



بررسی مزایا و معایب انرژی هسته‌ای

پوهنیار زمان محمدی^۱، نجیب الله نجیبی^۲

^۱دپارتمنت فزیک هسته‌ای و اتمی، پوهنځی فزیک، پوهنتون کابل، کابل، افغانستان

^۲لیسانس ریاضی، پوهنځی ریاضیات، پوهنتون کابل، کابل، افغانستان

ایمیل: zamanmohammadi1397@gmail.com

چکیده

انرژی هسته‌ای یکی از منابع نوین و قدرتمند انرژی است که توانایی تأمین برق به‌طور مداوم و پایدار را دارد. این نوع انرژی از پروسه‌های انشقاق هسته‌ای و همجوشی هسته‌ای در ریاکتورهای هسته‌ای به‌دست می‌آید. در این مقاله مروری-مقایسوی به بررسی مزایا و معایب انرژی هسته‌ای پرداخته شده است و راهکارهایی برای بهبود بهره‌برداری و مقابله با چالش‌های استفاده از این تکنالوژی مورد بررسی قرار گرفت که می‌توان از راهکارها و روش‌هایی؛ مانند تقویت ایمنی، مدیریت زباله‌های هسته‌ای، تنوع منابع انرژی، ارتقاء شفافیت و آگاهی‌دهی برای مقابله با چالش‌های استفاده از انرژی هسته‌ای و غیره نام برد. نتایج نشان داد که مزایای فراوانی از جمله تولید انرژی بالا از مقادیر اندک سوخت، عدم تولید گازهای گلخانه‌ای، پایداری و قابلیت تأمین انرژی مداوم و کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی برخوردار است. با این حال، این نوع انرژی معایبی نیز دارد که مهم‌ترین آن‌ها شامل خطرات ایمنی، پسماندهای مواد رادیواکتیف، هزینه‌های بالا و نگرانی‌های امنیتی است.

واژه‌های کلیدی: انرژی هسته‌ای؛ انشقاق؛ ایمنی؛ پسماندها؛ ریاکتورها؛ هم‌جوشی

Examining the Advantages and Disadvantages of Nuclear Energy

Zaman Mohammadi¹, Najibullah Najibi²

¹Department of Nuclear and Atomic Physics, Faculty of Physics, Kabul University,
Kabul, Afghanistan

²Bachelor's Degree in Mathematics, Faculty of Mathematics, Kabul University, Kabul,
Af

Email: zamanmohammadi1397@gmail.com

Abstract

Nuclear energy is one of the modern and powerful sources of energy, capable of providing continuous and stable electricity supply. This type of energy is produced through nuclear fission and fusion processes in nuclear reactors. This review-comparative study examines the advantages and disadvantages of nuclear energy and explores strategies to improve its utilization and address the challenges associated with this technology. Such strategies include enhancing safety measures, managing nuclear waste, diversifying energy sources, increasing transparency, and raising public awareness to mitigate the challenges of nuclear energy use. The results indicate numerous benefits, including high energy output from small amounts of fuel, zero greenhouse gas emissions, sustainability, continuous energy supply, and reduced dependence on fossil fuels. However, nuclear energy also presents several drawbacks, the most significant of which are safety risks, radioactive waste, high costs, and security concerns.

Keywords: Fission; Fusion; Nuclear Energy; Reactors; Safety; Waste

ارجاع: محمدی، ز و نجیبی، ن. (۱۴۰۴). بررسی مزایا و معایب انرژی هسته‌ای. مجله علمی- تحقیقی علوم طبیعی

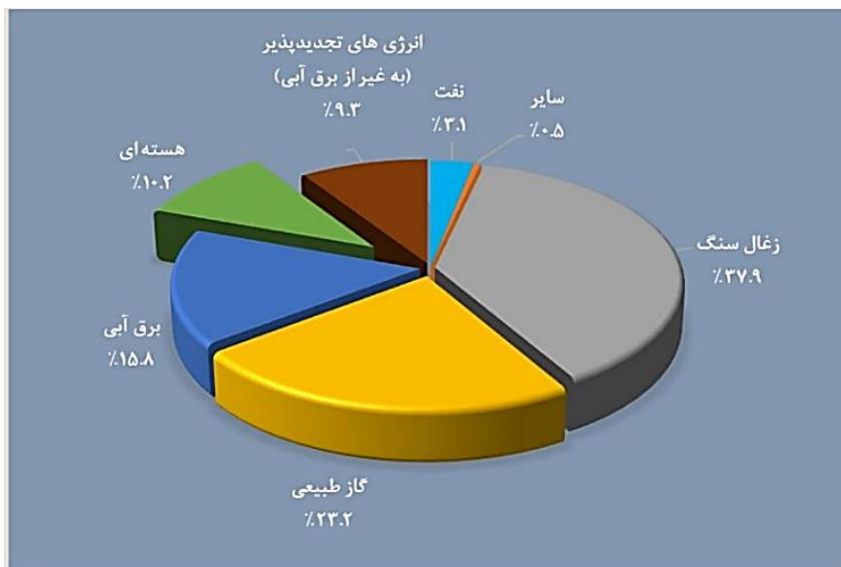
پوهنتون کابل، ۸(۲)، ۱۲۱-۱۴۰. <https://doi.org/10.62810/jns.v8i2.394>

مقدمه

انرژی هسته‌ای یکی از منابع انرژی پایدار است که به‌ویژه در سال‌های اخیر به عنوان جایگزینی برای منابع سوخت فسیلی مطرح شده است. امروزه جهان با بحران‌های محیط‌زیستی از قبیل تغییرات اقلیمی، آلودگی‌های هوا و کاهش منابع سوخت‌های فسیلی روبرو است. بنابراین، تلاش‌ها برای استفاده از منابع انرژی پاک و پایدار در دستور کار قرار گرفته است. انرژی هسته‌ای به دلیل تولید مقادیر بالای انرژی از مقدار کمی سوخت و عدم تولید آلاینده‌های زیست‌محیطی؛ مانند کاربن دای‌اکساید، به یکی از گزینه‌های جذاب برای بسیاری از کشورها تبدیل شده است (Hossain, 2022).

با آغاز انقلاب صنعتی در جهان و رشد صنایع، نیاز به انرژی روزبه‌روز افزایش یافت، به‌نحوی که هم اکنون هر کشوری که بتواند انرژی را با کمترین هزینه تولید کند، در عرصه جهانی قدرت‌مند خواهد بود. به همین دلیل مقرون به صرفه بودن روش‌های تولید انرژی یکی از پارامترهای مهم کشورهای صاحب صنایع است (زبردست و همکاران، ۱۳۹۶). از جانب دیگر سطح زندگی بشر همواره با کاربرد انرژی برای انجام کار ارتباط کامل داشته است. این استفاده از انرژی با اولین کاربرد چرخ شروع و با کارهای بزرگ مصریان قدیم، وسایل تولید قدرت نیوکامن و وات ادامه یافته و به فنون پیشرفته و سطح زندگی بشر معاصر رسیده است. جنگ‌های بزرگ تاریخ مثال‌های از انرژی مصرف شده به مقادیر زیاد را نشان می‌دهد. از نظر تاریخی، به استثنای چند صدسال اخیر، چوب منبع تولید انرژی بشر را تشکیل داده است. در حقیقت امروزه در بسیاری از نقاط جهان هنوز چوب یکی از منابع اصلی تولید انرژی است (آرتور و همکاران، ۱۳۶۴). کشف تیل و فرآورده‌های آن مقرون به صرفه بودن (ارزشمند از نگاه اقتصادی) تولید انرژی را نسبت به سوخت‌های دیگر نظیر ذغال سنگ و چوب افزایش داد، ولی کشف اتفاقی انشقاق هسته‌ای و آزاد شدن مقدار زیادی انرژی از چندگرم ماده، ایده استفاده از این انرژی بسیار عظیم را به جای تیل و فرآورده‌های آن و ذغال سنگ در ذهن دانشمندان هسته‌ای انداخت. کنترل و مهار این انرژی بسیار عظیم نوید گسترش صنایع را می‌داد (زبردست و همکاران، ۱۳۹۶). در حال حاضر منابع انرژی که عملاً قابل استفاده اند، عبارت‌اند از سوخت‌های فسیلی، آب جاری، باد، جذر و مد اقیانوس‌ها، انرژی خورشیدی، انرژی حرارتی زمین، هسته‌های قابل شکست و هسته‌های همجوشی‌پذیر (عملی بودن آن مورد سؤال است). می‌دانیم زمانی فرا خواهد رسید که تمام سوخت‌های فسیلی تمام شود و از طرف دیگر سهم باد، اقیانوس، جذرومد، انرژی حرارتی زمین، انرژی خورشیدی و آب جاری بسیار محدود می‌باشد. بنابراین، در این حالت نیازمند انرژی هسته‌ای می‌باشیم (آرتور و همکاران، ۱۳۶۴). امروزه انرژی هسته‌ای نقش کلیدی در تولید برق جهانی ایفا می‌کند. اکنون ۱۰.۲٪

از برق جهان در ریاکتورهای هسته‌یی تولید می‌شود و این فیصدی در حال افزایش می‌باشد (Balat, 2017).



شکل ۱: سهم منابع مختلف انرژی در تولید برق در سال ۲۰۱۸ در کل جهان (آرتور و همکاران، ۱۳۹۶)

با این حال، تکنالوژی هسته‌یی به‌ویژه از دیدگاه امنیتی و زیست‌محیطی دارای چالش‌هایی است که باید به دقت مورد بررسی قرار گیرد. حادثه‌هایی؛ مانند فاجعه چرنوبیل و فوکوشیما نشان داده‌اند که مشکلات ایمنی و مدیریت پسماندهای مواد رادیواکتیف می‌تواند خطرات زیادی به همراه داشته باشد. بنابراین، استفاده از انرژی هسته‌یی همواره با پیچیدگی‌های خاص خود همراه است با توجه به اهمیت دستیابی به منابع انرژی پاک و پایدار، ضروری است که مزایا و معایب انرژی هسته‌یی به صورت علمی و منظم بررسی شود تا بتوان در باره‌ی جایگاه آن در آینده‌ی تأمین انرژی تصمیم آگاهانه‌تری گرفت (زبردست و همکاران، ۱۳۹۶).

بررسی مزایا و معایب انرژی هسته‌یی از اهمیت زیادی برخوردار است؛ زیرا انرژی هسته‌یی یکی از منابع عمده و بحث‌برانگیز تأمین انرژی در جهان امروزی به شمار می‌رود. با توجه به افزایش تفاضا برای انرژی پاک، آگاهی از مزایای آن؛ مانند تولید برق بدون آلاینده‌ی کاربنی و هم‌چنین شناخت معایب مانند خطرات ایمنی، هزینه‌های بالا و مدیریت زباله‌های مواد رادیواکتیف، برای تصمیم‌گیری آگاهانه در سطح علمی، اقتصادی و سیاسی ضروری است. این موضوع می‌تواند به درک بهتر راهکارهای پایدار و مسئولانه برای تأمین انرژی آینده کمک کند.

هدف این مقاله بررسی مزایا و معایب انرژی هسته‌یی است و در نهایت راهکارهایی برای مقابله با چالش‌های پیش‌رو ارائه خواهد شد؛ و در این مقاله کوشش می‌شود به سوالات ذیل پاسخ داده شوند.

۱. انرژی هسته‌یی چگونه تولید می‌شوند؟

۲. مزایای انرژی هسته‌یی چیست؟

۳. معایب انرژی هسته‌یی چیست؟

۴. چه راهکارها و روش‌هایی برای مقابله با چالش‌های استفاده از انرژی هسته‌یی وجود دارند؟

در مورد مزایا و معایب انرژی هسته‌یی تحقیقات متعددی توسط افراد و دانشمندان صورت گرفته است. به طور مثال؛ راسیل حسین در کالج حکومتی کوتیشا، بنگله‌دیش در مقاله‌یی تحت عنوان مرور مختصر بر انرژی هسته‌یی که در سال 2022 به نشر رسیده است، مزایای انرژی هسته‌یی را انرژی کم‌هزینه، تولید انرژی از سوخت کم و هم‌چنان معایب انرژی هسته‌یی را هزینه‌های بالای تأسیسات، حادثات هسته‌یی و محدود بودن سوخت هسته‌یی دانسته‌اند (Hossain, 2022). هلن در کتاب خطر نبرد هسته‌یی نوین در باره معایب انرژی هسته‌یی صحبت کرده و بیان می‌دارد که اگر از سلاح‌های هسته‌یی استفاده شود در مدت چند ساعت کره زمین نابود می‌گردد (هلن، 1388). مزدک زبردست و علی‌رضا گوشه در کتاب فیزیک ریاکتورهای هسته‌یی 1 از ایمنی و خطرات بالقوه‌ی انرژی هسته‌یی صحبت کرده است و هم‌چنان از حادثات ناکازاکی، هیروشیما، چرنوبیل، تری‌مایل آیلند و غیره یادآوری کرده است که در حادثات متذکره میلیون‌ها انسان از بین رفته‌اند (زبردست و همکاران، 1396). توچایکول و همکاران شان در مقاله تحت عنوان تکنالوژی تصفیه زباله‌های هسته‌یی؛ زباله‌ها ویا پسمانده‌های مواد رادیواکتیف را مورد بررسی قرار داده است و بیان می‌دارند که پسمانده‌های رادیواکتیف بزرگ‌ترین نگرانی آینده بشر می‌باشد؛ زیرا هم برای نوع بشر و هم برای محیط اطراف ما خطرناک است. پسمانده‌های رادیواکتیف می‌توانند باعث مرگ شود و آلودگی رادیواکتیف به آب‌های زیرزمینی، اقیانوس‌ها و غیره ممکن است به‌طور غیرمستقیم بر زنجیره غذایی تأثیر بگذارد (Tochaikul et al, 2022). هم‌چنان دی‌آوریا و همکاران شان در مقاله تحت عنوان چالش تکنالوژی برای نسل امروز در باره هزینه بالای تأسیسات هسته‌یی صحبت کرده و بیان می‌دارند که برای ساخت ریاکتورهای هسته‌یی حدود 2 تا 4 میلیارد دالر پول نیاز بوده و برای نگهداری تأسیسات هسته‌یی حدود 9 میلیارد دالر پول نیاز می‌باشد (D'Auria et al, 2019).

با وجود مطالعات متعددی که در زمینه مزایا و معایب انرژی هسته‌یی صورت گرفته است، هنوز در بسیاری از موارد خلاهای تحقیقاتی قابل توجهی وجود دارد. به طور خاص، بیشتر تحقیقات یا بر جنبه‌های حرفه‌یی و اقتصادی این منبع انرژی تمرکز دارند یا صرفاً به مسائل زیست‌محیطی و ایمنی پرداخته‌اند، در حالی که بررسی جامع و مقایسه‌یی میان مزایا و معایب آن از دیدگاه‌های مختلف (اقتصادی، زیست‌محیطی، اجتماعی و سیاسی) کمتر مورد توجه قرار گرفته است. همچنین، تحقیقات محدود و پراکنده‌یی در باره نگرش عمومی مردم و تصمیم‌گیرندگان نسبت به انرژی هسته‌یی وجود دارد که نیازمند بررسی‌های عمیق‌تر و دقیق‌تر است. در این مقاله کوشش صورت گرفته است که همه جوانب مزایا و معایب انرژی هسته‌یی مورد بررسی قرار گرفته است و هم‌چنان راهکارها و روش‌هایی برای مقابله با چالش‌های استفاده از انرژی هسته‌یی بیان شده است.

مبانی نظری و تعریف مفاهیم

انرژی هسته‌یی

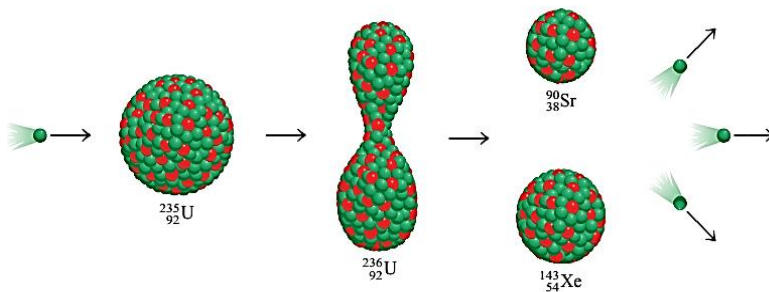
انرژی هسته‌یی یکی از انواع انرژی داخلی ماده است که در هسته اتم‌ها ذخیره شده است. این انرژی از طریق دوپروژه اصلی به دست می‌آیند: انشقاق هسته‌یی که در آن هسته اتم‌های سنگین؛ مانند $^{239}_{94}\text{Pu}$ و $^{235}_{92}\text{U}$ به دو یا چند هسته کوچک‌تر می‌شوند و هم‌جوشی هسته‌یی که در آن دو هسته سبک‌تر؛ مانند ایزوتوپ‌های هایدوجن با هم ترکیب می‌شوند و یک هسته سنگین‌تر را تشکیل می‌دهند. در هر دو حالت، مقدار زیادی انرژی به شکل حرارت آزاد می‌شود (آرتور و همکاران، 1364). در ریاکتورهای هسته‌یی از انشقاق هسته‌یی برای گرم کردن آب و تولید بخار استفاده می‌شود؛ این بخار سپس توربین‌ها را به حرکت درآورده و برق تولید می‌کند (کرین، 1390).

روش‌های تولید انرژی هسته‌یی

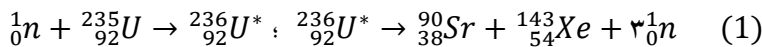
معمولاً به دو روش می‌توانیم انرژی هسته‌یی را تولید نماییم که عبارت از انشقاق هسته‌یی و هم‌جوشی هسته‌یی. در این مقاله هر کدام از روش‌های تولید انرژی هسته‌یی را به شکل مختصر به معرفی می‌گیریم.

انشقاق هسته‌یی. انشقاق هسته‌یی هنگامی صورت می‌گیرد که یک هسته که قابلیت شکسته شدن را داشته باشد و نیوترون را جذب نماید. جذب نیوترون سبب برهم خوردن تعادل قوه‌های داخلی بین نیوترون‌ها و پروتون‌ها در هسته می‌شود. هسته‌ی سنگین به دو هسته سبک‌تر تقسیم می‌شود و به‌طور

متوسط دو یا سه نیوترون نیز پخش می‌گردد. کتله مجموعی محصولات حاصل از انشقاق از مجموعه کتله‌های هسته اولیه و نیوترون کم می‌باشد (یرهوف، ۱۳۹۴). این تفاوت کتله به شکل انرژی ظاهر می‌شود که مقدار آن از فورمول انشتین $E = mc^2$ به دست می‌آید. اگر یکی از نیوترون‌های پخش شده توسط هسته‌ی انشقاق‌پذیر دیگری جذب شود، انشقاق ثانویه مشابه به انشقاق اول صورت می‌گیرد. یک نیوترون دیگر ممکن است انشقاق سومی را ایجاد کند همین قسم الی آخر. هنگامی که یک تعامل خود را نگهدارد، به طوری که هر انشقاق یک انشقاق دیگر ایجاد کند، این پدیده تعامل زنجیری نامیده می‌شود. وسیله‌ی که در آن این تعامل آغاز می‌شود، ادامه می‌یابد و کنترل می‌گردد، به نام ریاکتور هسته‌یی نامیده می‌شود (آرتور و همکاران، ۱۳۶۴).



شکل ۲: انشقاق هسته‌یی (Chang, 2008)



هنگامی که یورانیم ${}_{92}^{235}\text{U}$ نیوترون را می‌بلعد (جذب می‌کند)، و حالت مرکب ${}_{92}^{236}\text{U}^*$ را 0645sx می‌سازد. انرژی برانگیختگی عبارت است از:

$$E_{ex} = [m({}_{92}^{236}\text{U}^*) - m({}_{92}^{235}\text{U})]c^2 \quad (2)$$

انرژی حالت هیجانی را می‌توان مستقیماً از انرژی‌های کتله ${}_{92}^{235}\text{U}$ و n به دست آورد. با فرض این که انرژی حرکتی نیوترون آن قدر کوچک باشد که قابل صرف نظر باشد، در این صورت خواهیم داشت که:

$$\begin{aligned} m({}_{92}^{236}\text{U}^*) &= m({}_{92}^{235}\text{U}) + m_n \\ &= (235.043924u + 1.008665u) = 236.052589u \\ E_{ex} &= (236.052589u - 236.45563u)931.502 \text{ MeV/u} = 6.5 \text{ MeV} \end{aligned}$$

بنابراین، انرژی مورد نیاز برای برانگیختن ${}_{92}^{236}\text{U}$ به حالت انشقاق‌پذیر (انرژی فعال‌سازی) از مقدار انرژی که با علاوه کردن یک نیوترون به ${}_{92}^{235}\text{U}$ به دست آوردیم، کمتر است. این بدان معنی است که

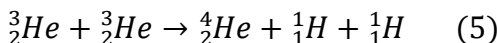
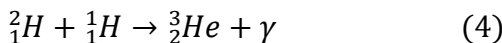
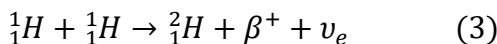
$^{235}_{92}U$ می‌تواند با استفاده از نیوترون‌های با انرژی صفر انشقاق نماید و این امر با سطح مقطع بزرگ انشقاق که در ناحیه حرارتی مشاهده می‌شود، سازگاری دارد (کرین، ۱۳۹۰).

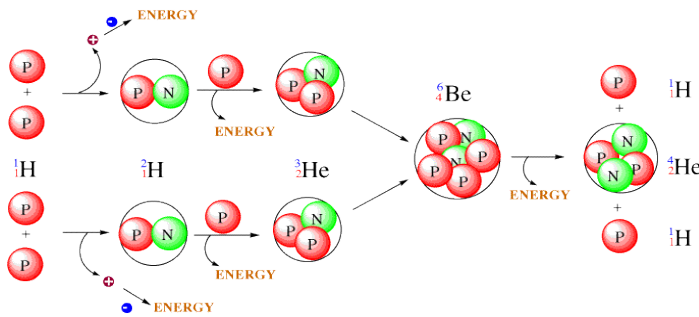
استفاده از انرژی، انشقاق هسته‌یی به دو دلیل اهمیت دارد:

۱. انشقاق هسته‌های سنگین با آزاد شدن مقدار زیاد انرژی (حدود $200MeV$) همراه است.
۲. در انشقاق هسته‌یی چندین نیوترون دیگر آزاد می‌شود. در نتیجه در شرایط مناسب می‌توان از این نیوترون‌ها برای انشقاق‌های مجدد استفاده کرد و یک تعامل زنجیره‌یی حاصل می‌شود (زبردست، ۱۳۹۶).

هم‌جوشی هسته‌یی. پروسه هم‌جوشی هسته‌یی را می‌توان پروسه معکوس انشقاق هسته‌یی نامید (قریشی و همکاران، ۱۳۹۳). یعنی اگر دو هسته‌ی سبک را ترکیب کنیم و هسته‌ی با کتله کم‌تر از $A = 56$ تشکیل دهیم، در این عمل انرژی آزاد می‌شود. این پروسه، هم‌جوشی هسته‌یی نام دارد؛ زیرا از ترکیب دو هسته‌ی سبک یک هسته‌ی سنگین ایجاد می‌شود. پروسه هم‌جوشی از نقطه نظر تولید انرژی دارای چند مزیت واضح نسبت به انشقاق است: هسته‌های سبک فراوان و به آسانی قابل حصول اند و محصولات نهایی هم‌جوشی معمولاً هسته‌های سبک پایدارند و نه هسته‌های سنگین رادیواکتیف. با این وجود یک مشکل قابل توجه آن است که هسته‌های سبک قبل از این که بتوانند ترکیب شوند باید بر دافعه کولمبی غلبه کنند. انشقاق که در اثر جذب نیوترون‌ها حاصل می‌شود، سد کولمبی ندارد و لذا از ذرات تشعشعی با انرژی خیلی کم می‌توان استفاده کرد. در حقیقت سطح مقطع $^{235}_{92}U$ با کاهش انرژی نیوترون افزایش می‌یابد. از طرف دیگر، با کاهش انرژی سطح مقطع عمل‌های متقابل ناشی از ذرات چارج‌دار تمایل به کاهش دارد (کرین، ۱۳۹۰).

تعامل هم‌جوشی در آفتاب یک پروسه‌ی چندمرحله‌یی است که در آن هایدروجن برای تشکیل هلیوم می‌سوزد. هایدروجن «سوخت» و هلیوم «خاکستر» است (هالیدی و همکاران، ۲۰۱۴). در ذیل فورمول آزاد شدن انرژی در اثر تعامل هم‌جوشی (برحسب اتم خنثی) نوشته شده است.





شکل ۳: زنجیره‌ی تعاملات هم‌جوشی هسته‌یی (krane, 2020)

در تعامل اول هم‌جوشی، دو پروتون با هم ترکیب شده، یک دوتریون (هایدروجن سنگین) یا (2_1H) و نیز یک پوزیترون β^+ و یک نیوترینوی الکترون ایجاد می‌شود. در تعامل دوم یک پروتون و یک دوتریون ترکیب شده و یک ایزوتوپ هلیوم (3_2He) تولید می‌شود. با هم‌جوشی این دو (3_2He) تعامل سوم صورت می‌گیرد که در آن یک ذره الفا (4_2He) و دو پروتون تولید می‌شود. مجموعه‌یی این سه تعامل را زنجیره‌ی پروتون-پروتون می‌نامند (یانگ و همکاران، ۱۳۸۳).

مجموعه‌ی سه تعامل بالا در حکم تبدیل چهار پروتون به یک ذره‌ی الفا، دو پوزیترون و دو فوتون گاما است (هالیدی و همکاران، ۲۰۱۴). می‌توان انرژی آزاد شده در این مجموعه پروسه‌ها را دریافت کرد: کتله‌ی یک ذره الفا به علاوه کتله دو پوزیترون، مساوی به کتله یک اتم خنثی 4_2He است. کتله نیوترینو صفر (یا قابل صرف نظر) و کتله فوتون گاما نیز صفر است. در این صورت داریم که:

$$\text{کتله پروتون } 4.029106u$$

$$\text{کتله اتم خنثی هلیوم } 4.002603u$$

$$\text{تفاوت کتله و انرژی آزاد شده } 24.68MeV, 0.026503u$$

دو پوزیترون تولید شده در مرحله زنجیره‌ی پروتون-پروتون با دو الکترون برخورد کرده و نابود می‌شوند. به سبب نابودی آن‌ها $2.044MeV = 4(0.511MeV)$ انرژی تولید می‌شود. به این ترتیب انرژی حاصل از مجموعه‌ی تمام تعاملات مساوی است به $24.69MeV + 2.044MeV = 26.73MeV$ (یانگ و همکاران، ۱۳۸۳):

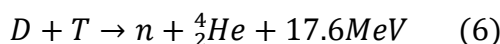
روش‌های هم‌جوشی هسته‌یی. تا کنون دو روش شناخته شده به‌منظور ایجاد پروسه هم‌جوشی هسته‌یی ارائه شده است.

در روش اول که تحت عنوان محصورسازی مقناطیسی^۱ شناخته می‌شود. اتوم‌های دوتریم و تریتم به اندازه درجه حرارت هسته خورشید یعنی حدود ۱۰۰ میلیون درجه سانتی‌گراد داغ می‌شوند. سپس آن‌ها را با استفاده از ساحه مقناطیسی بسیار قوی در مسیر حلقوی تحت عنوان چنبره (حلقه) گیر می‌اندازند. به دستگاهی که این کار را انجام توکامک گفته می‌شود (krane, 2020). در حال حاضر بزرگ‌ترین توکامک در آزمایشگاه *JET*^۲ یا در جنوب آکسفورد در انگلستان قرار دارد (هزاوه حصار مسکن و همکاران، ۱۳۹۲).



شکل ۴: ریاکتور توکامک (krane, 2020)

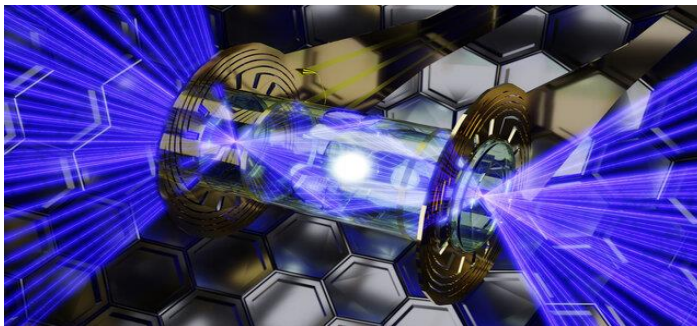
روش دوم تحت عنوان محصورسازی عطالتی^۳ شناخته می‌شود. در این روش اتوم‌ها داخل لایه‌هایی به شکل کپسول قرار می‌گیرند. در ابتدا با استفاده از لیزر به لایه بیرونی حرارت منتقل می‌شود. لایه حرارت داده شده به سمت بیرون پرتاب شده و منفجر می‌شود. اتوم‌های داخل آن فشرده شده و پروسه‌ی هم‌جوشی رخ می‌دهد. در حقیقت موج ضربه‌یی ایجاد شده و در داخل کپسول منفجر به فشرده شدن اتوم‌ها به یک‌دیگر و رخ دادن هم‌جوشی می‌شود. نمونه‌یی از محصورسازی عطالتی در آزمایشگاه ملی بروکلی در کالیفرنیا انجام شد (پروازیان و همکاران، ۱۳۸۹).



^۱ (Magnetic Confinement)

^۲ Joint European Torus

^۳ (Inertial Confinement)



شکل ۵: محصورسازی عطالتی (Batani, 2023)

روش تحقیق

این تحقیق از نوع مروری-مقایسه‌ای است. به منظور انجام آن، ابتدا با استفاده از کلیدواژهایی؛ مانند انرژی هسته‌ای، انشقاق، ایمنی، پسماندهای هسته‌ای، ریاکتورهای هسته‌ای، هم‌جوشی هسته‌ای و غیره، جستجوهای در سایت‌های معتبر اینترنتی صورت گرفت. در نتیجه، مقالات و کتاب‌هایی که بیشترین ارتباط با موضوع تحقیق را داشتند، انتخاب شده و به شکل دقیق مورد مطالعه و بررسی قرار گرفتند و از آن‌ها یادداشت‌برداری شد. این منابع به عنوان مبنای تحلیل در تدوین تحقیق حاضر به کار گرفته شدند.

معیارهای مشمول منابع مورد استفاده در این تحقیق عبارت‌اند از: تمرکز بر موضوع انرژی هسته‌ای، بررسی مزایا و معایب آن، پرداختن به پروسه‌های انشقاق و هم‌جوشی هسته‌ای و برخورداری از اعتبار علمی، اطلاعات مورد نیاز از این منابع به دو طریقه کمی و کیفی استخراج و تحلیل شده‌اند.

یافته‌ها

مزایای انرژی هسته‌ای

بسیاری از کارشناسان معتقدند که انرژی هسته‌ای یکی از مفیدترین و پاک‌ترین منابع انرژی است. دانستن مزایای انرژی هسته‌ای به ما کمک می‌کند که چگونه از این انرژی بهرمند شویم و آیا برای سیاره ما مفید است یا مضر (Hossain, 2022). اگرچه انرژی هسته‌ای مزایای زیادی دارند؛ ولی در این مقاله تعدادی از این مزایا که از اهمیت زیادی برخوردارند، بررسی می‌شوند.

تولید انرژی زیاد از کم‌ترین مقدار سوخت. یکی از بزرگ‌ترین مزایای انرژی هسته‌ای این است که برای تولید مقادیر عظیم انرژی، به مقدار کمی سوخت نیاز دارد. تخمین زده می‌شود که مقدار انرژی آزاد شده در یک تعامل انشقاق هسته‌ای ده میلیون برابر بیشتر از مقدار انرژی آزاد شده هنگام سوزاندن

سوخت‌های فسیلی است (Hossain, 2022). طور مثال، یک کیلوگرم یورانیوم می‌تواند انرژی معادل چند میلیون کیلوگرم زغال‌سنگ تولید کند. این ویژگی به‌ویژه در مناطقی که به منابع سوختی محدود دسترسی دارند، اهمیت زیادی دارد. از این سبب، انرژی هسته‌ای می‌تواند به عنوان یک منبع با ثمره‌ی بالا و پایدار شناخته شود (zniak et al, 2021). یک ریاکتور هسته‌ای می‌تواند هزاران میگاووات برق را با استفاده از انرژی هسته‌ای تولید کند (Hossain, 2022).

کاهش آلودگی‌های محیط زیستی. بر خلاف تصور عموم مردم ریاکتورهای هسته‌ای هیچ‌گونه گاز گلخانه‌ای نظیر کاربن دای اکساید تولید نمی‌کنند و هیچ‌گونه آلاینده یا مواد رادیواکتیف در اتموسفر منتشر نمی‌کنند و ریاکتورهای هسته‌ای تنها بخار آب از خود پخش می‌کنند (Graves et al, 2011). بنابراین، استفاده از انرژی هسته‌ای به کاهش اثرات منفی تغییرات اقلیمی کمک می‌کند. این امر به‌ویژه در مقابله با آلودگی‌هایی ناشی از سوخت‌های فسیلی و حفظ سلامت محیط زیست اهمیت دارد (Hossain, 2022).



شکل ۶: مصئون بودن محیط زیست در استفاده از انرژی هسته‌ای (Hossain, 2022)

پایداری و قابلیت تأمین انرژی مداوم. یکی دیگر از مزایای انرژی هسته‌ای، توانایی تأمین انرژی به‌صورت مداوم و بدون وقفه است. یعنی این انرژی معمولاً از ثبات و ایمنی بالاتری برخوردار است (Zhang, 2022) و برخلاف انرژی‌های تجدیدپذیر نظیر انرژی خورشیدی و بادی که وابسته به شرایط جوی هستند، انرژی هسته‌ای می‌تواند به‌طور ثابت برق تولید کند. این ویژگی باعث می‌شود تا انرژی هسته‌ای به عنوان یک منبع اصلی در تأمین انرژی برق در برخی از کشورهای جهان مورد استفاده قرار گیرد (Kessides, 2009).

کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی. استفاده از انرژی هسته‌یی می‌تواند به کاهش وابستگی به منابع سوخت فسیلی که در بسیاری از کشورها به واردات نیاز دارند، کمک کند. این امر باعث تقویت امنیت انرژی و کاهش اثرات منفی وابستگی به سوخت‌های فسیلی می‌شود (Jimenez et al, 2014).

انرژی هسته‌یی انرژی کم‌هزینه. اگرچه هزینه ساختن ریاکتورهای هسته‌یی بالا است؛ اما تولید انرژی توسط آن و هزینه‌های عملیاتی آن‌ها پایین است. انرژی هسته‌یی این مزیت را دارد که از باصرفه‌ترین راه حل‌های انرژی‌های موجود است. هزینه تولید برق از این انرژی بسیار کم‌تر از هزینه تولید برق از گاز، زغال‌سنگ و یا تیل است. همچنین، انرژی هسته‌یی نوسانات قیمتی مشابه منابع انرژی سوخت فسیلی سنتی؛ مانند زغال سنگ و گاز طبیعی را تجربه نمی‌کند. به همین دلیل می‌توان قیمت انرژی هسته‌یی را در آینده به خوبی پیش‌بینی کرد. ممکن است با پیشرفت تکنالوژی، این قیمت پایین یا حتی پایین‌تر بماند (Hossain, 2022).

معایب انرژی هسته‌یی

اگرچه انرژی هسته‌یی یک منبع انرژی پاک، کم‌هزینه و قابل اعتماد برای نیازهای برق آینده است. با این وجود، اثرات منفی انرژی هسته‌یی نیز بسیار زیاد می‌باشد. به خصوص تأثیرات منفی انرژی هسته‌یی بالای محیط زیست، پسماندهای مواد رادیواکتیف، هزینه‌های بالای تأسیسات و غیره که در این جا بعضی از معایب انرژی هسته‌یی را به معرفی می‌گیریم.

ایمنی و خطرات بالقوه. با وجود این‌که ریاکتورهای هسته‌یی تحت نظارت دقیق قرار دارند، وقوع حوادث هسته‌یی می‌تواند خسارات جبران‌ناپذیری به دنبال داشته باشد (John, 2020). پس از جنگ جهانی دوم و فاجعه ناکازاکی و هیروشیما، حوادث بسیاری در زمینه انتشار مواد رادیواکتیف در جهان رخ داد و در پی آن بسیاری از کارکنان ریاکتورها و مردم عادی جان باختند. بعضی از این حوادث از نظر میزان آلودگی؛ مانند حادثه هانفورد آمریکا یا تامسک روسیه در رتبه پایینی قرار دارند؛ اما بعد از جنگ جهانی دوم و بمباران شهرهای هیروشیما و ناکازاکی جاپان حادثی؛ مانند حادثه آتش‌سوزی ریاکتور واین‌داسکیل انگلستان (۱۹۷۵)، حادثه تری‌مایل آیلند آمریکا (۱۹۷۹)، حادثه چرنوبیل اوکراین (۱۹۸۶) و فوکوشیما (۲۰۱۱) نشان دادند که خطرات ناشی از نشت مواد رادیواکتیف و از دست رفتن کنترل بر پروسه هسته‌یی می‌تواند تهدیدات بزرگی برای محیط زیست و سلامت انسان‌ها به همراه داشته باشد (زبردست و همکاران، ۱۳۹۶).

پسماندهای مواد رادیواکتیف. زباله‌ها یا پسماندهای مواد رادیواکتیف بزرگ‌ترین نگرانی را ایجاد می‌کنند؛ زیرا هم برای نوع بشر و هم برای محیط‌های اطراف ما خطرناک هستند. سطوح بالای تشعشع

مواد رادیواکتیف وقتی بالای موجود زنده می‌تابد، می‌توانند باعث مرگ شود و آلودگی رادیواکتیف به آب‌های زیرزمینی، اقیانوس‌ها و غیره ممکن است به‌طور غیر مستقیم بر زنجیره‌های غذایی تأثیر بگذارد. پسماندها باید قبل از دفع، طبقه‌بندی شده و با روش‌های فیزیکی، کیمیایی یا بیولوژیکی مورد بازیابی قرار گیرند تا در راستای رعایت مقررات ایمنی انسان و محیط زیست باشند. متأسفانه، هیچ روش جهانی کاملی وجود ندارد که عملکرد کافی برای تصفیه انواع زباله‌های رادیواکتیف داشته باشد. همه روش‌های تصفیه هنوز محدودیت‌های خود را دارند که باید برای بهبود توانایی آن‌ها در مهار زباله‌های هسته‌یی غلبه کرد (Tochaikul et al, 2022).



شکل ۷: پسماندهای مواد رادیواکتیف (Hossain, 2022)

هزینه‌های بالای تأسیسات. ساخت، راه‌اندازی و نگهداری ریاکتورهای هسته‌یی هزینه‌های بالایی دارند و هزینه‌ها مداوم در حال افزایش است. هزینه‌های نظارت بر ایمنی و مدیریت پسماندهای رادیواکتیف نیز به این هزینه‌ها افزوده می‌شود. این امر باعث می‌شود تا بسیاری از کشورها برای سرمایه‌گذاری در این حوزه با مشکلات مالی مواجه شوند (D'Auria et al, 2019). بین سال‌های 2002 و 2008، هزینه‌های مورد انتظار برای ساخت ریاکتورهای هسته‌یی از 2 تا 4 میلیارد دلار و حتی تا 9 میلیارد دلار متفاوت بود و اغلب از برآورد هزینه‌های آن در طول ساختن فراتر می‌رفت. یک تجربه مجازی اخیر در ایالات متحده آمریکا تخمین می‌زند که 3.5 تا 6 میلیارد دلار علاوه بر هزینه‌های اضافی برای نگهداری تأسیسات ریاکتورهای هسته‌یی نیاز است. هم‌چنان ریاکتورهای هسته‌یی باید بودجه برای حفاظت از زباله‌های هسته‌یی که تولید می‌کنند اختصاص دهند و آن‌ها را در ساختمان‌های سرد

با پوشش ایمنی ویژه نگهداری کنند. این امر می تواند تهدیدات امنیتی جدی برای امنیت جهانی ایجاد کند (Hossain, 2022).



شکل ۸: تأسیسات هسته‌ای با هزینه بسیار بالا (Hossain, 2022)

تهدیدات امنیتی و استفاده نظامی. یکی از نگرانی‌های بسیار بزرگ در خصوص انرژی هسته‌ای، احتمال استفاده از این فناوری برای تولید سلاح‌های هسته‌ای است. در حالی که بسیاری از کشورها به دنبال استفاده صلح‌آمیز از انرژی هسته‌ای هستند. این خطر وجود دارد که فناوری هسته‌ای به‌ویژه در کشورهای غیرمسئول به ساخت سلاح‌های هسته‌ای منجر شود. این امر می‌تواند تهدیدات امنیتی جدی برای امنیت جهانی ایجاد کند. به طور مثال اگر در یک شهری پرجمعیتی بمب اتم استفاده گردد 50% از ساکنان آن بلافاصله کشته شده 40% ساکنان شدیداً مجروح می‌گردند و 10% باقی‌مانده نیز با انواع و اقسام مریضی‌ها گرفتار می‌شوند (هلن، 1388).



شکل ۹: صحنه‌ای از یک نبرد هسته‌ای (آرتور و همکاران، ۱۳۶۴)

محدودیت منابع سوخت هسته‌ای. سوخت هسته‌ای یک منبع تجدیدپذیر نیست و مقدار یورانیوم موجود در زمین محدود است و در آینده ممکن است منابع سوخت هسته‌ای پایان یابد. هرچند که

بعضی کشورها به دنبال جستجوی منابع جدید و بهره‌برداری از تکنولوژی‌های نوین مانند توریم هستند؛ اما این مسأله همچنان یک نگرانی بلندمدت به حساب می‌آید (Peel, 2021). قبل از این که ذخایر توریم و یورانیوم تمام شوند، باید ریاکتورهای هم‌جوشی ساخته شوند، در این صورت تولید برق به شکل دائمی امکان‌پذیر نیست. انرژی هسته‌یی تنها یک گزینه انرژی گران‌قیمت برای مدت زمان کوتاه می‌باشد (Hossain, 2022).

چالش‌ها و مشکلات پیشرو

در حالی که انرژی هسته‌یی دارای مزایای زیادی است، چالش‌های متعددی نیز پیش‌روی توسعه آن وجود دارد. یکی از بزرگ‌ترین چالش‌ها، مربوط به ایمنی و خطرات ناشی از حوادث هسته‌یی است. به همین دلیل، نیاز به توسعه تکنولوژی‌های جدید برای افزایش ایمنی و کاهش خطرات ضروری به نظر می‌رسد. همچنین، مدیریت پسماندهای رادیواکتیف یکی از مشکلات بزرگ است که نیاز به راهکارهای مؤثر و پایدار دارد. علاوه بر این، نگرانی‌های امنیتی ناشی از تهدیدات نظامی و احتمال استفاده غیرمسئولانه از تکنولوژی هسته‌یی نیز از جمله مشکلاتی است که باید به آن‌ها توجه ویژه‌یی داشته باشیم (Kessides, 2009).

راهکارها و روش‌هایی برای مقابله با چالش‌های استفاده از انرژی هسته‌یی. مقابله با چالش‌های استفاده از انرژی هسته‌یی نیازمند رویکردهای چندگانه است. در ذیل چند راهکار و روش برای این منظور بررسی می‌کنیم.

تقویت ایمنی و امنیت. ۱. توسعه دادن و به‌کارگیری تکنولوژی‌های پیشرفته برای افزایش ایمنی تأسیسات هسته‌یی. ۲. برگزاری دوره‌های آموزشی منظم برای کارکنان و ایجاد پروتوکول‌های دقیق برای عکس‌العمل نشان دادن به حوادث هسته‌یی (Ramana, 2009).

مدیریت پسماندهای هسته‌یی. ۱. تحقیق و توسعه روش‌های مؤثر برای مدیریت و ذخیره‌سازی پسماندهای هسته‌یی، مانند دفن عمیق. ۲. استفاده از تکنولوژی‌های بازیافت سوخت هسته‌یی برای کاهش حجم زباله‌های هسته‌یی (Zhang, 2022).

ارتقاء شفافیت و اطلاع‌رسانی. ۱. برقراری ارتباط مؤثر با عموم و فراهم آوردن اطلاعات دقیق درباره مزایا و معایب انرژی هسته‌یی. ۲. مشارکت عمومی در تصمیم‌گیری‌ها و پروژه‌های هسته‌یی (هلن، ۱۳۸۸).

تنوع منابع انرژی. ۱. سرمایه‌گذاری در انرژی‌های تجدیدپذیر به عنوان مکمل انرژی هسته‌یی برای کاهش وابستگی به آن. ۲. توسعه شبکه‌های هوشمند برای استفاده اعظمی انرژی و مدیریت آن (جمع از نویسندگان، ۱۴۰۰).

تقویت همکاری‌های بین‌المللی. ۱. ایجاد توافقات بین‌المللی برای تبادل دانش و تکنالوژی ایمنی هسته‌یی. ۲. همکاری در زمینه نظارت و کنترل تسلیحات هسته‌یی و جلوگیری از گسترش آن (هلن، ۱۳۸۸).

تحقیق و توسعه. 1. حمایت از تحقیق و توسعه تکنالوژی‌های نوین؛ مانند ریاکتورهای نسل چهارم که ایمن‌تر و کارآمدتر هستند. 2. تشویق به نوآوری در زمینه‌های مرتبط با انرژی هسته‌یی و افزایش ثمره (Ramana, 2009).

با انجام راهکارهای ارائه شده فوق، می‌توان به بهبود وضعیت انرژی هسته‌یی و کاهش چالش‌های مرتبط با آن کمک کرد.

بحث و نتیجه‌گیری

یافته‌های این مقاله نشان می‌دهد که انرژی هسته‌یی به عنوان یکی از منابع مهم و استراتژیک تأمین انرژی، توانایی بالقوه در کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌یی و تولید برق پایدار دارد. این نتایج هم راستا با تحقیقات پیشین است که نقش انرژی هسته‌یی را در گذار به سمت انرژی‌های پاک برجسته کرده اند. طور مثال، جانسون (۲۰۱۹) نشان داد که توسعه ریاکتورهای هسته‌یی می‌تواند سهم قابل توجهی در کاهش انتشار کاربن داشته باشد، هرچند مشکلات مالی و اجتماعی مانع رشد سریع آن است. همچنین، اسمیت و همکاران (۲۰۲۰) تأکید کرده اند که بدون پیشرفت تکنالوژی مدیریت مواد پسمانده‌های رادیواکتیف و افزایش ایمنی، انرژی هسته‌یی نمی‌تواند به طور کامل به عنوان یک گزینه پایدار در نظر گرفته شود.

مطالعات دیگر مانند (OECD/NEA, 2020) نیز بر این نکته تأکید کرده اند که در ارزیابی انرژی هسته‌یی باید نگاه چندبعدی داشت و جنبه‌های اقتصادی، محیط‌زیستی و اجتماعی به طور هم‌زمان در نظر گرفته شوند. هم‌چنین در تحقیق زوانگ و همکاران (۲۰۲۲) در باره ریاکتورهای نسل جدید، گزارش شده است که تکنالوژی‌های نوین می‌توانند بخشی از مشکلات پسمانده‌های مواد رادیواکتیف و ایمنی را کاهش دهند؛ اما هنوز برای جایگزینی کامل سوخت‌های فسیلی نیاز به توسعه بیشتر دارند.

این مقاله علاوه بر تأیید یافته‌های پیشین، بر چند نکته کلیدی دیگر نیز تأکید دارد: نخست، هزینه‌های سنگین احداث و نگهداری ریاکتورهای هسته‌یی، مانعی جدی برای گسترش این منبع انرژی به شمار

می‌رود. دوم، مدیریت پسماندهای مواد رادیواکتیف نه تنها، از دیدگاه تخریکی، بلکه از منظر اجتماعی و محیط‌زیستی نیز چالش اساسی محسوب می‌شود. سوم، نگرانی‌های امنیتی ناشی از احتمال کاربرد نظامی تکنالوژی‌های هسته‌یی، بعد سیاسی و ژئوپولیتیکی به موضوع می‌بخشد که در بسیاری از تحقیقات کم‌تر به آن پرداخته شده است.

نتیجه‌گیری کلی مقاله حاضر این است که انرژی هسته‌یی یک گزینه جدی برای آینده انرژی جهان است؛ اما بهره‌برداری پایدار از آن مشروط به تحقق چندپیش شرط اساسی ذیل است:

۱. توسعه تکنالوژی‌های ایمن‌تر و کارآمدتر، هم‌چون ریاکتورهای مودولار کوچک و ریاکتورهای نسل چهارم.

۲. بهبود و استندردسازی روش‌های مدیریت و دفع پسماندهای مواد رادیواکتیف و به کارگیری سیکل‌های بسته سوخت.

۳. کاهش هزینه‌های مالی از طریق نوآوری تکنالوژی و سرمایه‌گذاری هدفمند.

۴. جلب اعتماد و مشارکت اجتماعی از طریق شفاف‌سازی اطلاعات و افزایش آگاهی عمومی. در نهایت، یافته‌های این مقاله نشان می‌دهد که انرژی هسته‌یی در صورتی می‌تواند پاسخگوی بحران انرژی و تغییرات اقلیمی باشد که توسعه تکنالوژی، سیاست‌گذاری دقیق و مدیریت اجتماعی هم‌زمان مورد توجه قرار گیرند. این نتیجه‌گیری با بسیاری از مطالعات بین‌المللی هم‌راستا بوده و تأکید می‌کند که آینده انرژی هسته‌یی نه در حذف آن، بلکه در بهبود ایمنی، کاهش هزینه‌ها و افزایش مسئولیت‌پذیری محیط‌زیستی و اجتماعی نهفته است.

سیاسگذاری

در این جا شایسته است مراتب سپاس و قدردانی خویش را از معاونت تحقیقات و نوآوری، آمریت مجله علمی-تحقیقی علوم طبیعی پوهنتون کابل، مرورگران مقاله و سایر افرادی که با ارائه پیشنهادها، راهنمایی‌ها و حمایت‌های علمی خود در ارتقای کیفیت این مقاله نقش مؤثری ایفا کرده‌اند، ابراز نمایم.

سهم نویسندگان در تحقیق (مقاله)

در این مقاله با عنوان «بررسی مزایا و معایب انرژی هسته‌یی»، بخش عمده‌یی از کار تحقیقی و نگارش علمی توسط نویسنده اول انجام شده است؛ در حالی که نویسنده دوم بیشتر در زمینه محاسبات ریاضی و تحلیل معادلات سهم داشته و در تکمیل جنبه‌های تخریکی تحقیق همکاری نموده است.

تضاد منافع

نویسندگان اول و دوم این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ گونه تضاد منافع مالی، شخصی یا حرفه‌یی مرتبط با موضوع وجود نداشته و همکاری آن‌ها بر اساس اصول اخلاقی و علمی به صورت شفاف و مستقل صورت گرفته است.

منابع

- آرتور، ر. ف. و رایت، ر. (۱۳۶۴). *مهندسی هسته ای پایه* (ترجمه ی. بکشلو و رهبر) تهران، ایران: مرکز نشر پوهنتونی.
- پروازیان، ا. و جاوانی، ا. (۱۳۸۹). محاسبه بهره هم جوشی اشتغال سریع با حضور میدان مغناطیسی توسط الکترون های نسبیته و باریکه های پروتون. *مجله پژوهش فیزیک ایران*، ۲۴۹-۲۵۰. [لینک](#).
- زبر دست، م. و گوشه، ع. (۱۳۹۶). *فیزیک راکتورهای هسته ای ۱* (نسخه اول). تهران، ایران: دانشگاه پیام نور.
- قریشی، س. صدیقزاده، ا. و رعایایی، م. (۱۳۹۳). *انرژی گداخت هسته ای از منظر ایمنی و محیط زیست*. سازمان انرژی و اتمی ایران، ۲.
- کرین، ک. (۱۳۹۰). *آشنایی با فیزیک هسته ای* (ترجمه ی میرفرخایی و مدرس)، ویرایش سوم، جلد دوم. تهران: مرکز نشر دانشگاهی.
- نویسندگان، ج. ا. (۱۴۰۰). *آشنایی با انرژی هسته ای و کاربردهای آن* - جلد اول. تهران: سازمان انرژی اتمی ایران.
- هالیدی، د. رزیک، ر. و واکر، ج. (۲۰۱۴). *مبانی فیزیک* (ترجمه ی جلیلیان نصرتی، عابدینی و خلیلی بروجینی). ویرایش دهم، جلد سوم تهران: صفار.
- هزازه حصار مسکن، ه. و امراللهی، ر. (۱۳۹۲). *پاکسازی محفظه خلا توکامک البرز توسط سیستم تخلیه تابان DC*. انجمن هسته یی ایران.
- هلن، ک. (۱۳۸۸). خطر نبرد هسته یی نوین. (ترجمه ی رجایی و سروری). تهران: انتشارات قلم.
- یانگ، ه. و فریدمن، ر. (۱۳۸۳). *فیزیک دانشگاهی* (جلد چهارم). (ترجمه ی فروتن) تهران، ایران: نشر علوم دانشگاهی.
- یرهوف، و. (۱۳۹۴). *مبانی فیزیک هسته یی*. (ترجمه ی رحیمی). ویرایش هفتم. مشهد. پوهنتون فردوسی مشهد.
- Hossain, R. (2022). A Short Review of the Nuclear Energy. *Journal of Electrical Power System Engineering and Technology*, 71-72-73-74. [Link](#)
- Peel, R. (2021). *Nuclear Fuel Reserves*. king's college london, 29. <https://doi.org/10.1002/0471238961>.
- Badora, A. Kud, K & .Wo'zniak, M. (2021). *Nuclear Energy Perception and Ecological Attitudes*. *energies* 5.: <https://doi.org/10.3390/en14144322>.
- Balat, M. (2017). *The Role of Nuclear Power in Global Electricity Generation*. *Energy sources*, 381: <https://doi.org/10.1080/15567240600705458>.
- Batani, D. (2023). *Inertial confinement fusion: recent results*. *EPJ Web of Conferences* 310. : <https://doi.org/10.1051/epjconf/202431000013>
- Chang, R. (2008). *General Chemistry* (Fifth Edition Ed.). New York: McGraw-Hill,.

- D'Auria, F., Debrechin, N., & Glaeser, H. (2019). *The technological challenge for current generation. nuclear energy and technology*, 195. <https://doi.org/10.3897/nucet.5.38117>.
- Graves, C., Ebbesen, S., Mogensen, M., & Lackner, K. (2011). *Sustainable hydrocarbon fuels by recycling CO2 and H2O with renewable or. Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 6 <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.014>.
- Jimenez, G., & Flores, J. M. (2014). *Reducing the CO2 emissions and the energy dependence of a large city. Science Direct*, 5. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pnucene.2014.03.013>.
- John, O. (2020). *Global and regional probabilities of major nuclear. Environmental Management*, 7. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110780>.
- Kessides, I. (2009). *Nuclear Power and Sustainable Energy. The World Bank Research Observer*, 3. <https://doi.org/10.1093/wbro/lkp010>.
- Krane, k. (2020). *Modern physics* (fourth ed.). New york, USA: John Wiley & sons. <https://www.wiley.com/en-us/Modern+Physics%2C+4th+Edition-p-9781119495468>.
- Ramana, M. (2009). *Nuclear Power: Economic, Safety, Health, and Environmental Issues of Near-Term Technologies. Annual Review of Environment and Resources*, 5. <https://doi.org/10.1146/annurev.enviro.033108.092057>.
- Tochaikul, G., Phattanasub, A., & Khemkham, P. (2022). *Radioactive waste treatment technology: a review. Kerntechnik*, 12. <https://doi.org/10.1515/kern-2021-1029>.
- Zhang, K. (2022). *Analysis of Continuous Development with Nuclear Energy. EDP Scienc*, 4. <https://doi.org/10.1051/shsconf/202>.