Quarterly Journal of
Strategic Studies of Public Policy
Autumn 2021, Volume 11, Number 40

Research Paper

Prioritization of Nuclear Fusion Methods for Strategic Nuclear Fusion Energy Policy Making in Iran

•Amir Hosein Ghorashi[1], Ameneh Kargarian[1], Farid Gholamreza Fahimi[2]

1. Plasma and Nuclear Fusion Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran, Iran.
2. Department of Environment Management, Faculty of Agriculture, Islamic Azad University, Unit of Tonekabon, Tonekabon, Iran.

Use your device to scan and read the article online

Citation: Ghorashi, A. H., Kargarian, A., & Gholamreza Fahimi, F. (2021). [Prioritization of Nuclear Fusion Methods for Strategic Nuclear Fusion Energy Policy Making in Iran (Persian)]. *Journal Strategic Studies of Public Policy, 11*(40), 154-183.

CC BY NC

Received: 29 Dec 2020
Accepted: 13 Jun 2021
Available Online: 01 Nov 2021

Keywords:
Nuclear Fusion Methods, Strategic ranking, Analytical hierarchical process

ABSTRACT

Higher worldwide research activities in the fields of nuclear fusion energy indicate the importance of developing such technology in Iran as well. On the other hand, the ambiguity regarding the justification and priority of investing in each of the methods of nuclear fusion is a universal challenge that is altimatlly common among nuclear fusion experts Iran too. The present research is aiming at presenting a coherent investigation that can be based on analytical and comparative analysis to achieve a rational prioritization among different methods of nuclear fusion. In this article, different nuclear fusion options are prioritized, using the experts'opinions through Analytic Hierarchy Process (AHP); free from any personal judgments and influences. Furthermore, through Delphi method, 19 quality criteria related to different methods of nuclear fusion were classified based on mathematical logic, and based on the degree of importance and screenings, 13 criteria were finally selected. Then, using hierarchical analysis method and also through Expert Choice software, pairwise comparisons between criteria were performed to determine their coefficient of importance. In addition, pairwise comparisons were made between each of the criteria for each of the fusion methods. Finally, the strategic practical prioritization of three different nuclear fusion methods was quantitatively achieved as 0.415, 0.379, and 0.207, respectivly; for Iran.

*** Corresponding Author:**
Amir Hosein Ghorashi, PhD.
Address: Plasma and Nuclear Fusion Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran, Iran.
E-mail: aghorashi@aeoi.org.ir

مقاله پژوهشی

اولویت‌بندی راهبردی روش‌های گداخت هسته‌ای جهت سیاست‌گذاری پایدار جمهوری اسلامی ایران در حوزه انرژی گداخت هسته‌ای

*امیرحسین قرشی[۱]، آمنه کارگریان[۱]، فرید غلامرضا فهیمی[۲]

۱. پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران، ایران.
۲. گروه مدیریت محیط زیست، دانشکده کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تنکابن، تنکابن، ایران.

تاریخ دریافت: ۰۹ دی ۱۳۹۹
تاریخ پذیرش: ۲۳ خرداد ۱۴۰۰
تاریخ انتشار: ۱۰ آبان ۱۴۰۰

چکیده

شتاب کشورهای صنعتی در توسعه فناوری گداخت هسته‌ای، بیانگر ضرورت توسعه بیش از پیش این فناوری در ایران است که این امر مهم مورد تأیید ریاست جمهوری نیز است. از طرفی، وجود ابهام در خصوص توجیه و اولویت سرمایه‌گذاری در هریک از روش‌های گداخت هسته‌ای چالشی جهان‌شمول است که طبعاً در بین متخصصین این حوزه در ایران نیز رایج است؛ بنابراین در کنار توجیه راهبرد اجتناب‌ناپذیر دست‌یابی ایران به انرژی گداخت هسته‌ای، باید اتخاذ تصمیم و هدایت سرمایه‌گذاری در روشی که بتوان از آن طریق به انرژی گداخت هسته‌ای نائل آمد، در راستای سیاست‌گذاری پایدار انرژی مورد توجه قرار گیرد. در این پژوهش با استفاده از نظرات کارشناسان گداخت هسته‌ای، عاری از هرگونه قضاوت و سلائق شخصی، روش‌های مختلف گداخت هسته‌ای بر اساس ضریب اهمیت و اهداف راهبردی رتبه‌بندی شده‌اند. ابتدا از طریق روش دلفی، نوزده معیار کیفی مرتبط با روش‌های گداخت هسته‌ای درجه‌بندی شدند. سپس بر مبنای غربالگری‌های انجام‌شده و درجه اهمیت، سیزده معیار گزینش شدند. ضریب اهمیت معیارها در هر روش از طریق تحلیل سلسله‌مراتبی و مقایسات زوجی با استفاده از نرم‌افزار Expert Choice به صورت کمّی محاسبه شدند. در پایان با احتساب میزان کمّی معیارها، روش‌های گداخت هسته‌ای شامل محصورسازی مغناطیسی، محصورسازی اینرسی و روش ترکیبی به ترتیب به میزان ۰/۴۱۵، ۰/۳۷۹ و ۰/۲۰۷ به صورت کمّی اولویت‌بندی شدند.

کلیدواژه‌ها:
روش‌های گداخت هسته‌ای، اولویت راهبردی، تحلیل سلسله‌مراتبی

* نویسنده مسئول:
دکتر امیرحسین قرشی
نشانی: تهران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته‌ای.
پست الکترونیکی: aghorashi@aeoi.org.ir

مقدمه

تأمین امنیت انرژی، الزاماً به مفهوم قابلیت بهره‌برداری همزمان از تمام منابع انرژی، اعم از فسیلی و غیرفسیلی نیست، بلکه این امر می‌بایست در قالب یک اولویت‌بندی راهبردی در راستای تحقق اهداف برنامه درازمدت صورت پذیرد، چرا که امنیت انرژی در قالب معیارهای قیمت، محیط زیست، در دسترس بودن، فناوری و سیاست‌گذاری پایدار / پایداری حکومت قابل تعریف و ارزیابی است (Sovacool, 2010: 1-119؛ ایجابی و همکاران، ۱۳۹۷: ۱۳۵-۱۵۷).

به استثنای معیار سیاست‌گذاری انرژی که برنامه‌محور است و باید بر مبنای راهبردی هدفمند پایدار و ماندگار باشد، سایر معیارها بر حسب زمان و به تناسب شرایط مختلف تغییرپذیر هستند. از طرفی، ایجاد زیرساخت‌های بنیادین جهت نیل به دانش، علم و فناوری‌های مرتبط با همه منابع نوین انرژی از ملزومات بنیادین سیاست‌گذاری پایدار انرژی محسوب می‌شود، چرا که سیاست‌گذاری انرژی کشور در صورتی پایدار تلقی خواهد شد که عنداللزوم سبد انرژی کشور تغییرپذیر بوده و از قابلیت جایگزینی منابع انرژی در چارچوب برنامه‌های توسعه کشور جهت تأمین انرژی مورد نیاز در هر سطح از رشد اقتصادی (کم، متوسط و یا زیاد) برخوردار شود (Ghorashi, 2007: 1643-1647).

بنابراین دسترسی به دانش فنی و ایجاد زیرساخت‌های علمی و دانش‌بنیان در زمینه همه منابع انرژی‌های نوین می‌بایست از قبل در کشور فراهم شود تا در زمان نیاز امکان بهره‌برداری از این منابع به درستی و فارغ از تجربه سعی و خطا صورت پذیرد. با توجه به شتاب بیش از پیش کشورهای صنعتی در توسعه فناوری گداخت هسته‌ای، چشم‌انداز تأمین انرژی مورد نیاز بشر از طریق مهار انرژی گداخت هسته‌ای بسیار امیدوارکننده است. رهیافتی که علاوه بر تأمین نامحدود انرژی، خطری برای امنیت، صلح و سلامت بشر ندارد.

همچنین پیش‌بینی می‌شود در آینده، میزان پیشرفت و ملاک راه یافتن به افق مرزهای دانش در کشورها، از استاندارد کنونی که بر مبنای اشراف و سطح دانش فنی هر کشور در زمینه شکافت هسته‌ای سنجیده می‌شود، به سطح دانش فنی و دسترسی آن کشور به فناوری‌های گداخت هسته‌ای (استاندارد ITER[1]) ارتقا خواهد یافت. این تحولات لزوم اتخاذ تصمیمات راهبردی جهت اهتمام به توسعه فناوری گداخت هسته‌ای در ایران را امری اجتناب‌ناپذیر می‌کند (قرشی و صدیق‌زاده، ۱۳۹۴: ۲۰۵).

همچنین، طی دهه اخیر، توسعه فناوری‌های گداخت هسته‌ای، ازجمله برنامه‌های مورد تأکید ریاست جمهوری و از اولویت‌های کاری سازمان انرژی اتمی ایران است که از سال ۱۳۹۰ با تمرکزی بیش از پیش در دستور کار این سازمان قرار گرفته است. مضافاً اینکه، با توجه به صلح‌آمیز بودن این فناوری و طبق سند برجام کشورهای غربی در چارچوب آژانس بین‌المللی انرژی اتمی جهت همکاری با ایران در توسعه فناوری‌های گداخت هسته‌ای اعلام آمادگی کرده‌اند (اسناد طرح ملی گداخت هسته‌ای، ۱۳۹۱، معاونت علمی و فناوری ریاست جمهور).

بنابراین در این برهه، تشخیص اولویت سرمایه‌گذاری در کدامین روش گداخت از اهمیتی راهبردی برخوردار است. شایان ذکر است، ایجابی و همکاران در تحقیق خود با استفاده از روش مشابه

1. International Thermonuclear Experimental Reactor

اولویت‌بندی بهره‌برداری از منابع بالقوه انرژی فسیلی و تجدیدپذیر در ایران را گزارش کرده‌اند (ایجابی و همکاران، ۱۳۹۷: ۱۳۵-۱۵۷). مقاله کنونی به اولویت‌بندی روش‌های فنی شناخته‌شده برای مهار انرژی حاصل از فرایند گداخت هسته‌ای در ایران می‌پردازد که تا کنون مقاله‌ای در این خصوص به چاپ نرسیده است.

به طور کلی روش‌های گداخت هسته‌ای به سه طریق: ۱) روش محصورسازی مغناطیسی (MCF)[۲]، ۲) روش محصورسازی اینرسی (ICF)[۳] و ۳) روش‌های میانبر / روش ترکیبی / سایر روش‌ها، طبقه‌بندی می‌شوند (قرشی و صدیق‌زاده، ۱۳۹۴: ۲۰۵).

معرفی و تشریح فنی روش‌های یادشده از اهداف و گنجایش مقاله حاضر خارج است، ولی قبلاً در قالب ده سند جامع علمی توسط نگارنده اول و مجموعه همکاران تدوین شده‌اند (اسناد طرح ملی گداخت هسته‌ای، ۱۳۹۱، معاونت علمی و فناوری ریاست جمهور).

از این میان، انتخاب روش برتر، از جمله چالش‌های فراگیر است، به‌ویژه در ایران که به عنوان یک کشور در حال توسعه سرمایه‌گذاری برای توسعه فناوری گداخت هسته‌ای باید مبتنی بر توجیه فنی و اقتصادی و برآورد دقیق از حصول نتیجه‌ای راهبردی و مطمئن باشد.

شایان ذکر است هریک از این روش‌ها مدعیان بالقوه‌ای دارند. چنانچه، کارشناسان روش MCF معتقدند که این روش از سال ۱۳۵۳ در سازمان انرژی اتمی ایران مورد توجه بوده؛ بنابراین دارای سابقه در تربیت نیروی متخصص و انجام تحقیقات گسترده و نصب و راه‌اندازی انواع تجهیزات پایلوت و آزمایشگاهی، به‌ویژه دو توکامک دماوند و الوند در این سازمان است. مهمترین پروژه بین‌المللی در حوزه MCF، پروژه ITER، با بودجه‌ای حدود ۱۵ میلیارد یورو است که در کشور فرانسه در حال انجام است (قرشی و صدیق‌زاده، ۱۳۹۴: ۲۰۵).

بنابراین نظر به سرمایه‌گذاری کلان توسط کشورهای صنعتی در این پروژه، مدعیان روش محصورسازی مغناطیسی به آینده انرژی گداخت هسته‌ای از این طریق امیدی مضاعف دارند و روش‌های دیگر را صرفاً تحقیقاتی می‌دانند. از طرفی مدعیان روش ICF که از سال ۱۳۷۸ تحقیقات آن در ایران آغاز شده، معتقدند که این روش در مدت‌زمان کوتاهی از پیشرفت‌های قابل ملاحظه‌ای برخوردار شده است.

طرفداران این روش، تمایل ایالات متحده آمریکا برای تحقیق و توسعه در این روش که عمدتاً به صورت محرمانه صورت می‌گیرد را عاملی برای نتیجه‌بخش بودن این روش دانسته و معتقدند آمریکا عمداً اذهان علمی را به سمت MCF منحرف می‌کند تا نتایج آتیِ دیگر روش‌ها را در انحصار خود داشته باشد.

ایشان معتقدند که حتی در صورت موفقیت پروژه ITER، تکرار یا تجاری‌سازی این پروژه توسط دیگر کشورها عملاً غیرممکن خواهد بود. از سویی، کارشناسان حوزه روش‌های ترکیبی که فعالیت‌های پژوهشی آن طی دهه اخیر در ایران صورت گرفته است، بر این باورند که با امکانات محدود داخلی حصول نتیجه میانبر با ساخت این‌گونه ماشین‌های گداخت همچون Z-pinch و دستگاه IECF از مزایای این گزینه نسبت به دو روش دیگر است. تولید

2. Magnetic Confinement Fusion (MCF)
3. Inertial Confinement Fusion (ICF)

انرژی، توسط راکتورهایی کوچک نظیر پلی‌ول و با هزینه‌ای بسیار کمتر از دیگر گزینه‌ها، در آینده‌ای نه چندان دور توسط متخصصین داخل کشور امکان‌پذیر خواهد بود. مهم‌ترین سؤالات مطرح‌شده در کشمکش اولویت‌بندی بین روش‌های گداخت هسته‌ای عبارت‌اند از:

ادامه یافتن مسیر پژوهش‌های گداخت هسته‌ای کشور در اثر انتخاب تنها یکی از روش‌های فوق و در نتیجه کمبود بودجه و امکانات برای سایر روش‌ها.

احتمال عدم موفقیت روش منتخب و در نتیجه محکومیت این انتخاب توسط طرفداران سایر روش‌ها.

ابهام در ارزیابی صحیح از امکان انجام تحقیقات جانبی توسط سایر مراکز تحقیقاتی و کمک صنایع پشتیبان در اجرای روش منتخب.

امکان یا عدم امکان حمایت‌های بین‌المللی بر اثر این انتخاب.

برآورد صحیح از امکان تأمین نیروی متخصص مورد نیاز.

امکان جذب اعتبارات تخصیص یافته برای روش منتخب.

تجارب بین‌المللی و برآورد صحیح از روند پیشرفت آتی در مهار انرژی گداخت هسته‌ای در جهان.

برآورد صحیح از سرعت دست‌یابی به نتیجه با روش منتخب.

ابهام در اهداف راهبردی توسعه فناوری‌های گداخت هسته‌ای در کشور.

در این مقاله با در نظر گرفتن دغدغه‌های موجود، دیدگاه‌های کارشناسان صاحب‌نظر در حوزه گداخت هسته‌ای کشور که در قالب ادعاها و معیارهای نظری ارائه می‌شوند را برای اولین بار با اجرای فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی بررسی کرده و سپس روش‌های گداخت هسته‌ای در قالب معیارهای کمی اولویت‌بندی شده‌اند. در این تحقیق با درک اهمیت رعایت اصل بی‌طرفی، تحلیل داده‌ها صرفاً بر پایه نظرات متخصصین ذیربط استوار است.

۱. ادبیات موضوع

۱-۱. سؤالات تحقیق

چه معیارهایی برای انتخاب روش برتر گداخت هسته‌ای باید تعیین شوند؟

کدام‌یک از روش‌های گداخت هسته‌ای از اولویت بیشتری نسبت به دیگری برخوردار است؟

۱-۲. فرضیه‌های تحقیق

فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی روشی مناسب در اولویت‌بندی معیارهای گداخت هسته‌ای است.

گداخت به روش محصورسازی مغناطیسی در قیاس با سایر روش‌ها از ارجحیت بیشتری برخوردار است.

۱-۳. اهداف تحقیق

تعیین معیارهای مقایسه‌ای روش‌های گداخت هسته‌ای.

اولویت‌بندی معیارها بر اساس درجه و ضریب اهمیت آن‌ها.

انتخاب روش برتر گداخت هسته‌ای با توجه به معیارهای موجود.

۲. روش‌شناسی پژوهش

اغلب پژوهش‌های متکی بر روش‌های مدیریتی، بر پایه نظرات کارشناسی استوار هستند و رمز موفقیت این‌گونه تحقیقات همکاری و قضاوت بی‌طرفانه کارشناسان و متخصصین ذیربط است. در این تحقیق، ۲۵ نفر از متخصصین مجرب با مدارج علمی کارشناسی ارشد و دکترا دارای تخصص و تجربه مرتبط با هریک از روش‌های گداخت هسته‌ای به عنوان جامعه آماری در سطح ملی انتخاب شدند.

تعداد پانزده نفر پرسش‌نامه‌ها را به طور کامل تکمیل و عودت کردند که تحقیق حاضر حاصل بررسی و تجزیه و تحلیل نظرات ایشان است. در این پژوهش از دو روش دلفی و روش تحلیل سلسله‌مراتبی استفاده شد که چگونگی کاربرد آن‌ها در این تحقیق به شرح زیر است.

۲-۱. روش دلفی

روش دلفی در سال ۱۹۶۴ توسط دالکی و هلمر (Dalkey and Helmer 1963, 458) جهت شکل‌گیری فرایند ارتباطات گروهی معرفی شد. این روش، از جمله موارد کلان طوفان فکری[4] است که منجر به اجماع صاحب‌نظران در موضوعی خاص می‌شود؛ بنابراین هرگاه پیچیدگی مسئله به‌گونه‌ای باشد که نتوان از طریق روش‌های متعارف آن را حل کرد، از روش دلفی کمک گرفته می‌شود (Tseng and Tzai-Zang 2009, p.6548, Okoli and Pawlowski2004, 15).

در مطالعات آماری مانند نظرسنجی‌های عمومی، شرکت‌کنندگان به عنوان نماینده یک جمعیت بزرگ محسوب می‌شوند، در صورتی که اشخاصی که در مطالعات دلفی انتخاب می‌شوند، نماینده یک جمعیت نیستند، بلکه افرادی مطلع و آگاه محسوب می‌شوند؛ بنابراین اولین مسئله در روش دلفی انتخاب شرکت‌کنندگان صاحب‌نظر است.

مرحله بعد، تنظیم پرسش‌نامه است. پرسش‌نامه عملاً مصاحبه‌ای است که به صورت نوشتاری و بدون حضور مصاحبه‌کننده تهیه و تکمیل می‌شود. در واقع، پرسش‌نامه روشی غیرحضوری و گروهی برای گردآوری نظرات کارشناسان بدون نیاز به رو در رو شدن ایشان با یکدیگر محسوب می‌شود. سؤالات پرسش‌نامه دلفی معمولاً به سه دسته تقسیم می‌شوند:

الف) سؤالات مربوط به پیش‌بینی احتمال وقوع پیشرفت و توسعه در آینده

لازمه پیش‌بینی پیشرفت، پاسخ به سؤالاتی در مورد احتمال وقوع یک رویداد و همچنین ارزیابی برخی از پارامترها است.

ب) سؤالات مربوط به برخی شرایط مطلوب در آینده

سؤالات مربوط به قضاوت در مورد مطلوبیت یک رویداد. اینکه -آیا یک واقعه باید اتفاق بیفتد یا نه؟- به همراه دلایل باید پاسخ داده شوند.

ج) سؤالات مربوط به سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی

این سؤالات مرتبط با سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی جهت نیل به اهداف راهبردی در آینده هستند.

پاسخ به پرسش‌های طبقه‌بندی‌شده مذکور به نوبه خود نیازمند دانش و اطلاعات کافی توسط کارشناسان ذیربط به شرح زیر است:

پرسش‌های احتمالی (نوع اول): نیاز به تجربه‌های

4. Brain Storming

عملی و دانش دقیق در مورد موضوع مورد تحقیق دارد.

پرسش‌های مطلوبیت (نوع دوم): نیاز به ابعاد اخلاقی، سیاسی و یا اجتماعی دارد که ممکن است با تخصصی که مرتبط با پرسش‌های احتمالی است، مغایرت داشته باشد.

پرسش‌های مربوط به سیاست‌گذاری (نوع سوم): مستلزم اطلاع از آخرین پیشرفت‌هایی است که رسیدن به آن‌ها امکان‌پذیر است.

در این تحقیق، پرسش‌نامه به یک گروه از متخصصان که به راحتی در دسترس بودند، ارائه شد. با پاسخ‌های این گروه معایب و سوءتعبیرهای احتمالی از سؤالات طراحی‌شده مشخص شدند. شفافیت و ترکیب پرسش‌ها تأثیر مثبتی بر قابل اعتماد بودن نتایج دارد. زمانی که سؤالات به این حد از کیفیت رسیدند، پرسش‌نامه‌ها برای شرکت‌کنندگان فرستاده شدند.

شرکت‌کنندگان در تحقیق دلفی از پنج تا بیست نفر را شامل می‌شوند. اعتبار روش دلفی نه به تعداد شرکت‌کنندگان در تحقیق، بلکه به اعتبار علمی متخصصان شرکت‌کننده در پژوهش بستگی دارد. نظر به اینکه روش دلفی بر ناشناس بودن بازخوردهای کنترل‌شده و پاسخ گروهی و آماری تکیه دارد؛ بنابراین از دخالت افراد صاحب منصب و ذی‌نفوذ جهت اعمال فشار برای هم‌نوایی و حمایت از گزینه مورد نظرشان اجتناب می‌شود.

در این تحقیق، پاسخ‌دهی به پرسش‌ها طی چهار هفته انجام گرفت. سپس پرسش‌هایی که پاسخ عددی داشتند و یا جواب‌هایشان به صورت انتخاب گزینه‌ای بود، با استفاده از نرم‌افزار رایانه‌ای تحلیل شدند.

۲-۱-۱. مراحل استفاده از روش دلفی

ابتدا تعداد نوزده معیار با جمع‌بندی نظرات کارشناسی در مرحله آزمایشی تهیه شد و در قالب پرسش‌نامه تنظیم شد و برای تعیین میزان اهمیت در اختیار هریک از متخصصان قرار گرفت.

در این مرحله معیارهای متناسب با روش‌های گداخت هسته‌ای با استفاده از نظرات کارشناسان به شرح ذیل تعیین شدند:

۱. معیار الزامات قانونی

این معیار به این دلیل انتخاب شد که نقش مقررات و ضوابط داخلی برای استفاده از این روش و همچنین ضرورت و یا عدم ضرورت دریافت تأییدیه از مراجع قانونی بین‌المللی بررسی شود.

۲. معیار نیاز فنی به این روش

با توجه به مزایا و برتری‌هایی که این روش از گداخت هسته‌ای دارد، کشور تا چه اندازه به آن نیازمند است؟ این معیار از دید شما چقدر اهمیت دارد؟

۳. معیار سطح فناوری

آیا سطح فناوری موجود کشور برای روش منتخب به حدی هست که عملاً دست‌یابی به اهداف راهبردی آن را برای ما محقق سازد؟ این معیار چقدر اهمیت دارد؟ ضرورت آن چیست؟

۴. معیار وجود صنایع پشتیبان

این معیار به این دلیل انتخاب شد که مشخص شود آیا صنایع پشتیبان برای این روش در کشور اعم از صنایع بخش خصوصی و دولتی وجود دارد؟

و حمایت همه جانبه از این روش امکان‌پذیر است؟

۵. معیار سابقه روش

سابقه روش منتخب به حدی وزین و قابل اعتبار است که عملاً با این روش دست‌یابی به انرژی گداخت حاصل شود؟

۶. معیار نحوه مدیریت

آیا نحوه مدیریت با توجه به چارچوب‌ها و بضاعت مدیریتی موجود در این روش اهمیت زیادی دارد؟ و سیستم مدیریت موجود تا چه اندازه توانایی اجرایی شدن این روش را دارد؟

۷. معیار کاربردی بودن

چقدر این روش قابلیت عملیاتی شدن با توجه به جمیع جهات را دارد؟ آیا عملیاتی شدن از طریق روش مزبور برای تصمیم‌گیران اهمیت دارد؟ میزان کاربردی بودن روش چیست؟

۸. معیار قابلیت کاربرد در سایر علوم

کاربردهای این روش در سایر علوم و فنون به حدی هست که حائز اهمیت باشد؟ میزان نقش‌آفرینی این روش در پیشبرد اهداف سایر علوم چقدر است؟

۹. معیار کمک به ارتقای سطح فناوری کشور

آیا این روش به ارتقای سطح فناوری کشور و پیشرفت‌های فنی مربوطه، به‌ویژه در سطوح دانشگاهی و صنایع کمک می‌کند و میزان اهمیت این موضوع چقدر است؟

۱۰. معیار مقبولیت و حمایت‌های بین‌المللی

آیا حمایت‌های بین‌المللی با توجه به شرایط موجود برای این روش وجود دارد و این روش مورد قبول جامعه بین‌المللی، به‌ویژه در مورد ایران است؟ آیا به طور کلی حمایت‌های بین‌المللی در این روش اهمیت و ضرورت دارد؟

۱۱. معیار امکان‌پذیری تأمین بودجه

آیا تصویب بودجه کافی از سوی مراجع قانونی مانند مجلس شورای اسلامی از اهمیت کافی برخوردار است و اصلاً این روش می‌تواند بودجه کافی را جذب کند و هزینه‌های پیش‌بینی‌شده آن از اولویت‌های کشور است؟

۱۲. معیار دسترسی به منابع انسانی

آیا دسترسی به نیروی انسانی کارآزموده که توانایی انجام این روش را داشته باشند، مهم است و این مهم با توجه به بضاعت فارغ‌التحصیلان رشته‌های مربوطه چه مقدار عملی است؟

۱۳. معیار ایمنی

آیا رعایت ایمنی هسته‌ای برای این روش به اندازه کافی مهم است یا تأثیر چندانی در انتخاب این روش ندارد؟

۱۴. معیار چشم‌انداز آتی

آیا از دیدگاه متخصصین چشم‌انداز آینده انرژی گداخت با روش منتخب شفاف و مشخص است؟ آیا آینده‌ای برای این روش متصور است؟ این معیار از دیدگاه شما چقدر اهمیت دارد؟

۱۵. معیار خسارت احتمالی در صورت عدم انجام

آیا در صورتی که پروژه اجرا نشد یا به هر دلیلی

کنار گذاشته شد، خسارتی از این بابت متوجه کشور می‌شود؟ آیا عدم انجام آن در توسعه آتی کشور تأثیرگذار است؟

۱۶. معیار توجیه اقتصادی

آیا روش منتخب دارای توجیه اقتصادی از طریق آنالیز هزینه فایده است؟ آیا می‌توان با این روش توجیه اقتصادی برای بازگشت هزینه و سرمایه را از طریق منافع کرد؟ یا اصلاً این موضوع اهمیتی در این روش ندارد؟

۱۷. معیار ارتباط با کشورهای صاحب تکنولوژی

با توجه به شرایط موجود، آیا کشورهای صاحب تکنولوژی مانند اروپا و آمریکا در رسیدن به این هدف از طریق روش منتخب به ما یاری می‌رسانند؟ یا حمایت آن‌ها در پیشبرد این هدف اهمیتی ندارد؟

۱۸. معیار میزان احتمال تولید برق از این روش

آیا با این روش تولید برق در کشور امکان‌پذیر خواهد بود؟ تولید برق از این طریق مقرون به صرفه است؟

۱۹. معیار داشتن سایر کاربردها

آیا به جز تولید برق با این روش کاربردهای سرریز دیگری نیز قابل تصور هستند؟ این کاربردها تا چه میزان در پیش‌برد توسعه کشور سهیم خواهند بود؟

۲-۱-۲. استفاده از روش دلفی بر اساس اهمیت معیار

پس از تعیین معیارها در مرحله قبل، با استفاده از روش دلفی غربال‌گری‌های لازم انجام شد و درجه اهمیت معیارها مشخص شد. برای این منظور پرسش‌نامه نظرسنجی متخصصان (پرسش‌نامه دلفی) حاوی معیارها و زیرمعیارهای استخراج‌شده تهیه و در اختیار کارشناسان و متخصصان قرار داده شد. این متخصصین از میان افراد مسلط به انواع فناوری‌های گداخت هسته‌ای که بیش از پنج سال سابقه فعالیت مرتبط را داشتند، انتخاب شدند.

پرسش‌نامه این امکان را برای متخصصان فراهم کرد تا ایشان نظر خود را در خصوص میزان اهمیت معیارها و زیرمعیارها با یکی از پنج درجه اهمیت به صورت بی‌اهمیت با امتیاز ۱، کم اهمیت با امتیاز ۳، با اهمیت با امتیاز ۵، با اهمیت زیاد با امتیاز ۷ و با اهمیت بسیار زیاد با امتیاز ۹ بیان کنند.

برای جمع‌بندی آرای پرسش‌شوندگان، امتیاز وزن‌دار هر معیار محاسبه شد. تعداد انتخاب‌های صورت‌گرفته برای هر درجه اهمیت معرف امتیاز آن درجه اهمیت قلمداد شد. وزن معیارها در دامنه بین صفر تا ۱۰ در نظر گرفته شد و هر درجه اهمیت معرف یک دامنه از وزن برای هر معیار به شرح ذیل است:

امتیاز ۱ برای درجه بی‌اهمیت معرف دامنه ۰ تا ۲

امتیاز ۳ برای درجه کم اهمیت معرف دامنه ۲ تا ۴

امتیاز ۵ برای درجه با اهمیت معرف دامنه ۴ تا ۶

امتیاز ۷ برای درجه با اهمیت زیاد معرف دامنه ۶ تا ۸

امتیاز ۹ برای درجه با اهمیت بسیار زیاد معرف دامنه ۸ تا ۱۰.

برای هر معیار دو مؤلفه آماری شامل درصد اهمیت معیار و درجه اهمیت معیار محاسبه شد.

بدین ترتیب امکان گزینش معیارهای منتخب بر اساس نمودار اهمیت معیار فراهم شد. درصد اهمیت هر معیار از تقسیم مجموع امتیاز وزن‌دار هر معیار بر حداکثر امتیاز وزن‌دار قابل حصول هر معیار به دست آمد.

برای محاسبه امتیاز وزن‌دار هر معیار از ضریب وزن تعدیل شده هر معیار استفاده شد. سپس میانگین وزنی درجه اهمیت هر معیار از جمع حاصل‌ضرب امتیاز در وزن (درجه اهمیت) تقسیم بر مجموع کل امتیازها به دست آمد و به عنوان درجه اهمیت هر معیار در نظر گرفته شد (فهیمی و اولادعسکری، ۱۳۹۱: ۱۵۹).

برای انتخاب معیارهای مورد نظر برای گزینه‌های گداخت هسته‌ای، نمودار اهمیت معیار طراحی و تنظیم شد. در این نمودار درصد اهمیت هر معیار در محور افقی و درجه اهمیت هر معیار در محور عمودی نمایش داده شد. هر معیار بر اساس این دو مؤلفه روی درصد اهمیت و بهترین درجه اهمیت استفاده شد.

به این ترتیب، نمودار بر اساس نصف درجه اهمیت معیارها و نصف حداکثر درصد اهمیت اخذشده به چهار بخش تفکیک و معیارهایی که حداقل بیش از نصف ارزش عددی هر محور را دارا بودند، انتخاب شدند. مدل ریاضی روش مذکور به شرح زیر است (Tseng, and Tzai-Zang, 2009, p.6548):

وزن تعدیل‌شده (y_i): $\frac{\sum y_i}{A}=\frac{\sum y_i}{150}\times 100$

درصد اهمیت معیار: $\frac{\sum x_i \times n}{N}$

درجه اهمیت معیار: $\frac{10}{\sum n}\times X_i=\frac{10X_i}{\sum n}$

که در معادلات فوق پارامترها عبارت‌اند از: x_i وزن اولیه، n تعداد افرادی که به هر درجه اهمیت رأی داده‌اند، N تعداد کل پرسش‌شوندگان، A حداکثر امتیاز قابل حصول، $\frac{10}{\sum n}$ ضریب وزن تعدیل شده.

۲-۲. فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی[5]

جهت انتخاب یک راهکار از بین راهکارهای موجود یا اولویت‌بندی راهکارها، روش‌های تصمیم‌گیری با شاخص‌های چندگانه[6] متداول شده‌اند. از این میان، روش تحلیل سلسله‌مراتبی بیش از سایر روش‌ها در علم مدیریت استفاده شده است. فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی اولین بار توسط توماس ال. ساعتی عراقی‌الاصل در دهه ۱۹۷۰ ابداع شد (Saaty, 1970).

این فرایند منعکس‌کننده رفتار طبیعی و تفکر انسانی است. این تکنیک، مسائل پیچیده را بر اساس آثار متقابل آن‌ها بررسی، آن‌ها را به شکلی ساده تبدیل کرده و به حل آن می‌پردازد (Tseng, and Tzai-Zang, 2009, p.6548).

اساس این روش تصمیم‌گیری بر مبنای مقایسات زوجی است و تصمیم‌گیرنده با فرآهم آوردن درخت سلسله‌مراتبی، تصمیم‌گیری را آغاز می‌کند. درخت سلسله‌مراتب، عوامل قابل قیاس و گزینه‌های رقیب را نشان می‌دهد. مقایسات زوجی وزن هریک از معیارهای گزینه‌های رقیب را در تصمیم نشان می‌دهد.

درنهایت، ماتریس‌های حاصل از مقایسات زوجی بر مبنای منطق تحلیل سلسله‌مراتبی به گونه‌ای با یکدیگر تلفیق می‌شوند تا تصمیم بهینه حاصل شود. به طور کلی به‌کارگیری این روش مستلزم انجام پنج اقدام: الف) مدل‌سازی، ب) قضاوت ترجیحی (مقایسات زوجی)، ج) محاسبات وزن‌های نسبی، د)

5. Analytic Hierarchy Process (AHP)
6. Multiple Attribute Decision Making (MADM)

جدول ۱. ترجیحات امتیازدهی برای معیارها

ترجیحات (قضاوت شفاهی)		مقدار عددی
کاملاً ارجح یا کاملاً مهم‌تر یا کاملاً مطلوب‌تر	Extremely Preferred	۹
ترجیح یا اهمیت یا مطلوبیت خیلی قوی	Very strongly Preferred	۷
ترجیح یا اهمیت یا مطلوبیت قوی	Strongly Preferred	۵
کمی ارجح یا کمی مهم‌تر یا کمی مطلوب‌تر	Moderately Preferred	۳
ترجیح یا اهمیت یا مطلوبیت یکسان	Equally Preferred	۱
ترجیحات بین فواصل فوق		۸، ۶، ۴، ۲

ادغام وزن‌های نسبی و ه) سازگاری در قضاوت‌ها هستند. همچون تحقیقات مشابه، در این پژوهش نیز برای ارزش‌گذاری معیارها جهت انتخاب گزینه مطلوب، ارجحیت یا مطلوبیت یک پارامتر نسبت به پارامتر دیگر مطابق جدول شماره ۱ تعیین شد.

سپس برای مقایسات زوجی پرسش‌نامه‌های مربوطه طبق ماتریس زوجی AHP برای معیارها طراحی شد و در اختیار کارشناسان قرار گرفت (فهیمی و اولادعسکری، ۱۳۹۱: ۱۵۹).

در ماتریس‌های زوجی ترجیح هر معیار بر خودش برابر یک در نظر گرفته شد و ترجیح هر معیار به معیار دیگر بر اساس جدول ارجحیت به این طریق تکمیل شد که اگر معیار A به معیار B بر فرض داده‌های ترجیح برابر دو باشد (A→B=2) ترجیح B بر A برابر یک‌دوم خواهد بود.

پس از تکمیل ماتریس زوجی توسط کارشناسان از نرم‌افزار Expert Choice (EC) جهت تجزیه و تحلیل و آنالیز معیارها و روش‌های گداخت هسته‌ای استفاده شد. این نرم‌افزار، یکی از نرم‌افزارهای قوی و قابل اعتماد برای ارزیابی چندمعیاره است که قابلیت‌های فراوانی نظیر محاسبه ضریب ناسازگاری و ضریب اهمیت معیارها و کاربردها دارد. ماتریس‌های تکمیل‌شده در مرحله قبل به محیط نرم‌افزار وارد شد تا ضریب ناسازگاری هر ماتریس مشخص شود.

ضریب ناسازگاری برای تشخیص خطاهای محتمل در قضاوت‌ها و همچنین ناسازگاری ذاتی در خود قضاوت‌ها است. به طور کلی، میزان ناسازگاری باید کمتر از ۰/۱ باشد. با توجه به ضریب اهمیت به‌دست‌آمده توسط نرم‌افزار، اهمیت و اولویت روش‌های گداخت هسته‌ای، همچنین اهمیت معیارهای هر روش به ترتیب اولویت مشخص شدند.

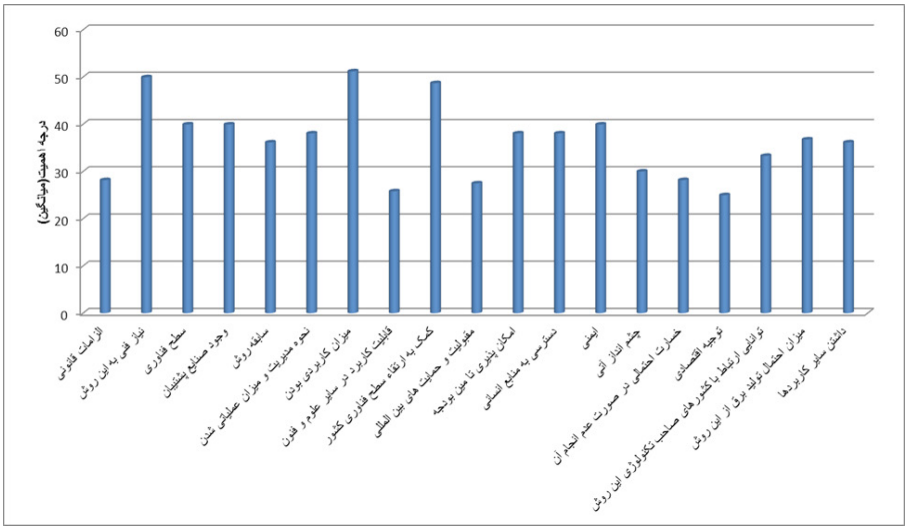
۳. یافته‌های پژوهش

۳-۱. نتایج استفاده از روش دلفی

با توجه به بررسی‌های صورت‌گرفته میان نوزده معیار اولیه، ارزیابی نظرات کارشناسان و تجزیه و تحلیل نظرات کارشناسان با استفاده از مدل ریاضی، نتایج حاصل از ضریب اهمیت معیارها برای

جدول ۲. رتبه‌بندی معیارهای روش MCF

ردیف	معیار	اهمیت معیار	درجه اهمیت (میانگین)
۱	الزامات قانونی	۲۸/۱۶ درصد	۶/۲
۲	نیاز فنی به این روش	۴۹/۹۵ درصد	۸
۳	سطح فناوری	۳۹/۹۵ درصد	۸/۴
۴	وجود صنایع پشتیبان	۳۹/۹۵ درصد	۸/۴
۵	سابقه روش	۳۶/۱۵ درصد	۷/۶
۶	نحوه مدیریت و میزان عملیاتی شدن	۳۸/۰۵ درصد	۸
۷	میزان کاربردی‌بودن	۵۱/۲ درصد	۸/۲
۸	قابلیت کاربرد در سایر علوم و فنون	۲۵/۸ درصد	۶/۲
۹	کمک به ارتقای سطح فناوری کشور	۴۸/۷ درصد	۷/۸
۱۰	مقبولیت و حمایت‌های بین‌المللی	۲۷/۴۷ درصد	۶/۶
۱۱	امکان‌پذیری تأمین بودجه	۳۸/۰۵ درصد	۸
۱۲	دسترسی به منابع انسانی	۳۸/۰۵ درصد	۸
۱۳	ایمنی	۳۹/۹۴ درصد	۷/۶
۱۴	چشم‌انداز آتی	۲۹/۹۹ درصد	۷/۲
۱۵	خسارت احتمالی در صورت عدم انجام آن	۲۸/۱۷ درصد	۶/۴
۱۶	توجیه اقتصادی	۲۴/۹۷ درصد	۶
۱۷	توانایی ارتباط با کشورهای صاحب تکنولوژی این روش	۳۳/۳ درصد	۷
۱۸	میزان احتمال تولید برق از این روش	۳۶/۷۷ درصد	۷
۱۹	داشتن سایر کاربردها	۳۶/۱۵ درصد	۷/۶



تصویر ۱. نمودار ستونی درجه اهمیت معیارهای روش MCF

روش‌های ICF، MCF و سایر روش‌های گداخت هسته‌ای به شرح ذیل قابل مشاهده هستند.

۳-۱-۱. رتبه‌بندی معیارهای روش MCF

با توجه به نظرات کارشناسان این روش، بیشترین امتیاز مربوط به میزان کاربردی‌بودن، نیاز فنی به این روش و کمک به ارتقای سطح فناوری کشور است و سایر معیارها از امتیازات پایین‌تری برخوردار شدند. نتایج حاصل از رتبه‌بندی معیارهای روش MCF در جدول شماره ۲ نشان داده شده‌اند. تصویر شماره ۱ نیز بیانگر نمودار ستونی درجه اهمیت معیارهای روش MCF است.

۳-۱-۲. رتبه‌بندی معیارهای روش ICF

با توجه به نظرات کارشناسان این روش، بیشترین امتیاز مربوط به معیارهای چشم‌انداز آتی، نحوه مدیریت و میزان عملیاتی شدن و قابلیت کاربرد در سایر علوم است و سایر معیارها امتیازات پایین‌تری دارند.

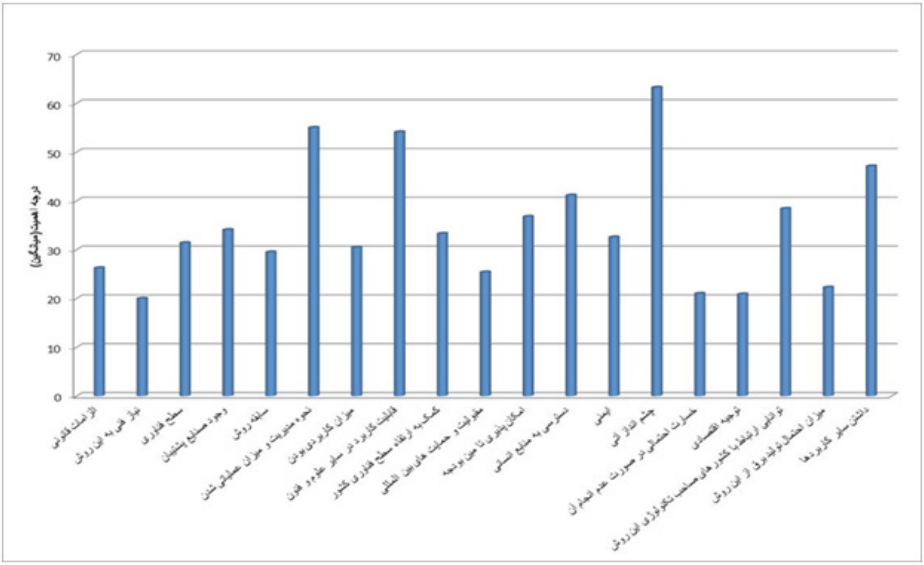
نتایج حاصل از رتبه‌بندی معیارهای روش ICF در جدول شماره ۳ ارائه شده‌اند. همچنین، نمودار ستونی درجه اهمیت معیارهای روش ICF در تصویر شماره ۲ نشان داده شده است.

۳-۱-۳. رتبه‌بندی معیارهای سایر روش‌های گداخت هسته‌ای

با توجه به نظرات کارشناسان این روش، بیشترین امتیاز مربوط به معیارهای کمک به ارتقای سطح فناوری کشور، امکان ارتباط با کشورهای صاحب تکنولوژی و داشتن کاربردهای سرریز است و سایر معیارها از امتیازات پایین‌تری برخوردارند. نتایج حاصل از رتبه‌بندی معیارها برای گزینه سایر روش‌های گداخت هسته‌ای به شرح جدول شماره ۴ است و در تصویر شماره ۳ نیز نمودار ستونی درجه

جدول ۳. رتبه‌بندی معیارهای روش ICF

ردیف	معیار	اهمیت معیار	درجه اهمیت (میانگین)
۱	الزامات قانونی	۲۶/۲۴ درصد	۵
۲	نیاز فنی به این روش	۲۰ درصد	۵
۳	سطح فناوری	۳۱/۴ درصد	۶/۶
۴	وجود صنایع پشتیبان	۳۴/۰۸ درصد	۵/۸
۵	سابقه روش	۲۹/۵ درصد	۶/۲
۶	نحوه مدیریت و میزان عملیاتی شدن	۵۵ درصد	۶/۶
۷	میزان کاربردی بودن	۳۰/۴۶ درصد	۵/۸
۸	قابلیت کاربرد در سایر علوم و فنون	۵۴/۱ درصد	۶/۶
۹	کمک به ارتقای سطح فناوری کشور	۳۳/۳ درصد	۷
۱۰	مقبولیت و حمایت‌های بین‌المللی	۲۵/۴ درصد	۴/۶
۱۱	امکان‌پذیری تأمین بودجه	۳۶/۷۸ درصد	۷
۱۲	دسترسی به منابع انسانی	۴۱/۱۴ درصد	۷
۱۳	ایمنی	۳۲/۵۶ درصد	۷/۴
۱۴	چشم‌انداز آتی	۶۳/۲۴ درصد	۵/۸
۱۵	خسارت احتمالی در صورت عدم انجام آن	۲۱ درصد	۴/۲
۱۶	توجیه اقتصادی	۲۰/۸۸ درصد	۴/۶
۱۷	توانایی ارتباط با کشورهای صاحب تکنولوژی این روش	۳۸/۴ درصد	۵
۱۸	میزان احتمال تولید برق از این روش	۲۲/۲۸ درصد	۳/۸
۱۹	داشتن سایر کاربردها	۴۷/۱ درصد	۶/۶



تصویر ۲. نمودار ستونی درجه اهمیت معیارهای روش ICF

اهمیت معیارهای سایر روش‌های گداخت هسته‌ای نمایش داده شده است.

۳-۲. نتایج حاصل از فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی

از فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی برای تعیین دقیق ضرایب معیارها و عوامل مختلف استفاده می‌شود. این فرایند مستلزم مقایسات زوجی است؛ بنابراین ماتریس‌های زوجی برای معیارهای انتخابی برای هر روش در مرحله قبل از طریق روش دلفی تشکیل شد. سپس بر اساس پرسش‌نامه‌ها، مقایسات زوجی بین ماتریس‌ها انجام شد که به تعیین ضریب معیارها و روش‌ها و ارزیابی معیارها و روش‌ها منتهی شد.

برای طولانی نشدن مراحل پرسشگری معیارهای سطوح پایین‌تر نیز با معیارهای سطوح بالاتر در یک جدول مقایسه زوجی تنظیم شدند که در انتها معیارهای درون یک خانواده در تحلیل نرم‌افزاری به صورت درختی در جایگاه خود قرار گرفتند. برای این منظور تعداد هفده ماتریس مقایسه زوجی به شرح زیر تشکیل شدند:

ماتریس مقایسات زوجی معیارهای تأثیرگذار سطح اول در انتخاب روش

ماتریس مقایسات زوجی معیارهای تأثیرگذار سطح دوم (گروه میزان و انواع کاربرد) در انتخاب روش

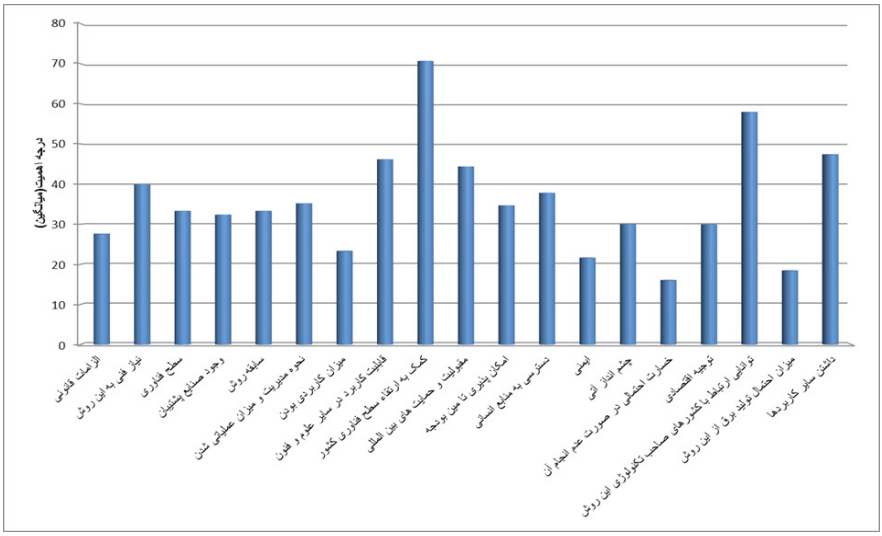
ماتریس مقایسات زوجی معیارهای تأثیرگذار سطح دوم (گروه صنایع پشتیبان و نیروی انسانی) در انتخاب روش

ماتریس مقایسات زوجی معیارهای تأثیرگذار سطح دوم (احتیاجات فنی کشور) در انتخاب روش

ماتریس مقایسات زوجی روش‌های گداخت بر اساس معیار نیاز فنی به این روش

جدول ۴. رتبه‌بندی معیارهای سایر روش‌های گداخت هسته‌ای

ردیف	معیار	اهمیت معیار	درجه اهمیت (میانگین)
۱	الزامات قانونی	۲۷/۶ درصد	۵/۸
۲	نیاز فنی به این روش	۳۹/۹۵ درصد	۶
۳	سطح فناوری	۳۳/۳ درصد	۷
۴	وجود صنایع پشتیبان	۳۲/۳۵ درصد	۶/۸
۵	سابقه روش	۳۳/۳ درصد	۵
۶	نحوه مدیریت و میزان عملیاتی شدن	۳۵/۲ درصد	۷/۴
۷	میزان کاربردی بودن	۲۳/۳ درصد	۵/۶
۸	قابلیت کاربرد در سایر علوم و فنون	۴۶/۲ درصد	۷/۴
۹	کمک به ارتقای سطح فناوری کشور	۷۰/۷ درصد	۶/۸
۱۰	مقبولیت و حمایت‌های بین‌المللی	۴۴/۴ درصد	۴
۱۱	امکان‌پذیری تأمین بودجه	۳۴/۶۷ درصد	۶/۶
۱۲	دسترسی به منابع انسانی	۳۷/۸۳ درصد	۷/۲
۱۳	ایمنی	۲۱/۶ درصد	۵/۴
۱۴	چشم‌انداز آتی	۳۰ درصد	۶
۱۵	خسارت احتمالی در صورت عدم انجام آن	۱۶ درصد	۴
۱۶	توجیه اقتصادی	۲۹/۹۱ درصد	۵/۴
۱۷	توانایی ارتباط با کشورهای صاحب تکنولوژی این روش	۵۸ درصد	۵/۸
۱۸	میزان احتمال تولید برق از این روش	۱۸/۴ درصد	۴/۶
۱۹	داشتن سایر کاربردها	۴۷/۴۵ درصد	۷/۶



تصویر ۳. نمودار ستونی درجه اهمیت معیارهای سایر روش‌های گداخت هسته‌ای

ماتریس مقایسات زوجی روش‌های گداخت بر اساس معیار وجود صنایع پشتیبان

ماتریس مقایسات زوجی روش‌های گداخت بر اساس معیار نحوه مدیریت و میزان عملیاتی شدن

ماتریس مقایسات زوجی روش‌های گداخت بر اساس معیار میزان کاربردی بودن

ماتریس مقایسات زوجی روش‌های گداخت بر اساس معیار قابلیت کاربرد در سایر علوم و فنون

ماتریس مقایسات زوجی روش‌های گداخت بر اساس معیار کمک به ارتقای سطح فناوری کشور

ماتریس مقایسات زوجی روش‌های گداخت بر اساس معیار امکان‌پذیری تأمین بودجه

ماتریس مقایسات زوجی روش‌های گداخت بر اساس معیار دسترسی به منابع انسانی

ماتریس مقایسات زوجی روش‌های گداخت بر اساس معیار ایمنی

ماتریس مقایسات زوجی روش‌های گداخت بر اساس معیار چشم‌انداز آتی

ماتریس مقایسات زوجی روش‌های گداخت بر اساس معیار توانایی ارتباط با سایر کشورهای صاحب تکنولوژی

ماتریس مقایسات زوجی روش‌های گداخت بر اساس معیار میزان احتمال تولید برق از این روش

ماتریس مقایسات زوجی روش‌های گداخت بر اساس معیار داشتن سایر کاربردها.

در ادامه بر اساس جدول ارجحیت (جدول شماره ۱)، ارجحیت مقایسات بر اساس اعداد یک تا نُه تعیین شد. اولین ماتریس، مربوط به مقایسات زوجی معیار سطح اول است که بر اساس ارجحیت از پیش

جدول ۵. ماتریس ۱ (مقایسات زوجی معیار سطح اول)

معیار	احتیاجات فنی کشور	صنایع پشتیبان و نیروی انسانی	مدیریت و میزان عملیاتی شدن	میزان و انواع کاربرد	تأمین بودجه	ایمنی	چشم‌انداز آتی	ارتباط با سایر کشورهای صاحب تکنولوژی	میزان احتمال تولید برق از این روش
احتیاجات فنی کشور	۱	۱/۱	۰/۳	۱/۱	۰/۵	۰/۶	۰/۵	۱/۳	۰/۷
صنایع پشتیبان و نیروی انسانی		۱	۱	۱/۱	۱	۰/۷	۰/۶	۲/۲	۰/۸
نحوه مدیریت و میزان عملیاتی شدن			۱	۱/۴	۱/۵	۳/۱	۰/۸	۴/۵	½
میزان و انواع کاربرد				۱	۰/۴	۰/۴	۰/۴	۱	۰/۵
تأمین بودجه					۱	۰/۶	۰/۶	۴/۲	۱/۴
ایمنی						۱	۰/۶	۴/۷	۲/۶
چشم‌انداز آتی							۱	۳/۲	۱/۹
ارتباط با سایر کشورهای صاحب تکنولوژی								۱	۰/۵
میزان احتمال تولید برق از این روش									۱

تعیین‌شده است. نتایج حاصل از ماتریس مزبور در جدول شماره ۵ تشریح شده است.

با توجه به تعیین ارزش‌ها و تکمیل ماتریس، ضریب اهمیت هر معیار محاسبه شد و اولویت‌بندی معیارهای موجود بر اساس مطلوبیت و ضریب اهمیت به شرح جدول شماره ۶ تعیین شد.

چنانکه در تصویر شماره ۴ ملاحظه می‌شود، معیار نحوه مدیریت و میزان عملیاتی شدن حائز بیشترین ضریب اهمیت است. دومین ماتریس مربوط به مقایسات زوجی معیار سطح دوم زیرمعیارهای معیار میزان و انواع کاربرد است که بر اساس ارجحیت از پیش تعیین‌شده نتایج حاصل از ماتریس مذکور به شرح جدول شماره ۷ است.

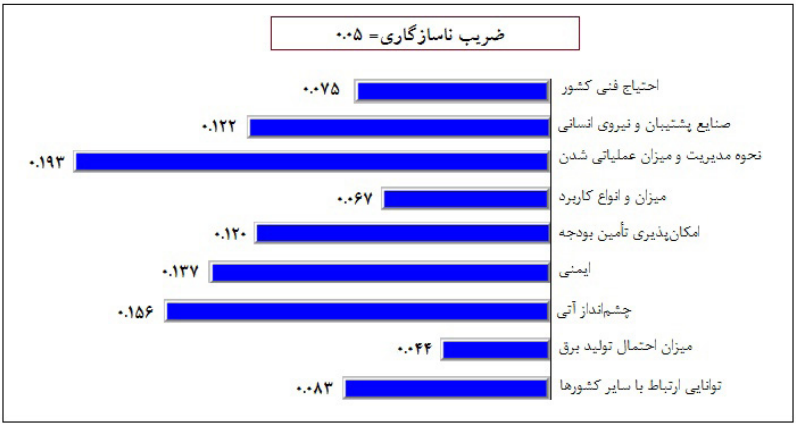
با توجه به تعیین ارزش‌ها و تکمیل ماتریس، ضریب اهمیت هر معیار محاسبه شد و اولویت‌بندی معیارهای موجود بر اساس مطلوبیت و ضریب اهمیت به شرح جدول شماره ۸ اعلام شد. همان‌گونه که در تصویر شماره ۵ ملاحظه می‌شود، معیار میزان کاربردی‌بودن حائز بالاترین ضریب اهمیت در میان سایر معیارها است.

جدول ۶. اولویت‌بندی معیارها بر اساس ضریب اهمیت معیار سطح اول

معیار	ضریب اهمیت
احتیاجات فنی کشور	۰/۰۷۸
صنایع پشتیبان و نیروی انسانی	۰/۱۲۲
نحوه مدیریت و میزان عملیاتی شدن	۰/۱۹۳
میزان و انواع کاربرد	۰/۰۶۷
امکان‌پذیری تأمین بودجه	۰/۱۲۰
ایمنی	۰/۱۳۷
چشم‌انداز آتی	۰/۱۵۶
توانایی ارتباط با سایر کشورهای صاحب این تکنولوژی	۰/۰۴۴
میزان احتمال تولید برق از این روش	۰/۰۸۳

سومین ماتریس، مربوط به مقایسات زوجی معیار سطح دوم زیرمعیارهای معیار صنایع پشتیبان و نیروی انسانی است که نتایج حاصل از ماتریس مذکور به شرح جدول شماره ۹ است.

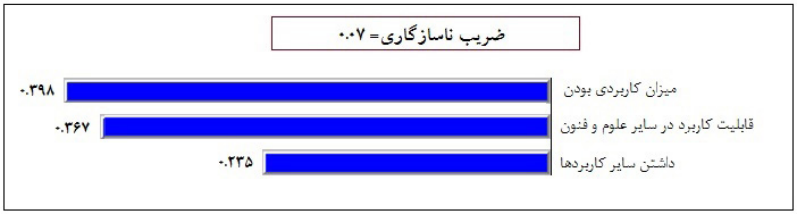
با توجه به تعیین ارزش‌ها و تکمیل ماتریس، ضریب اهمیت هر معیار محاسبه شد و اولویت‌بندی معیارهای موجود بر اساس مطلوبیت و ضریب اهمیت به شرح جدول شماره ۱۰ مشخص شد.



تصویر ۴. ضریب اهمیت معیار سطح اول

جدول ۷. ماتریس ۲

داشتن سایر کاربردها	قابلیت کاربرد در سایر علوم و فنون	میزان کاربردی بودن	معیار
۳/۲	۰/۸	۱	میزان کاربردی بودن
۱/۲	۱		قابلیت کاربرد در سایر علوم و فنون
۱			داشتن سایر کاربردها



تصویر ۵. ضریب اهمیت زیرمعیارهای معیار میزان و انواع کاربرد

همان‌گونه که در تصویر شماره ۶ ملاحظه می‌شود، معیار دسترسی به منابع انسانی حائز بالاترین ضریب اهمیت است.

چهارمین ماتریس، مربوط به مقایسات زوجی معیار سطح دوم زیرمعیارهای معیار احتیاجات فنی کشور است که نتایج حاصل از ماتریس یادشده به شرح جدول شماره ۱۱ است.

با توجه به تعیین ارزش‌ها و تکمیل ماتریس، ضریب اهمیت هر معیار محاسبه شد و اولویت‌بندی معیارهای موجود بر اساس مطلوبیت و ضریب اهمیت به شرح جدول شماره ۱۲ مشخص شد. در تصویر شماره ۷ نیز ضریب اهمیت زیرمعیارهای معیار احتیاجات فنی کشور مقایسه شده‌اند.

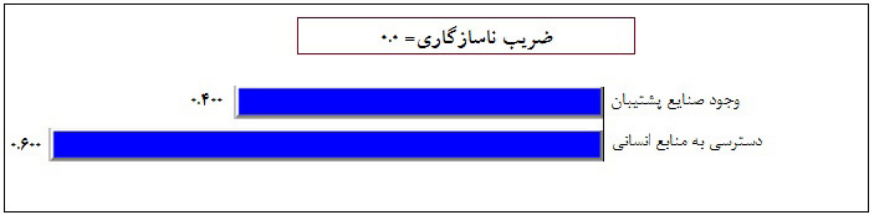
ماتریس پنجم تا هفدهم مربوط به مقایسات زوجی سه روش گداخت بر اساس معیار نیاز فنی به

جدول ۸. ضریب اهمیت معیار سطح دوم (زیرمعیارهای معیار میزان و انواع کاربرد)

معیار	ضریب اهمیت
میزان کاربردی بودن	۰/۳۹۸
قابلیت کاربرد در سایر علوم و فنون	۰/۳۶۷
داشتن سایر کاربردها	۰/۲۳۵

جدول ۱۰. ضریب اهمیت معیار سطح دوم (زیرمعیارهای معیار صنایع پشتیبان و نیروی انسانی)

معیار	ضریب اهمیت
وجود صنایع پشتیبان	۰/۴
دسترسی به منابع انسانی	۰/۶



تصویر ۶. ضریب اهمیت زیرمعیارهای معیار صنایع پشتیبان و نیروی انسانی

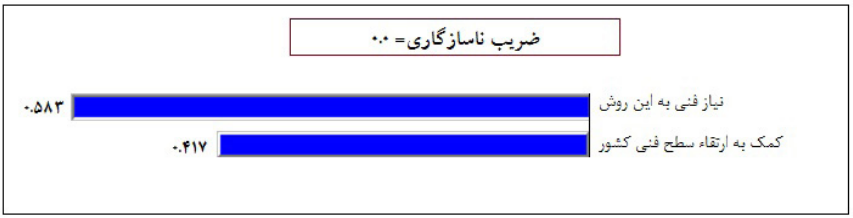
این روش الی معیار سایر کاربردها (ماتریس هفدهم) است. به عنوان نمونه ماتریس ۵ در جدول شماره ۱۴ ارائه شده است. با توجه به تعیین ارزش‌ها و تکمیل ماتریس ضریب اهمیت هر روش بر اساس این معیار (نیاز فنی)، محاسبه شد و اولویت‌بندی روش‌های موجود براساس مطلوبیت و ضریب اهمیت به شرح تصویر شماره ۸ هستند.

جدول ۱۱. ماتریس ۴

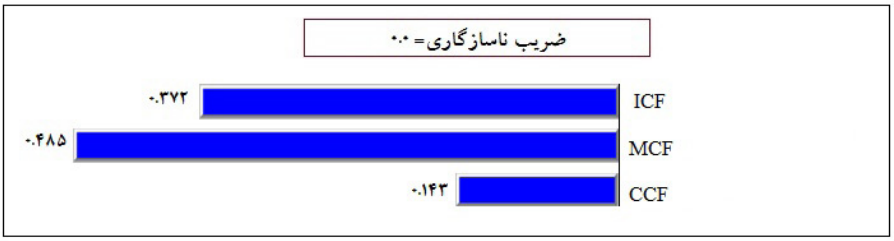
کمک به ارتقای سطح فناوری کشور	نیاز فنی به این روش	معیار
۱/۴	۱	نیاز فنی به این روش
۱		کمک به ارتقای سطح فناوری کشور

جدول ۱۲. ضریب اهمیت معیار سطح دوم (زیرمعیارهای معیار احتیاجات فنی کشور)

معیار	ضریب اهمیت
نیاز فنی به این روش	۰/۵۸۳
کمک به ارتقای سطح فنی کشور	۰/۴۱۷



تصویر ۷. ضریب اهمیت زیرمعیارهای معیار احتیاجات فنی کشور



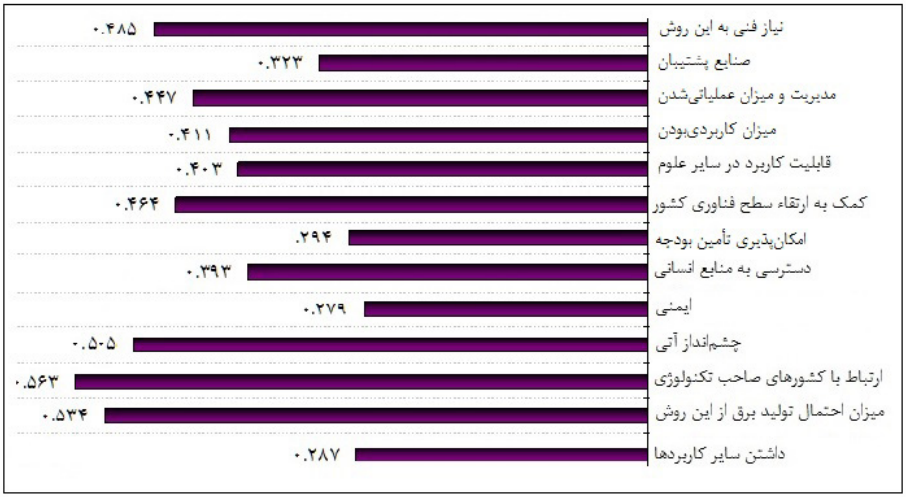
تصویر ۸. ضریب اهمیت هر روش بر اساس معیار نیاز فنی به این روش

جدول ۱۳. ماتریس ۲

معیار نیاز فنی به این روش	ICF	MCF	CCF
ICF	۱	۰/۸	۲/۶
MCF		۱	۳/۴
CCF			۱

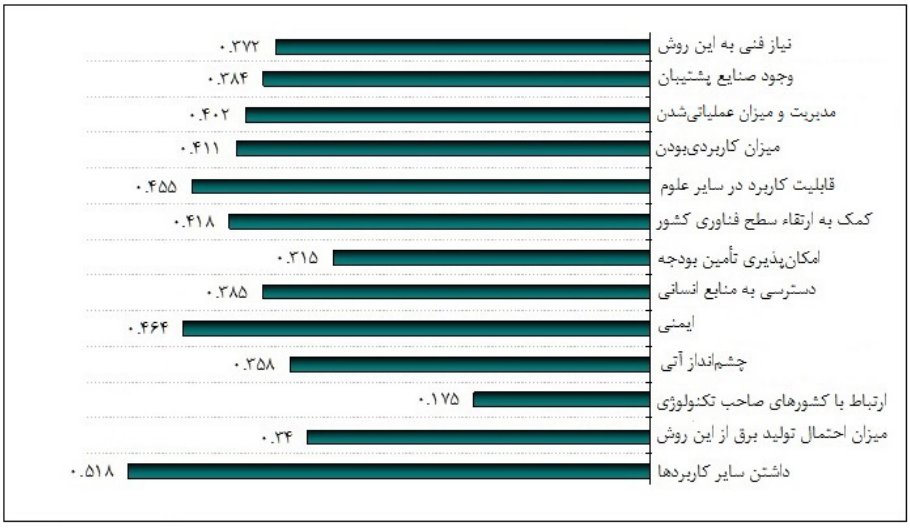
جدول ۱۴. ضریب اهمیت هر روش بر اساس معیار نیاز فنی به این روش

روش	ضریب اهمیت در این معیار
ICF	۰/۳۷۲
MCF	۰/۴۸۵
سایر رهیافت‌های گداخت هسته‌ای	۰/۱۴۳

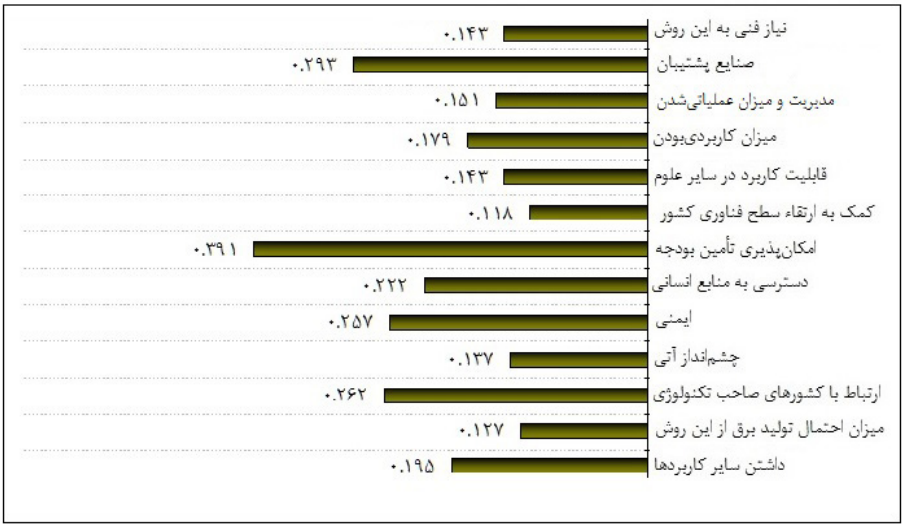


تصویر ۹. ضریب اهمیت معیارها در روش FCM

طبق نمودارهای درجه اهمیت معیارها (تصاویر شماره ۱ تا ۳)، از میان نوزده معیار، معیارهای الزامات قانونی، سطح فناوری، توجیه اقتصادی، سابقه روش، خسارات احتمالی در صورت عدم انجام آن، مقبولیت و حمایت‌های بین‌المللی به دلیل اینکه در دو گزینه ICF و سایر روش‌های گداخت هسته‌ای



تصویر ۱۰. ضریب اهمیت معیارها در روش ICF

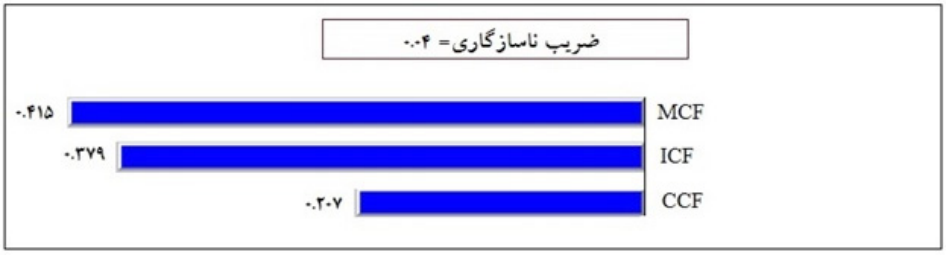


تصویر ۱۱. ضریب اهمیت معیارها در سایر روش‌های گداخت هسته‌ای

از درصد اهمیت و ضریب اهمیت مناسبی برخوردار نبوده و در گزینه MCF هم در محدوده خط امتیاز هستند؛ دارای امتیاز کافی برای رسیدن به مرحله نهایی امتیازدهی نبودند و با توجه به غربالگری‌های صورت گرفته و برآورد میانگین از این سه گزینه، این معیارها برای مرحله گزینش نهایی حذف شدند.

همچنین، جهت رعایت اختصار از ارائه سایر ماتریس‌ها به صورت مجزا (همچون تصویر شماره ۸) در این مقاله امتناع شد. در این مجال خروجی نرم‌افزار برای سیزده معیار نهایی برای سه روش گداخت هسته‌ای در قالب سه شکل (تصاویر شماره ۹ تا ۱۱) جمع‌بندی شده‌اند. همان‌طور که اشاره شد، ضریب ناسازگاری تا سقف ۰/۱ قابل قبول است که میانگین ضریب ناسازگاری محاسبات در این پژوهش به میزان ۰/۰۴ است. خروجی نرم‌افزار در قالب نمودارهای مربوطه همگی به لاتین هستند که برگردان فارسی آن‌ها در این مقاله ارائه شده‌اند.

در تصویر شماره ۱۲، ضریب اهمیت هر روش بر



تصویر ۱۲. ضریب اهمیت هر روش بر اساس اولویت‌بندی انجام‌شده

جدول ۱۵. ضریب اهمیت معیارها در هریک از روش‌های گداخت هسته‌ای

معیارها	روش ICF	روش MCF	سایر روش‌ها
نیاز فنی به این روش	۰/۳۷۲	۰/۴۸۵	۰/۱۴۳
وجود صنایع پشتیبان	۰/۳۸۴	۰/۳۲۳	۰/۲۹۳
نحوه مدیریت	۰/۴۰۲	۰/۴۴۷	۰/۱۵۱
میزان کاربردی بودن	۰/۴۱۱	۰/۴۱۱	۰/۱۷۹
قابلیت کاربرد در سایر علوم	۰/۴۵۵	۰/۴۰۳	۰/۱۴۳
کمک به ارتقای سطح فناوری کشور	۰/۴۱۸	۰/۴۶۸	۰/۱۱۸
امکان‌پذیری تأمین بودجه	۰/۳۱۵	۰/۲۹۴	۰/۳۹۱
دسترسی به منابع انسانی	۰/۳۸۵	۰/۳۹۳	۰/۲۲۲
ایمنی	۰/۴۶۴	۰/۲۷۹	۰/۲۵۷
چشم‌انداز آتی	۰/۳۵۸	۰/۵۰۵	۰/۱۳۷
ارتباط با کشورهای صاحب تکنولوژی	۰/۱۷۵	۰/۵۶۳	۰/۲۶۲
میزان احتمال تولید برق از این روش	۰/۳۴۰	۰/۵۳۴	۰/۱۲۷
داشتن سایر کاربردها	۰/۵۱۸	۰/۲۸۷	۰/۱۹۵

اساس اولویت‌بندی انجام‌شده، نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌شود، با توجه به نتایج و بررسی معیارها از طریق روش دلفی و مبتنی بر نظرات کارشناسی و با در نظر گرفتن نتایج حاصل از فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی و با توجه به ملاحظات و درصد اهمیت و ضریب اهمیت معیارها و مقایسات زوجی مربوط به هریک از روش‌ها، از بین روش‌های یادشده روش محصورسازی مغناطیسی (MCF) با بیشترین امتیاز در اولویت اول قرار دارد و روش‌های محصورسازی اینرسی (ICF) و روش‌های ترکیبی به ترتیب در اولویت‌های بعدی قرار گرفته‌اند.

٤. بحث و نتیجه‌گیری

مهار موفقیت‌آمیز فرایند گداخت هسته‌ای در مدت زمان بسیار اندک نشانگر آن است که انسان بتواند در چند دهه آتی به مهار این انرژی عظیم جهت تأمین انرژی مورد نیاز خود نائل آید؛ بنابراین لازم است در قالب برنامه‌ریزی راهبردی همگام با کشورهای پیشرفته در زمینه توسعه فناوری گداخت هسته‌ای اقدامات لازم در ایران نیز انجام شوند.

در این راستا اولویت‌بندی راهبردی جهت سرمایه‌گذاری هدفمند در هریک از روش‌های مهار

انرژی گداخت هسته‌ای از ملزومات سیاست‌گذاری پایدار در این حوزه محسوب می‌شود.

این پژوهش برای نخستین بار جهت ایجاد وحدت رویه در رتبه‌بندی روش‌های گداخت هسته‌ای و اجتناب از قضاوت‌های غیرعلمی و با درک صحیح از دامنه کاربرد و مزایای هر روش صورت گرفت. مضافاً اینکه این امر، در راستای سیاست‌گذاری پایدار و اجتناب از تمرکز سرمایه بر روی روشی توجیه‌ناپذیر و متعاقباً ممانعت از خسارت‌های محتمل، با استفاده از فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی تحقق یافت.

در این تحقیق، تعداد نوزده معیار شامل: «الزامات قانونی، نیاز فنی به این روش، سطح فناوری، وجود صنایع پشتیبان، سابقه روش، نحوه مدیریت، کاربردی بودن، قابلیت کاربرد در سایر علوم، کمک به ارتقای سطح فناوری کشور، مقبولیت و حمایت‌های بین‌المللی، امکان‌پذیری تأمین بودجه، دسترسی به منابع انسانی، ایمنی، چشم‌انداز آتی، خسارت احتمالی در صورت عدم انجام، توجیه اقتصادی، ارتباط با کشورهای صاحب تکنولوژی و میزان احتمال تولید برق از این روش و داشتن سایر کاربردها برای روش‌های مختلف گداخت هسته‌ای» تعیین شد.

نتایج به‌دست‌آمده از محاسبات با روش دلفی و بررسی نمودارهای پراکندگی نشان داد که از میان این نوزده معیار، معیارهای «الزامات قانونی، سطح فناوری، توجیه اقتصادی، سابقه روش، خسارات احتمالی در صورت عدم انجام آن، مقبولیت و حمایت‌های بین‌المللی» از درجه اهمیت و درصد بالای ارزش‌گذاری برای انتخاب روش بهینه گداخت هسته‌ای برخوردار نیستند؛ بنابراین این معیارها از فرایند اولویت‌بندی حذف شدند.

در مرحله بعد، نتایج به‌دست‌آمده از فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی حاکی از این بود که با توجه به مقایسات زوجی و تجزیه و تحلیل معیارها در سطوح مختلف بر اساس ضریب اهمیت آن‌ها به ترتیب معیارهای «نحوه مدیریت و میزان عملیاتی‌شدن، چشم‌انداز آتی و ایمنی» از اولویت بالاتری در انتخاب روش گداخت هسته‌ای برخوردار بودند. سپس ضریب اهمیت هر معیار برای هر روش استخراج شد. نتایج به شرح مندرج در جدول شماره ۱۵ جمع‌بندی شده‌اند.

روش MCF در هشت مورد از معیارها شامل «نیاز فنی به این روش، نحوه مدیریت، میزان کاربردی بودن، کمک به ارتقای سطح فناوری کشور، دسترسی به منابع انسانی، چشم‌انداز آتی، ارتباط با کشورهای صاحب تکنولوژی و میزان احتمال تولید برق از این روش» در رتبه بالاتری قرار دارد و روش‌های ICF و سایر روش‌های گداخت هسته‌ای در مراتب بعدی هستند. این در حالی است که روش ICF فقط در پنج مورد از معیارها شامل «وجود صنایع پشتیبان، میزان کاربردی بودن، قابلیت کاربرد در سایر علوم، ایمنی و داشتن سایر کاربردها» از دو روش دیگر بالاتر است.

در این میان، گزینه سایر روش‌های گداخت هسته‌ای تنها در «معیار امکان‌پذیری تأمین بودجه» به دلیل هزینه‌های کمتر نسبت به دو روش دیگر برتری دارد.

در انتها با توجه به نتایج مربوط به رتبه‌بندی تک‌تک معیارها با روش‌های معمول گداخت هسته‌ای، روش محصورسازی مغناطیسی یا MCF با ضریب اهمیت معادل با ۴۱۵/۰، به عنوان مناسب‌ترین روش انتخاب شد. بدین ترتیب، یکی از فرضیات تحقیق صورت گرفته که با توجه به برایند

افکار متخصصان این حوزه مطرح شده بود، یعنی ارجحیت داشتن روش MCF نسبت به دو روش دیگر به اثبات رسید.

ضریب اهمیت دو گزینه دیگر، یعنی روش ICF و سایر روش‌ها به ترتیب معادل ۰/۳۷۹ و ۰/۲۰۷ است. با حصول این اولویت‌بندی هدف پژوهش حاضر محقق شد.

اما جمع‌بندی نهایی بستگی به اهداف راهبردی کشور دارد. طبق سند افق چشم‌انداز، ایران می‌بایست از منظر فناوری‌های پیشرفته در منطقه اول و از منظر کسب دانش فنی هم‌تراز کشورهای پیشرفته شود. چنانچه اهداف راهبردی کشور در توسعه فناوری گداخت هسته‌ای تولید انرژی باشد، طبعاً روش MCF نسبت به ICF از اولویت بیشتری برخوردار است.

از طرفی، هرچند سایر روش‌های گداخت به روش‌های ترکیبی، یعنی ترکیب دو روشMCF و ICF نیز شناخته شده‌اند، ولی طبق لیست زیرشاخه‌های روش‌های ترکیبی (قرشی و صدیق‌زاده، ۱۳۹۴: ۲۰۵)، غالباً از منظر سطح فناوری به روش MCF تشابه و هم‌خوانی بیشتری دارند.

همچنین، این سیستم‌ها از منظر تولید برق به روش‌های میانبر و سهل‌الوصل‌تر شناخته شده‌اند و با توجه به اینکه در معیار «امکان‌پذیری تأمین بودجه» از امتیاز بیشتری نسبت به دو روش دیگر برخوردار هستند و بودجه مورد نیاز برای روش‌های میان‌بر در قیاس با هزینه‌های نجومی لازم برای MCF بسیار اندک است؛ بنابراین در صورت اتخاذ راهبرد توسعه فناوری گداخت هسته‌ای به روش محصورسازی مغناطیسی، طبعاً نیل به روش‌های میان‌بر نیز به موازات روش اول و یا به تعبیری به عنوان پروژه‌های جانبی و سرریز روش MCF، قابل انجام خواهند بود.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

اصول اخلاقی تماماً در این مقاله رعایت شده است.

حامی مالی

هزینه این پژوهش توسط پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای تأمین شده است.

مشارکت نویسندگان

نویسندگان در تهیه مقاله به صورت یکسان مشارکت داشته‌اند.

تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان هیچ‌گونه تعارض منافعی در این پژوهش وجود ندارد.

منابع فارسی

ایجابی، ا.، بیات، ر. ا.، شیروانی ناغانی، م. (۷۹۳۱). اولویت‌بندی انواع انرژی در ایران با هدف افزایش امنیت انرژی در افق ۴۰۴۱ (با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی). *فصلنامه مطالعات راهبردی سیاست‌گذاری عمومی*، ۸ (۹۲)، ۱۳۵-۱۵۷.

پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای. (۱۹۳۱). اسناد طرح ملی گداخت هسته‌ای، معاونت علمی و فناوری ریاست جمهور.

قریشی، س .ا .ح.، و صدیق‌زاده، ا. (۴۹۳۱). انرژی گداخت هسته‌ای راهبردی اجتناب‌ناپذیر در افق چشم‌انداز انرژی کشور. *فصلنامه علمی پژوهشی راهبرد*، ۴۲*(۱)*، ۴۳۲-۵۰۲.

فهیمی، ف.غ. ر.، و اولاد عسکری، م. (۱۹۳۱). اولویت‌بندی معیارهای حفاظت در پارک ملی خجیر با به‌کارگیری روش فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی. *مجله علوم محیطی*، ۱ ۰(۲)، صص ۱۵۹-۱۷۲.

References

Abdullah, L., & Zulkifli, N. (2015). Integration of fuzzy AHP and interval type-2 fuzzy DEMATEL: An application to human resource management. *Expert Systems with Applications, 42*(9), 4397-4409. [DOI:10.1016/j.eswa.2015.01.021]

Dalkey, N., & Helmer, O. (1963). An experimental application of the Delphi method to the use of experts. *Management Science, 9*(3), 458-467. [DOI:10.1287/mnsc.9.3.458]

Fahimi, F. G., & Oladaskari, M. (2013). [Prioritizing conservation criteria in Khojeer National Park Through the AHP Method (Persian)]. *Enviromental Sciences, 10*(2), 159-172. https://envs.sbu.ac.ir/article_97211.html

Ghorashi , A. H. (2007). Prospects of nuclear power plants for sustainable energy development in Islamic Republic of Iran. *Energy Policy, 35*(3), 1643-1647. [DOI:10.1016/j.enpol.2006.05.007]

Ghorashi , A. H., & Sedigh Zadeh, A.(2015). [Plasma and nuclear fusion Faculty, Nuclear Science & Technology Institution, Atomic Energy Organization Of Iran (Persian)]. T*he Scientific Journal of Strategy, 24*(1), 205-234. [DOI:10.1016/j.enpol.2006.05.007]

Ijabi, E., Bayat, R., & Shirvani, M. (2019). [Prioritization energy types in Iran with the aim of increasing energy security in the 1404 horizon (using hierarchical analysis method) (Persian)]. *Strategic Studies of public policy, 8*(29), 135-157. http://sspp.iranjournals.ir/article_34717.html?lang=en

Okoli, C., & Pawlowski, S. D. (2004). The Delphi method as a research tool: An example, design considerations and applications. *Information & management, 42*(1), 15-29. [DOI:10.1016/j.im.2003.11.002]

Saaty, T. L. (1970). *Optimization in integers and related extremal problems.* New York: McGraw-Hill.

Sovacool, B. K. (2010). *The Routledge handbook of energy security.* London: Routledge. [DOI:10.1016/j.im.2003.11.002]

Sovacool, B. K., & Cooper, C. (2008). Nuclear nonsense: Why nuclear power is no answer to climate change and the world's Post-kyoto energy challenges. *William & Mary Environmental Law & Policy Review, 33*(1), 1-119. https://scholarship.law.wm.edu/cgi/viewcontent.cgi?referer=https://www.google.com/&httpsredir=1&article=1040&context=wmelpr

Tseng, Y. F., & Lee, T. Z. (2009). Comparing appropriate decision support of human resource practices on organizational performance with DEA/AHP model. *Expert Systems with Applications, 36*(3), 6548-6558. [DOI:10.1016/j.eswa.2008.07.066]