پژوهشنامه اقتصاد انرژی ایران
سال چهارم، شماره ۱۴، بهار ۱۳۹۴، صفحات ۲۱۵- ۱۹۱

اولویت‌بندی نیروگاه‌های تولید برق در ایران با استفاده از مدل‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه

داود منظور[۱] و علیرضا رحیمی[۲]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۱/۱۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۳/۲۶

چکیده

با توجه به رشد متوسط سالانه ۶ درصد در مصرف برق کشور و ضرورت احداث بیش از سه هزار مگاوات نیروگاه جدید لازم است نوع نیروگاه‌ها براساس طیف گسترده‌ای از معیارها اولویت‌گذاری شود. در این مقاله با در نظر گرفتن معیارهای مختلف اقتصادی، زیست محیطی، سیاسی و اجتماعی، امنیت انرژی و فنی و با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی برای وزن‌دهی به معیارها و محاسبه میزان معیارهای کیفی و روش پرومته برای محاسبه میزان معیارهای کمی به ارزیابی و اولویت‌بندی گزینه‌های مختلف تولید برق پرداخته شده است. در بین ۲۳ معیاری که خبرگان اوزان هر یک را تعیین کردند هزینه تمام‌شده برای هر کیلووات ساعت در رتبه اول، امنیت تامین منبع ورودی نیروگاه در رتبه دوم، سرمایه‌گذاری اولیه در رتبه سوم، تاثیر در حفظ و صرفه‌جویی در منابع پایان‌پذیر در رتبه چهارم و تاثیر در تنوع بخشی به سیستم عرضه در رتبه پنجم قرار گرفت و در انتها نیز سه معیار تاثیرگذاری بر مردم سایر کشورها (قدرت نرم)، سرریز دانشی و وسعت زمین مورد استفاده قرار دارند. نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد به ترتیب نیروگاه‌های بادی، برق‌آبی، فتوولتائیک، سیکل ترکیبی، هسته‌ای، گازی و بخاری در اولویت قرار دارند.

طبقه‌بندی *JEL*: *Q4, D8*

واژه‌های کلیدی: نیروگاه، رویکرد تصمیم‌گیری چندشاخصه، پرومته، تحلیل سلسله مراتبی، انرژی

۱- دانشیار، دانشکده اقتصاد، دانشگاه امام صادق- نویسنده مسئول

Email: manzoor@isu.ac.ir

۲- کارشناسی ارشد، دانشکده اقتصاد، دانشگاه امام صادق

Email: ar.rahimi@isu.ac.ir

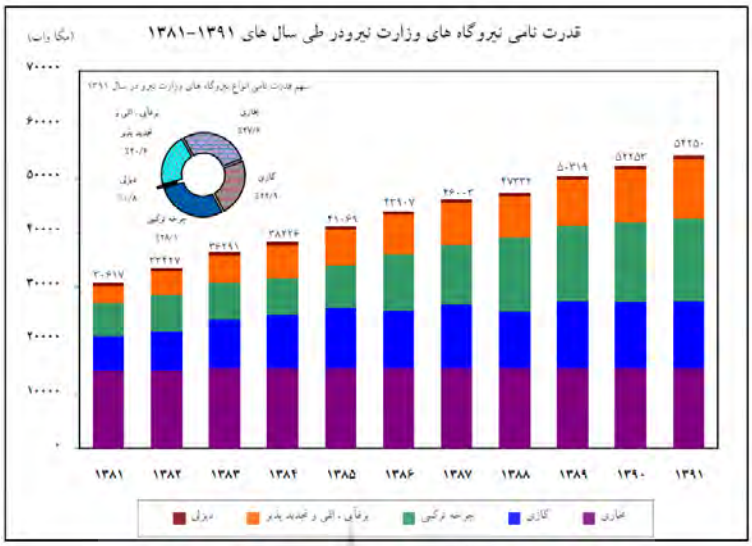
۱- مقدمه

تا پیش از رخداد بحران انرژی در دهه ۷۰، منابع انرژی فسیلی به عنوان منابع انرژی‌های مرسوم و ارزان قیمت در دسترس بودند و بلوغ تکنولوژی‌های استفاده از این منابع باعث محبوبیت و نفوذ آن‌ها در جوامع مختلف شده بود. بعد از بحران انرژی در دهه ۷۰ و با افزایش سریع قیمت انرژی و همچنین نگرانی از اتمام منابع فسیلی انرژی، توجه کشورها به سایر منابع در دسترس برای تامین انرژی جلب شد. همچنین طی سال‌های بعد، افزایش نگرانی‌های زیست‌محیطی منجر به حرکت به سمت تکنولوژی‌های پاک‌تر شد و در نتیجه، تکنولوژی‌های مختلف با هدف سیاست‌گذاری در مورد آینده منابع تامین انرژی از وجوه مختلفی مانند وجوه فنی، جذابیت‌های اقتصادی، فناوری‌ها، مسایل زیست‌محیطی، مسائل سیاسی و اجتماعی و امنیت تامین انرژی مورد توجه قرار گرفتند و به تدریج تکنولوژی‌های جدیدی وارد عرصه رقابت با تکنولوژی‌های مرسوم فسیلی شدند.

طی سال‌های اخیر، افزایش سهم مصرف داخلی منابع فسیلی از کل تولید این منابع، کسب ارزش افزوده بیشتر، لزوم حفظ منابع انرژی برای نسل‌های آینده و مسائل زیست‌محیطی در منظر سیاست‌گذاران ایران مورد توجه ویژه قرار گرفته است به طوری که دیگر معیار ارزان بودن انرژی تولیدی، به عنوان تنها معیار تصمیم‌گیران کشور در انتخاب تکنولوژی تولید تلقی نمی‌شود. مسائلی مانند پایان‌پذیری سوخت‌های فسیلی، امنیت انرژی و مسائل زیست‌محیطی نیز در مجموعه ملاحظات ارزیابی سیاست‌گذاران در نظر گرفته می‌شود. با این حال لازم است تا به ابعاد مختلف مدیریت عرضه برق به عنوان یکی از بزرگ‌ترین مصرف‌کنندگان منابع انرژی فسیلی در ایران توجه شود.

ظرفیت نصب شده نیروگاه‌های کشور با رشدی حدود ۷۷ درصد از حدود ۳۰ هزار مگاوات در سال ۱۳۸۱ به حدود ۵۴ هزار مگاوات در سال ۱۳۹۱ افزایش یافته است[1].

۱- آمار تفصیلی صنعت برق ایران ویژه مدیریت راهبردی ۱۳۹۱



منبع: آمار تفصیلی صنعت برق ایران ویژه مدیریت راهبردی ۱۳۹۱

نمودار ۱- قدرت نامی نیروگاه‌های وزارت نیرو طی سال‌های ۱۳۹۱ - ۱۳۸۱

میزان مصرف انرژی الکتریکی در سال ۱۳۹۱ با رشدی معادل ۵/۶ درصد نسبت به سال ۱۳۹۰ به ۱۹۴۱۴۸ میلیون کیلووات ساعت افزایش یافته است. در ایران تقاضای برق تکیه زیادی بر سوخت‌های فسیلی داشته و بیشترین ظرفیت نصب شده نیروگاهی در ایران به نیروگاه‌های گازی، بخاری، سیکل ترکیبی اختصاص دارد که حدود ۸۴ درصد ظرفیت نصب شده نیروگاهی کشور را در اختیار دارند. در مقایسه با سایر کشورها و مناطق دنیا نیز مشاهده می‌شود که به طور مثال ۵۰ درصد و ۳۲ درصد ترکیب سبد انرژی اتحادیه اروپا و آمریکا به نیروگاه‌هایی غیر از فسیلی اختصاص دارد و روند حرکتی ترکیب نیروگاه‌های تولید برق در این کشورها به سمت انرژی‌های تجدیدپذیر و هسته‌ای و کاستن از انرژی‌های فسیلی پیش می‌رود[1].

با توجه به مسائل ذکر شده، یکی از مهم‌ترین سوالات در زمینه سیاست‌گذاری برای آینده صنعت برق ایران، انتخاب تکنولوژی‌های مناسب تولید برق با توجه به شرایط مختلف اقتصادی، اجتماعی، سیاسی، فنی و محیط زیستی است. از آنجا که

1- *World Energy Outlook* (2012)

ایران کشوری سرشار از منابع نفتی است، به نظر می‌رسد طی سال‌های اخیر انتخاب نوع نیروگاه‌ها به طور عمده براساس حجم سرمایه‌گذاری اولیه مورد نیاز و دسترسی به منابع انرژی اولیه صورت گرفته است و اولویت‌بندی انواع فناوری‌های تولید برق براساس مجموعه جامعی از معیارها و ضوابط فنی، اقتصادی، اجتماعی و سیاسی، زیست محیطی و... کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

سوال اصلی در این مقاله این است که با توجه به شرایط فعلی و آینده پیش روی کشور از منظر سیاست‌گذاران و تصمیم‌گیران برق کشور، گزینه‌های فعلی تولید برق در ایران با توجه به جنبه‌های نام‌برده در چه اولویتی قرار دارند و هدف‌گذاری‌های کلان توسعه شبکه برق ایران باید بر پایه توسعه کدامیک از نیروگاه‌های مورد مطالعه باشد. در این مقاله با در نظر گرفتن دغدغه‌های سیاست‌گذاران به مقایسه نیروگاه‌های فتوولتائیک، بادی، آبی، گازی، سیکل ترکیبی، بخاری و هسته‌ای که می‌توانند به عنوان نیروگاه‌های متمرکز مورد استفاده قرار گیرند، پرداخته شده است.

در این مقاله ابتدا به مرور مطالعات پیشین پرداخته و سپس روش تحلیلی مورد استفاده تشریح می‌شود. در ادامه معیارهای ارزیابی نیروگاه‌ها با توجه به نظرات خبرگان، وزن‌دهی شده و سرانجام به اولویت‌بندی انواع فناوری‌های نیروگاهی پرداخته شده است.

۲- مرور ادبیات

اتماجا و بوراک[1] (۲۰۱۲) انرژی را به عنوان مهم‌ترین پارامتر توسعه اجتماعی معرفی کرده‌اند. آنها به ارزیابی نیروگاه‌های برق در ترکیه با استفاده از روش فرآیند تحلیل شبکه‌ای پرداخته‌اند. برای انتخاب بهترین نیروگاه از میان گزینه‌های مختلف، چند معیار اصلی و تعدادی معیار فرعی مرتبط با آن‌ها در نظر گرفته‌اند که معیارهای فنی، اقتصادی، زیست محیطی و اجتماعی معیارهای اصلی این پژوهش بوده است. براساس این رتبه‌بندی به ترتیب نیروگاه‌های اتمی، گاز طبیعی، زمین‌گرمایی، بادی، برق‌آبی و ذغالی در اولویت فناوری‌های تولید برق در ترکیه قرار گرفته‌اند.

1- Ediz Atmaca, Hasan Burak Basar

توپکو[1] و دیگران (۲۰۰۴) نیز در تحقیقی از شیوه‌ی تصمیم‌گیری چند شاخصه برای ارزیابی منابع انرژی با هدف انتخاب گزینه‌ی مناسب برای تولید برق در ترکیه با روش پرومته پرداخته‌اند. در این مطالعه به معیارهای پنج‌گانه‌ی مقایسه‌ی گزینه‌ها شامل مناسب بودن، پایداری، مانایی، هزینه‌های خارجی و قیمت، وزن یکسان داده شده است. براساس یافته‌های این تحقیق برق بادی در مقایسه با سایر گزینه‌ها بهترین انتخاب برای تولید برق ارزیابی شده است. نیروگاه‌های برق‌آبی، فتوولتائیک، زیست توده، هسته‌ای، گاز طبیعی در ردهای بعدی قرار دارند.

آتاناسیوس[2] (۲۰۱۲) در یونان با استفاده از تحلیل سلسله مراتبی به مطالعه و ارزیابی نیروگاه‌های تولید برق از ابعاد گوناگون پرداخته است. یکی از ابعاد مطالعات انجام‌شده توسط این محقق، تاثیر انواع نیروگاه‌ها بر استانداردهای زندگی است. برای این منظور این نیروگاه‌ها از جنبه‌های مثبت و منفی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. جنبه‌های مثبت در نظر گرفته شده عبارتند از: جنبه‌های اقتصادی اجتماعی مانند اشتغال‌زایی، میزان جبران خسارت و مقبولیت اجتماعی. معیارهای منفی نیز به آن دسته از عواملی بستگی دارند که روی کیفیت زندگی تاثیرگذار هستند، این معیارها عبارتند از: میزان انتشار آلاینده‌های غیر رادیواکتیو و آلاینده‌های رادیواکتیو، زمین مورد نیاز و تعداد تلفات در حوادث. براساس یافته‌های این پژوهش نیروگاه‌های زمین گرمایی، بادی، زیست توده، فتوولتائیک، برق‌آبی، اتمی، سیکل ترکیبی، گازی، نفتی و ذغالی به ترتیب در اولویت گزینه‌های تولید برق یونان قرار گرفتند.

پژوهش دیگری که در حوزه انرژی و برای انتخاب بهترین گزینه‌های تولید برق انجام شده، پژوهشی است که جو- شیونگ و دیگران[3] در مورد کشور تایوان در سال ۱۹۹۲ انجام داده‌اند.

برای تعیین بهترین گزینه‌های تامین انرژی در کشور تایوان، مقایسه بین انتخاب‌های مختلف صورت گرفته است. جهت مقایسه بین این گزینه‌ها از چهار دسته معیار استفاده شده است که عبارتند از: فناورانه، اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی. روش تصمیم‌گیری در این تحقیق، تحلیل ترکیبی از روش‌های تحلیل سلسله مراتبی و پرومته

1- Topcu
2- Athanasios
3- Gwo-Hshiung

بوده است. کاربرد تحلیل سلسله مراتبی در استخراج اوزان معیارها بوده است. کاربرد پرومته نیز برای مقایسه گزینه‌ها براساس امتیاز هر گزینه در معیارها و اوزان تخصیص داده شده به معیارها و معیارهای فرعی بوده است. انرژی حرارتی خورشیدی، فتوولتائیک، بادی، زمین گرمایی، پیل سوختی، بیو انرژی، انرژی اقیانوسی و هیدروژنی به ترتیب در اولویت گزینه‌های تولید برق تایوان قرار گرفتند.

خاتمی[1] (۲۰۱۳) با روش پرومته به ارزیابی انواع فناوری‌های تجدیدپذیر تولید برق در منطقه سیستان و بلوچستان پرداخته است. معیارهای مورد بررسی در این مطالعه هزینه سرمایه‌گذاری مهندسی، تامین تجهیزات و ساخت، هزینه بهره‌برداری و نگهداری سالانه، کارایی، ضریب ظرفیت، طول عمر، مصرف داخلی و پتانسیل منابع بوده است که براساس این معیارها پیل‌سوختی، گاز لندفیل، فاضلاب، فضولات حیوانی، پسماندهای جنگل، باد، تولید برق از زباله‌ها با روش هاضم، زمین گرمایی، فتوولتائیک متصل به شبکه، زباله سوز احتراقی، فتوولتائیک خارج از شبکه، کلکتور سهموی خطی، برج گیرنده مرکزی و استرلینگ به ترتیب در اولویت قرار گرفته‌اند.

باقری مقدم و همکاران (۲۰۱۱) به بررسی ابعاد روش‌شناختی یک مسأله تصمیم‌گیری چند شاخصه پرداخته‌اند و برای حل مسائل برنامه‌ریزی الکتریسیته پایدار، استفاده از ترکیبی از روش‌های پرومته دو و *AHP* را پیشنهاد می‌کنند.

جدول ۱- خلاصه‌ای از مطالعات پیشین

نویسنده	کشور	سال	روش	معیارها	
اتماجا	ترکیه	۲۰۱۲	تحلیل شکاف	اشتغال‌زایی	مقبولیت اجتماعی
				تلفات حوادث	زمین مورد نیاز
				انتشار آلاینده‌های رادیواکتیو	سرمایه‌گذاری اولیه
				هزینه سوخت	هزینه‌های جانبی
				هزینه تعمیر و نگهداری	بازدهی
				ضریب دسترسی	نسبت منابع به مصرف
				ضریب ظرفیت	

1- Khatami

ادامه جدول ۱- خلاصه‌ای از مطالعات پیشین

نویسنده	کشور	سال	روش	معیارها	
توپکو	ترکیه		پرومته	قیمت	هزینه خارجی
				مانایی	پایداری
				مناسب بودن	
آتاناسیوس	یونان	۲۰۱۲	پرومته	مقبولیت اجتماعی	میزان جبران خسارت
				اشتغال‌زایی	زمین مورد نیاز
				انتشار آلاینده‌های رادیواکتیو	تلفات حوادث
				انتشار آلاینده‌های غیر رادیواکتیو	
آتاناسیوس	یونان	۲۰۰۹	تحلیل سلسله مراتبی	هزینه‌های خارجی	هزینه سوخت
				هزینه تعمیر و نگهداری	هزینه سرمایه‌گذاری اولیه
				ضریب ظرفیت	ضریب دسترسی
				نسبت ذخایر به تولید انرژی اولیه	بازدهی
آتاناسیوس	یونان	۲۰۰۸	تحلیل سلسله مراتبی	هزینه‌های خارجی	هزینه سوخت
				هزینه تعمیر و نگهداری	هزینه سرمایه‌گذاری اولیه
				ضریب ظرفیت	ضریب دسترسی
				نسبت ذخایر به تولید انرژی اولیه	بازدهی
جو شیونگ	تایوان	۱۹۹۲	تحلیل سلسله مراتبی - پرومته	دشوار بودن دسترسی به فناوری	بازده سیستم انرژی
				دشوار بودن افزایش ظرفیت	پایایی عرضه
				امکان جایگزینی انرژی نفت	گستردگی استفاده
				تاثیر بر صنایع	آلوده‌کنندگی آب
				آلوده‌کنندگی خاک	تاثیر بر چشم‌اندازهای طبیعی و مناظر
				هزینه توسعه	هزینه تولید
				دوره ساخت	تولید سالانه
خاتمی	ایران	۲۰۱۳	پرومته	هزینه سرمایه‌گذاری	هزینه بهره‌برداری و نگهداری
				کارایی	ضریب ظرفیت
				طول عمر	مصرف داخلی
				پتانسیل منابع	

۳- روش‌شناسی تصمیم‌گیری چندشاخصه

در این مقاله از معیارهای کمی و کیفی برای اولویت‌بندی بین فناوری‌های نیروگاهی استفاده شده است، بنابراین برای اولویت‌بندی گزینه‌های تولید برق با معیارهای کمی با توجه به اهمیت فواصل بین معیارها از روش پرومته و برای معیارهای کیفی با توجه به مطرح بودن نسبت بین معیارها از روش *AHP* استفاده شده است. رتبه‌بندی نهایی تکنولوژی‌های تولید برق نیز از روش ترکیبی این دو روش به شرح زیر استفاده شده است.

امتیاز نهایی کیفی مجموع وزن‌های کیفی × امتیاز نهایی کمی مجموع وزن‌های کمی= امتیاز نهایی گزینه تولید برق

روش تحلیل سلسله مراتبی یکی از معروف‌ترین فنون تصمیم‌گیری چندشاخصه است. این روش، اولین بار توسط توماس. ال. ساعتی[1] (۱۹۸۰) ارائه شد. تصمیم‌گیری در مسائل چندشاخصه با استفاده از تحلیل سلسله مراتبی با تشکیل درخت سلسله مراتبی و تصمیم دو به دو آغاز می‌شود.

درخت سلسله مراتبی، یک نمایش گرافیکی از مسأله پیچیده واقعی بوده که در رأس آن هدف کلی مسأله و در سطوح بعدی معیارها و گزینه‌ها قرار دارند. اساس روش تحلیل سلسله مراتبی بر مبنای مقایسات زوجی قرار دارد. بنابراین پس از تشکیل درخت سلسله مراتب تصمیم، عوامل و عناصر موجود در هر سطح به ترتیب از سطح پایین به بالا، نسبت به تک تک عوامل و عناصر موجود در سطوح بالاتر به صورت دو به دو توسط تصمیم‌گیرنده مورد مقایسه قرار می‌گیرند و به این ترتیب، جدول‌های مقایسه‌ای ایجاد می‌شوند. مقایسه‌های زوجی و امتیازدهی مربوطه براساس جدول استاندارد شده ساعتی به صورت جدول ۲ انجام می‌شود.

1- Thomas. L. Saaty

جدول ۲- مقدار عددی ترجیحات

مقدار عددی	درجه اهمیت در مقایسه دو به دو
۱	ترجیح یکسان
۳	نسبتا مرجح
۵	قویا مرجح
۷	ترجیح بسیار قوی
۹	بی‌اندازه مرجح

جدول ۲ نشان می‌دهد که امتیازدهی در جدول‌های مقایسه‌ای و یا ماتریس مقایسات زوجی در دامنه ۱/۹ تا ۹ است. هنگام مقایسه دو به دو، ابتدا معادل اهمیت، به طریق رتبه‌ای مشخص و سپس مقدار عددی متناظر با آن در جدول مقایسه‌ای ذکر می‌شود. حاصل این کار، تشکیل یک ماتریس است که آن را A می‌نامیم و عناصر آن را با a_{ij} نشان می‌دهیم. بنابراین A یک ماتریس مثبت و معکوس‌پذیر است.

$$A = \left(a_{ij}\right) \qquad i = ۱,۲,\ldots,n$$

$$a_{ji} = \frac{۱}{a_{ij}} \qquad j = ۱,۲,\ldots,m$$

در صورت برقراری رابطه $i = j$، $a_{ij} = ۱$ بوده و عناصر قطر ماتریس A برابر با یک هستند، زیرا اهمیت هر عامل نسبت به خودش یکسان است. همچنین با توجه به خاصیت عکس‌پذیری ($a_{ji} = \frac{۱}{a_{ij}}$) تنها به تعداد $\frac{n(n-۱)}{۲}$ مقایسه زوجی در مورد یک ماتریس $n \times n$، توسط تصمیم‌گیرنده لازم خواهد بود.

چنانچه لازم باشد براساس تخصص و مسئولیت، به نظرات تصمیم‌گیرندگان، اولویت (اهمیت) ویژه‌ای داده شود، می‌توان به نظرات هر تصمیم‌گیرنده وزن W_L داد. با این وجود باید خاطرنشان کرد که هنگامی می‌توان از ماتریس مقایسه زوجی هر یک از تصمیم‌گیرندگان در فرآیند تصمیم‌گیری گروهی تحلیل سلسله مراتبی استفاده کرد که دارای «نرخ سازگاری» قابل قبول باشد.

جهت محاسبه ارزش ماتریس‌ها و نیز بی‌مقیاس کردن آن‌ها، روش‌های گوناگونی وجود دارد. نرم‌افزار اکسپرت چویس[1] نرم‌افزار تخصصی آنالیز تحلیل سلسله مراتبی است و محاسبات را به راحتی انجام می‌دهد، این نرم‌افزار مورد تایید ساعتی نیز است.

روش پرومته از خانواده روش‌های رتبه‌بندی برتری بوده که شامل پرومته یک برای رتبه‌بندی قسمتی از گزینه‌ها و پرومته دو برای رتبه‌بندی کامل گزینه‌ها است. این روش در دهه ۱۹۸۰ میلادی به وسیله دو پروفسور بلژیکی به نام ژتان پیر برنز[2] و برتراند مارسکال[3] برای انجام رتبه‌بندی ارائه شد.

روش پرومته که روش منتخب جهت رتبه‌بندی انواع گزینه‌های تولید برق براساس معیارهای کمی در کشور قرار گرفته است و با نرم‌افزار ویژال پرومته[4] قابل انجام است، به صورت خلاصه در ادامه بیان شده است:

تعیین میزان تفاوت ارزیابی هر دو گزینه، نسبت به هر معیار:

$$d_j(a,b) = g_j(a) - g_j(b)$$

که در آن، $g_j(a)$ و $g_j(b)$ به ترتیب، نمایانگر ارزیابی گزینه‌های a و b نسبت به معیار jام است. همچنین، $d_j(a,b)$ نشان‌دهنده میزان تفاوت است.

بکارگیری تابع ترجیحات:

$$P_j(a,b) = F_j\left[d_j(a,b)\right] \quad \forall a,b \in A$$

که در آن، $P_j(a,b)$ نشان‌دهنده‌ی ترجیح گزینه‌ی a به گزینه b در هر معیار، به صورت تابعی از $d_j(a,b)$ است.

محاسبه شاخص ترجیح دو گزینه بر پایه تمامی معیارها:

$$\pi(a,b) = \sum_{j=1}^{k} P_j(a,b) w_j, \quad \forall a,b \in A$$

1- Expert Choice
2- Jean – Pierre Brans
3- Bertrand Mareschal
4- Visual Promethee

که در آن، $\pi(a,b)$ (از مقدار ۰ تا ۱) به صورت مجموع موزون $P_j(a,b)$ برای هر معیار، تعریف شده و w_j نشانگر وزن معیار j ام است.

محاسبه جریان‌های رتبه‌بندی برتری:

$$\phi^+(a) = \frac{1}{n-1}\sum_{x\in A}\pi(a,x), \qquad \phi^-(a) = \frac{1}{n-1}\sum_{x\in A}\pi(x,a)$$

که در آن، $\phi^+(a)$ و $\phi^-(a)$ به ترتیب، نشان‌دهنده جریان رتبه‌بندی مثبت و جریان رتبه‌بندی منفی برای هر گزینه هستند.

محاسبه جریان رتبه‌بندی برتری خالص:

$$\phi(a) = \phi^+(a) - \phi^-(a)$$

که در آن، $\phi(a)$ نشان‌دهنده جریان رتبه‌بندی برای هر گزینه است (برنس و مارشال، ۱۹۸۴).

٤- معیارهای مورد استفاده در ارزیابی چندشاخصه فناوری‌های نیروگاهی

معیارهای کلیدی که در ترجیحات سیاست‌گذاران جهت اولویت‌بندی گزینه‌های تولید برق لحاظ می‌شود از روش‌های مختلفی به دست می‌آیند. در این مقاله برای به دست آوردن معیارها با مرور مطالعات پیشین مجموعه‌ای از معیارها جمع‌آوری شده و سپس نظرات تصمیم‌گیران نیز در رابطه با معیارهای پیشنهادی اخذ شد.

در نمودار ۲ درخت نهایی معیارهای تصمیم‌گیری برای مقایسه میان فناوری نیروگاهی با ۲۳ معیار در پنج گروه اصلی اقتصادی، زیست محیطی، سیاسی و اجتماعی، امنیت انرژی و فنی نشان داده شده و در ادامه به اختصار هر یک از این معیارها شرح داده شده است.

نمودار ۲- درخت معیارهای تصمیم‌گیری

یکی دسته از معیارهای کلیدی در انتخاب تکنولوژی تولید برق، معیارهای اقتصادی است. با توجه به محدود بودن منابع مالی و از طرف دیگر نیاز به تولید برق جهت پاسخ‌گویی به نیاز مصرف‌کنندگان، سرمایه‌گذاران و تولیدکنندگان برق، توجه به معیار اقتصادی در انتخاب گزینه تولید برق دارای اهمیت است.

معیارهای اقتصادی شامل زیرمعیارهای هزینه تمام‌شده تولید برق، هزینه سرمایه‌گذاری اولیه نیروگاه‌ها، اشتغال‌زایی و حجم بازار جهانی است. میزان سرمایه اولیه جهت احداث نیروگاه به عنوان دغدغه اصلی سرمایه‌گذاران مطرح است. بنابراین لازم است تا سیاست‌گذار، این عامل بسیار مهم را به صورت جداگانه به عنوان معیاری در تصمیم‌گیری انتخاب فناوری لحاظ کند؛ قیمت تمام‌شده تولید برق به صورت دلار بر کیلووات ساعت محاسبه می‌شود که قیمت یک واحد تولید برق را با احتساب هزینه‌های سرمایه‌گذاری، هزینه‌های تعمیر و نگهداری، هزینه سوخت و در بعضی موارد هزینه اثرات خارجی در طول چرخه عمر نیروگاه را شامل می‌شود.

توسعه برق نیروگاهی و استفاده از تکنولوژی‌های تولید برق علاوه بر تامین انرژی، اثر مثبتی بر سطح اشتغال دارد. حجم بازار جهانی نشان دهنده میزان حجم دلاری است

که در آینده هر یک از فناوری‌های تولید برق می‌توانند در بازار جهانی در اختیار بگیرند و این برای آن منظور است که میزان فرصت‌های احتمالی صادراتی مشخص شود تا سرمایه‌گذاران بتوانند در آینده تمرکز خود را روی فناوری با حجم بالاتر بازار جهانی قرار دهند.

یکی دیگر از معیارهای ارزیابی گزینه‌های مختلف تولید برق، میزان انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی آن‌ها است. بخش برق از مهم‌ترین منابع انتشار گازهای گلخانه‌ای در سطح جهان است. کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای از بخش برق، مستلزم استفاده از الگوهای مختلف انرژی برای تولید برق است. مقایسه میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای از فناوری‌های مختلف برق به انتخاب روش‌های موثر در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای کمک می‌کند. در این مقاله آلاینده‌های زیست محیطی به سه بخش گازهای آلاینده، گازهای گلخانه‌ای و آلاینده‌های رادیواکتیو تقسیم شده‌اند.

گازهای گلخانه‌ای ($GHGs$) اجزای گازی از جو هستند که به «اثر گلخانه‌ای» کمک می‌کنند، اما عدم اطمینان درباره این موضوع وجود دارد که آب و هوای زمینی چگونه نسبت به این گازها واکنش نشان می‌دهد و دمای نقاط مختلف جهان افزایش می‌یابد. برخی گازهای گلخانه‌ای به طور طبیعی در جو زمین وجود دارند در حالی که برخی دیگر در اثر فعالیت‌های بشری به وجود می‌آیند. به طور طبیعی گازهای گلخانه‌ای موجود شامل بخار آب، دی اکسید کربن، متان، اکسید نیتروژن و ازن هستند، اما فعالیت‌های خاص بشری بر سطوح بسیاری از گازهای موجود طبیعی در جو می‌افزاید. در این مقاله منظور از گازهای آلاینده NO_X، So_2 و So_3 است.

میزان انتشار آلاینده‌های رادیواکتیو با واحدی با عنوان پرسن‌ریم[1] اندازه‌گیری می‌شود که عبارت است از: مجموع میزان دز دریافت شده توسط افرادی که در یک شعاع مشخص از محل نیروگاه در یک سال هستند که تنها در نیروگاه‌های هسته‌ای و ذغالی وجود دارد.

یکی از معیارهای زیست‌محیطی میزان زمین مورد استفاده هر یک از نیروگاه‌های تولید برق در مقیاس ۱۰۰۰ مگاواتی است. معیار زمین مورد استفاده را علاوه بر گروه زیست محیطی می‌توان در گروه شاخص‌های اقتصادی نیز قرار داد اما در این مقاله

1- Persen-rem

میزان هزینه برای خرید این زمین مورد بحث نبوده است و بیشتر تمرکز روی اثرات زیست محیطی استفاده هرز نیروگاه‌ها از زمین است.

سایر معیارهای زیست محیطی از قبیل آلودگی آب و آلودگی خاک معیارهایی کیفی هستند که به بررسی اثرات فناوری‌های مختلف تولید برق، بر خاک و آب موجود در منطقه نیروگاه می‌پردازند.

تغییرات وضعیت بخش انرژی دارای اثر قابل توجهی بر وضعیت اقتصادی و سیاسی هر کشور است. به عبارت دیگر، مهم‌ترین شاخص‌های فعالیت در سطح ملی متاثر از تغییرات وضعیت بخش انرژی است. یکی از فاکتورهای موثر بر فعالیت سیستم انرژی، امنیت تامین انرژی است. امنیت تامین انرژی در سه حوزه امنیت تامین منبع ورودی، تاثیر در تنوع بخشی به سیستم عرضه و تاثیر در حفظ و صرفه جویی در منابع پایان‌پذیر تقسیم‌بندی شده‌اند که معیار اول کیفی و معیارهای دوم و سوم به صورت کمی محاسبه شده‌اند.

هر چند حجم فعلی ذخایر نفت و گاز کشور به گونه‌ای است که پیش‌بینی می‌شود کشور تا سال‌های متمادی آینده از نفت و گاز برخوردار باشد، اما این واقعیت که ذخایر نفت و گاز کشور بالاخره روزی به پایان می‌رسد، هشداری است برای مسئولان و متولیان انرژی کشور که به فکر منابع جدیدی در تولید انرژی کشور باشند.

تنوع در ترکیب سبد انرژی سبب ایجاد امنیت در عرضه پایدار انرژی می‌شود. بر این اساس تاثیر در تنوع بخشی به سیستم عرضه یکی از معیارهایی است که با توجه به حجم بالای نیروگاه‌های فسیلی در سبد انرژی کشور و سهم اندک انرژی‌های تجدیدپذیر می‌تواند در تصمیم گیری نقش مهمی ایفا کند. جهت محاسبه این امر، ظرفیت نصب شده نیروگاه‌های مختلف را به کل ظرفیت نصب شده نیروگاه‌ها تقسیم کرده و برای محاسبه میزان تاثیر از یک کم شده است.

با توجه به پایان‌پذیر بودن منابع فسیلی کشور، تمرکز روی نیروگاه‌هایی که در حفظ و صرفه‌جویی در منابع پایان‌پذیر سهم بسزایی دارند از اهمیت فوق‌العاده‌ای برخوردار است.

دستیابی به فناوری ساخت نیروگاه و بحث‌های فنی آن جهت توسعه فناوری‌های نیروگاهی از اهمیت بسزایی برخوردار است. در این مقاله معیارهای فنی به هفت معیار فرعی تقسیم شده است که دو معیار زمان احداث نیروگاه و ضریب دسترسی به صورت کمی محاسبه شده و سایر معیارها به صورت کیفی و با نظرات خبرگان تکمیل شده است.

دستیابی به فناوری‌های مختلف گاهی با پیچیدگی‌های مختلفی مواجه است که در معیار سهولت دسترسی به فناوری، فناوری‌های مختلف از منظر عدم این پیچیدگی‌ها مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. نگاهی به پتانسیل ساخت تکنولوژی مورد نظر در کشور و سهولت دسترسی به آن تکنولوژی در فرآیند تولید برق یکی از فاکتورهای مهم در انتخاب گزینه‌های تولید برق است. اینکه کشور در چه سطحی از تولید تکنولوژی مورد نظر است و همچنین میزان های‌تک[1] بودن تکنولوژی در چه سطحی است، کمک می‌کند تا تصمیم‌گیرنده تصمیم درستی در انتخاب خود انجام دهد.

منظور از سریز دانشی، تاثیر استفاده از نیروگاه بر رشد صنایع جانبی و پایه کشور است. اگر فناوری مورد نظر کاربردهای فراوان دیگری داشته باشد، دستیابی به فناوری مورد نظر باعث می‌شود که سرریز دانشی برای سایر صنایع جانبی نیز به وجود آید.

یکی از راه‌حل‌های مصرف بهینه و کاهش تلفات برق، نزدیک کردن نقاط تولید برق به مصرف به منظور تامین برق پایدارتر مشترکین، کاهش خاموشی و تلفات، افزایش راندمان و بهره‌وری بالاتر اقتصادی و حفاظت از محیط زیست است که لازمه این کار احداث نیروگاه‌های تولید پراکنده است. قابلیت تولید پراکنده معیاری کیفی است و قابلیت تولید پراکنده نیروگاه‌ها در مقایسه با هم سنجیده می‌شود.

در ساخت هر نیروگاه زیرساخت‌هایی از قبیل جاده، لوله کشی و... ایجاد می‌شود، بنابراین یکی از عواملی که در ساخت نیروگاه مورد اهمیت است سهولت توسعه ظرفیت در نیروگاه موجود است.

با توجه به اینکه در ساعات مختلف شبانه روز میزان استفاده از برق متغیر است یکی از معیارهای مهم فنی نیروگاه قابلیت تغییر در سطح تولید نیروگاه است که سبب می‌شود در زمان‌های کاهش و یا افزایش مصرف میزان متناسب با نیاز تنظیم شود.

1- High-Tech

یکی از دغدغه‌های سیاست‌گذاران، تامین انرژی مورد نیاز در زمان مقتضی است و با توجه به رشد جمعیت و افزایش مصرف متناسب با آن، ساخت سریع یک نیروگاه یکی از معیارها جهت تامین پایدار برق مورد نیاز است.

ضریب دسترسی مولد تولید برق به صورت درصد بیان می‌شود و برابر است با نسبت میزان ساعات تولید برق یک نیروگاه در یک دوره زمانی معین بر تعداد کل ساعت آن دوره زمانی.

از ۲۳ معیار معرفی شده در بالا ۱۲ معیار کمی و ۱۱ معیار باقی مانده کیفی هستند. به اختصار، اطلاعات کمی معیارهای کمی در جدول زیر آمده است.

جدول ۳- امتیاز هر یک از گزینه‌های تولید برق برای معیارهای مختلف

	واحد	سیکل ترکیبی	بخاری	گازی	اتمی	فتوولتائیک	بادی	برق‌آبی
هزینه تمام شده هر کیلووات ساعت[1]	سنت دلار در هر کیلووات ساعت	۱۲/۵٤	۱۸/٤۳	۲۰/۹۸	۹/٦۹	۲۲/٤	۸/۸۹	۳/۰۵
سرمایه‌گذاری اولیه[2]	دلار در هر کیلووات	۵۵۷	۷۰۹	۳۱٤	۵۰۰۰	۳۵۰۰	۲۵۰۰	٤۸۰
میزان اشتغال‌زایی[3]	نفر در هر گیگاوات ساعت برای یک سال	۰/۲۱	۰/۲۱	۰/۲۱	۰/۲۷	۱/٦۵	۰/۳۲	۰/۲۵
حجم بازار جهانی[4]	میلیارد دلار	۱۰٤۰	۱۰٤۰	۱۰٤۰	۹٤۲	۱۲۵۹	۲۱۲۹	۱۵٤۹
میزان انتشار گازهای آلاینده[5]	گرم بر کیلووات ساعت	۳/۳	۷/٤	۳/٤	۰	۰	۰	۰
میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای[6]	گرم بر کیلووات ساعت	٤۷۸/۲	۷٦۸/٤	۸۳۷/٦	۰	۰	۰	۰

۱- منظور و رحیمی، ۱۳۹۳

۲- *همان*

3- Renewable and Appropriate Energy Laboratory

4- *World Energy Outlook*, 2012

۵- ترازنامه انرژی، ۱۳۸۹

۶- *همان*

ادامه جدول ۳- امتیاز هر یک از گزینه‌های تولید برق برای معیارهای مختلف

	واحد	سیکل ترکیبی	بخاری	گازی	اتمی	فتوولتائیک	بادی	برق‌آبی
میزان انتشار آلاینده‌های رادیواکتیو[1]	*Persen-rem/year [MW۱۰۰۰]*	۰	۰	۰	٤,٨	۰	۰	۰
وسعت زمین مورد استفاده[2]	کیلومتر مربع	۲/۵	۲/۵	۲/۵	۲/۵	۳۵	۱۰۰	۷۵۰
تاثیر در تنوع بخشی بر سیستم عرضه[3]	درصد	۰/۷۷	۰/۷٦	۰/٦۳	۰/۹۸	۱/۰۰	۱/۰۰	۰/۸۷
تاثیر در صرفه‌جویی در منابع پایان‌پذیر[4]	درصد	۲٦	۱۷	۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
زمان احداث نیروگاه[5]	سال	٦	۵	۲	۹	۱	۲	۱۰
ضریب دسترسی[6]	درصد	۹۱	۹۱	۹۱	۹٦	۲۰	۳۸	۵۰

۵- اولویت‌بندی فناوری نیروگاهی در ایران

پس از معرفی انواع معیارهای اصلی و فرعی و با توجه به مرور ادبیات و متدولوژی تصمیم‌گیری چندشاخصه بیان شده، جهت اولویت‌بندی نیروگاه‌ها مراحل زیر انجام می‌پذیرد:

* تعیین خبرگان حوزه برق جهت انجام وزن‌دهی به معیارهای مقایسه با پر کردن پرسش‌نامه و با روش تحلیل سلسله مراتبی

1- Athanasios, 2012
2- *ibid*

۳- ترازنامه انرژی، ۱۳۹۰

۴- *همان*

۵- منظور و رحیمی، ۱۳۹۳

۶- معاونت برنامه‌ریزی تولید، آذرماه ۱۳۸۵

* رتبه‌بندی انواع نیروگاه‌های تولید برق با استفاده از معیارهای کمی و با روش پرومته
* رتبه‌بندی انواع نیروگاه‌های تولید برق با استفاده از معیارهای کیفی و با روش تحلیل سلسله مراتبی
* تلفیق اوزان و رتبه‌های سه مرحله اول و به دست آمدن رتبه‌بندی نهایی

به منظور وزن‌دهی به معیارهای ۲۳گانه مقایسه فناوری‌های نیروگاهی، خبرگان مختلفی از قبیل متخصصان وزارت نیرو، شرکت مادر تخصصی توانیر، پژوهشگاه نیرو، سازمان انرژی‌های نو ایران، اساتید دانشگاه، شورای علوم تحقیقات و فناوری (عتف)، شرکت‌های خصوصی مشاوره‌ای در حوزه انرژی، گروه مپنا، سندیکا صنعت برق ایران و سازمان انرژی اتمی ایران شناسایی شدند و با استفاده از پرسش‌نامه نظرات هر یک اخذ شده سپس اوزان هر یک از معیارها با استفاده از نرم افزار اکسپرت چویس به صورت جدول ۴ محاسبه شد.

جدول ٤- اوزان معیارهای اولویت‌بندی نیروگاه‌ها

ردیف	معیار	معیارهای فرعی	نوع معیار	اوزان	رتبه
۱	اقتصادی	هزینه تمام شده برای هر کیلووات ساعت	کمی	۰/۰۹۵	۱
۲		سرمایه‌گذاری اولیه	کمی	۰/۰۸۱	۳
۳		میزان اشتغال‌زایی	کمی	۰/۰٤۷	٦
٤		حجم بازار جهانی	کمی	۰/۰٤۲	۸
٥	زیست محیطی	میزان انتشار گازهای آلاینده	کمی	۰/۰۳۷	۱۱
٦		میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای	کمی	۰/۰۳٥	۱۲
۷		میزان انتشار آلاینده‌های رادیواکتیو	کمی	۰/۰۳۸	۹
۸		میزان آلایندگی آب	کیفی	۰/۰۳۳	۱۳
۹		میزان آلایندگی خاک	کیفی	۰/۰۲۹	۱۷
۱۰		وسعت زمین مورد استفاده	کمی	۰/۰۱۷	۲۳
۱۱	سیاسی اجتماعی	تاثیر فناوری بر اقتدار سیاسی	کیفی	۰/۰٤٤	۷
۱۲		تاثیرگذاری بر مردم سایر کشورها (قدرت نرم)	کیفی	۰/۰۲۷	۲۱
۱۳		مقبولیت عمومی مشارکت محلی	کیفی	۰/۰۳۸	۱۰

ادامه جدول ٤- اوزان معیارهای اولویت‌بندی نیروگاه‌ها

ردیف	معیار	معیارهای فرعی	نوع معیار	اوزان	رتبه
١٤	امنیت انرژی	امنیت تامین منبع ورودی نیروگاه	کیفی	۰/۰۸۳	۲
١٥		تاثیر در تنوع بخشی به سیستم عرضه	کمی	۰/۰۷۳	٥
١٦		تاثیر در حفظ و صرفه‌جویی در منابع پایان‌پذیر	کمی	۰/۰۷۸	٤
١٧	فنی	سهولت دسترسی به فناوری	کیفی	۰/۰۳۰	١٦
١٨		سریز دانشی	کیفی	۰/۰۲٥	۲۲
١٩		سهولت استقرار در موقعیت‌های مکانی مختلف	کیفی	۰/۰۲۹	١٨
۲۰		قابلیت تولید پراکنده	کیفی	۰/۰۳۱	١٤
۲۱		زمان احداث نیروگاه	کمی	۰/۰۲۸	١٩
۲۲		ضریب دسترسی	کمی	۰/۰۳۱	١٥
۲۳		قابلیت تغییر در سطح تولید	کیفی	۰/۰۲۸	۲۰

* خروجی نرم‌افزار اکسپرت چویس برای وزن‌دهی به معیارها

در بین **۲۳** معیاری که خبرگان اوزان هر یک را تعیین کردند هزینه تمام‌شده برای هر کیلووات ساعت در رتبه اول، امنیت تامین منبع ورودی نیروگاه در رتبه دوم، سرمایه‌گذاری اولیه در رتبه سوم، تاثیر در حفظ و صرفه‌جویی در منابع پایان‌پذیر در رتبه چهارم و تاثیر در تنوع بخشی به سیستم عرضه در رتبه پنجم قرار گرفت و در انتها نیز سه معیار تاثیرگذاری بر مردم سایر کشورها (قدرت نرم)، سریز دانشی و وسعت زمین مورد استفاده قرار دارند.

داده‌های جمع‌آوری شده برای معیارهای کمی که در قسمت قبل ارائه شده است را به همراه اوزان هر یک از معیارهای کمی که در گام اول و با استفاده از نرم‌افزار اکسپرت چویس به دست آمده بود را در نرم‌افزار ویژال پرومته قرار داده و فناوری‌های نیروگاهی براساس معیارهای کمی محاسبه می‌شود. بر این اساس با محاسبه جریان رتبه‌بندی برتری خالص هر یک از گزینه‌ها با توجه به معیارهای کمی، نیروگاه‌های برق‌آبی در رتبه نخست قرار گرفتند. در رتبه‌های بعدی مزارع بادی، فتوولتائیک، سیکل ترکیبی، هسته‌ای، بخاری و گازی قرار دارند. در ادامه رتبه‌های هر یک از نیروگاه‌ها به همراه جریان رتبه‌بندی برتری خالص هر یک از گزینه‌ها با توجه به معیارهای کمی نشان داده شده است.

جدول ۵- رتبه‌بندی فناوری‌های نیروگاهی بر اساس معیارهای کمی

Prometee Flow Table				
ردیف	*Action*	*Phi*	*Phi+*	*Phi-*
۱	*Hydropower*	۰/۱۹٤٦	۰/۲۷۳۰	۰/۰۸۷۳
۲	*Wind*	۰/۱۹۲۷	۰/۲۵۸۳	۰/۰٦۵۵
۳	*Photovoltaic*	۰/۰٦٤۱	۰/۲۲٦۰	۰/۱٦۱۹
٤	*Combined Cycle*	-۰/۰۳۲٤	۰/۱۲۸۳	۰/۱٦۰۷
۵	*Nuclear*	-۰/۰٦۵۰	۰/۱٦۹۵	۰/۲۳٤۵
٦	*Steam Plant*	-۰/۱۷۷۰	۰/۰۸٤۲	۰/۲٦۲۳
۷	*Gas Plant*	-۰/۱۷۷۱	۰/۰۹٦۲	۰/۲۷۳۲

* خروجی نرم افزار ویژال پرومته

همان‌طور که در بخش متدولوژی مورد استفاده در تصمیم‌گیری نیز بیان شد، برای اولویت‌بندی گزینه‌های تولید برق برای معیارهای کیفی از روش تحلیل سلسله مراتبی (نرم‌افزار اکسپرت چویس) استفاده می‌شود، دلیل این امر هم این است که در معیارهای کیفی، فاصله معنا نداشته و اهمیت نسبی گزینه‌ها مطرح است. در جدول ۶ رتبه‌بندی هر یک از گزینه‌ها با توجه به معیارهای کیفی و با توجه به نظر خبرگان نشان داده شده است.

جدول ٦- خروجی نرم‌افزار اکسپرت چویس برای هر یک از گزینه‌ها مرتبط با هر یک از معیارهای کیفی

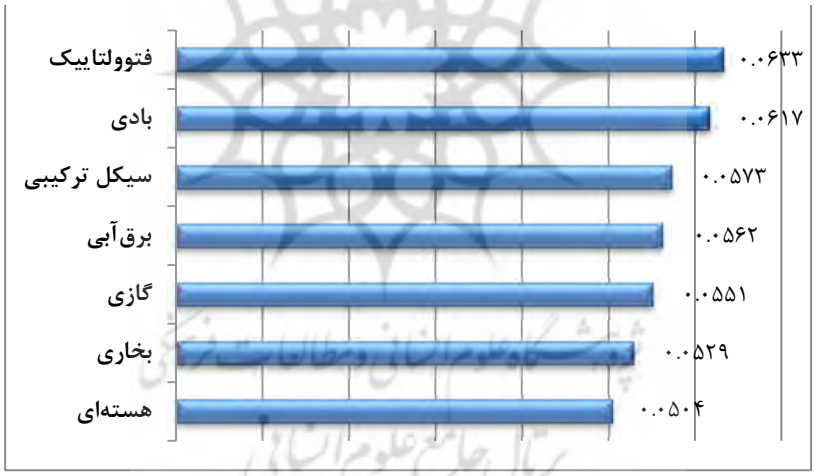
معیار	سیکل ترکیبی	بخاری	گازی	اتمی	فتوولتائیک	بادی	برق‌آبی
میزان آلایندگی آب	۰/۱۷۰	۰/۱۸۵	۰/۱٦۸	۰/۱٦۹	۰/۰۸۵	۰/۰۸۳	۰/۱٤۰
میزان آلایندگی خاک	۰/۱٦۳	۰/۱۸۱	۰/۱۷۲	۰/۲۲۰	۰/۰٦۲	۰/۰۷۸	۰/۱۲٤
تاثیر فناوری بر اقتدار سیاسی	۰/۱۲٤	۰/۰۹۳	۰/۱۰۵	۰/۱۷۳	۰/۱٦۹	۰/۱۷۸	۰/۱۵۷
تاثیرگذاری بر مردم سایر کشورها (قدرت نرم)	۰/۱۱۰	۰/۰۹۳	۰/۰۸۸	۰/۱۷٦	۰/۱۷۸	۰/۱۸٤	۰/۱۷۳
مقبولیت عمومی و مشارکت محلی	۰/۱۲٦	۰/۰۹٦	۰/۰۹۹	۰/۱۱٦	۰/۱۹۱	۰/۲۰۵	۰/۱٦۷
امنیت تامین منبع ورودی نیروگاه	۰/۱۵٦	۰/۱٤۸	۰/۱٤۳	۰/۱۰۵	۰/۱۵۹	۰/۱٤۸	۰/۱٤۱

ادامه جدول ٦- خروجی نرم‌افزار اکسپرت چویس برای هر یک از گزینه‌ها مرتبط با هر یک از معیارهای کیفی

معیار	سیکل ترکیبی	بخاری	گازی	اتمی	فتوولتائیک	بادی	برق‌آبی
سهولت دسترسی به فناوری	۰/۱۷۹	۰/۱۸۱	۰/۱۹۰	۰/۰۵۹	۰/۱۰۲	۰/۱۲۷	۰/۱٦۳
سریز دانشی	۰/۱٤۱	۰/۱۲٤۰	۰/۱۲۱	۰/۱٦۲	۰/۱۷۰	۰/۱۷۰	۰/۱۱٤
سهولت استقرار در موقعیت‌های مکانی مختلف	۰/۱۵۹	۰/۱٤۵	۰/۱۷۳	۰/۰۹۱	۰/۱۹۵	۰/۱٤۲	۰/۰۹۳
قابلیت تولید پراکنده	۰/۰۹۹	۰/۰۸۸	۰/۱۲۱	۰/۰۵۲	۰/۲۸۷	۰/۲٤۹	۰/۱۰۳
قابلیت تغییر در سطح تولید	۰/۱۵۲	۰,۱۲۸	۰/۱۲۸	۰/۱۰٤	۰/۱٤۸	۰/۱٤۱	۰/۱۷۰

* خروجی نرم افزار اکسپرت چویس برای معیارهای کیفی

بر این اساس رتبه‌بندی فناوری‌های نیروگاهی براساس معیارهای کیفی به صورت نمودار ۳ است.



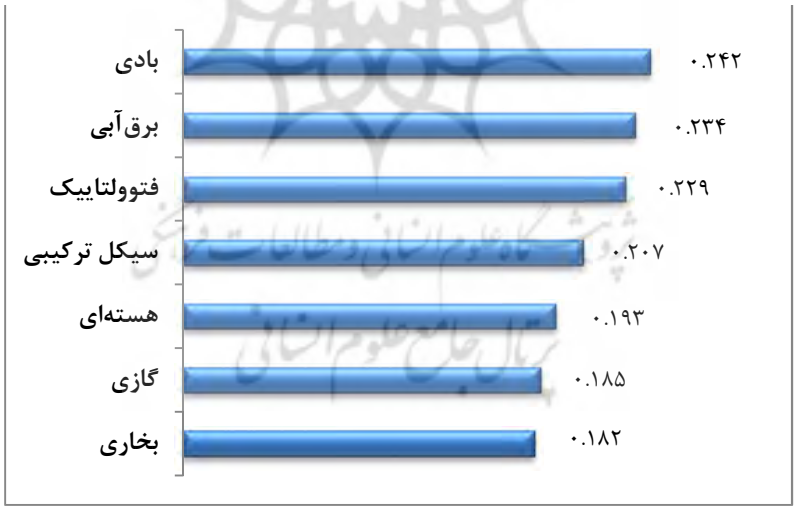
نمودار ۳- رتبه‌بندی فناوری‌های نیروگاهی براساس معیارهای کیفی

پس از به دست آمدن وزن هر یک از معیارها و رتبه‌بندی هر یک از گزینه‌ها براساس معیارهای کمی و کیفی و با نرم افزارهای ویژال پرومته و اکسپرت چویس برای هر معیار، در ادامه در جدول زیر و در گام نهایی برای رتبه‌بندی نهایی تکنولوژی‌های تولید برق نیز از روش ترکیبی این دو روش استفاده شده است.

جدول ۷- امتیازات معیارهای کمی و کیفی برای گزینه‌های مختلف تولید برق

	معیارهای کیفی		معیارهای کمی		
	امتیازبندی نیروگاه‌ها	رتبه	خروجی پرومته	امتیازبندی نیروگاه‌ها	رتبه
مجموع وزن معیارها	۰/۳۹۷	–	–	۰/۶۰۳	–
سیکل ترکیبی	۰/۰۵۷۳	۳	-۰/۰۳۲٤	۰/٤۸۳۷	٤
بخاری	۰/۰۵۲۹	٦	-۰/۱۷۷	۰/٤۱۱۵	٦
گازی	۰/۰۵۵۱	۵	-۰/۱۷۷۱	۰/٤۱۱٤۵	۷
هسته‌ای	۰/۰۵۰٤	۷	-۰/۰٦۵	۰/٤٦۷۵	۵
فتوولتائیک	۰/۰٦۳۳	۱	۰/۰٦٤۱	۰/۵۳۲۰۵	۳
بادی	۰/۰٦۱۷	۲	۰/۱۹۲۷	۰/۵۹٦۳۲	۲
برق‌آبی	۰/۰۵٦۲	٤	۰/۱۹٤٦	۰/۵۹۷۳	۱

پس از به دست آمدن خروجی‌های دو نرم‌افزار اکسپرت چویس و پرومته با استفاده از فرمول بیان شده در بالا دو خروجی با هم ترکیب می‌شود و نتیجه نهایی برای رتبه‌بندی فناوری‌های نیروگاهی به صورت نمودار ۴ ارائه می‌شود.



نمودار ٤- نتیجه نهایی رتبه‌بندی گزینه‌های مختلف تولید برق

نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که نیروگاه‌های بادی بالاترین امتیاز را به خود اختصاص داده‌اند. در میان گزینه‌های مورد بررسی، نیروگاه‌های بخاری جذابیتی در مقایسه با سایر گزینه‌ها ندارند، اما این نیروگاه‌ها با توجه به هزینه پایین سرمایه‌گذاری اولیه و سرعت بالای ساخت در کانون توجهات قرار گرفته‌اند.

همچنین بر پایه نتایج به دست آمده، نیروگاه‌های فتوولتائیک و هسته‌ای و سیکل ترکیبی امتیازهای نزدیک به یکدیگر کسب کرده‌اند. در این میان نیروگاه‌های آبی در ایران با بلوغ قابل قبولی رو به رو بوده‌اند و در سالیان اخیر به دلیل عدم توجه به تاثیرات زیست‌محیطی این نیروگاه‌ها، بحران‌هایی در نقاط مختلف کشور به وجود آورده‌اند و همچنین موقعیت قرارگیری کشور در شرایط جغرافیایی خشک و نیمه‌خشک، توسعه بیشتر این نوع نیروگاه‌ها را با مشکل کمبود منابع آبی مواجه کرده است. با توجه به شرایط فوق، نیروگاه‌های بادی به دلیل کسب بالاترین امتیازات و با توجه به اینکه سهم ناچیزی از تولید برق کشور را بر عهده دارند و با وجود پتانسیل‌های مناسب توسعه از نظر زیرساختی و منبع انرژی اولیه، بهترین گزینه برای توسعه شبکه تولید برق ایران هستند.

در گذشته، به دلیل عدم بلوغ تکنولوژی نیروگاه‌های تجدیدپذیر بادی و فتوولتائیک، استفاده از این تکنولوژی‌ها به خصوص از منظر اقتصادی معقولانه به نظر نمی‌رسید. با این حال به دلیل پیشرفت چشمگیر و کاهش هزینه‌های این نیروگاه‌ها، جذابیت استفاده از آن‌ها افزایش یافته است، به طوری که حتی با مقایسه نیروگاه‌های بادی با سایر نیروگاه‌های مرسوم از منظر اقتصادی، این نیروگاه‌ها دارای جذابیت مناسبی خواهند بود.

٦- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

با توجه به افزایش روزافزون در قیمت منابع فسیلی، استفاده از این منابع به عنوان منابع سوختی جذابیت خود را از دست می‌دهد. همچنین افزایش انتشار آلاینده‌های زیست محیطی و پدیده گازهای گلخانه‌ای در کنار امنیت پایین انرژی این منابع، تامین

انرژی با استفاده از این منابع را با محدودیت‌هایی مواجه می‌کند. در این میان استفاده از تکنولوژی‌های جدید و پاک تولید انرژی برق، علاوه بر اینکه جایگزین مناسبی برای نیروگاه‌های فسیلی در بسیاری از موارد به شمار می‌روند، منافع بسیاری از جمله بهبود اشتغال، افزایش توانمندی‌های ملی و امکان صادرات این تکنولوژی‌ها در صورت بومی‌سازی آنها را میسر می‌کنند. همچنین منابع فسیلی صرفه‌جویی شده، می‌توانند در فعالیت‌های دیگری با ارزش افزوده بالاتر مورد استفاده قرار گیرند.

در این مطالعه جایگاه نیروگاه‌های مختلف با استفاده از معیارهای شناسایی‌شده و با جمع‌آوری نظرات خبرگان در ایران مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به مصاحبه‌های انجام شده، پنج معیار اصلی اقتصادی، زیست محیطی، امنیت انرژی، سیاسی و اجتماعی و فنی به عنوان معیارهای اصلی شناسایی شدند.

طبق نتایج به دست آمده از این بررسی، در میان معیارهای مختلف مورد بررسی، معیارهای اقتصادی و امنیت انرژی از دیدگاه صاحب‌نظران دارای بیشترین اهمیت بودند و معیارهای فرعی هزینه تمام شده برای هر کیلووات ساعت، امنیت تامین منبع ورودی نیروگاه، سرمایه‌گذاری اولیه، تاثیر در حفظ و صرفه‌جویی در منابع پایان‌پذیر و تاثیر بر تنوع‌بخشی به سیستم عرضه به ترتیب مهم‌ترین معیارها از میان معیارهای ۲۳گانه قرار گرفتند.

با توجه به معیارهای فوق در میان هفت نیروگاه مورد مطالعه نیروگاه‌های بادی،آبی و فتوولتائیک بالاترین امتیازات را کسب کرده‌اند و نیروگاه‌های بخاری نیز کمترین امتیاز را به دست آورده‌اند. این رتبه‌بندی به وضوح نشان می‌دهد که با در نظر گرفتن قیمت‌های واقعی سوخت‌های فسیلی و همچنین سایر معیارها، انرژی‌های تجدیدپذیر در اولویت توسعه فناوری‌های تولید برق کشور قرار گرفته‌اند و می‌توانند نیاز کشور به انرژی را مرتفع سازند.

۷- منابع

الف) فارسی

۱- آمار تفصیلی تولید صنعت برق ایران (۱۳۹۱)، شرکت مادر تخصصی توانیر معاونت منابع انسانی و تحقیقات.

۲- آمار تفصیلی صنعت برق ایران ویژه مدیریت راهبردی (۱۳۹۱)، شرکت مادر تخصصی توانیر معاونت منابع انسانی و تحقیقات.

۳- ترازنامه انرژی (۱۳۸۹)، شرکت مادر تخصصی توانیر معاونت منابع انسانی و تحقیقات.

۴- ترازنامه انرژی (۱۳۹۰)، شرکت مادر تخصصی توانیر معاونت منابع انسانی و تحقیقات.

۵- منظور، داود و رحیمی، علیرضا (۱۳۹۳)، *اولویت‌بندی نیروگاه های کشور در راستای طرح جامع انرژی*، تهران: دانشکده اقتصاد دانشگاه امام صادق (ع).

ب) انگلیسی

1- Athanasios, Chatzimouratidis I., and Pilavachi A. Petros (2012), "Decision Support Systems for Power Plants Impact on the Living Standard", *Energy Conversion and Management*.

2- Bagheri Moghaddam, N, M Nasiri, and M Mousavi (2011), "An Appropriate Mmultiple Criteria Decision Making Method for Solving Electricity Planning Problems, Addressing Sustainability Issue", *International Journal of Environmental Science and Technology*.

3- Brans, J P, and B Mareschal (1984), "PROMETHEE: A New Family of Outranking Methods in Multicriteria analysis", *Operational Research*.

4- Khatami Firouzabadi, Ali, and Elham Ghazimatin (2013), "Application of Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation Method in Energy Planning - Regional Level", *Iranian Journal of Fuzzy Systems*.

5- Renewable and Appropriate Energy Laboratory, US: Department Of Energy (DOE).

6- Saaty, T A (1980), *The Analytic Hierarchy Process*, New York: McGraw-Hil.

7- *World Energy Outlook*, International Energy Agency (IEA), 2012.