مقاله پژوهشی

علوم و تکنولوژی محیط زیست، دوره بیست و سوم، شماره هفت، مهرماه ۱۴۰۰(۲۵۲-۲۳۷)

تحلیل عوامل موثر برانتخاب فناوری و رتبه‌بندی فناوری‌های کاهش انتشار اکسیدهای نیتروژن(مورد مطالعه: نیروگاه‌های حرارتی ایران)

شیرین عزیزی[۱]
رضا رادفر[۲]
radfar@gmail.com
هانیه نیکومرام[۳]
علی رجب زاده قطری[۴]

تاریخ دریافت: ۹۹/۱/۲۸ **تاریخ پذیرش: ۹۹/۱۱/۸**

چکیده

زمینه و هدف: نیروگاه‌های حرارتی با مصرف قابل توجه سوخت‌های فسیلی، نقش عمده‌ای در تولید آلاینده‌های هوا دارند. اکسیدهای نیتروژن از جمله این آلاینده‌ها هستند. تاکنون هیچ یک ازنیروگاه‌های حرارتی ایران به فناوری‌های کاهش و کنترل انتشار اکسیدهای نیتروژن تجهیز نشده‌اند. با توجه به ضرورت کاهش آلاینده‌های ناشی از احتراق سوخت در نیروگاه‌های کشور، و تحمیل هزینه‌های گزاف اجتماعی ناشی از انتشار بی رویه آلاینده‌ها این مقاله با هدف ارائه راهکاری به منظور تحلیل عوامل تاثیرگذار بر انتخاب فناوری‌های کاهنده اکسیدهای نیتروژن با منشا فعالیت‌های نیروگاهی و نیز اولویت بندی و انتخاب آن‌ها با رویکرد سرمایه‌گذاری در فناوری‌های کاهنده انتشار این آلاینده در نیروگاه‌های حرارتی ایران انجام گرفته است.

روش بررسی: در این پژوهش ابتدا با مطلعه گسترده پژوهش‌های انجام شده در این زمینه، فناوری‌های موجود در سطح جهان و نیز اهم معیارهای موثر در تاثیر گذاری آن‌ها شناسایی شده و در گام بعد به منظور انطباق این معیارها با شرایط ایران، از تکنیک دلفی فازی به منظور تایید نهایی معیارها استفاده شد. به منظور وزن‌دهی به معیارها و سپس رتبه بندی فناوری های موجود از تکنیک رتبه بندی نوین SECA استفاده می‌شود.

یافته‌ها: نتایج پژوهش که در سال ۱۳۹۹ انجام گرفته است نشان داد که تکنولوژی‌های IFGR، OFA، Flameless، LNB، FR به ترتیب اولویت اول تا پنجم را به خود اختصاص دادند که با توجه با این مطلب که جملگی آنها جزء تکنولوژی‌های اصلاح فرآیند احتراق

۱- دانشجوی دکترای مدیریت صنعتی گرایش مدیریت سیستم‌ها، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و اقتصاد، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.
۲- گروه مدیریت صنعتی. دانشکده مدیریت و اقتصاد، واحد علوم وتحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی.تهران.ایران. * (مسوول مکاتبات)
۳- گروه مدیریت محیط زیست. دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست. واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.
۴- گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و اقتصاد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

هستند، در واقع نشان دهنده این واقعیت است که فن آوری‌های اصلاح فرآیند احتراق از اولویت بالاتری نسبت به سایر گروه‌های فنآوری برخوردار هستند.
بحث و نتیجه گیری: مجموع این ارزیابی‌های فناوری به ایجاد شرایط محیط زیستی مناسب‌تر و پایدارتر و آسیب پذیریِ کمتر سیستم های اکولوژیکی یاری کننده خواهد بود.

واژه‌های کلیدی: آلودگی هوا، فن‌آوری‌های کاهنده NOx ، تحلیل سلسله مراتبی، دلفی فازی، SECA.

J. Env. Sci. Tech., Vol 23, No. 7, October, 2021

Analysis of Effective Factors on Technology Selection and Ranking of Nitrogen Oxide Emission Reduction Technologies (Case study: Iranian Thermal Power Plants)

Shirin Azizi[1]
Reza Radfar[2 *]
radfar@gmail.com
Hanieh Nikoomaram[3]
Ali Rajabzadeh Ghatari[4]

Admission Date: January 27, 2021 Date Received: April 16, 2020

Abstract

Background and Objectives: Thermal power plants with significant consumption of fossil fuels play a major role in the production of air pollutants. Nitrogen oxides are among these pollutants. So far, none of Iran's thermal power plants have been equipped with technologies to reduce and control nitrogen oxide emissions. Considering the necessity of reducing pollutants caused by fuel combustion in the country's power plants, and imposing excessive social costs due to the excessive emission of pollutants, this article aims to provide a solution to analyze the factors affecting the selection of reducing technologies. Nitrogen oxides with the origin of power plant activities and also their prioritization and selection with the approach of investing in technologies to reduce the emission of this pollutant in Iran's thermal power plants has been done.

Material and Methodology: In this research, first, with the widespread knowledge of the researches conducted in this field, the existing technologies in the world and also the most important criteria influencing their effectiveness have been identified and in the next step, in order to adapt these criteria to the conditions of Iran, Fuzzy Delphi technique was used to finalize the criteria. In order to weigh the criteria and then rank the existing technologies, the new SECA ranking technique is used.

Findings: The results showed that IFGR technology, OFA, Flameless Combustion, LNB and FR(Fuel reburning) were the first to fifth priority of technology selection, respectively.

Discussion and Conclusion: The sum of these technological assessments will help to create more suitable and sustainable environmental conditions and less vulnerability of ecological systems.

Keywords: Air Pollution, NOx Reduction Technologies, Analytical Hierarchy Process, Fuzzy Delphi,SECA.

1- PhD Student in Industrial Management, Systems Management, Industrial Management Group, Faculty of Management and Economics,Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
2- Industrial Management Group. Faculty of Management and Economics. Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. **(Corresponding Author)*
3- Environmental Management Group, Faculty of Natural Resources and Environment. Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
4- Industrial management group. Faculty of Management and Economics. Tarbiat Modares University, Tehran. Iran.

مقدمه

در سال‌های اخیر آگاهی‌های زیست محیطی در محافل سیاسی به میزان قابل توجهی افزایش یافته است. این را می توان به نارضایتی اجتماعی از وضعیت محیط نسبت داد. در نتیجه قوانین سختگیرانه محیط زیست افزایش می‌یابند. آلودگی هوا یکی از مهمترین مشکلات مناطق شهری است که در آن بسیاری از منابع متولی آلایندگی هوا متمرکز شده اند (۱). تأمین انرژی یکی از مهمترین موضوعات برای همه دولت ها و نیازهای کشورهای مختلف جهان می‌باشد. تقاضای انرژی و مصرف آن هر ساله نیروگاه ها را مجبور به تولید انرژی الکتریکی و گرمایشی بیشتری می‌کند که این امر با حجم بیشتری از گازهای آلاینده مرتبط است(۲). هزینه های اجتماعی تخریب محیط زیست در اثر مصرف انرژی فسیلی در کشور بر اساس مطالعات بانک جهانی و سازمان حفاظت محیط زیست در سال ۱۳۹۰، ۱۰۲/۶ هزار میلیارد دلار ریال (بر اساس قیمت های ثابت سال۱۳۸۱)می‌باشد که معادل ۱۹/۶درصد از تولید ناخاص داخلی کشور در ان سال بوده است (۳). با تولید مقادیر حجیم آلاینده های تولید برق، مقررات بیشتر با هدف محدود کردن اکسیدهای گوگرد-(SO2) (SO3، دی اکسید نیتروژن (NO2) ، ذرات (PM2.5 و PM10) و تا حدی کمتر ، جیوه و منوکسید کربن(CO) در بسیاری از کشورها در حال انجام است(۴). ایران در گزارش های مختلف بین المللی انتشار گازهای گلخانه ای در رتبه ۹ تا ۱۱ قرار داشته و عدم وجود سیاست گذاری مشخص و مدون و برنامه ریزی عملی جهت کاهش انتشار گازهای گلخانه ای در صورت استقرار پروتکل جدید کاهش انتشار گازهای گلخانه ای و الزام جهت کاهش انتشار از سال ۲۰۲۰ با تهدید بزرگی نظیر تحریم بین المللی سایر کشورهای دنیا مواجه خواهد شد. لذا مدیریت انتشار گازهای گلخانه ای به صورت یک چالش اساسی برای کشور و به تبع آن برای صنعت برق کشور به عنوان یکی از بزرگ ترین تولیدکنندگان گاز گلخانه ای در کشور مطرح می‌باشد (۵).

از طرفی روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره می‌توانند یک ابزار حمایتی مهم در سیاست گذاری سرمایه‌گذاری انرژی باشند و ضمن انعطاف پذیری، ظرفیت ارزیابی پیامدهای فن-آوری‌ها بر اقتصاد، محیط و چارچوب اجتماعی را فراهم آورند (۶). به خصوص، توجه به این واقعیت که بسیاری از ویژگی-های اصلی فن‌آوری‌های انرژی، که دارای ارزش بازار نیستند و به ابعاد اجتماعی و زیست محیطی SD توجه می‌کنند، غالباً خارج از دامنه پژوهش قرار داده می‌شوند(۶). در مقاله‌ای که با عنوان برنامه ریزی انرژی پایدار با استفاده از روش تجزیه و تحلیل چند معیاره در جزیره کرت انجام شد، شاخص‌های سرمایه گذاری، هزینه عملیاتی و تعمیر و نگهداری، صرفه جویی در مصرف سوخت، بلوغ تکنولوژی و ایمنی عرضه در گروه معیارهای زیست محیطی- اقتصادی و از معیارهای جلوگیری از انتشارات آلاینده، مشارکت در توسعه محلی و رفاه عمومی ، پذیرش اجتماعی و قابلیت تعدیل اثرات زیست محیطی در گروه شاخص‌های اقتصادی اجتماعی به منظور برنامه ریزی استفاده شد و این رتبه بندی با استفاده از روش پرومته۱ انجام شد(۷). در مقاله‌ای که با عنوان برنامه ریزی استراتژیک در بخش تولید برق از طریق تهیه یک مدل ارزیابی چند معیار مبتنی بر دلفی۲ انجام شد، بهره وری سیستم، ظرفیت، در دسترس بودن سوخت ، تجربه موجود در زیر گروه تکنولوژی، ۱۴ معیارهزینه پرداخت بالا برای هر تن CO2، هزینه سوخت، هزینه ساخت و ساز، دوره بازپرداخت طولانی مدت و غیره در بخش اقتصادی ،۱۴ معیار انتشار گازهای آلاینده و ذرات، دفع فاضلاب، دفع آب داغ ، تغییر اقلیم و غیره در بخش زیست محیطی و ۹ معیار اجتماعی از قبیل میزان سرو صدا، اثرات بر بهداشت و سلامت افراد و ... مورد نظر قرار گرفت. این پژوهش با هدف ارزیابی فن‌آوری‌ها برای توسعه صنعت تولید برق انجام گرفت (۸). در سال ۲۰۱۰ مقاله‌ای با عنوان شاخص های پایداری سیستم های تولید برق با هدف ارزیابی فن آوری های تولید برق با استفاده از رتبه بندی معیارها و وزنهای برابر[3] انجام پذیرفت. در این پژوهش در

1- PROMETHEE
2- Delphi method (qualitative evaluating approach)
3- Ranking of criteria and equal weights

بخش تکنولـوژی در دسـترس بـودن تکنولـوژی و کـارایی، در بخش اقتصادی، هزینه انرژی، در بخش محیطی، انتشار CO2، استفاده از زمـین، مصـرف آب شـیرین و در بخـش اجتمـاعی، هزینه‌های خارجی، مزایـای خـارجی بـه عنـوان شـاخص‌هـای پژوهش لحاظ شد(۹). در ادامه تکنولوژی‌های شناسـایی شـده که با مطالعه منابع متعدد کنتـرل آلاینـدگی در نیروگـاه‌هـای حرارتی و همچنین فناوری‌های موجود و تازه معرفی شـده بـه دنیای تکنولوژی انتخاب و معرفی شده است و همچنین شـرح مختصری از منابع معرف آن‌ها و ارائه توضیحات جـامع‌تـر کـه اشاره به آن‌ها در این مقال نمی‌گنجد به شـرح جـدول ۱ ارائـه شده است

بنابراین این پژوهش در صدد است که ضمن معرفی معتبرترین تکنولوژی‌های موجود در زمینه کاهش انتشار NOx کـه یکـی از پرهزینه ترین آلاینده‌های منشر شده از نیروگاه‌های حرارتـی سطح کشور می‌باشـد، و بـا در نظـر گـرفتن اینکـه بـر مبنـای گزارش‌های منتشر شده از پژوهشـگاه تحقیقـات نیـروی ایـران تاکنون هیچ کدام از نیروگاه‌های سطح کشور به تکنولوژی‌هـای کنترل کننده و کاهنده انتشار NOx ها تجهیز نشده‌انـد، اهـم متغیرهـای تاثیرگـذار بـر انتخـاب تکنولـوژی را بـا اسـتفاده از تکنیک دلفی فـازی شناسـایی و در گـام بعـد بـه رتبـه‌بنـدی تکنولوژی‌هـا و معرفـی اولویـت‌هـای فنـاوری در نیروگـاه‌هـای حرارتی ایران با استفاده از تکنیک ارزیابی همزمـان معیارهـا و گزینه‌ها برای تحلیل چند معیاره موسوم به تکنیک (SECA) بپردازد.

روش انجام پژوهش

این پژوهش به لحاظ هدف کاربردی و از لحاظ ماهیت توصیفی – پیمایشی می‌باشد. دراین پژوهش که در سـال ۱۳۹۹ انجـام شد، ابتدا از مطالعات میدانی و کتابخانه‌ای و انجام مصاحبه بـاز با خبرگان صنعت برق برای شناسایی معیارهـای تاثیرگـذار بـر انتخاب فناوری اسـتفاده شـد. بـه منظـور پـالایش و ارزیـابی معیارهای نهایی تاثیرگذار بـر انتخـاب فنـاوری از روش دلفـی فازی استفاده شد. بدین منظور از پرسشنامه دلفی استفاده شد و روایی آن به تایید خبرگان رسید. جامعه آماری مورد نظر بـه منظور انجام نظرسنجی فعالان حوزه طراحی و توسعه نیروگـاه بودند که با استفاده از تکنیک گلوله برفی انتخاب شدند. بـدین ترتیب اعضای مشارکت کننده در تعیـین معیارهـای پـژوهش، شامل ۸ نفراز متخصصان شرکت مدیریت پروژه‌های نیروگـاهی ایران(مپنا)، با تحصیلات لیسـانس و فـوق لیسـانس بـا سـابقه کاری بیشتر از ۱۵ سال انتخاب شدند. سپس اهمیت نسبی هر یک از ۱عوامل موثر بر انتخاب فناوری و رتبه‌بندی فنآوری‌ها با استفاده از روش نوین تحلیـل سلسـه مراتبـی SECA انجـام پذیرفت. این روش رتبه بندی شده که در سال ۲۰۱۸ معرفـی شده از طریق حل مدل غیر خطی چند هدفـه، وزن معیارهـا و رتبه‌بندی گزینه‌ها را به طور همزمان انجام می‌دهد .

یافته‌ها

ابتدا معیارهای تاثیرگذار بـر انتخـاب تکنولـوژی را بـا مطالعـه ادبیات و مطالعات موجود انتخاب و سپس جهت پالایش نهایی معیارها، از تکنیک دلفی فازی استفاده می‌کنیم. ایـن معیارهـا در جدول ۲ ارائه شده است.

اجرای تکنیک دلفی فازی

گـام اول: گـردآوری نظـرات خبرگـان؛ در مرحلـه اول دلفـی، پرسشنامه‌ای دارای ساختار براساس نتایج مرحله اول پـژوهش طراحی و از خبرگان درخواست شد تا با استفاده از متغیرهـای کلامی خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد میزان اهمیت هر یک از مراحل شناسایی شده را مشـخص نماینـد. گـام دوم تبدیل متغیرهای کلامی به اعدا فـازی مثلثـی؛ دراین مرحلـه متغیرهای کلامی به صورت اعداد فازی مثلثی تعریـف شـدند . بدین صورت که پرسش‌نامه با مقادیر کلامی برای هر متغیر بـه خبرگان داده شد و سپس این پاسخ‌ها به مقادیر فـازی مثلثـی تبدیل شد و مجموعه اعداد فـازی مثلثـی بـرای هـر خبـره بـا استفاده از رابطه 1 بدست آمد.

$$A^{(i)} = (a_1^{(i)}, a_2^{(i)}, a_3^{(i)}) \qquad i = 1, 2, \ldots, n \qquad (1)$$

گام سوم: در این مرحله میانگین مجموعه ها $(A_m^{(i)})$ ازتمامی مجموعه ها $(A^{(i)})$ از طریق رابطه 2 محاسبه شد (ستون میانگین‌گیری مرحله اول جدول۳).

$$A_m = (a_{m1}, a_{m2}, a_{m3}) = (\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} a_1^i, \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} a_2^i, \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} a_3^i) \quad (۲)$$

سپس برای هر خبره، مقدار اختلاف از میانگین محاسبه شد. در مرحله دوم به منظور بررسی میزان توافق بین خبرگان، پرسشنامه مرحله اول بعد از اعمال تغییرات لازم به همراه میانگین نظرات خبرگان و اختلاف نظر قبلی هر یک از آنها با میانگین مجدداً برای اعضا پانل خبرگان ارسال و از آنها درخواست شد تا پاسخ‌ها را مرور نموده و در صورت نیاز در نظرات و قضاوت های خود تجدید نظر کنند. گام چهارم: بعد از اینکه بازخورد اولیه به خبرگان داده شد و مرحله دوم دلفی انجام گرفت، نظرات اصلاح شده خبرگان در قالب اعداد فازی مثلثی به صورت رابطه3 درآمد.

$$B^{(i)} = (b_1^{(i)}, b_2^{(i)}, b_3^{(i)}) \quad i = 1,2,...,n \quad (۳)$$

در این مرحله نیز همانند گام دوم، میانگین نظرات اصلاح شده خبرگان در مرحله دوم دلفی محاسبه شد (ستون میانگین-گیری مرحله دوم جدول۳). گام پنجم: فازی زدایی کردن؛ روش‌های مختلفی برای فازی زدایی مقادیر نهایی هر یک از شاخص‌ها وجود دارد. در این پژوهش از روش مینکووسکی طبق رابطه 4 محاسبه و ارائه شده است (ستون دی فازی جدول ۳).

$$\chi = a_1 + \frac{a_3 - a_2}{4} \quad (4)$$

گام ششم: محاسبه میزان اختلاف نظر خبرگان در دو مرحله؛ میزان اختلاف نظر خبرگان در دو مرحله دلفی محاسبه شد (ستون تفاوت مقادیر دی فازی شده جدول۳). تکرار مراحل دلفی تا آنجا پیش می‌رود که اختلاف نظر خبرگان بین دو مرحله نظر سنجی به کمتر از حد آستانه خیلی کم ۰,۲ برسد و در این صورت فرایند نظرسنجی متوقف می‌شود .

در این تحلیل بر اساس نظر خبرگان، معیارهای با امتیاز ۰ تا ۰,۲ از در دامنه خیلی کم تعریف شد و بنابراین همان‌طور که مشاهده می‌شود معیارهای میزان دانش بومی موجود ومیزان امنیت در این مرحله از پژوهش حذف شدند و سایر شاخص‌ها به عنوان اهم شاخص‌های تاثیرگذار در انتخاب تکنولوژی کاهش NOx نیروگاه‌ها انتخاب شدند.

تعیین اهمیت شاخص‌ها و اولویت بندی تکنولوژی‌ها

همان‌گونه که پیشتر اشاره شد، در این پژوهش به منظور وزن دهی به شاخص‌ها و رتبه بندی گزینه‌ها از تکنیک تحلیل سلسله مراتبی SECA استفاده می‌شود. هدف از این روش تعیین نمرات کلی عملکرد گزینه‌ها و وزن معیارها به طور همزمان است. برای دستیابی به این هدف، یک مدل ریاضی چند هدفه غیرخطی تدوین شده است (۱۰). در ادامه تکنیک پیاده سازی می‌شود.

جدول ۱- معرفی تکنولوژی‌های بحث شده در پژوهش و منابع معرف تکنولوژی‌های کاهنده اکسیدهای نیتروژن نیروگاه

Table 1. Introducing the technologies discussed in the research and references to technologies that reduce nitrogen oxides from power plants

شماره فناوری	نام فناوری	شماره مرجع
۱	کاهش انتخابی کاتالیستی[۱]	۱۴،۱۳،۱۲،۱۱
۲	کاهش انتخابی غیر کاتالیستی[۲]	۱۶،۱۵،۱۱
۳	مشعل‌های کم ناکس[۳]	۱۷،۱۱
۴	OFA[۴]	۱۸
۵	چرخش گاز دودکش[۵]	۱۸ ، ۱۹
۶	احتراق بدون شعله[۶]	۲۲،۲۱،۲۰
۷	مه‌پاشی[۷]	۲۴،۲۳
۸	پاشش آب یا بخار[۸]	۲۷،۲۶،۲۵
۹	بازسوزش سوخت[۹]	۱۸،۱۱
۱۰	IFGR	۲۸
۱۱	پرتو الکترونی[۱۰]	۲۹،۳۰،۱۱،۳۱،۳۲،۳۳
۱۲	تخلیه کرونا[۱۱]	۳۵،۳۴،۲۹
۱۳	پرتو الکترونی همراه با مایکروویو[۱۲]	۳۶
۱۴	پرتو الکترونی همراه با قطرات ریز آب[۱۳]	۳۶
۱۵	اسکرابر گاز ویوارد[۱۴]	۳۶
۱۶	جذب[۱۵]	۲۹،۱۱

ماخذ:یافته‌های پژوهش

1- SCR
2- SNCR
3- LOW NOX Burners
4- Over Fire Air
5- Pulsed corona discharge
6- Flameless Combustion
7- Fogging process
8- Water/Steam Injection
9- FR(Fuel Reburning)
10- EB(Electron Beam)
11- Pulsed corona discharge
12- EB(Electron Beam)+ Microwave
13- EB(Electron Beam)+ FWD(Fine Water Drop)
14- VIVIRAD gas scrubber
15- Absorbtion

جدول ۲- معرفی معیارهای تاثیرگذار در انتخاب فناوری

Table 2. Introducing effective criteria in technology selection

معیارها	مرجع	معیارها	مرجع
حداکثر کارایی	۴۱،۴۰،۳۹،۳۸،۳۷،۲۹	میزان ضایعات وپسماند	۴۰،۳۷،۲۹،۱۸
میزان خوردگی تجهیزات ناشی از کاربرد تکنولوژی	۴۱،۴۰،۳۷	سطح پیچیدگی تکنولوژی	۴۰،۳۷،۲۹،۱۸
فضای مورد نیاز	۴۰،۳۷	هزینه مواد خام	۴۰،۳۷
هزینه سرمایه‌گذاری ثابت	۴۱،۴۰،۳۷	میزام مصرف انرژی	۴۱،۲۹،۱۸
هزینه سرمایه‌گذاری متغیر	۴۱،۴۰،۳۷	میزان دانش بومی موجود	۴۰،۱۸
میزان مصرف آب	۴۱،۳۷	میزان امنیت	۴۰،۱۸
میزان فاضلاب	۳۷		

ماخذ:یافته‌های پژوهش

برای تدوین مدل ریاضی، دو نوع مرجع برای وزن معیارها شرح داده شده است. نوع اول براساس تعریف میزان تنوع اطلاعات درون هر معیار توسط انحراف استاندارد است و نوع دوم مربوط به همبستگی اطلاعات بین معیارها است. مدل چند هدفه به دنبال حداکثر رساندن عملکرد کلی هر گزینه و حداقل کردن انحراف وزن معیارها از نقاط مرجع است. برای به حداکثر رساندن عملکرد کلی هر گزینه، از یک مدل مجموع موزون به عنوان تابع هدف استفاده می‌شود. همچنین، از مجموع مربع انحرافات از نقاط مرجع استفاده می‌کنیم تا اهداف دیگر مدل را تعریف کنیم (۱۰). فرض می‌کنیم یک مدل MCDM با n گزینه و m معیار داریم و وزن هر معیار (w_j , $j\in\{1, 2, \dots, m\}$) مشخص است. بدین ترتیب ماتریس تصمیم‌گیری را مانند ماتریس زیر تشکیل می‌دهیم.

$$X=\begin{pmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & \cdots & x_{nm} \end{pmatrix}$$

و سپس مقادیر اختصاص داده شده به هر تکنولوژی در هر معیار، با توجه به طیف لیکرت ۵ تایی به اعداد فازی تبدیل و در گام بعد از طریق رابطه ۵ دی‌فازی می‌شوند و سپس با استفاده از رابطه ۶ نرمال‌سازی می‌شوند. که BC معرف معیارهای مطلوب و NC معرف معیارهای نامطلوب هستند. تجاری بودن و کارایی معیارهای مطلوب هستند و از سطر اول رابطه ۶ برای نرمال سازی استفاده می‌شود. ماتریس تصمیم-گیری پژوهش با توجه به معیارهای به دست آمده از مرحله قبل و سپس نرمال‌سازی آن به شرح جدول ۴ می‌باشد (۴۲،۴۱،۴۰،۳۷،۲۹،۱۸،۱۱).

سپس بردار $\mathbf{V}_j=\left[\mathbf{X}_{ij}^{N}\right]_{n\times 1}$ را به عنوان بردار معیار j ام$\{j\in\{1,2, \dots, m\}$ در نظر می‌گیریم. انحراف استاندارد عناصر هر بردار (σ_j) انحراف درون هر معیار لحاظ می‌شود. به منظور محاسبه انحراف میان معیارها، ضریب هم بستگی میان هر جفت از بردار معیارها را به طور مجزا محاسبه می‌کنیم. r_{jl} را به عنوان همبستگی بین معیار j ام و l ام ($j \& l \in \{1, 2, \dots, m\}$) در نظر می‌گیریم. سپس π_j می تواند میزان تعارض بین معیار j و معیارهای دیگر را نشان دهد (۱۰). مقدار πj نیز از رابطه ۷ حاصل می‌شود. سپس در گام بعد مقادیر حاصل شده برای σ_j و π_j از طریق روابط ۸ و ۹ نرمال می‌شود.

$$\mathbf{X}_{ij}^{N}=\begin{cases}\dfrac{\mathbf{X}_{ij}}{\max_k \mathbf{X}_{kj}} & \text{if } j\in BC,\\ \dfrac{\min_k \mathbf{X}_{kj}}{\mathbf{X}_{ij}} & \text{if } j\in NC,\end{cases} \quad (۶)$$

$$\pi_j=\sum_{l=1}^{m}(1-r_{jl}) \quad (۷)$$

$$\sigma_j^{N}=\frac{\sigma_j}{\sum_{l=1}^{m}\sigma_l} \quad (۸)$$

$$\pi_j^{N}=\frac{\pi_j}{\sum_{l=1}^{m}\pi_l} \quad (۹)$$

بر اساس تکنیک SECA یک مدل برنامه نویسی غیرخطی چند هدفه به شرح زیر تدوین می‌شود. معادله ۱۶ تضمین می-کند که مجموع وزن‌ها برابر با یک باشد. لازم به ذکر است که

ε به عنوان یک پارامتر مثبت کوچک در معادله ۱۷ تضمین می‌کند که مجموع وزن‌ها برابر با یک باشد. لازم به ذکر است که ε به عنوان یک پارامتر مثبت کوچک به عنوان محدوده پایین برای وزن معیارها محسوب می شود. در این مطالعه، این پارامتر بر روی $۱۰^{-۳}$ تنظیم شده است.

$$\max Z = \lambda_a - \beta(\lambda_b + \lambda_c) \quad (۱۰)$$

$$s.t. \quad \lambda_a \le S_i, \qquad \forall i \in \{۱,۲,...,n\} \quad (۱۱)$$

$$S_i = \sum_{j=۱}^{m} \omega_j x_{ij}^{N} \qquad \forall i \in \{۱,۲,...,n\} \quad (۱۲)$$

$$\lambda_b = \sum_{j=۱}^{m} (\omega_j - \sigma_j^{N})^{۲} \quad (۱۳)$$

$$\lambda_c = \sum_{j=۱}^{m} (\omega_j - \pi_j^{N})^{۲} \quad (۱۴)$$

$$\sum_{j=۱}^{m} \omega_j = ۱ \quad (۱۵)$$

$$\omega_j \le ۱, \qquad \forall j \in \{۱,۲,...,m\} \quad (۱۶)$$

$$\omega_j \ge \varepsilon, \qquad \forall j \in \{۱,۲,...,m\} \quad (۱۷)$$

جدول ۳- نتایج پرسشنامه دلفی

Table 3. Delphi questionnaire result

ردیف	معیارها	میانگین‌گیری مرحله اول			دی فازی مرحله اول	میانگین‌گیری مرحله دوم			دی فازی مرحله	
		u	m	l	x_1	u	m	l	x_2	$l_2 - x_1 l x$
۱	کارایی	۱	۰/۹۱	۰/۶۶	۰/۶۷۹۶۸۷۵	۱	۰/۹۱	۰/۶۶	۰/۶۷۹۶۸۷۵	۰
۲	میزان خوردگی تجهیزات	۱	۰/۹۱	۰/۶۶	۰/۶۷۹۶۸۷۵	۱	۰/۹۴	۰/۶۹	۰/۷۰۳۱۲۵	۰/۰۲۳۴۴
۳	میزان فضای مورد نیاز برای نصب تجهیزات	۰/۸۴	۰/۵۹	۰/۳۴	۰/۴۰۶۲۵	۰/۸۸	۰/۶۶	۰/۴۱	۰/۴۶۰۹۳۷۵	۰/۰۵۴۶۹
۴	میزان سرمایه گذاری ثابت	۰/۹۴	۰/.۸۱	۰/۵۶	۰/۵۹۳۷۵	۰/۹۷	۰/۸۴	۰/۵۹	۰/۶۲۵	۰/۰۳۱۲۵
۵	میزان سرمایه گذاری متغیر(عملیاتی)	۰/۹۴	۰/۷۸	۰/۵۶	۰/۶۰۱۵۶۲۵	۰/۹۴	۰/۸۱	۰/۵۹	۰/۶۲۵	۰/۰۲۳۴۴
۶	میزان مصرف آب	۰/۸۱	۰/۶۳	۰/۴۱	۰/۴۵۳۱۲۵	۰/۷۲	۰/۵۳	۰/۳۴	۰/۳۹۰۶۲۵	۰/۰۶۲۵
۷	میزان فاضلاب تولید شده	۰/۷۵	۰/۵۳	۰/۳۴	۰/۳۹۸۴۳۷۵	۰/۸۱	۰/۶۳	۰/۳۸	۰/۴۲۱۸۷۵	۰/۰۲۳۴۴
۸	میزان فاضلاب تولید شده	۰/۷۵	۰/۵	۰/۲۸	۰/۳۴۳۷۵	۰/۷۲	۰/۴۷	۰/۲۲	۰/۲۸۱۲۵	۰/۰۶۲۵
۹	سطح پیچیدگی تکنولوژی	۰/۵۹	۰/۳۴	۰/۱۹	۰/۲۵	۰/۶۳	۰/۳۸	۰/۱۶	۰/۲۱۸۷۵	۰/۰۳۱۲۵
۱۰	نیاز به مواد خام برای انجام فرآیند	۰/۸۴	۰/۵۹	۰/۳۴	۰/۴۰۶۲۵	۰/۸۸	۰/۶۳	۰/۳۸	۰/۴۳۷۵	۰/۰۳۱۲۵
۱۱	مقدار مصرف انرژی	۰/۷۵	۰/۵	۰/۳۱	۰/۳۷۵	۰/۸۱	۰/۵۹	۰/۳۴	۰/۳۹۸۴۳۷۵	۰/۰۲۳۴۴
۱۲	میزان دانش بومی در دسترس	۰/۴۴	۰/۱۹	۰/۰۳	۰/۰۹۳۷۵	۰/۴۷	۰/۲۲	۰/۰۳	۰/۰۹۳۷۵	۰
۱۳	امنیت	۰/۳۸	۰/۱۳	۰	۰/۰۶۲۵	۰/۳۸	۰/۱۳	۰	۰/۰۶۲۵	۰

با توجه به تابع هدف مدل، حداقل امتیاز عملکرد هر گزینه حداکثر می‌شود. از آنجا که انحراف از نقاط مرجع باید به حداقل برسد، آنها با ضریب β از تابع هدف (β>۰) کم می‌شوند. این ضریب بر میزان رسیدن به نقاط مرجع وزن معیارها تأثیر می‌گذارد. در نهایت امتیاز کل عملکرد هر گزینه (S_i) و وزن هر معیار (w_j) با حل مدل تعیین می شود(۱۰). حال با در دست داشتن ماتریس نرمالیزه شده گزینه/معیار(جدول۴)، و محاسبه مقادیر انحراف استاندارد نرمال شده (استفاده از رابطه ۸) و مقادیر هم‌بستگی نرمال شده (استفاده از روابط ۷ و ۹) که به دلیل محدودیت در حجم مقاله نشان دادن خروجی و جداول محاسباتی آن مقدور نمی‌باشد، مدل غیرخطی شرح داده شده را اجرا می‌کنیم. در این پژوهش از نرم افزار LINGO به منظور حل معادله غیر خطی استفاده شده است. خروجی حل مدل به شرح جداول زیر می‌باشد. لازم به ذکر است در مقاله اصلی معرفی تکنیک، به این مورد اشاره شده که مقادیر وزن‌های بدست آمده از حل مدل، برای مقادیر β>۳ به

پایداری و تمایز مشخص میان رتبه بندی وزن معیارها و به تبع آن رتبه بندی گزینه‌ها رسیده است. (در جدول۶ این ستون‌ها بولد شده‌اند). همچنین در جدول ۵ وزن ۱۰ معیار پژوهش حاضر با مقادیر متفاوت β محاسبه و ارائه شده است.

جدول ۴- مقادیر نرمال شده متغیرهای کلامی ماتریس تصمیم گیری تکنولوژی- معیار

Table 4. Normalized values of verbal variables Matrix of decision-technology

شماره فناوری	سطح پیچیدگی	میزان مصرف انرژی	هزینه مواد خام	ضایعات و پسماند	میزان مصرف آب	هزینه عملیاتی	هزینه سرمایه گذاری	فضای مورد نیاز	خوردگی	کارایی
۱	۰/۸۰۹۵۲	۰/۳۱۰۳۴۴	۰/۱۲۱۲۱۲	۰/۱۲۱	۰/۸	۰/۱۳۷۹۳	۰/۱۲۱۲۱۲	۰/۳۱۰۳۴۴	۰/۱۲۱	۰/۹۲۱
۲	۰/۸۰۹۵۲	۰/۳۶	۰/۱۳۷۹۳۱	۱	۱	۰/۱۶	۱	۱	۰/۸	۰/۵۱۱
۳	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰/۱۶	۰/۶۹۲۳۰۷	۱	۰/۵۱۱
۴	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰.۸	۰/۶۹۲۳۰۷	۱	۰/۶۱۴
۵	۰/۵۸۶۲۰۶	۰/۳۶	۱	۱	۱	۰/۱۹۰۴۷	۰/۱۹۰۴۷	۰/۶۹۲۳۰۷	۱	۰/۴۶۰
۶	۰/۸۰۹۵۲	۱	۱	۱	۱	۰/۴۴۴۴۴	۰/۴۴۴۴۴	۱	۱	۰/۹۲۴
۷	۰/۸۰۹۵۲	۰/۵۲۹۴۱۱	۰/۴۴۴۴۴	۱	۰/۱۲۱۲۱	۰/۴۴۴۴۴	۰/۴۴۴۴۴	۰/۳۱۰۳۴۴	۱	۰/۳۰۷
۸	۰/۸۰۹۵۲	۰/۵۲۹۴۱۱	۰/۴۴۴۴۴	۱	۰/۱۲۱۲۱	۰/۴۴۴۴۴	۰/۴۴۴۴۴	۰/۳۱۰۳۴۴	۰/۸	۰/۷۱۶
۹	۰/۸۰۹۵۲	۰/۵۲۹۴۱۱	۰/۴۴۴۴۴	۱	۰/۱۲۱۲۱	۰/۴۴۴۴۴	۰/۴۴۴۴۴	۰/۳۱۰۳۴۴	۰/۸	۰/۶۶۵
۱۰	۱	۱	۱	۱	۱	۰/۲۳۵۲۹	۰/۱۳۷۹۳۱	۰/۶۹۲۳۰۷	۱	۰/۶۱۴
۱۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰/۲۳۵۲۹۴	۰/۶۹۲۳۰۷	۱	۰/۹۷۲
۱۲	۰/۵۸۶۲۰۶	۰/۲۷۲۷۲۷	۰/۲۳۵۲۹۴	۱	۰/۸	۰/۳۰۷۶۹	۰/۱۲۱۲۱۲	۰/۵۲۹۴۱۱	۰/۸	۰/۸۷
۱۳	۱	۰/۲۷۲۷۲۷	۱	۱	۱	۰/۳۰۷۶۹	۰/۱۲۱۲۱۲	۰/۵۲۹۴۱۱	۰/۸	۰/۴۲۹
۱۴	۰/۵۸۶۲۰۶	۰/۳۱۰۳۴۴	۰/۲۳۵۲۹۴	۱	۰/۸	۰/۳۰۷۶۹	۰/۱۲۱۲۱۲	۰/۵۲۹۴۱۱	۰/۸	۰/۸۱۸
۱۵	۰/۵۸۶۲۰۶	۰/۳۱۰۳۴۴	۰/۲۳۵۲۹۴	۱	۰/۴۴۴۴۴	۰/۳۰۷۶۹	۰/۱۲۱۲۱۲	۰/۵۲۹۴۱۱	۰/۸	۱
۱۶	۰/۵۸۶۲۰۶	۰/۳۱۰۳۴۴	۰/۲۳۵۲۹۴	۱	۰/۲۳۵۲۹	۰/۳۰۷۶۹	۰/۱۲۱۲۱۲	۰/۵۲۹۴۱۱	۰/۸	۰/۸۲۱
۱۷	۰/۵۸۶۲۰۶	۰/۳۱۰۳۴۴	۰/۲۳۵۲۹۴	۰/۸	۱	۰/۳۰۷۶۹	۰/۱۳۷۹۳۱	۰/۲۷۲۷۲۷	۰/۳۰۷۶۹۲	۰/۹۷۲

جدول ۵ - محاسبه وزن معیارها با مقادیر متفاوت

Table 5.Calculate the weight of the criteria with different β values

اندیس وزن‌ها	معیارها	B=1	B=2	B=3	B=4	B=5
W۱	سطح پیچیدگی تکنولوژی	۰/۱۷۲۴	۰/۱۲۹۴	۰/۱۱۴۲	۰/۱۰۵۲	۰/۰۹۹۸
W۲	میزان مصرف انرژی	۰/۰۸۳۱	۰/۰۸۷۸	۰/۰۸۹۶	۰/۰۹۱۰	۰/۰۹۱۹
W۳	هزینه مواد خام	۰/۰۶۰۶	۰/۰۸۱۹	۰/۰۸۹۹	۰/۰۹۵۲	۰/۰۹۸۴
W۴	ضایعات و پسماند	۰/۰۸۸۸	۰/۰۷۲۸	۰/۰۷۱۳	۰/۰۷۶۶	۰/۰۷۹۸
W۵	میزان مصرف آب	۰/۱۵۶۲	۰/۱۶۰۰	۰/۱۵۶۷	۰/۱۴۷۹	۰/۱۴۲۶
W۶	هزینه عملیاتی	۰/۰۴۹۷	۰/۰۷۰۰	۰/۰۷۷۶	۰/۰۸۲۶	۰/۰۸۵۶
W۷	هزینه سرمایه گذاری	۰/۰۵۵۸	۰/۰۷۲۲	۰/۰۸۵۱	۰/۰۹۰۵	۰.۰۹۳۷
W۸	فضای مورد نیاز	۰/۰۵۴۸	۰/۰۷۴۲	۰/۰۷۹۷	۰/۰۸۱۱	۰/۰۸۲۰
W۹	خوردگی	۰/۰۸۵۵	۰/۰۶۹۵	۰/۰۶۸۰	۰/۰۷۳۳	۰/۰۷۵۶
W۱۰	کارایی	۰/۱۹۲۶	۰/۱۷۶۸	۰/ ۱۶۷۴	۰/۱۵۶۱	۰/۱۴۹۳

جدول ۶-رتبه بندی تکنولوژی‌ها با مقادیر β متفاوت

Table 6. Ranking of technologies with different β values

اندیس	نام تکنولوژی	β=۱	β=۲	β=۳	β=۴	β=۵	اولویت‌بندی نهایی فناوری ها
S۱	کاهش انتخابی کاتالیستی	S۱۱	S۱۱	S۱۱	S۱۱	S۱۱	IFGR
S۲	کاهش انتخابی غیر کاتالیستی	S۴	S۴	S۴	S۴	S۴	OFA
S۳	مشعل‌های کم ناکس	S۶	S۶	S۶	S۶	S۶	احتراق بدون شعله
S۴	OFA	S۳	S۳	S۳	S۳	S۳	مشعل‌های کم ناکس
S۵	چرخش گاز دودکش	S۱۰	S۱۰	S۱۰	S۱۰	S۱۰	بازسوزش سوخت
S۶	احتراق بدون شعله	S۲	S۲	S۲	S۲	S۲	کاهش انتخابی غیر کاتالیستی
S۷	مه‌پاشی	S۱۳	S۱۳	S۱۳	S۱۳	S۱۳	تخلیه کرونا
S۸	پاشش آب	S۵	S۵	S۵	S۵	S۵	چرخش گاز دودکش
S۹	پاشش بخار	S۱۲	S۱۲	S۱۲	S۱۲	S۱۲	پرتو الکترونی
S۱۰	بازسوزش سوخت	S۱۴	S۱۴	S۱۴	S۱۴	S۱۴	پرتو الکترونی همراه با مایکروویو
S۱۱	IFGR	S۱۷	S۱۷	S۱۷	S۱۷	S۱۷	جذب
S۱۲	پرتو الکترونی	S۱۵	S۱۵	S۱۵	S۱۵	S۱۵	پرتو الکترونی همراه با قطرات ریز آب
S۱۳	تخلیه کرونا	S۸	S۸	S۸	S۸	S۸	پاشش آب
S۱۴	پرتو الکترونی همراه با مایکروویو	S۹	S۹	S۹	S۹	S۹	پاشش بخار
S۱۵	پرتو الکترونی همراه با قطرات ریز آب	S۱۶	S۱۶	S۱۶	S۷	S۷	مه‌پاشی
S۱۶	اسکرابر گاز ویوارد	S۱	S۱	S۷	S۱۶	S۱۶	اسکرابر گاز ویوارد
S۱۷	جذب	S۷	S۷	S۱	S۱	S۱	کاهش انتخابی کاتالیستی

بحث و نتیجه‌گیری

بر اساس مطالعه‌ای‌که توسط دفتر استانداردهای فنی، مهندسی، اجتماعی و زیست‌محیطی برق و انرژی وزارت نیرو در سال ۱۳۸۴ صورت گرفته است، هزینه اجتماعی مستقیم و غیرمستقیم NO_x، SO_2، CO_2 به ازای هر کیلووات ساعت برق تولیدی در نیروگاه‌های بخاری ۷۲۰ تا ۱۳۶۰ ریال، نیروگاه‌های گازی ۷۴۰ تا ۱۳۸۰ ریال و نیروگاه‌های سیکل ترکیبی ۵۹۰ تا ۱۲۳۰ ریال برآورد شده است.

همچنین بر اساس اطلاعات موجود در ترازنامه سال ۹۵ کشور و ExternE، متوسط هزینه اجتماعی گازهای گلخانه‌ای گاز دودکش نیروگاه‌های کشور به شرح جدول ۷ ارائه می‌شود (۴۳،۴۴).

جدول ۷- متوسط هزینه اجتماعی گازهای گلخانه ای و آلایند های گاز دودکش نیروگاه‌های کشور به تفکیک ترازنامه انرژی و ExternE

Table 7. Average social cost of greenhouse gases and flue gas pollutants in the country's power plants by energy balance and ExternE

CO_2(Rials/kWh)		NO_x (Rials/kWh)		SO_2(Rials/kWh)	
ترازنامه	ExternE	ترازنامه انرژی	ExternE	ترازنامه انرژی	ExternE
۵۱/۲	۸۰	۱۱/۲۵	۱۸	۴۰/۵۱	۲۶/۷۳

این درحالی‌است که اطلاعات منتشر شده در سند آلایندگی نیروگاه‌های ایران که در سال ۹۵ تدوین شده است نشان می-دهد، هزینه اجتماعی تولید آلاینده های NOx در بخش نیروگاه‌های ایران برابر با ۳۰۳۰۶۸/۴ دلار بر تن است در صورتی‌که هزینه پیشگیری و کنترل انتشار این آلاینده ۲۰۱۹ دلار بر تن می‌باشد. همان طور که مشاهده می شود هزینه کنترل انتشار گازهای آلاینده بسیار کمتر از هزینه اجتماعی آن‌ها است. همچنین اشاره شده که میزان کاهش انتشار آلاینده‌های NOx و SOx ، تا حدود ۸۰ درصد قابل دستیابی است (۱۸).

این پژوهش با هدف انتخاب تکنولوژی‌های بهینه و رتبه‌بندی آن‌ها به منظور کاهش انتشار اکسیدهای NOx حاصل از فرآیندهای تولید برق در نیروگاه‌های حرارتی ایران انجام شد. بدین منظور و در گام اول، با پیمایش ادبیات در فن آوری های موجود جهان، متغیرهای تاثیر گذار بر انتخاب تکنولوژی‌ها جمع آوری گردید و در گام بعد با به‌کارگیری تکنیک دلفی فازی توسط خبرگان فعال در مجموعه نیروگاهی ایران لیست نهایی این معیارها تایید شد. در گام بعد با استفاده تکنیک SECA ، ابتدا وزن معیارها تعیین شد و همان‌گونه که مشخص شد معیارهای کارایی، میزان مصرف آب، سطح پیچیدگی تکنولوژی، هزینه مواد خام، هزینه سرمایه گذاری، میزان مصرف انرژی، هزینه عملیاتی، فضای مورد نیاز، ضایعات و پسماند و خوردگی تجهیزات به ترتیب از اولویت بیشتر تا کمتر رتبه بندی شده‌اند. در گام بعد تکنولوژی‌های موجود نیز با توجه به اوزان محاسبه شده و توسط حل مدل غیر خطی محاسبه شدند. بر این اساس همان طور که در ستون آخر جدول ۶ بیان شد تکنولوژی‌های IFGR، OFA ، احتراق بدون شعله، مشعل‌های کم ناکس، بازسوزش سوخت به ترتیب اولویت اول تا پنجم را به خود اختصاص دادند که با توجه با این مطلب که جملگی آنها جزء تکنولوژی‌های اصلاح فرآیند احتراق از طریق ترکیب مناسب سوخت و هوا هستند، در واقع نشان دهنده این واقعیت است که فن‌آوری‌های اصلاح فرآیند احتراق از طریق ایجاد ترکیب بهینه با روش‌های مکانیکی نسبت به استفاده از روش‌های تغییر ترکیب شیمیایی و کاربرد کاتالیزور از اولویت بالاتری نسبت به سایر گروه‌های فن‌آوری برخوردار هستند. همچنین موضوع تامل انگیز دیگر در این پژوهش آن است که بر خلاف تصور عمومی نسبت به اولویت داشتن تکنولوژی SCR و رایج بودن آن به عنوان تکنولوژی انتخابی کاهش آلایندگی، این فنآوری به دلیل لحاظ شدن سایر پارامترهای علاوه بر کارایی، در انتهای لیست انتخاب فنآوری قرار گرفت. همچنین فنآوری های نوین مانند Electron Beam با توجه به مزیت آن به دلیل حذف همزمان سایر گروه‌های آلاینده (SOx)، جزء فن آوری‌های قابل توجه و برتر نسبت به فنآوری‌های عمومی‌تر و رایج تر قرار می‌گیرند.جستجوی مولفان برای یافتن پژوهشی با هدف مشابه در داخل ایران نتیجه قابل قبولی در پی نداشت. لاکن در پژوهش‌های خارج از ایران تحقیقات گسترده‌ای به منظور طراحی استراتژی‌های توسعه در بخش انرژی به خصوص صنایع تولید برق با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه انجام پذیرفته که به تعدادی از این موارد در قسمت مرور پیشینه پژوهش اشاره شده است. با مطالعات انجام شده تعداد پژوهش‌های انجام شده با روش AHP نسبت به سایر روش‌ها بیشتر بود و از امتیازات این تحقیق آن است که اهم شاخص‌های مشترک در این پژوهش مورد توجه قرار گرفته است. دراین میان توجه به نکات زیر نیز ضروری می‌باشد:

جایگزینی و استفاده از انرژی های تجدید پذیر باعث کاهش پراکندگی اکسیدهای نیتروژن و سایر آلاینده های خروجی از نیروگاه های ایران می شود.

استفاده از سوخت‌های با نیتروژن کمتر(گاز طبیعی) نیز به دلیل دسترسی قابل قبول کشور به این منبع انرژی می‌تواند در برنامه مطالعاتی سیاست‌گذاران حوزه انرژی قرار گیرد.

واقعی کردن قیمت سوخت ارائه شده به نیروگاه‌ها می‌تواند به عنوان ابزاری مهم و قابل توجه در سوق دادن آن‌ها به تکیه بر افزایش بهره‌وری و راندمان و در نتیجه از دستاوردهای مهم آن کاهش مصرف سوخت و کاهش انتشارات آلاینده‌ها خواهد بود.

متصدیان اصلی حفاظت از محیط زیست ایران از جمله سازمان حفاظت محیط زیست و همچنین مجلس شورای اسلامی، ضروری است نسبت به تعیین سطح مجاز انتشارات آلاینده و

تعیین قوانین جدید بازدارنده و همچنین طراحی برنامه‌های مدون در زمینه مشوق‌های مالیاتی و مالیات سبز به منظور بازسازی و احیای بخش‌های آسیب دیده محیط زیست به عنوان رکن قدرتمند توسعه پایدار به طور جدی مبادرت ورزند.

Reference

1. Chaloulakou A, Mavroidis I, Gavriil I. Compliance with the annual NO2 air quality standard in Athens. Required NOx levels and expected health implications. Atmospheric Environment. 2008 Jan 1;42(3):454-65.
2. Razmjoo A, Shirmohammadi R, Davarpanah A, Pourfayaz F, Aslani A. Stand-alone hybrid energy systems for remote area power generation. Energy Reports. 2019 Nov 1;5:231-41.
3. Spangenberg JH, Pfahl S, Deller K. Towards indicators for institutional sustainability: lessons from an analysis of Agenda 21. Ecological indicators. 2002 Nov 1;2(1-2):61-77.
4. Bekhrad K, Roumi S, Yousefi H, Noorollahi Y. Decrease in CO2 emission per capita as a result of the reduction in power grid losses in Iran. International Journal of Ambient Energy. (2020) Jan 2;41(1):8-18.
5. Spangenberg JH, Pfahl S, Deller K. Towards indicators for institutional sustainability: lessons from an analysis of Agenda 21. Ecological indicators. 2002 Nov 1;2(1-2):61-77.
6. Salo A, Gustafsson T, Ramanathan R. Multicriteria methods for technology foresight. Journal of Forecasting. 2003 Mar;22(2-3):235-55.
7. Szegö GG, Dally BB, Nathan GJ. Scaling of NOx emissions from a laboratory-scale mild combustion furnace. Combustion and Flame. 2008 Jul 1;154(1-2):281-95.
8. Kamall R. Flue Gas Desulphurisation (FGD) technologies. Cleaner coal technology programme, Department of Trade and Industry. 2000;1.
9. Novelo DA, Igie U, Prakash V, Szymański A. Experimental investigation of gas turbine compressor water injection for NOx emission reductions. Energy. 2019 Jun 1;176:235-48Onat N, Bayar H. The sustainability indicators of power production systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2010 Dec 1;14(9):3108-15.
10. Keshavarz-Ghorabaee M, Amiri M, Zavadskas EK, Turskis Z, Antucheviciene J. Simultaneous evaluation of criteria and alternatives (SECA) for multi-criteria decision-making. Informatica. 2018 Jan 1;29(2):265-80.
11. Skalska K, Miller JS, Ledakowicz S. Trends in NOx abatement: A review. Science of the total environment. 2010 Sep 1;408(19):3976-89.
12. Zhang J, Zhang R, Chen X, Tong M, Kang W, Guo S, Zhou Y, Lu J. Simultaneous removal of NO and SO2 from flue gas by ozone oxidation and NaOH absorption. Industrial & Engineering Chemistry Research. 2014 Apr 16;53(15):6450-6.
13. Sorrels JL, Randall DD, Schaffner KS, Fry CR. Selective catalytic reduction. EPA Air Pollution Control Cost Manual. 2016 May:1-08.
14. Rezaei F, Rownaghi AA, Monjezi S, Lively RP, Jones CW. SOx/NOx removal from flue gas streams by solid adsorbents: a review of current challenges and future directions.

Energy & fuels. 2015 Sep 17;29(9):5467-86.

15. Romero, C. E., Vahedi, N., & Qin, Y. (2020). Chemical Kinetics Modeling and Analysis of Mon methylamine for Power Plants Selective Non-Catalytic Reduction (SNCR) Systems. Emission Control Science and Technology, 6(4), 431-441.
16. Mousavi, S. M., Fatehi, H., & Bai, X. S. (2021). Numerical study of the combustion and application of SNCR for NOx reduction in a lab-scale biomass boiler. Fuel, 293, 120154.
17. Romano S, Cerutti M, Riccio G, Andreini A, Romano C. Effect of Natural Gas Composition on Low NOx Burners Operation in Heavy Duty Gas Turbine. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. 2019 Nov 1;141(11).
18. Strategic Document and Technology Development Roadmap, Tehran,Iran, 2015. (In Persian)
19. Liu J, Luo X, Yao S, Li Q, Wang W. Influence of flue gas recirculation on the performance of incinerator-waste heat boiler and NOx emission in a 500 t/d waste-to-energy plant. Waste Management. 2020 Mar 15;105:450-6.
20. Abuelnuor AA, Wahid MA, Mohammed HA, Saat A. Flameless combustion role in the mitigation of NO_X emission: a review. International journal of energy research. 2014 Jun 10;38(7):827-46.
21. Effuggi A, Gelosa D, Derudi M, Rota R. Mild combustion of methane-derived fuel mixtures: natural gas and biogas. Combustion Science and Technology. 2008 Jan 28;180(3):481-93.
22. Szegö GG, Dally BB, Nathan GJ. Scaling of NOx emissions from a laboratory-scale mild combustion furnace. Combustion and Flame. 2008 Jul 1;154(1-2):281-95.
23. Kim KH, Ko HJ, Kim K, Perez-Blanco H. Analysis of water droplet evaporation in a gas turbine inlet fogging process. Applied Thermal Engineering. 2012 Feb 1;33:62-9.
24. Egware HO, Onochie UP, Itoje H. Effect of incorporating fogging inlet air cooling system: a case study of Ihovbor Thermal Power Plant, Benin City. International Journal of Ambient Energy. 2020 Feb 13:1-7.
25. Vadlamudi TC, Kommineni R, Katuru BP. Exploration of turbine blade cooling strategies for performance boosting and CO2 emissions reduction of combined cycle with steam injection based gas turbine. International Journal of Ambient Energy. 2020 Feb 18(just-accepted):1-32.
26. Novelo DA, Igie U, Prakash V, Szymański A. Experimental investigation of gas turbine compressor water injection for NOx emission reductions. Energy. 2019 Jun 1;176:235-48.
27. Londerville S, Anderson K, Baukal C, Bussman W. Water/Steam Injection for NOx Reduction in Process Burners. In ASME 2018 International Mechanical Engineering Congress and Exposition 2018 Nov 9. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection.
28. National Energy Technology Laboratory. IEP—advanced NOx emissions control, NOx reduction technologies.

www.netl.doe.gov/technologies/coalpower/ewr/nox/NOx reduct.
29. Sun Y, Zwolińska E, Chmielewski AG. Abatement technologies for high concentrations of NOx and SO2 removal from exhaust gases: A review. Critical Reviews in Environmental Science and Technology. 2016 Jan 17;46(2):119-42.
30. Talebizadeh, P., Babaie, M., Brown, R., Rahimzadeh, H., Ristovski, Z., & Arai, M. (2014). The role of non-thermal plasma technique in NOx treatment: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 40, 886-901.
31. Tan E, Ünal S, Doğan A, Letournel E, Pellizzari F. New "wet type" electron beam flue gas treatment pilot plant. Radiation Physics and Chemistry. 2016 Feb 1;119:109-15.
32. Lakshmipathiraj P, Chen J, Doi M, Takasu N, Kato S, Yamasaki A, Kojima T. Electron beam treatment of gas stream containing high concentration of NOx: An in situ FTIR study. Chemical engineering journal. 2013 Aug 1;229:344-50.
33. Chmielewski AG, Sun Y, Licki J, Pawelec A, Witman S, Zimek Z. Electron beam treatment of high NOx concentration off-gases. Radiation Physics and Chemistry. 2012 Aug 1;81(8):1036-9.
34. Talebizadeh, P., Babaie, M., Brown, R., Rahimzadeh, H., Ristovski, Z., & Arai, M. (2014). The role of non-thermal plasma technique in NOx treatment: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 40, 886-901
35. Vinogradov J, Rivin B, Sher E. NOx reduction from compression ignition engines with pulsed corona discharge. Energy. 2008 Mar 1;33(3):480-491.
36. Park JH, Ahn JW, Kim KH, Son YS. Historic and futuristic review of electron beam technology for the treatment of SO2 and NOx in flue gas. Chemical Engineering Journal. 2019 Jan 1;355:351-66.
37. Poullikkas A. Review of Design, Operating, and financial considerations in flue gas desulfurization systems. Energy Technology & Policy. 2015 Jan 1;2(1):92-103.
38. Kamall R. Flue Gas Desulphurisation (FGD) technologies. Cleaner coal technology programme, Department of Trade and Industry. 2000;1.
39. Greening LA, Bernow S. Design of coordinated energy and environmental policies: use of multi-criteria decision-making. Energy policy. 2004 Apr 1;32(6):721-35.
40. Daim T, Yates D, Peng Y, Jimenez B. Technology assessment for clean energy technologies: The case of the Pacific Northwest. Technology in Society. 2009 Aug 1;31(3):232-43.
41. Park JH, Ahn JW, Kim KH, Son YS. Historic and futuristic review of electron beam technology for the treatment of SO2 and NOx in flue gas. Chemical Engineering Journal. 2019 Jan 1;355:351-66.
42. Tsoutsos T, Drandaki M, Frantzeskaki N, Iosifidis E, Kiosses I. Sustainable energy planning by using multi-criteria analysis application in the island of Crete. Energy policy. 2009 May 1;37(5):1587-600.

43. Shafie-Pour, M., & Ardestani, M. (2007). Environmental damage costs in Iran by the energy sector. Energy Policy, 35(9), 4413-4423.

44. Energy balance sheet of 2016, Ministry of Energy. (In Persian)