فصلنامه مدیریت صنعتی دانشکده علوم انسانی، دانشگاه آزاد اسلامی
واحد سنندج – سال پانزدهم/ شماره ۵۲ / تابستان ۱۳۹۹

شناسایی و اولویت بندی فن آوری های کاهنده انتشار SOx مورد مطالعه: نیروگاه های حرارتی ایران

شیرین عزیزی
دانشجوی دکترای مدیریت صنعتی گرایش مدیریت سیستم‌ها، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و اقتصاد، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
رضا رادفر(نویسنده مسؤول)
گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و اقتصاد، واحد علوم وتحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
Email: radfar@gmail.com
هانیه نیکومرام
گروه مدیریت محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، واحد علوم و تحقیقات ،دانشگاه آزاد اسلامی،تهران،ایران
علی رجب زاده قطری
گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و اقتصاد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۹۸/۰۹/۱۰ * تاریخ پذیرش ۹۹/۰۳/۱۸

چکیده
نیروگاه‌های حرارتی با مصرف قابل توجه سوخت‌های فسیلی، نقش عمده‌ای در تولید آلاینده‌های هوا دارند. اکسیدهای گوگرد از جمله این آلاینده‌ها هستند. تاکنون هیچ یک ازنیروگاه‌های حرارتی ایران به فناوری‌های کاهش و کنترل انتشار اکسیدهای گوگرد 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 در تلاش است تا با ارائه راهکاری به منظور اولویت بندی و انتخاب فناوری‌های کاهنده اکسیدهای گوگرد با رویکرد سرمایه‌گذاری در نیروگاه‌های حرارتی ایران در مدیریت انتشار این آلاینده نقش موثری ایفا کند. در این پژوهش به منظور انتخاب معیارهای موثر بر انتخاب فناوری از تکنیک دلفی فازی و به منظور رتبه بندی فن آوری‌های کاهنده SOx از تکنیک نوین رتبه‌بندی همزمان معیارها و گزینه‌ها (SECA) بهره گرفته شد. نتایج پژوهش نشان داد که تکنولوژی‌های اسکرابرهای خشک، فرآیند احیا، تخلیه کرونا، فرایند تزریق جاذب وتکنولوژی جذب به ترتیب اولویت اول تا پنجم انتخاب فناوری را به خود اختصاص داده‌اند.

کلمات کلیدی: آلایندگی، فن آوری های کاهنده SOx، تحلیل سلسله مراتبی، دلفی فازی، SECA.

۱-مقدمه

حفاظت از محیط زیست در جوامع مدرن به یک موضوع مهم اجتماعی و اقتصادی تبدیل شده است. آگاهی در مورد حفاظت از محیط زیست در سراسر جهان در حال افزایش است و با وضع قوانین سختگیرانه تر در سال های اخیر سطح قابل قبول آلودگی هوا را تنظیم می‌کنند. از طرف دیگر تعداد وسایل نقلیه، نیروگاه ها و کارخانه‌های در حال کار نیز در حال افزایش است. 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 (Chmielewski, 2013). این امر باعث آلودگی گسترده به خصوص در مناطق شهری می‌شود. فرآیندهای احتراق سوخت های فسیلی (که در نیروگاه ها و وسایل نقلیه اتفاق می افتد) منابع اصلی آلودگی هوا هستند و ترکیبات شیمیایی مضر مانند CO2 ، SO2 ، NOx، هیدروکربن های غیرمجاز و ذرات را منتشر می‌کنند. این ترکیبات برای سیستم تنفسی انسان و محیط زیست مضر هستند و باعث ایجاد باران اسیدی، نازک شده روزافزون لایه ازن ، دود فتوشیمیایی و اثر گلخانه ای می‌شوند. نیروگاه‌ها، بر اساس احتراق سوخت های فسیلی، هنوز هم رایج ترین هستند. در اروپا بیش از ۵۰٪ انرژی در نتیجه فرایندهای احتراق و سوختن سوخت های فسیلی تولید می شود و احتمالاً در آینده نزدیک این نسبت تغییر نخواهد کرد (Chmielewski, 2013). در سال۲۰۱۲ نیروگاه‌های ایران با مصرف۱/۶ درصداز نفت و فرآورده‌های نفتی بعد از ژاپن و عربستان در رتبه سوم جهان قرار گرفتند. ایران جزو کشورهایی است که گران ترین برق را با استفاده از فراورده های نفتی و گاز تولید می کند (رتبه سوم در تولید برق با فراورده های نفتی و رتبه چهارم در تولید برق با گاز (Ministry of Industry, Mine and Trade). 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 (بر اساس قیمت های ثابت سال۱۳۸۱) می‌باشد که معادل ۱۹/۶درصد از تولید ناخاص داخلی کشور در ان سال بوده است (Energy Balance Sheet, 2015). 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 گلخانه‌ای 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 بزرگ‌ترین تولیدکنندگان گاز گلخانه‌ای در کشور مطرح می‌باشد (Strategic Document and Technology Development Roadmap, 2015).

تخمین‌ها از هزینه‌های زیست محیطی نشان داده شده که تولید گازهای گلخانه‌ای SO2 جزء گران ترین از نظر هزینه‌های زیست محیطی می‌باشند، مقوله‌ای که ما در تلاشیم مطالعه خود را بر آن متمرکز کنیم. بدین منظور و در گام اولیه، تکنولوژی-های مختلف کاهنده انتشار SOx از نیروگاه‌های حرارتی که با سوزاندن سوخت‌های فسیلی به تولید انرژی برق می‌پردازند، شناسایی شده و عوامل موثر بر انواع تکنولوژی‌های مطرح شده شناسایی و معرفی شده‌اند. عوامل تاثیرگذار بر تعیین موفقیت تکنولوژی‌ها متنوع هستند و بالطبع اهمیت تاثیرگذاری آن‌ها نیز بر فرآیند SOx زدایی متفاوت است. بنابراین برای شفاف شدن میزان تاثیر هریک از عوامل در تکنولوژی‌ها، باید اهمیت نسبی هریک از عوامل نیز مشخص شود. بر این اساس در مطالعه حاضر به شناسایی عوامل موثر بر عملکرد تکنولوژی‌های معرفی شده در کاهش انتشار SOx با کمک روش دلفی فازی می‌پردازیم و به منظور تعیین اهمیت هر یک از عوامل ودر ادامه اولویت‌بندی تکنولوژی‌های موجود، الگوریتم تحلیل سلسله مراتبی موسوم به SECA بکار گرفته می‌شود. در ادامه مبانی نظری و پیشینه پژوهش تبیین می‌شود. در بخش بعدی، روش شناسی پژوهش بیان می‌شود. سپس داده‌ها تحلیل می‌شود و در نهایت نتیجه‌گیری کلی ارائه می‌شود.

تولید انرژی برق در ایران در طی سال‌های اخیر رشد قابل توجهی را به دلیل افزایش چشمگیر جمعیت، رشد اقتصادی و افزایش چشمگیر شهر نشینی تجربه کرده است. به تبع آن تولید سرانه برق از میزان ۳۱۰کیلو وات ساعت در سال ۱۳۵۲، به ۲۹۳۵ کیلو وات ساعت در سال ۱۳۸۷ افزایش یافته است(Statistical report of 42 years of activity of Iran's electricity

industry, 2009). علاوه بر آن سوبسیدهای قابل ملاحظه بر قیمت برق و از این طریق ارائه انرژی بسیار ارزان قیمت نیز بر روند مصرف رو به رشد آن تاثیرگذار می‌باشد. در ایران حدود ۹۰ درصد از برق کشور توسط سوزاندن سوخت‌های فسیلی در نیروگاه تولید برق حرارتی ایجاد می‌شود که این میزان بسیار بیشتر از همتایان آن در کشورهای OECD و کشورهای غیر OECD است(IEA, ۲۰۰۶). در همین حال، ۲۴٪ برق در ایران توسط فرآورده های نفتی شامل نفت سنگین و گازوئیل با سهم ۱۷٪ و ۷٪ تولید می شود(Energy Balance Sheet, 2015)در مقایسه با سایر فرآورده های نفتی، گاز طبیعی سهم بالاتری در تولید برق ما دارد. اما در فصول سرد سال با سرمای شدید ، گاز طبیعی از نیروگاه ها قطع می شود (برای استفاده در بخش مسکونی مورد استفاده قرار می‌گیرد) و از این طریق نیروگاه های حرارتی مجبور می شوند از سوخت ثانویه خود یعنی گازوئیل یا روغن سنگین استفاده کنند که این مسئله باعث انتشار حجم وسیعی از اکسیدهای گوگرد در هوا می‌شود. طبق اطلاعات منتشر شده در سند راهبردی و نقشه راه توسعه فناوری کشور هیچ یک از نیروگاه‌های ایران به فناوری‌های حفظ و کنترل انتشار اکسیدهای گوگرد تجهیز نشده‌اند (Strategic Document and Technology Development Roadmap, 2015). از این رو اهتمام در زمینه انتخاب و نصب این تکنولوژی‌ها به منظور تامین امنیت بهداشت و سلامت جامعه و به تبع آن کاهش قابل توجه هزینه‌های جانبی و اجتماعی حاصل از آن از اهمیت شایانی برخوردار است. پیشرفت‌های فنآوری از اهمیت اساسی برای بهبود شرایط زندگی، تولید و حمل و نقل انرژی و بهره وری از استفاده از آن برخوردار است (World Energy Council, 2011). با این وجود، ارزیابی فناوری‌ها با در نظر گرفتن معیارهای متعدد کاری پیچیده و وقت گیر است، زیرا این تحلیل با مجموعه‌ای از ابهامات مانند قیمت سوخت فسیلی، مقررات زیست محیطی، ساختار بازار، مسائل مربوط به تکنولوژی و فناوری و عدم قطعیت تقاضا و عرضه روبرو می‌باشد(Venetsanos et al., 2002). روش‌های تصمیم-گیری چند معیاره می‌توانند یک ابزار حمایتی مهم در سیاست گذاری سرمایه‌گذاری انرژی باشند و ضمن انعطاف پذیری، ظرفیت ارزیابی پیامدهای فن‌آوری‌ها بر اقتصاد ، محیط و چارچوب اجتماعی را فراهم آورند (Salo et al., 2003). در ادامه به بخشی از پژوهش‌های انجام شده در صنعت برق با بکارگیری تکنیک‌های رتبه‌بندی چند معیاره می‌پردازیم. 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 پرومته[1] انجام شد(Tsoutsos et al., 2009). در مقاله‌ای که با عنوان ارزیابی پایداری یک سیستم انرژی ترکیبی که توسط افغان و کاروالهو انجام پذیرفت، راندمان، هزینه برق، هزینه سرمایه گذاری، انتشار CO2، انتشار NOx به عنوان شاخص‌های مورد بررسی انتخاب شد و از روش میانگین حسابی وزن شاخص ها بدین منظور بهره گرفته شد(Afgan& Carvalho, 2008). در مقاله‌ای که با عنوان برنامه ریزی استراتژیک در بخش تولید برق از طریق تهیه یک مدل ارزیابی چند معیار مبتنی بر دلفی[2] 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 پذیرفت(Kaldellis et al., 2013). 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 بخش تکنولوژی در دسترس بودن تکنولوژی و کارایی، در بخش اقتصادی، هزینه انرژی، در بخش محیطی، انتشار CO2، استفاده از زمین، مصرف آب شیرین و در بخش اجتماعی، هزینه‌های

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

خارجی، مزایای خارجی به عنوان شاخص‌های پژوهش لحاظ شد(Onat & Bayar, 2010). در مقاله‌ای که با عنوان تصمیم-گیری چند معیاره به منظور ارزیابی فناوری‌خورشیدی متمرکز برای تولید برق انجام پذیرفت، شاخص‌های بلوغ فناوری، دما ،ضریب ظرفیت خورشیدی در گروه تکنولوژی، هزینه سرمایه گذاری، هزینه عملیات و تعمیر و نگهداری در گروه اقتصادی و تأثیرات زیست محیطی در گروه محیط زیست به عنوان شاخص لحاظ شد. این پژوهش با استفاده از تکنیک رتبه بندی چند معیاره پرومته و گایا[4] انجام پذیرفت(Cavallaro, 2009).

در مقاله‌ای که با عنوان ارزیابی و رتبه بندی چند معیاره فن آوری‌های نیروگاهی با سوخت هیدروژن و گاز طبیعی با هدف ارزیابی فن‌آوری‌های تولید انرژی برق انجام پذیرفت، کارایی و بهره وری در گروه تکنولوژی، انتشار CO2، انتشار NOx و انتشارSOx در گروه زیست محیطی و هزینه سرمایه ، هزینه عملیاتی و تعمیر و نگهداری و هزینه برق در گروه اقتصادی لحاظ شد.این پژوهش با تکنیک رتبه‌بندی چند معیاره AHP انجام پذیرفت(Pilavachia, 2009). در مقاله‌ای که با عنوان ارزیابی سیاست منبع انرژی با استفاده از فرآیند سلسله مراتبی تحلیلی و با هدف تسهیل برنامه‌ریزی منابع انرژی و با استفاده از تکنیک رتبه‌بندی چند معیاره AHP انجام پذیرفت، در بعد فناوری امکان دستیابی به فناوری اصلی، برتر بودن فناوری، کامل بودن فناوری، در بعد اقتصادی قابلیت اطمینان فن آوری و عملیات ، سهولت دسترسی به منابع، سرمایه گذاری اضافی، دوام منبع، استفاده تکمیلی از منابع و در بعد زیست محیطی تأثیر فناوری به محیط زیست ، اثرات کربن ، نیاز به منابع و در بعد عمومی، قابل قبول بودن توسط ساکن محلی لحاظ شد (Erol & Kilkis, 2012). در مقاله‌ای که با عنوان اولویت بندی فناوری های تولید برق پایدار: رویکرد MCDM در سال ۲۰۱۲ با هدف انتخاب پایدارترین فن آوری های تولید برق انجام پذیرفت، شاخص-های هزینه های خصوصی، ضریب در دسترس بودن (بار)، امنیت تامین، هزینه های اتصال شبکه در گروه شاخص‌های اقتصادی، انتشار گازهای گلخانه ای ، هزینه های محیطزیست ، هزینه های خارجی رادیونوکلئید[5]، تأثیر بر سلامت انسان در گروه شاخص-های عمومی و فرصت های شغلی خاص فناوری، ریسک ایمنی مواد غذایی ، تاثیرات مرگبار حوادث گذشته، حوادث شدیدی که در آینده ممکن است اتفاق بیفتد به عنوان شاخص‌های عمومی در نظر گرفته شدند. این پژوهش با تکنیک ارزیابی رتبه بندی تاپسیس و مولتی موراً[6] انجام پذیرفته است(Streimikiene, 2012). مقاله‌ای توسط داپکوس و همکاران با عنوان ارزیابی چند معیاره فن آوری‌های تولید برق که به دنبال اجرای اهداف سیاست گذاری انرژی اتحادیه اروپا هستند با استفاده از تکنیک رتبه-بندی مولتی مورا انجام شد. او تحلیل را با هدف گرایش به انرژی‌های خورشیدی و آبی در آینده ارائه داد (Dapkus & Streimikiene, 2012). دایم و همکاران یک ارزیابی فناوری برای تولید برق پاک در شمال غربی اقیانوس آرام را انجام دادند. هدف آن‌هااین بود که معیارهای تولید پاک را در فرایند ارزیابی جایگزین معیارهای توان قرار دهند. معیارهایی مانند مکان، هزینه، امکان سنجی و در دسترس بودن برای ارزیابی‌ها استفاده شد. از تحلیل سلسه مراتبیAHP برای رتبه‌بندی تکنولوژی‌ها استفاده کردند و در نهایت برای فناوری تولید گازهای گلخانه‌ای SO2، فرآیند احیا کننده بهترین فناوری برای اسکراب انتشار گازهای SO2 از هوا تعیین شد (Daim et al., 2009). مونتانری در سال ۲۰۰۴ از یک روش ترکیبی سلسه مراتبی(TOPSIS) و (AHP)، برای طبقه بندی عملکرد محیطی یک نیروگاه بر اساس چندین شاخص تک هدفه استفاده کرد. شاخص های عملکرد تک هدفه، شامل میزان انتشار گازهای گلخانه ای SO2، NOx، CO2 و غیره بود (Montanari, 2004). کوالسکی و همکاران (۲۰۰۹) مطالعه‌ای را برای تعیین مناسب‌ترین گزینه اقتصادی برای تامین انرژی پایدار با استفاده از تکنیک تصمیم گیری چند معیار برای تحلیل میزان انتشار گاز نیروگاه‌ها انجام داد. نتایج آنها حاکی از آن بود که گاز طبیعی بهترین سوخت است (Kowalski, 2009). دیاکولا و کارنگلیس پژوهشی با عنوان تجزیه و تحلیل تصمیمات چند معیاره و تحلیل هزینه و فایده سناریوهای جایگزین برای بخش تولید برق در یونان انجام دادند. هدف در نظر گرفتن عمده تبعات جانبی مثبت و منفی فن‌آوری‌های تولید برق برای شرکت در هر سناریو و تاکید بر نقش ویژه منابع انرژی تجدید پذیر که نشان دهنده

[4] . PROMETHEE, GAIA
[5] . radionuclide external cost
[6] . Multimoora and TOPSIS

یک عامل اصلی تمایز عمده بین آنها است، تعریف شد. محاسبه عملکردهای اقتصادی، فنی و زیست محیطی سناریوهای مورد بررسی برای سال ۲۰۱۰ نشان داد که برنامه ریزی برق کار پیچیده ای است زیرا پیشرفت در یک هدف سیاسی با خسارات در سایر قسمت‌ها همراه است. به منظور حل این تعارض، سناریوهایی با دو روش تصمیم گیری، تجزیه و تحلیل تصمیمات چند معیار و تجزیه و تحلیل هزینه و فایده، که قادر به گسترش مرزهای دقیق یک تحلیل مالی هستند استفاده شد. پس از انجام دو روش ارزیابی کاملاً متفاوت، سناریو توسعه منابع انرژی تجدیدپذیر به عنوان بهترین پیکربندی توسعه انرژی برای بخش تولید برق یونان تایید شد (Karangelis & Diakoulaki, 2007). با بررسی‌هایی که نگارنده انجام داد پژوهشی که در آن تکنولوژی‌های کاهنده اکسیدهای گوگرد را شناسایی و با توجه به موقعیت و شرایط نیروگاه‌های ایران به رتبه‌بندی آن‌ها بپردازد مشاهده نشد. در ادامه تکنولوژی‌های کاهنده اکسیدهای گوگرد با مطالعه منابع متعدد به شرح جدول ۱ ارائه می‌شود.

جدول شماره (۱): معرفی تکنولوژی‌های بحث شده در پژوهش

نام تکنولوژی	
اسکرابرهای مرطوب لجن[۷]	پرتو الکترونی ۸
اسکرابرهای مرطوب گچ[۹]	تخلیه کرونا[۱۰]
اسکرابرهای اسپری خشک – نیمه خشک[۱۱]	پرتو الکترونی همراه با مایکروویو[۱۲]
فرایندهای تزریق جاذب[۱۳]	پرتو الکترونی همراه با قطرات ریز آب۱۴
اسکرابرهای خشک[۱۵]	اسکرابر گاز ویوارد [۱۶]
فرآیندهای احیا[۱۷]	جذب[۱۸]

ماخذ: یافته‌های تحقیق

به طور کلی تکنولوژی‌های کاهنده انتشار اکسیدهای گوگرد به سه دسته کلی تقسیم می‌شوند. تکنولوژی‌های اصلاح سوخت، تکنولوژی‌های حین احتراق و تکنولوژی‌های پس از انجام احتراق و پالایش گازهای خروجی از دودکش نیروگاه[۱۹]. گروه اول نیاز به سرمایه‌گذاری در اصلاح سوخت مورد استفاده دارد که با توجه به تحمیل هزینه بسیار بالاتر نسبت به دو روش دیگر، در اولویت بررسی قرار نمی‌گیرد.عمده روش موجود بدین منظور در گروه روش‌های حین احتراق(گروه پرتوهای الکترونی، تخلیه کرونا و ...) و نیز گروه سولفورزدایی از گاز دودکش(اسکرابرهای ترو خشک و نیمه خشک، جذب، تزریق جاذب، فرایندهای احیا) می‌باشند. البته نکته‌ای که در این میان از نظر بزخی از صاحبنظران مطرح می‌باشد به این شرح است که با توجه به مزیت قابل توجه ایران در دسترسی به گاز طبیعی، چرخش نوع سوخت مصرفی از سوخت‌های نفت سنگین به گاز طبیعی از راهکارهای پیشتاز در کنترل آلایندهای منتشر شده نیروگاه می‌باشد. البته که اصلاح سوخت مصرفی توسط نیروگاه‌های حرارتی تاثیرات قابل توجهی در کاهش انتشار اکسیدهای گوگرد ایفا می‌کند، لاکن با توجه به اینکه تاکنون اجماع قابل استنادی در حوزه سیاست-گذاری های کلان کشور در خصوص جهت گیری برآیند ملاحضات مربوط به میزان ارزش افزوده حاصل از صادرات گاز و یا استفاده از آن در حوزه‌های دیگر نسبت به مصرف آن در نیروگاه‌های حرارتی، و یا تاثیر اختصاص ارزان قیمت گاز طبیعی در توسعه نیروگاه‌های سوخت فسیلی و مغفول ماندن توسعه دربخش انرژهای تجدید پذیر حاصل نشده، لذا این استراتژی همچنان از سوی محققان حوزه انرژی مورد بحث می‌باشد. تکنولوژی‌های اشاره شده با مطالعه منابع متعدد کنترل آلایندگی در نیروگاه-

---

7 . wet scrubber sludge
8 . electron beam
9 . wet scrubber gypsum
10 . corona discharge
11 . spray dry scrubbers
12 . electron beam+MW
13 . sorbent injection process
14 . electron beam+FWD
15 . dry scrubbers
16 .Vivard gas scrubber(VGS)
17 . regenerable process
18 . adsorbtion
19 .FGD

های حرارتی و همچنین فناوری‌های موجود و تازه معرفی شده به دنیای تکنولوژی انتخاب و معرفی شده است. شرح مختصری از منابع معرف آن‌ها و ارائه توضیحات جامع‌تر که اشاره به آن‌ها در این مقال نمی‌گنجد به شرح جدول شماره ۲ ارائه شده است.

۲- روش شناسی پژوهش

این پژوهش به لحاظ هدف کاربردی و از لحاظ ماهیت توصیفی – پیمایشی می‌باشد. دراین پژوهش ابتدا از مطالعات میدانی و کتابخانه‌ای و انجام مصاحبه باز با خبرگان صنعت برق برای شناسایی معیارهای تاثیرگذار بر انتخاب فناوری استفاده شد. به منظور پالایش و ارزیابی معیارهای نهایی تاثیرگذار بر انتخاب فناوری از روش دلفی فازی استفاده شد. بدین منظور از پرسشنامه دلفی استفاده شد و روایی آن به تایید خبرگان رسید. جامعه آماری مورد نظر به منظور انجام نظرسنجی فعالان حوزه طراحی و توسعه نیروگاه بودند که با استفاده از تکنیک گلوله برفی انتخاب شدند. بدین ترتیب اعضای مشارکت کننده در تعیین معیارهای پژوهش، شامل ۸ نفراز متخصصان شرکت مدیریت پروژه‌های نیروگاهی ایران(مپنا)، با تحصیلات لیسانس و فوق لیسانس با سابقه کاری بیشتر از ۱۵ سال انتخاب شدند. سپس اهمیت نسبی هر یک از عوامل موثر بر انتخاب فناوری و رتبه‌بندی فنآوری‌ها با استفاده از روش نوین تحلیل سلسه مراتبی SECA انجام پذیرفت. این روش رتبه بندی شده نوین که در سال ۲۰۱۸ معرفی شده از طریق حل مدل غیر خطی چند هدفه، وزن معیارها و رتبه‌بندی گزینه‌ها را به طور همزمان انجام می‌دهد.

جدول شماره(۲) : منابع معرف تکنولوژی های کاهنده اکسیدهای گوگرد از نیروگاه ها

ردیف	تکنولوژی	منابع
۱	اسکرابرهای مرطوب لجن	Poullikkas, 2015;Dou et al,2009;Stergarek, 2010;Park et al,۲۰۱9
۲	اسکرابرهای مرطوب گچ	Park etal,2019;Poullikkas,2015;Stergarek,2010;Wu et al,2013
۳	اسکرابرهای اسپری خشک – نیمه خشک	Environmental Protection Agency,2003; Poullikkas,2015; Zaremba et al,2008; Cheng,Zhang,2018
٤	فرایندهای تزریق جاذب	Poullikkas,2015; Rodriguez et al,2008
٥	اسکرابرهای خشک	Rezaei et al,2015;Jafarinejad,2016;Environmental Protection Agency,2003;Cheng, Zhang,2018;Park etal,2019;Wu et al,2013;Li et al,2007
٦	فرآیندهای احیا	Poullikkas, 2015;Kiel et al,1992
۷	پرتو الکترونی	Chmielewski۲۰۰۷ ،;Namba et al۱۹۹۵،;Chmielewski et al,1993؛ Chmielewski et al ۱۹۹۵ ،;Chmielewski et al , 2004;Basfar et al.,2008; Chmielewski et al., 2012a; Chmielewski et al., 2012b; Chmielewski et al., 2002; Kikuchi and Pelovski, 2009; Lakshmipathiraj et al., 2013; Licki et al., 2002; Namba et al., 1998; Polyanskii et al., 2012 Radoiu et al., 2003;Wang et al,2005;Sun et al,2016
۸	تخلیه کرونا	Mok and Ham,1998; Mok and Nam,2002;Vinogradov et al.,2008
۹	پرتو الکترونی و مایکروویو	Cheng; Zhang ,2018;Martin,1999
۰۰	پرتو الکترونی همراه با قطرات ریز آب	Cheng; Zhang ,2018; Calinescu,2013;Cleland et al,2011
۱۱	اسکرابر گاز ویوارد	Tan et al,2016;Park et al,2019
۱۲	جذب	Atanes et al., 2012; Dahlan et al., 2009, 2011; Lau et al., 2011, Sumathi et al., 2010;Tan et al,2016 ;Zhang et al,2014; Zhang,2002; Zwolińska et al,2017;Poullikkas, 2015

ماخذ:یافته های پژوهش

۳- نتایج و بحث

ابتدا معیارهای تاثیرگذار بر انتخاب تکنولوژی را با مطالعه ادبیات و مطالعات موجود انتخاب و سپس جهت پالایش نهایی معیارها، از تکنیک دلفی فازی استفاده می‌کنیم. این معیارها در جدول شماره ۳ ارائه شده است.

جدول شماره (۳): معرفی معیارهای تاتیرگذار در انتخاب فناوری

معیارها	مرجع
حداکثر کارایی	Kamall R,2000;Daim et,.al,2009; Poullikkas,2015;Park et al,2019; Sun et al,2016
تجاری بودن محصول جانبی	Kamall R,2000; Poullikkas,2015;Daim et,.al,2009; Park et al,2019;Sun et al,2016
فضای مورد نیاز	Poullikkas, 2015; Park et al,2019
هزینه سرمایه‌گذاری ثابت	Kamall R ,2000; Poullikkas, 2015; Daim et,.al,2009; Park et al,2019
هزینه سرمایه‌گذاری متغیر	Kamall R ,2000; Poullikkas, 2015; Daim et,.al,2009; Park et al,2019
میزان مصرف آب	Poullikkas, 2015; Gang et al,.2011
میزان فاضلاب	Kamall R,2000;Poullikkas,2015; Daim et al,2009;Gang et al,2011;Sun et al,2016
میزان ضایعات وپسماند	Kamall R ,2000; Poullikkas, 2015; Daim et,.al,2009; Sun et al,2016
سطح پیچیدگی تکنولوژی	Kamall R ,2000; Poullikkas, 2015; Daim et,.al,2009; Sun et al,2016
هزینه مواد خام	Kamall R ,2000; Poullikkas, 2015; Daim et,.al,2009
میزام مصرف انرژی	Kamall R,2000;Poullikkas;2015;Daim et al,2009;Park et al,2019;Sun et al,2016
میزان دانش بومی موجود	Kamall R ,2000;
میزان امنیت	Park et al,2019

الف)تکنیک دلفی فازی: تکنیک دلفی یک فرآیند قوی مبتنی بر ساختار ارتباطی گروهی است که در مواردی که دانشی ناکامل و نامطمئن در دسترس باشد (Hader,1995). با هدف دستیابی به اجماع گروهی در بین خبرگان استفاده می‌شود (Keeney et al., 2001). در روش دلفی کلاسیک، نظرات خبرگان در قالب اعداد قطعی بیان می‌شود، درحالی که افراد خبره از شایستگی‌های ذهنی خود برای بیان نظر استفاده می‌کنند و این نشان دهنده احتمالی بودن عدم قطعیت حاکم بر این شرایط است. احتمالی بودن عدم قطعیت، با مجموعه‌های فازی سازگاری دارد. بنابراین، بهتر است داده‌ها در قالب زبان طبیعی از خبرگان اخذ و با استفاده از مجموعه‌های فازی مورد تحلیل قرار گیرند(Azar & Faraji, 2010). بدین منظور، پیشنهاد ادغام روش دلفی سنتی با تئوری فازی تحت عنوان روش دلفی فازی ارائه شد (Murryet al., 1985). در این روش از توابع عضویت برای نشان دادن نظر خبرگان استفاده میشود .(Kardaras et al., 2013; Ishikawa et al., 1993) با بکارگیری تئوری فازی در روش دلفی، الگوریتم یکپارچه دلفی فازی را توسعه دادند. مزیت روش دلفی فازی در توجه به هر یک از نظرات و یکپارچه نمودن آنها برای دستیابی توافق گروهی است (Kuo & Cheng 2008). مراحل اجرایی این روش ترکیبی از روش دلفی سنتی و تحلیل داده‌های هر مرحله با استفاده از تعاریف نظریه مجموعه‌های فازی است. به منظور فازی سازی نظرات خبرگان از اعداد فازی استفاده می‌شود. اعداد فازی، مجموعه‌های فازی هستند که در مواجه با عدم قطعیت در مورد یک پدیده به همراه داده‌های عددی تعریف می‌شود. در این مطالعه از عدد فازی مثلثی استفاده شده است. عدد فازی مثلثی با سه عدد حقیقی به صورت (M=(l,m,u نمایش داده می‌شود. کران بالا(u) بیشینه مقادیر عدد فازی M ،کران پایین (l) کمینه مقادیر عدد فازی M و m محتمل‌ترین مقدار یک عدد فازی است. تابع عضویت یک عدد فازی مثلثی به صورت زیر است:

رابطه ۱

$$\pi_M(x) \cong \begin{cases} \dfrac{x-l}{m-l} & l \le x \le m \\ \dfrac{u-x}{u-m} & m \le x \le u \\ 0 & otherwise \end{cases}$$

مراحل اجرای روش دلفی فازی به شرح زیر می‌باشد(Cheng & Lin, 2002). گام اول: گردآوری نظرات خبرگان؛ در مرحله اول دلفی، پرسشنامه‌ای دارای ساختار براساس نتایج مرحله اول پژوهش طراحی و از خبرگان درخواست شد تا با استفاده از متغیرهای کلامی خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد میزان اهمیت هر یک از مراحل شناسایی شده را مشخص نمایند. گام دوم تبدیل متغیرهای کلامی به اعدا فازی مثلثی؛ دراین مرحله متغیرهای کلامی با توجه به شکل شماره (**۱**)**:**به صورت اعداد فازی مثلثی تعریف شدند. لازم به ذکر است جمعیت خبرگان پژوهش شامل ۸ نفر از مهندسان با سابقه بالای ۱۰ سال در طراحی و مدیریت پروژه‌های نیروگاهی ایران بودند.

متغیرهای کلامی	عدد فازی مثلثی (l, m, u)
خیلی زیاد	(۰/۷۵ ، ۱ ، ۱)
زیاد	(۰/۵ ، ۰/۷۵ ، ۱)
متوسط	(۰/۲۵ ، ۰/۵ ، ۰/۷۵)
کم	(۰ ، ۰/۲۵ ، ۰/۵)
خیلی کم	(۰ ، ۰ ، ۰/۲۵)

شکل شماره (۱): متغیرهای کلامی و عدد فازی مثلثی

بدین صورت که پرسش‌نامه با مقادیر کلامی برای هر متغیر به خبرگان داده شد و سپس طبق جدول فوق این پاسخ‌ها به مقادیر فازی مثلثی تبدیل شد و مجموعه اعداد فازی مثلثی برای هر خبره با استفاده از رابطه ۲ بدست آمد.

رابطه ۲

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

گام سوم: در این مرحله میانگین مجموعه ها $(A_m^{(i)})$ ازتمامی مجموعه ها $(A^{(i)})$ از طریق رابطه ۳ محاسبه شد (ستون میانگین جدول۴).

سپس برای هر خبره، مقدار اختلاف از میانگین محاسبه شد. در مرحله دوم به منظور بررسی میزان توافق بین خبرگان، پرسشنامه

رابطه ۳

$$A_m \cong (a_{m1}, a_{m2}, a_{m3}) \cong \left(\frac{1}{n}\sum_{i\cong 1}^{n} a_1^i, \frac{1}{n}\sum_{i\cong 1}^{n} a_2^i, \frac{1}{n}\sum_{i\cong 1}^{n} a_3^i\right)$$

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

رابطه ۴

$$B^{(i)} \cong (b_1^{(i)}, b_2^{(i)}, b_3^{(i)}) \qquad i \cong 1, 2, \ldots, n$$

خبرگان در قالب اعداد فازی مثلثی به صورت رابطه۴ درآمد.

در این مرحله نیز همانند گام دوم، میانگین نظرات اصلاح شده خبرگان در مرحله دوم دلفی محاسبه شد (ستون میانگین جدول۵).

گام پنجم: فازی زدایی کردن؛ روشهای مختلفی برای فازی زدایی مقادیر نهایی هر یک از شاخصها وجود دارد. در این پژوهش از روش مینکووسکی(Cheng & Lin, 2002). طبق رابطه ۵ محاسبه و ارائه شده است (ستون دی فازی جداول ۴ و۵).

رابطه ۵

$$\phi \cong a_{10} \cdot \frac{a_3 \,0\, a_2}{4}$$

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 جدول۵). 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 (Cheng & Lin, 2002).

جدول شماره (۴): نتایج پرسشنامه مرحله اول دلفی

معیارها	میانگین			De fuzzy
	u	m	l	χ_1
کارایی	۱	۰/۹۱	۰/۶۶	۰/۶۷۹۶۸۷۵
قابلیت تجاری بودن محصول جانبی	۱	۰/۸۸	۰/۶۳	۰/۶۵۶۲۵
میزان فضای مورد نیاز برای نصب تجهیزات	۰/۸۴	۰/۵۹	۰/۳۴	۰/۴۰۶۲۵
هزینه سرمایه گذاری ثابت	۰/۹۴	۰/۸۱	۰/۵۶	۰/۵۹۳۷۵
هزینه سرمایه گذاری متغیر(عملیاتی)	۰/۹۴	۰/۷۸	۰/۵۶	۰/۶۰۱۵۶۲۵
میزان مصرف آب	۰/۸۱	۰/۶۳	۰/۴۱	۰/۴۵۳۱۲۵
میزان فاضلاب تولید شده	۰/۷۵	۰/۵۳	۰/۳۴	۰/۳۹۸۴۳۷۵
میزان ضایعات و پسماند	۰/۷۵	۰/۵	۰/۲۸	۰/۳۴۳۷۵
سطح پیچیدگی تکنولوژی	۰/۵۹	۰/۳۴	۰/۱۹	۰/۲۵
هزینه مواد خام برای انجام فرآیند	۰/۸۴	۰/۵۹	۰/۳۴	۰/۴۰۶۲۵
میزان مصرف انرژی	۰/۷۵	۰/۵	۰/۳۱	۰/۳۷۵
میزان دانش بومی موجود	۰/۴۴	۰/۱۹	۰/۰۳	۰/۰۹۳۷۵
میزان امنیت	۰/۳۸	۰/۱۳	۰	۰/۰۶۲۵

جدول شماره (۵): نتایج پرسشنامه مرحله دوم دلفی

معیارها	میانگین			De fuzzy	تفاوت مقادیر دی
	u	m	l	χ_2	$\lvert\chi_1 - \chi_2\rvert$
کارایی	۱	۰/۹۱	۰/۶۶	۰/۶۷۹۶۸۷۵	۰
قابلیت تجاری بودن محصول جانبی	۱	۰/۸۸	۰/۶۳	۰/۶۵۶۲۵	۰
میزان فضای مورد نیاز برای نصب تجهیزات	۰/۸۸	۰/۶۶	۰/۴۱	۰/۴۶۰۹۳۷۵	۰/۰۵۴۶۹
هزینه سرمایه گذاری ثابت	۰/۹۷	۰/۸۴	۰/۵۹	۰/۶۲۵	۰/۰۳۱۲۵
هزینه سرمایه گذاری متغیر(عملیاتی)	۰/۹۴	۰/۸۱	۰/۵۹	۰/۶۲۵	۰/۰۲۳۴۴
میزان مصرف آب	۰/۷۲	۰/۵۳	۰/۳۴	۰/۳۹۰۶۲۵	۰/۰۶۲۵
میزان فاضلاب تولید شده	۰/۸۱	۰/۶۳	۰/۳۸	۰/۴۲۱۸۷۵	۰/۰۲۳۴۴
میزان ضایعات و پسماند	۰/۷۲	۰/۴۷	۰/۲۲	۰/۲۸۱۲۵	۰/۰۶۲۵
سطح پیچیدگی تکنولوژی	۰/۶۳	۰/۳۸	۰/۱۶	۰/۲۱۸۷۵	۰/۰۳۱۲۵
هزینه مواد خام	۰/۸۸	۰/۶۳	۰/۳۸	۰/۴۳۷۵	۰/۰۳۱۲۵
میزان مصرف انرژی	۰/۸۱	۰/۵۹	۰/۳۴	۰/۳۹۸۴۳۷۵	۰/۰۲۳۴۴
میزان دانش بومی موجود	۰/۴۷	۰/۲۲	۰/۰۳	۰/۰۹۳۷۵	۰
میزان امنیت	۰/۳۸	۰/۱۳	۰	۰/۰۶۲۵	۰

در این تحلیل بر اساس نظر خبرگان، معیارهای با امتیاز ۰ تا ۰/۲ از در دامنه خیلی کم تعریف شد و بنابراین همان گونه که مشاهده می‌شود معیارهای میزان دانش بومی موجود ومیزان امنیت در این مرحله از پژوهش حذف شدند و شاخص‌های کارایی، قابلیت تجاری بودن محصولات جانبی، میزان فضای مورد نیاز، میزان مصرف آب، میزان فاضلاب تولید شده، میزان ضایعات و پسماند، سطح پیچیدگی تکنولوژی، هزینه مواد خام و میزان مصرف انرژی با توجه به انجام تکنیک دلفی فازی بر اساس نظر خبرگان، به عنوان اهم شاخص‌های تاثیرگذار در انتخاب تکنولوژی کاهش SOx از نیروگاه‌ها انتخاب شدند.

الف) تعیین اهمیت شاخص‌ها و اولویت بندی تکنولوژی‌ها: در این بخش روشی جدید برای حل مشکلات تصمیم‌گیری چند معیاره ارائه شده است. 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 (Keshavarz Ghorabaee et al., 2018). در ادامه تکنیک گام به گام پیاده سازی می‌شود. 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 معیارهاست. 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 می شود. همچنین، از مجموع مربع انحرافات از نقاط مرجع استفاده می‌کنیم تا اهداف دیگر مدل را تعریف کنیم (Keshavarz Ghorabaee et al., 2018). فرض می‌کنیم یک مدل MCDM با n گزینه و m معیار داریم و وزن هر معیار ($w_j , j \in \{1, 2, \ldots, m\}$) مشخص است. بدین ترتیب ماتریس تصمیم‌گیری را مانند ماتریس زیر تشکیل می‌دهیم.

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

ماتریس تصمیم‌گیری پژوهش با توجه به معیارهای بدست آمده از مرحله قبل به شرح جدول شماره ۶ می‌باشد (Heng & Guo, 2006; Heng et al., 2003; Pearson, 2006; Alpert, 1991; Kamall, 2000;Daim et al., 2009; Poullikkas, 2015; Park et al., 2019; Sun et al., 2016)

جدول شماره(۶): ماتریس تصمیم گیری تکنولوژی– معیار

	تکنولوژی/معیار	تجاری بودن محصول جانبی	میزان فضا	ثابت	عملیاتی	مصرف آب	فاضلاب	ضایعات و پسماند	هزینه مواد مصرفی	میزان مصرف انرژی	پیچیدگی تکنولوژی	کارایی
۱	اسکرابرهای مرطوب لجن	خیلی ضعیف	متوسط	متوسط	ضعیف	زیاد	زیاد	متوسط	زیاد	ضعیف	متوسط	۸۰
۲	اسکرابرهای مرطوب گچ	زیاد	متوسط	متوسط	ضعیف	زیاد	زیاد	ضعیف	زیاد	ضعیف	متوسط	۸۰
۳	اسکرابرهای اسپری خشک – نیمه خشک	خیلی ضعیف	متوسط	کم تا متوسط	متوسط	خیلی زیاد	خیلی ضعیف	متوسط	متوسط	ضعیف	متوسط	۹۰
۴	فرایندهای تزریق جاذب	ضعیف	خیلی ضعیف	خیلی ضعیف	متوسط	خیلی ضعیف	خیلی ضعیف	متوسط	متوسط	ضعیف	متوسط	۵۰
۵	اسکرابرهای خشک	خیلی ضعیف	ضعیف	ضعیف	بالا	خیلی ضعیف	خیلی ضعیف	متوسط	ضعیف	ضعیف	متوسط پایین	۵۰
۶	فرآیندهای احیا	زیاد	متوسط	زیاد	کم تا متوسط	ضعیف	خیلی ضعیف	خیلی ضعیف	خیلی ضعیف	متوسط	زیاد	۹۲
۷	پرتو الکترونی	خیلی زیاد	متوسط	خیلی زیاد	کم تا متوسط	ضعیف	خیلی ضعیف	خیلی ضعیف	متوسط	خیلی زیاد	خیلی زیاد	۹۰
۸	تخلیه کرونا	خیلی	متوسط	خیلی	کم تا	ضعیف	خیلی	خیلی	خیلی	خیلی	خیلی	۷۵

		زیاد		زیاد	متوسط		ضعیف	ضعیف	ضعیف	زیاد	زیاد		
۹	پرتو الکترونی همراه با مایکروویو	خیلی زیاد	متوسط	خیلی زیاد	کم تا متوسط	ضعیف	خیلی ضعیف	خیلی ضعیف	متوسط	زیاد	خیلی زیاد	۹۵
۱۰	پرتو الکترونی همراه با قطرات ریز آب	زیاد	متوسط	خیلی زیاد	کم تا متوسط	متوسط	خیلی ضعیف	خیلی ضعیف	متوسط	زیاد	خیلی زیاد	۸۵
۱۱	اسکرابر گاز ویوارد	متوسط	متوسط	خیلی زیاد	کم تا متوسط	متوسط	خیلی ضعیف	خیلی ضعیف	متوسط	زیاد	خیلی زیاد	۹۰
۱۲	جذب	خیلی ضعیف	خیلی زیاد	زیاد	کم تا متوسط	خیلی ضعیف	خیلی ضعیف	خیلی ضعیف	ضعیف	زیاد	ضعیف	۸۰

در گام بعد 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 وبرای نرمالسازی سایر معیارها از سطر دوم رابطه ۶ استفاده می‌شود

رابطه ۶

$$X_{ij}^{N} \cong \begin{cases} \dfrac{x_{ij}}{\max_k x_{kj}} & \text{if } j \angle BC, \\ \dfrac{\min_k x_{kj}}{x_{ij}} & \text{if } j \angle NC, \end{cases}$$

جدول شماره (۷): مقادیر نرمال شده متغیرهای کلامی ماتریس تصمیم گیری تکنولوژی– معیار

تکنولوژی	تجاری	میزان	ثابت	عملیاتی	مصرف	فاضلاب	ضایعات	هزینه	میزان	پیچیدگی	کارایی
۱	۰/۰۸۳	۱	۰/۲۳۵۲	۱	۰/۱۱۱	۰/۱۱۱	۰/۲	۰/۱۱۱	۱	۰/۵۲۹۴	۰/۸۴۲۱
۲	۰/۷۵	۰/۱۱۱	۰/۲۳۵۲	۱	۰/۱۱۱	۰/۱۱۱	۱	۰/۱۱۱	۱	۰/۵۲۹۴	۰/۸۴۲۱
۳	۰/۰۸۳	۰/۲	۰/۳۰۷۶	۰/۲۹۴۱	۰/۰۸۳	۱	۰/۲	۰/۲	۱	۰/۵۲۹۴	۰/۹۴۷۴
۴	۰/۰۸۳	۱	۱	۰/۲۹۴۱	۱	۱	۰/۲	۰/۲	۱	۰/۵۲۹۴	۰/۵۲۶۳
۵	۰/۰۸۳	۱	۰/۸	۰/۱۷۲۴	۱	۱	۰/۲	۱	۱	۰/۶۹۲۳	۰/۵۲۶۳
۶	۰/۷۵	۰/۲	۰/۱۳۷۹	۰/۵۵۵۶	۱	۱	۱	۱	۰/۲	۰/۳۶	۰/۹۶۸۴
۷	۱	۰/۲	۰/۱۲۱۲	۰/۵۵۵۶	۱	۱	۱	۰/۲	۰/۰۸۳۳	۰/۲۷۲۷	۰/۹۴۷۴
۸	۱	۰/۲	۰/۱۲۱۲	۰/۵۵۵۶	۱	۱	۱	۱	۰/۰۸۳۳	۰/۲۷۲۷	۰/۷۸۹۵
۹	۱	۰/۲	۰/۱۲۱۲	۰/۵۵۵۶	۱	۱	۱	۰/۲	۰/۱۱۱۱	۰/۲۷۲۷	۱
۱۰	۰/۷۵	۰/۲	۰/۱۲۱۲	۰/۵۵۵۶	۰/۲	۱	۱	۰/۲	۰/۱۱۱۱	۰/۲۷۲۷	۰/۸۹۴۷
۱۱	۰/۴۱۶	۰/۲	۰/۱۲۱۲	۰/۵۵۵۶	۰/۲	۱	۱	۰/۲	۰/۱۱۱۱	۰/۲۷۲۷	۰/۹۴۷۴
۱۲	۰/۰۸۳	۰/۰۸۳	۰/۱۳۷۹	۰/۵۵۵۶	۱	۱	۱	۱	۰/۱۱۱۱	۱	۰/۸۴۲۱

بردار (σj) 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 ($j \& l \in \{1, 2, \ldots, m\}$) در نظر می‌گیریم. سپس πj می تواند میزان تعارض بین معیار j و معیارهای دیگر را نشان دهد (Keshavarz Ghorabaee et al., 2018). مقدار πj نیز از رابطه زیر حاصل می‌شود.

رابطه ۷

$$\sigma_j \cong \prod_{l=1}^{m} (1 - r_{jl})$$

سپس در گام بعد مقادیر حاصل شده برای σj و πj از طریق روابط زیر نرمال می‌شود.

رابطه ۸

$$\varpi_j^N \cong \frac{\varpi_j}{\sum_{l=1}^{m} \varpi_l}$$

رابطه ۹

$$\sigma_j^N \cong \frac{\sigma_j}{\sum_{l=1}^{m} \sigma_l}$$

انحراف استاندارد هر معیار (هر ستون) و مقدار نرمال شده آن طبق توضیحات بخش قبل و رابطه ۸ به شرح جدول ۸ ارائه میشود.

جدول شماره (۸): مقادیر انحراف استاندارد هر معیار و مقدارنرمال شده انحراف استاندارد

	تجاری بودن محصول جانبی	میزان فضا	ثابت	عملیاتی	مصرف آب	فاضلاب	هزینه مواد مصرفی	میزان مصرف انرژی	پیچیدگی تکنولوژی	کارایی
انحراف معیار	۰/۰/۴۰۵۸۵۷	۰/	۰/	۰/	۰/	۰/۳۴۶	۰/	۰/	۲۲/	۱۵/
انحراف	۰/۰۱۰۸۱۶	۰/	۰/	۰/	۰/	۰/	۰/	۰/	۰/	۰/

طبق توضیحات بیان شده در فوق در این مرحله ماتریس ضریب همبستگی بین هر معیار با معیارهای دیگر انجام می‌شود. خروجی این مرحله در جدول۹ ارائه شده است.

	معیار۱	معیار۲	معیار۳	معیار۴	معیار۵	معیار۶
معیار۱	۱	-۰/۵۹۱۹۳	-۰/۵۷۸۳۳	۰/۲۷۳۷۶۵	۰/۲۱۵۴۴۵۳۴۲	۰/۱۰۳۹۰۰۳۰۴
معیار۲	-۰/۵۹۱۹۳	۱	۰/۷۸۸۵۶۵	-۰/۱۹۲۲	۰/۰۸۳۹۳۶۶۸۲	-۰/۲۱۵۵۶۱۰۲۶
معیار۳	-۰/۵۷۸۳۳	۰/۷۸۸۵۶۵	۱	-۰/۵۳۸۳۵	۰/۲۳۸۷۹۹۳۰۸	۰/۰۸۳۹۲۵۷۵۶
معیار۴	۰/۲۷۳۷۶۵	-۰/۱۹۲۲	-۰/۵۳۸۳۵	۱	-۰/۴۵۹۳۷۰۵۹۱	-۰/۸۳۸۵۵۱۴۴۲
معیار۵	۰/۲۱۵۴۴۵	۰/۰۸۳۹۳۷	۰//۲۳۸۷۹۹	-۰/۴۵۹۳۷	۱	۰/۵۵۹۲۶۷۷۱۴
معیار۶	۰/۱۰۳۹	-۰/۲۱۵۵۶	۰/۰۸۳۹۲۶	-۰/۸۳۸۵۵	۰/۵۵۹۲۶۷۷۱۴	۱
معیار۷	۰.۷۷۰۸۵۶	-۰.۸۲۳۳	-۰.۷۴۳۸۲	۰.۳۳۸۸۹۵	۰.۱۵۵۷۳۱۹۴۴	۰/۱۵۸۱۱۳۸۸۳
معیار۸	-۰/۰۴۰۱۷	-۰/۰۴۱۴	۰/۰۳۳۶۳۲	-۰/۳۴۳۵۵	۰/۶۲۵۵۸۳۸۵۳	۰/۳۹۱۸۶۲۰۶۵
معیار۹	-۰/۶۳۶۳	۰/۶۵۷۹۶۱	۰/۶۷۹۰۱۸	-۰/۰۰۷۰۹	-۰/۳۵۶۱۳۶۶۱۸	-۰/۵۲۸۰۷۵۹۶۶
معیار۱۰	-۰/۷۲۹۵۶	۰/۲۴۴۶۹۳	۰/۳۴۷۶۵۸	-۰/۱۰۴۰۶	۰/۱۰۷۶۶۹۹۶۵	-۰/۱۴۲۶۰۷۳۵۸
معیار۱۱	۰/۵۰۷۳۴۸	-۰/۷۶۱۹۲	-۰/۸۹۸۵۴	۰/۴۰۴۴۵۳	-۰/۳۰۱۲۹۷۳۰۵	-۰/۰۰۷۷۱۷۸۴۸

جدول شماره (۹): ماتریس همبستگی میان معیارها

	معیار۷	معیار۸	معیار۹	معیار۱۰	معیار۱۱
معیار۱	۰/۷۷۰۸۵۶۰۸	-۰/۰۴۰۱۷	-۰/۶۳۶۳۰۴	-۰/۷۲۹۵۶۱	۵۰۷۳/۰۴۸
معیار۲	-۰/۸۲۳۲۹۶۴	-۰/۰۴۱۴۰۳	۰/۶۵۷۹۶۱۴	۰/۲۴۴۶۹۳۱	-۰/۷۶۱۹۲
معیار۳	-۰/۷۴۳۸۱۵۴	۰/۰۳۳۶۳۲۱	۰/۶۷۹۰۱۸۵	۰/۳۴۷۶۵۸۱	-۰/۸۹۸۵۴
معیار۴	۰/۳۳۸۸۹۴۵۴	-۰/۳۴۳۵۴۵	-۰/۰۰۷۰۸۸	-۰/۱۰۴۰۶۲۶	۰/۴۰۴۴۵۳
معیار۵	۰/۱۵۵۷۳۱۹۴	۰/۶۲۵۵۸۳۹	-۰/۳۵۶۱۳۷	۰/۱۰۷۶۷	-۰/۳۰۱۳
معیار۶	۰/۱۵۸۱۱۳۸۸	۰/۳۹۱۸۶۲۱	-۰/۵۲۸۰۷۶	-۰/۱۴۲۶۰۷۴	-۰/۰۰۷۷۲
معیار۷	۱	۰/۱۳۴۶۹۳۱	-۰.۸۳۴۹۶۱	-۰/۳۵۹۹۶۷۱	۰.۵۹۷۹۴۶
معیار۸	۰/۱۳۴۶۹۳۱۱	۱	-۰/۲۵۷۹۵۹	۰/۳۷۲۵۶۶۷	-۰/۲۶۱۰۱
معیار۹	-۰/۸۳۴۹۶۱۴	-۰/۲۵۷۹۵۹	۱	۰/۴۰۰۷۴۲۹	-۰/۵۵۸۴
معیار۱۰	-۰/۳۵۹۹۶۷۱	۰/۳۷۲۵۶۶۷	۰/۴۰۰۷۴۲۹	۱	-۰/۴۳۲۷۷

معیار۱۱	۰/۵۹۷۹۴۶۴۵	-۰/۲۶۱۰۱۳	-۰/۵۵۸۴۰۲	-۰/۴۳۲۷۶۹۷	۱

ادامه جدول شماره (۹): ماتریس همبستگی میان معیارها

در گام بعد πj و πj نرمال شده با توجه به روابط ۷ و ۹ محاسبه می‌شود. نتیجه این مرحله در جدول ۱۰ ارائه شده است.

جدول شماره (۱۰) : مقادیر πj و مقادیر نرمال πj

مقدار مجموع πj	مقدار نرمال πj
۱۰/۷۰۴۹۸۳۲۸	۰/۰۹۱۷۹۷۰۶۴
۱۰/۸۵۱۱۵۱۱۶	۰/۰۹۳۰۵۰۴۷۹
۱۰/۵۸۷۴۳۶۹۷	۰/۰۹۰۷۸۹۰۸۵
۱۱/۴۶۶۰۴۹۴۶	۰/۰۹۸۳۲۳۳۳۷
۹/۱۳۰۳۶۹۷۰۶	۰/۰۷۸۲۹۴۴۸۳
۱۰/۴۳۵۴۴۳۹۲	۰/۰۸۹۴۸۵۷۱۸
۱۰/۶۰۵۸۰۴۲	۰/۰۹۰۹۴۶۵۸۷
۹/۳۸۵۷۵۲۹۸۶	۰/۰۸۰۴۸۴۴۳۹
۱۱/۴۴۱۲۰۵۳۱	۰/۰۹۸۱۱۰۲۹۴
۱۰/۲۹۵۶۳۶۹۵	۰/۰۸۸۲۸۶۸۴۹
۱۱/۷۱۱۹۱۳۵۸	۰/۱۰۰۴۳۱۶۶۴

رابطه ۱۰ $$\max S_i \cong \sum_{j=1}^{m} \zeta_j x_{ij}^N , \quad \forall i = 1,2,\ldots,n$$

رابطه ۱۱ $$\min o_b \cong \sum_{j=1}^{m} (\zeta_j \varpi_j^N)^2$$

رابطه ۱۲ $$\min o_c \cong \sum_{j=1}^{m} (\zeta_j \sigma_j^N)^2$$

رابطه ۱۳ $$s.t. \quad \sum_{j=1}^{m} \zeta_j \cong 1$$

رابطه ۱۴ $$\zeta_j \propto 1, \quad \forall j = 1,2,\ldots,m$$

رابطه ۱۵ $$\zeta_j \propto \eta, \quad \forall j = 1,2,\ldots,m$$

بر اساس تکنیک SECA یک مدل برنامه نویسی غیرخطی چند هدفه به شرح زیر تدوین می‌شود(مدل ۱):

معادله ۱۴ 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 10^{-3} تنظیم شده است. برای بهینه سازی مدل (۱) ، ما از برخی تکنیک های بهینه سازی چند هدفه استفاده می کنیم و مدل را به مدل (۲) تبدیل می کنیم که به شرح زیر ارائه می‌شود:

رابطه ۱۶ $$\max Z \cong o_a - \varepsilon (o_b + o_c)$$

رابطه ۱۷ $$s.t. \quad o_a \propto S_i , \quad \forall i = 1,2,\ldots,n$$

رابطه ۱۸ $$S_i \cong \sum_{j=1}^{m} \zeta_j x_{ij}^N \quad \forall i = 1,2,\ldots,n$$

رابطه ۱۹ $$o_b \cong \sum_{j=1}^{m} (\zeta_j \varpi_j^N)^2$$

رابطه ۲۰ $$o_c \cong \sum_{j=1}^{m} (\zeta_j \sigma_j^N)^2$$

رابطه ۲۱ $$\sum_{j=1}^{m} \zeta_j \cong 1$$

رابطه۲۲ $\zeta_j \propto 1, \quad \%j \angle \sim 1,2,\ldots,m$

رابطه ۲۳ $\zeta_j \propto \eta, \quad \%j \angle \sim 1,2,\ldots,m$

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 می شوند. این ضریب بر میزان رسیدن به نقاط مرجع وزن معیارها تأثیر می گذارد. در نهایت امتیاز کل عملکرد هر گزینه (Si) و وزن هر معیار (wj) با حل مدل تعیین می شود (Keshavarz Ghorabaee et al., 2018).

حال با توجه به در دست داشتن ماتریس نرمالیزه شده گزینه/معیار(جدول۷)، مقادیر انحراف استاندارد نرمال شده (جدول۸) و مقادیر هم‌بستگی نرمال شده (جدول۱۰) ، مدل غیرخطی شماره ۲ 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 $\beta \geq ۳$ به پایداری و تمایز مشخص میان رتبه بندی وزن معیارها و به تبع آن رتبه بندی گزینه‌ها رسیده است. لذا در این پژوهش مقادیر مختلف حاصل با مقادیر $\beta \geq ۱$ ارائه شده و همان‌گونه که در جدول۱۳ مشخص است، رتبه بندی گزینه‌ها (تکنولوژی‌های موجود) بر اساس مقادیر محاسبه شده وزن‌ها برای $\beta \geq ٤$ به پایداری و همگرایی رسیده است(در جدول۱۳ این ستون‌ها بولد شده‌اند). در جدول شماره ۱۱ وزن ۱۱ معیار پژوهش حاضر با مقادیر متفاوت β محاسبه و ارائه شده است.

جدول شماره(۱۱): محاسبه وزن معیارها با مقادیر متفاوت β

اندیس	معیارها	β=۱	β=۲	β=۳	β=۴	β=۵
W۱	قابلیت تجاری بودن محصولات جانبی	۰/۰۴۳۸	۰/۰۷۱۴	۰/۰۸۰۵	۰/۰۸۵۱	۰/۰۸۷۹
W۲	میزان فضای مورد نیاز برای نصب تجهیزات	۰/۰۹۳۲	۰/۰۸۸۱	۰/۸۶۴	۰/۰۸۵۵	۰/۰۸۵۰
W۳	هزینه سرمایه گذاری ثابت	۰/۰۲۰۴	۰/۰۵۴۰	۰/۰۶۵۲	۰/۰۷۰۸	۰/۰۷۴۲
W۴	هزینه سرمایه گذاری متغیر(عملیاتی)	۰/۱۲۴۹	۰/۰۹۷۰	۰/۰۸۷۷	۰/۰۸۳۱	۰/۰۸۰۳
W۵	میزان مصرف آب	۰/۱۹۷۸	۰/۰۵۸۸	۰/۰۷۱۸	۰/۰۷۸۳	۰/۰۸۲۲
W۶	میزان فاضلاب تولید شده	۰/۱۵۷۹	۰/۱۳۲۵	۰/۱۲۴۰	۰/۱۱۹۸	۰/۱۱۷۳
W۷	میزان ضایعات و پسماند	۰/۱۲۳۷	۰/۱۰۹۱	۰/۱۰۴۲	۰/۱۰۱۸	۰/۱۰۰۳
W۸	هزینه مواد خام	۰/۰۲۲۹	۰/۰۵۹۷	۰/۰۷۲۰	۰/۰۷۸۱	۰/۰۸۱۸
W۹	میزان مصرف انرژی	۰/۱۴۴۷	۰/۱۲۹۹	۰/۱۲۴۹	۰/۱۲۲۵	۰/۱۲۱۰
W۱۰	سطح پیچیدگی تکنولوژی	۰/۰۶۲۶	۰/۰۶۹۳	۰/۰۷۱۵	۰/۰۷۲۶	۰/۰۷۳۲
W۱۱	کارایی	۰/۱۸۵۵	۰/۱۲۹۷	۰/۱۱۱۱	۰/۱۰۱۸	۰/۰۹۶۲

در جدول شماره ۱۲، ۱۲ تکنولوژی مورد بررسی در پژوهش با اندیس‌های S۱ تا S۱۲ مشخص شده‌اند. مقادیر حاصل شده بهینه بر اساس وزن معیاها با توجه به مقادیر متفاوت β ارائه شده است.

جدول شماره (۱۲): مقادیر بهینه حاصل شده بر اساس β های متفاوت برای تکنولوژی‌های موجود

اندیس تکنولوژی‌ها	نوع تکنولوژی	β=۱	β=۲	β=۳	β=٤	β=٥
S۱	اسکرابرهای مرطوب لجن	۰/۶۰۸۰۴۳	۰/۵۲۹۵۶۵	۰/۵۰۳۴۰۶	۰/۴۹۰۳۲۷	۰/۴۸۲۴۷۹
S۲	اسکرابرهای مرطوب گچ	۰/۶۵۳۳۶۷	۰/۵۸۶۱۴۱	۰/۵۶۳۷۳۲	۰/۵۵۲۵۲۷	۰/۵۴۵۸۰۵
S۳	اسکرابرهای اسپری خشک – نیمه خشک	۰/۶۰۸۰۴۳	۰/۵۲۹۵۶۵	۰/۵۰۳۴۰۶	۰/۴۹۰۳۲۷	۰/۴۸۲۴۷۹
S۴	فرایندهای تزریق جاذب	۰/۶۳۶۸۱۱	۰/۶۳۶۷۷۰	۰/۶۳۷۷۵۶	۰/۶۳۶۸۴۴	۰/۶۳۶۷۴۵
S۵	اسکرابرهای خشک	۰/۶۴۶۰۶۵	۰/۶۷۳۲۵۱	۰/۶۸۲۳۱۳	۰/۶۸۶۸۴۴	۰/۶۸۹۵۶۳
S۶	فرآیندهای احیا	۰/۶۷۹۴۲۷	۰/۶۶۹۴۷۵	۰/۶۶۶۱۵۸	۰/۶۶۴۴۹۹	۰/۶۶۳۵۰۴
S۷	پرتو الکترونی	۰/۶۴۵۴۴۴	۰/۶۱۴۶۷۰	۰/۶۰۴۴۱۱	۰/۵۹۹۲۸۲	۰/۵۹۶۲۰۵

S۸	تخلیه کرونا	۰/۶۳۴۴۸۰	۰/۶۴۱۹۹۳	۰/۶۴۴۴۹۷	۰/۶۴۵۷۴۹	۰/۶۴۶۵۰۰
S۹	پرتو الکترونی همراه با مایکروویو	۰/۶۵۹۲۳۳	۰/۶۲۵۱۰۹	۰/۶۱۳۷۳۵	۰/۶۰۸۰۴۷	۰/۶۰۴۶۳۵
S۱۰	پرتو الکترونی همراه با قطرات ریز آب	۰/۶۱۲۸۹۹	۰/۶۴۶۵۴۰	۰/۵۲۴۴۲۱	۰/۵۱۳۳۶۱	۰/۵۰۶۷۲۵
S۱۱	اسکرابر گاز ویوارد	۰/۶۰۸۰۴۳	۰/۵۲۹۵۶۵	۰/۵۰۳۴۰۶	۰/۴۹۰۳۲۷	۰/۴۸۲۴۷۹
S۱۲	جذب	۰/۶۴۳۱۰۴	۰/۶۲۸۰۰۰	۰/۶۲۲۹۶۵	۰/۶۲۰۴۴۸	۰/۶۱۸۹۳۸

در جدول شماره ۱۳ همان مقادیر بدست آمده بهینه هر تکنولوژی برای β های مختلف در جدول ۱۲، در هر ستون رتبه بندی شده‌اند. مثلا در ستون آخر برای β=۱، تکنولوژی شماره ۶ یعنی فرآیندهای احیا در جایگاه اول رتبه بندی و S۱۱، اسکرابر گاز ویوارد (تکنولوژی شماره ۱۱) در جایگاه آخر رتبه بندی قرار گرفته است. همان گونه که پیشتر اشاره شد، مقادیر رتبه بندی برای β های بزرگتر از ۳ به پایداری و تمایز مشخص می‌رسند که این مورد در ستون β های ۴ و ۵ بولد شده‌اند و بنابراین این دو ستون مبنای رتبه‌بندی تکنولوژی‌ها قرار می‌گیرند.

جدول شماره (۱۳): رتبه بندی تکنولوژی‌ها با مقادیر β متفاوت

اندیس تکنولوژی‌ها	نوع تکنولوژی	β =۵	β =۴	β =۳	β =۲	β =۱
S۱	اسکرابرهای مرطوب لجن	S۵	S۵	S۵	S۵	S۶
S۲	اسکرابرهای مرطوب گچ	S۶	S۶	S۶	S۶	S۹
S۳	اسکرابرهای اسپری خشک – نیمه خشک	S۸	S۸	S۸	S۱۰	S۲
S۴	فرایندهای تزریق جاذب	S۴	S۴	S۴	S۸	S۵
S۵	اسکرابرهای خشک	S۱۲	S۱۲	S۱۲	S۴	S۷
S۶	فرآیندهای احیا	S۹	S۹	S۹	S۱۲	S۱۲
S۷	پرتو الکترونی	S۷	S۷	S۷	S۹	S۴
S۸	تخلیه کرونا	S۲	S۲	S۲	S۷	S۸
S۹	پرتو الکترونی همراه با مایکروویو	S۱۰	S۱۰	S۱۰	S۲	S۱۰
S۱۰	پرتو الکترونی همراه با قطرات ریز آب	S۱	S۱	S۱	S۱	S۱
S۱۱	اسکرابر گاز ویوارد	S۳	S۳	S۳	S۳	S۳
S۱۲	جذب	S۱۱	S۱۱	S۱۱	S۱۱	S۱۱

در جدول شماره ۱۴ رتبه‌بندی نهایی تکنولوژی‌ها بر مبنای جدول شماره ۱۳ ارائه شده است. همان طور که مشخص است تکنولوژی های اسکرابرهای خشک ، فرآیندهای احیا ، تخلیه کرونا ، فرایندهای تزریق جاذب و تکنولوژی جذب به ترتیب اولویت اول تا پنجم را به خود اختصاص داده‌اند .

جدول شماره (۱۴): رتبه بندی تکنولوژی‌ها

رتبه بندی تکنولوژی	β =۵	β =۴	β =۳
S۵	اسکرابرهای خشک	اسکرابرهای خشک	اسکرابرهای خشک
S۶	فرآیندهای احیا	فرآیندهای احیا	فرآیندهای احیا
S۸	تخلیه کرونا	تخلیه کرونا	تخلیه کرونا
S۴	فرایندهای تزریق جاذب	فرایندهای تزریق جاذب	فرایندهای تزریق جاذب
S۱۲	جذب	جذب	جذب
S۹	پرتو الکترونی همراه با مایکروویو	پرتو الکترونی همراه با مایکروویو	پرتو الکترونی همراه با مایکروویو
S۷	پرتو الکترونی	پرتو الکترونی	پرتو الکترونی
S۲	اسکرابرهای مرطوب گچ	اسکرابرهای مرطوب گچ	اسکرابرهای مرطوب گچ
S۱۰	پرتو الکترونی همراه با قطرات ریز آب	پرتو الکترونی همراه با قطرات ریز آب	پرتو الکترونی همراه با قطرات ریز آب
S۱	اسکرابرهای مرطوب لجن	اسکرابرهای مرطوب لجن	اسکرابرهای مرطوب لجن

S۳	اسکرابرهای اسپری خشک – نیمه خشک	اسکرابرهای اسپری خشک – نیمه خشک	اسکرابرهای اسپری خشک – نیمه خشک
S۱۱	اسکرابر گاز ویوارد	اسکرابر گاز ویوارد	اسکرابر گاز ویوارد

نیروگاه‌های حرارتی ایران از روغن‌های نفت سنگین به عنوان سوخت ثانویه استفاده می‌کنند. درصد گوگرد این سوخت مصرفی در نیروگاه های ایران از ۱/۵۵ به ۳/۵ درصد است. این ماده منجر به تولید آلاینده SO2 می شود که بسته به پایداری جو و توپوگرافی منطقه در جو پراکنده می شود و خسارت های مخرب به سلامتی انسان ، ساختمان ها و سکونتگاه ها و همچنین خطوط انتقال و توزیع برق و تجهیزات نیروگاهی وارد می کند. براساس اطلاعات منتشر شده در ترازنامه انرژی ایران ، هزینه اجتماعی تولید این آلاینده در بخش نیروگاه‌های ایران برابر با ۶۸۳ میلیون دلار معادل ۲/۶٪ تولید ناخالص داخلی ایران ، در سال ۲۰۰۷ بود. هزینه‌های اجتماعی ناشی از انتشار این آلاینده در حد قابل ملاحظه‌ای بیشتر از هزینه جلوگیری و کنترل انتشار این آلاینده با استفاده از تجهیز نیروگاه‌ها به نصب فناوری‌های کاهش انتشار اکسیدهای گوگرد برآورد شده است (۵۶۹/۶ میلیون دلار) و هزینه استفاده از سوخت‌های با سولفورپایین(گاز طبیعی) حدود (۳۷۳/۷ میلیون دلار) می‌باشد. بنابراین کنترل و کاهش میزان پراکندگی این آلاینده در نیروگاه های ایران از اهمیت بالایی برخوردار است. مصرف بیشتر روغن سوخت در نیروگاه های بخار به ویژه در فصول سرد سال باعث افزایش پراکندگی آلاینده های SO2 در جو و تجمع غلظت SO2 در اطراف نیروگاه ها به دلیل مخلوط شدن در ارتفاع پایین و پدیده وارونگی دما می‌شود. این در نهایت منجر به تجاوز از مقررات کیفیت هوا در ایران می شود. این پژوهش با هدف انتخاب تکنولوژی‌های بهینه و رتبه‌بندی آن‌ها به منظور کاهش انتشار اکسیدهای گوگرد حاصل از فرآیندهای تولید برق در نیروگاه‌های حرارتی ایران انجام شد. بدین منظور و درگام اول، با پیمایش ادبیات در فن آوری‌های موجود جهان، متغیرهای تاثیر گذار بر انتخاب تکنولوژی‌ها جمع آوری گردید و در گام بعد با بکارگیری تکنیک دلفی فازی توسط خبرگان فعال در مجموعه نیروگاهی ایران لیست نهایی این معیارها تایید شد. شاخص‌های کارایی، قابلیت تجاری بودن محصولات جانبی، میزان فضای مورد نیاز، میزان مصرف آب، میزان فاضلاب تولید شده، میزان ضایعات و پسماند، سطح پیچیدگی تکنولوژی، هزینه مواد خام و میزان مصرف انرژی با توجه به انجام تکنیک دلفی فازی بر اساس نظر خبرگان، به عنوان اهم شاخص‌های تاثیرگذار در انتخاب تکنولوژی کاهش SOx از نیروگاه‌ها انتخاب شدند. در گام بعد با استفاده از تکنیک رتبه بندی همزمان وزن دهی به معیارها و رتبه بندی گزینه‌ها، موسوم به تکنیک SECA، ابتدا وزن معیارها تعیین شد و در گام بعد تکنولوژی‌های موجود نیز با توجه به اوزان محاسبه شده و توسط حل مدل غیر خطی رتبه بندی شدند. تکنیک SECA از جدیدترین تکنیک‌های معرفی شده در جهان می‌باشد که در سال ۲۰۱۸ توسط دکتر کشاورز به جامعه علمی جهان معرفی شده است. مقایسه خروجی ارزیابی این تکنیک در مقایسه با سایر تکنیک‌های MADM که در مقاله اصلی دکتر کشاورز ارائه شده، نشان از پایداری و همگرایی قابل قبول ان در مقایسه با سایر تکنیک‌های شناخته شده در این حوزه دارد. وجه تمایز این روش توجه همزمان به وزن شاخص و بهینه کردن هر وزن با توجه به کسب حداقل انحراف از سایر گزینه‌های ارائه شده و در ادامه رتبه‌بندی با هدف بهینه‌سازی هر گزینه می‌باشد. در جدول شماره ۱۵ نتیجه رتبه بندی نهایی فناوری‌ها آورده شده است.

جدول شماره(۱۵): رتبه‌بندی نهایی فناوری‌ها

اولویت بندی فناوری	فناوری
۱	اسکرابرهای خشک
۲	فرآیندهای احیا
۳	تخلیه کرونا
۴	فرایندهای تزریق جاذب
۵	جذب
۶	پرتو الکترونی همراه با مایکروویو
۷	پرتو الکترونی

۸	اسکرابرهای مرطوب گچ
۹	پرتو الکترونی همراه با قطرات ریز آب
۱۰	اسکرابرهای مرطوب لجن
۱۱	اسکرابرهای اسپری خشک – نیمه خشک
۱۲	اسکرابر گاز ویوارد

بر این اساس منطبق با جدول فوق الذکر تکنولوژی‌های اسکرابرهای خشک، فرآیندهای احیا، تخلیه کرونا، فرایندهای تزریق جاذب، و فرآیند جذب به ترتیب اولویت اول تا پنجم را به خود اختصاص دادند. انتخاب تکنولوژی اسکرابر خشک به عنوان اولویت سرمایه‌گذاری به دلیل مصرف آب بسیار پایین علاوه بر زودودن الاینده در خور توجه می‌باشد. همچنین هزینه پایین نصب و بهره برداری این فناوری در شرایط اقتصادی فعلی کشور بر مزیت نسبی ان به منظور بکارگیری می‌افزاید. همچنین فنآوری های نوین مانند پرتو الکترونی با توجه به مزیت آن به دلیل حذف همزمان سایر گروه‌های آلاینده (NOx)، جزء فن-آوری‌های قابل توجه و برتر نسبت به فنآوری‌های عمومی‌تر و رایج‌تر قرار می‌گیرند. جستجوی مولفان برای یافتن پژوهشی با هدف مشابه در داخل ایران نتیجه قابل قبولی در پی نداشت. لیکن 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 پژوهش-های انجام شده با روش AHP نسبت به سایر روش‌ها بیشتر بود و از امتیازات این تحقیق آن است که اهم شاخص‌های مشترک در بیشتر تحقیقات انجام گرفته در این پژوهش لحاظ شده است. شاخص‌هایی که به دفعات بیشتری مورد توجه قرار گرفته بود شامل، در دسترس بودن تکنولوژی، هزینه‌های سرمایه گذاری ثابت و عملیاتی، میزان انتشارات، کارایی و میزان استفاده از زمین (فضای مورد نیاز برای نصب تکنولوژی) بودند. دراین میان توجه به نکات زیر نیز ضروری می‌باشد: جایگزینی و استفاده از انرژی های تجدید پذیر مانند انرژی های برق ، باد ، خورشیدی ، زمین گرمایی و زیست توده باعث کاهش پراکندگی SO2 و سایر آلاینده های خروجی از نیروگاه های ایران می شود.

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.

همان‌طور که پیشتر نیز اشاره شد، استفاده از سوخت‌های با گوگرد 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 دستاودهای مهم آن کاهش مصرف سوخت و کاهش انتشارات آلاینده خواهد بود.

٤- منابع

1. Azar, A. & Faraji, H. (2010). *Fuzzy management science* (4th ed.). Tehran: Institute Mehraban book publisher (in Farsi).
2. Afgan, N. H., & Carvalho, M. G. (2008). Sustainability assessment of a hybrid energy system. *Energy Policy*, 36(8), 2903-2910.
3. Atanes, E., Nieto-Márquez, A., Cambra, A., Ruiz-Pérez, M. C., & Fernández-Martínez, F. (2012). Adsorption of SO2 onto waste cork powder-derived activated carbons. *Chemical engineering journal*, 211, 60-67.
4. Basfar, A. A., Fageeha, O. I., Kunnummal, N., Al-Ghamdi, S., Chmielewski, A. G., Licki, J.,& Zimek, Z. (2008). Electron beam flue gas treatment (EBFGT) technology for simultaneous removal of SO2 and NOx from combustion of liquid fuels. *Fuel*, 87(8-9), 1446 -1452.

5. Calinescu, I., Martin, D., Chmielewski, A., & Ighigeanu, D. (2013). E-Beam SO2 and NOx removal from flue gases in the presence of fine water droplets. *Radiation Physics and Chemistry*, *85*, 130-138.
6. Cheng, G., & Zhang, C. (2018). Desulfurization and Denitrification Technologies of Coal-fired Flue Gas. *Polish Journal of Environmental Studies, 27 (2).*
7. Cavallaro, F. (2009). Multi-criteria decision aid to assess concentrated solar thermal technologies. *Renewable Energy*, 34(7), 1678-1685.
8. Cheng, CH., Ching, H. and Lin, Y. (2002). Evaluating the best main battle tank using fuzzy decision theory with linguistic criteria evaluation. *European Journal of Operational Research*, 142, 174-186.
9. Chmielewski, A. G. (2013). Nuclear power for Poland. *World Journal of Nuclear Science and Technology*, 3(4), 123.
10. Chmielewski, A. G., Sun, Y., Licki, J., Pawelec, A., Witman, S., & Zimek, Z. (2012). Electron beam treatment of high NOx concentration off-gases. *Radiation Physics and Chemistry*, 81(8), 1036-1039.
11. Chmielewski, A. G., Sun, Y., Pawelec, A., Licki, J., Dobrowolski, A., Zimek, Z., & Witman, S. (2012). Treatment of off-gases containing NOx by electron beam. *Catalysis today*, 191(1), 159-164.
12. Chmielewski, A. G., Sun, Y., Zimek, Z., Bułka, S., & Licki, J. (2002). Mechanism of NOx removal by electron beam process in the presence of scavengers. *Radiation Physics and chemistry*, 65(4-5), 397-403.
13. Dapkus, R., & Streimikiene, D. (2012). Multi-criteria assessment of electricity generation technologies seeking to implement EU energy policy targets. Proc. *Economics Development and Research*, 55, 50-56.
14. Daim, T., Yates, D., Peng, Y., & Jimenez, B. (2009). Technology assessment for clean energy technologies: The case of the Pacific Northwest. *Technology in Society*, 31(3), 232-243.
15. Dahlan, I., Lee, K. T., Kamaruddin, A. H., and Mohamed, A. R. (2009). Selection of metal oxides in the preparation of rice husk ash (RHA)/CaO sorbent for simultaneous SO2 and NO removal. *Journal of Hazardous Materials*. 166, 1556_1559.
16. Dou, B., Pan, W., Jin, Q., Wang, W., & Li, Y. (2009). Prediction of SO2 removal efficiency for wet flue gas desulfurization. *Energy Conversion and Management*, 50(10), 2547-2553.
17. Diakoulaki, D., & Karangelis, F. (2007). Multi-criteria decision analysis and cost–benefit analysis of alternative scenarios for the power generation sector in Greece. *Renewable and sustainable energy reviews*, 11(4), 716-727.
18. Environmental Protection Agency, *Air pollution control technology fact sheet*, EPA, EPA-452/F-03034(2003).
19. European Commission, (2003). Communication from the Commission, Developing an action plan for environmental technology.
20. Energy Balance Sheet (2015), Ministry of Energy (Central Bank of Iran).
21. Erol, O. and Kilki, .B.(2012) .An energy source policy assessment using analytical hierarchy process. *Energy Conversion and Management*, 63, 245-252, 2012.
22. Jafarinejad, S. (2016). Control and treatment of sulfur compounds specially sulfur oxides (SOx) emissions from the petroleum industry: a review. *Chem. Int*, 2(4), 242-253.
23. Ministry of Industry, Mine and Trade of the Islamic Republic of Iran.

24. Heng L, Guo AH. (2006). Energy efficiency comparison of SACK, Tahoe, Reno and new Reno over ad hoc network based on analytic hierarchy process. In*: International conference on wireless communications, networking and mobile computing*; p. 1–4.
25. Häder, M., & Häder, S. (1995). Delphi und Kognitionspsychologie: Ein Zugang zur theoretischen Fundierung der Delphi-Methode. *ZUMA Nachrichten*, 19(37), 8-34.
26. Ishikawa, A., T. Amagasa, T. Shiga, G. Tomizawa, R. Tatsuta and H. Mieno (1993). The Max-Min Delphi Method and Fuzzy Delphi Method via Fuzzy Integration. *Fuzzy Sets Systems*, 55(3), 241- 253.
27. Kaldellis, J. K., Anestis, A., & Koronaki, I. (2013). Strategic planning in the electricity generation sector through the development of an integrated Delphi-based multi-criteria evaluation model. *Fuel*, 106, 212-218.
28. Kardaras D.K., Karakostas, B. & Mamakou, X.J. (2013). Content presentation personalisation and media adaptation in tourism web sites using Fuzzy Delphi Method and Fuzzy Cognitive Maps. *Expert Systems with Applications*, 40, 2331-2342.
29. Kamall R. Technology status report: flue gas desulphurisation (FGD) technologies. *Department of Trade and Industry*; 2000. 1–15.
30. Keeney, S., Hasson, F., & McKenna, H. P. (2001). A critical review of the Delphi technique as a research methodology for nursing. *International journal of nursing studies*, 38(2), 195-200.
31. Keshavarz-Ghorabaee, M., Amiri, M., Zavadskas, E. K., Turskis, Z., & Antucheviciene, J. (2018). Simultaneous evaluation of criteria and alternatives (SECA) for multi-criteria decision-making. Informatica, 29(2), 265-280.
32. Kuo, Y. F., & Chen, P. C. (2008). Constructing performance appraisal indicators for mobility of the service industries using fuzzy Delphi method. *Expert Systems with Applications*, 35, 1930 -1939.
33. Kiel, J. H. A., Prins, W., & Van Swaaij, W. P. M. (1992). Modelling of non-catalytic reactions in a gas-solid trickle flow reactor: dry, regenerative flue gas desulphurisation using a silica-supported copper oxide sorbent. *Chemical engineering science*, *47*(17-18), 4271-4286.
34. Kikuchi, R., and Pelovski, Y. (2009). Low-dose irradiation by electron beam for the treatment of high-SO2 flue gas on a semi-pilot scale-consideration of by-product quality and approach to clean technology. *Process Safety and Environmental Protection*, 87, 135_143.
35. Kowalski, K., Stagl, S., Madlener, R., & Omann, I. (2009). Sustainable energy futures: Methodological challenges in combining scenarios and participatory multi-criteria analysis. *European Journal of Operational Research*, 197(3), 1063-1074.
36. Lakshmipathiraj, P., Chen, J., Doi, M., Takasu, N., Kato, S., Yamasaki, A., and Kojima, T. (2013). Lau, L. C., Lee, K. T., and Mohamed, A. R. (2011). Simultaneous SO2 and NO removal using sorbents derived from rice husk: An optimization study. *Fuel* 90, 1811-181.
37. Li, T., Zhuo, Y., Lei, J., & Xu, X. (2007). Simultaneous removal of SO2 and NO by low cost sorbent-catalysts prepared by lime, fly ash and industrial waste materials. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 24(6), 1113-1117.
38. Licki, J., Chmielewski, A. G., Zimek, Z., Tymi_nski, B., and Bu»ka, S. (2002). Electron beam process for SO2 removal from flue gases with high SO2 content. *Radiation Physics and Chemistry*, 63, 637-639.
39. Martin, D., Radoiu, M., Calinescu, I., Indreias, I., Oproiu, C., Marghitu, S., & Margaritescu, A.D. (1999). Combined electron beam and microwave treatment for flue gas purification. Materials and manufacturing processes, 14(3), 365-382.
40. Mok, Y. S., and Ham, S. W. (1998). Conversion of NO to NO2 in air by a pulsed corona discharge process. *Chemical Engineering Science*, 53, 1667-1678.

41. Mok, Y. S., and Nam, I. S. (2002). Modeling of pulsed corona discharge process for the removal of nitric oxide and sulfur dioxide.
42. Murry, T. J., Pipino, L. L., & Gigch, J. P. (1985). A pilot study of fuzzy set modification of Delphi. *Human Systems Management*, 5(1), 76-80.
43. Namba, H., Hashimoto, S., Tokunaga, O., and Suzuki, R. (1998). Electron beam treatment of lignite-burning flue gas with high concentrations of sulfur dioxide and water. *Radiation Physics and Chemistry*, *53*, 673-681.
44. Onat, N., & Bayar, H. (2010). The sustainability indicators of power production systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(9), 3108-3115.
45. Pearson B.(2006). Clean coal technology roadmap. In: *EIC climate change technology conference* ;p. 1–31.
46. Polyanskii, A. M., Polyanskii, V. A., Bogdanov, A. A., and Petrov, M. I. (2012). Basic for technology developing cost-effective thermal waste recycling industry. *Chemical Physics of Ecological Processes*, 10, 5-28.
47. Poullikkas, A. (2015). Review of Design, Operating, and financial considerations in flue gas desulfurization systems. *Energy Technology & Policy*, 2(1), 92-103.
48. Pilavachia.P, Stephanidis.S, Pappas.V, and Afgan.N. (2009). Multi-criteria evaluation of hydrogen and natural gas fuelled power plant technologie. *Applied Thermal Engineering*, 29: 2228-2234.
49. Radoiu, M. T., Martin, D. I., & Calinescu, I. (2003). Emission control of SO2 and NOx by irradiation methods. *Journal of hazardous materials*, 97(1-3), 145-158.
50. D.Stergarek, A.; Horvat, M.; Frkal, P.; Stergarek, J. (2010).Removal of HgO from flue gases in Wet FGD by Catalytic Oxidation with Air-An Experimental Study. *Fuel*, 89, 3167–3177.
51. Strategic Document and Technology Development Roadmap, Tehran, Iran, 2015.
52. Sumathi, S., Bhatia, S., Lee, K. T., and Mohamed, A. R. (2010). Cerium impregnated palm shell activated carbon (Ce/PSAC) sorbent for simultaneous removal of SO2 and NO-Process study. *Chemical Engineering Journal* ,162, 51_57.
53. Sun, Y., Zwolińska, E., & Chmielewski, A. G. (2016). Abatement technologies for high concentrations of NOx and SO2 removal from exhaust gases: A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 46(2), 119-142.
54. T. Tsoutsos, M. Drandaki, N. Frantzeskaki, E. Iosifidis, and I. Kiosses. (2009). Sustainable energy planning by using multi-criteria analysis application in the island of Crete. *Energy Policy*, 37(5), 1587-1600.
55. Tan, E., Ünal, S., Doğan, A., Letournel, E., & Pellizzari, F. (2016). New "wet type" electron beam flue gas treatment pilot plant. *Radiation Physics and Chemistry*, *119*, 109-115.
56. Rezaei, F., Rownaghi, A. A., Monjezi, S., Lively, R. P., & Jones, C. W. (2015). SO x/NO x removal from flue gas streams by solid adsorbents: a review of current challenges and future directions. *Energy & fuels*, 29(9), 5467-5486.
57. Venetsanos, K., Angelopoulou, P., Tsoutsos, T., (2002). Renewable energy sources project appraisal under uncertainty: The case of wind energy exploitation within a changing energy market environment. *Energy Policy*, 30, 293–307.
58. Vinogradov, J., Rivin, B., and Sher, E. (2008). NOx reduction from compression ignition engines with pulsed corona discharge. *Energy*, 33, 480-491.
59. World Energy Council, (2001). Energy Technologies for the 21st Century, Energy Research, Development and Demonstration Expenditure 1985–2000*: An International Comparison*, August 2001.

60. Xu, G., Yang, Y. P., Lu, S. Y., Li, L., & Song, X. (2011). Comprehensive evaluation of coal-fired power plants based on grey relational analysis and analytic hierarchy process. *Energy policy*, 39(5), 2343-2351.
61. Zaremba, T., Mokrosz, W., Hehlmann, J., Szwalikowska, A., & Stapiński, G. (2008). Properties of the wastes produced in the semi-dry FGD installation. *Journal of and Thermal Analysis and Calorimetry*, 93(2), 439-443.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

Identification and Prioritization of SOx Emission Reduction Technologies (Case study: Iranian Thermal Power Plants)

Shirin Azizi
Department of Industrial Management, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
Reza Radfar (Corresponding Author)
Department of Industrial Management, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
Email: radfar@gmail.com
Hanieh Nikoomaram
Department of Natural Resources and Environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
Ali Rajabzadeh Ghatari
Department of Industrial Management, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Abstract
Thermal power plants play a major role in the production of air pollutants with significant consumption of fossil fuels. Sulfur oxides are among these pollutants. So far, none of Iran's thermal power plants have been equipped with technologies to reduce and control sulfur oxide emissions. Regarding the necessity of reducing pollutants due to combustion of fuel in power plants of Iran, and imposing high social costs due to the excessive emission of pollutants, this paper proposes a solution to select SOx reduction technology with investment approach in Iranian thermal power plants. In this study, fuzzy Delphi technique was used to select the criteria for effective investment in technology and Simultaneous evaluation of criteria and alternatives (SECA) was used to rank SOx-lowering technologies. The results showed that dry scrubber technologies, regenerable process, corona discharge, sorbent injection process and absorption technology were the first to fifth priority of of technology selection, respectively.
Keywords: Pollution, SOx Reduction Technologies, Analytical Hierarchy Process, Fuzzy Delphi, SECA.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی