

اولویت بندی نیروگاه های حرارتی دارای قابلیت بازیافت CO₂ در ایران

امیرحسین خلیلی گرکانی^{*1}

¹ عضو هیئت علمی گروه پژوهشی شیمی و فرآیند، پژوهشگاه نیرو

Email: akhalili@nri.ac.ir

چکیده

مطالعه در مورد بازیابی و بکارگیری گاز CO₂ در دودکش نیروگاه های حرارتی کشور در سه سطح قابل بررسی است. در سطح اول به بررسی شرایط نیروگاه از نظر موقعیت جغرافیایی، تجهیزات و پارامترهای عملیاتی و آمادگی برای نصب و یکپارچه سازی سیستم بازیافت پرداخته می شود. در سطح دوم تمرکز مطالعات بر روی انواع فناوری های بازیابی CO₂ قابل اجرا در نیروگاه های کشور است. و در نهایت سطح سوم که به مطالعه فناوری های موجود و محصولات قابل تولید از لحاظ پیشرفت و بلوغ فناوری، چشم انداز اقتصادی، حجم CO₂ بازیافتی، تاثیرات زیست محیطی فناوری بکاربرده شده و ... می پردازد. این مقاله به مطالعات در سطح اول می پردازد و با در نظر گرفتن شرایط نیروگاه های حرارتی ایران سعی دارد تا امکان بکارگیری و آمادگی آنها را در راستای توسعه فناوری بازیافت و بکارگیری گاز CO₂ بررسی نماید. فرآیند تحلیل سلسله مراتبی بدین منظور بکار گرفته شده است و چهار بازار مصرف عمده موجود در کشور که در حال حاضر قابل تصور است بررسی شده اند: تزریق به مخازن نفت و گاز، کارخانجات سیمان و بتن، صنایع شیمیایی و پتروشیمی و صنایع کوچک و شهرک های صنعتی. در پایان لیستی از نیروگاه ها که از لحاظ شرایط عملیاتی مناسب بکارگیری در راستای بازارهای مصرف هستند، ارائه شده است.

واژگان کلیدی: گاز دودکش نیروگاه ها، بازیافت CO₂، فرآیند تحلیل سلسله مراتبی، مدل های تصمیم گیری چند معیاره

مقدمه

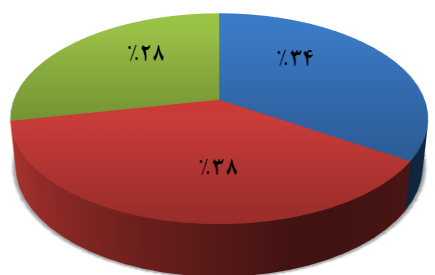
گازهای گلخانه‌ای ناشی از این بخش و سایر بخش‌های صنعتی نیز تاکید گردیده است [3].

یکی از مهمترین آلودگی‌های بخش انرژی براساس اقلیم، نوع فعالیت و منابع طبیعی در منطقه و غیره، آلودگی هوا در اثر انتشار و نشت گازهای آلاینده ناشی از احتراق سوخت‌های فسیلی است. اکسیدهای گوگرد (SO_x)، اکسیدهای نیتروژن (NO_x)، مونوکسید کربن (NO)، ذرات معلق (SPM)، هیدروکربن‌ها (CH) و دی‌اکسید کربن (CO₂) از جمله گازهای آلاینده و گلخانه‌ای هستند که در اثر فعالیت‌های بخش انرژی بویژه احتراق سوخت‌های هیدروکربنی در جو انتشار می‌یابند. گازهای گلخانه‌ای مانند CO₂ به سبب بروز پدیده تغییرات اقلیمی و همچنین گرمایش جهانی حائز اهمیت می‌باشند.

نتیجه‌گیری‌های مشابه توسط کارشناسان IEA و IPCC در فن‌آوری‌های کربن نیز بیان شده است [1]. ادامه بهره‌برداری از انرژی و تولید برق تجدیدپذیر، افزایش دما را محدود می‌کند، اما با این‌وجود بازهم ممکن است با افزایش دمای بیش از دو درجه سانتی‌گراد کره زمین تا سال 2100 مواجه شویم [3]. البته گیاهان سلاح بزرگ طبیعت برای مبارزه با آلاینده‌هایی مانند دی‌اکسید کربن هستند، با این‌حال، سرعت جذب آنان کند بوده، به گونه‌ای که نمی‌توانند مانع افزایش آلاینده‌ها در غلظت بالای CO₂ باشند. پس کره زمین و اتمسفر نیازمند به راه‌حلهایی است که می‌تواند CO₂ را با سرعت بیشتری جذب کند.

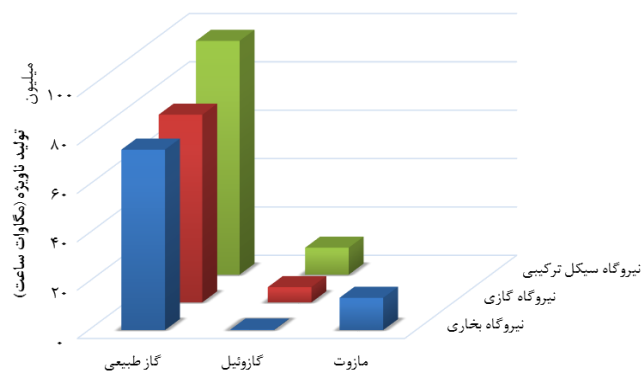
کاهش قابل توجه انتشار کربن به منظور جلوگیری از آسیب‌های اقتصادی و زیست محیطی در زندگی بشر نقش حیاتی دارد. تولید برق تجدیدپذیر و سایر تکنولوژی‌های بدون کربن و کم کربن بخش مهمی از راه حل‌های جلوگیری انتشار کربن را برعهده دارند [1]. اتخاذ فن‌آوری‌های کاهش کربن (آن‌هایی که باعث کاهش انتشار و غلظت CO₂ در اتمسفر می‌شوند) برای حفظ درجه حرارت زمین به میزان کمتر از افزایش 2 درجه سلسیوس ضروری است [1]. فن‌آوری‌های بازیافت و بکارگیری CO₂ می‌توانند در این زمینه نقش مهمی را ایفا کنند، اما تا به حال آنچنان در ایران مورد توجه قرار نگرفته و پتانسیل آن‌ها به طور جامع مورد بررسی قرار نگرفته است. مشکل اصلی از آنجا ناشی می‌شود که بخش قابل توجهی از انرژی در ایران و جهان توسط سوخت‌های فسیلی تامین می‌شود [2]. بهترین پیش‌بینی‌های علمی نشان می‌دهد که تا سال 2050 انتشار گازهای گلخانه‌ای باید به گونه‌ای کاهش یابد که امید به جلوگیری از آسیب‌های محیطی را به همراه داشته باشد [3].

رشد روزافزون جمعیت، وابستگی به انرژی و به تبع آن رشد مصرف انرژی بویژه انرژی‌های فسیلی موجب افزایش مشکلات زیست محیطی می‌شود. در مطالعات جهانی با توجه به اثرات قابل توجه تغییر اقلیم و اهمیت روزافزون فن‌آوری‌های مربوط به کاهش نشر گازهای گلخانه‌ای (NO_x, CH₄, HFCS, SF₆) و CO₂ علاوه بر آلاینده‌های ناشی از بخش تولید انرژی، بر



نیروگاه سیکل ترکیبی ■ نیروگاه گازی ■ نیروگاه بخاری

(ب)



(الف)

شکل 1. سهم هر کدام از سوخت‌ها در تولید ناویژه نیروگاه‌های کشور و سهم انواع نیروگاه‌ها در تولید گاز CO₂ در سال 1397

مبانی نظری

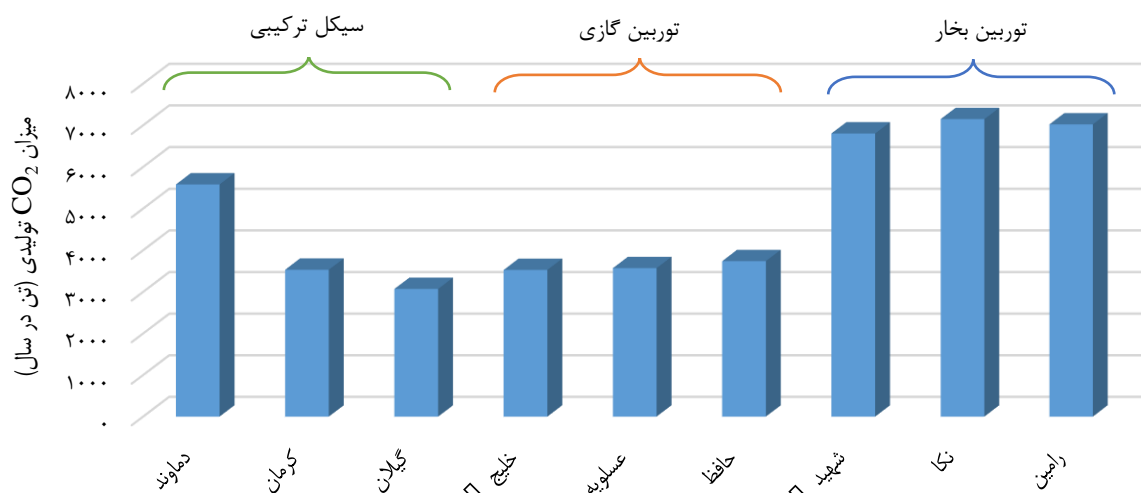
میزان تولید گاز CO₂ در نیروگاه‌های ایران

بر اساس اطلاعات انتشار یافته در آمارنامه تفصیلی در سال 1397 تعداد 113 نیروگاه حرارتی شامل: 23 نیروگاه بخاری، 62 نیروگاه گازی و 28 نیروگاه سیکل ترکیبی مشغول فعالیت بوده‌اند [4]. این تعداد شامل نیروگاه‌های دولتی، بخش خصوصی و صنایع بزرگ است. در نیروگاه‌های حرارتی ایران سه نوع سوخت فسیلی گاز، گازوئیل و مازوت به منظور تولید برق سوزانده می‌شود. در شکل 1 (الف) سهم هرکدام از سوخت‌های فسیلی در تولید ناویژه نیروگاه‌های کشور (به تفکیک نوع نیروگاه) در سال 1397 نمایش داده شده است. با توجه به مطالعات انجام شده بر روی 113 نیروگاه حرارتی کشور در پژوهشگاه نیرو [5]، بر اساس مشخصات سوخت‌های فسیلی مصرفی از این مقدار سوخت حدود 179000 تن گاز CO₂ در سال 1397 تولید شده است. سهم هرکدام از انواع نیروگاه‌ها از این میزان CO₂ در شکل 1 (ب) آورده شده است. میزان تولیدی در سه نیروگاه بزرگ فعال در هر طبقه-بندی (بخاری، گازی و سیکل ترکیبی) نیز در شکل 2 آورده شده است. این حجم از تولید گازهای گلخانه‌ای لزوم یک عزم

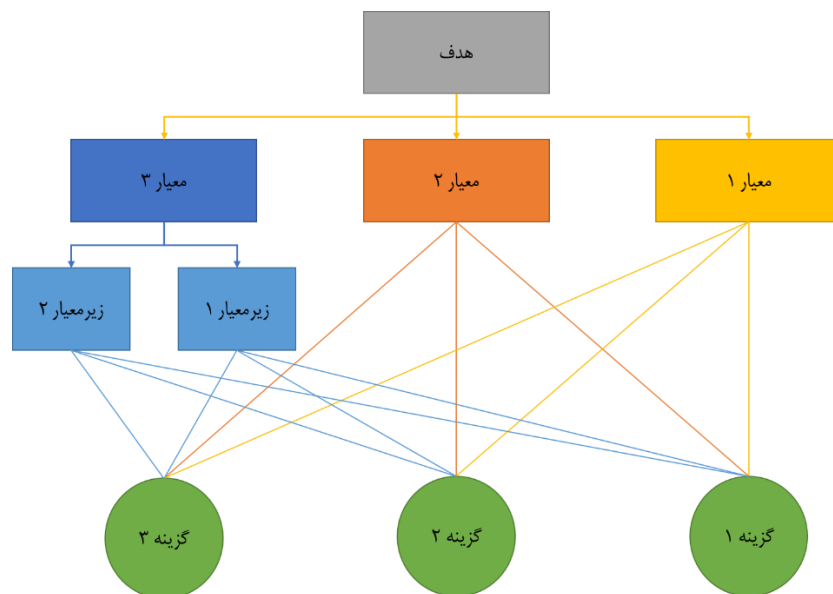
ملی در راستای کاهش آن و تبدیل کردن آن به یک فرصت اقتصادی در چشم‌انداز آینده کشور را نشان می‌دهد، که می‌تواند با مطالعه دقیق شرایط و بازاریابی مناسب از یک تهدید به یک فرصت تبدیل شود.

فرآیند تحلیل سلسله مراتبی

از آنجا که پارامترهای عملیاتی و ساختاری متعددی در انتخاب و اولویت‌بندی نیروگاه‌ها وجود دارد این مسئله از نمونه‌های تصمیم‌گیری چند معیاره محسوب می‌شود. فرآیند تحلیل سلسله مراتبی یکی از معروف‌ترین فنون تصمیم‌گیری چند معیاره است که اولین بار توسط ساعتی، دانشمند عراقی الاصل آمریکایی در دهه 1970، ارائه شد [6]. تصمیم‌گیری در مورد مسائلی از نوع مدل‌های تصمیم‌گیری چند معیاره با استفاده از تحلیل سلسله مراتبی با تشکیل درخت سلسله مراتب تصمیم آغاز می‌شود (شکل 3). براساس روش تحلیل سلسله مراتبی، موضوع تصمیم‌گیری دارای درختی است که سطح یک آن، هدف و سطح آخر، گزینه‌های رقیب خواهد بود. سطح یا سطوح میانی نیز شامل عوامل بوده و تعداد سطوح بستگی به موضوع مورد ارزیابی دارد.



شکل 2. میزان تولید گاز CO₂ در نیروگاه‌های شاخص کشور در سال 1397



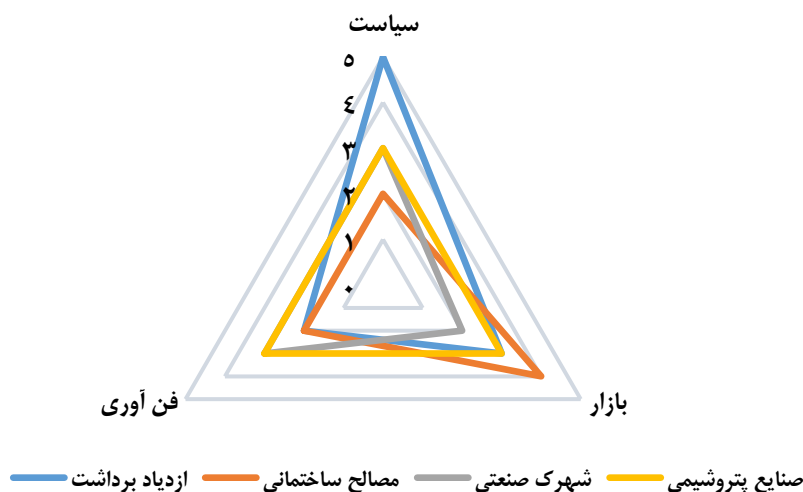
شکل 3. درخت سلسله مراتب تصمیم

روش تحقیق

- شناسایی و پیش‌بینی فرصت‌های بازار

تحقیقات نشان می‌دهد پیشرفت قابل توجهی در فن‌آوری‌های مرتبط با بازیافت و بکارگیری CO₂ طی پنج سال گذشته صورت گرفته است و بسیاری از فن‌آوری‌ها دارای قابلیت مقیاس‌پذیری هستند (توانایی رشد اقتصادی و فن‌آوری را دارا می‌باشند). پیشرفت در چهار بازار بزرگ از محصولات اعم از تزریق به میادین نفتی و گازی در راستای ازدیاد برداشت، مصالح ساختمانی (سیمان و کانی‌های کربنات)، واسط‌های شیمیایی (متانول، اسید فرمیک، گاز سنتز و ...)، سوخت‌ها و پلیمرها (پلیول‌ها و پلی کربنات) و شهرک‌های صنعتی و صنایع کوچک شرایط مطلوبی را نشان داده است [7]. هرکدام از این بازارها، با توجه به بلوغ فن‌آوری، پیش‌بینی بازار و تأثیر بالقوه بر کاهش انتشار کربن، مورد بررسی قرار گرفته است. برای بسیاری از این محصولات،

سرمایه‌گذاری و انگیزه‌ها برای سرعت بخشیدن به توسعه فن‌آوری و دستیابی به توانایی بازاریابی تجاری در تمام سطوح ضروری است. نقشه راه از سه منظر در ذهن محققان طراحی شده است: سیاست، فن‌آوری و بازار [3]. این سه بعد به شدت بر مسیر و سرعت تجاری‌سازی تأثیر می‌گذارند. مطالعه وضعیت ایران نشان می‌دهد که، هرکدام از موانع و محدودیت‌ها به روش‌های مختلف بر بازارهای مختلف تأثیر می‌گذارد. در برخی موارد، فن‌آوری ممکن است بزرگ‌ترین مانع باشد در حالی که در سایر موارد ممکن است سیاست‌گذاری دولتی مانع اصلی باشد. شکل 4 شمای کلی برای نشان دادن تأثیر نسبی سه بعد: سیاست، فن‌آوری و بازار در توسعه روش‌های مختلف بازیافت و بکارگیری CO₂ در ایران را نشان می‌دهد. برای نمونه، سیاست‌گذاری‌ها، تأثیر بیشتری بر تزریق در راستای ازدیاد برداشت می‌گذارند در صورتی که برای روش‌های تبدیل به مصالح ساختمانی مانع اصلی بازار تجاری‌سازی آن می‌باشد.



شکل 4. تاثیر سیاست، فن آوری و بازار در توسعه روش‌های مختلف بازیافت

میزان گاز CO₂ منتشرشده از هر نیروگاه یکی از موارد بسیار مهم برای اولویت‌بندی‌ها به شمار می‌رود. محصولات احتراق در هر نوع نیروگاه متفاوت بوده و درصد گاز CO₂ نیز متفاوت است. سیستم امتیازدهی برای این موضوع در جدول 2 آورده شده است.

جدول 2. امتیازدهی به نیروگاه‌ها بر اساس میزان گاز CO₂ در محصولات احتراق

امتیاز	میزان گاز CO ₂ در محصولات احتراق (1000 تن در سال)
9	6-7
8	5-6
7	4-5
6	3-4/5
5	3/3-5
4	2-3/5
3	2/2-5
2	1-2/5
1	کمتر از 1/5

سهولت در حمل‌ونقل تا مبادی مصرف
به‌منظور استفاده از دی‌اکسید کربن بازیافت شده می‌بایست راه‌های آسانی برای حمل‌ونقل آن تا مبادی مصرف پیشنهاد شود. برای نمونه: استفاده از CO₂ در ازدیاد برداشت از مخازن نفتی نمی‌تواند به‌صورت مخزن و کپسول باشد و حتماً نیازمند

- تعیین معیارهای غربالگری نیروگاه‌ها

در روش تحلیل سلسله مراتبی معمولاً از مجمع نخبگان و نظرات کارشناسان بهره گرفته می‌شود. در این راستا پرسشنامه‌ای بر مبنای پارامترهای عملیاتی و شرایط جغرافیایی و تجهیزات موجود در نیروگاه‌های حرارتی ایران تهیه شد و برای کارشناسان زیربط و محققان در این زمینه ارسال شد.

- فاصله نیروگاه تا مبادی مصرف

امتیازدهی به نیروگاه‌ها با توجه به فاصله آن‌ها تا مبادی مصرف (تزریق به چاه‌های نفتی، کارخانه‌ها تولید بتن و سیمان، صنایع پتروشیمی و شهرک‌های صنعتی) مطابق جدول 1 است.

جدول 1. امتیاز بندی نیروگاه‌ها بر اساس فاصله تا مبادی مصرف CO₂

امتیاز	فاصله تا مبادی مصرف به کیلومتر
9	کمتر از 50 کیلومتر
7	50 تا 100
5	100 تا 150
4	150 تا 200
3	200 تا 250
1	250 تا 350

- میزان گاز CO₂ انتشاری از نیروگاه

نیروگاه جدید آسان‌تر خواهد بود. جدول 5 اساس امتیازدهی به نیروگاه‌های کشور به‌منظور عمر نیروگاه است.

جدول 5. امتیازدهی به نیروگاه‌ها بر اساس عمر

امتیاز	عمر نیروگاه
9	زیر 5 سال
8	5 تا 10
7	10 تا 15
5	15 تا 20
4	20 تا 25
3	25 تا 30
1	بالای 30 سال

- استمرار تولید و انتشار CO₂

یکی از شاخص‌های انتخاب نیروگاه مستعد بازیافت، میزان بهره‌برداری از ظرفیت عملی آن است. زیرا چنانچه نیروگاهی دائماً در مدار تولید نباشد، پس استمرار انتشار CO₂ نیز ندارد و نمی‌توان از سیستم بازیافت آن بهره‌وری بالایی داشت. نیروگاه‌هایی که استمرار تولید دارند، به لحاظ استمرار در انتشار CO₂ نیز ارجحیت نصب سیستم بازیافت دارند. در جدول 6 نیروگاه‌ها بر اساس درصد بهره‌برداری از ظرفیت عملی دسته‌بندی شده‌اند و در نهایت امتیازدهی شده‌اند.

جدول 6. امتیازدهی به نیروگاه‌ها بر اساس درصد بهره‌برداری

امتیاز	درصد بهره‌برداری از ظرفیت عملی نیروگاه
9	بالای 80 درصد
8	75 تا 80
7	70 تا 75
6	65 تا 70
5	60 تا 65
4	55 تا 60
3	50 تا 55
2	45 تا 50
1	زیر 45 درصد

- سازگاری سیکل نیروگاه با نصب سیستم بازیافت

خط لوله حمل CO₂ است ولی در مصارف آزمایشگاهی می‌توان از کپسول‌های CO₂ نیز استفاده کرد. شرایط ارزیابی این پارامتر در جدول 3 نمایش داده شده است.

جدول 3. جدول مربوط به امتیازدهی بر اساس سهولت در حمل و نقل

سهولت در حمل و نقل تا مبادی مصرف	امتیاز
استفاده از خط لوله کوتاه	9
خط لوله بلند	7
استفاده از قطار و حمل در مخزن	5
استفاده از کامیون و حمل در مخزن	4
استفاده از قطار و حمل در کپسول	3
استفاده از کامیون و حمل در کپسول	1

- امکانات جانبی جهت نصب سیستم بازیافت

دستگاه‌های بازیافت دی‌اکسیدکربن با توجه به ابعادی که دارند نیازمند فضای مناسب، آب، برق، انرژی حرارتی و سایر امکانات لازم می‌باشد. لذا نیروگاه‌ها با توجه به موقعیتی که دارند و نظر به داخل شهر یا خارج شهر بودن آن‌ها تفاوت‌هایی دارند و محدودیت و اولویت‌هایی را به وجود می‌آورند. جدول امتیازبندی نیروگاه‌ها به لحاظ دارا بودن امکانات موردنیاز در جدول 4 نشان داده شده است.

جدول 4. امتیازدهی به نیروگاه‌ها بر اساس دارا بودن امکانات جانبی برای نصب سیستم بازیافت

امتیاز	امکانات جانبی جهت نصب سیستم بازیافت
9	فضای مناسب، آب کافی، خارج از شهر
6	فضای مناسب، آب کافی، داخل شهر
5	فضای مناسب، آب محدود، خارج از شهر
2	فضای مناسب، آب محدود، داخل شهر
1	فضای کم، آب محدود، داخل شهر

- عمر نیروگاه

نیروگاه‌های کشور را از نظر سال بهره‌برداری می‌توان در دسته‌بندی‌های مختلف در نظر گرفت. این موضوع از آن جهت اهمیت دارد که نصب دستگاه‌های بازیافت CO₂ در یک

جمع‌آوری شده و رتبه‌بندی‌ها معیار قرار گرفته است. با توجه به اهمیت هر معیار به ترتیب امتیاز اخذ شده رتبه‌بندی معیارهای هشت‌گانه در جدول 9 آورده شده است. پس از مشخص شدن اهمیت معیارها و رتبه‌بندی معیارهای ذکر شده، با توجه به اینکه نیروگاه‌ها از نظر برخی مسائل باهم تفاوت‌هایی دارند پس هر نیروگاه جداگانه امتیازبندی و در نهایت پس از بررسی امتیاز کل برای هر نیروگاه و مقایسه آن با سایر نیروگاه‌ها، اولویت‌بندی نیروگاه به‌منظور بازیافت CO₂ برای استفاده در چهار بازار عمده مصرف انجام می‌شود.

جدول 8. امتیازدهی به نیروگاه‌ها بر اساس ترکیبات موجود در محصولات احتراق

امتیاز	نوع سوخت	%O ₂
9	گاز	زیر 3%
8	گازوئیل	
7	مازوت	
8	گاز	3-5
7	گازوئیل	
6	مازوت	
6	گاز	5-10
5	گازوئیل	
4	مازوت	
4	گاز	10-15
3	گازوئیل	
2	مازوت	
3	گاز	بالای 15%
2	گازوئیل	
1	مازوت	

نتایج اجرای مدل و اولویت‌بندی نیروگاه‌های کشور
 به‌منظور اولویت‌بندی‌ها برای مشخص شدن نیروگاه‌ها، جداول اولویت‌بندی در چهار بازار برای 113 نیروگاه حرارتی کشور انجام شده است. در این قسمت نتایج برای چهار بازار عمده استفاده در صنایع پتروشیمی و تبدیل به متانول، استفاده از CO₂ در کارخانه‌ها سیمان و بهبود مصالح ساختمانی، ازدیاد برداشت نفت و همچنین استفاده در شهرک‌های صنعتی تعداد نیروگاه‌های که در کشور ایران از نظر موقعیت مکانی برتر بوده و میزان انتشار CO₂ بیشتر و

نیروگاه‌های کشور از لحاظ میزان تولید و انتشار گاز دودکش در سال متغیر هستند. از این‌رو، نیروگاه‌های که میزان انتشار گاز CO₂ بیشتری به نسبت سایر نیروگاه‌ها را دارد ارجح است (پیوست 1) و این تفاوت در میزان دود نیروگاه‌ها در تعداد واحدهای نیروگاه و نوع سوخت آن‌ها و ... به وجود آمده است. هرچه میزان برداشت دود کمتری از نیروگاه به‌منظور بازیافت انجام شود، نیروگاه کمتر دچار افت راندمان خواهد شد. جدول 7 به‌منظور امتیازدهی نیروگاه‌های کشور بر اساس سازگاری با نصب سیکل بازیافت CO₂ طراحی شده است.

جدول 7. امتیازدهی به نیروگاه‌ها بر اساس میزان برداشت از دود

میزان درصد برداشت دود از نیروگاه	امتیاز
کمتر از 15 %	9
15 تا 20	8
20 تا 25	7
25 تا 30	6
30 تا 35	5
35 تا 40	4
40 تا 45	3
45 تا 50	2
بالتر از 50 %	1

- میزان ناخالصی‌ها در محصولات احتراق

معمولا اکسیژن اضافی و SOx به عنوان ناخالصی‌های همراه دود معروفند که هر یک از آن‌ها مشکلاتی از قبیل تخریب حلال، ایجاد خوردگی در تجهیزات سیستم بازیافت را باعث می‌شوند و هر اندازه میزان آن‌ها بیشتر باشد قدرت تخریب آن‌ها بیشتر می‌شود. در جدول 8 الگویی جهت رتبه‌بندی نیروگاه‌ها بدلیل وجود ترکیبات فوق در محصولات احتراق آن‌ها ارائه گردد.

همانطور که پیش‌تر بیان شد، با توجه به پارامترهای ذکر شده، فرمی تحت عنوان اولویت‌بندی نیروگاه‌های حرارتی دارای قابلیت بازیافت CO₂ در ایران تهیه و در اختیار کارشناسان و محققان فعال در این حوزه قرار گرفت. پس از دریافت پاسخ ارسالی از سوی نفرات مذکور با استفاده از نرم‌افزار و روش تحلیل سلسله مراتبی نقطه نظرات

همچنین تولید انرژی بیشتری نیز داشته‌اند، آورده شده است.

جدول 9. معیارهای ارزیابی نیروگاه‌ها به منظور اولویت بندی

رتبه	معیار ارزیابی	امتیاز اخذشده
1	فاصله تا مبادی مصرف	0/243
2	میزان گاز CO ₂ انتشاری از سوی نیروگاه	0/181
3	سهولت در حمل و نقل CO ₂ تا مبادی مصرف	0/149
4	سازگاری نیروگاه با نصب سیستم بازیافت	0/105
5	استمرار تولید CO ₂	0/102
6	میزان ناخالصی‌ها در محصولات احتراق	0/087
7	دسترسی به امکانات جانبی مورد نیاز برای بازیافت	0/067
8	عمر نیروگاه	0/066

- ازدیاد برداشت از مخازن نفتی

اولین اولویت‌بندی‌ها مربوط به بازار استفاده از CO₂ بازیافتی به منظور ازدیاد برداشت از مخازن نفتی است. در جدول 10 نتایج بررسی و اولویت‌بندی نیروگاه‌های گازی، بخاری و سیکل ترکیبی با توجه به امتیازهای مربوط نشان داده شده است. در بحث تزریق گاز به میدان‌ها نفتی یکی از مهم‌ترین پارامترها نزدیکی محل بازیافت CO₂ به میدان نفتی است. این موضوع در ایران از اهمیت دوچندانی برخوردار است چراکه با توجه به میزان ذخایر گاز طبیعی ایران و ارزانی آن وجود هزینه‌های اضافی برای انتقال گاز بازیافت شده به میدان نفتی باعث آن خواهد شد که استفاده از گاز طبیعی جهت تزریق مقرون به صرفه‌تر گردد. لذا همان‌گونه که در جدول ملاحظه می‌شود در پنج ردیف اول نیروگاه‌هایی که در جنوب و جنوب غرب کشور مستقر می‌باشند در اولویت قرار گرفته‌اند. در این بین نیروگاه‌های گازی با توجه به جوان‌تر بودن و سازگار پذیرتر بودن با سیکل بازیافت در ردیف‌های بالاتری قرار دارند و پس از آن نیروگاه‌های بخاری بزرگ مستقر در جنوب کشور با توجه به ظرفیت بالای خود در اولویت قرار می‌گیرند. نیروگاه سیکل ترکیبی دماوند با توجه به وجود میادینی مانند البرز و سراج در مرکز کشور در محدوده مابین تهران و قم انتخاب شده است و مجدداً نیروگاه‌های گازی و سیکل ترکیبی

در محدوده استان فارس با توجه به نزدیک‌تر بودن به مخازن نفتی مورد توجه می‌باشند. نیروگاه بیستون نیز با مخازن نفتی غرب کشور فاصله متوسطی دارد و با توجه به عمر آن جزء آخرین نیروگاه‌های دارای اولویت بازیافت قرار دارد.

جدول 10. اولویت‌بندی نیروگاه‌های کشور به منظور استفاده در فناوری ازدیاد برداشت

شماره اولویت	نام نیروگاه	نوع نیروگاه	امتیاز اکتسابی
1	رامین	بخاری	7.686
2	خرمشهر	گازی	7.388
3	عسلویه	گازی	7.332
4	خلیج فارس	گازی	7.332
5	هرمزگان	بخاری	6.965
6	دماوند	سیکل ترکیبی	6.837
7	حافظ	گازی	6.515
8	بیستون	بخاری	6.358
9	منتظری	بخاری	6.098
10	کازرون	سیکل ترکیبی	5.97

- کارخانجات سیمان و بهبود مصالح ساختمانی

نیروگاه‌های دارای قابلیت بازیافت به منظور استفاده از CO₂ بازیافتی در کارخانجات سیمان و همچنین بهبود مصالح ساختمانی در جدول 11 آمده است. در بحث استفاده در صنایع سیمان و مصالح ساختمانی با توجه به گسترده بودن این صنایع در سطح کشور اکثریت نیروگاه‌ها به نوعی به این گونه صنایع نزدیک می‌باشند. بنابراین ضمن اینکه مجدداً نزدیکی به صنعت اولویت اول را دارد اما همان‌گونه که مشاهده می‌شود گسترده‌گی آن در سطح کشور به مراتب بیشتر از نیروگاه‌های مناسب برای تزریق و ازدیاد برداشت است. بنابراین در این مورد، ظرفیت و عمر نیروگاه پارامتر مؤثرتری است. به گونه‌ای که نیروگاه رامین، دماوند و ارومیه در اولویت‌های اولیه قرار دارند. نیروگاه رامین اولین نیروگاه بخاری است که ظرفیت و نزدیکی آن به کارخانه‌ها سیمان مؤثر است و پس از آن نیروگاه‌های شهرهای کرمان و اصفهان نیز می‌تواند به این منظور استفاده شوند. نیروگاه شهید

گیرند. نیروگاه اول در نزدیکی اراک و پتروشیمی شازند است. نیروگاه‌های هرمزگان و خرمشهر که نزدیک به منطقه آزاد پتروشیمی است و همچنین عسلویه که نزدیک به پتروشیمی‌های روبه گسترش پارس جنوبی می‌باشند. پس از آن نیروگاه‌های واقع در نزدیکی پتروشیمی‌های بزرگ نظیر اصفهان و اهواز و کرمانشاه قرار دارند. نیروگاه دیگری که در این جدول ذکر نشده اما در این زمینه اهمیت دارد نیروگاه متمرکز پارس جنوبی است.

رجایی نیروگاه دیگری است که با توجه به نزدیکی به کارخانه سیمان آبیگ موقعیت مناسبی دارد. اما در این جدول در ردیف‌های پایانی قرار گرفته است. این نیروگاه در دو بخش جدید و قدیم و در کنار هم ساخته شده است و با بررسی‌های انجام گرفته بخش سیکل ترکیبی آن نیز از موقعیت مناسبی برای این استفاده برخوردار است. بنابراین با توجه به این امر اگر این نیروگاه از تمام ظرفیت خود استفاده کند در موقعیت مناسب‌تری برای بازیافت قرار خواهد داشت.

جدول 12. اولویت‌بندی نیروگاه‌های کشور به منظور استفاده در صنایع پتروشیمی

شماره اولویت	نام نیروگاه	نوع نیروگاه	امتیاز اکتسابی
1	شازند	بخاری	7.425
2	هرمزگان	بخاری	7.4
3	خرمشهر	گازی	7.388
4	عسلویه	گازی	7.332
5	ترکیبی ارومیه*	گازی	7.317
6	منتظری	بخاری	7.313
7	رامین	بخاری	7.2
8	بیستون	بخاری	7.142
9	خلیج فارس	گازی	6.518
10	حافظ	گازی	6.515

- صنایع کوچک و شهرک‌های صنعتی

آخرین بازار بررسی شده برای نیروگاه‌های دارای قابلیت بازیافت CO₂ به منظور استفاده در شهرک‌های صنعتی و استفاده در صنایع تولید نوشیدنی‌ها و کپسول‌های اطفاء حریق و سایر مصارف کوچک هست که در جدول 13 این اولویت‌بندی‌ها برای 10 نیروگاه مشخص شده است. از آنجا که مسئله حمل و نقل دی اکسید کربن بازیافتی از محل نیروگاه تا محل مصرف بسیار مهم شمرده می‌شود، با توجه به اینکه در کنار اکثر نیروگاه‌های ایران شهرک‌های صنعتی احداث شده و یا قابلیت احداث شهرک‌های صنعتی در کنار نیروگاه‌ها در آینده وجود دارد، نمی‌توان اهمیت استفاده از CO₂ در این صنایع را در اولویت‌بندی نیروگاه‌های ایران انکار کرد. شهرک‌های صنعتی همانند کارخانه‌های سیمان در سطح

جدول 11. اولویت‌بندی نیروگاه‌های کشور به منظور استفاده در فناوری سیمان و بتن

شماره اولویت	نام نیروگاه	نوع نیروگاه	امتیاز اکتسابی
1	رامین	بخاری	7.686
2	دماوند	سیکل ترکیبی	7.621
3	ترکیبی ارومیه*	گازی	7.317
4	منتظری	بخاری	7.313
5	حافظ	گازی	7.299
6	بیستون	بخاری	7.142
7	کرمان	سیکل ترکیبی	7.127
8	رجایی	بخاری	7.083
9	جنوب اصفهان (چهل‌ستون)	گازی	6.947
10	خرمشهر	گازی	6.604

*بخش گاز نیروگاه ارومیه در تاریخ داده‌گیری فعال بوده است.

- صنایع پتروشیمی و تبدیل به مواد شیمیایی و پلیمری

اولویت‌بندی نیروگاه‌های دارای قابلیت بازیافت دی‌اکسید کربن به منظور استفاده در صنایع پتروشیمی و تبدیل به مواد شیمیایی و پلیمری مانند: متانول، آمونیاک، اوره و ... در جدول 12 آمده است که تعداد 10 نیروگاه با اولویت و امتیازهای اکتسابی بالاتر را نشان می‌دهد. در این جدول نیز پارامتر نزدیکی به مجتمع پتروشیمی اولویت اول را دارد و با توجه به تجمع این صنایع در جنوب و جنوب غرب کشور انتظار آن می‌رفت که مجدداً نیروگاه‌های این مناطق در اولویت قرار

استمرار تولید و انتشار CO₂، سازگاری نیروگاه با نصب سیستم بازیافت، سهولت در حمل و نقل CO₂ بازیافتی تا مبادی مصرف و میزان ناخالصی‌ها در محصولات احتراق پارامترهایی هستند که در این پرسشنامه جهت ارزیابی بکار گرفته شده‌اند. از آنجاکه در تبیین اولویت‌بندی بدست آمده پارامترهای عملیاتی و ساختاری نیروگاه‌ها مدنظر بوده است، می‌توان از آن به عنوان معیاری جهت امکان‌سنجی یکپارچه‌سازی سیستم بازیافت CO₂ در نیروگاه‌ها و همچنین سهولت در جذب سرمایه‌گذار برای پروژه‌های مرتبط بهره گرفت.

پیوست 1

در این قسمت نتایج رتبه‌بندی بر اساس میزان CO₂ تولیدی نیروگاه‌های بخاری، گازی و سیکل ترکیبی در سال 1397 آورده شده است [5].

جدول الف. رتبه‌بندی نیروگاه‌های سیکل بخاری

رتبه	نام نیروگاه	سوخت مصرفی		
		گاز (مترمکعب)	گازوئیل (لیتر)	مازوت (لیتر)
1	شهید سلیمی (نکا)	1631306	-	873356
2	رامین	2926300	10	51416
3	شهید منتظری	2917075	-	10748039
4	بندرعباس	929485	855	725175
5	شهیدمفتح همدان	1027443	-	612584
6	شازند	1842382	313	30797
7	شهیدرجائی	1490685	154	124436
8	توس	541451	323	499352
9	بیستون	437483	-	524319
10	سهند	1116685	-	42273

جدول ب. رتبه‌بندی نیروگاه‌های سیکل گازی

کشور گسترده هستند و بنابراین جدول مربوطه در اکثر موارد مشابه با کارخانه‌های سیمان است. اما با توجه به نزدیکی و عمر نیروگاه‌ها بازهم تفاوت‌هایی مشاهده می‌شود که با توجه به این تفاوت‌ها می‌توان نیروگاه‌های مناسب را برای این منظور انتخاب نمود. شهرک‌های صنعتی به دلیل تعداد بالا و گسترش در تمامی نقاط کشور، از مهمترین موارد قابل تامل جهت اجرای طرح بازیافت و بکارگیری CO₂ می‌باشد.

جدول 13. اولویت‌بندی نیروگاه‌های کشور به‌منظور استفاده در صنایع کوچک

شماره اولویت	نام نیروگاه	نوع نیروگاه	امتیاز اکتسابی
1	رامین	بخاری	7.686
2	دماوند	سیکل ترکیبی	7.621
3	نکا	بخاری	7.581
4	شازند	بخاری	7.425
5	منتظری	بخاری	7.4
6	خرمشهر	گازی	7.388
7	عسلویه	گازی	7.332
8	حافظ	گازی	7.299
9	کرمان	سیکل ترکیبی	7.127
10	هرمزگان	بخاری	6.965

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

از بین تمامی روش‌های موجود در دنیا، استفاده از CO₂ برای بهبود بازیافت نفت در مخازن نفتی و ازدیاد برداشت، استفاده در صنایع پتروشیمی و تولید مواد شیمیایی واسط، استفاده در خط تولید کارخانجات سیمان و بهبود بتن و همچنین جهت استفاده در سایر موارد مصرفی دی‌اکسید کربن مانند نوشابه‌سازی‌ها و اطفاء حریق و کنسروسازی و ... در کشور ما قابل پیش‌بینی می‌باشد. در این تحقیق با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی معیارهای عملیاتی و ساختاری نیروگاه-های حرارتی کشور انتخاب شده و سپس با تهیه یک پرسشنامه و جمع‌آوری اطلاعات از کارشناسان و محققان زیربط اولویت‌بندی نیروگاه‌ها برای بازارهای مذکور انجام شد. پارامترهای فاصله نیروگاه تا مبادی مصرف، میزان CO₂ انتشاری، دسترسی به امکانات جانبی موردنیاز، عمر نیروگاه،

204	-	25551	953983	پره‌سر	10
6		8			

منابع

[1] EUROPEAN COMMISSION (2018), A European long-term strategic vision for a prosperous, modern, competitive and climate neutral economy, Brussels.

[2] خلیلی گرکانی، امیرحسین. نشریه شیمی سبز و فرآیندهای پایدار، پژوهشگاه شیمی و مهندسی شیمی، چشم‌انداز روش‌های کنترل آلاینده- های دودکش نیروگاه‌های سوخت فسیلی، 1399، شماره 3 بهار و تابستان 1399 صفحات 16 الی 31.

[3] EUROPEAN COMMISSION (2018), Novel carbon capture and utilization technologies, Brussels.

[4] دفتر فناوری اطلاعات و آمار-شرکت مادر تخصصی توانیر (1398)، آمارنامه تفصیلی صنعت برق ایران ویژه تولید در سال 1397.

[5] گروه شیمی و فرآیند، پژوهشگاه نیرو (1398)، گزارش نهایی پروژه با عنوان "چشم انداز بازیافت گاز CO₂ نیروگاه‌ها و استفاده آن در محصولات دارای ارزش افزوده".

[6] T. L. Saaty (1990), Multicriteria Decision Making: The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation, 2nd edition, RWS Pubns.

[7] Innovation for Cool Earth Forum (ICEF) (2016), Global Roadmap for Implementing CO₂ Utilization.

رتبه	نام نیروگاه	سوخت مصرفی			CO ₂ (تن)
		مازوت (لیتر)	گازوئیل (لیتر)	گاز (مترمکعب)	
1	حافظ	-	30173	1265370	3738
2	عسلویه	-	17611	1220695	3571
3	خلیج فارس	-	24310	1198387	3527
4	خرمشهر	-	31591	1187418	3518
5	ترکیبی ارومیه*	-	186425	959359	3335
6	جنوب اصفهان (چهل-ستون)	-	56979	1056406	3218
7	گلستان	-	102184	956157	3068
8	سیلان	-	130831	867901	2901
9	فردوسی	-	100213	825684	2686
10	افق ماهشهر	-	4859	884505	2563

*بخش گاز نیروگاه ارومیه در تاریخ داده‌گیری فعال بوده است.

جدول ج. رتبه‌بندی نیروگاه‌های سیکل ترکیبی

رتبه	نام نیروگاه	سوخت مصرفی			CO ₂ (تن)
		مازو ت (لیتر)	گازوئیل (لیتر)	گاز (مترمکعب)	
1	دماوند	-	74277	255055	5580
2	کرمان	-	10987	200951	3531
3	گیلان	-	36335	145359	3071
4	کازرون	-	60146	152106	2631
5	پرند	-	33010	106094	2359
6	جهرم	-	47372	134447	2315
7	نیشابور	-	35741	963917	2248
8	شهیدرجائی	-	22976	108405	2215
9	فارس	-	25651	129126	2201