

بهبود شبکه‌های توزیع نیروی تاسیسات صنعتی جهت ادغام انرژی‌های تجدیدپذیر

علیرضا صفری

کارشناسی ارشد دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

aliviperreza200@gmail.com

خلاصه

همان‌طور که می‌دانیم، توجه زیادی به استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر برای کاهش انتشار کربن معطوف شده است. برای شناسایی استراتژی‌های عملیاتی مناسب جهت ادغام این منابع در سیستم‌های قدرت سنتی و درک اثرات فناوری و اقتصادی آن‌ها بر مدیریت انرژی صنعتی، به یک رویکرد جامع و یکپارچه نیاز داریم. هدف ما مدل‌سازی سیستم‌های قدرت صنعتی است که در آن‌ها انرژی تجدیدپذیر تلفیق شده است. سپس این مدل‌ها را برای بررسی موازنه اقتصادی بین سرمایه‌گذاری ثابت، مصرف سوخت، تولید برق و مالیات انتشار کربن بهینه می‌کنیم.

با استفاده از چارچوب بهینه‌سازی، حساسیت پارامترهای طراحی کلیدی ارزیابی می‌شود که به ما درک عمیق‌تری از اثرات اقتصادی مالیات کربن و قیمت انرژی تجدیدپذیر بر مدیریت انرژی و حرارت در سطح صنعتی می‌دهد. در مطالعه موردی، نشان داده شد که ادغام انرژی تجدیدپذیر در سیستم‌های قدرت، در مقایسه با سیستم‌های مبتنی بر سوخت‌های فسیلی، منجر به صرفه‌جویی تقریباً ۱۴ درصدی در هزینه‌های عملیاتی و ۹ درصدی در هزینه‌های سرمایه با تزریق راهبردی ۲۰ مگاوات توان تجدیدپذیر می‌شود. این مطالعات موردی به طور کامل اثرات اقتصادی استفاده از انرژی تجدیدپذیر در سیستم‌های قدرت صنعتی را نشان می‌دهند و مزایای بهینه‌سازی فرایند یکپارچه‌سازی را تأیید می‌کنند.

کلمات کلیدی: انرژی تجدیدپذیر، برق رسانی، سیستم‌های تاسیسات قدرت، یکپارچه سازی فرایند، بهینه سازی

۱. مقدمه

حرارت و توان الکتریکی موردنیاز برای تولیدات صنعتی معمولاً توسط سیستم‌های قدرت در ناحیه صنعتی، تولید می‌شوند. سیستم تاسیسات قدرت در صنایع فرایندی برای کاهش هزینه عملیاتی مهم در نظر گرفته می‌شود، زیرا بیشتر انرژی مصرف‌شده در تولیدات صنعتی توسط حرارت و توان الکتریکی تأمین می‌شوند. اما این روزها طراحی انرژی-کارآمد و مدیریت پایدار سیستم‌های قدرت اهمیت زیادی برای کاهش انتشار گاز دی‌اکسید کربن در تولیدات صنعتی پیدا کرده است، زیرا روش‌های متعارف تولید حرارت و توان الکتریکی عمدتاً از سوخت فسیلی استفاده می‌کنند. صنایع فرایندی باید اقدامات لازم برای پیاده‌سازی فناوری‌های ذخیره کننده انرژی را اجرا و همچنین از منابع انرژی پاک (بدون کربن)، استفاده کنند. دستیابی



به راندمان انرژی بالا یا حداقل کردن انتشار کربن سیستم‌های قدرت صنعتی به ارزیابی دقیق بده بستان اقتصادی مرتبط با تولید انرژی و توزیع آن نیاز دارد.

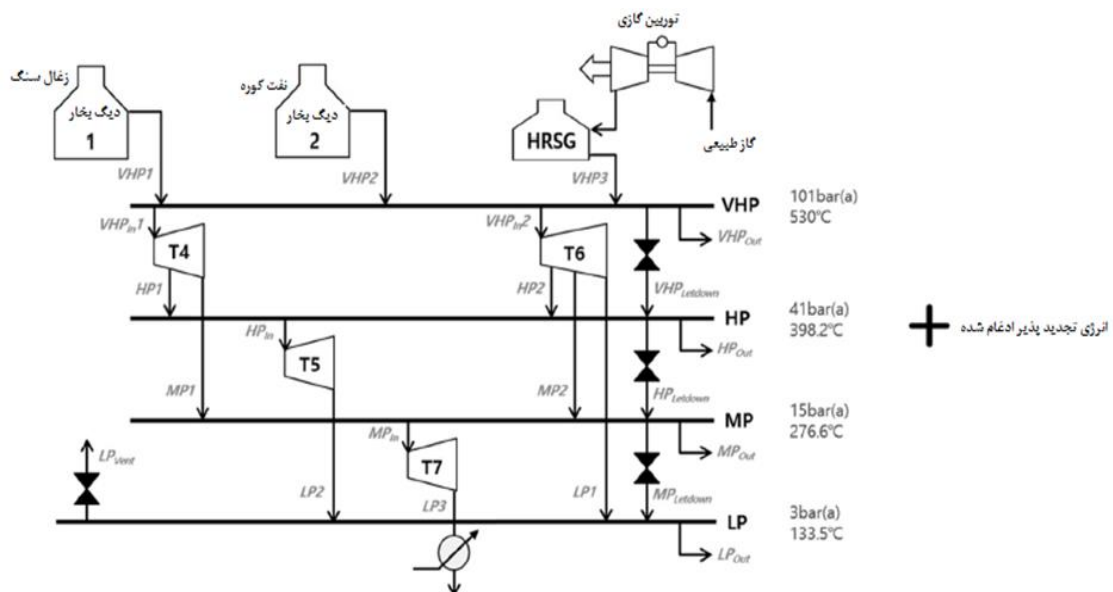
در مقایسه با روش‌های طراحی شهودی که از گراف استفاده کرده‌اند، ما یک چارچوب ریاضی را تشکیل می‌دهیم و سپس از آن در یک محیط کامپیوتری برای طراحی و بهینه‌سازی سیستم تأسیسات قدرت سایت‌های صنعتی، استفاده می‌کنیم. علاوه بر این، روش طراحی مبتنی بر بهینه‌سازی نیز می‌تواند برای تحلیل سیستماتیک عدم قطعیت مرتبط با تصمیمات عملیاتی در سیستم‌های تأسیسات قدرت، مفید باشند. ما هنوز نمی‌دانیم که تغییرات در هزینه انرژی تجدید پذیر در سناریوهای مختلف مالیات کربن چگونه سیستم‌های قدرت مبتنی بر سوخت فسیلی را تحت تأثیر قرار می‌دهند. ما در این مقاله از طریق مطالعات موردی تلاش می‌کنیم درک خوبی از تأثیرات تکنولوژیکی-اقتصادی تغییرات در قیمت انرژی تجدید پذیر و مالیات کربن بر روی سیستم‌های قدرت سایت صنعتی پیدا کنیم.

اما مهم‌ترین ابتکار روش‌شناختی مطالعه ما این بود که سیستم‌های قدرت سایت صنعتی با در نظر گرفتن خصوصیات غیرخطی موجود در فرایند تولید بخار و توان الکتریکی و همچنین برهمکنش‌های داخلی در سطح سیستم، مدل بندی و بهینه‌سازی شده‌اند. بیشتر مطالعات قبلی در زمینه بهینه‌سازی سیستم‌های قدرت معمولاً مبتنی بر مدل‌های خطی ساده‌سازی شده از بخار یا مولدهای توان الکتریکی در سیستم‌های قدرت هستند. در نتیجه، بهینه‌سازی سیستم‌های قدرت در سایت صنعتی معمولاً با کمک ابزار حل‌کننده بهینه‌سازی قطعی انجام می‌شود که در آن درجه بالایی از ساده‌سازی در مدل ریاضی اعمال می‌شود. از سوی دیگر، استفاده از شبیه‌سازی‌های فرایندی در نظر گرفته شد تا اینکه پیچیدگی‌های طراحی و ویژگی‌های غیرخطی برای مدل بندی سیستم‌های قدرت، تطبیق داده شوند. با کمک این ابزارها می‌توان محاسبات عددی را به صورت مطمئن و دقیق انجام داد.

در این مطالعه چارچوب بهینه‌سازی در داخل محیط شبیه‌سازی یونی سیم (UNISIM@) ساخته شده است که در آن تعادل‌های غیرخطی انرژی به طور دقیق با کمک خصوصیات ترمودینامیک، مدل بندی و شبیه‌سازی می‌شوند. فرایند بهینه‌سازی با کمک یک ابزار حل‌کننده داخلی در دسترس در چارچوب شبیه‌سازی یونی سیم (UNISIM@) انجام خواهد شد. در طول بهینه‌سازی برهمکنش بین واحدهای تولید، توزیع و بهره‌برداری بخار به طور دقیق در نظر گرفته خواهد شد. همچنین چارچوب بهینه‌سازی به شکلی ساخته می‌شود که بده بستان اقتصادی بین هزینه‌های تولید انرژی و مخارج خرید انرژی‌های تجدید پذیر تحت سیاست مالیات کربن، در نظر گرفته شوند.

۲. مدل بندی و شبیه‌سازی سیستم‌های قدرت در زمینه یکپارچه‌سازی انرژی تجدید پذیر

سیستم قدرت کار ما مبتنی بر مقاله آقای واربانوف (Varbanov) و همکاران او است که در آن زغال سنگ، نفت کوره و گاز طبیعی برای تولید بخار و توان الکتریکی سوزانده می‌شوند. دلیل انتخاب سیستم واربانوف این بود که در سیستم قدرت آن‌ها سه نوع سوخت فسیلی با ضرایب انتشار کربن متفاوت، مصرف می‌شوند. این سیستم گزینش شده به ما اجازه می‌دهد که به طور مؤثر یکپارچه‌سازی انرژی تجدید پذیر برای سیستم‌های قدرت صنعتی را ارزیابی کنیم. سیستم قدرت شامل دو دیگ بخار و یک توربین گازی ادغام شده با یک مولد بخار بازیافت حرارت (HRSC) است که برای تولید کردن بخار فشار بسیار بالا (VHP) و تأمین ۶۸ مگاوات توان الکتریکی مورد نیاز در سایت صنعتی، مورد استفاده قرار می‌گیرند. چهار هدر بخار در دسترس هستند. بخار فشار بسیار بالا (VHP) با سطح فشار ۱۰۱ بار (Bar) از سیستم آب تغذیه دیگ بخار (BFW) تولید شده است که در داخل آن یک دیگ زغال سنگی و همچنین یک دیگ نفت کوره وجود دارد. این سیستم در شکل زیر به نمایش گذاشته شده است. فرض می‌شود که فشار بخار پایین (LP) بعد از منبسط شدن در داخل توربین در فشار ۰.۵ بار (Bar) منقبض خواهد شد و در نهایت میعان بخار به داخل سیستم BFW بازگردانده می‌شود. مدل بندی فرایندی سیستم‌های قدرت در محیط یونی سیم (UNISIM@) اجرا شده‌اند.



شکل ۱ - نمونه مبنای یک سیستم قدرت در سایت‌های صنعتی



اگرچه توربین‌های بخار برای تولید کردن توان الکتریکی یا گرداندن ماشین‌های دوار مورد استفاده قرار می‌گیرند، نمونه مبنای ارائه شده در این مقاله بدون در نظر گرفتن یک گزینه درایور، ساده‌سازی شده است. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌کنید، سیستم قدرت شامل چهار توربین بخار است که برای تولید توان الکتریکی استفاده می‌شوند. T4 و T6 توربین‌های توزیع‌کننده‌ای هستند که جریان‌های بخار فشار بالا (HP)، فشار متوسط (MP) و فشار پایین (LP) به ترتیب از آن‌ها استخراج می‌شوند. T5 و T7 توربین‌های متعارف پس فشار هستند. توربین‌های پس فشار دارای یک جریان تغذیه بخار و یک اگزوز (خروجی هستند). برای شبیه‌سازی چندین توربین توزیع‌کننده در سیستم قدرت، این سیستم پیچیده به مجموعه‌ای از توربین‌های پس فشار بین جریان‌های بخار VHP (فشار بسیار بالا)، HP (فشار بالا) و LP (فشار پایین) تقسیم‌بندی شده است که برای تخمین زدن تولید توان الکتریکی مورد استفاده قرار می‌گیرند [2]. توربین‌های بخار در این سیستم با کمک ابزار معادله حالت (ASME EOS) در شبیه‌سازی یونی سیم (UNISIM@)، مدل بندی می‌شوند. در مطالعه ما فرض می‌شود که توربین گازی از سوخت گاز طبیعی استفاده می‌کند که در مقایسه با فرایند توربین بخار مزیت مهمی از لحاظ سازگار بودن با محیط زیست دارد. با پیروی کردن از نمونه مطالعه B31A که در گزارش آزمایشگاه ملی فناوری انرژی توصیف شده است، می‌توانیم هر سیستم توربین گازی را بر اساس یک آرایش شفت (محور گرداننده) و استفاده از یک توربین و یک کمپرسور، مدل‌سازی کنیم. تولید بخار در مولدهای بخار باز یافت حرارتی (HRSG) صرفاً به منظور مدل بندی کردن جریان بخار فشار بسیار بالا (VHP) در نظر گرفته می‌شود، اگرچه می‌توان چندین سطح از بخار را تولید کرد. سیستم توربین گازی با استفاده از بسته‌بندی طراحی ترمودینامیک پنگ رابینسون در شبیه‌سازی یونی سیم (UNISIM@)، شبیه‌سازی شده است و بیشتر شرایط عملیاتی استفاده شده برای مدل بندی فرایندی شامل شرایط ورود جریان گاز طبیعی و هوا به داخل سیستم توربین گازی هستند که در گزارش آزمایشگاه ملی فناوری انرژی در سال ۲۰۱۵ به آن‌ها اشاره شده است. هزینه تولید برای انرژی الکتریکی تجدید پذیر وابستگی زیادی به تکنولوژی استفاده شده دارد. روند هزینه انرژی‌های تجدید پذیر در مقایسه با سوخت‌های فسیلی نوسانات زیادی نشان می‌دهد، زیرا اقتصاد این حوزه وابستگی زیادی به سیاست‌گذاری‌ها و عوامل محیطی دارند. در حال حاضر فناوری‌های موجود برای استفاده از منابع انرژی تجدید پذیر به پتانسیل کامل خود نرسیده‌اند و پیش‌بینی می‌شود که قیمت آن‌ها در آینده کاهش پیدا کند. بنا براین، ما در چارچوب بهینه‌سازی فرایندی ابتدا هزینه ثابت برق تجدید پذیر را به عنوان یک سناریوی مبنای استفاده می‌کنیم. سپس در ادامه هزینه واحد انرژی تجدید پذیر از طریق تحلیل حساسیت بین -10 درصد تا +10 درصد تغییر پیدا می‌کند. هزینه مبنای برای انرژی تجدید پذیر برابر با ۶۷ دلار در هر مگاوات ساعت در نظر گرفته می‌شود. این رقم معادل با میانگین قیمت خرید انرژی‌های سلول سوختی، خورشیدی، بادی، هیدرو، زیستی و دریایی است که در دسامبر سال ۲۰۲۰ توسط اداره سیستم اطلاعات آمار قدرت کره جنوبی منتشر شده‌اند.

۳. بهینه‌سازی فرایند سیستم‌های قدرت سایت صنعتی

در ادامه چارچوب در نظر گرفته شده برای بهینه‌سازی عملیاتی سیستم‌های قدرت را مطابق با سیستم توصیف شده در شکل ۱، تشکیل می‌دهیم. تابع هدف به صورت زیر توصیف می‌شود:

$$f_{fuel1,min} = C_C + C_{FO} + C_{NG} + C_P + C_W \quad \text{تابع هدف (1)}$$



در این معادله CC به صورت زیر تعریف می شود:

$$C_C = \frac{m_c(H_{VHP} - H_{BFW})}{\eta_c NHV_c} \quad (2)$$

$$C_{FO} = P_{FO} \frac{m_{FO}(H_{VHP} - H_{BFW})}{\eta_{FO} NHV_{FO}} \quad (3)$$

$$C_{NG} = P_{NG} m_{NG} \quad (4)$$

$$C_P = P_P W_P \quad (5)$$

$$C_W = P_W Q_{cond} \quad (6)$$

همان طور که در معادله (۱) مشاهده می کنید، چارچوب بهینه سازی به صورتی فرمول بندی شده است که هزینه عملیاتی کل بر مبنای مصرف سوخت، حداقل شود. تابع هدف شامل عبارت هایی برای هزینه سوخت ها، آب خنک کننده و همچنین عبارتی برای ارزیابی تاثیر اقتصادی مربوط به واردات یا صادرات توان الکتریکی به شبکه تاسیسات قدرت است. با توجه به آنکه باید چندین منبع انرژی و سوخت مختلف به طور هم زمان در نظر گرفته شوند و تعادل های قدرت و بخار پیچیده ای برای مدل بندی کردن سیستم های تاسیسات قدرت وجود دارند، در نهایت مسئله بهینه سازی ما به مقدار زیادی غیر خطی خواهد بود. در نتیجه، فرایند بهینه سازی با کمک یک حل کننده غیر خطی مربوط به یک روش ترکیبی موجود در طراحی شبیه ساز یونی سیم (*UNISIM*)، اجرا خواهد شد. روش ترکیبی استفاده شده در مطالعه ما مبتنی بر رویکرد ترتیبی برای بهینه سازی است. در رویکرد ترتیبی بهینه سازی ابتدا از روش باکس (*BOX*) به منظور پیدا کردن یک راه حل نزدیک به نقطه بهینه تحت تکرار همگرایی خیلی ضعیف استفاده می شود و سپس برای پیدا کردن راه حل نهایی از روش بهینه سازی با تکنیک برنامه نویسی درجه دوم دنباله ای (*SQP*) بهره خواهیم گرفت. معادله های (۷) تا (۱۷) نشان دهنده تعادل جمعی مربوط به سیستم قدرت هستند. معادله های (۱۸) تا (۲۱) نیز تعادل های انرژی مرتبط با هر توربین بخار را توصیف میکنند. جدول ۱ محدودیت های در نظر گرفته شده بار بهینه سازی را نمایش میدهد. مدل بهینه سازی با تابع هدف توصیف شده در معادله (۱) با کمک محدودیت های برابری در معادله های (۷) تا (۲۱) ساخته میشود. محدودیت های نابرابری در جدول بعدی نمایش داده شده اند.

$$VHP - VHP_{Out} - HP_{Out} - MP_{Out} - LP_{Out} - LP3 = 0 \quad (7)$$

$$VHP1 + VHP2 + VHP3 - VHP = 0 \quad (8)$$

$$VHP - VHP_{in1} - VHP_{in2} - VHP_{Out} - VHP_{letdown} = 0 \quad (9)$$



$$VHP_{in1} - HP1 - MP1 = 0 \quad (10)$$

$$VHP_{in2} - HP2 - MP2 - LP1 = 0 \quad (11)$$

$$HP1 + HP2 + VHP_{letdown} - HP = 0 \quad (12)$$

$$HP - HP_{in} - HP_{out} - HP_{letdown} = 0 \quad (13)$$

$$MP1 + MP2 + HP_{letdown} - MP = 0 \quad (14)$$

$$MP - MP_{in} - MP_{out} - MP_{letdown} = 0 \quad (15)$$

$$LP1 + LP2 + LP3 + MP_{letdown} - LP = 0 \quad (16)$$

$$LP - LP3 - LP_{out} - LP_{vent} = 0 \quad (17)$$

$$VHP_{in1}(H_{VHP_{in1}}) - HP1(H_{HP1}) - MP1(H_{MP1}) - Q_{T4} = 0 \quad (18)$$

$$HP_{in}(H_{HP_{in}}) - LP2(H_{LP2}) - Q_{T5} = 0 \quad (19)$$

$$VHP_{in2}(H_{VHP_{in2}}) - HP2(H_{HP2}) - MP2(H_{MP2}) - LP1(H_{LP1}) - Q_{T6} = 0 \quad (20)$$

$$MP_{in}(H_{MP_{in}}) - LP3(H_{LP3}) - Q_{T7} = 0 \quad (21)$$

جدول ۱: محدودیت های نامساوی برای بهینه سازی

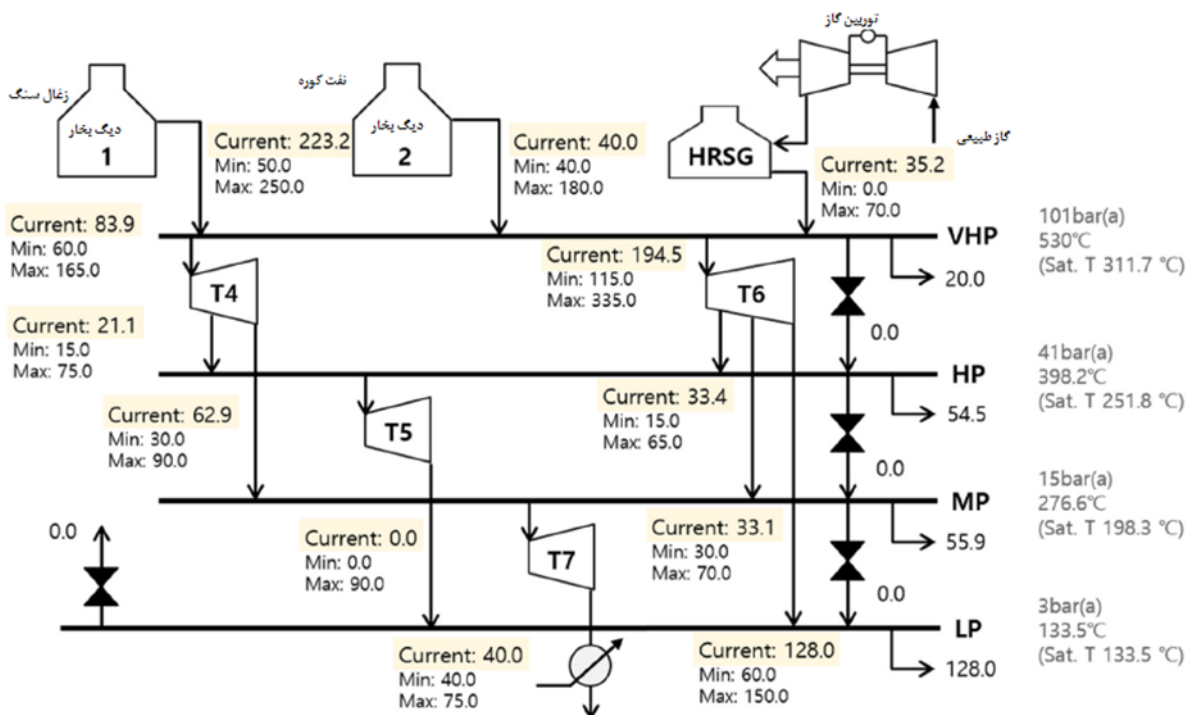
متغیرها	محدودیت ها
تقاضای توان سایت صنعتی	حداقل تقاضای توان برای سایت ۶۸ مگاوات است
HP1	حداقل نرخ جریان بخار 15 تن در ساعت
MP2	حداقل جریان بخار ۳۰ تن در ساعت
LP2, VHP _{letdown} , HP _{letdown} , MP _{letdown} , LP _{vent}	نرخ جریان بخار نمیتواند منفی باشد

۴. مطالعه موردی

در ادامه مدل بهینه سازی تایید شده در بخش قبل برای مطالعه موردی اجرا خواهد شد که در آن چهار هدف مختلف در نظر گرفته شده اند. در مورد ۱ هدف ما مینیمم کردن هزینه کلی سوخت است که تابع هدف آن توسط معادله (۱) توصیف می شود. در مورد ۲ بهینه سازی در کنار ارزیابی تاثیر انتشارات گاز دی اکسید کربن انجام میشود. در مورد ۳ ادغام کردن انرژی تجدیدپذیر با سیستم های قدرت در نظر گرفته شده است. در مورد ۴ سرمایه گذاری سرمایه ای به طور همزمان با هزینه سوخت در نظر گرفته شده است.

مورد ۴-۱: بهینه سازی OPEX (مخارجی عملیاتی) بر اساس هزینه سوخت

در اولین مطالعه موردی برای بهینه سازی یک سیستم قدرت قصد داریم هزینه عملیاتی مبتنی بر سوخت های فسیلی را مینیمم سازی کنیم. در مطالعه موردی ۱ بر خلاف نمونه اعتبارسنجی فرایند بهینه سازی بدون مشخص کردن توان تولید شده در توربین گازی انجام خواهد شد. نتایج مربوط به بهینه سازی بر اساس تابع هدف معادله (۱) در شکل ۲ ارائه شده اند.



شکل ۲: نتایج بهینه سازی برای مورد ۱



مورد ۴-۲: بهینه سازی OPEX با در نظر گرفتن انتشارات CO2

احتراق سوخت های فسیلی در دیگ های بخار و توربین گاز منجر به انتشار گاز دی اکسید کربن میشود و این گاز گلخانه ای موجب گرم شدن کره زمین خواهد شد. در مقایسه با مورد ۱ که در آن فقط هزینه سوخت در تابع هدف در نظر گرفته میشود، برای مورد ۲ مالیات انتشار دی اکسید کربن مطابق با معادله (۲۲) به تابع هدف افزوده می شود. نتایج شبیه سازی در شکل بعدی نمایش داده شده اند.

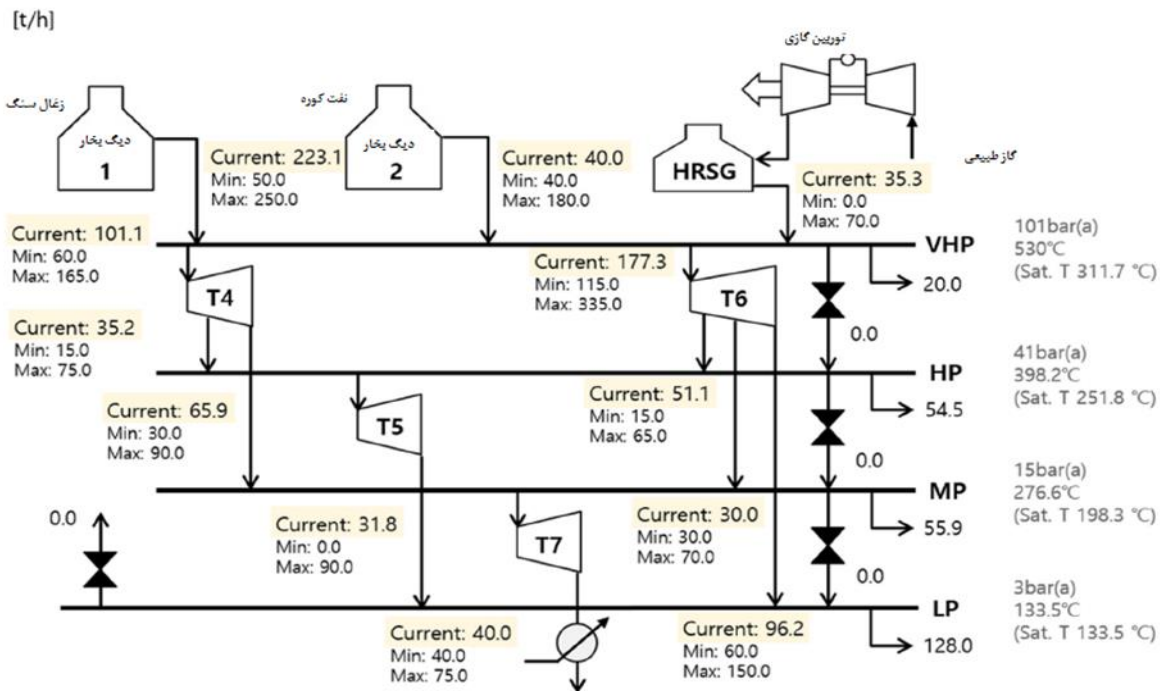
$$f_{min} = f_{fuel1,min} + f_{CO2\ emission,min} \quad (22)$$

$$f_{CO2\ emission,min} = T_{CO2}(E_C + E_{FO} + E_{NG}) \quad (23)$$

$$E_C = cm_C NHV_C \frac{m_C(H_{VHP} - H_{BFW})}{\eta_C NHV_C} \quad (24)$$

$$E_{FO} = cm_{FO} NHV_{FO} \frac{m_{FO}(H_{VHP} - H_{BFW})}{\eta_{FO} NHV_{FO}} \quad (25)$$

$$E_{NG} = cm_{NG} NHV_{NG} m_{NG} \quad (24)$$



شکل ۳: نتایج بهینه سازی برای مورد ۲

مورد ۳-۴: بهینه سازی OPEX تحت یکپارچه سازی انرژی الکتریکی تجدیدپذیر

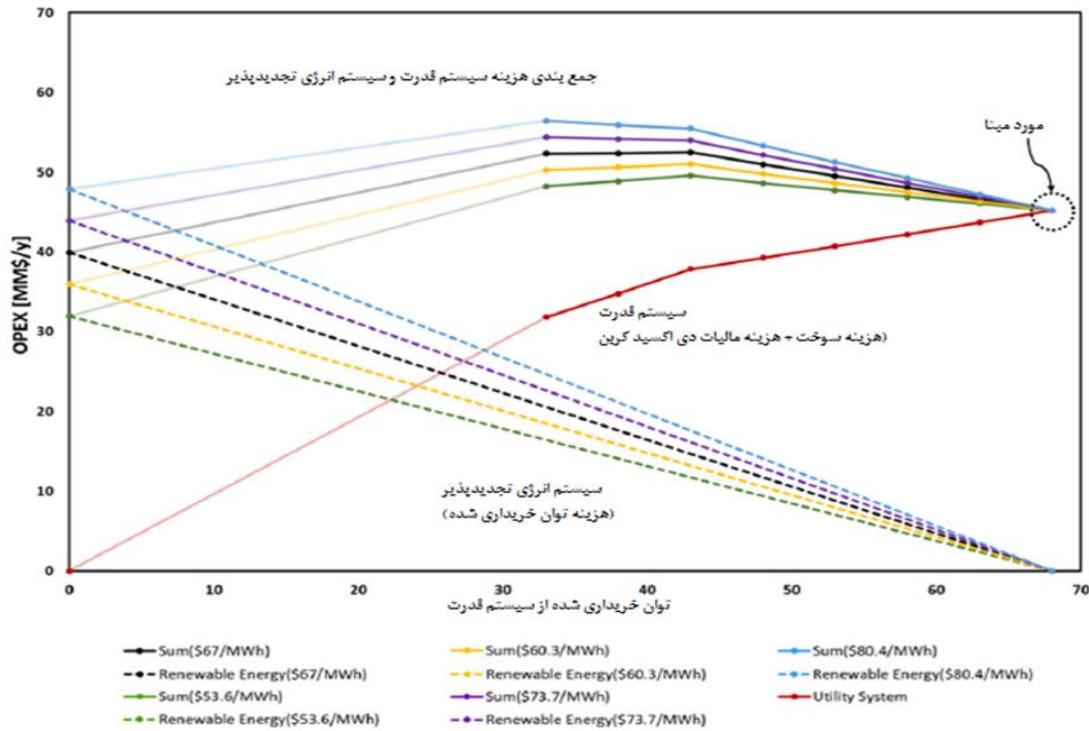
مورد ۳. در این بخش قصد داریم تاثیر اقتصادی بر روی هزینه عملیاتی و طراحی سیستم های قدرت را در صورت تامین بخشی از تقاضای توان برق در سایت صنعتی توسط انرژی تجدیدپذیر، مورد بررسی قرار دهیم. تابع هدف در نظر گرفته شده برای مورد ۳ در معادله (۲۷) توصیف میشود.

$$f_{min} = f_{fuel2,min} + f_{CO2\ emission,min} \quad (27)$$

$$f_{fuel2,min} = C_C + C_{FO} + C_{NG} + C_R + C_W \quad (28)$$

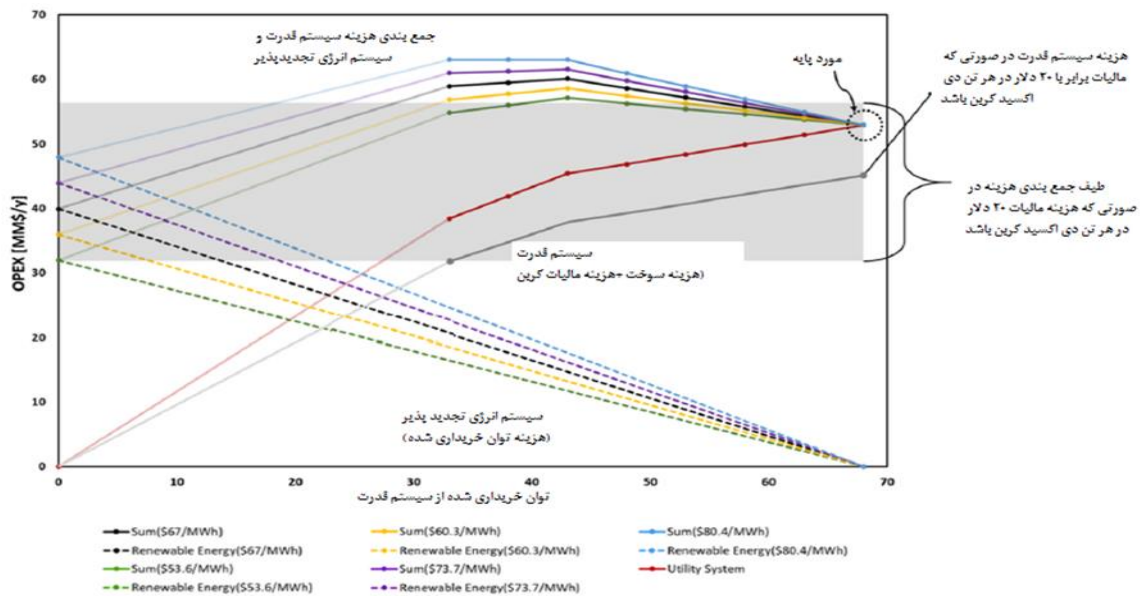
$$C_R = P_R W_P \quad (29)$$

نتایج بهینه سازی و تحلیل حساسیت در شکل زیر به نمایش گذاشته شده اند. در این شکل محور X نشان دهنده مقدار توان الکتریکی تولید شده توسط سوخت های فسیلی در سیستم قدرت و محور Y نشان دهنده هزینه عملیاتی است. در این شکل مورد مبنا با یک دایره خط چین نشان داده شده است که معادل با نتیجه بهینه بدون در نظر گرفتن واردات انرژی تجدیدپذیر خواهد بود.



(sum=مجموع؛ renewable energy=انرژی تجدیدپذیر؛ utility system=سیستم قدرت)

(a) هزینه عملیاتی در صورتی که مالیات انتشار دی اکسید کربن برابر با ۲۰ دلار در هر تن دی اکسید کربن باشد





مجموع: $\text{sum} =$

انرژی تجدیدپذیر: $\text{renewable energy} =$

(سیستم قدرت) $\text{utility system} =$

(b) هزینه عملیاتی در صورتی که مالیات انتشار دی اکسید کربن برابر با ۳۰ دلار در هر تن دی اکسید کربن باشد

شکل ۴: نتایج تحلیل حساسیت برای مورد ۳

مورد ۴-۴: در نظر گرفتن هزینه‌های عملیاتی و سرمایه‌ای برای بهینه‌سازی

در موارد ۱ تا ۳ صرفاً هزینه عملیاتی در نظر گرفته شده بودند، اما در مطالعه موردی ۴ ارزیابی اقتصادی بعد از اضافه کردن هزینه سرمایه‌ای سیستم قدرت به تابع هدف، انجام خواهد شد. با توجه به آنکه ما فرض میکنیم انرژی تجدیدپذیر از منابع خارجی خریداری میشوند، تنها هزینه سرمایه‌ای برای سیستم قدرت مبتنی بر سوخت فسیلی ارزیابی خواهد شد. در این مطالعه ارزیابی هزینه سرمایه بر اساس هزینه خالص نصب (BEC) برای تجهیزات فرایند انجام میشود که مبتنی بر روش مقیاس‌گذاری چند پارامتری یون (Yun) و همکارانش است

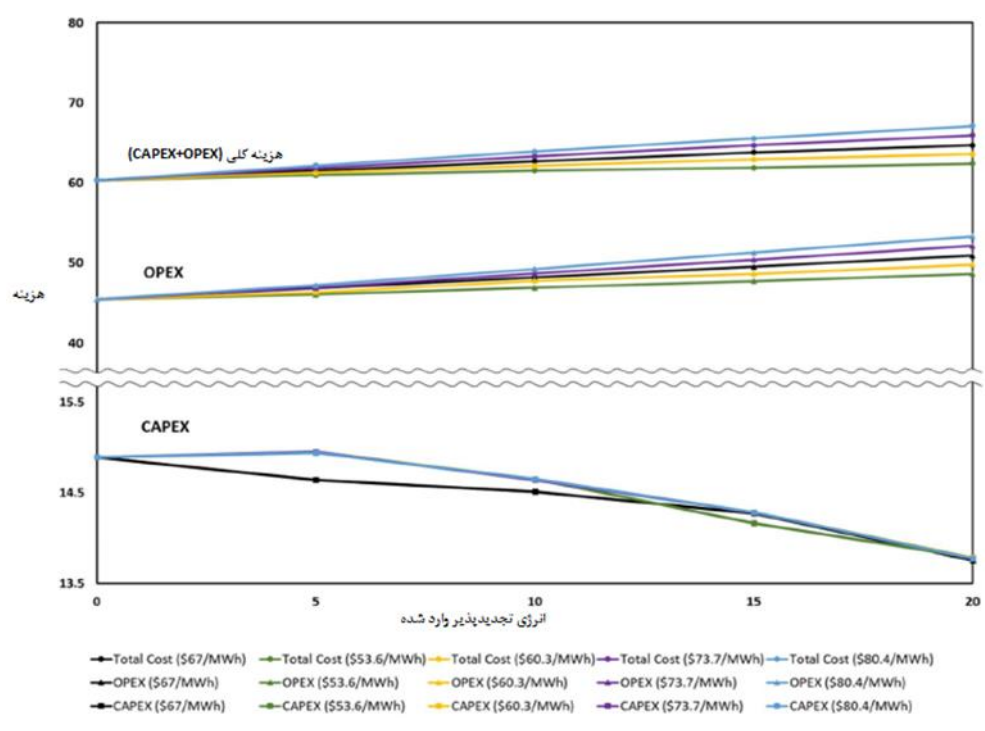
$$f_{min} = f_{fuel2,min} + f_{CO2\ emission,min} + f_{BEC,min} \quad (30)$$

$$f_{BEC,min} = \sum_i SC_i AF_i \quad (31)$$

$$SC = RC_i \left(\frac{SP_i}{RP_i} \right)^{EXP} \quad (32)$$

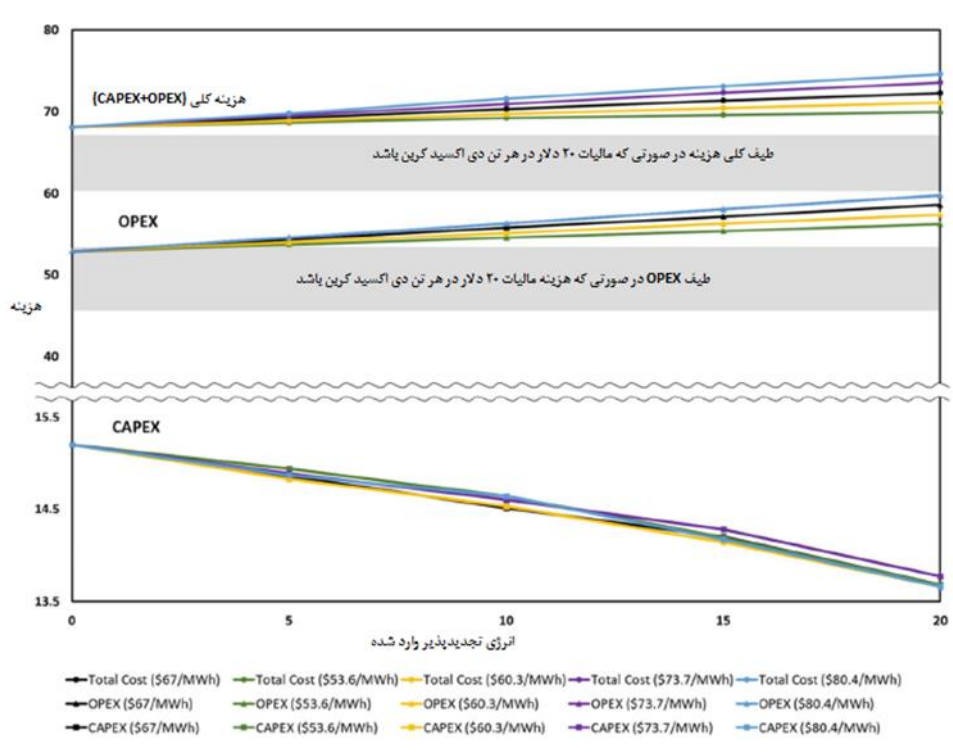
$$AF = \frac{IR(1+IR)^n}{(1+IR)^n - 1} \quad (33)$$

نتایج بهینه‌سازی مربوط به مورد ۴ در شکل زیر نمایش داده شده‌اند. در شکل ۵(a) تغییرات در هزینه عملیاتی، هزینه سرمایه‌ای و هزینه کلی را تحت شرایطی که مالیات کربن برابر با ۲۰ دلار در هر تن دی اکسید کربن باشد، مشاهده می‌کنید. در این مطالعه مقدار انرژی تجدیدپذیر وارد شده تغییر می‌کند و هزینه در طیف ۵۳.۶ دلار در هر مگاوات ساعت تا ۸۰.۴ دلار در هر مگاوات ساعت، قرار می‌گیرد. زمانی که انرژی تجدیدپذیر وارد شده از صفر مگاوات به ۲۰ مگاوات میرسد، دیگر نیازی به انرژی الکتریکی تولید شده توسط توربین‌های گازی و توربین بخار وجود نخواهد داشت و در نتیجه هزینه عملیاتی مرتبط با مصارف سوخت و انتشار دی اکسید کربن مینیمم میشود. به همین خاطر هرچه قدر انرژی تجدیدپذیر بیشتری وارد کنیم، مصرف سوخت کمتر خواهد شد. اما با توجه به بده بستان اقتصادی که بین کاهش در مخارج سرمایه‌ای (CAPEX) و افزایش در مخارج عملیاتی (OPEX) وجود دارد، درجه تغییرات در هزینه کلی در مقایسه با موارد دیگر نسبتاً کوچک خواهد بود.



CAPEX= (هزینه سرمایه ای) OPEX= (هزینه عملیاتی) هزینه کلی= (total cost)

(a) هزینه کلی در صورتی که مالیات کربن برابر ۲۰ دلار در هر تن دی اکسید کربن باشد.



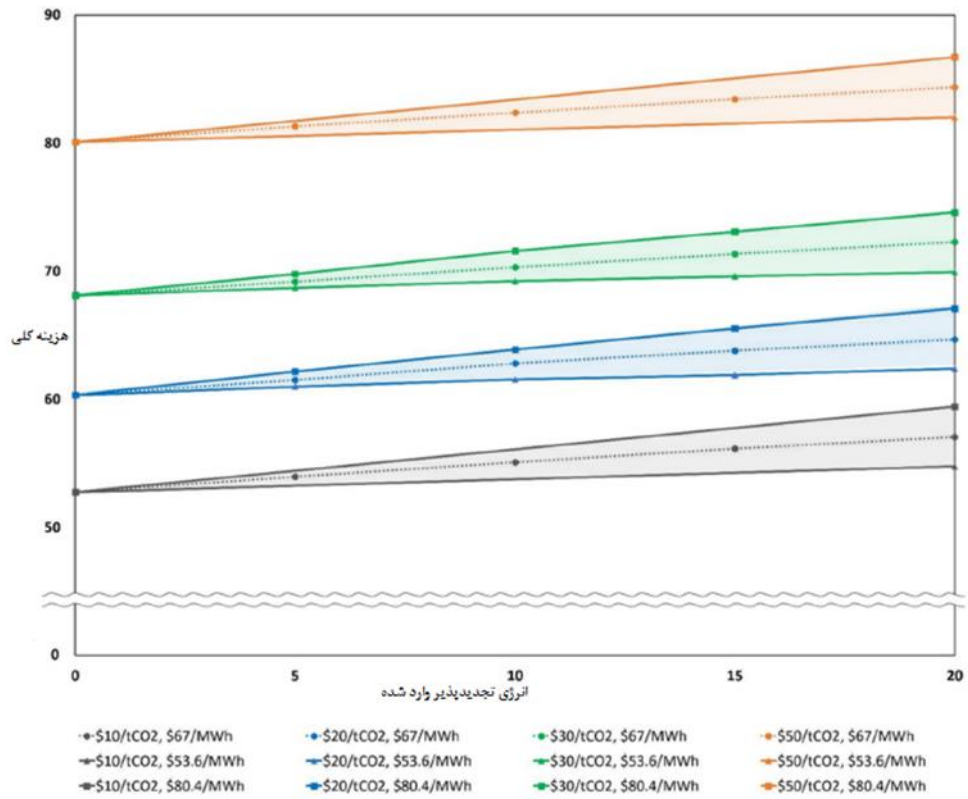


هزینه کلی؛ (total cost)

هزینه عملیاتی؛ (OPEX)

هزینه سرمایه‌ای؛ (CAPEX)

(b) هزینه کلی در صورتی که مالیات کربن برابر ۳۰ دلار در هر تن دی‌اکسید کربن باشد.



(C) حساسیت هزینه کلی نسبت به مقادیر مالیات مختلف برای دی‌اکسید کربن

شکل ۵. نتایج تحلیل حساسیت برای مورد ۴



۵. نتیجه گیری

در این مطالعه بر روی بررسی یکپارچه سازی انرژی های تجدیدپذیر در سیستم های قدرت متعارف تمرکز می کنیم. تاثیر زیست محیطی سیستم های قدرت با در نظر گرفتن مالیات انتشار دی اکسید کربن تفسیر میشوند و سپس در قالب شاخص های اقتصادی همچون هزینه عملیاتی و هزینه سرمایه ای، بیان خواهند شد. در راستای مطالعه کردن تاثیر تکنولوژیکی-اقتصادی ادغام انرژی تجدیدپذیر در سیستم های قدرت تلاش می کنیم که ابتدا یک مدل فرایندی از سیستم های قدرت با کمک شبیه ساز نرم افزار تشکیل دهیم. در ادامه این مدل به منظور پیدا کردن اقتصادی ترین شرایط عملیاتی تحت محدودیت های طراحی، بهینه سازی خواهد شد. چارچوب بهینه سازی توسعه یافته در این مطالعه برای چهار مطالعه موردی مختلف به کار گرفته شد و به کمک آنها بینش های مفهومی در مورد تاثیرات یکپارچه سازی انرژی تجدیدپذیر در سیستم های قدرت سایت صنعتی به دست آوردیم.

۶. مراجع

- [1] Li S, Limei G, Smith R. Site utility system optimization with operation adjustment under uncertainty. *Appl Energy* 2017;186:450–6.
- [2] Smith R. Chemical process design and integration. In: John Wiley & Sons, Ltd. second ed. Chichester: England; 2016.
- [3] Lee P, Liew P, Walmsley T, Alwi S, Klemes J. Total site heat and power integration for locally integrated energy sectors. *Energy* 2020;204:117959.
- [4] Wang B, Klemes J, Varbanov P, Shahzad K, Kabli M. Total site heat integration benefiting from geothermal energy for heating and cooling implementations. *J Environ Manag* 2021;290:112596.
- [5] Li S, Doyle S, Smith R. Heat recovery and power targeting in utility systems. *Energy* 2015;84:196–206.
- [6] Varbanov P, Doyle S, Smith R. Modeling and optimization of utility systems. *ICHEME* 2004;82(A5):561–78.
- [7] Varbanov P, Perry S, Makwana Y, Zhu X, Smith R. Top-level analysis of site utility systems. *ICHEME* 2004;82(A6):784–95.
- [8] Li Z, Du W, Zhao L, Qian F. Modeling and optimization of a steam system in a chemical plant containing multiple direct drive steam turbines. *Ind Eng Chem Res* 2014;53(27):11021–32.



- [9] Tang Q, Zhang W, Hu J, He C, Chen Q, Zhang B. Design optimization of industrial energy systems with energy consumption relaxation mod
- [10] Zhao L, You F. A data-driven approach for industrial utility systems optimization under uncertainty. *Energy* 2019;182:559–69.
- [11] Karthik N, Parvathy A, Arul R, Padmanathan K. Multi-objective optimal power flow using a new heuristic optimization algorithm with the incorporation of renewable energy sources. *International Journal of Energy and Environmental Engineering* 2021;12:641–78.
- [12] Lee H, Guo K, Souza L, Lee J. Application of digital twin to monitor and optimize utility process. 2021 21st International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS) 2021:376–81.
- [13] IEA. Net zero by. A roadmap for the global energy sector. 2021.
- [14] C2ES. Carbon tax basics. <https://www.c2es.org/content/carbon-tax-basics/>. [Accessed 8 April 2022].
- [15] The world bank. State and trends of carbon pricing. 2021. p. 2021.
- [16] Chen L, Zhao J, Zhao J, Li F, Yang Y. A supply chain model based on data-driven demand uncertainty under the influence of carbon tax policy. *Mobile Inf Syst* 2022; 2022:10.
- [17] Choi C, Kim C-I. The 4th industrial revolution, smart cities, and sustainable urban regeneration: a perspective study. *Journal of Environmental Policy and Administration* 2017;25:61–91.
- [18] Ebrahimi S, Kinnon M, Brouwer J. California end-use electrification impacts on carbon neutrality and clean air. *Appl Energy* 2018;213:435–49.
- [19] Brodin M, Fahnestock J, Rootzen J. Industry’s electrification and role in the future electricity system: a strategic innovation agenda 2017.
- [20] IRENA. An electrified future. <https://www.irena.org/DigitalArticles/2019/Apr/How-To-Transform-Energy-System-And-Reduce-Carbon-Emissions>. [Accessed 7 June 2022].
- [21] IRENA. Renewable power generation costs in. 2020. p. 2021.
- [22] REN21. Renewables 2021 global status report. 2021.
- [23] DOE/NETL. Cost and performance baseline for fossil energy plants volume 1a: bituminous coal (PC) and natural gas to electricity, revision 3. U.S. Department of energy. National Energy Technology Laboratory 2015.



[24] EPSIS. Electricity Market – Unit Cost by Fuel. <http://epsis.kpx.or.kr/epsisnew/selectEkmaUpsBftChart.do?menuId=040701&locale=eng>. [Accessed 22 December 2020].

[25] Honeywell. UNISIM. Design – simulation basis reference guide. London, U.K. 2010.

[26] PA. Industrial boilers – fuel switching methods, costs, and environmental impacts. U.S: Environmental Protection Agency; 1978.

[27] Yun S, Oh S-Y, Kim, J-K Techno-economic assessment of absorption-based CO2 capture process based on novel solvent for coal-fired power plant. Appl Energy 2020;268:114933.

[28] eia. How much carbon dioxide is produced when different fuels are burned – pounds of CO2 emitted per million British thermal units (Btu) of energy for various fuels. <https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.php?id=73&t=11>. [Accessed 18 December 2020].

[29] KRX Market Data System. KRX300. <http://data.krx.co.kr/contents/MDC/MAIN/main/index.cmd?locale=en> (accessed January 22, 2021).