حل پخش بار بهینه اقتصادی و آلودگی نیروگاه های مبتنی بر سیستم جذب و ذخیره کربن با استفاده از نرم افزار بهینه سازی GAMS

اسماعیل ولی پور[۱]، صیاد نوجوان[۲]
[۱]دانشکده فنی و حرفه‌ای شماره یک استان آذربایجان شرقی، *Esmaeilvalipour3@gmail.com*
[۲]دانشکده مهندسی برق دانشگاه بناب، *Sayyad.nojavan@bonabu.ac.ir*

چکیده - تولید کربن حاصل از مصرف سوخت‌های فسیلی در نیروگاه‌ها به عنوان یک خطر بزرگ زیست محیطی تلقی می‌شود. برای کنترل آلودگی روش‌های مختلفی وجود دارد که بهترین روش استفاده از سیستم جذب و ذخیره کربن (CCS) است. در این مقاله به منظور بهینه‌سازی عملکرد انعطاف‌پذیر در نیروگاه‌های مجهز به سیستم جذب و ذخیره کربن برای پخش بار بهینه، فرمولاسیون بهبود یافته‌ای ارائه شده است. تمام فرمول‌بندی‌های ارائه شده برای بهینه‌سازی روی شبکه استاندارد بین‌المللی IEEE با ۳۰ باس، آنالیز شده و تاثیر قیمت‌های مختلف کربن بر سیستم پخش بار بهینه مورد بررسی قرار گرفته است. در نتیجه تاثیر جدا کردن آلودگی کربن از نیروگاه‌ها در این مقاله به خوبی قابل مشاهده است.

کلید واژه- محیط زیست؛ سیستم جذب و ذخیره کربن؛ بهینه سازی پخش بار؛ عملکرد انعطاف‌پذیر؛ قیمت کربن

فهرست علائم واختصارات

P_N	توان خالص خروجی نیروگاه‌های با سیستم جذب کربن
P_G	توان ناخالص خروجی نیروگاه‌های با سیستم جذب کربن
P_{CP}	توان کل مصرفی سیستم جذب کربن
P_{BP}	توان مصرفی پایه سیستم جذب کربن
P_{OP}	توان بهره‌برداری سیستم جذب کربن
w_{CC}	مقدار انرژی مصرفی واحد CCS برای جذب کربن
E_C	آلودگی کربن جذب شده
E_G	آلودگی کربن ناخالص
E_N	آلودگی کربن خالص
e_E	شدت آلودگی
γ_C	نرخ فشرده سازی و جذب کربن
α_C	نرخ جذب دستگاه مکنده سیستم جذب کربن
N_{CP}	تعداد نیروگاه‌های تجهیز شده به سیستم جذب کربن
N_{NP}	تعداد نیروگاه‌های بدون سیستم جذب کربن
d	شاخص نیروگاه‌های بدون سیستم جذب کربن
k	شاخص نیروگاه‌های تجهیز شده به سیستم جذب کربن
P_d	توان برنامه ریزی شده نیروگاه بدون سیستم جذب کربن
C_F	هزینه سوخت نیروگاه‌های بدون سیستم جذب کربن
C_E	هزینه آلودگی نیروگاه‌های بدون سیستم جذب کربن
C_{Fc}	هزینه سوخت نیروگاه‌های تجهیز شده به سیستم جذب کربن
C_{EC}	هزینه آلودگی نیروگاه‌های تجهیز شده به سیستم جذب کربن
b_i, c_i, d_i, e_i	ضرایب هزینه سوخت
f_i, g_i, h_i	ضرایب مصرف سوخت
ef	عامل آلودگی
CP	قیمت کربن
P_D	کل تقاضای سیستم
P_L	تلفات توان
P^{max}	حداکثر توان تولیدی
P^{min}	حداقل توان تولیدی

۱- مقدمه

یکی از عوامل گرم شدن کره زمین ناشی از افزایش گاز کربن دی اکسید CCS می‌باشد که در کل جهان به صورت ویژه مورد توجه واقع شده و از این رو اقدامات موثری برای کاهش آلودگی نیروگاه‌های سنتی و توسعه اقتصاد کم کربن انجام گرفته است [۱]. یک راه حل موثر ومفید برای کاهش آلودگی ناشی از نیروگاه‌ها استفاده از سیستم جذب و ذخیره کربن (CCS) می‌باشد [۲]. پس از نصب این سیستم در نیروگاه‌های فسیلی و جذب کربن تولید شده، به وسیله خطوط انتقال به محل ذخیره‌سازی منتقل می‌شود که در فرآیندهای دیگر قابل استفاده می‌باشد. در این فرآیند دی‌اکسیدکربن پس از فیلتر شدن توسط سیستم CCS جذب شده و مانع از ورود آن به داخل جو

می‌شود که نهایتاً آلودگی ناشی از کربن تا حد بسیار زیادی کاهش پیدا می‌کند [۳].

یک نیروگاه با سیستم جذب و ذخیره کربن به دلیل اینکه مصرف انرژی سیستم بیشتر است باید عملکرد انعطاف پذیر داشته باشد، ابتدا سیستم باید قابلیت جذب و ذخیره سازی کربن را به طور یکنواخت در یک محدوده عملیاتی گسترش دهد [۴]، و همچنین کربن تولید شده توسط نیروگاه باید به طور موثر به وسیله سیستم CCS جذب شود. برای دستیابی به این اهداف از یک مدل پیش‌بینی چندگانه استفاده می‌شود [۵]. در کنار تمامی مزایایی که سیستم CCS دارد، این سیستم معایبی نیز دارد که از جمله آنها بالا بودن قیمت آن است. هزینه این سیستم به ازای هر تن کربن دی‌اکسید برای کاربردهای نیروگاهی ۸۰ الی ۱۰۰ دلار تخمین زده می‌شود، همچنین توانی که خود سیستم مصرف می کند توان تولیدی نیروگاه را کاهش می دهد. توان تولید شده در نیروگاه به دو بخش توان خالص و توان ناخالص تقسیم بندی می‌شود، پس از تولید توان خالص در نیروگاه، قسمتی از آن در سیستم جذب و ذخیره کربن استفاده می شود و توان ناخالص به شبکه انتقال می‌یابد. بخاطر اینکه میزان مصرف انرژی سیستم CCS قابل ملاحظه است، راندمان تولیدی نیروگاه بدلیل تغذیه این سیستم کاهش پیدا می‌کند و باید مصرف سیستم از توان تولیدی نیروگاه جدا شود [۶]. برای ایجاد عملکرد انعطاف پذیر تحت اقتصاد کم کربن در سیستم CCS، ازیک مدل ترکیبی از ذخیره‌سازی انرژی باد و سیستم جذب کربن استفاده می‌شود. سیستم ذخیره‌سازی انرژی باد که مبتنی بر ذخیره‌سازی انرژی در باطری است مزایایی به دنبال دارد، اولا سیستم ذخیره‌سازی انرژی باد در بدترین سناریوها قابل تنظیم است و به نیروگاه‌ها معرفی می شود تا یک ساختار ترکیبی از سیستم ذخیره‌سازی باد را تشکیل دهند. سپس مدل ارائه شده پس از تجزیه و تحلیل با سیستم جذب و ذخیره کربن ترکیب می‌شود و برای به حداقل رساندن هزینه‌های کلی و انتشار کربن استفاده می‌شود [۴]. کشور هندوستان که جز کشورهای پرجمعیت جهان است متعهد شده که تا سال ۲۰۳۰، ۳۰ الی ۳۵ درصد آلودگی ناشی از نیروگاه‌های خود را با تجهیز کردن آنها به سیستم CCS کاهش دهد [۷]. کشور ویتنام در نظر دارد تا ۲۰ سال آینده ده‌ها واحد نیروگاهی خود را که زغال سوز هستند با هدف کاهش آلودگی کربن دی‌اکسید به سیستم CCS تجهیز کند [۵].

به منظور بهبود عملکرد نیروگاه‌ها در جهت کاهش آلودگی کربن و یکپارچه‌سازی آنها برای بهینه‌سازی سیستم پخش بار راه‌حل‌هایی در این مقاله ارائه شده است. یکی از راه‌حل‌های ارائه شده استفاده از سیستم CCS می‌باشد که تا حدی مشکل انتشار کربن را برطرف می‌کند. در بهینه‌سازی بخش بار، آلودگی کربن باید از نیروگاه جدا گردد تا عمل بهینه سازی به طور قابل قبول انجام شود، لذا برای بهینه سازی سیستم استفاده از مدل‌های ترکیبی درصد عملکرد سیستم CCS را به طور چشم‌گیری افزایش می‌دهد، تمام فرمولاسیون‌هایی که در چهارچوب عملکرد انعطاف‌پذیر در این مقاله ارائه شده است تاثیر ایزولاسیون را به خوبی نشان می‌دهند.

مقاله ارائه شده به ترتیب زیر سازماندهی شده است. معادلات اصلاح شده در قسمت دوم به همراه تابع هدف برای بهینه‌سازی پخش بار مورد بررسی قرار گرفته است. در قسمت سوم اطلاعات مربوط به شبیه‌سازی مسئله تجزیه و تحلیل گردیده و تاثیر قیمت کربن بر روی ۶ نیروگاه با توانهای متفاوت به همراه نمودار آنها مشخص شده است که هر کدام از نمودارها اثر قیمت کربن بر روی پارامترهای مختلف را نشان می‌دهد. نتیجه‌گیری برای داشتن درک کلی از مقاله در قسمت چهارم ارائه شده است.

۱-۱- مدل عملکرد انعطاف‌پذیر *CCPP*

در این قسمت فرمولاسیون های مختلف از جمله فرمول‌های توان نیروگاه، آلودگی‌ها و روابط آنها به طور کامل ارائه و همچنین عملکرد انعطاف‌پذیر سیستم جذب و ذخیره کربن بررسی می‌شود.

۱-۲- معادلات ریاضی

برای مشخص کردن تاثیر تصمیم های بهره‌برداری برای بهینه‌سازی پخش‌بار، یک تابع هدف تعریف می‌شود. در واقع تابع هدف یک چهارچوب کلی در قالب کاهش کل هزینه های عملیاتی مشخص می‌کند که در معادله (۱) بیان شده است. معادله (۱) شامل هزینه های بهره برداری و آلودگی نیروگاههای با و بدون سیستم ذخیره سازی کربن است. معادلات (۲) و (۳) به ترتیب هزینه بهره برداری و آلودگی نیروگاههای بدون سیستم ذخیره ساز کربن را نشان می دهد. همچنین، هزینه های بهره برداری و آلودگی نیروگاههای با سیستم ذخیره ساز کربن به ترتیب در معادلات (۴) و (۵) نشان داده شده است.

$$OC = \left\{ \sum_{d=1}^{N_{NP}} [C_{Fd} + C_{Ed}] + \sum_{k=1}^{N_{CP}} [C_{FC_k} + C_{EC_k}] \right\} \quad (۱)$$

$$C_{Fd}(P_d) = a_d + b_d P_d + c_d P_{d^2} + \left| e_d \times sin(f_d(P_d - P_{d^{min}})) \right| \quad (۲)$$

$$C_{Ed}(P_d) = CP \times ef_d(f_d + g_d P_d + h_d P_{d^2}) \quad (۳)$$

$$C_{FC_k}(P_d) = a_K + b_K P_{G_k} + c_k P_{G_k}^2 + \left|e_k \times sin(f_k(P_{G_k} - P_{G_k}^{min}))\right| \quad (۴)$$

$$C_{EC_k}(E_{N_k}) = CP \times E_{N_k} \quad (۵)$$

معادله (۶) مجموع توان خالص خروجی نیروگاه‌های با سیستم جذب کربن و توان برنامه ریزی شده نیروگاه بدون سیستم جذب کربن می‌باشد که وقتی کل تقاضای سیستم و تلفات توان را از آنها کسر می‌کنیم حاصل صفر می‌شود.

$$\left\{\sum_{d=1}^{N_{NP}} P_d\right\} + \left\{\sum_{k=1}^{N_{CP}} P_{N_k}\right\} - P_D - P_L = 0 \quad (۶)$$

معادلات (۷) و (۸) به ترتیب مقدار حداکثر و حداقل توان ناخالص خروجی نیروگاه‌های با سیستم جذب و ذخیره کربن و توان برنامه ریزی شده نیروگاه بدون سیستم جذب کربن را نشان می‌دهند.

$$P_{G_k}^{min} \le P_{G_k} \le P_{G_k}^{max} \quad (۷)$$

$$P_d^{min} \le P_d \le P_d^{max} \quad (۸)$$

توانی که بر روی شبکه قرار می‌گیرد توان خالص تولید شده در نیروگاه نیست. توان تولید شده در نیروگاه تقسیم شده و قسمتی برای تغذیه سیستم جذب و ذخیره کربن استفاده می‌شود این توان شبکه طبق معادله (۹) از کسر توان کل مصرفی سیستم جذب کربن از توان ناخالص خروجی نیروگاه‌های با سیستم جذب کربن بدست می‌آید.

$$P_{N_k} = P_{G_k} - P_{CP_k} \quad (۹)$$

معادله (۱۰) بدست آوردن توان مصرفی سیستم جذب کربن از مجموع توان مصرفی پایه و توان بهره‌برداری سیستم را نشان می‌دهد.

$$P_{CP_k} = P_{BP_k} + P_{OP_k} \quad (۱۰)$$

آلودگی جذب شده توسط سیستم جذب و ذخیره کربن دارای ضریب مقدار انرژی است که سیستم CCS در هنگام کارکرد مصرف می‌کند. مصرف انرژی سیستم نسبت به میزان عملکرد آن افزایش یا کاهش پیدا می‌کند، در نتیجه طبق معادله (۱۱) مقدار توان بهره‌برداری سیستم از ضرب مقدار کربن جذب شده با مقدار توان مصرف شده توسط سیستم *CCS* حاصل می‌شود.

$$P_{OP_k} = w_{CC_k} \times E_{C_k} \quad (۱۱)$$

مقدار کربن تولید شده به وسیله نیروگاه توسط سیستم CCS جذب می‌شود اما جذب کربن به طور صددرصد انجام نمی‌شود، این مقدار جذب نشده که آلودگی ناخالص نام دارد در معادله (۱۲) مقدار آلودگی کربن ناخالص از ضرب توان ناخالص خروجی نیروگاه در شدت آلودگی کربن بدست می‌آید.

$$E_G = e_{E_k} \times P_{G_k} \quad (۱۲)$$

نیروگاه‌هایی که مجهز به سیستم جذب و ذخیره کربن هستند، در جذب آلودگی کربن پارامترهایی از قبیل نرخ فشرده‌سازی کربن و نرخ جذب دستگاه مکنده سیستم CCS نقش دارند، اگر این پارامترها را در آلودگی کربن ناخالص ضرب بکنیم طبق معادله (۱۳) مقدار کربن جذب شده بدست می‌آید.

$$E_{C_k} = E_{G_k} \times \gamma_{C_k} \times \alpha_{C_k} \quad (۱۳)$$

مقدار آلودگی خالص همان مقدار گاز کربن تولید شده در نیروگاه می‌باشد که از کسر مقدار کربن جذب شده از مقدار آلودگی کربن ناخالص طبق معادله زیر حاصل می‌شود.

$$E_{N_k} = E_G - E_C \quad (۱۴)$$

۱-۳- ناحیه بهره برداری

سیستم جذب و ذخیره کربن در پست احتراق نصب گردیده و کربن تولید شده را جذب می‌کند. در این مقاله یک پست احتراق مبتنی بر سیستم CCS در نظر گرفته شده است. اگر بخواهیم یک پست احتراق را مورد بررسی قرار دهیم، این پست باید قابلیت تجهیز شدن و رسیدن به یک حد بالاتر برای عملکردهای انعطاف‌پذیر را داشته باشد. نصب مخازن ذخیره حلال مونواتانول‌آمین و سیستم انتقال آن، امکان کنترل جریان حلال در خط انتقال بین *Scrubber* و *Stripper* را به طور موثر در پست احتراق فراهم می کند، تمام پارامترهای مربوط به سیستم جذب و ذخیره کربن در جدول۱ ارائه شده است.

جدول ۱مدل سیستم جذب و ذخیره کربن

نماد	پارامترهای سیستم جذب و ذخیره کربن	مقایر	منابع
	نوع حلال	۷ مونواتانول‌آمین	
	مکانیزم فعال برای عملکرد انعطاف‌پذیر	مخازن ذخیره‌سازی حلال	
w_{cc}	مقدار انرژی مصرفی واحد CCS	۰/۲۶۹	
P_{BP}	توان مصرفی پایه سیستم CCS	$۵ \times P_G^{max}$	۵
α_C	نرخ جذب دستگاه مکنده	٪۹۰	۶
γ_C^{max}	نرخ فشرده سازی و جذب کربن	۱۲۰	۱۰
e_E	شدت آلودگی کربن	۰/۷۴	۱۱

۱-۴- مطالعات عددی

در این بخش اعداد و نتایج حاصل از شبیه‌سازی مدل بهینه‌سازی گسترده سیستم پخش‌بار نشان داده شده است. در مدل شبیه‌سازی شده، تصمیم‌های بهره‌برداری برای نیروگاه‌های CCPP به منظور

کاهش کل هزینه‌های بهره‌برداری اتخاذ می‌گردد. نتایج آزمایش‌های انجام شده با استفاده از نرم‌افزار MATLAB رسم شده است.

۱-۵- مطالعات موردی

در این مقاله برای بدست آوردن فرمولاسیون سیستم توسعه داده شده با CCS، از یک شبکه استاندارد بین‌المللی بنام IEEE که دارای ۳۰ باس می‌باشد استفاده شده است.

جدول ۲: ضرایب آلودگی و هزینه در نیروگاهها

نیروگاه‌ها	اول	دوم	سوم	چهارم	پنجم	ششم
نوع نیروگاه	زغالی	زغالی	گازی	گازی	نفتی	زغالی
حداقل توان	۲۰	۲۰	۱۱۰	۱۱۰	۴۰	۳۰۰
حداکثر توان	۱۱۰	۱۰۰	۵۲۰	۵۰۰	۲۰۰	۶۰۰
ضرایب سوخت						
a	۲۰۰۰	۲۵۰۰	۹۲۳/۴	۹۵۰	۱۲۴/۸	۶۰۰۰
b	۱۰	۱۵	۱۸	۲۰	۲۳/۴	۹
c(10^3)	۲	۲/۵۰	۳/۱۵	۳/۲۰	۳/۴۳	۱/۸۰
d	۲۰۰	۳۰۰	۱۵۰	۱۰۰	۸۰	۴۰۰
e	۰/۰۸۴	۰/۰۳۵	۰/۰۶۳	۰/۰۸۴	۰/۰۹۸	۰/۰۴۲
ضرایب آلودگی						
f	۴۰	۵۰	۲۴۶۲/۴	۲۵۰۰	۱/۲۴۸	۰/۱۲
g	۰/۲	۰/۳	۴۸	۵۰	۰/۲۳۴	۰/۱۲
h (10^{-6})	۴۰	۵۰	۸۴۰۰	۹۰۰۰	۳۴/۳	۲۴

این سیستم آزمایشی دارای ۶ نیروگاه بوده و هر نیروگاه توان حداقل و توان حداکثر دارد، ضرایب آلودگی و سوخت و همچنین مقدارآلودگی سوخت‌های نیروگاه‌ها با جزئیات کامل در جدول شماره ۲ و جدول شماره ۳ اشاره شده است [۹]. در این سیستم، نیروگاهی که حداکثر ظرفیت تولید را دارد فرض شده که مجهز به سیستم جذب و ذخیره کربن است. در حالت کلی نیروگاهی که دارای حداکثر ظرفیت تولید باشد مجهز به سیستم CCS در نظر گرفته می‌شود [۱۱].

جدول ۳: عوامل آلودگی واحد های تولید حرارتی

عوامل آلودگی کربن	زغال (kg/kg)	گاز (t/m^2)	نفت (kg/kg)
مقدار آلودگی کربن	۳/۱۶۰۴	۰/۰۰۱۸۴	۲/۸۵۲۳

۱-۶- تاثیر قیمت کربن

در این آزمایش تاثیر هزینه‌های مختلف کربن بر روی عملکرد بهینه سیستم مورد بررسی قرار گرفته است. قیمت‌ها از ۱ دلار بر تن کربن شروع شده و با گام ۰/۵ تا سقف ۱۰ دلار بر تن کربن افزایش پیدا می‌کنند. هدف از افزایش قیمت‌ها با گام ۰/۵ دلار بر کربن بدست آوردن تاثیر دقیق قیمتها بر روی عملکرد سیستم می‌باشد که در جدول۴ قابل مشاهده است.

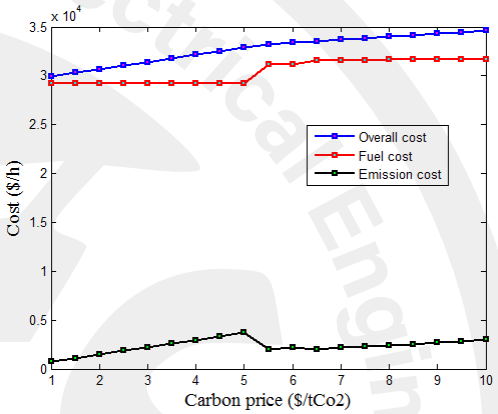
همانطور که در جدول۴ نشان داده شده است تغییر رنج قیمت کربن بر عملکرد نیروگاه‌های دوم و پنجم تاثیر آنچنانی نداشته است، اما اثر آن بر روی نیروگاه‌های اول، سوم، چهارم و ششم قابل توجه می‌باشد. با افزایش قیمت کربن، تولید بهینه در نیروگاه‌های اول، سوم وچهارم با شیب ملایم افزایش پیدا می‌کند، در رنج قیمت ۵ الی ۵/۵ دلار بر تن کربن، برنامه بهینه‌سازی در نیروگاه سوم حدود ۱۴ درصد نسبت به مقدار قبلی خود افزایش یافته، که این نتیجه از ادغام کردن توان بهره‌برداری سیستم با واحد CCPP حاصل می‌شود. طبق بررسی-های انجام شده در مورد تغییر و تحول برنامه بهینه‌سازی نیروگاه چهارم، نتیج نشان می‌دهد که این نیروگاه بهتر است از لحاظ فنی و اقتصادی در حد پایین عمل کند [۱۰]، در نتیجه می‌توان نیروگاه سوم را بعنوان یک واحد ذخیره برای ایجاد تعادل در تقاضای بار استفاده کرد. و در نهایت افزایش قیمت کربن در نیروگاه ششم باعث کاهش خروجی تولید بهینه می‌شود.

جدول ۴: عملکرد بهینه سیستم در قیمت‌های مختلف کربن

قیمت کربن	G1 (زغال)	G2 (زغال)	G3 (گازی)	G4 (گازی)	G5 (نفتی)	G6 (CCPP)	هزینه کلی
۱	۹۵	۱۰۰	۲۵۹	۱۱۰	۴۰	۵۹۶	۱۲۰۰
۱/۵	۹۵	۱۰۰	۲۵۹	۱۱۰	۴۰	۵۹۶	۱۲۰۰
۲	۹۵	۱۰۰	۲۵۹	۱۱۰	۴۰	۵۹۶	۱۲۰۰
۲/۵	۹۵	۱۰۰	۲۵۹	۱۱۰	۴۰	۵۹۶	۱۲۰۰
۳	۹۵	۱۰۰	۲۵۹	۱۱۰	۴۰	۵۹۶	۱۲۰۰
۳/۵	۹۵	۱۰۰	۲۵۹	۱۱۰	۴۰	۵۹۶	۱۲۰۰
۴	۹۵	۱۰۰	۲۵۹	۱۱۰	۴۰	۵۹۶	۱۲۰۰
۴/۵	۹۵	۱۰۰	۲۵۹	۱۱۰	۴۰	۵۹۶	۱۲۰۰
۵	۹۵	۱۰۰	۲۶۰	۱۱۰	۴۰	۵۹۵	۱۲۰۰
۵/۵	۹۵	۱۰۰	۲۶۰	۱۱۰	۴۰	۵۹۵	۱۲۰۰
۶	۹۵	۱۰۰	۲۶۰	۱۱۰	۴۰	۵۹۵	۱۲۰۰
۶/۵	۱۱۰	۱۰۰	۳۵۹	۱۱۰	۴۰	۴۸۱	۱۲۰۰
۷	۱۱۰	۱۰۰	۳۵۹	۱۱۰	۴۰	۴۸۱	۱۲۰۰

۷/۵	۱۱۰	۱۰۰	۳۵۹	۱۱۴	۴۰	۴۷۷	۱۲۰۰
۸	۱۱۰	۱۰۰	۳۵۹	۱۱۴	۴۰	۴۷۷	۱۲۰۰
۸/۵	۱۱۰	۱۰۰	۳۵۹	۱۱۴	۴۰	۴۷۷	۱۲۰۰
۹	۱۱۰	۱۰۰	۳۵۹	۱۱۴	۴۰	۴۷۷	۱۲۰۰
۹/۵	۱۱۰	۱۰۰	۳۵۹	۱۱۴	۴۰	۴۷۷	۱۲۰۰
۱۰	۱۱۰	۱۰۰	۳۵۹	۱۱۴	۴۰	۴۷۷	۱۲۰۰

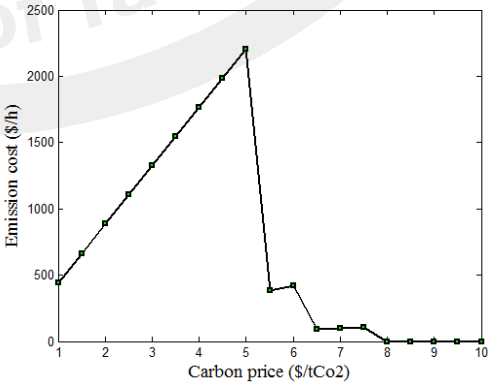
در نمودار شکل۱ تاثیر تغییرات قیمت کربن بر هزینه‌های آلودگی، سوخت و هزینه کلی نشان داده شده است.



شکل ۱: تاثیر قیمت¬ کربن بر روی هزینه‌های مختلف

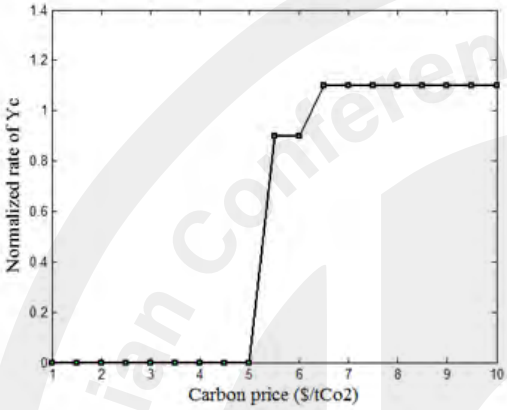
طبق نمودار در رنج‌های اولیه (۱ الی ۶ دلار بر تن کربن)، افزایش هزینه آلودگی تاثیر چندانی بر هزینه سوخت ندارد و شیب هزینه سوخت ثابت است، اما در رنج قیمت ۶ الی ۷ دلار بر تن کربن، افزایش یافتن هزینه سوخت به طور مستقیم بر هزینه آلودگی تاثیر داشته و باعث کاهش چشم‌گیر در هزینه آلودگی می‌شود، بنابراین با افزایش یافتن قیمت کربن، هزینه بهره‌برداری سیستم بهینه نیز افزایش پیدا می‌کند.

آلودگی کربن در شکل۲ تا مقدار ۵ دلار بر تن کربن با شیب ملایم حالت صعودی دارد اما نرخ سیستم فشرده‌سازی در شکل۳ ثابت بوده و تغییر نمی‌کند.



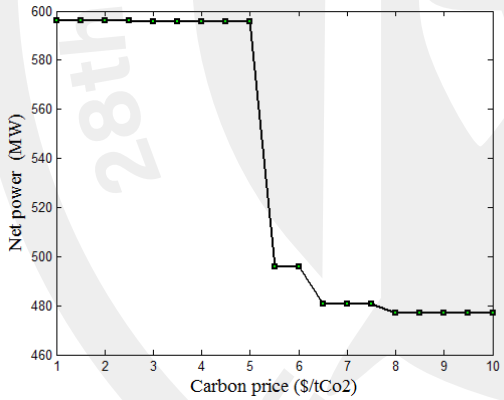
شکل ۲: نمودار بهینه سازی هزینه آلودگی در قیمت¬های مختلف

در رنج ۵ الی ۵/۵ دلار بر کربن هزینه آلودگی به شدت کاهش یافته ولی در نرخ سیستم فشرده‌سازی برعکس هزینه آلودگی به شدت افزایش پیدا می‌کند. عملکرد سیستم جذب و ذخیره کربن در رنج قیمت‌های ۷ الی ۸ دلار بر کربن از نظر اقتصادی قابل توجیه است، اما وقتی رنج قیمت از ۸ دلار بر کربن بیشتر می‌شود باعث افزایش یافتن عملکرد سیستم CCS در واحدهای نیروگاهی می‌شود.

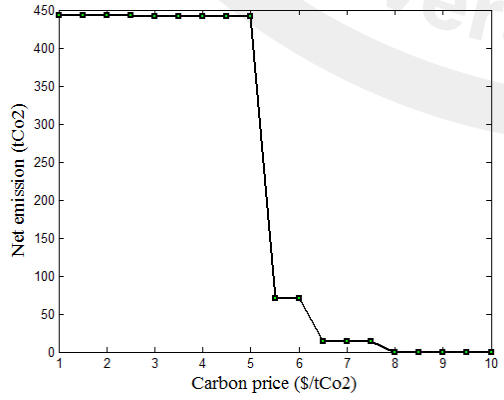


شکل ۳: نمودار نرخ فشرده سازی و جذب کربن در هزینه¬های مختلف

شکل۴ و شکل۵ به ترتیب بهینه سازی توان خالص خروجی و بهینه سازی آلودگی خالص خروجی نیروگاه را نشان می‌دهند.



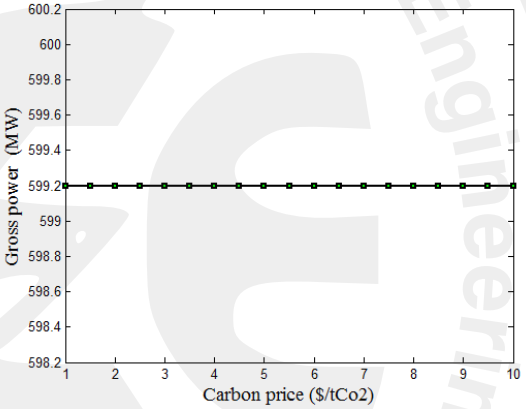
شکل ۴: نمودار بهینه سازی توان خالص خروجی در هزینه¬های مختلف



شکل ۵: نمودار بهینه سازی آلودگی خالص در هزینه¬های مختلف

در رنج قیمت‌های اولیه (۱ الی ۵/۵ دلار بر تن کربن) علارغم افزایش یافتن هزینه عملیاتی کلی در هر دو نمودار تغییرات آنچنانی در عملکرد سیستم بهینه مشاهده نمی‌شود، اما وقتی هزینه کربن از ۵/۵ دلار بر کربن افزایش پیدا می‌کند میزان توان خالص خروجی نیروگاه در شکل۴ کاهش یافته و حدود ۴۷۷ مگاوات تولید می‌کند. در نمودار شکل۵ نیز آلودگی خالص کربن کاهش می‌یابد و به صفر میل می‌کند.

نمودار شکل۶ تاثیر هزینه‌های مختلف سیستم، در بهینه‌سازی توان ناخالص خروجی نیروگاه را نشان می‌دهد. توان ناخالص خروجی نیروگاه در هیچ یک از رنج قیمت‌ها تغییر نداشته ونمودار بر روی عدد ثابت حرکت کرده است، لذا توان ناخالصی که در خروجی نیروگاه مشاهد می‌شود حدود ۶۰۰ مگاوات است.



شکل ۶: نمودار بهینه سازی توان ناخالص در هزینه¬های مختلف

۲- نتیجه‌گیری

عملکرد انعطاف‌پذیر پاسخ تقاضا و نیروگاه‌های مجهز به سیستم جذب و ذخیره کربن می‌تواند باعث کاهش آلودگی و بهبود اقتصاد کلی شود. فرمولاسیون‌های قبلی، مساله پخش بار بهینه را برای عملکرد انعطاف‌پذیر حل کرده ولی مساله جدا شدن آلودگی از نیروگاه همچنان باقی بوده است. در نیروگاه‌هایی که مجهز به سیستم CCS هستند می‌توان به راحتی تولید نیروگاه را با جدا کردن آلودگی آن کنترل کرد. یک تابع هدف برای کاهش هزینه‌ی بهره‌برداری به همراه تمام معادلات مربوط به آن ارائه گردید. بعد از اینکه شبیه‌سازی مسئله انجام شد، اثر قیمت کربن بر روی پارامترهای مختلف از جمله هزینه آلودگی کربن، توان خالص و توان ناخالص نیروگاه، نرخ فشرده‌سازی و آلودگی کربن خالص مشخص گردید. افزایش قیمت کربن موجب افزایش یافتن هزینه بهره‌برداری شده و هزینه آلودگی کربن را کاهش می‌دهد. همچنین با افزایش یافتن قیمت کربن نرخ جذب و فشرده-سازی بهبود پیدا می‌کند و باعث کاهش توان خالص خروجی نیروگاه را می‌شود. تاثیر قیمت کربن در کنترل میزان آلودگی خالص کربنی که توان خروجی نیروگاه به شبکه عرضه می‌کند بیشتر بوده و این روند بر توان ناخالص نیروگاه در کل طیف قیمت کربن هیچ تاثیری نداشته است. این راهکار ارائه شده برای ایجاد عملکرد انعطاف‌پذیر، فرصت مناسبی برای جذب سرمایه از بازارهای داخلی و خارجی را فراهم می‌کند.

مراجع

[1] Metz B, Davidson O, De Coninck H, Loos M, Meyer L. IPCC special report on carbon dioxide capture and storage. Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva (Switzerland). Working Group III; 2005 Jul 1.

[2] IEA: ‘Clean energy progress report’ (IEA Publication, Paris, France, 2011); 2011. P. 31-3.

[3] Gibbins J, Chalmers H. Preparing for global rollout: A ‘developed country first demonstration programmer for rapid CCS deployment. Energy Policy. 2008 Feb 1; 36(2):501-7.

[4] Zhang R, Jiang T, Bai L, Li G, Chen H, Li X, Li F. Adjustable robust power dispatch with combined wind-storage system and carbon capture power plants under low-carbon economy. International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2019 Dec 1; 113:772-81.

[5] Wu X, Shen J, Li Y, Wang M, Lawal A. Flexible operation of post-combustion solvent-based carbon capture for coal-fired power plants using multi-model predictive control: A simulation study. Fuel. 2018 May 15; 220:931-41.

[6] Li X, Zhang R, Bai L, Li G, Jiang T, Chen H. Stochastic low-carbon scheduling with carbon capture power plants and coupon-based demand response. Applied energy. 2018 Jan 15; 210:1219-28.

[7] Kumar R, Jilte R, Nikam KC, Ahmadi MH. Status of carbon capture and storage in India’s coal fired power plants: A critical review. Environmental technology & innovation. 2018 Nov 2.

[8] Ha-Duong M, Nguyen-Trinh HA. Two scenarios for carbon capture and storage in Vietnam. Energy Policy. 2017 Nov 1; 110:559-69.

[9] Yao F, Dong ZY, Meng K, Xu Z, Iu HH, Wong KP. Quantum-inspired particle swarm optimization for power system operations considering wind power uncertainty and carbon tax in Australia. IEEE transactions on industrial informatics. 2012 Jul 26; 8(4):880-8.

[10] Zhan J, Wu QH, Guo C, Zhou X. Economic dispatch with non-smooth objectives—part I: local minimum analysis. IEEE Transactions on Power Systems. 2014 Jun 26; 30(2):710-21.

[11] Abellera C, Short C. The costs of CCS and other low-carbon technologies. Global CCS Institute. 2011 Nov; 2.