بررسی تاثیر هم‌زمان سیاست‌های کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و حضور نیروگاه بادی بر سودآوری واحدهای تولیدی و کاهش تولید کربن

مهدی ابراهیمی/دانشگاه صنعتی سجاد، Mahdi.ebrahimi1368@yahoo.com
سمیه حسن‌پور/دانشگاه صنعتی سجاد ، S_hasanpour@sadjad.ac.ir

چکیده

صنعت برق یکی از مهم‌ترین منابع انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌باشد. دو راهکار بسیار مهم برای کاهش گازهای گلخانه‌ای، سیاست‌های اعمالی دولت‌ها و استفاده از منابع انرژی‌های تجدیدپذیر می‌باشد. در این مقاله تاثیر سیاست‌های کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای از جمله:(۱) سهمیه انتشار ثابت؛(۲) خرید و فروش سهمیه انتشار؛(۳) تعهدات قراردادهای دوجانبه، بر سودآوری واحدهای تولیدی مورد بررسی قرار گرفته است. آنچه که این مقاله را از مقالات پیشین در این زمینه متمایز می‌کند حضور نیروگاه بادی به‌همراه چالش عدم قطعیت تولید توان در هر یک از سیاست‌های مذکور می‌باشد. حضور نیروگاه بادی در این سیاست‌ها توسط چندین سناریوی مختلف برای بیان عدم قطعیت تولید توان در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که برای تولید سناریوهای مختلف برای تولید توان از انرژی باد، از تابع احتمال ویبال که مطابقت بسیار مناسب‌تری نسبت به سایر توابع احتمال با داده‌های آماری سرعت باد دارد استفاده شده است. برای مدل‌سازی بازار از مدل کورنات و برای تحلیل رفتار واحدهای تولیدی از روش بازی راهبردی استفاده شده است. صحت و عملکرد روش پیشنهادی در نهایت با استفاده از شبکه ۳۰ باسه IEEE نمایش داده شده است.

واژه‌های کلیدی: بازار برق، خرید و فروش سهمیه انتشار آلودگی، قراردادهای دو جانبه، عدم قطعیت در تولید توان، نیروگاه بادی

۱- مقدمه

مساله تغییرات آب و هوایی از جمله گرم شدن کره زمین امروزه بسیار مورد توجه قرار گرفته است. آلودگی هوا عامل اصلی این افزایش دما است. گازهای گلخانه‌ای سهم به‌سزایی در آلودگی هوا و محیط‌زیست دارند لذا بسیار مهم است که برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای سیاست‌ها و روش‌های مختلفی به‌کار گرفته شود. در میان تمامی طرح‌های به‌کار گرفته شده، کنوانسیون سازمان ملل در رابطه با تغییرات آب و هوا، باهدف برقراری ثبات در تولید گازهای گلخانه‌ای در یک سطح پایدار در سال ۱۹۹۷ پیمانی تحت عنوان پیمان کیوتو را منعقد نمود که در آن کشورهای صنعتی متعهد شدند که ظرف ده سال آینده میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای خود را ۵٪ کاهش دهند و به کشورهای در حال توسعه کمک‌های مالی برای افزایش ضریب نفوذ استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر نظیر انرژی خورشیدی و بادی، اعطا نمایند. امروزه با توسعه این پروتکل سیاست‌های مختلفی برای کاهش گازهای گلخانه‌ای طراحی و در بسیاری از کشورهای جهان مورد استفاده قرار گرفته است.

از جمله این سیاست‌ها می‌توان به :

۱. سازوکار توسعه پاک[۱]
۲. پیاده‌سازی مشترک[۲]
۳. تجارت سهمیه انتشار آلودگی[۳]

اشاره نمود[۱].

در[۲]تاثیر بالقوه سیاست مبادله سهمیه انتشار کربن در بازار برق بیان شده است. تخصیص سهمیه براساس سابقه آلودگی سبب افزایش قیمت بازار برق و قیمت کربن نسبت به تخصیص سهمیه بر

اساس سابقه تولید می‌شود. بنابراین تخصیص سهمیه انتشار آلودگی در کاهش میزان انتشار بسیار مهم است. این تخصیص سهمیه به اهداف کاهش آلودگی و هزینه مکانیزم‌های مختلف تولیدی وابسته است[۳].

برای جلوگیری از افزایش آلودگی ناشی از تولید توان در صنعت برق سیاست‌های گوناگونی توسط دولت‌ها اتخاذ می‌شود. از جمله این سیاست‌ها محدود کردن تولید آلودگی برای یک مدت زمان مشخص برای تمامی واحدها می‌باشد. هم‌چنین به تمامی واحدها و تولیدکنندگان آلودگی متناسب با تولیدشان سهمیه رایگان انتشار آلودگی تخصیص داده می‌شود. این سیاست منجر به کنترل و جلوگیری از افزایش آلودگی ناشی از صنایع از جمله صنعت برق می‌شود[۴].

سهمیه آلودگی می‌تواند منجر به تغییر تصمیم‌گیری‌های تولیدکنندگان برق شود و به‌عنوان یک نتیجه فهرست تولیدی و خروجی آن‌ها را تغییر دهد. از این رو برای سهمیه انتشار محدود باید برنامه در مدار قرار گرفتن واحدها برای یک بازه زمانی متوسط اجرا شود. سهمیه روزانه و یا هفتگی هر واحد را می‌توان به‌وسیله سهمیه سالانه مشخص کرد[۵]. سهمیه نخست انتشار آلودگی (خریدیا فروش) به همراه تغییرات قیمت بازار برق روی عملکرد بازار تاثیرمی‌گذارد. از این رو ترکیب بازار لحظه‌ای و قراردادهای دو جانبه در حضور سهمیه انتشار آلودگی مورد بررسی قرار گرفته است. تولیدکنندگان توان ملزم به پایبندی به قراردادهای دوجانبه بدون نقض انتشار آلودگی بیش‌تر هستند. این امر تاثیر قابل توجهی روی تصمیمات تولیدکنندگان و فهرست برنامه تولیدآن‌ها دارد[۶]. در[۷] از یک نمونه محدود بازی دو سطحی برای نمایش رفتار شرکت‌های تولیدی استفاده شده است. در این مرجع بازی بین شرکت‌کنندگان پی‌درپی و به شکل بازی دو سطحی می‌باشد.

شرکت‌های تولیدی توان در سطح بالایی بازی، در بازار انتشار سهمیه آلودگی شرکت می‌کنند و پس از به دست آوردن راهبردهای مناسب خود در این سطح وارد بازار برق می‌شوند و با توجه به راهبُرد قبلی خود در بازار سهمیه آلودگی، راهبُرد جدیدی را اتخاذ می‌کنند.

مساله پخش بار اقتصادی تحت ۳ سیاست کاهش آلودگی محیط‌زیست (مالیات بر کربن، خرید و فروش سهمیه، سهمیه انتشار آلودگی) مورد بررسی قرار گرفته است. این حل رفتار و پاسخ ژنراتورها را به پیچیدگی‌های موجود در اجرای این سیاست‌ها فراهم می‌کند[۸و۹]. نیروگاه‌های حرارتی با سوخت‌های فسیلی دارای سطح تولید آلودگی‌های متفاوتی هستند که سیاست مربوط به آلودگی خود را براساس تجارت سهمیه یا قیمت کربن در نظر می‌گیرند. تاثیر محدودیت‌های انتشار آلودگی و سیاست خرید و فروش سهمیه انتشار در مرجع[۱۰] مورد بررسی قرار گرفته است. علاوه برسیاست‌های کنترل و کاهش آلودگی، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر نیز نقش مهمی در بازار برق و عملکرد تولیدکنندگان دارد. در بین تمامی انرژی‌های تجدیدپذیر نیروگاه بادی تاثیرپذیری بیش‌تری دارد.

انرژی باد در حال حاضر ارزان‌ترین و پاک‌ترین نوع منبع انرژی در بین منابع تجدیدپذیر است که می‌تواند حجم زیادی از انتشار آلودگی را جابه‌جا کند. مکانیزم حمایت از انرژی‌های تجدیدپذیر باید قادر به پشتیبانی از سرمایه‌گذاری در این بخش باشد. این موضوع با دادن تعرفه‌های تشویقی، گواهی‌های سبز قابل معامله و تخفیف‌های مالیاتی به تولیدکنندگان انرژی‌های تجدیدپذیر انجام شده است. تولیدکنندگان توان‌های پاک می‌توانند برق تولیدی خود را به شبکه بفروشند و از شبکه تعدادی گواهی سبز قابل معامله دریافت کنند. این گواهی‌ها نوعی دارایی مالی هستند که امکان معامله آن‌ها نیز وجود دارد. بنابراین قیمت برای تولیدکنندگان برق برابر با جمع قیمت فروش و گواهی سبز خواهد بود. قیمت کربن می‌تواند جایگزین خوبی برای حمایت از واحدهای بادی باشد. تولیدکنندگان حرارتی برق به قیمت برق واکنش مثبت و به قیمت کربن واکنش منفی نشان می‌دهند. درحالی‌که تولیدکنندگان توان از منابع پاک، واکنش مثبتی به قیمت آلودگی دارند. بنابراین سهم تولیدکنندگان انرژی پاک را می‌توان با صدور گواهی سبز و یا حق انتشار آلودگی افزایش داد[۱۱].

در هند به منظور توسعه سرمایه‌گذاری در بخش انرژی‌های تجدیدپذیر و افزایش این نوع از انرژی‌ها در تولید، سیاست‌های تعهد خرید انرژی تجدیدپذیر و اعطای تعرفه به‌کار گرفته شده است. با توجه به اهداف این طرح درصد خاصی از انرژی‌های تجدیدپذیر در هر یک از ایالت‌ها استفاده می‌شود. گواهی انرژی‌های تجدیدپذیر برای تولیدکنندگان توان پاک صادر می‌شود و ایالت‌هایی که دارای بخش تولیدی انرژی تجدیدپذیر کافی نیستند می‌توانند توان را از تولیدکنندگانی که گواهی انرژی‌های تجدیدپذیر را دارند، خریداری کنند [۱۲و۱۳].

با توجه به تحقیقات و پژوهش‌های انجام شده در سال‌های اخیر در رابطه با سیاست‌های کاهش انتشار آلودگی واحدهای تولیدی و حضور انرژی‌های تجدیدپذیر، حضور نیروگاه بادی در این سیاست‌ها مورد مطالعه بوده است اما عدم قطعیت تولید توان از این انرژی از چالش‌های اساسی و قابل توجهی است که کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. لذا آنچه که در این مقاله مورد بررسی قرار می‌گیرد حضور نیروگاه بادی و عدم قطعیت تولید توان با استفاده از تابع احتمال ویبال که مطابقت بسیار خوبی با داده‌های آماری سرعت دارد، می‌باشد. هم‌چنین در این مقاله تاثیر سیاست‌های مختلف کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در صنعت برق و حضور انرژی‌های تجدیدپذیر بر سودآوری واحدهای تولیدی توان و قیمت بازار برق که کمتر مورد بررسی و تحلیل در زمینه سیاست‌های کاهش انتشار آلودگی قرار گرفته است، با مدل‌سازی کورنات و بازی راهبردی بین شرکت‌کنندگان مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲- فرمول‌بندی مساله

در این مقاله سه سناریوی مختلف کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در صنعت برق از جمله: (۱) سهمیه انتشار ثابت[۴]؛(۲) خرید و فروش سهمیه انتشار[۵]؛(۳) تعهدات قراردادهای دوجانبه[۶]، در نظر گرفته شده است. بازار برق با مدل کورنات پیاده‌سازی شده است. تمامی واحدها برای رسیدن به سود بیشینه خود به‌صورت هم‌زمان در هر یک از سیاست‌ها شرکت می‌کنند و پس از رسیدن به نقطه تعادل، براساس مدل کورنات میزان تولید هر واحد مشخص می‌گردد که میزان تولید تمامی واحدها، قیمت تعادلی بازار برق را معین می‌کند. سهمیه انتشار آلودگی در این مقاله براساس سابقه تولیدی هر واحد تخصیص می‌یابد. حضور نیروگاه بادی به‌صورت یک توان تولیدی با چند سناریوی تولیدی متفاوت به جای یکی از واحدهای حرارتی در هر یک از سیاست‌ها مدل شده است و تاثیر این جایگزینی بر سودآوری سایر واحدها و میزان انتشار آلودگی و قیمت توان در بازار برق دیده شده است. فرمول‌بندی بازار تحت این سه سیاست در زیر آورده شده است:

۲-۱- سهمیه انتشار ثابت

در این سیاست دو رویکرد مختلف در نظر گرفته شده است. ابتدا سهمیه ثابت و محدودی برای انتشار گازهای گلخانه‌ای برای تمامی واحدها در نظر گرفته شده است و در مرحله بعدی به تمامی واحدها مقدار نامحدود سهمیه انتشار آلودگی داده شده است. برای هر یک از دو رویکرد حضور نیروگاه بادی با سناریوهای حاصله از عدم قطعیت در تولید توان در نظر گرفته شده است. در این سیاست تابع سود هر واحد عبارت است از:

$$Max \quad \pi_i = 720\sum_i (PQ_i - C_i(Q_i)) \qquad (۱)$$

مقید به:

$$P = a - b(\sum_i Q_i) \qquad (۲)$$

$$C_i(Q_i) = \alpha_i Q_i + \frac{\beta_i Q_i^2}{2} \qquad (۳)$$

$$Em_i = (\sum_i 24\eta_i Q_i) - \frac{Em\max_i}{30} \qquad (۴)$$

$$Q_i^{\min} \text{ " } Q_i \text{ " } Q_i^{\max} \qquad (۵)$$

$$EmC_i \text{ " } (Em\max_i/30) \qquad (۶)$$

در این مدل π_i سود شرکت i در یک ماه بر حسب دلار، P قیمت توان در بازار برق بر حسب دلار بر مگاوات ساعت، Q_i تولید شرکت iبر حسب مگاوات، C_i هزینه تولید شرکت i بر حسب دلار بر ساعت است. قید (۲) میزان قیمت برق را با توجه به تولید تمامی واحدها تعیین می‌کند و ضرایب تابع قیمت انرژی در بازار برق به ترتیب ۴۵و۰/۰۵ در نظر گرفته شده‌اند. (۴) میزان کمبود سهمیه انتشار آلودگی یا مازاد این سهمیه را که در بازار آلودگی معامله می‌شود، نمایش می‌دهد. $Em\max_i$ سهمیه نخست تخصیص یافته به واحد i را بر حسب تن در یک ماه نشان می‌دهد. قید (۶) محدودیت تولید انتشار آلودگی را برای هر واحد براساس سهمیه ماهانه‌اش نمایش می‌دهد.

۲-۲- خرید و فروش سهمیه انتشار

تحت این سیاست ابتدا براساس سابقه تولید هر یک از واحدهای تولیدی، سهمیه نخست انتشار آلودگی به آن‌ها تخصیص می‌یابد. واحدهای تولیدی در این سیاست می‌توانند برای رسیدن به بیشینه‌ی سود خود تصمیم بگیرند که براساس قیمت بازار برق و قیمت‌های پیشنهادی در بازار آلودگی تولید خود را افزایش دهند و سهمیه اضافی خریداری کنند یا تولید خود را کم کرده و مازاد سهمیه انتشار آلودگی خود را در بازار آلودگی به فروش برسانند. در پایان بازه مطالعاتی باید میزان سهمیه فروخته شده و خریداری شده برابر با کل سهمیه تخصیص یافته اولیه باشد. در این سیاست تابع سود هر واحد عبارت‌است از:

$$Max \quad \pi_i = 720\sum_i (PQ_i - C_i(Q_i)) - 30ES_i \times CPS_i - 30EB_i \times CPB_i \qquad (۷)$$

مقید به قیدهای ۲،۳،۴،۵ و

$$EmC_i - EB_i + ES_i \le (Em\max_i/30) \qquad (۸)$$

که ES_i قیمت پیشنهادی واحد i در بازار کربن برای فروش سهمیه بر حسب دلار بر تن، EB_i قیمت پیشنهادی واحد i در بازار کربن برای خرید سهمیه بر حسب دلار بر تن، CPS_i میزان سهمیه قابل فروش واحدi در یک روز در بازار کربن بر حسب تن و CPB_i میزان سهمیه قابل خرید واحد i در یک روز در بازار کربن بر حسب تن است.

۲-۳- تعهدات قراردادهای دوجانبه

توان تولیدشده توسط هر واحد می‌تواند به عوامل زیادی از جمله قیمت برق، سهمیه انتشار آلودگی و غیره وابسته باشد. در بازار برق واحدهای تولیدی می‌توانند قرارداد دو جانبه نیز برای فروش توان خود منعقد کنند. این قراردادها می‌تواند شامل تمامی توان تولید شده یک واحد و یا بخشی از توان تولید شده آن باشد. در این بخش حضور تعهدات قرارداد دو جانبه به همراه سیاست خرید و فروش سهمیه انتشار که در بخش قبل بیان شده است با یکدیگر ترکیب می‌شوند. یکی از واحدها تمامی توان تولیدی خود را در قرارداد دو جانبه برای بازه یک ماهه به فروش می‌رساند. قیمت برق برای فروش در قرارداد دو جانبه همان قیمت در بازار برق در نظر گرفته شده است.

۲-۴- مدل‌سازی نیروگاه بادی

تابع سود نیروگاه بادی عبارت است از :

$$\pi_w = 720\sum_{k\in K} \rho_k (PQ_w - UbC_k) \qquad (۹)$$

که K سناریوهای ممکن، ρ_k احتمال رخداد سناریو k ام و UbC_k هزینه عدم تعادل در سناریو k ام است. هزینه‌ی عدم تعادل نیروگاه بادی در سناریوی k ام، با فرض ثابت نبودن قیمت هزینه‌ی عدم تعادل مثبت و منفی برای هر مگاوات عدم تعادل به‌صورت زیر نشان داده می‌شود:

$$\begin{matrix} P_{wk} > P_{ws} \\ P_{wk} \le P_{ws} \end{matrix} \quad UbC_k = \begin{cases} UbC_{up}(P_{wk} - P_{ws}) \\ UbC_{down}(P_{ws} - P_{wk}) \end{cases} \qquad (۱۰)$$

که UbCup هزینه‌ی عدم تعادل مثبت بر حسب دلار بر مگاوات، UbCdown هزینه‌ی عدم تعادل منفی بر حسب دلار بر مگاوات، Pws توان برنده شده واحد بادی در بازار انرژی و Pwk توان خروجی واحد بادی در سناریو k ام است. توان Pws در این مقاله همان توانی در نظر گرفته شده است که واحد حرارتی در بازار برق به تعادل رسیده است.

برای آنکه استاندارد مشخصی از تولید بادی وجود داشته باشد، می‌بایست تابع مشخصی از وزش باد تعیین شود. فرض واقع‌گرایانه برآنست که تابع توزیع سرعت وزش باد دارای توزیع احتمالی ویبال است. با در نظر گرفتن این تابع احتمال وزش باد می‌توان به مقدار تولید توان بادی براساس سرعت باد دست یافت. تابع ویبال در حالت کلی به‌صورت زیر است[۱۴]:

$$f(x;\lambda,k) = \frac{k}{\lambda}(\frac{x}{k})^{k-1} e^{-(\frac{x}{k})^k} \qquad x \ge 0 \qquad (۱۱)$$

در این تابع xمتغیر تصادفی است. kمتغیر شکل و λ متغیر مقیاس است. توجه شود که در بعضی مقالات از آلفا و بتا برای نشان دادن متغیرهای λ و k استفاده شده است.

جدول۱مقادیر توان خروجی نیروگاه بادی به‌ازای سناریوهای مختلف و احتمالات این سناریوها را نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود از چهار سناریوی مطرح شده دو سناریو برای توان‌های تولیدی پایین و دو سناریو برای توان‌های تولیدی بالا می‌باشد.

جدول ۱: چهار سناریوی مختلف تولید توان بادی

	سناریوی ۱	سناریوی ۲	سناریوی ۳	سناریوی ۴
توان خروجی(MW)	۵	۱۵	۲۵	۳۵
احتمال تولید توان	۰/۰۴۳۲	۰/۰۴۳۴	۰/۰۳۹۳	۰/۰۳۳۸

شبیه‌سازی مدل

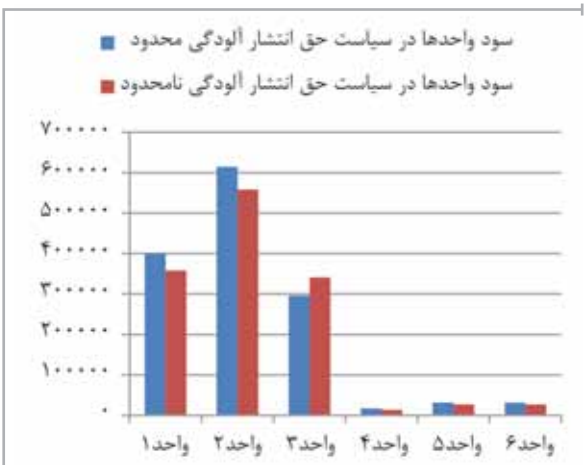
برای بیان تحلیل و صحت مدل ارایه شده برای سیاست‌های مختلف انتشار آلودگی از شبکه آزمون ۳۰ باسه IEEE استفاده شده است. برای جلوگیری از پیچیدگی مساله قیود مربوط به انتقال در نظر گرفته نشده است. نقطه تعادل بازار برق در هر یک از سیاست‌ها از بازی راهبردی واحدها برای بیشینه کردن سودشان که به‌صورت همزمان اجرا می‌شود، به‌دست آمده است. برای حل مساله بهینه‌سازی واحدها در بازار برق و بازار کربن و در نظر گرفتن قیود و عدم قطعیت‌های توان تولیدی از انرژی باد از نرم‌افزارMatlab استفاده شده است. جدول۲ مشخصات واحدهای تولیدی را نمایش می‌دهد.

جدول۲: مشخصات واحدهای تولیدی

	واحد۱	واحد ۲	واحد۳	واحد ۴	واحد۵	واحد۶
$\alpha_i(\$/MWh)$	۲۰	۱۷/۵	۱۰	۳۲/۵	۳۰	۳۰
$\beta_i(\$/MW^2h)$	۰/۲	۰/۱۷۵	۰/۶۲	۰/۰۸۳۴	۰/۲۵	۰/۲۵
$\eta_i(ton/MWh)$	۰/۴	۰/۴	۰/۹	۰/۸	۰/۷۲	۰/۷۲
$Q^{max}(MW)$	۸۰	۸۰	۵۰	۵۵	۳۰	۴۰
$Q^{min}(MW)$	۰	۰	۰	۰	۰	۰

سیاست اول:سهمیه انتشار ثابت

تحت این سیاست دو رویکرد متفاوت برای تمامی واحدها در نظر گرفته شده است. ابتدا میزان انتشار آلودگی تمامی واحدها محدود شده است به این معنی که هیچ واحدی نمی‌تواند بیش‌تر از سهمیه انتشار کربن تخصیص داده شده تولید آلودگی داشته باشد. در رویکرد دوم به واحدها سهمیه انتشار آلودگی کافی تخصیص داده شده است. میزان سود تمامی واحدها در این ۲ رویکرد بدون حضور انرژی تجدیدپذیر در شکل۱ نمایش داده شده است.



شکل ۱: سود واحدها بر حسب دلار

در رویکرد نخست که انتشار آلودگی محدود است واحدهای تمیز تر(۱و۲) تولید توان بیش‌تری دارند و واحدهایی با ضریب آلودگی بالا توان کمتری را تولید می‌کنند. هنگامی‌که به تمامی واحدها سهمیه انتشار آلودگی کافی داده می‌شود واحدهایی با ضریب آلودگی بالا تولید توان خود را افزایش می‌دهند و واحدهای تمیزتر تمایلی به افزایش توان تولیدی خود ندارند. سوددهی واحدها در رویکرد نخست به‌دلیل قیمت بالا تر توان در بازار برق نسبت به رویکرد دوم بیش‌تر است. شکل۲ سود واحدهای تولیدی را در سیاست نخست یعنی محدودیت تولید کربن زمانی‌که واحد بادی به‌جای واحد۶ جایگزین می‌شود نمایش می‌دهد.

شکل ۲:سود واحدها بر حسب دلار

با مقایسه شکل‌های۱و۲ با یکدیگر مشاهده می‌شود که حضور نیروگاه بادی در سناریوی۱(توان پایین) سبب افزایش سوددهی تمامی واحدها شده است و در سناریو های ۲،۳و۴ منجر به کاهش سوددهی واحدها گردیده است. دلیل این امر تولید توان بیش‌تر واحدها در سناریوی۱ و تولید توان کمتر واحدها در سناریو های ۲،۳و۴ است. هم‌چنین با تغییر سناریوها از ۱ تا ۴ قیمت بازار انرژی نیز به تدریج کاهش می‌یابد و تمایل واحدها به تولید توان کمتر می‌شود.

شکل۳ سود واحدهای تولیدی را در سیاست سهمیه انتشار کربن کافی و حضور نیروگاه بادی نمایش می‌دهد. مشاهده می‌شود که حضور نیروگاه بادی به عنوان منبع تولید انرژی تجدیدپذیر در این رویکرد نیز بر سوددهی واحدها تاثیر قابل‌توجهی داشته است. با حضور نیروگاه بادی برای سناریوی۱ افزایش سود برای تمامی واحدها دیده می‌شود. با تغییر سناریو از سناریوی ۱ تا ۴ رفته‌رفته سود هر واحد کاهش می‌یابد. کاهش قیمت بازار انرژی دلیل این کاهش سود برای واحدهای تولیدی است. هم‌چنین واحدهای تمیز با حضور نیروگاه بادی توان تولیدی خود را افزایش می‌دهند و واحدهای با ضریب آلودگی بالا میزان تولید خود را کاهش می‌دهند.

شکل ۳: سود واحدها بر حسب دلار

مجموع میزان آلودگی تولید شده تمام واحد در این دو سیاست در زمان حضور و عدم حضور نیروگاه بادی در بازار برق در جدول۳ نمایش داده شده است. مجموع میزان آلودگی تولیدی در یک روز برای رویکرد نخست نسبت به رویکرد دوم در غیاب نیروگاه بادی کمتر است. تاثیر حضور نیروگاه بادی با توجه به سناریوهای مختلف آن به این صورت است که از سناریوی ۱ تا ۴ در هر رویکرد میزان انتشار کربن در یک روز کاهش قابل توجهی پیدا کرده است تا جایی که در سناریوی ۴ کاهش نزدیک به ۱۰٪(۲۶۶تن کربن) میزان آلودگی در هر روز مشاهده می‌شود.

جدول ۳: مجموع آلودگی تولیدی واحدها در یک روز

	عدم حضور نیروگاه بادی(تن)	حضور نیروگاه بادی(تن)			
		سناریوی۱	سناریوی۲	سناریوی۳	سناریوی۴
سهمیه محدود	۲۴۲۲	۲۲۴۲	۲۲۱۳	۲۱۸۵	۲۱۵۶
سهمیه نامحدود	۲۵۷۸	۲۶۵۳	۲۵۷۵	۲۴۹۸	۲۴۲۱

سیاست دوم:خرید و فروش سهمیه انتشار کربن

در سیاست خرید و فروش سهمیه، تخصیص سهمیه انتشار کربن براساس سابقه تولید صورت گرفته است و تمامی واحدها می‌توانند بخشی یا تمام این سهمیه را در بازار کربن به فروش برسانند. فرض شده است که قیمت‌های خرید و فروش سهمیه انتشار کربن از بازار کربن به‌دست آمده است و در این مقاله به‌عنوان ورودی در نظر گرفته شده است. در این سیاست قیمت توان در بازار برق از مدل کورنات و بازی بین واحدهای تولیدی به‌دست می‌آید. هر واحد با توجه به قیمت بازار برق، قیمت خرید سهمیه انتشار، قیمت فروش سهمیه انتشار و سهمیه تخصیص‌یافته به آن بهترین راهبُرد تولید توان را برای بیشینه کردن سود خود اتخاذ می‌کند.کل میزان آلودگی تولیدی برای یک ماه تمامی واحدها ۸۶۰۰۰ تن کربن در نظر گرفته شده است. شکل ۴ سود هر واحد را در این سیاست برای حضور و عدم حضور نیروگاه بادی در بازار برق نمایش می‌دهد. سود تمامی واحدها در سناریوی ۱ تولید توان نسبت به عدم حضور نیروگاه بادی افزایش یافته است. در سناریوی ۲ تغییر محسوسی در سود واحدها مشاهده نمی‌شود اما در سناریوهای۴و۵ سوددهی واحدها کاهش یافته است. در سناریوی۱واحدهای تمیزتر تمایل بیش‌تری به تولید توان از خود نشان می‌دهند. کاهش سوددهی در سناریوهای ۳،۴و۵ را می‌توان کاهش قیمت بازار برق به دلیل حضور نیروگاه بادی و تمایل کمتر واحدها به تولید توان دانست. سوددهی واحد بادی در این شکل گنجانده نشده است.

شکل ۴: سود واحدها بر حسب دلار

مجموع میزان آلودگی تولیدشده تمام واحد در این سیاست در زمان حضور و عدم حضور نیروگاه بادی در بازار برق در جدول ۴ نمایش داده شده است. مجموع میزان آلودگی تولیدی در یک روز برای سیاست خرید و فروش سهمیه در غیاب نیروگاه بادی در بازار برق۲۱۶۰ تن کربن می‌باشد درحالی‌که حضور نیروگاه بادی میزان آلودگی ناشی از تولید کربن را در سناریوی ۴ تا ۱۸۹۴ تن در یک روز کاهش می‌دهد. این میزان نزدیک به ۱۲٪ درصد کاهش آلودگی در هر روز است.

جدول ٤: مجموع آلودگی تولیدی واحدها در یک روز

سیاست خرید و فروش سهمیه	عدم حضور نیروگاه بادی(تن)	حضور نیروگاه بادی سناریوی ۱(تن)	حضور نیروگاه بادی سناریوی ۲(تن)	حضور نیروگاه بادی سناریوی ۳(تن)	حضور نیروگاه بادی سناریوی ۴(تن)
	۲۱۶۰	۲۰۱۰	۱۹۶۹	۱۹۳۳	۱۸۹۴

سیاست سوم:تعهدات قراردادهای دوجانبه

در این سیاست فرض شده است که واحد نخست دارای قرارداد دوجانبه یک ماهه می‌باشد. قیمت برق برای این قرارداد همان قیمت توان در بازار لحظه‌ای در نظر گرفته شده است. این قرارداد دو جانبه به همراه بازار کربن برای خرید و فروش سهمیه انتشار آلودگی در

نظر گرفته شده است. شکل ۵ سود واحدها را در این سیاست زمانی که نیروگاه بادی در بازار برق حضور ندارد نمایش می‌دهد. با مقایسه این شکل با بخش نخست شکل۴ این نتیجه حاصل می‌شود که میزان سود تمامی واحدها زمانی که واحد نخست قرارداد دوجانبه دارد نسبت به سیاست خرید و فروش سهمیه بدون قرارداد دوجانبه کاهش یافته است. علت کاهش قیمت در بازار برق بوده است. در این سیاست واحد دوم تولید خود را کاهش داده است. در نمودارهای ۲تا ۵ شکل۵، سود واحدها زمانی‌که نیروگاه بادی در بازار برق جایگزین واحد ۶ شده است، نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود برای سناریوی ۱ میزان سود تمامی واحدها افزایش یافته است. دلیل این امر افزایش قیمت توان در سناریوی۱می‌باشد. از سناریوی ۲تا۴ رفته‌رفته قیمت توان با افزایش تولید توان واحد بادی، کاهش می‌یابد و سبب کاهش سود سایر واحدهای تولیدی می‌شود.

شکل ۵: سود واحدهابر حسب دلار

مجموع میزان آلودگی تولید شده تمام واحد در این سیاست در زمان حضور و عدم حضور نیروگاه بادی در بازار برق در جدول ۵ نمایش داده شده است. مجموع میزان آلودگی تولیدی در یک روز برای سیاست خرید و فروش سهمیه به همراه قرارداد دو جانبه در غیاب نیروگاه بادی در بازار برق ۲۲۳۴ تن کربن هست. درحالی‌که حضور نیروگاه بادی میزان آلودگی ناشی از تولید کربن را در سناریوی ۴ تا ۱۹۹۴تن در یک روز کاهش می‌دهد. این میزان نزدیک به۱۰٪ درصد کاهش آلودگی در هر روز است.

جدول ۵: مجموع آلودگی تولیدی واحدها در یک روز

حضور نیروگاه بادی سناریوی ۴(تن)	حضور نیروگاه بادی سناریوی ۳(تن)	حضور نیروگاه بادی سناریوی ۲(تن)	حضور نیروگاه بادی سناریوی ۱(تن)	عدم حضور نیروگاه بادی(تن)	قرارداد دوجانبه
۱۹۹۴	۲۰۳۳	۲۰۵۱	۲۰۸۰	۲۲۳۴	

نتیجه‌گیری

در این مقاله تاثیر سه سیاست اصلی در زمینه کاهش انتشار آلودگی در صنعت برق که امروزه از سوی اتحادیه اروپا مورد استفاده قرار می‌گیرد با روش پیشنهادی حضور نیروگاه بادی به همراه عدم قطعیت تولید آن که توسط تابع احتمال ویبال مدل شد، بر سودآوری واحدهای تولیدی و میزان تولید آلودگی واحدها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که بیش‌ترین سوددهی واحدها مربوط به سیاست خرید و فروش سهمیه انتشار آلودگی با حضور نیروگاه بادی در روش پیشنهادی می‌باشد هرچند میزان سناریوهای مختلف تولید توان بر سوددهی واحدها اثرگذار است. هم‌چنین شبیه‌سازی‌ها در این مقاله نشان می‌دهند که کمترین میزان تولید آلودگی توسط واحدها در هر روز در سیاست خرید و فروش سهمیه صورت می‌گیرد و این سیاست سبب کاهش۱۲٪ در تولید کربن در هر روز می‌شود. حضور قرارداد دوجانبه نیز در بازار برق در کاهش تولید انتشار آلودگی بسیار موثر است. تاثیر این سیاست کاهش ۱۰/۷٪ در میزان تولید کربن در هر روز است. سیاست سهمیه انتشار ثابت نیز با دو رویکرد سهمیه محدود و نامحدود برای هر واحد تولیدی سبب کاهش تولید کربن در رویکرد سهمیه محدود ۱۱٪ و در رویکرد سهمیه نامحدود۱۴/۳٪ در هر روز می‌شود.

پی‌نوشت‌ها

1. Clean Development Mechanism (CDM)
2. Joint Implementation (JI)
3. emission trading
4. fixed emission quota
5. cap and trade

منابع:

[6] bilateral contract commitments
[7] Y. Pal Verma, A. Kumar, “Potential Impacts of Emission Concerned Policies on Power System Operation With Renewable Energy Sources,” International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 44, Issue 1, pp. 520-529. 2013.
[8] Cong R, Wei Y,”Potential Impacts of CET Carbon Emission Trading on China’sPower Sector: A Perspective from Different Allowance Allocation Options,”Environmental and Ecological Economics Energy, Vol. 9, No.1pp.31-35.2010.
[9] Kuri B, Li F,”Allocation Of Emission Allowances To Effectively Reduce EmissionsIn Electricity Generation,”IEEEPower & Energy Society General Meeting.2009.
[10] T. Tietenberg, “The Tradable-Permits Approach To Protecting The Commons: Lessons For Climate Change,” Oxford Review Of Economic Policy, Vol. 19, No. 3. 2003.
[11] Pulgar-Painemal HA,”Short-Term Generation Scheduling Under A So2 Emissions Allowances Market,”Electric Power Systems Research,”Vol .74, Issue 2, pp. 257–265.2005.
[12] Kockar I,”Unit Commitment for Combined Pool/Bilateral Markets With Emissions Trading,” IEEEPower and Energy Society General Meeting.2008.
[13] V.Nanduri,”Application of Reinforcement Learning-Based Algorithms In Co2 Allowance And Electricity Markets”.IEEE Symposium onAdaptive Dynamic Programming And Reinforcement Learning, pp.164-169. 2011
[14] Basu M,”Dynamic economic emission dispatch using no dominated sorting genetic algorithm-II,”International Journal of Electrical Power & Energy Systems,Vol. 30, Issue 2, pp.140-149.2008.
[15] Xie L, Ilic MD,” Emission-concerned economic dispatch: possible formulations and implementations,”IEEEPower and Energy Society General Meeting .2010.
[16] Kockar I, Conejo AJ, McDonald JR,”Influence Of The Emissions Trading Scheme On Generation Scheduling,” International Journal of Electrical Power & Energy SystemsVol. 31, Issue 9, pp. 465–473. 2009.
[17] Blanco MI, Rodrigues G,”Can The Future Eu Ets Support Wind Energy Investments?,”Energy Policy,Vol 36, Issue 4,pp. 1509–1520. 2008.
[18] Report on development of conceptual framework for renewable energy. <www.mnre.gov.in/pdf/MNRE_REC_Report.pdf>.
[19] Goyal M, Jha R,”Introduction Of Renewable Energy Certificate In The Indian Scenario,”Renewable and Sustainable Energy Reviews,Vol. 13, Issues 6–7, pp. 1395–1405. 2009.
[20] R. Heydari, S. Hasanpour,”Wind Power Trading In Power Energy Market”, IEEE 14th International conference on Environment and Electrical Engineering, pp.210-215. 2014.

***