بیست و یکمین کنفرانس مهندسی برق ایران

دانشگاه فردوسی مشهد ● ۲۴ تا ۲۶ اردیبهشت ۱۳۹۲

21st Iranian Conference on Electrical Engineering

14 - 16 May 2013 ● Ferdowsi Univ. of Mashad

باسمه تعالی

بدین وسیله گواهی می شود که مقاله زیر در بیست و یکمین کنفرانس مهندسی برق ایران ارائه شده است .

"بررسی اثر سهمیه آلودگی و گواهی سبز بر کاهش آلودگی و حمایت از پروژه های انرژی تجدیدپذیر"

نویسندگان: مرتضی صمدی، مجید علومی بایگی، محمد حسین جاویدی

میر مجتبی میرصالحی

دبیر کمیته علمی کنفرانس

بررسی اثر سهمیه آلودگی و گواهی سبز بر کاهش آلودگی و حمایت از پروژه‌های انرژی تجدیدپذیر

مرتضی صمدی[۱]، مجید علومی بایگی[۲] و محمدحسین جاویدی[۳]
[۱] دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، MO_SA579@STU-MAIL.UM.AC.IR
[۲] دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، M.OLOOMII@UM.AC.IR
[۲] دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، H-JAVIDI@UM.AC.IR

چکیده - طرح‌های حمایت از انرژی‌های تجدیدپذیر و سیستم مبادله سهمیه انتشار آلودگی از ابزارهای نوین کنترل آلودگی گازهای گلخانه ای هستند که توسط سیاستمداران برای کاهش آلودگی در صنایع آلاینده و توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر در صنعت برق استفاده می‌شود. به دلیل اینکه این سیاست‌ها اثرات همپوشانی دارند، در صورت عدم طراحی مناسب، عملکرد بازار برق دچار مشکل می‌شود. در این مقاله اثر این دو سیاست را بر سودآوری واحدها و قیمت بازار برق در افق زمانی میان مدت بررسی می‌شود.

کلید واژه- نقطه تعادل بازار برق، تعادل کورنات، طرح‌های حمایت از انرژی‌های تجدیدپذیر، سهمیه انتشار آلودگی

۱- مقدمه

با افزایش نگرانی‌ها در مورد گرم شدن کره زمین و اثرات خطرناک گازهای گلخانه‌ای، اقداماتی برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در سراسر جهان انجام شده است. پروتکل کیوتو معاهده بین‌المللی است که کشورهای مختلف از طریق آن متعهد شده‌اند تا اقداماتی را در راستای کاهش گازهای گلخانه ای از طریق مکانیزم‌های مختلف انجام دهند. یکی از مکانیزم‌های مهم پروتکل کیوتو طرح مبادله سهمیه انتشار آلودگی است [۱]. در این طرح یک سازمان دولتی (معمولاً سازمان حفاظت از محیط زیست)، بر روی میزان انتشار آلاینده‌ها محدودیتی (سقف آلودگی) تعیین می‌کند. این محدودیت به فرم سهمیه انتشار آلاینده‌ها به واحدهای آلاینده در صنایع مختلف به صورت رایگان تخصیص می‌یابد و یا فروخته می‌شود. شرکت‌های آلاینده نیازمند به داشتن سهمیه آلودگی معادل با میزان انتشار آلودگی خود هستند. این سهمیه‌ها می‌تواند در بازار آلودگی مبادله شود. از طریق این طرح، کاهش آلودگی در مقایسه با طرح مالیات بر آلودگی به روش بهینه انجام می‌شود [۲- ۳].

طرح مبادله سهمیه آلودگی مستقیماً انتشار آلودگی گازهای گلخانه‌ای در صنایع مختلف را کاهش می‌دهد. قیمت سهمیه آلودگی می‌تواند به صورت غیرمستقیم حمایتی برای انرژی‌های تجدیدپذیر باشد [۴-۵]. اما طرح‌های حمایتی از انرژی‌های تجدیدپذیر مستقیماً انرژی‌های تجدیدپذیر را در صنعت برق توسعه می‌دهند. این سیاست‌ها با افزایش به‌کارگیری انرژی‌های تجدید پذیر به طور غیر مستقیم باعث کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شود [۶].سیاست‌های حمایتی انرژی تجدیدپذیر به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند: طرح‌های قیمتی (تعرفه و پاداش) و طرح‌های سهمیه ای (گواهی سبز). سیستم تعرفه انرژی سبز، رایج‌ترین سیستم حمایتی در کشورهای مختلف است [۷]. در این طرح از طریق قراردادهای بلندمدت بین تولیدکنندگان انرژی تجدیدپذیر و بهره بردار سیستم، قیمتی ثابت و بیشتر از قیمت بازار برق برای هر مگاوات ساعت انرژی تجدیدپذیر پرداخت می‌شود.

بر اساس استانداردهای سبد انرژی تجدیدپذیر، هدفی تعیین می‌شود تا در مدت زمان معینی، میزان مشخصی از انرژی برق از تکنولوژی‌های سبز و کارآمد تولید شود.برای توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر و رسیدن به هدف تعیین شده در زمان مقرر، باید مشوق‌هایی برای توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر در نظر گرفته شود. برای این منظور ویژگی‌های زیست محیطی حاصل از انرژی تجدیدپذیر با عناوین برچسب سبز یا اعتبارات انرژی تجدیدپذیر و یا گواهی‌های سبز (تجدیدپذیر) قابل معامله شناخته می‌شوند. این اعتبارات به طور جداگانه از انرژی تعریف و در بازار گواهی سبز فروخته می‌شود. در حال حاضر در ایتالیا و بریتانیا دو سیستم مبادله سهمیه آلودگی و مبادله گواهی سبز همزمان اجرا می‌شود [۸- ۹].

در ادامه مقاله، در بخش ۲ مقالات مربوط به برهم کنش بازار برق، بازار آلودگی و بازار گواهی سبز مرور می‌شود. در بخش ۳ مدل مورد نیاز برای بررسی اثر سیاست‌های زیست محیطی بر

بازار برق ارائه می‌شود. در بخش ۴ نتایج و تحلیل شبیه سازی‌ها آورده می‌شود و در بخش آخر نتیجه گیری بیان می‌شود.

۲- مروری بر مقالات

برای مدل سازی بازار برق، پژوهش‌های زیادی در زمینه ساختار بازار برق و چگونگی رقابت بنگاه‌ها در صنعت برق در سال‌های اخیر انجام شده است. مدل‌های چند انحصاری بازار برق عمدتاً مبتنی بر مفهوم تعادل نش هستند. نقطه تعادل نش، نقطه ای است که در آن واحدها هیچ انگیزه ای ندارند تا به صورت یکطرفه پیشنهاد خود را در بازار عوض کنند. زیرا با تغییر پیشنهاد، سود آن‌ها افزایش نمی‌یابد. قیمت‌های تعادلی نش برای مدل‌های مختلف انحصار چند جانبه نظیر کورنات، برترند و تابع عرضه می‌تواند محاسبه شود. در بسیاری از مقالات شرکت‌های تولیدی در بازار برق به صورت بازیگر کورنات مدل می‌شوند. به عبارتی استراتژی آن‌ها به صورت میزان تولید ارائه می‌شود و در کمیت تولید با یکدیگر رقابت می‌کنند. در مدل کورنات قیمت‌ها توسط توابع تقاضا تعیین می‌شوند، لذا این قیمت‌ها به تغییرات تقاضا حساس هستند و معمولاً در مقایسه با مدل تعادل تابع عرضه، قیمت‌ها را بیشتر از واقعیت تخمین می‌زنند [۹]. به علت اینکه مدل کورنات جزئیات بیشتری را می‌تواند پوشش دهد، برای بررسی برهم کنش بازار برق با بازارهای دیگر از قبیل بازار آلودگی و بازار گواهی سبز و در نظر گرفتن قیود رزرو و خطوط انتقال استفاده می‌شود. از طرفی مدل تعادل تابع عرضه کمتر به تنظیم پارامترها حساس است، لذا برای تحلیل بلندمدت بازارها بیشتر کاربرد دارد. اما پیچیدگی‌های اثبات وجود نقاط تعادل و یکتایی آن در این مدل بیشتر است [۱۰].

در [۱۱]، مدل نش-کورنات برای شبیه سازی رقابت تولیدکنندگان در بازار برق به صورت حوضچه انرژی با در نظر گرفتن قرارداد دوجانبه و نمایش تراکم در شبکه انتقال معرفی شده است. در [۱۲]، اثر حضور منابع بادی بر قیمت بازار برق در بلند مدت با استفاده از تعادل تابع عرضه بررسی شده است. در این مقاله نشان داده شده است که وقتی ظرفیت بادی نصب شده در سیستم از حد معینی بیشتر شود، تخمین قیمت آینده بازار برق به دلیل عدم وجود نقطه تعادل دشوار می‌شود. مرجع [۱۳]، برای شبیه سازی بازار برق چندانحصاری در حضور سیستم مبادله سهمیه آلودگی از مدل کورنات استفاده کرده است. در این مقاله مسئله مزایده سهمیه آلودگی سالیانه برای تخصیص سهمیه به واحدها و تأثیر آن بر رقابت بین آن‌ها بررسی شده است.

در [۹] و [۱۴]، مسئله برنامه ریزی توسعه تولید در حضور سهمیه آلودگی و گواهی سبز به عنوان سیاست‌های زیست محیطی در بازه زمانی بلندمدت بررسی شده است و نشان داده شده است که بدون مشوق‌های اقتصادی، تکنولوژی‌های سبز از نظر اقتصادی پایدار نخواهند ماند. در [۱۵]، بازار برق PJM توسط مدل کورنات و بازار سهمیه آلودگی Nox توسط مدل تغییرات قیمت حدسی شبیه سازی شده است و نشان داده شده است که قدرت بازار در هر یک از این دو بازار می‌تواند اثر قدرت بازار در بازار دیگر تشدید کنند.

با توجه به اینکه سیاست‌های زیست محیطی در دهه اخیر مطرح شده‌اند، مقالات موجود در این زمینه اثر این سیاست‌ها را در بلندمدت بررسی کرده‌اند. در تعدادی از مقالات اثر حضور بازار های آلودگی و گواهی سبز در حضور تراکم شبکه انتقال و بازار رزرو لحاظ شده است که منجر به پیچیدگی مسئله شده است. همچنین قیمت سهمیه آلودگی و گواهی سبز به صورت یک پارامتر ثابت در مدلسازی فرض شده است. در این مقاله برای بررسی تأثیر گذاری سیاست‌های زیست محیطی بر قیمت بازار برق و سودآوری واحدها، هرکدام از این بازارها به صورت جداگانه در کنار بازار برق مدل می‌شود. از آنجا که در حضور بازار آلودگی یا گواهی سبز، بازیکنان بازار برق ممکن است استراتژی‌های خود را تغییر دهند، استراتژی آن‌ها در حضور هریک از این بازارها با استفاده از تعادل کورنات تعیین می‌شود و اثر سهمیه آلودگی و گواهی سبز بر بازار برق و در نتیجه بر کاهش آلودگی و حمایت از انرژی تجدیدپذیر مطالعه می‌گردد.

۳- فرمولبندی مسئله

۳-۱- مدل بازار برق

در این مطالعه مدل کورنات برای بررسی اثر سهمیه آلودگی و گواهی سبز بر کاهش آلودگی و حمایت از انرژی تجدیدپذیر استفاده می‌گردد. در مدل کورنات بازار برق به صورت حوضچه انرژی مدل می‌شود که در آن بازیگران بازار با تغییر سطح تولید خود، سودشان را بیشینه می‌کنند. در این مقاله تقاضای بار هر روز به سه سطح کم باری، میان باری و پرباری تقسیم می‌شود. فرض می‌شود که بار هر سطح در طول یک ماه مورد مطالعه ثابت باقی می‌ماند. قیمت بازار برق با توجه به تابع تقاضای سیستم و تولید شرکت‌های مختلف تعیین می‌شود. برای تعیین میزان

تولید هر شرکت فرض می‌شود که شرکت‌ها در بازی حداکثرسازی سود خود به تعادل رسیده‌اند. میزان تولید هر شرکت در نقطه تعادل کورنات برای تعیین قیمت انرژی الکتریکی مورد استفاده قرار می‌گیرد و برای سادگی از قیود انتقال صرفنظر می‌شود. در این مقاله با فرض اینکه ظرفیت هر یک از واحدهای تولید انرژی الکتریکی از طریق منابع انرژی تجدیدپذیر کوچک، تعداد آن‌ها زیاد و در سطح جغرافیایی گسترده ای توزیع شده‌اند، متوسط تولید انرژی الکتریکی توسط منابع تجدیدپذیر ثابت فرض شده و از عدم قطعیت در مجموع تولید این منابع صرفنظر شده است.

برای تعیین نقطه تعادل کورنات، سود کلیه شرکت‌ها باید به صورت همزمان حداکثر شود. سود شرکت f را می‌توان به صورت زیر مدل نمود.

$$\max \quad \pi_f = 30 \times \sum_t D_t [p_t \times q_{f,t} - C_{f,t}(q_{f,t})] \qquad (۱)$$

مقید به:

$$p_t = a_t - b_t (q_{ren,t} + \sum_f q_{f,t}) \qquad \forall t \in T \qquad (۲)$$

$$q_{f,t}^{min} \le q_{f,t} \le q_{f,t}^{max} \qquad \forall t \in T \qquad (۳)$$

$$C_{f,t}(q_{f,t}) = \alpha_f \times q_{f,t} + \frac{1}{2} \times \beta_f \times q_{f,t}^2 \qquad \forall t \in T \qquad (۴)$$

در این مدل π_f سود شرکت f در ماه مورد مطالعه بر حسب دلار، T مجموعه سطوح بار، D_t مدت زمان سطح بار t بر حسب ساعت، p_t قیمت انرژی الکتریکی در سطح بار t بر حسب دلار بر مگاوات ساعت، $q_{f,t}$ تولید شرکت f در سطح بار t بر حسب مگاوات، $C_{f,t}$ هزینه تولید شرکت f در سطح بار t بر حسب دلار بر ساعت و $q_{ren,t}$ تولید انرژی تجدیدپذیر در سطح بار t بر حسب مگاوات است. قید (۲) مبین تابع تقاضا انرژی الکتریکی سیستم بوده و قیمت انرژی الکتریکی را با توجه به میزان تولید واحدها تعیین می‌نماید. قید (۳) مبین حد بالا و پایین ژنراتورها می‌باشد. قید (۴) مبین هزینه تولید انرژی الکتریکی است که به صورت یک تابع محدب درجه دو در نظر گرفته شده است.

۳-۲- مدل بازار برق و بازار آلودگی

برای مدل نمودن بازار آلودگی فرض می‌شود که هر شرکت مازاد یا کسری سهمیه آلودگی خود را به صورت ماهانه معامله می‌کند. قیمت سهمیه آلودگی با توجه به تابع تقاضای سهمیه آلودگی تعیین می‌شود. بازار برق به همراه بازار آلودگی را به صورت زیر می‌توان مدل نمود.

$$\max \quad \pi_f = 30 \times \sum_t D_t [p_t \times q_{f,t} - C_{f,t}(q_{f,t})] - p_{co2} \times E_f \qquad (۵)$$

مقید به:

قیود (۲)، (۳) و (۴)

$$p_{co2} = a' + b' (E_0 + \sum_f E_f) \qquad (۶)$$

$$E_f = (30 \times \sum_t D_t \times \eta_f \times q_{f,t}) - N_f \qquad (۷)$$

با حضور بازار آلودگی، هزینه (درآمد) ناشی از خرید (فروش) کسری (مازاد) سهمیه آلودگی نیز به تابع سود هر شرکت اضافه می‌شود. جمله سوم معادله (۵) مبین این هزینه (درآمد) می‌باشد. P_{co2} قیمت سهمیه آلودگی بر حسب دلار بر تن، E_f میزان کسری (مازاد) سهمیه آلودگی شرکت f بر حسب تن، η_f نرخ آلودگی شرکت f بر حسب تن بر مگاوات ساعت، N_f سهمیه تخصیص یافته اولیه به شرکت f برای مدت یک ماه بر حسب تن و E_0 میزان کسری (مازاد) سهمیه آلودگی صنایع دیگر از قبیل کارخانجات صنعتی، پتروشیمی، سیمان و ..... می‌باشد. قیمت سهمیه آلودگی در بازار آلودگی توسط تابع عرضه و میزان تقاضای سهمیه آلودگی تعیین می‌شود. قید (۶) مبین تابع عرضه سهمیه آلودگی در بازار آلودگی است. E_f مثبت مبین کسری سهمیه آلودگی و E_f منفی نشان دهنده مازاد سهمیه آلودگی می‌باشد. میزان کسری (مازاد) باید پیش بینی و از (در) مزایده ماهیانه خریداری (فروخته) شود. سهم آلودگی تولیدی توسط سایر صنایع معادل با سهم آلودگی بخش برق در نظر گرفته می‌شود.

تخصیص اولیه سهمیه آلودگی به واحدها (مقدار N_f) بر سودآوری آن‌ها و قیمت سهمیه آلودگی تأثیر می‌گذارد. تخصیص بیش از حد سهمیه اولیه به واحدها باعث سودهای بادآورده می‌شود و ممکن است باعث کاهش انگیزه تولید شود و به رقابت واحدهای تولیدی صدمه بزند. تخصیص اولیه رایگان سهمیه آلودگی به واحدها به دو صورت انجام می‌شود. در این روش از اطلاعات تاریخی آلودگی و میزان تولید استفاده می‌شود. در روش تخصیص مبتنی بر سابقه آلودگی، میزان آلودگی تولیدی هر واحد در سال(های) قبل اندازه گیری می‌شود و سپس بر اساس آن به واحدها سهمیه آلودگی تخصیص می‌گردد. در روش تخصیص مبتنی بر سابقه تولید میزان تولید برق هر واحد در

سال(های) قبل به عنوان معیاری برای تخصیص سهمیه آلودگی به آن در نظر گرفته می‌شود.

در این مقاله فرض می‌شود سهمیه‌ها به صورت رایگان به واحدها تخصیص یابد. بدین منظور ابتدا نقطه تعادل بازار برق بدون در نظر گرفتن سهمیه آلودگی تعیین می‌شود. آلودگی و تولید هر واحد در نقطه تعادل فوق به عنوان اطلاعات تاریخی برای تخصیص سهمیه به هر واحد در نظر گرفته می‌شود.

۳-۳- مدل بازار برق و بازار گواهی سبز

برای مدل نمودن بازار گواهی سبز فرض می‌شود که هر تولید کننده باید در هر سطح از تولید، کسر مشخصی از تولید خود، گواهی سبز تهیه نماید. برای در نظر گرفتن بازار گواهی سبز هزینه خرید گواهی سبز در تابع سود هر شرکت لحاظ می‌شود. فرض می‌شود تولیدکنندگان انرژی تجدیدپذیر به میزان توان تولیدی خود در هر ساعت، گواهی سبز را به بازار گواهی سبز عرضه می‌کنند و هر واحد باید درصد مشخصی از توان تولیدی خود را گواهی سبز بخرد و به بهره بردار شبکه ارائه کند. اگر در این بازار نوسانات قیمت گواهی زیاد باشد، باعث ایجاد عدم قطعیت در بلندمدت برای واحدها می‌شود. این عدم قطعیت در حمایت از انرژی تجدیدپذیر باعث کاهش انگیزه سرمایه گذاری بخش خصوصی در این پروژه‌ها می‌شود. لذا در این مدل $P_{tgc,t}$ قیمت گواهی سبز در هر سطح بار به صورت درصد مشخصی از قیمت برق در آن سطح بار در نظر گرفته می‌شود. بازار برق به همراه بازار گواهی سبز را به صورت زیر می‌توان مدل نمود.

$$\max \quad \pi_f = 30\times\sum_t D_t[p_t\times q_{f,t} - C_{f,t}(q_{f,t})] - 30\times\sum_t D_t\times p_{tgc,t}\times r\times q_{f,t} \qquad (۸)$$

مقید به:

قیود (۲)، (۳) و (۴)

$$p_{tgc,t} = k_t\times p_t \qquad \forall t\in T \qquad (۹)$$

$$q_{ren,t} \ge \sum_f r\times q_{f,t} \qquad \forall t\in T \qquad (۱۰)$$

$P_{tgc,t}$ قیمت گواهی سبز در سطح t بر حسب دلار بر مگاوات ساعت و r درصدی از تولید هر شرکت است که معادل آن باید گواهی سبز از تولیدکنندگان انرژی تجدیدپذیر در بازار گواهی سبز خریداری شود. درصد مورد نیاز برای خرید گواهی سبز توسط هر شرکت باید به نحوی تعیین شود تا این میزان سهمیه برای خرید از واحدهای تولید انرژی تجدیدپذیر وجود داشته باشد. قید (۹) مبین قیمت گواهی سبز و قید (۱۰) مبین حداقل میزان توان تجدیدپذیر است که برای راه اندازی بازار گواهی سبز الزامی می‌باشد. در این سیستم میزان r و k، ۰.۰۵ در نظر گرفته می‌شود.

۴- اعمال مدل پیشنهادی به شبکه آزمون

در این بخش مدل‌های ارائه شده به شبکه آزمون ۳۰ باسه IEEE با صرفنظر از قیود انتقال اعمال می‌گردد. برای تعیین نقطه تعادل بهینه سازی‌های کوپل شرکت‌های مختلف باید با هم حل شوند. برای این منظور شرایط بهینگی KKT برای کلیه شرکت‌ها با هم حل می‌شود. برای این منظور از نرم افزار GAMS استفاده می‌شود.

جدول ۱ – مشخصات واحدهای تولیدی شبکه تست ۳۰ باسه IEEE [۱۲]

	واحد۱	واحد۲	واحد۳	واحد۴	واحد۵	واحد۶
α_f ($/MWh)	۲۰	۱۷/۵	۱۰	۳۲/۵	۳۰	۳۰
β_f ($/MW²h)	۰/۲	۰/۱۷۵	۰/۶۲۵	۰/۰۸۳۴	۰/۲۵	۰/۲۵
η_f (ton/MWh)	۰/۴	۰/۴	۰/۹	۰/۸	۰/۷۲	۰/۷۸
q^{max} (MW)	۸۰	۸۰	۵۰	۵۵	۳۰	۴۰
q^{min} (MW)	۰	۰	۰	۰	۰	۰

جدول ۲ – پارامترهای مربوط به بازار برق [۱۱]

	D_t (h)	$q_{ren,t}$ (MW)	a_t ($/MWh)	b_t ($/MW²h)
کم باری	۸	۱۰	۴۰	۰/۰۵
میان باری	۱۰	۱۰	۴۶	۰/۰۵
پر باری	۶	۱۰	۵۰	۰/۰۵

جدول ۳ – پارامترهای مربوط به بازار آلودگی

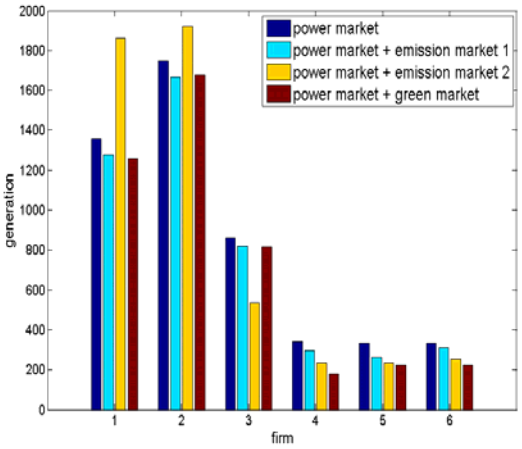
a'	b'	E_0
۱۰	۰/۰۵	۷۰۰۰

۴-۱- تولید

تولید روزانه هر واحد در چهار سناریوی متفاوت در شکل (۱) آورده شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، وجود بازار آلودگی و بازار گواهی سبز منجر به کاهش تولید و مصرف در بازار برق می‌شود که میزان کاهش تولید به مشخصات و نرخ آلودگی هر واحد بستگی دارد.

در صورت تخصیص سهمیه مبتنی بر سابقه آلودگی به واحدها (سناریو ۲)، همه واحدها به نسبت مشابهی تولید خود را در بازار برق کاهش می‌دهند. از این طریق می‌توانند مقداری از سهمیه خود را استفاده نکنند و مازاد آن را در بازار آلودگی به فروش برسانند تا سود خود را با حضور در بازار برق و آلودگی

بیشینه کنند. این نوع تخصیص سهمیه بر همه واحدها اثر مشابهی می‌گذارد و انگیزه کافی برای رفتن به سمت تولید انرژی‌های پاک‌تر را در بلند مدت فراهم نمی‌کند. با تخصیص سهمیه آلودگی مبتنی بر سابقه تولید به هر واحد (سناریو ۳)، واحدهای ۱ و ۲ که نرخ آلودگی کمتری دارند با افزایش تولید مواجه می‌شوند و واحدهای ۳ تا ۶ که نرخ آلودگی بیشتری دارند، تولیدشان کاهش می‌یابد. این روش تخصیص باعث می‌شود واحدهای پاک‌تر و تمیز تر سهمیه آلودگی بیشتری دریافت کنند. در نتیجه این واحدها تولید بیشتری خواهند داشت و مازاد سهمیه خود را در بازار آلودگی به فروش می‌رسانند. این مورد باعث می‌شود که حاشیه سود این واحدها افزایش یابد که در بلند مدت، رفتن به سمت تکنولوژی‌های کاهنده کربن و پروژه های انرژی پاک را سرعت می‌بخشد.



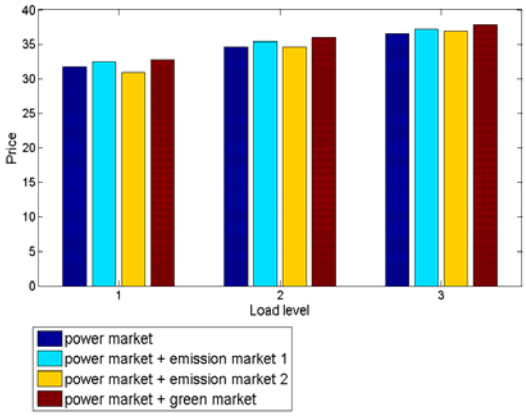
شکل ۱ – تولید روزانه هر واحد در سناریوهای مختلف

با حضور بازار گواهی سبز (سناریو ۴) نیز تولید واحدها کاهش می‌یابد، زیرا واحدها باید درصدی از تولید را گواهی سبز بخرند. به دلیل اینکه هزینه خرید این گواهی برای واحدها زیاد نشود، ترجیح می‌دهند تولید خود را کاهش دهند تا سودشان بیشینه شود. با اینکه وجود این بازار میزان سود واحدها را کاهش می‌دهد، اما از واحدهای تجدیدپذیر حمایت می‌شود که این حمایت از طرف سایر واحدهای حرارتی در شبکه انجام می‌شود. در نتیجه بار حمایتی از پروژه های تجدیدپذیر از طریق مکانیزم بازار و سایر نیروگاه‌ها انجام می‌شود که این مورد باعث می‌شود که دولت نقش نظارتی در حمایت از این نیروگاه‌ها را داشته باشد و سهم تولید انرژی پاک در بلند مدت از این طریق افزایش می‌یابد. اما برای افزایش کارایی این بازار باید قوانین و مقرراتی در نظر گرفته شود تا از نوسان بیش از حد قیمت سهمیه و ایجاد عدم قطعیت در سرمایه گذاری واحدهای تجدیدپذیر کاهش یابد.

۴-۲- قیمت برق

در شکل (۲) قیمت تسویه بازار برق در سطوح مختلف بار در سناریوهای مختلف نشان داده شده است. مشاهده می شود که حضور بازارهای گواهی سبز و سهمیه آلودگی در کنار بازار برق قیمت برق را افزایش می‌دهد که این قیمت به مصرف کننده نهایی منتقل می‌شود. به عبارتی کاهش آلودگی منتشر شده توسط نیروگاه‌ها و توسعه استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر توسط مصرف کنندگان صورت می‌گیرد و در نهایت منافع حاصل از این کار در بلندمدت در راستای منافع جامعه و افزایش رفاه اجتماعی خواهد بود.

در هر سطح بار قیمت برق در حضور بازار سبز بیش از سناریوهای دیگر است. زیرا همان‌طور که اشاره شد واحدها برای جلوگیری از کاهش سود خود، تولید خود را کاهش می‌دهند. به عبارت دیگر این واحدها خریدار گواهی سبز هستند. لذا با کاهش تولید در هر سطح بار، قیمت برق افزایش می‌یابد. راهکار موجود برای افزایش قابلیت تولید هر واحد (بنگاه) و کسب سود بیشتر، خرید واحد تجدیدپذیر یا سرمایه گذاری در بخش پروژه های تجدیدپذیر است تا از این طریق هر بنگاه بتواند علاوه بر خرید در بازار گواهی سبز، گواهی سبز حاصل از واحد تجدیدپذیر خود را نیز در این بازار بفروشد. لذا حضور این بازار در کنار بازار برق در بلند مدت باعث ایجاد انگیزه در بنگاه‌ها می‌شود تا در نیروگاه های تجدیدپذیر سرمایه گذاری کنند.



شکل ۲ – قیمت برق در سناریوهای مختلف

با حضور بازار آلودگی نیز قیمت برق افزایش می‌یابد. اما قیمت برق در سناریو ۲ بیشتر از سناریو ۳ است. به عبارتی تخصیص سهمیه بر اساس سابقه آلودگی، قیمت برق را بیشتر افزایش می‌دهد. زیرا در این روش کاهش سطح تولید توسط واحدها

بیشتر است تا بتوانند از مازاد سهمیه خود در بازار آلودگی استفاده کنند و در بازار آلودگی آن را به فروش رسانند.

۴-۳- میزان آلودگی

در جدول (۴) میزان آلودگی ماهانه هر یک از سناریوها آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با حضور بازار آلودگی و بازار گواهی سبز، میزان آلودگی کاهش می‌یابد. اگر سهمیه بر اساس سابقه تولید واحدها در بازار برق تخصیص یابد آلودگی نسبت به حالت تخصیص مبتنی بر آلودگی بیشتر کاهش می‌یابد. لذا در این مورد تخصیص مبتنی بر سابقه تولیدی واحدها نسبت به حالت دیگر بهتر است.اما طرح حمایتی از انرژی‌های تجدیدپذیر توسط گواهی سبز قابل معامله به مقدار بیشتری آلودگی را نسبت به حالات دیگر کاهش می‌دهد. لذا وجود طرح حمایتی از انرژی‌های تجدیدپذیر خود نیز باعث کاهش آلودگی نیز می‌شود. اما برای اینکه این کاهش آلودگی در بلندمدت پایدار باشد وجود بازار آلودگی الزامی است.

جدول۴ – میزان آلودگی تولیدی توسط بخش برق در طول یک ماه

	آلودگی (تن)
بازار برق	۸۳۵۵۷.۲۷۳
بازار برق + بازار آلودگی ۱	۷۷۴۲۸.۴۲۷
بازار برق + بازار آلودگی ۲	۷۶۴۸۳.۲۰۹
بازار برق + بازار گواهی سبز	۷۱۶۶۸.۳۲۵

۴-۴- قیمت سهمیه آلودگی

طبق جدول (۵) قیمت سهمیه آلودگی بر اساس تخصیص مبتنی بر سابقه آلودگی تاریخی واحدها بیشتر از حالت دیگر است. که این مورد نشان می‌دهد از این طریق واحدها می‌توانند قیمت سهمیه را بیشتر تغییر دهند.

جدول ۵ – قیمت سهمیه آلودگی در بازار آلودگی

	قیمت (دلار / تن)
بازار برق + بازار آلودگی ۱	۵۳.۵۵۷
بازار برق + بازار آلودگی ۲	۶.۲۹۶

۵- نتیجه گیری

در این مقاله بازارهای سهمیه آلودگی و گواهی سبز در کنار بازار برق در نظر گرفته شد و اثر آن‌ها بر قیمت بازار برق مورد بررسی قرار گرفت. مبادله سهمیه آلودگی و گواهی سبز باعث کاهش تولید واحدهای آلاینده می‌شود و در صورت عدم سرمایه گذاری برای احداث نیروگاه های تمیزتر و حمایت از واحدهای تجدیدپذیر باعث افزایش قیمت برق می‌شود.

مبحث تخصیص سهمیه آلودگی یکی از مواردی است که در بازارهای آلودگی باید به آن توجه شود. در صورت تخصیص مبتنی بر سابقه آلودگی واحدها، قیمت سهمیه آلودگی و قیمت برق بیشتر از تخصیص مبتنی بر سابقه تولید واحدها است. از طرفی واحدهای با نرخ آلودگی کمتر در روش تخصیص مبتنی بر سابقه تولید، سهمیه بیشتری دریافت می‌کنند و می‌توانند مازاد سهمیه بیشتری را در بازار آلودگی به فروش برسانند.

با حضور بازار گواهی سبز، هزینه واحدهای آلاینده به علت خرید گواهی سبز از واحدهای تجدیدپذیر افزایش می‌یابد. لذا برای جلوگیری از کاهش سود، تولید خود را کم می‌کنند. قیمت برق بیشتر از حضور بازار آلودگی است و آلودگی کلی توسط واحدها بسیار کمتر می‌شود..

۶- مراجع

[1] 'Kyoto protocol reference manual on accounting of emissions and assigned amounts'. United Nations Convention on Climate Change, February 2007

[2] J. Hill, T. Jennings and E. Vanezi, The emissions trading market: risks and challenges, FSA Commodities Group, March 2008.

[3] T. Tietenberg, "The Tradeable-Permits Approach To Protecting The Commons: Lessons For Climate Change," Oxford Review Of Economic Policy, vol. 19, no. 3, 2003.

[4] M. Blanco and G. Rodrigues, "Can the future EU ETS support wind energy investments?," Energy Policy, 36,509–1520, 2008.

[5] S. Jensen and K. Skytte, "Simultaneous attainment of energy goals by means of green certificates and emission permits," Energy Policy, 3,63–71, 2003.

[6] Y. Chen and L. Wang, "A Power Market Model with Renewable Portfolio Standards, Green Pricing and GHG Emissions Trading Programs," Energy 2030 Conference, 2008.

[7] P. Menanteau, D. Finon and M. Lamy, "Prices versus quantities:Choosing policies for promoting the development of renewable energy," Energy Policy, 31, 799–812, 2003.

[8] E. Doris, J. McLaren, V. Healey and S. Hockett, State of the States: Renewable Energy Development and the Role of Policy, NREL, Golden, CO, 2009.

[9] P. Linares, F. Javier Santos, M. Ventosa1and L. Lapiedra, "Incorporating oligopoly, CO2 emissions trading and green certificates into a power generation expansion model," Automatica, 44, 1608–1620, 2008.

[10] B. Willems, I. Rumiantseva and H. Weigt, "Cournot versus Supply Functions: What does the data tell us?", Energy Economics, 31, 38–47, 2009.

[11] B. F. Hobbs, "Linear complementarity models of Nash-Cournot competition in bilateral and poolco power markets," IEEE Trans. Power Syst., vol. 16, no. 2, pp. 194–202, 2001.

[12] M. Oloomi Buygi, H. Zareipour and W. D. Rosehart, "Impacts of Large-scale Integration of Intermittent Resources on Electricity Markets: A Supply Function Equilibrium Approach,"

[13] F.D. Galiana and S.E. Khatib, "Emission allowances auction for an oligopolistic electricity market operating under cap-and-trade," IET Gener. Transm. Distrib., Vol. 4, Iss. 2, pp. 191–200, 2010.

[14] F. Careri, C. Genesi and P. Marannino "Generation Expansion Planning in the Age of Green Economy," IEEE Trans. Power Syst., vol. 26, no. 4, 2011.

[15] Y. Chen, and B. F. Hobbs, "An Oligopolistic Power Market Model With Tradable NOx Permits". IEEE Trans. Power Syst., vol. 20, no. 1, 2005.