

# اثر بازار آلودگی و حراج سهمیه آلودگی بر سودآوری شرکت‌های تولیدی در بازار برق

مرتضی صمدی - مجید علومی بایگی

گروه مهندسی برق دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد

مشهد، ایران

smortezas2000@gmail.com

## ۱. مقدمه

استفاده از سوخت‌های فسیلی برای تولید انرژی در صنایع مختلف باعث افزایش گازهای گلخانه‌ای در جو کره زمین شده است. با توجه به رشد بی‌رویه استفاده از این نوع سوخت‌ها در سال‌های اخیر، غلظت گازهای موجود در جو افزایش یافته و باعث به وجود آمدن پدیده‌ای به نام اثر گلخانه‌ای شده است. اثر گلخانه‌ای به نوبه خود موجب افزایش دمای کره زمین، آب شدن یخچال‌های طبیعی، تغییرات شدید آب و هوایی، از بین رفتن اکوسیستم و تخریب محیط‌زیست می‌شود. 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 گلخانه‌ای از طریق سازوکارهای مختلف انجام دهند. یکی از سازوکارهای مهم پروتکل کیوتو طرح مبادله سهمیه انتشار آلودگی است [۱]. به دلیل اینکه نیروگاه‌ها در صنعت برق منبع عظیم و دائمی انتشار گازهای گلخانه‌ای هستند، سیاست‌هایی برای کنترل و یا کاهش میزان آلودگی آن‌ها و همچنین افزایش تولید برق از منابع انرژی تجدیدپذیر در سال‌های اخیر انجام شده است. برای افزایش تولید انرژی پاک، سیاست‌های حمایتی از انرژی‌های تجدیدپذیر در کشورهای مختلف مطرح شده است. طرح‌های تعرفه تولید<sup>۱</sup>، پاداش تولید<sup>۲</sup> و الزامات سهمیه‌ای و گواهی سبز<sup>۳</sup> از جمله سازوکارهای

چکیده — سیستم مبادله سهمیه انتشار آلودگی از ابزارهای نوین کنترل آلودگی گازهای گلخانه‌ای است که توسط سیاستمداران برای کاهش آلودگی در صنایع آلاینده استفاده می‌شود. تخصیص سهمیه در این مکانیزم، موضوعی مهم و چالش‌برانگیز است. حق سابقه و حراج سهمیه از روش‌های متداول تخصیص سهمیه به شرکت‌ها می‌باشد. در فازهای ابتدایی این سیستم برای جلوگیری از کاهش سود شرکت‌ها، تمام یا قسمتی از سهمیه موجود به صورت رایگان و به روش حق سابقه به شرکت‌ها داده می‌شود. دو روش رایج برای تخصیص رایگان سهمیه به نیروگاه‌ها، استفاده از سابقه تولید انرژی الکتریکی و سابقه آلودگی تولیدی آن‌ها در گذشته است. تخصیص رایگان سهمیه آلودگی در فازهای اولیه برنامه سقف و تجارت سهمیه آلودگی صورت می‌گیرد. در فازهای بعدی این برنامه، دولت‌ها درصدی از سهمیه آلودگی را توسط مکانیزم حراج به شرکت‌های تولیدی به فروش می‌رسانند. در مکانیزم حراج ماهیانه هر کدام از نیروگاه‌ها با توجه به میزان نیاز خود، پیشنهاد قیمتی جداگانه برای دریافت سهمیه ارائه می‌دهند. در این مقاله، حراج سهمیه آلودگی و خرید و فروش سهمیه آلودگی در بازار آلودگی در کنار بازار برق مدل می‌شود. اثر بازار آلودگی بر سودآوری نیروگاه‌ها در بازار برق بررسی می‌شود

واژه‌های کلیدی — بازار برق؛ بازار آلودگی؛ حراج سهمیه آلودگی؛ شرکت‌های تولیدکننده انرژی الکتریکی؛ مدل کورنات؛ تابع عرضه سهمیه آلودگی

<sup>1</sup> Feed-in Tarrif

<sup>2</sup> Feed-in Premium

<sup>3</sup> Tradable Green Certificate

در ادامه مقاله، در بخش ۲ مقالات مربوط به برهم‌کنش بازار برق و بازار آلودگی و مدل‌های تعادلی در بازار برق مرور می‌شود. در بخش ۳ مدل مورد نیاز برای بررسی حراج آلودگی و بازار آلودگی بر بازار برق ارائه می‌شود و در بخش ۴ نتایج، تحلیل شبیه‌سازی‌ها و نتیجه‌گیری آورده می‌شود.

## ۲. مرور مقالات

برای مدل‌سازی 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، نقطه‌ای است که در آن واحدها هیچ انگیزه‌ای 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 چندجانبه 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 راه‌برد 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 [۶]. به علت اینکه مدل کورنات جزئیات بیشتری را می‌تواند پوشش دهد، برای بررسی برهم‌کنش 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 [۷].

در [۸]، مدل نش-کورنات برای شبیه‌سازی 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 [۹]، اثر حضور منابع بادی بر قیمت بازار برق در بلندمدت با استفاده از تعادل تابع عرضه بررسی شده است. در این مقاله نشان داده شده است که وقتی ظرفیت بادی نصب‌شده در سیستم از حد معینی بیشتر شود، تخمین قیمت آینده بازار برق به دلیل عدم وجود نقطه تعادل دشوار می‌شود. مرجع [۱۰]، برای شبیه‌سازی بازار برق چند انحصاری در حضور سیستم مبادله سهمیه آلودگی از مدل کورنات استفاده کرده است. در این مقاله مسئله حراج سهمیه آلودگی سالیانه

حمایتی از انرژی‌های نو است. از طرف دیگر برای کاهش آلودگی نیروگاه‌های سوخت فسیلی از سیاست‌های مالیات بر آلودگی<sup>۴</sup> و خرید و فروش سهمیه آلودگی در بازار آلودگی<sup>۵</sup> استفاده شده است. در بعضی از کشورها این سیاست‌ها همزمان با هم اجرا می‌شود. با تجدید ساختار در صنعت برق و افزایش رقابت‌پذیری شرکت‌ها در صنعت برق، سیستم مبادله سهمیه آلودگی از طریق بازار آلودگی در کشورهای توسعه‌یافته پیشنهاد شده است. با توجه به اهمیت این موضوع در آینده، در این مقاله به بررسی اثر بازار آلودگی بر نیروگاه‌ها در بازار برق پرداخته می‌شود.

دولت‌ها برای دستیابی به اهداف کاهش آلودگی، سقفی<sup>۶</sup> بر کل تولید آلودگی صنایع در سال‌های آینده می‌گذارند. این سقف به صورت سهمیه آلودگی<sup>۷</sup> بین صنایع تخصیص می‌یابد. در این سیستم نیروگاه‌ها و سایر کارخانه‌های آلاینده، باید معادل تولید آلودگی خود سهمیه آلودگی در اختیار داشته باشند. 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].

برای جلوگیری از کاهش شدید سود نیروگاه‌ها، سهمیه به نیروگاه‌ها تخصیص می‌یابد. تخصیص سهمیه در این مکانیزم، موضوعی مهم و چالش‌برانگیز است. حق سابقه<sup>۸</sup> و حراج<sup>۹</sup> سهمیه از روش‌های متداول تخصیص سهمیه به شرکت‌ها می‌باشند. در فازهای ابتدایی این سیستم، تمام یا قسمتی از سهمیه موجود به صورت رایگان و به روش حق سابقه به واحدها داده می‌شود. دو روش رایج برای تخصیص رایگان سهمیه به نیروگاه‌ها، استفاده از سابقه تولید انرژی الکتریکی<sup>۱۰</sup> و سابقه آلودگی تولیدی<sup>۱۱</sup> آن‌ها در گذشته است. در فازهای بعدی این برنامه، دولت‌ها درصدی از سهمیه آلودگی را توسط مکانیزم حراج به شرکت‌های تولیدی به فروش می‌رسانند. در مکانیزم حراج ماهیانه هر کدام از نیروگاه‌ها با توجه به میزان نیاز خود، پیشنهاد قیمتی جداگانه برای دریافت سهمیه ارائه می‌دهند.

<sup>4</sup> Emission Tax

<sup>5</sup> Emission Market

<sup>6</sup> Cap

<sup>7</sup> Emission Allowances

<sup>8</sup> Grandfathering

<sup>9</sup> Auction

<sup>10</sup> Output-based Allowance Allocation

<sup>11</sup> Emission-based Allowance Allocation

سیستم مبادله سهمیه آلودگی اشاره کرده است. سه روش مختلف برای تخصیص سهمیه معرفی شده است. روش مرسوم برای تخصیص رایگان سهمیه، استفاده از اطلاعات تاریخی نیروگاه‌ها از قبیل سهم تولید انرژی الکتریکی و آلودگی تولیدی آن‌ها در گذشته است. روش دیگر فروش سهمیه از طریق مکانیزم حراج به نیروگاه‌ها است. در مسئله حراج نیز میزان سهمیه عرضه‌شده توسط دولت در این مکانیزم مسئله مهمی است. سهمیه تخصیص‌یافته به هر نیروگاه و پیشنهاد قیمت خرید و فروش سهمیه آلودگی برای هر نیروگاه معلوم فرض شده است و روش تخصیص سهمیه و حراج سهمیه بر کارایی این سیستم بررسی نشده است.

با توجه به اینکه سیاست‌های زیست‌محیطی در دهه اخیر مطرح شده است، مقالات موجود در این زمینه اثر این سیاست‌ها را در بلندمدت بررسی کرده‌اند. در تعدادی از مقالات اثر حضور بازارهای 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 به صورت یک پارامتر ثابت در مدل‌سازی فرض شده است. در این مقاله برای بررسی اثر حراج سهمیه آلودگی و روش تخصیص سهمیه بر قیمت سهمیه آلودگی و سودآوری واحدها، بازار آلودگی در کنار بازار برق مدل می‌شود.

### ۳. فرمول‌بندی مسئله

در این مطالعه برای مدل‌سازی بازار برق از مدل کورنات استفاده می‌شود. 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. برای تعیین نقطه تعادل کورنات، سود کلیه شرکت‌ها باید به صورت همزمان حداکثر شود.

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

برای تخصیص سهمیه به واحدها و تأثیر آن بر رقابت بین آن‌ها بررسی شده است. مدل‌سازی بازار برق در دوره زمانی یک ساله و در نظر گرفتن حراج سهمیه سالیانه باعث می‌شود نتایج شبیه‌سازی از دقت لازم برخوردار نباشد.

در [۶] و [۱۱]، مسئله برنامه‌ریزی توسعه تولید در حضور سهمیه آلودگی و گواهی سبز به عنوان سیاست‌های زیست‌محیطی در بازه زمانی بلندمدت بررسی شده است و نشان داده شده است که بدون مشوق‌های اقتصادی، فناوری‌های سبز از نظر اقتصادی پایدار نخواهند ماند. در [۱۲]، بازار برق PJM توسط مدل کورنات و بازار سهمیه آلودگی Nox توسط مدل تغییرات قیمت حدسی شبیه‌سازی شده است و نشان داده شده است که قدرت بازار در هر یک از این دو بازار می‌تواند اثر قدرت بازار در بازار دیگر را تشدید کند.

در مرجع [۱۳]، اثر طرح مبادله سهمیه آلودگی بر سود صنعت برق استرالیا با استفاده از مدل کورنات بررسی شده است و نشان داده شده است که بعضی از شرکت‌ها کاهش سود زیادی را متحمل می‌شوند. برای بازار آلودگی دو سناریو قیمت در نظر گرفته شد است. در هر سناریو سود شرکت‌ها در دو روش تخصیص سهمیه بر اساس سابقه آلودگی و سابقه تولید واحدها محاسبه شده است و با سود شرکت‌ها با حالت پایه بدون حضور بازار آلودگی مقایسه شده است. شرکت‌هایی که واحدهای زغالی (آلاینده) بیشتری دارند سود بیشتری از دست می‌دهند. لذا میزان سهمیه رایگان تخصیص‌یافته به شرکت‌ها در بازار برق برای جبران سود از دست رفته محاسبه شده است. نتیجه‌گیری شده است که طرح مبادله سهمیه آلودگی با افزایش قیمت برق باعث کاهش آلودگی می‌شود. در این مرجع میزان سهمیه تخصیص‌یافته رایگان به نیروگاه‌ها لحاظ نشده است و فرض شده است که تمام واحدها باید سهمیه مورد نیاز خود را از بازار آلودگی تهیه کنند. قیمت سهمیه به صورت بیرونی و ثابت در مدل در نظر گرفته شده است که فرض درستی نیست.

در مرجع [۱۴]، اثر سیاست‌های مربوط به آلودگی از جمله طرح مبادله سهمیه آلودگی و منابع انرژی تجدیدپذیر بر بهره‌برداری از سیستم قدرت بررسی شده است. نشان داده شده است که سازوکارهای حمایتی از انرژی‌های نو، بر برنامه مبادله سهمیه آلودگی و تولید نیروگاه‌ها تأثیر می‌گذارد و نتیجه گرفته است که باید بین سازوکارهای حمایتی تجدیدپذیر و مقررات مربوط به کاهش آلودگی تعادلی وجود داشته باشد. در غیر این صورت باعث عدم کارایی این طرح‌ها می‌شود. در این مقاله، از تخصیص سهمیه به عنوان یک مسئله چالش‌برانگیز و عامل حیاتی در طراحی و کارایی

بهبودسازی محدود است. در ادامه مسئله بهینه‌سازی سود شرکت‌ها و رفاه اجتماعی حراج سهمیه آلودگی توسط بهره‌بردار اجتماعی<sup>۱۱</sup> فرمولبندی می‌شود.

### ۳.۱. بهینه‌سازی سود شرکت‌های تولیدی

سود شرکت f برابر است با:

$$\text{Max } \pi_f = 30 \sum_t D_t (p_t q_{f,t} - C_f(q_{f,t})) - p_{co2} \times E_f - \lambda_{auc} \times N_{bf} \quad (1)$$

مقید به:

$$p_t = a_t - b_t \left( \sum_f q_{f,t} \right) \quad \forall t \in T \quad (2)$$

$$q_{f,t}^{\min} \leq q_{f,t} \leq q_{f,t}^{\max} \quad \forall t \in T \quad (3)$$

$$C_{f,t}(q_{f,t}) = \alpha_f q_{f,t} + 0.5 \beta_f q_{f,t}^2 \quad \forall t \in T \quad (4)$$

$$p_{co2} = a' + b' (E_0 + \sum_f E_f) \quad (5)$$

$$E_f = (30 \times \sum_t D_t \eta_f q_{f,t}) - (N_f + N_{bf}) \quad (6)$$

در این مدل  $\pi_f$  سود شرکت f در ماه مورد مطالعه بر حسب دلار، T مجموع 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 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 است. قید (۴) مبین هزینه تولید انرژی الکتریکی است که به صورت یک تابع محدب درجه دو در نظر گرفته شده است.

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 (۱) مبین این هزینه (درآمد) است.  $P_{co2}$  قیمت سهمیه آلودگی بر حسب دلار بر تن،  $E_f$  میزان کسری (مازاد) سهمیه آلودگی شرکت f بر حسب تن،  $\eta_f$  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

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 اندازه‌گیری 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 ۹۰ درصد از کل سقف مجاز آلودگی، به صورت رایگان به واحدها تخصیص یابد. بدین منظور ابتدا نقطه تعادل بازار برق بدون در نظر گرفتن بازار 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.

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 عرضه سهمیه آلودگی تعیین می‌شود. تابع عرضه سهمیه یک تابع خطی صعودی است و نشان‌دهنده این است که با افزایش تقاضا برای سهمیه، قیمت سهمیه آلودگی زیاد می‌شود. در این بازار سایر صنایع آلاینده نیز حضور دارند که قیمت پذیر فرض شده‌اند. این صنایع به صورت یک تقاضای خالص سهمیه در تابع عرضه سهمیه آلودگی مدل می‌شوند. ۱۰ درصد از سقف آلودگی در حراج سهمیه آلودگی به فروش می‌رسد. حراج سهمیه آلودگی به صورت ماهانه انجام می‌شود. شرکت‌های تولیدکننده انرژی الکتریکی برای دریافت سهمیه آلودگی ماهانه، مازاد بر سهمیه رایگان تخصیص یافته به آن‌ها، پیشنهاد قیمت می‌دهند. به عبارتی هر شرکت می‌تواند با توجه به میزان سهمیه مورد نیاز خودش، در حراج شرکت کند و سهمیه اضافی بخرد. خرید و فروش مازاد یا کسری سهمیه آلودگی ماهانه در بازار آلودگی انجام می‌شود.

هر شرکت به صورت جداگانه تابع هدف خود یعنی سود ماهانه‌اش را بهینه می‌کند. سود ماهانه هر شرکت تابعی از سهمیه رایگان تخصیص یافته به آن‌ها و سهمیه خریداری شده از حراج است. در مسئله بهینه‌سازی سود هر شرکت، قیمت تسویه حراج سهمیه آلودگی مجهول است که از مسئله بهینه‌سازی حراج سهمیه بدست می‌آید. از طرف دیگر در مسئله بهینه‌سازی تابع هدف حراج، میزان کسری یا مازاد سهمیه شرکت‌ها مجهول است که از مسئله بهینه‌سازی سود شرکت‌ها بدست می‌آید. بنابراین با یک مسئله بهینه‌سازی دو سطحی مواجه هستیم که با توجه به قیود، هر سطح یک مسئله

۶	۵	۴	۳	۲	۱	
۳۰	۳۰	۳۲/۵	۱۰	۱۷/۵	۲۰	$\alpha_f (\$/MWh)$
-۰/۲۵	-۰/۲۵	-۰/۰۸۳۴	-۰/۶۲۵	-۰/۱۷۵	-۰/۲	$\beta_f (\$/MWh^2)$
-۰/۷۸	-۰/۷۲	-۰/۸	-۰/۹	-۰/۴	-۰/۴	$\eta_f (ton/MWh)$
۴۰	۳۰	۵۵	۵۰	۸۰	۸۰	$q^{max} (MW)$
۰	۰	۰	۰	۰	۰	$q^{min} (MW)$

جدول ۲: پارامترهای مربوط به بازار برق

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

جدول ۳: پارامترهای مربوط به بازار آلودگی

$E_0$	$b'$	$a'$
۷۰۰۰	۰/۰۵	۱۰

### ۴.۱. نقطه تعادل حراج

شرکت‌ها برای دریافت سهمیه بیشتر در حراج، پیشنهاد قیمت خود را تغییر می‌دهند. نقطه تعادل حراج سهمیه آلودگی و سهمیه خریداری‌شده نیروگاه‌ها در حراج برای مقایسه در جدول (۴) آورده شده است.

جدول ۴: پیشنهاد قیمت و سهمیه خریداری‌شده واحدها در حراج در دو روش

تخصیص سهمیه بر اساس سابقه تولید و سابقه آلودگی

واحد	واحد	واحد	واحد	واحد	واحد		
۶	۵	۴	۳	۲	۱		
۱/۰۱	۱/۰۷	۰	۰	۰	۰	پیشنهاد قیمت (\$/ton)	سابقه تولید
۳۶۹/۹	۲۰۶/۷	۰	۸۰/۱۳	۰	۰	سهمیه خریداری‌شده (ton)	
۰	۰	۰	۴	۱۳۰/۴۴	۳/۲	پیشنهاد قیمت (\$/ton)	سابقه آلودگی
۰	۰	۰	۵۳۰/۹	۷۱۱۹/۹	۹۳۸/۸	سهمیه خریداری‌شده (ton)	

در روش تخصیص بر اساس سابقه تولید، واحدهای ارزان و تمیز ۱، ۲ و ۴ سهمیه‌ای دریافت نمی‌کنند. واحد ۳ با پیشنهاد قیمت صفر، بیشترین سهمیه آلودگی را دریافت می‌کند. واحدهای ۵ و ۶ که ظرفیت کوچکی دارند نیز سهمیه می‌خرند. واحد ۶ که از واحد ۵ کثیف‌تر است، سهمیه بیشتری دریافت می‌کند. لذا در نقطه تعادل حراج و روش تخصیص بر

$E_0$  میزان کسری (مازاد) سهمیه آلودگی صنایع دیگر از قبیل کارخانه‌ها صنعتی، پتروشیمی، سیمان و .... است. قیمت سهمیه آلودگی در بازار آلودگی توسط تابع عرضه و میزان تقاضای سهمیه آلودگی تعیین می‌شود. قید (۵) مبین تابع عرضه سهمیه آلودگی است.  $E_f$  مثبت مبین کسری سهمیه آلودگی و  $E_f$  منفی نشان‌دهنده مازاد سهمیه آلودگی است. جمله چهارم معادله (۱) مبین هزینه خرید سهمیه از حراج است.  $N_{bf}$  سهمیه خریداری‌شده شرکت  $f$  در حراج بر حسب تن،  $\lambda_{auc}$  قیمت تسویه حراج بر حسب دلار بر تن، هست که از مسئله بهینه‌سازی برنامه‌ریز اجتماعی حاصل می‌شود.

### ۳.۲. پیشینه سازی تابع هدف حراج

تابع هدف حراج که توسط بهره‌بردار پیشینه می‌شود، برابر مجموع پیشنهاد قیمت شرکت‌ها برای دریافت سهمیه در حراج منهای هزینه خرید سهمیه در بازار سهمیه آلودگی است.

$$\text{Max } J_{sp} = \sum_f (bid_f N_{bf} - p_{co2} E_f) \quad (7)$$

مقید به:

$$\sum_f N_{bf} \leq 10\% CAP \quad (\lambda_{auc}) \quad (8)$$

$bid_f$  پیشنهاد قیمت خرید سهمیه شرکت  $f$  در حراج بر حسب دلار بر تن و  $CAP$  سقف آلودگی در یک ماه است. در قید (۸) کل سهمیه فروخته شده در حراج حداکثر برابر ۱۰ درصد از سقف آلودگی در نظر گرفته شده است.

### ۴. اعمال مدل پیشنهادی به شبکه آزمون

در این بخش مدل‌های ارائه‌شده به شبکه آزمون ۳۰ باسه IEEE با صرف‌نظر از قیود انتقال اعمال می‌گردد. برای تعیین نقطه تعادل، بهینه‌سازی‌های کوپل شرکت‌های مختلف باید با هم حل شوند. برای حل این مسئله بهینه‌سازی دو سطحی، تابع لاگرانژ هر سطح به صورت جداگانه تشکیل می‌شود. شرایط بهینگی KKT برای کلیه شرکت‌ها و بهره‌بردار اجتماعی با هم حل می‌شود. برای این منظور از نرم‌افزار GAMS استفاده می‌شود.

جدول ۱: مشخصات واحدهای تولیدی شبکه آزمون ۳۰ باسه IEEE

واحد	واحد	واحد	واحد	واحد	واحد
------	------	------	------	------	------

از روش سابقه تولید بیشتر است. تخصیص بر اساس سابقه تولید باعث تشویق نیروگاه‌های تمیز می‌شود.

اساس سابقه تولید واحدهای با ضریب آلودگی بیشتر، سهمیه بیشتری می‌خرند.

### ۴.۳. قیمت سهمیه آلودگی

قیمت سهمیه در بازار آلودگی و حراج سهمیه در جدول (۵) آورده شده است. با توجه به نتایج این جدول، می‌توان نتیجه گرفت که قیمت تعادلی بازار آلودگی و حراج سهمیه آلودگی در روش سابقه آلودگی از روش سابقه تولید بیشتر است.

در روش تخصیص بر اساس سابقه آلودگی واحد ۲ که ارزان‌ترین، تمیزترین و داری بیش‌ترین ظرفیت تولیدی است، با پیشنهاد قیمت بیشتر نسبت به سایر واحدها، سهمیه بیشتری در حراج دریافت می‌کند. از طرفی واحد ۳ با بیش‌ترین ضریب آلودگی نیز سهمیه می‌خرد که به علت ارزان بودن این واحد نسبت به واحدهای ۴، ۵ و ۶ هست. لذا در روش تخصیص بر اساس سابقه آلودگی واحدهای تمیز سهمیه می‌خرند.

به طور کلی وجود و یکتایی نقطه تعادل را در این مدل نمی‌توان اثبات کرد. با افزایش فروش سهمیه در حراج مشخص می‌شود که اگر سهمیه عرضه‌شده در حراج از ۱۵/۵ درصد سقف آلودگی بیشتر شود، نقطه تعادل وجود ندارد.

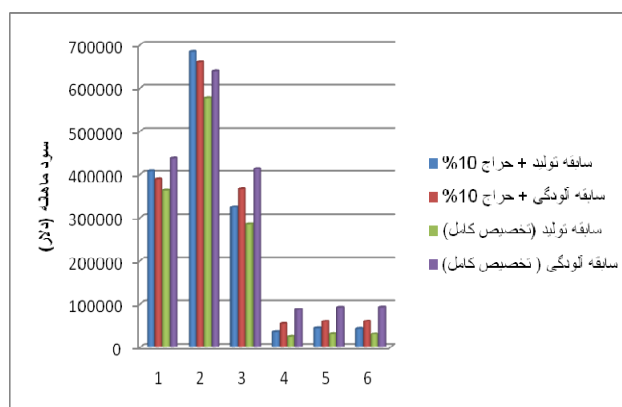
جدول ۵: قیمت سهمیه در بازار آلودگی و حراج سهمیه آلودگی بر حسب دلار

بر تن

حراج آلودگی	بازار آلودگی	
۳/۲۸	۲۸/۵۳	قیمت سهمیه در روش تخصیص سهمیه بر اساس سابقه تولید (\$/ton)
۷/۴۲	۳۵/۶۷	قیمت سهمیه در روش تخصیص سهمیه بر اساس سابقه آلودگی (\$/ton)

### ۴.۲. سود

شکل (۱) سود ماهانه واحدها را در حضور همزمان بازار آلودگی و حراج سهمیه آلودگی و روش‌های مختلف تخصیص سهمیه نشان می‌دهد.



شکل ۱: سود ماهانه واحدها در نقطه تعادل بر حسب دلار

در این فصل حراج (مزایده) سهمیه مدل‌سازی شد و نتایج حاصل از شبیه‌سازی در حالت‌های مختلف برای مقایسه آورده شد. با توجه به اینکه برنامه سقف و تجارت آلودگی به تازگی در کشورهای توسعه‌یافته مطرح شده است، فاز اول اجرای این طرح معمولاً به منظور یادگیری شرکت‌ها با سازوکار بازار آلودگی و طریقه خرید و فروش سهمیه آلودگی انجام می‌شود. در فازهای بعدی اجرای این برنامه معمولاً دولت‌ها در سال‌های بعد به منظور کاهش موثر آلودگی، سقف آلودگی را کاهش می‌دهند و تلاش می‌کنند از تخصیص رایگان سهمیه‌ها به سمت حراج کامل سهمیه‌ها حرکت کنند. در نتیجه واحدهای تمیزتر و با راندمان بیشتر، تشویق می‌شوند و واحدهای با آلاینده‌گی زیاد با انجام پروژه‌های کاهش‌دهنده کربن، آلودگی خود را کاهش می‌دهند و شرکت‌ها برای افزایش میزان رقابت‌پذیری خود در بازار برق، واحدهای تمیزتر را خریداری کنند.

با حراج سهمیه آلودگی و تخصیص بر اساس سابقه تولید، واحدهای کثیف‌تر سعی می‌کنند سهمیه از حراج خریداری کنند. در روش سابقه آلودگی واحدهای تمیزتر سهمیه بیشتری در حراج برنده می‌شوند. قیمت تعادلی سهمیه آلودگی در بازار آلودگی و قیمت تسویه حراج در روش سابقه آلودگی از روش سابقه تولید بیشتر است. سود واحدهای تمیزتر در روش

با توجه به اینکه حراج سهمیه، امکان رقابت برای خرید سهمیه را برای شرکت‌های تولیدی فراهم می‌کند، سود همه واحدها به جز واحد ۲، کمتر از حالت تخصیص کامل بر اساس سابقه آلودگی و بیشتر از تخصیص کامل بر اساس سابقه تولید است. همان‌طور که از شکل مشخص است، سود واحد ۲ که تمیزترین و ارزان‌ترین واحد است، با حراج سهمیه آلودگی افزایش می‌یابد. سود واحدهای ۱ و ۲ در حراج ۱۰٪، در روش سابقه تولید از سابقه آلودگی بیشتر در حالی که سود واحدهای ۳، ۴، ۵ و ۶ در روش سابقه آلودگی

Scheme in Australian Electricity Market". *IEEE Transactions on Power System*, vol. 25, no. 1, 2010.

- [14] [29] 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*, Volume 44, Issue 1, January 2013, Pages 520-529.
- [15] [17] M. J. Osborne, *An introduction to game theory*, Oxford University Press, August 2003.

سابقه تولید و سود واحدهای کثیف‌تر در روش سابقه آلودگی بیشتر نسبت به حالت دیگر است. بنابراین می‌توان گفت مکانیزم حراج و تخصیص به روش سابقه تولید واحدهای تمیزتر را تشویق می‌کند. اما این مکانیزم همراه با روش تخصیص بر اساس سابقه آلودگی برای واحدهای کثیف سودمندتر است زیرا این واحدها در حراج سهمیه‌ای خریداری نمی‌کنند و سهمیه مازاد خود را نیز در بازار آلودگی به قیمت بیشتری نسبت به سابقه تولید به فروش می‌رسانند.

با توجه به این موارد می‌توان گفت برای فاز اول برنامه سقف و تجارت آلودگی، برای اینکه سود نیروگاه‌ها کاهش نیابد و از رقابت‌پذیری شرکت‌ها کاسته نشود، تخصیص رایگان سهمیه بر اساس سابقه آلودگی گزینه بهتری برای نیروگاه‌ها هست. اما برای اینکه واحدها مجبور شوند تا اقداماتی را برای کاهش آلودگی خود در بلندمدت انجام دهند، تخصیص رایگان سهمیه بر اساس سابقه تولید و فروش سهمیه از طریق مزایده سهمیه به واحدها پیشنهاد می‌شود.

## منابع

- [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] P. Linares, F. Javier Santos, M. Ventosa and L. Lapedra, "Incorporating oligopoly, CO2 emissions trading and green certificates into a power generation expansion model," *Automatica*, 44, 1608-1620, 2008.
- [7] B. Willems, I. Rumiantseva and H. Weigt, "Cournot versus Supply Functions: What does the data tell us?," *Energy Economics*, 31, 38-47, 2009.
- [8] 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.
- [9] 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."
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Y. Chen, and B. F. Hobbs, "An Oligopolistic Power Market Model With Tradable NOx Permits". *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 20, no. 1, 2005.
- [13] [28] X. Zhou, G. James, A. Liebman, Z. Yang Dong and C. Ziser "Partial Carbon Permits Allocation of Potential Emission Trading