



The 4th Iranian Conference
on Renewable Energy
& Distributed Generation
(I C R E D G 2 0 1 6)

چهارمین کنفرانس
انرژی‌های تجدیدپذیر
و تولید پراکنده ایران



اسفندماه ۱۳۹۴

ICREDG2016



دانشگاه مشهد

بسمه تعالی

کواهی ارزش مقاله

بدینوسیله کواهی می‌گردد مقاله با عنوان:

" تشخیص تبانی در بازارهای برق "

پیمان رزمی، مجید علومی باکی

در چهارمین کنفرانس انرژی‌های تجدیدپذیر و تولید پراکنده ایران که مورخ ۱۳ و ۱۴ اسفندماه سال ۱۳۹۴ در جوار بارگاه ملکوتی حضرت امام رضا علیه السلام و در دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد برگزار شد با موفقیت ارزش گردید.

محمد حسین جاویدی دشت‌یاسن
دبیر کنفرانس

تشخیص تبانی در بازارهای برق

پیمان رزمی، مجید علومی بایگی

تشخیص و کلاسه بندی تبانی استفاده شده است. الگوریتم کارت از روشهای درخت‌های تصمیم‌گیری و الگوریتم ماشین‌های بردار پشتیبان برای این منظور استفاده شده است. روش پیشنهادی به یک بازار برق دارای چهار شرکت تولیدی و ده ژنراتور اعمال شده است. شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که ماشین‌های یادگیرنده با دقت مناسبی تبانی را تشخیص داده و آن را کلاسه بندی می‌کند.

واژه‌های کلیدی - قدرت بازار، تبانی، تشخیص تبانی، یادگیری ماشینی، ماشین‌بردار پشتیبان، درخت تصمیم

۱- مقدمه

در یک بازار رقابتی^۱ برق، واحدهای نیروگاهی نمی‌توانند قیمت بازار را تحت تاثیر قرار دهند و به بیان دیگر آنها قیمت را از بازار دریافت خواهند کرد. در چنین حالتی آنها تلاش خواهند کرد تا مقدار تولید خود را با توجه به قیمت بازار تعیین کنند. در این شرایط مقدار بهینه تولید بر اساس نقطه تلاقی منحنی هزینه نهایی واحد با قیمت بازار محاسبه می‌شود [۱]. اما در یک بازار بر پایه رقابت چندگانه^۲ این امکان برای شرکتهای تولیدی وجود دارد تا قیمت بازار را تحت تاثیر قرار دهند. شرکتهایی که خواستار افزایش قیمت بازار است می‌تواند این عمل را با افزایش قیمت پیشنهادی خود انجام دهد. آنها می‌توانند این هدف را به شکل غیر مستقیم از کاهش تولید خود برآورده سازند یا اینکه هردو عمل را همزمان انجام دهند. در این حالت بازار مشابه یک سیستم اقتصادی است که بازیگران آن تمایل به کنترل آن دارند. شرکتهایی که قابلیت تاثیرگذاری به یکی از دو طریق فوق بر قیمت بازار را دارند و می‌توانند آن را از سطح رقابتی افزایش دهند دارای قدرت بازار^۳ هستند [۲]، [۳] و [۴]. این عمل باید به شکل سودمندانه انجام گرفته باشد یعنی از بالا رفتن قیمت و

چکیده - بازار برق، به دلیل داشتن ویژگی‌ها و شرایط حاکم بر آن نمی‌تواند به صورت یک بازار رقابت کامل در نظر گرفته شود و به دلیل این که تعداد تولیدکنندگان خیلی محدود می‌باشد هم چنین وجود قیود انتقال می‌تواند از آن به عنوان یک بازار رقابت چند جانبه و یا انحصار چند جانبه یاد کرد. در این حالت در چنین فضایی بازیگران و عوامل بازار که دارای قدرت هستند می‌توانند قیمت بازار را دستکاری کرده و آن را به مدت طولانی از مقدار رقابتی آن افزایش دهند. این عملکرد از سوی بازیگران با فضای رقابتی بازار منافات داشته و باعث از بین بردن کارایی بازار خواهد شد. از این رو بهره‌بردار مستقل سیستم برای حفظ فضای رقابتی بازار و بهبود بهره‌وری بازار باید دائماً نقاط کار بازار را پیوسته بررسی کند و در صورت مشاهده هر گونه تبانی از ادامه آن جلوگیری کند. هدف از این مقاله ارائه ابزاری مناسب برای تشخیص و کلاسه بندی انواع تبانی می‌باشد گونه‌ای که بهره‌بردار با تحلیل داده‌های بازار روز بعد بتواند تبانی را تشخیص داده و آن را کلاسه بندی کند. برای این منظور از ماشین‌های یادگیرنده و آموزش پذیر استفاده شده است. یکی از مشکلات موجود در تشخیص و کلاسه بندی تبانی عدم وجود داده‌های واقعی بازار اعم از داده‌های بازار بدون تبانی شرکت‌ها و داده‌های واقعی حین تبانی‌های مختلف می‌باشند. برای رفع این مشکل نقاط تعادل نش بازار را برای تبانی‌های مختلف و برای بارهای مصرفی مختلف محاسبه شده است. با توجه به این که سیستم در نزدیکی نقطه تعادل کار میکند نقاط حول نقطه تعادل در هر بار مصرفی و در هر نوع تبانی به عنوان نقطه کار سیستم در نظر گرفته شده است. نقاط کار ایجاد شده برای حالت بدون تبانی و برای تبانی‌های مختلف برای آموزش، آزمون و نهایتاً برای

پیمان رزمی، دانشجو کارشناسی ارشد دانشگاه فردوسی، مشهد،
(email: peyman_razmi86@hotmail.com)

مجید علومی بایگی، دانشیار دانشگاه فردوسی، مشهد،
(email: m_ooloomi@yahoo.com)

¹competitive market

²oligopoly market

³Market Power

تقاضا نخواهد گذاشت به همین خاطر امکان افزایش قیمت‌ها توسط تولیدکنندگان وجود دارد. بنابراین برای پیشگیری از سود غیرمجاز شرکت کنندگان باید تباری را تشخیص داد و با متخلفین برخورد کرد. لذا تشخیص تباری را می‌توان امری مهم و ضروری در جهت کمک به رقابتی تر شدن و سالم بودن فضای رقابتی بازار برشمرد.

برای تشخیص تباری^۲ چندین رویکرد وجود دارد. یک روش رایج استفاده از روش‌های یادگیری نظارت شده می‌باشد. مرجع [۷] اشاره دارد که از آنجایی که هیچ داده واقعی از فعالیت‌های بازیگران مبنی بر تباری در دوره‌های قبلی برای آموزش مدل در اختیار نیست و اگر هم در اختیار باشد مشخص نیست که کدام داده‌ها مربوط به تباری و انواع مختلف آن می‌باشد از این رو بعضی مقالات، بیشتر از الگوریتم خوشه بندی گراف که یکی از روش‌های یادگیری غیر نظارتی به شمار می‌رود استفاده کرده‌اند. مرجع [۷] برای کشف و تشخیص تباری، طی دو مرحله غربالگری و ارزیابی، ابتدا الگوهای رفتاری مربوط به تباری را بررسی کرده، سپس در مرحله غربالگری با استفاده از آنالیز تغییر نقطه^۳ که با کمک رویکردهای داده‌کاوی انجام گرفته شده است رفتار هر عامل را به دقت بررسی کرده و در جستجوی نقص ساختاری و رفتار مشکوک در قیمت‌دهی هر بازیگر می‌باشد. چنانچه در رفتار هر عامل تغییر نقطه مشکوکی مشاهده گردد آن عامل به عنوان کاندید جهت بررسی بیشتر به مرحله ارزیابی منتقل شده که در این مرحله با استفاده از قوانین اماری، مشابهت رفتاری و ارتباط این کاندیدها به یکدیگر بررسی می‌گردد. مرجع [۶] تباری واحدهای تولیدی با کمک نظریه بازی‌ها مدل‌سازی شده و میزان سود ناشی از افزایش قیمت در تباری با میزان سود در اثر افزایش قیمت در حالت انحصاری باهم مقایسه شده است. در مرجع [۸] میزان پتانسیل اعمال تباری واحدها و چگونگی تاثیرگذاری آن بر کل بازار بررسی شده است.

در این مقاله با استفاده از دو الگوریتم پرکاربرد یادگیری ماشینی، ماشین‌های بردار پشتیبان^۴ و درخت‌های تصمیم-

کاهش مقدار تولید، سودی نصیب آنها شده باشد. علاوه بر بالا بردن قیمت از سطح رقابتی، توانایی شرکتها در حفظ این قیمت برای دوره‌ای از زمان نیز اهمیت دارد. اقتصاددانها بر پایه همین دو نکته مفهوم قدرت بازار را تعریف کرده‌اند [۵]. افزایش قیمت-ها علاوه بر سوء استفاده از قدرت بازار تک تک شرکتها، می‌تواند از تصمیم مشترک تمامی شرکتها و یا برخی از آنها در افزایش قیمت خود ناشی شود. به عبارت دیگر شرکتها می‌توانند جهت بالا بردن قیمت بازار از قیمت رقابتی آن باهم ائتلاف داشته باشند. اگر این ائتلاف که طی مدت زمان زیاد انجام شود و منجر به افزایش قیمت بازار گردد تحت عنوان تباری^۱ مطرح می‌شود. این نوع از تباری‌ها به صورت توافق صریح انجام می‌گیرد که شرکت‌ها برای کنترل قیمت بازار از هم ارتباط گرفته و اطلاعات محرمانه هم را در اختیار هم خواهند گذاشت. بر خلاف اعمال قدرت بازار که شرایط مانند سطح بار می‌تواند بر میزان اعمال آن تاثیر گذار باشد، در حالی که در تباری این امکان وجود دارد که شرکتها با همکاری همدیگر بتوانند حتی در شرایطی مانند پایین بودن سطح بار و یا سایر شرایط شبکه نیز مقدار قیمت بالایی رو طلب کنند. از این رو همانطور که اشاره شد بازار برق از بسیاری از جهات یک بازار بی‌همتا است و بدلیل شمار اندک بازیگران و تولیدکنندگان و همچنین به خاطر یکسان و همگن بودن کالای تولیدی محلی مناسب برای انجام تباری بشمار می‌رود. حساسیت تقاضا در بازار می‌تواند عرصه را برای انجام تباری تنگ‌تر کند. چنانچه حساسیت تقاضا در بازار برق برای انواع تقاضا چه مصرف کنندگان خانگی و چه مصرف کنندگان صنعتی متفاوت است اما به هر حال مقدار آن در بازار برق در کوتاه مدت کم بوده و قابل توجه نمی‌باشد [۶]. در چنین حالتی رقابت کردن بر سر مقدار قیمت پیشنهادی برای تولید کنندگان مخاطره آمیز بوده و همین مسئله امکان همکاری بین شرکتها جهت تبادل اطلاعات را افزایش داده و با هماهنگی که برسر مقدار قیمت کالا باهم خواهند داشت موجب افزایش قیمت خواهند شد. از سوی دیگر بخاطر این که محصول تولیدی دارای کشش خیلی کمی می‌باشد در این صورت بازیگران و تولیدکنندگان این انتظار را خواهند داشت که افزایش قیمت‌ها تاثیر چندانی از لحاظ کاهش

²Collusion Detection

³Chenge Point Analysis

⁴Support Vector Machine

¹Collusion

۳- شبیه‌سازی و تحلیل نتایج

در این بخش روش یادگیری ماشین جهت تشخیص تباری به بازار برق بیان شده طبق جدول زیر اعمال و نتایج مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرد. همانطور که مشاهده می‌شود بازار برق مورد مطالعه متشکل از چهار شرکت تولیدی است که هر شرکت دارای چندین واحد نیروگاهی است. جدول (۱) واحدهای متعلق به هر شرکت و جدول (۲) مشخصات واحدهای هر شرکت را نشان می‌دهد.

جدول ۱ واحدهای متعلق به هر شرکت

واحدهای متعلق به هر شرکت			نام شرکت
واحد ۳	واحد ۲	واحد ۱	شرکت ۱
---	واحد ۵	واحد ۴	شرکت ۲
---	واحد ۷	واحد ۶	شرکت ۳
واحد ۱۰	واحد ۹	واحد ۸	شرکت ۴

جدول ۲ مشخصات هر واحد نیروگاهی

unit	a(\$/MWh)	b(\$/MWh ²)	Qsmax(MW)
1	25	0.032	800
2	20	0.05	600
3	30	0.038	600
4	30	0.042	400
5	26	0.06	650
6	32	0.04	700
7	22	0.055	700
8	35	0.036	600
9	25	0.045	400
10	20	0.03	600

ضرایب جدول (۲) ضرایب تابع هزینه حدی یعنی $MC=a+b*Qs$ (\$/MWh) می‌باشد. با کمک این مشخصات داده-هایی شبیه داده‌های واقعی بازار در حالت غیر تباری و حالت‌های وقوع تباری‌های مختلف ایجاد کرده و سپس تشخیص تباری در حالت‌های مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای ایجاد داده-های شبه واقعی در هنگام وقوع تباری، ابتدا نقطه تعادل بازار با فرض وقوع تباری‌های مختلف تعیین می‌شود. برای کار تشخیص و کشف وجود تباری باید مولفه‌های زیادی در کنار هم بررسی شوند. برای این منظور از سه معیار زیر در نقطه تعادل و یا نقاط

گیری^۱ [۹]، [۱۰]، [۱۱]، [۱۲]، [۱۳] و [۱۴] هم چنین با کمک داده‌های شبیه داده‌های بازار واقعی که برای آموزش مدل استفاده می‌شود به بررسی و تشخیص وجود تباری پرداخته و شرکت‌های حاضر در تباری تشخیص داده شده است.

۲- مدل‌سازی بازار روز بعد

هدف از مدل‌سازی عملکرد بازار بدست آوردن داده‌های شبیه داده‌های واقعی می‌باشد ولی از آنجایی که نقطه کار واقعی بازار در دسترس نیست ابتدا باید بتوان نقطه تعادل^۲ نش بازار را پیدا کرد. نقطه تعادل نش نقطه ای است که همه طرف‌های شرکت کننده اعم از فروشندگان و خریداران به بهترین و مطلوب ترین سود خودشان دست پیدا کنند. به عبارت دیگر کوچکترین انحراف از نقطه تعادل نش توسط تولیدکنندگان سود آنها را کاهش خواهد داد. برای شروع مدل‌سازی بازار لازم است که ابتدا فرضیاتی را در مورد شرایط و چگونگی اجرای عملیات بازار در محیط ساختار تجدید یافته صنعت برق در نظر گرفت. برای این منظور فرض می‌شود بازار برقی که پیش رو است براساس نوع مبادله انرژی، یک بازار برق مبتنی بر سیستم حوضچه می‌باشد. استراتژی قیمت‌دهی که بازیگران برای پیشنهاد قیمت خود در پیش می‌گیرند فرض می‌شود به صورت مدل تابع عرضه باشد. مدل تابع عرضه بر مبنای نظریه تئوری بازی‌هاست. در این مقاله فرض شده است که بازار برق ایجاد شده براساس دوره زمانی تبادلات به صورت یک بازار روز بعد می‌باشد.

از آنجایی که برای بررسی و تشخیص تباری باید داده‌های واقعی بازار در دسترس باشد علاوه بر این چون داده‌های واقعی بازار محرمانه بوده و دسترسی به آنها مشکل است لذا برای تحقیقات نیاز است که داده‌های شبیه داده‌های واقعی را ایجاد کرد. داده-های واقعی بازار و یا نقطه کار بازار داده‌هایی می‌باشند که حول نقطه تعادل نش بازار در حال تغییر هستند. لذا برای دست یابی به داده‌های شبیه واقعی باید نقطه تعادل نش بازار را بدست آورد. در این مقاله برای محاسبه نقطه تعادل نش بازار از مرجع [۱۵] استفاده شده است.

¹Decision Tree

²Equilibrium Point

درصدی از مقدار α است که نشان دهنده مقدار انحراف یافته از نقطه تعادل می‌باشد. برای آنکه دقت ماشین یادگیرنده در بازه های مختلف مشخص گردد. پارامتر h از ± 2 درصد تا ± 10 درصد تغییر داده شده، و در هر حالت ماشین به صورت مستقل آموزش و اعتبار سنجی شده است. جهت ایجاد نقاط کار شبه واقعی در حالت تباری بین شرکت‌ها، باید عملکرد تباری شرکت‌ها را در بازار مدل‌سازی کرد. برای مدل‌سازی تباری، شرکت‌هایی که با هم تباری می‌کنند، به عنوان یک شرکت در نظر گرفته می‌شوند. با این کار هر شرکت بجای اینکه سود هر واحد خود را بهینه کند سود مجموع واحدهای دو شرکت را بهینه خواهند کرد. نتیجه‌ای که با این کار حاصل می‌شود افزایش قیمت و افزایش سود شرکت‌ها خواهد بود. به این ترتیب می‌توان نقطه تعادل یا نقطه کار مشابه با نقطه کار واقعی بازار را برای حالت های مختلف تباری اعم از تباری های دوجانبه و چند جانبه بدست آورد. سناریوهای مختلف تباری دو جانبه و سه جانبه برای شبکه مورد مطالعه به صورت جدول (۳) می‌باشد.

جدول ۳ سناریوهای مختلف تباری و برجسب های آنها

وضعیت	نوع تباری	برجسب
حالت بدون تباری	بدون تباری	۱
شرکت های ۱ و ۲	تباری دوجانبه	۲
شرکت های ۱ و ۳		۳
شرکت های ۱ و ۴		۴
شرکت های ۲ و ۳		۵
شرکت های ۲ و ۴		۶
شرکت های ۳ و ۴		۷
شرکت های ۱ و ۲ و ۳		تباری سه جانبه
شرکت های ۱ و ۲ و ۴	۹	
شرکت های ۱ و ۳ و ۴	۱۰	
شرکت های ۲ و ۳ و ۴	۱۱	

طبق جدول ۳ برای هر حالت نقطه تعادل را در ۴۱ بار مصرفی مختلف با پله‌های ۵۰ مگاواتی محاسبه و در این نقاط تعادل سه ویژگی را محاسبه کرده و تشخیص تباری و کلاسه‌بندی آن را در حالتی که نقطه کار واقعی بازار بر نقطه تعادل واقع می‌باشد بررسی می‌شود. سپس با انحراف نقطه تعادل طبق مطالب بیان شده در بخش قبل نقاط کار مختلف را بررسی و دوباره سه ویژگی را این بار در نقاط حول نقطه تعادل محاسبه می‌شود و کار تشخیص تباری انجام می‌شود. ابتدا فرض می‌شود که نقطه کار بازار بر نقطه تعادل نش بازار واقع می‌باشد در این صورت طبق بخش بعد تشخیص تباری بررسی می‌گردد.

حول آن به عنوان سه ویژگی برای ماشین‌های یادگیرنده جهت تشخیص تباری استفاده می‌شود:

۱- هزینه حدی واحدها

۲- مقدار پیشنهاد قیمت تولیدکنندگان

۳- شاخص لرنر

هزینه نهایی یک واحد نیروگاهی جزء اطلاعات محرمانه برای آن واحد نیروگاهی تلقی می‌شود و دسترسی به اطلاعات دقیق این مقدار توسط سایرین غیر ممکن بوده ولی در اینجا فرض می‌شود که بهره‌بردار مستقل سیستم با استفاده از مدلی که برای تخمین تابع هزینه حدی واحدها دارد اطلاعات هزینه حدی همه نیروگاه‌ها را می‌داند. در اینجا هدف از شبیه سازی بازار، بدست آوردن ویژگی های فوق حول نقطه تعادل و ایجاد نقطه کار شبیه نقطه کار واقعی بازار هنگام وقوع تباری، برای تباری‌های مختلف می‌باشد. برای بررسی و تشخیص تباری نمی‌توان تنها به یک دوره خاص بسنده کرد و برای بررسی بیشتر باید داده‌های بازار مربوط به یک دوره طولانی مدت را بررسی و مورد ارزیابی قرار داد. برای این منظور دوره طولانی مدتی را در نظر گرفته و فرض شده است که در آن بار از ۳۰۰۰ مگاوات تا مقدار ۵۰۰۰ مگاوات با پله‌های ۵۰ مگاواتی در حال تغییر است. بنابراین نقاط تعادل بازار را در این بار مصرفی که با پله‌های ۵۰ مگاواتی در حال تغییر می‌باشد محاسبه خواهد شد. این مقادیر مصرفی از ساعت ۱۲ ظهر تا ۸ شب منظور شده است که از مقدار ۳۰۰۰ مگاوات شروع شده و در هر ربع ساعت ۵۰ مگاوات به مقدار قبلی اضافه می‌شود.

۳-۱- تشخیص و کلاسه‌بندی تباری در حالت مقید بودن واحدها

۳-۱-۱) ایجاد داده

نقطه کار بازار برق در اکثر مواقع بر نقطه تعادل بدست آمده منطبق نبوده بلکه در اطراف آن نوسان خواهد کرد. بنابراین نقاط کار حول نقطه تعادل به عنوان نقاط کار شبه نقطه کار واقعی بازار در نظر گرفته می‌شود. برای این منظور عرض از مبدا منحنی عرضه پیشنهادی هر واحد حول مقدار آن در نقطه تعادل تغییر داده می‌شود و نقاط کار حاصل به عنوان نقطه کار شبه نقطه کار واقعی منظور می‌شود. بازه تغییرات عرض از مبدا منحنی عرضه پیشنهادی هر واحد بعلاوه منهای ده درصد مقدار آن در نقطه تعادل در نظر گرفته می‌شود. بنابراین عرض از مبدا مقدار پیشنهادی هر واحد به صورت تصادفی یک مقدار در بازه $(1-h)\alpha$ ، $(1+h)\alpha$ در نظر گرفته می‌شود، که α پیشنهاد قیمت واحد و h درصد انحراف می‌باشد. منظور از درصد انحراف

۳-۱-۲) تشخیص و کلاسه بندی تبانی با در نظر گرفتن نقطه تعادل به عنوان نقطه کار بازار

جدول ۵ نقطه تعادل حالت تبانی شرکت‌های ۱ و ۲ برای بار ۳۰۰۰ مگاوات

واحد	مقدار عرض از مبدا قیمت پیشنهادی (دلار بر مگاوات ساعت)	مقدار توان تولیدی (مگاوات)
۱	۳۷,۳۲۱	۳۴۸,۲۵
۲	۳۲,۳۲۱	۳۲۲,۸۸
۳	۴۲,۳	۱۶۱,۶
۴	۴۲,۳	۱۴۶
۵	۳۸,۳	۱۶۹,۰۶
۶	۳۶,۲	۳۰۵,۹
۷	۲۶,۲	۴۰۴,۳
۸	۴۲,۰۸	۱۷۷,۳
۹	۳۲,۰۸	۳۶۴,۱
۱۰	۲۶,۸۷	۶۰۰

برای تشخیص و کلاسه‌بندی تبانی باید نمونه‌های مربوط به حالت رقابتی و حالت‌های مختلف تبانی را طبق جدول ۳ برچسب زده و طی فرآیند آموزش، ماشین یادگیرنده این نمونه‌ها را یادگرفته تا اینکه با کمک مدلی که طبق فرآیند آموزش ایجاد می‌کند نمونه‌های مورد آزمایش را به یکی از ۱۱ حالت نسبت دهد. برای این کار مرحله آموزش ۱۰ بار اجرا می‌شود و در هر بار داده‌های اعتبار سنجی شانس حضور در آموزش مدل را خواهند داشت. این روش به روش آموزش و اعتبار سنجی k باره^۱ معروف است. ابتدا فرض می‌شود که نقطه کار بازار بر نقطه تعادل منطبق می‌باشد از این رو طبق حالت‌های مطرح شده برای ۱۱ دسته، طبقه‌بندی این حالت‌ها انجام می‌شود. برای ایجاد نقطه تعادل در حالت بدون تبانی فرض می‌شود که تقاضای مصرفی مصرف‌کنندگان برابر با ۳۰۰۰ مگاوات می‌باشد. از این رو نقطه تعادل به صورت جدول (۴) بدست می‌آید:

برای این حالت معیارها و ویژگی‌ها به صورت جدول ۶ می‌باشد.

جدول ۶ معیارها و ویژگی‌ها در نقطه تعادل برای حالت تبانی بین شرکت ۱ و ۲

شماره شرکت‌ها	شماره واحدها	اندیس لرنر	قیمت بازار (دلار بر مگاوات ساعت)	هزینه حدی (دلار بر مگاوات ساعت)
۱ و ۲	۱	۰,۳۴۰۹	۴۸,۴۶۶	۳۶,۱۴۴۱
۱ و ۲	۲	۰,۳۴۰۹	۴۸,۴۶۶	۳۶,۱۴۴۱
۱ و ۲	۳	۰,۳۴۰۹	۴۸,۴۶۶	۳۶,۱۴۴۱
۱ و ۲	۴	۰,۳۴۰۹	۴۸,۴۶۶	۳۶,۱۴۴۱
۱ و ۲	۵	۰,۳۴۰۹	۴۸,۴۶۶	۳۶,۱۴۴۱
۳	۶	۰,۰۹۵۵	۴۸,۴۶۶	۴۴,۲۳۸۹
۳	۷	۰,۰۹۵۵	۴۸,۴۶۶	۴۴,۲۳۸۹
۴	۸	۰,۱۷۱۱	۴۸,۴۶۶	۴۱,۳۸۵۷
۴	۹	۰,۱۷۱۱	۴۸,۴۶۶	۴۱,۳۸۵۷
۴	۱۰	۰,۱۸۰۹	۴۴,۸۷۲۸	۳۸

جدول ۴ نقطه تعادل حالت بدون تبانی برای بار ۳۰۰۰ مگاوات

واحد	مقدار عرض از مبدا قیمت پیشنهادی (دلار بر مگاوات ساعت)	مقدار توان تولیدی (مگاوات)
۱	۳۰,۷۸	۴۰۲,۲۱
۲	۲۵,۷	۳۵۷,۴
۳	۳۵,۷۸	۲۰۷,۱۲
۴	۳۲,۵۳	۲۶۴,۹۲
۵	۲۸,۵	۲۵۲,۱
۶	۳۴,۸۰	۲۲۱,۴۴
۷	۲۴,۸۰	۳۴۲,۸
۸	۴۰,۹	۷۶,۵
۹	۳۰,۹	۲۸۳,۴
۱۰	۲۵,۹	۵۹۱۱,۸

اگر چنانچه شرکت ۱ و شرکت ۲ در ابتدای بازه مورد بررسی یعنی ۳۰۰۰ مگاوات جهت افزایش قیمت‌ها باهم تبانی کنند همانند جدول ۴، جدول ۵ نقطه تعادل این حالت را نشان می‌دهد.

با تکرار مراحل طبق جدول ۶ برای همه حالت‌های تبانی و حالت بدون تبانی داده‌ها و نقاط کار زیاد محاسبه خواهد شد. جدول ۷ فرآیند اعتبار سنجی تشخیص و کلاسه بندی تبانی با کمک ابزار ماشین بردار پشتیبان را نشان می‌دهد.

^۱K-fold Crossvalidation

جدول ۸ دقت دسته‌بندی تباری در نقطه کار و برای همه تغییرات

ماشین‌بردار پشتیبان	درخت تصمیم	درصد انحراف
۹۵%	۹۶%	نقاط تعادل
۸۷%	۸۰%	±۲ درصد
۸۶%	۸۱%	±۴ درصد
۸۵%	۸۰%	±۶ درصد
۸۴%	۸۰%	±۸ درصد
۸۴%	۸۰%	±۱۰ درصد

هم‌چنان‌که از جدول ۸ مشخص است با انحراف مقادیر پیشنهادی واقع در نقطه تعادل تا ۲۰ درصد دیده می‌شود که خطای تشخیص مرحله به مرحله بیشتر شده است و این به خاطر هم‌پوشانی داده‌ها و یا به عبارتی متمرکز شدن همه داده‌ها در یک ناحیه می‌باشد و هر چه داده‌ها نسبت بهم از هم‌پوشانی بیشتری برخوردار باشد خطای کلاسه بندی نیز بیشتر خواهد شد.

۳-۱-۴) تشخیص و کلاسه بندی تباری با افزودن ویژگی‌های بیشتر

نتایجی که تا این مرحله بدست آمده است نتایجی هستند با معیارها و ویژگی‌های مطرح شده، یعنی هزینه حاشیه‌ای و قیمت پیشنهادی و شاخص لرنر واحدهای مختلف بدست آمده اند. این شاخص‌ها به عنوان ویژگی و یا پیش‌بین‌گر در ابزار یادگیری ماشینی مورد استفاده قرار گرفتند. شبیه سازی‌ها نشان داد که دو شاخص اضافه بها و شاخص لرنر ترکیب یافته‌ی دو شاخص اولی می‌باشد و چندان تاثیر مهمی را در تفکیک بندی و کلاسه بندی داده‌ها نخواهند داشت و استفاده کردن از این ویژگی‌ها هیچ تاثیر مطلوبی را در روند تفکیک پذیری داده‌ها برجای نمی‌گذارد. یکی از معایب مهم ماشین‌های بردار پشتیبان و ابزار درخت تصمیم‌گیری این می‌باشد که کمتر بودن تعداد ویژگی‌ها در مقابل تعداد زیاد کلاس‌ها خطایی را در هنگام کلاسه بندی از خود نشان می‌دهد. دقت بالای کلاسه بندی مستلزم ویژگی‌های تفکیک کننده کافی می‌باشد تا نمونه‌های موجود هر کلاس را از سایر نمونه‌های کلاس‌های دیگر به درستی تفکیک کند. در این مقاله کلاسه بندی با سه ویژگی و برای ۱۱ کلاس انجام گرفت از این‌رو برای تفکیک بندی ۱۱ کلاس نمی‌توان انتظار داشت که تنها با داشتن سه ویژگی خطای تفکیک بندی نیز کمتر باشد. بنابراین برای بهبود خطای دسته بندی باید ویژگی‌های بیشتری

جدول ۷ فرایند اعتبارسنجی داده‌ها برای تشخیص و کلاسه‌بندی

تباری در نقطه تعادل توسط ماشین بردار پشتیبان

کلاس	پیش‌بینی											
	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	
۱	۴۱	۰	۰	۰	۰	۳	۰	۰	۰	۰	۰	
۲	۰	۴۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	
۳	۰	۰	۴۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	
۴	۰	۰	۰	۳۸	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	
۵	۰	۰	۰	۰	۴۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	
۶	۰	۰	۰	۰	۰	۳۹	۰	۰	۰	۰	۰	
۷	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۳۸	۰	۰	۰	
۸	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۴۱	۰	۰	
۹	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۳۸	۰	
۱۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۳۸	
۱۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۳۷

طبق جدول (۷) از کل ده مرتبه اعتبارسنجی فقط ۲۳ نمونه اشتباه تشخیص و کلاسه بندی شده است. به عنوان مثال کل داده‌های مربوط به حالت غیر تباری ۴۱ نمونه می‌باشد که ماشین از این تعداد ۳ نمونه را به اشتباه به کلاس ۶ تشخیص داده و ۱ نمونه را به کلاس ۵ تشخیص داده است و ۳۷ نمونه را به درستی به کلاس ۱ تشخیص داده است. دقت فرآیند اعتبارسنجی در این مرحله ۹۵,۱۲ درصد می‌باشد.

۳-۱-۳) تشخیص تباری با در نظر گرفتن نقاط حول نقاط تعادل به عنوان داده‌های واقعی

هم‌چنان‌که در بخش ۳-۱-۱ اشاره شد همواره نقطه کار بازار بر نقطه تعادل سیستم منطبق نیست و همیشه نقطه کار حول نقطه تعادل بازار در حال تغییر می‌باشد. از این رو با انحراف نقطه تعادل بازار تا ۲۰ درصد می‌توان نقطه کار را زیادی را ایجاد کرده و به بررسی تشخیص تباری پرداخت. به ازای هر نقطه تعادل یک نقطه حول آن در نظر گرفته می‌شود. لذا برای هر h مشخص، ۴۵۱ نمونه حاصل می‌شود. درست آن است که به ازای هر نقطه تعادل تعداد زیادی نقطه حول آن در نظر گرفته اما بدلیل محدودیت حافظه در کامپیوتر فقط یک نمونه حول هر نقطه تعادل منظور شده است. دقت و کلاسه بندی تشخیص تباری در هر پله که از نقطه کار بازار از نقطه تعادل دورتر می‌شود طبق جدول ۸ خواهد بود.

تولیدکنندگان و از دیدگاه بهره‌بردار مستقل بازار برق رفتار تک تک بازیگران در شرایط بدون تبانی و هم‌چنین در شرایطی که تبانی انجام گرفته شده است مدلسازی شده و مورد ارزیابی قرار گرفت. تشخیص تبانی توسط ابزار ماشین‌های بردار پشتیبان و درخت تصمیم که دو الگوریتم پرکاربرد در یادگیری ماشینی می‌باشد مدلسازی و مورد بررسی قرار گرفت. نتایجی که از خروجی ابزار یادگیری ماشینی حاصل شد نتایجی هستند با دقت قابل قبول که عملکرد مناسب این دو ابزار را در تشخیص و کلاسه‌بندی بندی تبانی نشان می‌دهد. گرچه در بعضی موارد داده‌ها غیر خطی شده و داده‌های مربوط به چند کلاس باهم هم‌پوشانی داشتند که این مسئله بخاطر کم بودن ویژگی‌ها با توجه به تعداد زیاد دسته-بندهایی که برای داده‌ها استفاده شده بود ایجاد می‌شد و همانطور که ملاحظه شد خطای طبقه بندی با تبدیل ویژگی‌ها و ایجاد ویژگی جدید به مقدار زیادی کاهش پیدا کرد. از این رو تشخیص تبانی شرکت‌ها هم‌چنین کلاسه‌بندی حالت‌های مختلف آن با دقت خوبی انجام گردید. در انتها لازم به ذکر است که طبق تعریف تبانی اتحاد بین دو یا چند شرکت که قیمت بازار را به مدت طولانی افزایش می‌دهند به عنوان تبانی منظور می‌گردد.

را ایجاد کرده و با کمک این ویژگی‌های جدید که به سایر ویژگی‌ها اضافه می‌گردد مرز دو کلاس با دقت بالایی تفکیک گردد. بدین ترتیب با افزودن گرادیان مرتبه اول و دوم به عنوان ویژگی‌های جدید می‌توان با ۶ ویژگی دوباره مراحل تشخیص وجود و دسته بندی تبانی را بررسی کرده و با حالت قبل مقایسه کرد. خروجی ماشین یادگیرنده برای حالت مقید برای کشف وجود تبانی به صورت جدول ۹ خواهد بود:

جدول ۹ دقت اعتبارسنجی میانگین برای دسته‌بندی تبانی در همه

نقاط کار

ماشین‌بردار پشتیبان	درخت تصمیم	درصدانحراف
۹۵%	۹۶%	نقاط تعادل
۹۴%	۹۲%	±۲ درصد
۹۳%	۹۰%	±۴ درصد
۹۲%	۸۹%	±۶ درصد
۹۰%	۸۸%	±۸ درصد
۸۷%	۸۷%	±۱۰ درصد

مراجع

- [1] Kirschen, D. and Strbac, G., 2005. Basic Concepts from Economics. *Fundamentals of Power System Economics*, pp.11-47.
- [2] Twomey, Paul, Richard J. Green, Karsten Neuhoﬀ, and David Newbery. "A review of the monitoring of market power the possible roles of tsos in monitoring for market power issues in congested transmission systems." (2006).
- [3] omani, Abhishek, and Leigh Tesfatsion. "An agent-based test bed study of wholesale power market performance measures." *Computational Intelligence Magazine, IEEE* 3, no. 4 (2008): 56-72.
- [4] Anderson, Steven Craig. "Analyzing strategic interaction in multi-settlement electricity markets: A closed-loop supply function equilibrium model." PhD diss., Harvard University Cambridge, Massachusetts, 2004.
- [5] Stoft, Steven. "Power system economics." *Journal of Energy Literature* 8 (2002): 94-99

[۶] آرمن محمد عظیم، رجی مشهدی حبیب، لطفعلی پور محمدرضا. مدل‌سازی تبانی واحدهای تولیدی در بازار برق با کمک نظریه بازی‌ها. مجله کنترل. ۱۳۸۹؛ ۴ (۲): ۴۴-۵۴

- [7] Mihailescu, Radu-Casian, Matteo Vasirani, and Sascha Ossowski. "Detection of Collusive Behavior in Energy Markets." In *AT*, pp. 353-365. 2012.

[۸] شالچیان، جعفر؛ مصطفی صحرانی اردکانی و اشکان رحیمی کیان، ۱۳۸۵، بررسی بازارهای رقابتی و چند انحصاری برق، اولین کنفرانس بین‌المللی مدیریت

هم‌چنان که از نتایج دیده می‌شود افزایش ویژگی‌ها نتایج مطلوبی را به همراه داشته است و باعث شده است که جداپذیری دسته‌ها نسبت به حالت قبل چه در تشخیص وجود تبانی و چه در دسته‌بندی حالت‌های مختلف تبانی با خطای کمتری انجام شود. از نتایج بدست آمده از دو ابزار یادگیری ماشینی برای حالت‌های مختلف طبق همه جداول بالا نشان می‌دهد که همواره ماشین‌بردار پشتیبان از دقت بیشتری نسبت به درخت تصمیم-گیری برخوردار می‌باشد. مراحل بالا را برای حالت نامقید بودن واحدهای تولیدی نیز اعمال شده است که نسبت به حالت مقید نتایج کمی بهتری باشد و از آوردن نتایج برای این حالت بخاطر محدودیت مقاله صرف‌نظر شده است.

۴- نتیجه‌گیری

از آنجایی که محیط بازار برق شرایط ایده‌آلی را برای تولیدکنندگان جهت کسب سود غیر قانونی فراهم می‌آورد و منجر به تخریب فضای رقابتی و کاهش کارایی بازار می‌شود جهت تشخیص راهبردهای غیرمجاز تولیدکنندگان و بهبود کارایی بازار لازم است که چنین رفتارهایی از سوی تولیدکنندگان تشخیص داده شود. از این رو براساس مدلسازی شرایط بازار و استراتژی‌های

و برنامه ریزی انرژی، تهران، موسسه پژوهش در مدیریت و برنامه ریزی انرژی،
 دانشکده فنی دانشگاه تهران، [http://www.civilica.com/Paper-](http://www.civilica.com/Paper-ICEMP01-ICEMP01_020.html)

- ICEMP01-ICEMP01_020.html
- [9] Cristianini, Nello, and John Shawe-Taylor. *An introduction to support vector machines and other kernel-based learning methods*. Cambridge university press, 2000
- [10] Dibike, Yonas B., Slavco Velickov, Dimitri Solomatine, and Michael B. Abbott. "Model induction with support vector machines: introduction and applications." *Journal of Computing in Civil Engineering* (2001).
- [11] Weston, Jason, and Chris Watkins. *Multi-class support vector machines*. Technical Report CSD-TR-98-04, Department of Computer Science, Royal Holloway, University of London, May, 1998.
- [12] Safavian, S. Rasoul, and David Landgrebe. "A survey of decision tree classifier methodology." *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics* 21, no. 3 (1991): 660-674.
- [13] Rokach, Lior, and Oded Maimon. "Top-down induction of decision trees classifiers-a survey." *Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, IEEE Transactions on* 35, no. 4 (2005): 476-487.
- [14] Olshen, L. B. J. F. R., and Charles J. Stone. "Classification and regression trees." *Wadsworth International Group* 93, no. 99 (1984): 101.
- [15] Buygi, Majid Oloomi, Hamidreza Zareipour, and William D. Rosehart. "Impacts of large-scale integration of intermittent resources on electricity markets: A supply function equilibrium approach." *Systems Journal, IEEE* 6, no. 2 (2012): 220-232.