دانشکده مهندسی برق و رباتیک

گروه قدرت

پایان نامه کارشناسی ارشد

تاثیر کوتاه‌مدت سیاست تنوع سازی مجازی-مالی بر قدرت بازار بر بازار برق

مسعود عامری ۹۱۰۴۸۶۴

استاد راهنما :

دکتر مرتضی رحیمیان

استاد مشاور :

دکتر محمد امین لطیفی

شهریور ۱۳۹۴

بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه شاهرود

دانشکده : مهندسی برق

گروه : قدرت

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای مسعود عامری

تحت عنوان : تاثیر کوتاه‌مدت سیاست تنوع سازی مجازی-مالی بر قدرت بازار بر بازار برق

در تاریخ ..... توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد مورد ارزیـابی و با درجه ..... مورد پذیرش قرار گرفت.

اساتید راهنما	امضاء	اساتید مشاور	امضاء
دکتر مرتضی رحیمیان		دکتر محمد امین لطیفی	

اساتید داور	امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء
نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :	
نام و نام خانوادگی :			
نام و نام خانوادگی :			
نام و نام خانوادگی :			

ماحصل آموخته هایم را تقدیم می کنم

به استوارترین تکیه گاهم، دستان پرمهر پدرم

به سبزترین نگاه زندگیم، چشمان مهربان مادرم

به لطیف‌ترین همراه زندگیم، قلب همسرم

من لم یشکر المخلوق، لم یشکر الخالق

بر خود لازم می‌دانم بدین وسیله از زحمات بی‌دریغ، پیوسته و با عشق استاد راهنمای محترم جناب آقای دکتر رحیمیان تشکر و قدر دانی کنم. همچنین از جناب آقای دکتر لطیفی که نقطه نظرات کارگشایانه ایشان موجب دلگرمی و اشتیاق بیشتر اینجانب بود، محترمانه قدردانی می‌کنم.

از برادرم که در تمامی مقاطع تحصیلی همگام و پشتیبان من بوده است، سپاس گذارم. و کلیه دوستان و عزیزانی که در اجرای برنامه‌های طولانی شبیه‌سازی همکاری داشته‌اند، صمیمانه تشکر می-کنم.

تعهــد نامه

اینجانب مسعود عامری دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق دانشکده برق دانشگاه شاهرود نویسنده پایان نامه تاثیر کوتاه‌مدت سیاست تنوع سازی مجازی-مالی بر قدرت بازار بر بازار برق

تحت راهنمائی دکتر مرتضی رحیمیان متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه شاهرود » و یا « Shahrood University» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ :

امضای دانشجو :

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

* متن این صفحه نیز باید در ابتدای نسخه های تکثیر شده پایان نامه وجود داشته باشد .

چکیده

واگذاری مجازی به عنوان جایگزین مناسب برای واگذاری در دهه گذشته به کار گرفته شده است. نهاد پایش همواره نگران عملکرد این‌گونه سیاست‌ها در کاهش قدرت بازار بوده است. از این رو، این پایان نامه یک ابزار شبیه‌سازی مبتنی بر تعادل بازار، برای تحلیل پیشین اثر سیاست واگذاری مجازی-مالی بر کاهش قدرت بازار، در بازار روز قبل ارائه می‌دهد. بخشی از ظرفیت یک تولیدکننده غالب مقید به واگذاری مجازی-مالی در نظر گرفته می‌شود. مسأله پیشنهاد این تولیدکننده غالب در بازار روز قبل به صورت یک مسأله بهینه‌سازی دو سطحی مدلسازی می‌شود. در مسأله سطح بالا، تولیدکننده غالب استراتژی بهینه احتکار ظرفیت را مقید به محدودیت‌های بین زمانی واحدهای تولیدی و شرایط مربوط به واگذاری مجازی، بدست می‌آورد. در مسأله سطح پایین، بازار روز قبل توسط بهره‌بردار برای هر ساعت تسویه می‌شود. این مسأله بهینه‌سازی دو سطحی به برنامه‌ریزی ریاضی با قیود تعادل تبدیل و سپس به وسیله بعضی روش‌های خطی‌سازی، با یک مسأله بهینه سازی برنامه‌ریزی خطی آمیخته با عدد صحیح جایگزین می‌شود. سپس در یک مطالعه موردی نحوه کنترل قدرت بازار توسط این سیاست را نشان داده می‌شود. نتایج گواه آن است که تنوع تکنولوژی‌های تولید در اختیار تولیدکننده غالب اثر قابل توجهی بر عملکرد سیاست واگذاری مجازی-مالی دارد.

کلید واژه: واگذاری مجازی و بهینه‌سازی دو سطحی مدلسازی و قیود تعادل تبدیل

فهرست مطالب

فصل اول ۱

۱-۱ انگیزه ۲

۱-۲ هدف ۲

۱-۳ مروری بر فصل‌های پایان نامه ۳

فصل دوم ۵

۲-۱ مقدمه ٦

۲-۲ قدرت بازار ٦

۲-۲-۱ تعریف قدرت بازار ٦

۲-۲-۲ استراتژی‌های به‌کارگیری قدرت بازار ٦

۲-۲-۳ روش‌های کاهش قدرت بازار ۷

۲-۳ سیاست‌های واگذاری فیزیکی و مجازی ۹

۲-۳-۱ واگذاری فیزیکی ۹

۲-۳-۲ واگذاری مجازی ۹

۲-۴ انواع واگذاری مجازی ۱۰

۲-۴-۱ واگذاری مجازی-مالی ۱۱

۲-۴-۲ واگذاری مجازی-فیزیکی ۱۲

۲-۵ مناقصات واگذاری مجازی ۱۳

۲-۶ مطالعه میدانی سیاست واگذاری مجازی ۱٤

۲-۶-۱ پیشینه واگذاری ۱٤

۲-۶-۲ واگذاری مجازی در اسپانیا ۱۵

۲-۶-۳ واگذاری مجازی در بلژیک ۱٦

۲-۶-۴ مطالعه میدانی آثار سیاست واگذاری ۱٦

۲-۷ مطالعه تئوریک سیاست واگذاری مجازی ۱٦

۲-۸ جمع بندی و نتیجه‌گیری ۱۸

فصل سوم ۱۹

۳-۱ مقدمه ۲۰

۳-۲ تشریح مسأله تولیدکننده غالب ۲۰

۳-۳ علائم و اختصارات ۲۱
۳-۴ فرمول‌بندی مسأله ۲۳
۳-۵ مدل قیود تعادل با برنامه‌ریزی ریاضی ۲۶
۳-۶ مدل برنامه‌ریزی خطی آمیخته با اعداد صحیح ۲۷
فصل چهارم ۳۱
۴-۱ مقدمه ۳۲
۴-۲ سیستم مورد مطالعه ۳۲
۴-۳ تشریح طرح شبیه‌سازی ۳٤
۴-۴ شاخص‌های تحلیل کارائی بازار ۳٦
۴-۵ تحلیل نحوه اثرگذاری سیاست واگذاری مجازی مالی روی یک حالت نمونه ۳۷
۴-۶ سناریوی اول: تقاضا ناکشسان و سهم بازار ۵۰٪ ٤۲
۴-۶-۱ سطح بار کم ٤۲
۴-۶-۲ سطح بار متوسط ٤۳
۴-۶-۳ سطح بار زیاد ٤٤
۴-۷ سناریوی دوم: تقاضا کمی کشسان و سهم بازار ۵۰٪ ٤۵
۴-۷-۱ سطح بار کم ٤۵
۴-۷-۲ سطح بار متوسط ٤۷
۴-۷-۳ سطح بار زیاد ٤۹
۴-۸ سناریوی سوم: تقاضا کشسان و سهم بازار ۵۰٪ ۵۰
۴-۸-۱ سطح بار کم ۵۰
۴-۸-۲ سطح بار متوسط ۵۱
۴-۸-۳ سطح بار زیاد ۵۲
۴-۹ سناریوی چهارم: تقاضا ناکشسان و سهم بازار ۷۰٪ ۵۳
۴-۹-۱ سطح بار کم ۵۳
۴-۹-۲ سطح بار متوسط ۵٤
۴-۹-۳ سطح بار زیاد ۵۵
۴-۱۰ سناریوی پنجم: تقاضا کمی‌کشسان و سهم بازار ۷۰٪ ۵٦
۴-۱۰-۱ سطح بار کم ۵٦
۴-۱۰-۲ سطح بار متوسط ۵۸

۴-۱۰-۳ سطح بار زیاد ۵۹
۴-۱۱ سناریوی ششم: تقاضا کشسان و سهم بازار ۷۰٪ ۶۱
۴-۱۱-۱ سطح بار کم ۶۱
۴-۱۱-۲ سطح بار متوسط ۶۲
۴-۱۱-۳ سطح بار زیاد ۶۳
۴-۱۲ جمع بندی و نتیجه‌گیری ۶۴
فصل پنجم ۶۷
۵-۱ کارهای انجام شده ۶۸
۵-۲ پیشنهادها ۷۰
مراجع : ۸۱

فهرست شکل‌ها

شکل (۲-۱) – نحوه اجرای مناقصات افزایش ساعت با مرحله‌های گسسته ۱۲
شکل (۳-۱)- نحوه پیشنهاد ظرفیت تولیدکننده غالب در مدل این فصل ۱۸
شکل (۴-۱)- منحنی عرضه و تقاضا در حالت‌های تقاضای الف) ناکشسان، ب) کمی کشسان و ج) کشسان ۲۹
شکل (۴-۲)- احتکار ظرفیت بر حسب ظرفیت نیروگاه مجازی ۳۲
شکل (۴-۳)- متوسط قیمت بازار در ساعات پیک و غیر پیک بر حسب ظرفیت نیروگاه مجازی ۳۲
شکل (۴-۴)- سود تولیدکننده غالب در طول یک روز بر حسب ظرفیت نیروگاه مجازی ۳۳
شکل (۴-۵)- شاخص انحراف از هزینه مصرف‌کنندگان بر حسب ظرفیت نیروگاه مجازی ۳۳
شکل (۴-۶)- احتکار ظرفیت از تکنولوژی بار پایه قبل و بعد از اجرای سیاست واگذاری مجازی در ساعت روز ۳۴
شکل (۴-۷)- احتکار ظرفیت از تکنولوژی بار میانی قبل و بعد از اجرای سیاست واگذاری مجازی در ساعت روز ۳۵
شکل (۴-۸)- متوسط انرژی تولیدی از تکنولوژی‌های مختلف بر حسب ظرفیت نیروگاه مجازی ۳۵
(۴-۹)- شاخص انحراف هزینه مصرف‌کنندگان برای تکنولوژی نوع ۲،۱ و ۳ بر حسب ظرفیت نیروگاه مجازی در سطح بار کم سناریوی اول ۳۶
شکل (۴-۱۰)- شاخص انحراف هزینه مصرف‌کنندگان برای تکنولوژی نوع ۲،۱ و ۳ بر حسب ظرفیت نیروگاه مجازی در سطح بار متوسط سناریوی اول ۳۷
شکل (۴-۱۱)- شاخص انحراف هزینه مصرف‌کنندگان برای تکنولوژی نوع ۲،۱ و ۳ بر حسب ظرفیت نیروگاه مجازی در سطح بار زیاد سناریوی اول ۳۸
شکل (۴-۱۲)- شاخص انحراف مصرف‌کنندگان برای تکنولوژی نوع ۲،۱ و ۳ بر حسب ظرفیت نیروگاه مجازی در سطح بار کم سناریو دوم ۳۹
شکل (۴-۱۳)- شاخص انحراف حجم توان مبادله شده بر حسب ظرفیت نیروگاه مجازی در سطح بار کم سناریوی دوم ۴۰
شکل (۴-۱۴)- شاخص انحراف از هزینه مصرف‌کنندگان برای تکنولوژی نوع ۲،۱ و ۳ بر حسب ظرفیت نیروگاه مجازی در سطح بار متوسط سناریوی دوم ۴۱
شکل (۴-۱۵)- شاخص انحراف حجم توان مبادله شده بر حسب ظرفیت نیروگاه مجازی درسطح بار متوسط سناریوی دوم ۴۱
شکل (۴-۱۶)- شاخص انحراف از هزینه مصرف‌کنندگان برای ترکیب تکنولوژی نوع ۲،۱ و ۳ بر حسب ظرفیت نیروگاه مجازی در سطح بار زیاد سناریوی دوم ۴۲
شکل (۴-۱۷)- شاخص انحراف حجم توان مبادله شده بر حسب ظرفیت نیروگاه مجازی در سطح بار زیاد سناریوی دوم ۴۲
شکل (۴-۱۸)- شاخص انحراف هزینه مصرف‌کنندگان برای ترکیب تکنولوژی نوع ۲،۱ و ۳ بر حسب ظرفیت نیروگاه مجازی در سطح بار کم سناریوی سوم ۴۳
شکل (۴-۱۹)- شاخص انحراف حجم توان مبادله شده بر حسب ظرفیت نیروگاه مجازی در سطح بار کم سناریوی سوم ۴۴
شکل (۴-۲۰)- شاخص انحراف هزینه مصرف‌کنندگان برای ترکیب تکنولوژی نوع ۲،۱ و ۳ بر حسب ظرفیت نیروگاه مجازی در سطح بار متوسط سناریوی سوم ۴۴

شکل (۴-۲۱)- شاخص انحراف توان مبادله شده بر حسب ظرفیت نیروگاه مجازی در سطح بار متوسط سناریوی سوم ۴۵
شکل (۴-۲۲)- شاخص انحراف از هزینه مصرف‌کنندگان برای ترکیب تکنولوژی نوع ۲،۱ و ۳ بر حسب ظرفیت نیروگاه مجازی در سطح بار زیاد سناریوی سوم ۴۵
شکل (۴-۲۳)- شاخص انحراف توان مبادله شده بر حسب ظرفیت نیروگاه مجازی در سطح بار زیاد سناریوی سوم ۴۶
شکل (۴-۲۴)- شاخص انحراف از هزینه مصرف‌کنندگان برای ترکیب تکنولوژی نوع ۲،۱ و ۳ بر حسب ظرفیت نیروگاه مجازی در سطح بار کم سناریوی چهارم ۴۶
شکل (۴-۲۵)- شاخص انحراف از هزینه مصرف‌کنندگان برای ترکیب تکنولوژی نوع ۲،۱ و ۳ بر حسب ظرفیت نیروگاه مجازی در سطح بار متوسط سناریوی چهارم ۴۸
شکل (۴-۲۶)- شاخص انحراف از هزینه مصرف‌کنندگان برای ترکیب تکنولوژی نوع ۲،۱ و ۳ بر حسب ظرفیت نیروگاه مجازی در سطح بار زیاد سناریوی چهارم ۴۹
شکل (۴-۲۷)- شاخص انحراف از هزینه مصرف‌کنندگان برای ترکیب تکنولوژی نوع ۲،۱ و ۳ بر حسب ظرفیت نیروگاه مجازی در سطح بار کم سناریوی چهارم ۵۰
شکل (۴-۲۸)- شاخص انحراف توان مبادله شده بر حسب ظرفیت نیروگاه مجازی درسطح بار کم سناریوی پنجم ۵۰
شکل (۴-۲۹)- شاخص انحراف از هزینه مصرف‌کنندگان برای ترکیب تکنولوژی نوع ۲،۱ و ۳ بر حسب ظرفیت نیروگاه مجازی در سطح بار متوسط سناریوی پنجم ۵۱
شکل (۴-۳۰)- شاخص انحراف توان مبادله شده بر حسب ظرفیت نیروگاه مجازی در سطح بار متوسط سناریوی پنجم ۵۱
شکل (۴-۳۱)- شاخص انحراف از هزینه مصرف‌کنندگان برای ترکیب تکنولوژی نوع ۲،۱ و ۳ بر حسب ظرفیت نیروگاه مجازی در سطح بار زیاد سناریوی پنجم ۵۲
شکل (۴-۳۲)- شاخص انحراف توان مبادله شده بر حسب ظرفیت نیروگاه مجازی درسطح بار زیاد سناریوی پنجم ۵۳
شکل (۴-۳۳)- شاخص انحراف از هزینه مصرف‌کنندگان برای ترکیب تکنولوژی نوع ۲،۱ و ۳ بر حسب ظرفیت نیروگاه مجازی در سطح بار کم سناریوی ششم ۵۳
شکل (۴-۳۴)- شاخص انحراف توان مبادله شده بر حسب ظرفیت نیروگاه مجازی در سطح بار کم سناریوی ششم ۵۴
شکل (۴-۳۵)- شاخص انحراف از هزینه مصرف‌کنندگان برای ترکیب تکنولوژی نوع ۲،۱ و ۳ بر حسب ظرفیت نیروگاه مجازی در سطح بار متوسط سناریوی ششم ۵۴
شکل (۴-۳۶)- شاخص انحراف توان مبادله شده بر حسب ظرفیت نیروگاه مجازی در سطح بار متوسط سناریوی ششم ۵۵
شکل (۴-۳۷)- شاخص انحراف از هزینه مصرف‌کنندگان برای ترکیب تکنولوژی نوع ۲،۱ و ۳ بر حسب ظرفیت نیروگاه مجازی در سطح بار زیاد سناریوی ششم ۵۵
شکل (۴-۳۸)- شاخص انحراف توان مبادله شده بر حسب ظرفیت نیروگاه مجازی درسطح بار زیاد سناریوی ششم ۵۶

فهرست جدول‌ها

جدول (۴- ۱)- اطلاعات واحدهای تولیدی ۲۷
جدول (۴-۲)- اطلاعات مصرف کنندگان ۲۷

فصل اول

پیش‌گفتار

۱-۱ انگیزه

پس از تجدید ساختار در صنعت برق، قدرت بازار همواره از نگرانی‌های مهم سیاست‌گذاران بوده است. به دلیل پرهزینه بودن ذخیره‌سازی انرژی برق و کشسانی کم تقاضای برق به تغییرات قیمت و همچنین هزینه بالای سرمایه‌گذاری در بخش تولید همواره پتانسیل به کارگیری قدرت بازار توسط تولیدکنندگان وجود دارد. به کارگیری قدرت بازار موجب کاهش افزایش قیمت‌ها و کاهش رفاه اجتماعی در بازار می‌شود. در این راستا سیاست‌گذاران و نهاد پایش بازار، سیاست‌های پیشگیرانه‌ای برای جلوگیری از ایجاد قدرت بازار و یا به کارگیری آن توسط تولیدکنندگان به کار گرفته شده است. سیاست‌های کاهش قدرت بازار در دو گروه قانون محور و ساختاری طبقه بندی می‌شوند. در روش قانون محور با تصویب و اصلاح قوانین جدید، مانند اعمال قیمت سقف، و در روش ساختاری با تغییر در ساختار بازار، مانند تغییر در مالکیت نیروگاه‌ها، مانع از به‌کارگیری قدرت بازار می‌شوند.

یکی از روش‌هایی که از دهه گذشته تا کنون در اکثر کشورهای دنیا مورد استفاده قرار گرفته است سیاست واگذاری سرمایه‌های تولید است. مطالعات مختلف کارائی این سیاست را تائید کرده است. از سوی دیگر دخالت مستقیم سیاست‌گذاران در بازار، در سیاست واگذاری، همواره مورد نقد اقتصاددانان بوده است. به همین دلیل سیاست واگذاری مجازی به عنوان جایگزینی برای سیاست واگذاری، به دلیل دخالت کمتر در بازار و پیاده سازی ساده‌تر، از دهه گذشته در اکثر کشورهای دنیا مورد استفاده قرار گرفته است. مطالعات میدانی و تئوریک فراوانی نشان می‌دهند که سیاست واگذاری می‌تواند در کاهش قدرت بازار به طور قابل توجهی موثر باشد. در سیاست واگذاری مجازی بر خلاف واگذاری، انتقال مالکیت صورت نمی‌گیرد و یک سیاست برگشت‌پذیر است. در نوع مجازی به جای فروش بخشی از ظرفیت تولیدکننده غالب، آن را به طور موقت با یک قرارداد به خریداران منتقل می-کنند.

نگرانی سیاست گذاران بازارهای برق در بازارهای تازه راه‌اندازی شده، به دلیل انحصار مالکیت توسط یک یا چند تولیدکننده، دوچندان است. از این رو همواره سیاست‌گذاران به دنبال روش‌های کاهش قدرت بازار و نزدیک ساختن بازار به شرایط رقابتی هستند.

۱-۲ هدف

هدف این پایان‌نامه ارزیابی عملکرد سیاست واگذاری مجازی-مالی در کاهش قدرت بازار به کارگرفته شده توسط تولیدکننده غالب در بازار روز قبل است. در این پایان نامه سعی بر آن است که سیاست واگذاری مجازی-مالی به طور کامل مورد بررسی و نقد قرار گیرد و به عنوان ابزاری در دست نهاد پایش بازار برای کاهش قدرت بازار مدلسازی گردد. جوانب مختلف و ملاحظات فنی اجرای این

سیاست مورد ارزیابی وتحلیل قرار گیرد. به علاوه پتانسیل این سیاست در کاهش قدرت بازار تحت ساختار بازار مختلف (یعنی ویژگی‌های مختلف عرضه و تقاضا) تحلیل می‌شود.

در این پایان نامه سعی می‌شود به چند سوال اساسی پاسخ داده شود.

۱. آیا واگذاری مجازی-مالی می‌تواند به عنوان یک ابزار در دست سیاست‌گذاران برای کاهش قدرت بازار یک تولیدکننده غالب مورد استفاده قرار گیرد؟
۲. چه میزان ظرفیت مجازی می‌تواند برای کاهش قدرت بازار تولیدکننده غالب موثر باشد؟
۳. اجرای سیاست واگذاری مجازی-مالی در بازار چه اثری دارد؟
۴. اثر سهم بازار تولیدکننده غالب بر استراتژی احتکار ظرفیت چطور است؟
۵. اثر تنوع تکنولوژی‌های در دسترس تولیدکننده غالب بر عملکرد سیاست واگذاری مجازی-مالی چگونه است؟
۶. آیا با توسعه و رشد شبکه‌های هوشمند و افزایش حساسیت تقاضا به تغییرات قیمت قدرت بازار کاهش می‌یابد و یا بازهم به اجرای سیاست واگذاری مجازی-مالی نیاز هست؟

۱-۳ مروری بر فصل‌های پایان نامه

در فصل دوم، مطالعه میدانی و تئوریک سیاست واگذاری مجازی-مالی در بازارهای برق انجام می‌شود. در فصل سوم، مسأله بیشینه‌سازی سود یک تولیدکننده غالب تحت سیاست واگذاری مجازی-مالی در بازار روز قبل مدل‌سازی می‌شود. در فصل چهارم، اثرگذاری سیاست واگذاری مجازی-مالی در بازار روز قبل با در نظر گرفتن شرایط مختلف تولیدکننده غالب و ساختار بازار، تحلیل می‌شود. در فصل پنجم، نتایج و پیشنهادها به طور اجمالی ارائه می‌شود.

فصل دوم

مطالعه میدانی و تئوریک سیاست واگذاری مجازی سرمایه‌های تولید

۲-۱ مقدمه

صنعت برق پس از راه‌اندازی بازارهای رقابتی همواره دچار چالش سوء استفاده تولیدکنندگان غالب در جهت دورکردن بازار از سطح رقابتی و افزایش قیمت‌ها بوده است. تلاش سیاست گذاران برای کنترل بازار در سطح رقابتی همواره موجب اتخاذ تصمیمات و اقدامات پیشگیرانه مانند تصویب قوانین جدید، تغییر در ساختار مالکیت نیروگاه‌ها، تقسیم بازار و ... شده است. سیاست واگذاری مجازی نیز یکی از این روش‌های پیشگیرانه است که در دهه گذشته توجه بیشتری به آن شده است. طبق این سیاست تولیدکننده طی قراردادی بخشی از ظرفیت خود را به طور مجازی به خریداران و سرمایه-گذاران واگذار می‌کند. با این سیاست تولید کننده غالب مجبور به کاهش میزان احتکار ظرفیت خود می‌شود. در نتیجه بازار به شرایط رقابتی نزدیک می‌شود. جزئیات این سیاست و نحوه اثر گذاری آن در این فصل و فصل چهارم بحث می‌شود.

در این فصل مفهوم قدرت بازار و روش‌های به کارگیری آن بیان می‌شود. سپس به معرفی و بررسی سیاست واگذاری مجازی سرمایه‌های تولید به عنوان یکی از روش‌های کاهش قدرت بازار پرداخته می‌شود.

۲-۲ قدرت بازار

در این بخش، مفهوم قدرت بازار تعریف، و استراتژی‌های به کارگیری آن توسط شرکت‌کنندگان و همچنین روش‌های کاهش آن معرفی می شود.

۲-۲-۱ تعریف قدرت بازار

اقتصاددانان قدرت بازار یک شرکت کننده در بازار را به صورت «توانایی وی برای دور کردن قیمت‌ها از سطح رقابتی به قصد کسب سود» تعریف می‌کنند [۱].

در تعریف قدرت‌بازار تاکید بر سودآوری است. «افزایش سودمندانه قیمت بازار بیش از سطح رقابتی برای یک دوره زمانی قابل توجه»[1]. این تعریف توسط سیاست‌گذاران ارائه شده است.

۲-۲-۲ استراتژی‌های به کارگیری قدرت بازار

روش‌های به‌کارگیری قدرت بازار عبارتند از[۲]:

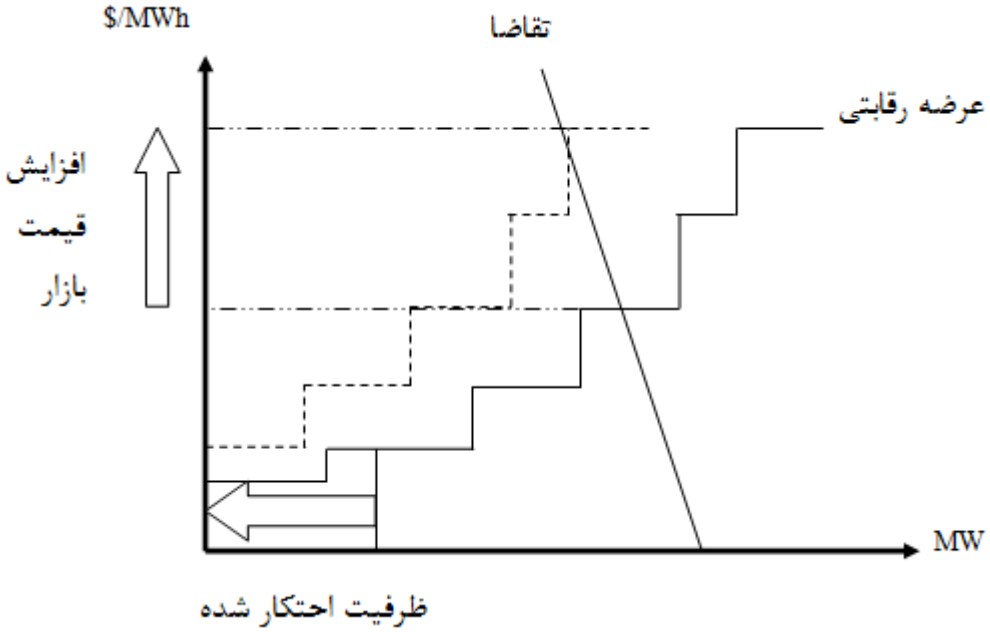
۱. احتکار فیزیکی و یا امتناع از پیشنهاد ظرفیت.
۲. احتکار اقتصادی و مالی.

در احتکار فیزیکی نیروگاه کل ظرفیت تولید را به بازار پیشنهاد نمی‌دهد و موجب جابجایی منحنی عرضه به سمت چپ و در نتیجه افزایش قیمت تسویه بازار می‌شود. در شکل (۲-۱) نحوه افزایش

[1] Department of Justice (DOJ)

قیمت با به کارگیری استراتژی احتکار ظرفیت را نشان داده شده است. تولیدکننده غالب[1] به این دلیل ظرفیتش را احتکار می‌کند که با تولید کمتر می‌تواند قیمت بازار را افزایش دهد به گونه‌ای که سود بیشتری دریافت کند. در احتکار مالی تولیدکننده غالب قیمت پیشنهادی بالاتری نسبت به سطح رقابتی ارائه می‌دهد و در نتیجه قیمت تسویه بازار افزایش می‌یابد.

در این پایان نامه، بازار روز قبل مورد نظر است. در بازار روز قبل، پیشنهادهای تولید انرژی در روز قبل به بهره‌بردار بازار تحویل داده می‌شود. بهره‌بردار بازار براساس میزان بار و پیشنهادهای تولید، بازار را برای هر ساعت تسویه می‌کند.



شکل (۲-۱)- نحوه افزایش قیمت بازار با استراتژی احتکار ظرفیت

۲-۲-۳ روش‌های کاهش قدرت بازار[2]

سیاست گذاران همواره از بدست آوردن جایگاه غالب توسط تولیدکنندگان و سوء استفاده از آن نگران بوده و ابزار و اقدامات مختلفی برای جلوگیری از آن به کار می‌گیرند. این ابزار و اقدامات عبارتند از [۳]:

۱) ابزار قانونی[3]

- اقدامات پیشین[1]

[1] تولید کننده ای که سهم بازار قابل توجهی دارد تولید کننده غالب نامیده می شود.

[2] Market power mitigation

[3] Legal Instruments

این اقدامات قبل از به کارگیری قدرت بازار و سوء استفاده از موقعیت غالب انجام می‌گیرد. سیاست گذاران با استفاده از این اقدامات سعی بر پیشگیری از انحراف بازار از شرایط رقابتی را دارند. البته اقدامات پیشگیرانه مستلزم ابزار تشخیص پتانسیل‌های ایجاد قدرت بازار است که خود این ابزارها و معیارها نیز ممکن است دقت لازم را نداشته باشند. برای مثال در مرجع [۴] نمونه تجربی از بازار انگلستان بیان شده است. در سال ۱۹۹۶ میلادی، اگر چه بر طبق شاخص HHI در این بازار پتانسیل قدرت بازار وجود نداشته است و بازار در شرایط رقابتی است اما در همان سال سیاست‌گذاران سیاست واگذاری را برای کاهش قدرت بازار تولیدکننده غالب به کار گرفتند.

- اقدامات پسین[۲]

این اقدامات در واقع آخرین ابزار و در حقیقت ابزار تنبیهی پس از به کارگیری قدرت بازار است. تولیدکننده غالب پس از محرز شدن به کارگیری قدرت بازار جریمه می‌شود. این اقدامات با تاخیر طولانی، گاهی سال‌ها، انجام می‌شود که ممکن است مالکیت تولیدکننده غالب تغییر یافته باشد و همچنین از دیگر معایب این نوع اقدامات دشواری بازگرداندن غرامت به مصرف‌کنندگان است.

۲) ابزار اقتصادی[۳]

- روش‌های ساختاری[٤]

این روش‌ها با تغییر در ساختار بازار[۵] سعی بر کاهش قدرت بازار دارند. واگذاری سرمایه تولید مهمترین روش ساختاری است که بخشی از ظرفیت مالک یا مالکین غالب را به شرکت کنندگان دیگر بازار با اجبار و یا تشویق واگذار می‌کنند. تولیدکننده غالب مجبور به فروش بخشی از سرمایه و نیروگاه‌هایش به دیگران می‌شود که موجب کاهش سهم بازارش می‌گردد.

- روش‌های‌رفتاری[۶]

این روش‌ها در واقع اقدامات پایش رفتار تولیدکنندگان است. برای مثال ممکن است تولید کننده کوچکی تنها در ساعات پیک با ارائه ندادن ظرفیتش به بازار (احتکار فیزیکی) بتواند موجب افزایش قیمت‌ها گردد. در این شرایط واحد پایش با کنترل مستمر رفتار تولیدکننده از افزایش قیمت جلوگیری می کند. در این مورد اقدامات ساختاری مانند واگذاری مناسب نیست.

---

[1] Ex-ante market regulation
[2] Ex-post market regulation
[3] Economic Instruments
[4] Structural solution

[۵] ساختار بازار اشاره به ویژگی های تولید و تقاضا دارد.

6Behavioural Instruments

واگذاری مجازی که در این پایان نامه بررسی می‌شود به صورت ترکیبی از روش‌های قانونی و اقتصادی است. در ابزار اقتصادی، در دسته روش‌های رفتاری قرار می‌گیرد. در ابزار قانونی این سیاست در دسته اقدامات پیشین قراردارد.

۲-۳ سیاست‌های واگذاری فیزیکی و مجازی

در واگذاری فیزیکی، یک یا چند نیروگاه از تولیدکننده غالب به طور قانونی به فروش می‌رسد و مالکیت آن به دیگری سپرده می‌شود.

واگذاری مجازی که به عنوان سیاست جایگزین برای واگذاری فیزیکی به‌کار می‌رود واگذاری قسمتی از سرمایه‌های تولید یک تولیدکننده برای مدت معین به دیگر شرکت‌کنندگان در بازار است. در این نوع واگذاری انتقال مالکیت صورت نمی‌گیرد. در ادامه به طور مفصل روش‌های واگذاری معرفی و شرح داده می‌شوند.

۲-۳-۱ واگذاری فیزیکی

واگذاری فیزیکی عبارتست از واگذاری مالکیت بخشی از ظرفیت تولید یک تولیدکننده به یک شخص حقیقی و یا حقوقی دیگر، در این نوع واگذاری معمولاً مالک مجبور به فروش نیروگاهش می‌گردد. برای مثال در بازار برق انگلستان در سال ۱۹۹۶ میلادی پس از اینکه دو تولیدکننده پاورژن[1] و نشنال‌پاور[2] غالب شناخته شدند آنها را مجبور به واگذاری قسمتی از نیروگاه‌های خود کردند. در ابتدا ۱۷٪ از ظرفیت دو تولیدکننده به فروش رسید. اداره مقررات برق انگلستان[3] اعلام کرد که قدرت این دو مالک کاهش خواهد یافت ولی در دو سال بعد اعلام شد که پیش بینی‌ها اشتباه بوده است. بنابراین، همان سال واحدهای ذغالسنگی این دو تولیدکننده به ظرفیت ۴۰٪ نیز واگذار شد[۴].

واگذاری فیزیکی بازگشت پذیر نیست و فروشنده نمی‌تواند قرارداد واگذاری را فسخ کند و دوباره مالکیت بخش واگذارشده را در دست بگیرد. از سوی دیگر از واگذاری فیزیکی به عنوان ابزاری سخت‌گیرانه توسط سیاست گذاران یاد می‌شود. زیرا در این سیاست دخالت سیاست گذاران در بازار به طور مستقیم صورت می‌گیرد. این دخالت مستقیم در بازار همواره مورد نقد اقتصاددانان بوده است. زیرا اکثر اقتصاددانان معتقدند که بازار باید با کمترین دخالت مستقیم، سیاست گذاران فعالیت کند.

۲-۳-۲ واگذاری مجازی

واگذاری مجازی عبارت است از قراردادی که براساس آن بخشی از ظرفیت تولیدی یک تولیدکننده غالب به خرده فروشان و یا فعالان بازار برای یک مدت معین واگذار می‌گردد. این ظرفیت

1 Power Gen
2 National Power
3MMC1996

فروخته‌شده مجازی باقی خواهد ماند و در این نوع واگذاری به طور قانونی تغییری در مالکیت نیروگاه-ها به وجود نمی‌آید و صاحب فعلی نیروگاه، مالک تمام ظرفیت‌تولیدی اش باقی خواهد ماند. در این قرارداد مالک غالب به عنوان فروشنده ظرفیت مجازی و خرده‌فروشان خریداران آن هستند. برگزاری مناقصه واگذاری مجازی به قصد افزایش رقابت بین شرکت‌کنندگان وتسهیل ورود شرکت‌کنندگان جدید انجام می‌گیرد[۵]. خریدار نیروگاه مجازی می‌تواند به‌ازای پرداخت قیمت قطعی از ظرفیت مجازی خود برای تولید برق استفاده کند، اما مجبور به مصرف آن نیست. سیاست گذاران اغلب واگذاری مجازی را نسبت به واگذاری فیزیکی به دلیل دخالت کمتر در بازار ترجیح می‌دهند[۶]. همچنین واگذاری فیزیکی پرهزینه‌تر و پیاده‌سازی آن از دیدگاه حقوقی سخت‌تر وغیر قابل بازگشت است.

۲-۴ انواع واگذاری مجازی

واگذاری مجازی به دو صورت انجام می‌گیرد: واگذاری مجازی-مالی و واگذاری مجازی-فیزیکی. در نوع مالی تنها یک قرارداد صرفاً مالی است که خریدار خود را در مقابل افزایش قیمت‌ها بیمه می-کند. نوع فیزیکی یک قرارداد اختیار خرید است. در قراردادهای اختیار بین خریدار و فروشنده اجباری برای منعقدکردن قرارداد با یکدیگر ندارند اما در واگذاری مجازی-فیزیکی تولیدکننده غالب توسط سیاست‌گذاران مجبور به فروش ظرفیت نیروگاه مجازی شده است. تفاوت کوچک دیگر قراردادهای اختیار و واگذاری مجازی-فیزیکی در قیمت تحویل انرژی است که در قراردادهای اختیار امکان چانه زنی برای تعیین قیمت قطعی وجود دارد اما در واگذاری مجازی-فیزیکی این قیمت از قبل توسط سیاست‌گذاران تعیین شده است.

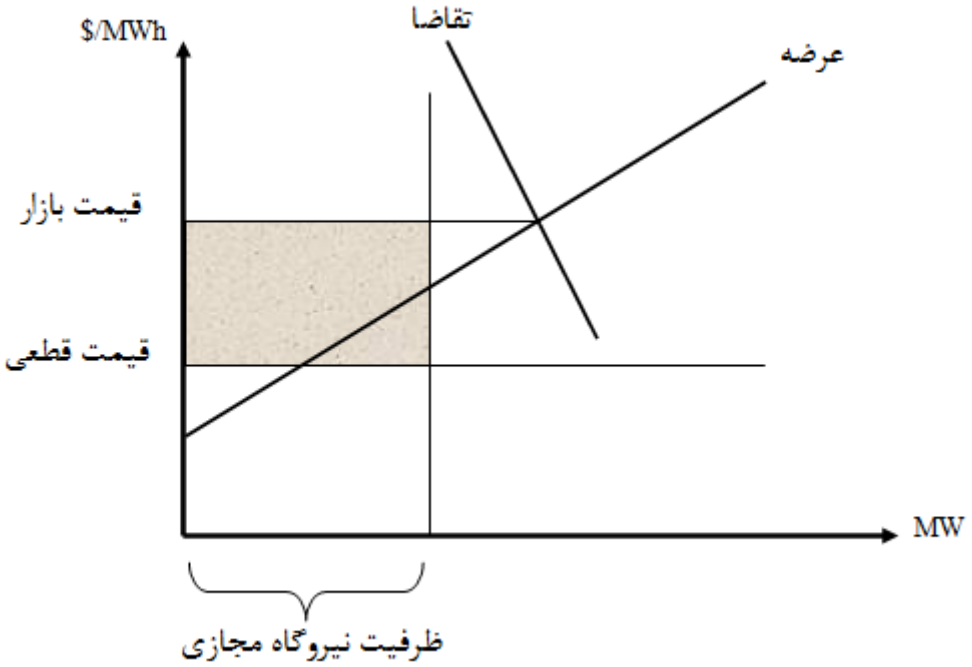
۲-۴-۱ تفاوت واگذاری مجازی-مالی و فیزیکی

مهمترین تفاوت واگذاری مجازی-مالی و فیزیکی در تصمیم‌گیری تولید است که در نوع فیزیکی خریدار می‌تواند برای ظرفیتش تصمیم‌گیری کند، ولی در نوع مالی خریدار چنین اختیاری ندارد. یعنی در نوع مالی مالک غالب با کل ظرفیتش در بازار شرکت می‌کند. اما در نوع فیزیکی مالک غالب نمی‌تواند با کل ظرفیتش در بازار شرکت کند و باید با کسری از ظرفیت (کل ظرفیت بجز مقدار ظرفیت مجازی فروخته شده به بازار) پیشنهاد دهد. تفاوت دیگر این دو در تحویل فیزیکی کالای برق است که تنها در واگذاری مجازی-فیزیکی تحویل کالای برق صورت می‌پذیرد، اما در نوع مجازی-مالی هیچ‌گاه تحویل کالا صورت نمی‌گیرد و صرفاً یک قرارداد مالی است. تفاوت دیگر این است که در سیاست واگذاری مجازی-فیزیکی، قرارداد بین خریدار و مالک در ارتباط با نیروگاه مشخصی منعقد می‌شود؛ اما در سیاست واگذاری مجازی-مالی نیروگاه مشخصی در قرارداد بین خریدار و مالک ذکر نمی‌شود[۷].

۲-۴-۱ واگذاری مجازی-مالی

در واگذاری مجازی-مالی به صورت یک قرارداد بین تولیدکننده و خرده‌فروشان انجام می‌پذیرد و خرده‌فروش یک قرارداد بیمه مالی دریافت می‌کند. این قرارداد در ارتباط با هیچ نیروگاه مشخصی نیست، تنها اگر قیمت بازار لحظه‌ای از یک سطح معین بالاتر رود سپس خرده‌فروش از طرف تولید کننده مبلغی دریافت خواهد کرد. درواقع خرده‌فروش با این قرارداد خود را بیمه کرده است که تا پایان مدت قرارداد انرژی مورد نیازش را می‌تواند با قیمت‌قطعی بخرد و در مقابل افزایش قیمت‌ها درامان بماند. خریدار نیروگاه مجازی نمی‌تواند برای فروش ظرفیت نیروگاه مجازی‌اش در بازار نقش فعالی داشته باشد. چون نمی‌تواند انرژی تولیدی نیروگاه مجازی را تحویل بگیرد و در اصطلاح یک شرکت کننده پسیو در بازار برق است[۷].

طبق قرارداد واگذاری مجازی-مالی خریدار مبلغی را به عنوان بیمه فروشنده پرداخت می‌کند و مقدار معینی ظرفیت نیروگاه مجازی را با قیمت قطعی مشخص می‌خرد. فروشنده متعهد می‌گردد اگر قیمت بازار لحظه‌ای از قیمت قطعی بیشتر شود تفاوت این دو قیمت ضرب‌در میزان ظرفیت نیروگاه-مجازی را به ازای هر ساعت به خریدار پرداخت کند و اگر قیمت بازار لحظه‌ای برابر و یا کمتر از قیمت قطعی شود پرداختی صورت نمی‌گیرد[۶]. میزان پرداخت تولیدکننده غالب به خریدار نیروگاه مجازی در شکل (۲-۲) نشان داده شده است.



شکل (۲-۲)- مبلغ دریافتی خریدار نیروگاه مجازی

۲-۴-۲ واگذاری مجازی-فیزیکی

پس از منعقد شدن قرارداد واگذاری مجازی، خریدار نیروگاه مجازی یک قرارداد اختیار خرید استاندارد در اختیار دارد. درواقع، خرده‌فروشی که نیروگاه مجازی-فیزیکی خریده است، حق تولید چند مگاوات از ظرفیت تولید نیروگاه را خریده است. خریدار نیروگاه مجازی-فیزیکی می‌تواند در بازار فعال باشد و یا حضوری اکتیو داشته باشد.

خریدار نیروگاه مجازی-فیزیکی مبلغی را به عنوان خرید حق تولید به فروشنده می‌پردازد و اختیار فروش انرژی تا سقف ظرفیت نیروگاه مجازی را دارد. اگرچه بایستی هزینه تولید که برابر قیمت قطعی بازای هر مگاوات ساعت است را به فروشنده بپردازد. در نتیجه خریدار باید پیش بینی مناسبی از قیمت بازار داشته باشد و هر زمان که تشخیص دهد قیمت بازار از قیمت قطعی بیشتر می‌شود ظرفیتش را تولیدکند. البته این یک قرارداد اختیار است و اختیار تحویل گرفتن توان با خریدار است. یک خریدار ممکن است هیچگاه از حق تولیدش در طول مدت قرارداد استفاده نکند که در این صورت مبلغ پرداختی اولیه را از دست داده است. در این نوع واگذاری پیش‌بینی مناسب از قیمت بازار اهمیت ویژه ای دارد[۶].

هر قرارداد واگذاری مجازی دارای ۴ مولفه مهم است[۸]:

۱. میزان ظرفیت؛ میزان ظرفیت پیشنهادی برای نیروگاه مجازی
۲. هزینه بیمه ماهیانه؛ مبلغ پرداختی خریدار نیروگاه مجازی به فروشنده آن بازای هر مگاوات ظرفیت
۳. قیمت قطعی؛ قیمت از پیش تعیین شده‌ای که نیروگاه مجازی با آن تسویه می‌شود
۴. مدت قرارداد؛ مدت موقتی که نیروگاه مجازی در اختیار خریدار است

مولفه‌های میزان ظرفیت و هزینه بیمه پرداختی ماهیانه که خرده‌فروش به مالک نیروگاه پرداخت می‌کند از خروجی یک مناقصه واگذاری حاصل می‌گردد. قیمت قطعی و همچنین مدت قرارداد قبل از شروع مناقصه توسط برگزار کننده مناقصه با هماهنگی سیاست‌گذارن بازار، معین می-گردد.

این مناقصات در بیشتر کشورها شامل نیروگاه مجازی بارپایه و نیروگاه مجازی بار پیک است. نیروگاه مجازی بارپایه ظرفیت مربوط به نیروگاه‌های بار پایه است که خریدار آن می‌تواند در تمام طول ساعات روز و همچنین تمام روزهای هفته از ظرفیت مجازی‌اش استفاده کند اما نیروگاه مجازی بار پیک مربوط به ظرفیت نیروگاه‌های پیک است و خریدار آن تنها می‌تواند در برخی از ساعات روز (برای مثال ۸ صبح تا ۱۲ شب) و تنها در روزهای کاری هفته (یکشنبه تا جمعه) بجز روزهای تعطیل از ظرفیت‌مجازی‌اش استفاده نماید. قیمت قطعی در نیروگاه مجازی بارپایه برابر هزینه حاشیه‌ای بهره-برداری یک نیروگاه هسته‌ای است برای مثال در فرانسه حدود ۹ یورو بازای هر مگاوات ساعت است

بطور مشابه قیمت هر مگاوات ساعت برای نیروگاه‌های مجازی بارپیک برابر هزینه حاشیه‌ای نیروگاه-های پیک است که در فرانسه در ابتدا ۲۶ یورو بود اما هم‌راستا با افزایش قیمت نفت، رشد داشته و به بیشتر از ۵۰ یورو رسیده است.

۲-۵ مناقصات واگذاری مجازی

مناقصات نیروگاه مجازی در کشورهای مختلف به روش‌های متفاوتی در حال اجراست که در مرجع [۵] انواع آن بطور کامل بحث و بررسی شده است. ورودی‌های مناقصه عبارت است از:

۱. میزان کل ظرفیت پیشنهادی یک تولیدکننده برای ظرفیت مجازی؛
۲. بازه قیمتی کمینه تا بیشینه هزینه بیمه؛
۳. طول مدت قرارداد؛
۴. قیمت قطعی؛

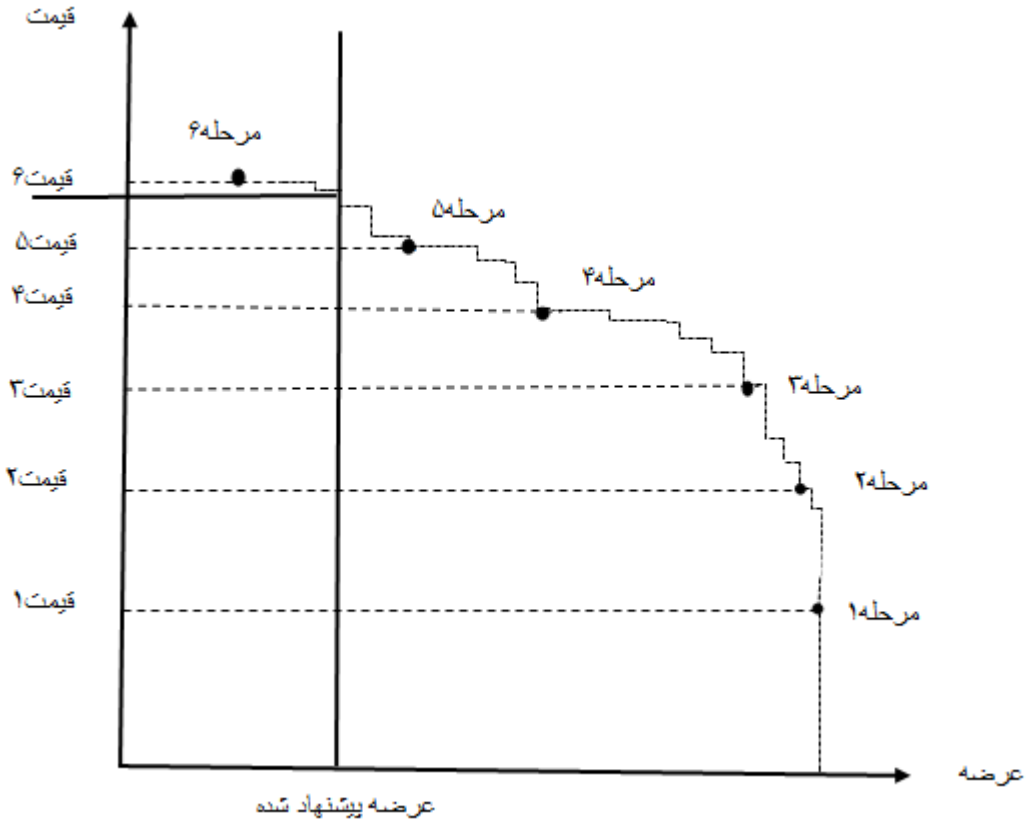
دوره های واگذاری نیروگاه های مجازی میان مدت (۳ تا ۱۲ماه) و بلند مدت (۱۲ تا ۴۸ ماه) است. میزان ظرفیت مجازی کل مورد مناقصه ممکن است توسط نهاد قانون‌گذار معین می‌گردد برای مثال میزان ۱۴۵TWh از ظرفیت شرکت اندسا و ایبردرولا در اولین مناقصه ظرفیت مجازی در اسپانیا به حراج رسید[۹].

میزان ظرفیت خریده‌شده هر خرده‌فروش، مدت قرارداد و میزان بیمه پرداختی ماهیانه پس از برگزاری مناقصه مشخص می‌گردد.

اگرچه مناقصات نیروگاه مجازی در کشورهای مختلف به روش‌های متفاوتی برگزار می‌گردد در اینجا یکی از مهمترین روش‌های تسویه این مناقصات که به روش افزایش ساعت با مرحله‌های گسسته است، به طور مختصر بیان می‌شود.

ساختار مناقصه بدین ترتیب است که پس از این که سیاست‌گذاران میزان ظرفیت کل برای فروش را ارائه کردند نهاد برگزارکننده مناقصه یک بازه قیمت $[P_{min1}, P_{max1}]$ برای هزینه بیمه ماهیانه ارائه می‌دهد. شرکت‌کنندگان در مناقصه بخشی از ظرفیت کل را با هزینه مورد نظرشان که در بازه قیمت پیشنهادی است، پیشنهاد می‌دهند.

نهاد برگزارکننده مناقصه تابع تجمعی ظرفیت‌های پیشنهاد شده توسط خرده‌فروشان را محاسبه می‌کند، اگر ظرفیت کل کمتر از ظرفیت تجمعی باشد مناقصه به دور دوم کشیده می‌شود ولی هزینه بیمه ماهیانه افزایش می‌یابد. در غیر اینصورت مناقصه پایان می‌پذیرد و میزان ظرفیت مجازی خریداری شده هر شرکت‌کننده و هزینه بیمه ماهیانه آن مشخص می‌گردد. در شکل (۲-۳) نمونه از اجرای مناقصه افزایش ساعت با مرحله‌های گسسته را نشان می‌دهد.



شکل (۲-۳) – نحوه اجرای مناقصات افزایش ساعت با مرحله‌های گسسته

قیمت‌گذاری بیمه به صورت یکنواخت[۱] یا تمایزی[۲] انجام می شود. در ساختار یکنواخت پس از مشخص شدن قیمت تسویه کلیه برندگان ظرفیت مجازی باید مبلغ بیمه ماهیانه را برابر قیمت تسویه مناقصه به فروشنده پرداخت کنند. اما در ساختار تمایزی هر خریدار باید مبلغ بیمه را برابر همان مبلغ پیشنهادی خودش پرداخت کند.

۲-۶ مطالعه میدانی سیاست واگذاری مجازی

۲-۶-۱ پیشینه واگذاری

مناقصه اولین نیروگاه مجازی در بازار برق فرانسه توسط ای دی اف[۳]، برگزار می‌کند[۱۰]. طی این مناقصه در سال ۲۰۰۱ میلادی ۶ گیگاوات از ظرفیت تولید این تولیدکننده به صورت مجازی واگذار گردید. ای دی اف حدود ۸۵ تا ۹۰٪ از ظرفیت نصب شده را در اختیار دارد. مناقصات نیروگاه مجازی در فرانسه در دو گروه بار پایه و پیک صورت می‌گیرد. در دسامبر سال ۲۰۰۹ میلادی قیمت قطعی نیروگاه مجازی بارپایه ۱۰ یورو بازای هر مگاوات ساعت و برای بارپیک قیمت قطعی برابر ۵۲

1Uniform
2Pay-as-bid
3 EDF: Électricité de France

یورو بازای هر مگاوات ساعت بوده است. حدود ٪۸۰ از ظرفیت نیروگاه مجازی به بارپایه و ٪۲۰ به بار-پیک اختصاص داده شد [۱۱] و [۵].

پس از برگزاری اولین مناقصه واگذاری مجازی توسط بازار برق فرانسه، نیروگاه مجازی برای کشورهای اروپایی کم‌کم شناخته شد. به این ترتیب، مناقصات نیروگاه مجازی برای الکترابل[1] در بلژیک [۱۲]، نئون[2] در هلند، السام[3] در دانمارک، اندسا و ایبردرولا[4] اسپانیا، رن و ای دی پی[5] در پرتقال، و ای آن و آر دبلیوای[6] در آلمان اجرا شد. مناقصات ظرفیت با ساختار مشابه برای تگزاس در آمریکا[7] نیز اجرا شده است[۱۳].

۲-۶-۲ واگذاری مجازی در اسپانیا

بازار برق اسپانیا در سال ۱۹۹۸ میلادی راه‌اندازی و واگذاری مجازی در سال ۲۰۰۷ به اسپانیا معرفی شد. سیاست‌گذاران دریافتند تنها خرده‌فروشان برای ادامه فعالیت بایستی صاحب ظرفیت تولید نیز باشند، به این ترتیب شرکت‌های اندسا و ایبردورا برای اولین بار مجبور به فروش نیروگاه مجازی شدند. در سال ۲۰۰۷ شرکت اندسا ٪۳۷ و ایبردرولا ٪۴۲ از ظرفیت نصب شده در اسپانیا را در اختیار داشته‌اند. در اولین برگزاری مناقصات نیروگاه مجازی ۱۵ شرکت‌کننده رقابت کردند. امروزه نیروگاه-های مجازی در اسپانیا به دو گونه مختلف ارائه می‌شود، نیروگاه مجازی بارپایه و نیروگاه مجازی بار-پیک. نیروگاه‌های مجازی بارپایه برای کل ۲۴ ساعت و همه ۷ روز هفته با قیمت قطعی ۱۷ یورو بازای هرمگاوات ساعت است و نیروگاه‌های مجازی بارپیک برای ۱۶ ساعت (از ۸ صبح تا ۱۲ شب) و برای پنج روز از هفته (از یکشنبه تا جمعه به غیر از روزهای تعطیل) با قیمت قطعی ۵۲ یورو بازای هرمگاوات ساعت است[۹].

پس از برگزاری مناقصات معلوم می‌گردد که هر بازیگر برای نیروگاه مجازی بارپایه ۳ ماهه و ۶ ماهه باید میزان هزینه بیمه ۲۰،۰۰۰ و ۲۰،۱۱۵ یورو بازای هر مگاوات در هر ماه پرداخت کند. همچنین برای بار ۳ ماهه و ۶ ماهه و نیروگاه‌های مجازی پیک یک را سال به ترتیب هزینه بیمه ۲،۳۱۰ و ۲،۸۶۷ یورو بازای هر مگاوات برای هر ماه پرداخت کند.

1Electrabel
2Nuon
3Elsam
4Endesa and Iberdrola
5Ren and EDP
6E.ON and RWE
7US

۲-۶-۳ واگذاری مجازی در بلژیک

در بلژیک تولید کننده غالب حدود٪۸۵ از کل تولید ملی را داراست و٪۶ از ظرفیت تولیدش را مقید به قرارداد نیروگاه مجازی است. نیروگاه مجازی بلژیک برای یک نیروگاه خاص طراحی نشده است، بلکه یک قرارداد اختیار استاندارد است. در این قرارداد یک قیمت ثابت قطعی در نظر گرفته می‌شود و نرخ افزایشی برای قیمت قطعی در نظر گرفته نمی‌شود. می‌توان گفت قراردادهای واگذاری مجازی در بلژیک نمونه واگذاری مجازی-مالی هستند. لازم به ذکر است خریداران نیروگاه مجازی نمی‌توانند بیش از ۴۰٪ از ظرفیت پیشنهاد شده برای نیروگاه مجازی را بخرد.

در بلژیک بازار لحظه‌ای سیالی وجود ندارد. اغلب قیمت بازار هلند به عنوان مرجع برای بازار بلژیک در نظر گرفته می‌شود.

۲-۶-۴ مطالعه میدانی آثار سیاست واگذاری

در مرجع [۱۴] اثر سیاست واگذاری مجازی-فیزیکی بر قیمت بازار روز قبل فرانسه به طور تجربی تحلیل شده است. تحلیل نتایج نشان می دهد خریداران نیروگاه مجازی موفق به کسب سود نمی‌شوند. زیرا نیاز مبرم خریداران به تأمین انرژی موجب شده است آنها مبلغ بیمه ماهیانه را بالا پیشنهاد دهند تا برنده مناقصه باشند.

مرجع [۱۵] سیاست واگذاری مجازی-فیزیکی را در بازار روز قبل فرانسه برای ۴ سال به طور تجربی بررسی کرده است. نتایج نشان از اثرگذاری این سیاست بر کاهش قیمت دارد. یعنی در بیشتر ساعاتی که قیمت بازار بیشتر از قیمت قطعی بوده است، خریداران نیروگاه مجازی از ظرفیت خود استفاده کرده اند. این نشان از اجرای درست این سیاست دارد.

۲-۷ مطالعه تئوریک سیاست واگذاری مجازی

در مرجع [۱۶] بر اساس مدل تعادل تابع عرضه بیان شده است که باید تولیدکنندگان مجبور به فروش نیروگاه مجازی-فیزیکی به خرده فروشان شوند. برای این ادعا دلایل زیر را ارائه می‌دهند. این مرجع بیان می‌کند نیروگاه‌های مجازی-فیزیکی موجب افزایش رقابت در بلند مدت می‌شود. همچنین امکان کنترل آسان‌تر قدرت بازار و اثر استراتژیک برتر قرارداد اختیار خرید فیزیکی نسبت به قراردادهای آتیه وجود دارد. و دیگر این‌که تحویل فیزیکی تاکیدی بر این است که تولید کافی وجود دارد.

در این مرجع فرض شده است که برای قراردادهای اختیار که تولیدکننده‌ها مجبور به فروشند، مقررات کاملی وجود دارد و همچنین تولیدکنندگان تابع عرضه خطی به بازار لحظه‌ای ارائه می‌دهند. این فرضیات ساده کننده از نقاط ضعف مدل به کار گرفته شده است.

در مرجع [۶] با کمک مدل کارنو نشان داده شده است که قیمت بازار با واگذاری مجازی-فیزیکی پایین‌تر از واگذاری مجازی-مالی است. فرض شده است که تعداد ثابتی از شرکت‌ها نیروگاه-های مجازی می‌فروشند و این شرکت‌ها تصمیم می‌گیرند چه میزان ظرفیت نیروگاه مجازی بفروشند. در حالیکه در تجربیات اجرای مناقصات مجازی، میزان ظرفیت را سیاست گذار تعیین می‌کند.

مرجع [۱۷] عملکرد سیاست‌های واگذاری فیزیکی و واگذاری مجازی برای کاهش قدرت بازار به کمک مدل کارنو ارائه شده در مرجع [۱۸] مطالعه شده است. در این مدل تنها یک تولیدکننده غالب می‌تواند رفتار استراتژیک غیررقابتی (احتکار ظرفیت) انجام دهد و بقیه تولیدکنندگان رفتار رقابتی دارند. شرکت غالب بخشی از دارایی‌اش را تحت سیاست واگذاری فیزیکی واگذار می‌کند که موجب کاهش قابل توجه قیمت می‌گردد. همچنین در این مرجع واگذاری بهینه معرفی می‌شود و ادعا می-شود از واگذاری نیروگاه‌های بارپایه بهتر است. بر طبق این مرجع واگذاری بهینه را واگذاری واحدهای تولیدی حاشیه‌ای و یا تعیین‌کننده قیمت بیان می‌شود. به عبارت دیگر واگذاری از تکنولوژی بار میانی، نیروگاه‌هایی که قبل از واگذاری تعیین کننده قیمت هستند، بیشترین اثر را در کاهش میزان احتکار ظرفیت تولیدکننده غالب دارد. نتایج این مرجع نشان می دهد، اثر واگذاری فیزیکی بر کاهش قدرت بازار بیش از واگذاری مجازی-مالی است. عملکرد واگذاری مجازی-مالی در بهترین حالت مانند واگذاری فیزیکی نیروگاه‌های بارپایه است.

در مدل تحلیلی این مرجع، مدلی ساده است که محدودیت‌های زمانی داخلی واحدهای تولیدی را مدل نکرده است. همچنین در این مقاله برای ترکیب تکنولوژی‌های مختلف نیز تفاوتی در نظر نگرفته شده است و مسأله مهم تنوع تکنولوژی بررسی نشده است.

در مرجع [۱۹] به بررسی اثرات رقابتی نیروگاه‌های مجازی در بلند مدت پرداخته شده است. در مدل این مرجع یک تولیدکننده وجود دارد که بخشی از ظرفیتش را بصورت نیروگاه مجازی-فیزیکی به یک خریدار می‌فروشد. سپس این دو تولیدکننده در بازار با یکدیگر طبق مدل کارنو به رقابت می-پردازند. بر اساس نتایج سیاست‌گذاران بازار نباید به اثر بخشی این سیاست امیدوار باشند. زیرا این سیاست هنگامی موثر خواهد بود که خریدار نیروگاه مجازی در تمام ساعات از ظرفیت نیروگاه مجازی خود استفاده کند و آن را از تولیدکننده غالب تحویل بگیرد. در حالیکه تحویل انرژی همیشه اتفاق نمی‌افتد.

در این مقاله بازار انحصار کامل فرض شده است که چندان با محیط رقابتی سازگاری ندارد. همچنین فرض شده است کل ظرفیت نیروگاه مجازی متعلق به یک خریدار است که با توجه به برگزاری مناقصه، چندان منطقی نمی‌باشد.

۸-۲ جمع بندی و نتیجه‌گیری

در این فصل، سیاست واگذاری مجازی و مولفه‌های آن معرفی شد. مطالعه میدانی و تئوریک سیاست واگذاری مجازی نشان می‌دهد این سیاست به عنوان ابزار کاربردی در اختیار سیاست‌گذاران بازار برای کاهش قدرت بازار است. برخی محققان معتقدند این سیاست می‌تواند روی کاهش قیمت‌ها موثر باشد. بررسی سابقه موضوع گواه آن است که مطالعه دقیق و عمیقی روی این سیاست انجام نشده است. بنابراین ضروری به نظر می‌رسد عملکرد این سیاست برای شرایط مختلف بررسی شود.

فصل سوم

مدل‌سازی

۳-۱ مقدمه

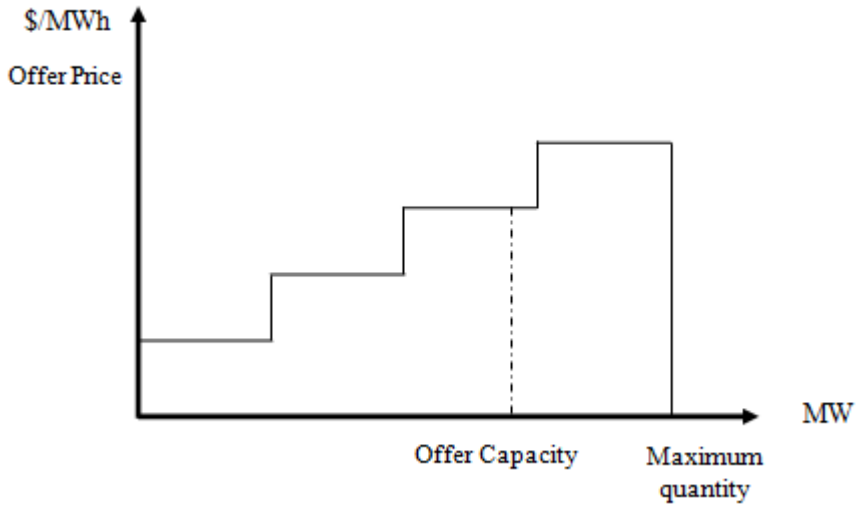
با توجه به افزایش به کارگیری سیاست واگذاری مجازی-مالی در بازارهای برق، چگونگی اثرگذاری این سیاست در کاهش قدرت بازار از دیدگاه واحد پایش مسأله مهم می‌باشد. در این راستا، اثر به کارگیری این سیاست در بازار روز قبل مطالعه می‌شود. جهت شبیه‌سازی قیمت و خروجی‌های بازار، مسأله بیشینه‌سازی سود تولیدکننده غالب مقید به شرایط سیاست واگذاری مجازی-مالی مدل-سازی می‌شود.

در این فصل، مسأله بیشینه‌سازی سود تولیدکننده غالب تشریح می‌شود. بر اساس فرضیات، این مسأله به صورت یک مسأله بهینه‌سازی دو سطحی مدلسازی می‌شود. مسأله دو سطحی به مسأله یک سطحی خطی تبدیل می‌شود.

۳-۲ تشریح مسأله تولیدکننده غالب

تولیدکننده غالب، تولیدکننده‌ای است که بتواند به طور مستقیم روی عملکرد بازار اثر بگذارد و خروجی‌های بازار را به نفع خودش تحت تأثیر قرار دهد و یا به عبارت دیگر از پتانسیل قدرت بازار برای افزایش سود استفاده نماید [۲۰]. براساس مطالعه میدانی در حوزه اجرای سیاست واگذاری مجازی-مالی رفتار تولیدکننده‌ای را شبیه‌سازی می‌کنیم که از پتانسیل قدرت بازار قابل توجهی برخوردار است و می‌تواند از استراتژی احتکار ظرفیت برای افزایش سود استفاده نماید، ولی سایر تولیدکنندگان رفتاری کاملاً رقابتی دارند و با تمام ظرفیت خود و همچنین با هزینه تولید حاشیه‌ای در بازار روز قبل شرکت می‌کنند. تولیدکننده غالب نیز با هزینه حاشیه‌ای خود در بازار شرکت می‌کند و تنها می‌تواند با ارائه ندادن بخشی از ظرفیتش به بازار، موجب دور شدن بازار از سطح رقابتی شود. شکل (۳-۱) چگونگی مدل‌سازی ریاضی رفتار تولیدکننده را نشان می‌دهد.

با توجه به اینکه از اهداف اصلی به کارگیری سیاست‌واگذاری مجازی-مالی، کاهش ریسک‌های ناشی از کمبود تولید، در بازار است، این فرضیات می‌تواند تا حدودی آثار این سیاست را بر قیمت تولید و مصرف انرژی آشکار کند.



شکل (۳-۱)- نحوه پیشنهاد ظرفیت تولیدکننده غالب

در این مدل قیمت قطعی نیروگاه مجازی بار پایه و بار پیک ثابت در نظر گرفته می‌شود. همچنین فرض می‌شود تولیدکنندگان به صورت گسسته بلوک‌های انرژی و قیمت آن را به بهره‌بردار مستقل سیستم ارائه می‌دهند. با توجه به وجود یک تولیدکننده غالب در این مدل، همانگونه که در شکل (۳-۱) نشان داده شده است، تولیدکننده غالب می‌تواند ظرفیت پیشنهادی کمتری نسبت به بیشینه ظرفیت خود را ارائه دهد. مصرف‌کنندگان نیز در سناریوهایی که تقاضا به قیمت حساس می-شود پیشنهادهای خرید انرژی خود را ارائه می‌دهند. در سناریوهای تقاضای ناکشسان تنها میزان بار مورد تقاضا را اعلام می‌کنند. سپس مسأله تسویه یکنواخت بازار توسط بهره‌بردار مستقل سیستم حل می‌شود و میزان تولید هر نیروگاه، قیمت بازار و مبلغ دریافتی خریداران نیروگاه مجازی بدست می‌آید. تلاش شده است این مدل قابلیت اجرا در سیستم‌های واقعی را داشته باشد.

۳-۳ علائم و اختصارات

در این قسمت علائم استفاده شده در فرمول‌بندی به طور تفکیک شده شامل پارامترها، متغیرها و مجموعه‌ها تعریف می‌شوند.

- پارامترها

$C^{D}_{mn}(t)$ هزینه خرید nامین بلوک انرژی از mامین مصرف کننده در ساعت t.

$C^{G}_{ij}(t)$ هزینه تولید jامین بلوک انرژی از iامین واحد تولیدی رقابتی در ساعت t.

$C^{W}_{ij}(t)$ هزینه تولید jامین بلوک انرژی از iامین واحد متعلق به تولیدکننده غالب در ساعت t.

$P_{mn}^{D,\max}$ بیشینه توان پیشنهادی nامین بلوک ازmامین مصرف‌کننده.

$P_{m}^{D,\min}$ کمینه توان پیشنهادی mامین مصرف کننده.

$P_{ij}^{G,\max}(t)$ بیشینه توان jامین بلوک انرژی از iامین واحد تولیدی رقابتی در ساعت t.

$P_{ij}^{W,\max}(t)$ بیشینه توانjامین بلوک انرژی از iامین واحد تولیدکننده غالب در ساعت t.

VP^{WB} ظرفیت نیروگاه مجازی بارپایه.

VP^{WP} ظرفیت نیروگاه مجازی بارپیک.

$\lambda^{SB}(t)$ قیمت قطعی نیروگاه مجازی بار پایه.

$\lambda^{SP}(t)$ قیمت قطعی نیروگاه مجازی بار پیک.

SC_i^W هزینه روشن شدنiامین واحد تولیدکننده غالب.

$P_i^{W,\min}$ کمینه توان iامین واحد تولیدکننده غالب.

R_i^{WU} شیب افزایش توان iامین واحد تولیدکننده غالب.

R_i^{WD} شیب کاهش توان iامین واحد تولیدکننده غالب.

MT_i^{WN} تعداد ساعاتی که واحد iام از تولیدکننده غالب، باید به طور مداوم روشن باشد.

MT_i^{WF} تعداد ساعاتی که واحد iام از تولیدکننده غالب، باید به طور مداوم خاموش باشد.

MT^{WU} حداقل زمان روشن بودن iامین واحد تولیدکننده غالب.

MT^{WD} حداقل زمان خاموش بودن iامین واحد تولیدکننده غالب.

- متغیرها

$P_{mn}^{D}(t)$ توان مصرفی nامین بلوک از mامین مصرف‌کننده در ساعت t.

$P_{ij}^{G}(t)$ توان تولیدی jامین بلوک انرژی از iامین واحد تولیدی رقابتی در ساعت t.

$P_{ij}^{W}(t)$ توان تولیدی jامین بلوک انرژی از iامین واحد تولیدکننده غالب در ساعت t.

$P_{ij}^{W,m}(t)$ توان پیشنهادی jامین بلوک انرژی از iامین واحد تولیدکننده غالب در ساعت t.

VC^{WB} متغیر کمکی برای تعیین مبلغ پرداختی به خریدار نیروگاه مجازی-مالی بار پایه.

VC^{WP} متغیر کمکی برای تعیین مبلغ پرداختی به خریدار نیروگاه مجازی-مالی بار پیک.

$C_i^{WS}(t)$ هزینه روشن شدنiامین واحد تولیدکننده غالب در ساعت t.

$\lambda(t)$ قیمت بازار در ساعت t.

$u_i^W(t)$ متغیر باینری نشان دهنده روشن و یا خاموش بودنiامین واحد تولیدکننده غالب در
ساعت t.

- مجموعه‌ها

Ω^G مجموعه واحدهای تولیدی متعلق به رقبای تولیدکننده غالب.

Ω^{DL} مجموعه متغیرهای دوگان مربوط به مسأله سطح پایین.

Ω^{PL} مجموعه متغیرهای اصلی مربوط به مسأله سطح پایین.

Ω^{PU} مجموعه متغیرهای اصلی مربوط به مسأله سطح بالا.

Ω^{PT} مجموعه ساعت‌های فعال نیروگاه مجازی-مالی بار پیک.

Ω^W مجموعه واحدهای تولیدی متعلق به تولیدکننده غالب.

۳-۴ فرمول‌بندی مسأله

مسأله بیشینه‌سازی سود تولیدکننده غالب در بازار روز قبل به صورت مسأله بهینه‌سازی دو سطحی فرمول‌بندی می‌شود. در مسأله سطح بالا، استراتژی بهینه برای پیشنهاد ظرفیت تولیدکننده غالب به بازار تعیین می‌شود و در مسأله سطح پایین، مسأله تسویه بازار توسط بهره‌بردار بازار حل می‌شود.

$$\underset{\Omega^{PU}\cup\Omega^{PL}\cup\Omega^{DL}}{Maximize} \sum_{i\in\Omega^W,j,t}\lambda(t)P_{ij}^W(t)-\sum_{i\in\Omega^W,t}C_i^{WS}(t) \qquad (۱-۳)$$
$$-\sum_{i\in\Omega^W,j,t}C_{ij}^W(t)P_{ij}^W(t)-\sum_t VC^{WB}(t)VP^{WB}-\sum_{t\in\Omega^{PT}}VC^{WP}(t)VP^{WP}$$

Subject to:

$$VC^{WB}(t) = \max\left\{\lambda(t) - \lambda^{SB}, 0\right\}, \forall t \quad (۲-۳)$$

$$VC^{WP}(t) = \max\left\{\lambda(t) - \lambda^{SP}, 0\right\}, \forall t \in \Omega^{PT} \quad (۳-۳)$$

$$0 \le P_{ij}^{W,m}(t) \le P_{ij}^{W,\max}(t), \forall j, t, i \in \Omega^{W} \quad (۴-۳)$$

$$C_i^{WS}(t) \ge SC_i^{W}(u_i^{W}(t) - u_i^{W}(t-1)), \forall t, i \in \Omega^{W} \quad (۵-۳)$$

$$C_i^{WS}(t) \ge 0, \forall t, i \in \Omega^{W} \quad (۶-۳)$$

$$P_i^{W}(t) = \sum_j P_{ij}^{W}(t), \forall t, i \in \Omega^{W} \quad (۷-۳)$$

$$u_i^{W}(t) P_i^{W,\min}(t) \le P_i^{W}(t) \le P_i^{W,\max}(t) u_i^{W}(t), \forall t, i \in \Omega^{W} \quad (۸-۳)$$

$$P_i^{W}(t) - P_i^{W}(t-1) \le R_i^{WU}, \forall t, i \in \Omega^{W} \quad (۹-۳)$$

$$P_i^{W}(t-1) - P_i^{W}(t) \le R_i^{WD}, \forall t, i \in \Omega^{W} \quad (۱۰-۳)$$

$$\sum_{T=1}^{MT_I^{WN}} u_i^{W} = MT_i^{WN}, \forall i \in \Omega^{W} \quad (۱۱-۳)$$

$$MT_i^{WU}(u_i^{W}(t) - u_i^{W}(t-1)) \le \sum_{t'=t}^{MT_i^{WU}+t-1} u_i^{W}(t'), \forall i \in \Omega^{W},$$

$$t = MT_i^{WN}+1,\ldots,24-MT_i^{WU}+1 \quad (۱۲-۳)$$

$$(24-t+1)(u_i^{W}(t) - u_i^{W}(t-1)) \le \sum_{t'=t}^{24} u_i^{W}(t'), \forall i \in \Omega^{W}, \quad (۱۳-۳)$$

$$t = 24 - MT_i^{WU} + 2,\ldots,24$$

$$\sum_{t-1}^{MT_i^{WF}} u_i^{W}(t) = 0, \forall i \in \Omega^{W} \quad (۱۴-۳)$$

$$MT_i^{WU}(u_i^{W}(t-1) - u_i^{W}(t)) \le \sum_{t''=t}^{MT_i^{WD}+t-1} (1 - u_i^{W}(t')), \forall i \in \Omega^{W}, \quad (۱۵-۳)$$

$$t = MT_i^{WF}+1,\ldots,24-MT_i^{WD}+1$$

$$(24-t+1)(u_i^W(t-1)-u_i^W(t)) \le \sum_{t'=t}^{24}(1-u_i^W(t')), \forall i \in \Omega^W,$$

$$t = 24 - MT_i^{WD} + 2,...,24 \qquad (۱۶-۳)$$

$$P_{ij}^W(t), \lambda(t) \in \arg\left\{ \underset{\Omega^{pl}}{Minimize} \sum_{i\in\Omega^W,j,t} C_{ij}^W(t) P_{ij}^W(t) + \sum_{i\in\Omega^G,j,t} C_{ij}^G(t) P_{ij}^G(t) \right.$$

$$\left. - \sum_{m,n,t} C_{mn}^D(t) P_{mn}^D(t) \right. \qquad (۱۷-۳)$$

$$\sum_{i\in\Omega^w,j} P_{ij}^W(t) + \sum_{i\in\Omega^G,j} P_{ij}^G(t) = \sum_{m,n} P_{mn}^D(t) : \lambda(t), \forall t \qquad (۱۸-۳)$$

$$0 \le P_{ij}^W(t) \le P_{ij}^{W,m}(t) : \mu_{ij}^{W,\min}(t), \mu_{ij}^{W,\max}(t), \forall j,t,i \in \Omega^W \qquad (۱۹-۳)$$

$$0 \le P_{ij}^G(t) \le P_{ij}^{G,\min}(t) : \mu_{ij}^{G,\min}(t), \mu_{ij}^{G,\max}(t), \forall j,i \in \Omega^G \qquad (۲۰-۳)$$

$$0 \le P_{mn}^D(t) \le P_{mn}^{D,\max}(t) : \mu_{mn}^{D,\min}(t), \mu_{mn}^{D,\max}(t), \forall m,n,t \qquad (۲۱-۳)$$

$$P_m^{D,\min}(t) \le \sum_n P_{mn}^D(t) : \mu_m^{D,\min}, \forall m,t \ \} \qquad (۲۲-۳)$$

مسأله بهینه‌سازی (۳-۱) تا (۳-۲۲) یک مسأله بهینه‌سازی دو سطحی است. روابط (۳-۱) تا (۳-۱۶) بیانگر مسأله سطح بالاست. تابع هدف (۳-۱) به دنبال بیشینه‌کردن سود تولیدکننده غالب در بازار روز قبل است. سود تولیدکننده غالب به صورت درآمد کسب شده حاصل از فروش انرژی در بازار است که هزینه بهره‌برداری و هزینه روشن کردن نیروگاه‌ها و همچنین مبلغ پرداختی به خریدار نیروگاه‌های مجازی بارپایه و پیک از آن کسر می‌شود. قیدهای (۳-۲) و (۳-۳) به ترتیب مربوط به مبلغ پرداختی به خریدار نیروگاه مجازی بار پایه و پیک می‌باشد که از اختلاف قیمت بازار و قیمت-های قطعی متناظر به دست می‌آید. رابطه (۳-۴) مربوط به محدوده پیشنهاد انرژی توسط تولیدکننده غالب به بازار است که ظرفیت پیشنهادی هر بلوک انرژی را به میزان بیشینه آن محدود می‌کند. قید-های (۳-۵) و (۳-۶) مربوط به هزینه روشن کردن واحدهای نیروگاهی تولیدکننده غالب است که با تغییر وضعیت دادن هر واحد از خاموش به روشن هزینه روشن شدن آن واحد در نظر گرفته می‌شود. قید (۳-۷) میزان تولید هر واحد نیروگاهی مربوط به تولید کننده غالب، برابر با مجموع تولید کلیه بلوک‌های انرژی آن واحد در نظر گرفته می‌شود. قید (۳-۸) تولید هر واحد را بین مقدار کمینه و بیشینه آن محدود می‌کند. رابطه‌های (۳-۹) و (۳-۱۰) به ترتیب مربوط به محدودیت نرخ افزایش و کاهش تولید بین دو ساعت متوالی است. قیدهای (۳-۱۱) تا (۳-۱۳) حداقل زمان روشن بودن واحد-

های نیروگاه را در نظر می‌گیرند. زیرا شرایط کیروش-کان-تاکر در یک مسأله محرب شرایط لازم و کافی برای دستیابی به جوانب بهینه سراسری میباشد. قیدهای (۳-۱۴) تا (۳-۱۶) نیز به طور مشابه به محدودیت حداقل زمان خاموش بودن واحدهای نیروگاهی تحت تملک تولیدکننده غالب را اعمال می‌کنند. روابط (۳-۱۷) تا (۳-۲۲) بیانگر مسأله سطح پایین است. تا به هدف (۳-۱۷) مسأله بهینه-سازی سطح پایین بیانگر کمینه‌سازی اختلاف هزینه تولید و مطلوبیت تقاضا در بازار روز قبل می‌باشد. رابطه (۳-۱۸) قید تعادل توان را به طور ساعتی برقرار می‌سازد. متغیر دوگان این قید قیمت بازار را تعیین می‌کند. رابطه (۳-۱۹) محدودیت تولید هر بلوک انرژی از واحدهای نیروگاهی تولیدکننده غالب است. رابطه (۳-۲۰) محدودیت تولید بلوک‌های انرژی واحدهای سایر تولیدکنندگان را در نظر می‌گیرد. رابطه (۳-۲۱) مصرف را برای بلوک‌های انرژی متقاضیان محدود می‌کند. رابطه (۳-۲۲) بیانگر حداقل میزان مصرف انرژی متقاضیان در هر ساعت است. با افزایش حداقل مقدار مصرف انرژی، حساسیت متقاضیان به تغییرات قیمت کاهش می‌یابد.

۳-۵ مدل برنامه‌ریزی ریاضی با قیود تعادل

با توجه به پیوسته و خطی بودن (و در نتیجه محدب) مسأله سطح پایین، این مسأله را می‌توان با شرایط کیروش-کان-تاکر جایگزین می‌کنیم[۲۱]. در این صورت مسأله دوسطحی تبدیل به یک مسأله بهینه‌سازی یک سطحی برنامه‌ریزی ریاضی با قیود تعادل می‌شود. در ادامه مسأله برنامه‌ریزی ریاضی با قیود تعادل فرمول‌بندی شده است. زیرا شرایط کیروش-کان-تاکر در یک مسأله محدب شرایط لازم و کافی برای دستیابی به جواب بهینه سراسری می‌باشد.

$$\underset{\Omega^{PU}\cup\Omega^{PL}\cup\Omega^{DL}}{Maximize}(1-3) \qquad (۲۳-۳)$$

Subject to:

$$\text{Constraints}\,(2-3)-(16-3) \qquad (۲۴-۳)$$

$$C_{ij}^{W}(t)-\lambda\ (t)+\mu_{ij}^{W,\max}(t)-\mu_{ij}^{W,\min}(t)=0,\forall j,t,i\in\Omega^{W} \qquad (۲۵-۳)$$

$$C_{ij}^{G}(t)-\lambda(t)+\mu_{ij}^{G,\max}(t)-\mu_{ij}^{G,\min}(t)=0,\forall j,t,i\in\Omega^{G} \qquad (۲۶-۳)$$

$$-C_{mn}^{D}(t)+\lambda(t)+\mu_{mn}^{D,\max}(t)-\mu_{mn}^{D,\min}(t)-\mu_{m}^{D,\min}=0,\forall m,n,t \qquad (۲۷-۳)$$

$$\sum_{i\in\Omega^{W},j}P_{ij}^{W}(t)+\sum_{i\in\Omega^{G},j}P_{ij}^{G}(t)=\sum_{m,n}P_{mn}^{D}(t),\forall t \qquad (۲۸-۳)$$

$$0\le\mu_{ij}^{W,\min}(t),\mu_{ij}^{W,\min}(t)\,P_{ij}^{W}(t)=0,0\le P_{ij}^{W}(t),\forall j,t,i\in\Omega^{W} \qquad (۲۹-۳)$$

$$0 \le \mu_{ij}^{W,\max}(t), \mu_{ij}^{W,\max}(t)(P_{ij}^{W,m}(t) - P_{ij}^{W}(t)) = 0, P_{ij}^{W}(t) \le P_{ij}^{W,m}(t), \forall j,t,i \in \Omega^{W} \quad (۳۰-۳)$$

$$0 \le \mu_{ij}^{G,\min}(t), \mu_{ij}^{G,\min}(t)\, P_{ij}^{G}(t) = 0, 0 \le P_{ij}^{G}(t), \forall j,t,i \in \Omega^{G} \quad (۳۱-۳)$$

$$0 \le \mu_{ij}^{G,\max}(t), \mu_{ij}^{G,\max}(t)(P_{ij}^{G,\max}(t) - P_{ij}^{G}(t)) = 0, 0 \le P_{ij}^{G}(t), \forall j,t,i \in \Omega^{G} \quad (۳۲-۳)$$

$$0 \le \mu_{mn}^{D,\min}(t), \mu_{mn}^{D,\min}(t)\, P_{mn}^{D}(t) = 0, 0 \le P_{mn}^{D}(t), \forall m,n,t \quad (۳۳-۳)$$

$$0 \le \mu_{mn}^{D,\max}(t), \mu_{mn}^{D,\max}(t)(P_{ij}^{D,\max}(t) - P_{mn}^{D}(t)) = 0, P_{mn}^{D}(t) \le P_{mn}^{D,\max}(t), \forall m,n,t \quad (۳۴-۳)$$

$$0 \le \mu_{m}^{D,\min}(t), \mu_{m}^{D,\min}(t)(\sum_{n} P_{mn}^{D}(t) - P_{m}^{D,\min}(t)) = 0, P_{m}^{D,\min}(t) \le \sum_{n} P_{mn}^{D}(t), \forall m,t \quad (۳۵-۳)$$

کیروش-کان-تاکر متناظر با روابط (۳-۲۵) تا (۳-۳۵) شرایط مسأله سطح پایین هستند. رابطه‌های (۳-۲۵) تا (۳-۲۸) به ترتیب با مشتق‌گیری از تابع لاگرانژین مسأله سطح پایین نسبت به متغیرهای $P_{ij}^{W}(t)$، $P_{ij}^{G}(t)$، $P_{mn}^{D}(t)$ و $\lambda(t)$ بدست آمده است. روابط (۳-۲۹) تا (۳-۳۴) نیز به ترتیب قیود مکمل برای میزان کمینه و بیشینه تولید هر بلوک انرژی واحد تولیدی مالک غالب، میزان کمینه و بیشینه تولید هر بلوک انرژی واحد تولیدی تولیدکنندگان رقابتی و میزان کمینه و بیشینه مصرف هر بلوک انرژی متقاضیان هستند. رابطه (۳-۳۵) قیود مکمل برای حداقل مصرف هر انرژی در هر ساعت است. اطلاعات بیشتر در خصوص مسائل بهینه‌سازی دو سطحی و تبدیل آنها به مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی با قیود تعادل در ضمیمه ارائه شده است.

مدل برنامه‌ریزی ریاضی با قیود تعادل (۳-۲۳) تا (۳-۳۵)، یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی آمیخته با عدد صحیح است که عبارت‌های غیرخطی آن عبارتند از:

۱.عبارت درآمد کسب شده توسط تولیدکننده غالب در تابع هدف (۳-۱). دلیل ضرب شدن دو متغیر باهم یعنی $\lambda(t) P_{ij}^{W}(t)$ درآمد تابعی غیرخطی است.

۲. عملکرد بیشینه‌سازی در رابطه‌های (۳-۲) و (۳-۳).

۳. ضرب شدن ضریب لاگرانژ در متغیرهای اولیه در روابط (۳-۲۹) تا (۳-۳۵).

در بخش بعد روابط غیرخطی را با استفاده از برخی تکنیک‌های خطی‌سازی، به رابطه‌های خطی تبدیل می‌کنیم.

۳-۶ مدل برنامه‌ریزی خطی آمیخته با اعداد صحیح

در این بخش، مدل برنامه‌ریزی خطی آمیخته با اعداد صحیح، معادل با مدل برنامه‌ریزی ریاضی با قیود تعادل ارائه می‌شود. برای این منظور ابتدا برای خطی‌سازی اولین عبارت غیرخطی بیان شده

در تابع هدف (۳-۱)، از رابطه تساوی (۳-۲۵) استفاده می‌کنیم. اگر این رابطه را در متغیر $P_{ij}^{W}(t)$ ضرب کنیم، رابطه (۳-۳۶) بدست خواهد آمد.

$$C_{ij}^{W}(t)\,P_{ij}^{W}(t)-\lambda(t)\,P_{ij}^{W}(t)+\mu_{ij}^{W,\max}(t)\,P_{ij}^{W}(t) \\ -\mu_{ij}^{W,\min}(t)\,P_{ij}^{W}(t)=0,\forall j,t,i\in\Omega^{W} \qquad (۳۶-۳)$$

با جمع کردن رابطه (۳-۳۶) روی $j,t,i\in\Omega^{W}$ عبارت (۳-۳۷) بدست خواهد آمد که عبارت است از اختلاف درآمد حاصل از فروش و هزینه تولید انرژی برای تولیدکننده غالب

$$\sum_{i\in\Omega^{W},j,t}\lambda(t)\,P_{ij}^{W}(t)-\sum_{i\in\Omega^{W},j,t}C_{ij}^{W}(t)\,P_{ij}^{W}(t)= \\ \sum_{i\in\Omega^{W},j,t}\mu_{ij}^{W,\max}(t)\,P_{ij}^{W}(t)-\sum_{i\in\Omega^{W},j,t}\mu_{ij}^{W,\min}(t)\,P_{ij}^{W}(t) \qquad (۳۷-۳)$$

طبق قید مکمل (۳-۲۹)، عبارت $\mu_{ij}^{W,\min}(t)\,P_{ij}^{W}(t)$ برابر صفر است. در نتیجه اختلاف درآمد حاصل از فروش و هزینه تولید انرژی برای تولیدکننده غالب به صورت رابطه (۳-۳۸) ساده می‌شود. علاوه بر این با استفاده از قید مکمل رابطه (۳-۳۰)، رابطه (۳-۳۹) بدست می‌آید.

$$\text{Revenue - Production Cost}=\sum_{i\in\Omega^{W},j,t}\mu_{ij}^{W,\max}(t)\,P_{ij}^{W}(t) \qquad (۳۸-۳)$$

$$\text{Revenue - Production Cost}=\sum_{i\in\Omega^{W},j,t}\mu_{ij}^{W,\max}(t)\,P_{ij}^{W,m}(t) \qquad (۳۹-۳)$$

همچنین از آنجا که مسأله سطح پایین محدب است رابطه دوگانی قوی برقرار است و فاصله دوگانی برابر با صفر است[۲۴]. دوگانی قوی در رابطه (۳-۴۰) بیان شده است.

$$\sum_{i\in\Omega^{W},j,t}C_{ij}^{W}(t)\,P_{ij}^{W}(t)+\sum_{i\in\Omega^{G},j,t}C_{ij}^{G}(t)\,P_{ij}^{G}(t)-\sum_{m,n,t}C_{mn}^{D}(t)\,P_{mn}^{D}(t)= \\ -\sum_{m,n,t}\mu_{mn}^{D,\max}(t)\,P_{mn}^{D,\max}(t)-\sum_{i\in\Omega^{W},j,t}\mu_{ij}^{W,\max}(t)\,P_{ij}^{W,m}(t) \\ -\sum_{i\in\Omega^{G},j,t}\mu_{ij}^{G,\max}(t)\,P_{ij}^{G,\max}(t)+\sum_{m,t}\mu_{m}^{D,\min}(t)\,P_{m}^{D,\min}(t) \qquad (۴۰-۳)$$

همانطور که مشخص است با توجه با رابطه دوگانی قوی و با استفاده از رابطه (۳-۳۵)، اختلاف درآمد و هزینه تولید انرژی برای تولیدکننده غالب در تابع هدف غیر خطی مسأله با رابطه (۳-۴۱) جایگذاری می‌شود.

$$\text{Revenue - Production Cost} = \sum_{m,n,t} C_{mn}^{D}(t)\,P_{mn}^{D}(t) - \sum_{i\in\Omega^{W},j,t} C_{ij}^{W}(t)\,P_{ij}^{W}(t)$$
$$- \sum_{i\in\Omega^{G},j,t} C_{ij}^{G}(t)\,P_{ij}^{G}(t) - \sum_{m,n,r} \mu_{mn}^{D,\max}(t)\,P_{mn}^{D,\max}(t)$$
$$- \sum_{i\in\Omega^{G},j,t} \mu_{ij}^{G,\max}(t)\,P_{ij}^{G,\max}(t) + \sum_{m,t} \mu_{m}^{D,\min}(t)\,P_{m}^{D,\min}(t) \qquad (۴۱-۳)$$

دومین عبارت غیر خطی که در روابط (۳-۲) و (۳-۳) آمده است نیز با قیدهای خطی (۳-۴۱) و (۳-۴۲) جایگزین می‌شوند.

$$\lambda(t) - \lambda^{SP,B} \le VC^{WB}(t), 0 \le VC^{WB}(t), \forall t \qquad (۴۲-۳)$$

$$\lambda(t) - \lambda^{SP,P} \le VC^{WP}(t), 0 \le VC^{WP}(t), \forall t \qquad (۴۳-۳)$$

سومین عبارت‌های غیر خطی که مربوط به قیود مکمل (۳-۲۹) تا (۳-۳۴) است نیز با اضافه کردن متغیرهای باینری به صورت رابطه‌های (۳-۴۳) تا (۳-۴۸) خطی می‌شوند.

$$0 \le P_{ij}^{W}(t) \le M_{G}(1 - V_{ij}^{W,\min}(t)), 0 \le \mu_{ij}^{W,\min}(t) \le M_{\mu} V_{ij}^{W,\min}(t), \forall j,t,i \in \Omega^{W} \qquad (۴۴-۳)$$

$$0 \le P_{ij}^{W,m}(t) - P_{ij}^{W}(t) \le M_{G}(1 - V_{ij}^{W}(t)),$$
$$0 \le \mu_{ij}^{W,\max}(t) \le M_{\mu} V_{ij}^{W}(t), \forall j,t,i \in \Omega^{W} \qquad (۴۵-۳)$$

$$0 \le P_{ij}^{G}(t) \le M_{G}(1 - V_{ij}^{G,\min}(t)),$$

$$0 \le \mu_{ij}^{G,\min}(t) \le M_{\mu} V_{ij}^{G,\min}(t), \forall j,t,i \in \Omega^{G} \qquad (۴۶-۳)$$

$$0 \le P_{ij}^{G,\max}(t) - P_{ij}^{G}(t) \le M_{G}(1 - V_{ij}^{G,\max}(t)),$$

$$0 \le \mu_{ij}^{G,\max}(t) \le M_{\mu} V_{ij}^{G,\max}(t), \forall j,t,i \in \Omega^{G} \qquad (۴۷-۳)$$

$$0 \le P_{mn}^{D}(t) \le M_{c}(1 - V_{mn}^{D,\min}(t)),$$

$$0 \le \mu_{mn}^{D,\min}(t) \le M_{\mu} V_{mn}^{D,\min}(t), \forall m,n,t \qquad (۴۸-۳)$$

$$0 \le P_{mn}^{D,\max}(t) - P_{mn}^{D}(t) \le M_{D}(1 - V_{mn}^{D,\max}(t)),$$

$$0 \le \mu_{mn}^{D,\max}(t) \le M_{\mu} V_{mn}^{D,\max}(t), \forall m,n,t \qquad (۴۹-۳)$$

$$0 \le \sum_{n} P_{mn}^{D} - P_{m}^{D,\min} \le M_{D}(1 - V_{m}^{D,\min}(t))$$

$$0 \le \mu_{m}^{D,\min}(t) \le M_{\mu} V_{m}^{D,\min}(t), \forall m,t \qquad (۵۰-۳)$$

۳-۷ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این فصل، مدل برنامه‌ریزی ریاضی با قیود تعادل برای مدل‌سازی بیشینه‌سازی سود تولیدکننده غالب مقید به قرارداد نیروگاه مجازی-مالی به صورت مسأله بهینه سازی دو سطحی فرمول‌بندی شد. با جایگزین کردن مسأله سطح پایین شرایط کیروش-کان-تاکر مسأله دو سطحی تبدیل به مسأله یک سطحی برنامه‌ریزی ریاضی با قیود تعادل گردید. با استفاده از روش‌های خطی سازی، مسأله غیر خطی به یک مسأله برنامه‌ریزی خطی آمیخته با اعداد صحیح تبدیل شد. لازم به ذکر است ارائه این مدل دقیق، که قیود بهره‌برداری نیروگاه‌ها را نیز شامل می‌شود و همچنین بدون فرضیات ساده‌کننده‌ای قرارداد نیروگاه مجازی-مالی را مدل کرده و نیز با روشی ابتکاری تبدیل به مسأله خطی شده، به عنوان یکی از مهمترین نوآوری‌های این پایان نامه به شمار می‌رود. این مدل می‌تواند به عنوان ابزاری در دست سیاست‌گذاران بازار برای ارائه مناسب‌ترین ظرفیت نیروگاه مجازی به کار رود.

فصل چهارم

شبیه‌سازی

۴-۱ مقدمه

در این فصل با استفاده از مدل استخراج شده در فصل سوم آثار به کارگیری سیاست‌واگذاری مجازی-مالی به کاهش قدرت بازار در بازار روز قبل در یک سیستم واقعی نمونه شبیه‌سازی و مورد تجزیه تحلیل قرار می‌گیرد. برای این منظور یک بازار غیر رقابتی شبیه‌سازی می‌شود که یک تولیدکننده از سهم بازار قابل توجهی برخوردار است. همچنین می‌تواند از استراتژی احتکار ظرفیت برای افزایش سود استفاده کند. در ادامه نحوه اثرگذاری این سیاست در سناریوهای مختلف مطالعه می‌شود.

۴-۲ سیستم مورد مطالعه

سیستم مورد مطالعه شبکه RTS است که دارای ۳۲ واحد تولیدی و ۱۷ مصرف‌کننده به شرح جدول (۴-۱) و (۴-۲) می‌باشد. فرض شده است که تولید کنندگان با ۲ بلوک انرژی در بازار روز بعد شرکت می‌کنند. هزینه روشن شدن نیروگاه‌ها و دیگر قیود فنی نظیر نرخ افزایش و یا کاهش تولید و حداقل زمان روشن و یا خاموش بودن بر اساس سیستم [۲۲] در نظر گرفته شده است.

۱۷ مصرف‌کننده توان با را در سه بلوک، با مقادیر ٪۶۰، ٪۲۵ و ٪۱۵ به بازار روز قبل پیشنهاد می‌دهند، پیشنهادات طبق اطلاعات جدول (۴-۲) ارائه می‌شود. این اطلاعات بر اساس به پیک بار ۲۵۰۰ مگاوات داده شده است. اطلاعات مربوط به روز دوشنبه از هفته پنجم (ماه تابستان) می‌باشد که بار در هر ساعت بر اساس پروفایل بار ساعتی بیان شده در مرجع [۲۲] محاسبه شده است.

جدول (۴- ۱) اطلاعات واحدهای تولیدی									
	ظرفیت	نوع	تعداد	حداقل تولید (MW)	حداقل زمان خاموش بودن (Hr)	حداقل زمان روشن بودن (Hr)	نرخ افزایش و کاهش (MW/Hr)	هزینه روشن شدن ($)	بلوک‌های انرژی (MW)
بار پایه	۵۰	آبی	۶	۱۰	۰	۰	۵۰	۰	۲۵ ۵۰
	۴۰۰	هسته‌ای	۲	۱۰۰	۱	۱	۴۰۰	۰	۲۰۰ ۴۰۰
بار میانی	۱۵۵	توربین بخار- زغالسنگ	۴	۵۴/۲۵	۸	۸	۱۵۵	۶۱۸/۸	۹۳ ۱۵۵
	۳۵۰	توربین بخار- زغالسنگ	۱	۱۴۰	۴۸	۲۴	۲۴۰	۴۵۵۷/۷	۲۲۷/۵ ۳۵۰
	۷۶	توربین بخار- زغالسنگ	۴	۱۵/۲	۴	۸	۷۶	۱۴۱۸/۴۸	۳۸ ۷۶
بار پیک	۱۰۰	توربین بخار- گازطبیعی	۳	۲۵	۸	۸	۱۰۰	۱۱۲۵	۵۰ ۱۰۰
	۱۹۷	توربین بخار- گازطبیعی	۳	۶۹	۱۰	۱۲	۱۸۰	۱۹۹۳/۵	۱۱۸/۲ ۱۹۷
	۲۰	توربین احتراقی- گازطبیعی	۴	۱۵/۸	۱	۱	۲۰	۲۲،۵	۱۶ ۲۰

جدول شماره (۴-۲)- اطلاعات مصرف کنندگان			
گروه	شماره مصرف‌کننده‌ها	بیشینه میزان مصرف	قیمت بلوک‌های انرژی
۱	۲، ۴، ۷، ۸، ۱۲، ۱۵ و ۱۶	۸۵، ۶۵، ۱۱۰، ۱۵۰، ۱۷۱، ۲۹۳ و ۱۶۱	۹۵، ۶۵ و۳۳
۲	۱، ۵، ۶، ۱۰ و ۱۳	۹۵، ۶۳، ۱۲۰، ۱۷۱ و ۲۷۸	۸۵، ۵۵ و ۲۵
۳	۳، ۹، ۱۱، ۱۴ و ۱۷	۱۵۸، ۱۵۳، ۲۳۳، ۸۸ و ۱۱۳	۷۵، ۴۵ و ۱۵

۳-۴ تشریح طرح شبیه‌سازی

طرح شبیه‌سازی جهت مطالعه پارامترهای موثر بر عملکرد نیروگاه مجازی-مالی در کاهش قدرت بازار ارائه می‌شود. برای مطالعه اثر ساختار بازار[1] (ویژگی‌های تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان) شبیه‌سازی‌هایی به شرح زیر انجام شده است.

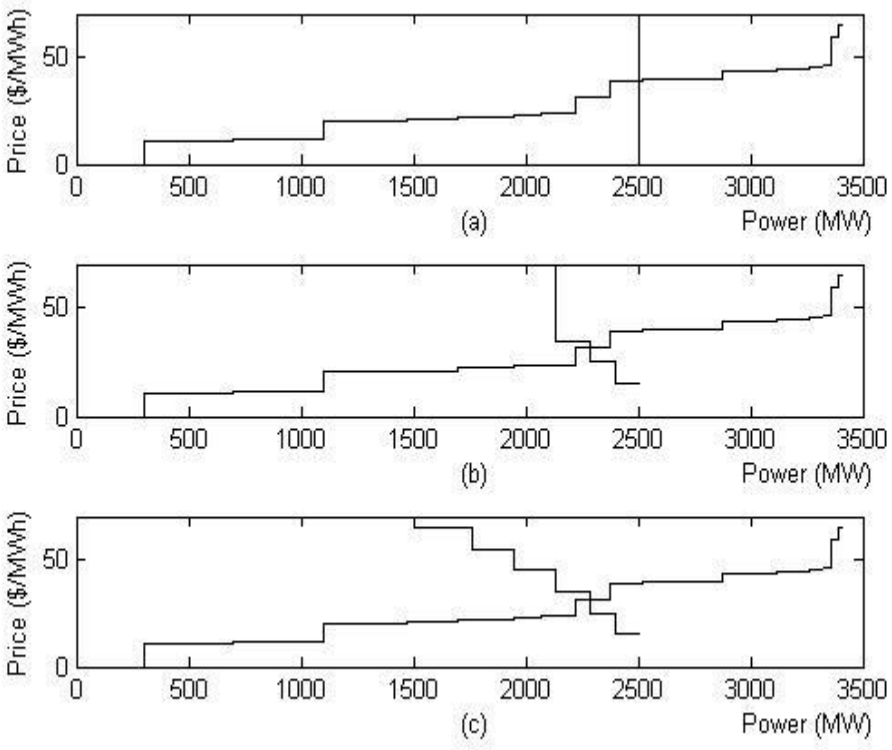
الف) سهم بازار: سیاست واگذاری مجازی-مالی برای کاهش قدرت بازار تولیدکننده غالب که از سهم بازار قابل توجهی برخوردار است، استفاده می‌شود. برای یافتن نحوه اثرگذاری این پارامتر، دو سهم بازار ۵۰٪ و ۷۰٪ بررسی می‌شود.

ب) تنوع تکنولوژی: به منظور بررسی اثر تکنولوژی‌های مختلف در دسترس تولیدکننده غالب و نحوه تغییر استراتژی اعمال قدرت بازار سه ساختار تکنولوژی شامل [۲۳]: نوع ۱) نیروگاه‌های بار پایه و میانی، نوع ۲) نیروگاه‌های بارپایه، میانی و پیک و نوع ۳) نیروگاه‌های بار میانی و پیک شبیه‌سازی می‌گردد. در ساختار تکنولوژی نوع۱، تولیدکننده غالب به میزان برابر از تکنولوژی‌های بارپایه و بار میانی را داراست. ساختارهای تکنولوژی نوع ۲ و ۳ نیز تولیدکننده غالب به میزان برابر از تکنولوژی-های در دسترس را دارا می‌باشد.

ج) سطح بار: برای تحلیل اثر سطح بار بر عملکرد سیاست واگذاری مجازی-مالی، شبیه‌سازی در سه سطح بار کم (۲۱۰۰مگاوات در پیک بار)، متوسط (۲۵۰۰مگاوات در پیک بار) و زیاد (۲۸۰۰مگاوات در پیک بار) انجام می‌شود.

د) کشسانی تقاضا[2]به قیمت: کشسانی تقاضا به میزان تغییرات تقاضا به ازای افزایش قیمت تعریف می-شود. در بازارهای برق در حال حاضر تقاضا ناکشسان است و با توسعه شبکه‌های هوشمند کشسانی تقاضا افزایش می‌یابد. اثر کشسانی تقاضا در حالت‌های تقاضای ناکشسان، کمی کشسان و کشسان مطالعه می‌گردد. در حالت تقاضای ناکشسان، مصرف‌کنندگان به قیمت حساس نیستند و تمایل به تأمین تمام میزان توان بار بدون توجه به قیمت آن را دارند. در حالت کمی کشسان، تنها بلوک سوم بار هر مصرف‌کننده به قیمت پاسخ می‌دهد و در واقع تنها ۱۵٪ از بار هر مصرف‌کننده ممکن است تأمین نشود و مابقی باید تأمین گردد. در حالت تقاضای کشسان، بلوک‌های ۲ و ۳ بار هر مصرف‌کننده به قیمت پاسخ می‌دهند که این میزان در مجموع ۴۰٪ از بار هر مصرف‌کننده است.

1Market structure
2Elasticity of demand



شکل (۴-۱)- منحنی عرضه و تقاضا در حالت‌های تقاضای الف) ناکشسان، ب) کمی کشسان و ج) کشسان

ذکر این نکته لازم است که حالت‌های تقاضای ناکشسان و کمی کشسان در حال حاضر در بازارهای مختلف قابل مشاهده است. حالت تقاضای کشسان با هدف تحلیل اثرگذاری توسعه و تکامل شبکه هوشمند در آینده نزدیک ارائه شده است.

اثر ظرفیت نیروگاه مجازی به عنوان یکی از پارامترهای مهم سیاست‌واگذاری مجازی-مالی بررسی می‌شود. ظرفیت نیروگاه از ۰٪ تا ۵۰٪ ظرفیت در دسترس تولیدکننده غالب افزایش می‌یابد. ظرفیت نیروگاه مجازی-مالی به دو قسمت بار پایه و بارپیک تقسیم بندی می‌شود. براساس مرجع [۵]، میزان ۸۰٪ از کل ظرفیت مجازی به نیروگاه بار پایه و ۲۰٪ باقیمانده را به نیروگاه بار پیک اختصاص داده می‌شود.

شکل (۴-۱)- حالت‌های مختلف برای شبیه‌سازی

۴-۴ شاخص‌های تحلیل کارائی بازار

برای بررسی میزان انحراف بازار از سطح رقابتی در اثر به کارگیری قدرت بازار توسط تولیدکننده غالب، دو شبیه‌سازی رقابتی و غیر رقابتی اجرا می‌گردد. در شبیه‌سازی رقابتی، تولیدکننده غالب از قدرت بازار استفاده نمی‌کند و کلیه شرکت‌کنندگان هزینه‌ی حاشیه‌ای و ظرفیت در دسترس را به بازار ارائه می‌دهند. در این شرایط نیازی به اجرای سیاست واگذاری مجازی-مالی نمی‌باشد. در شیبه‌سازی غیر رقابتی، بر اساس مدل پیشنهادی در فصل سوم این پایان نامه انجام می‌شود. تنها تولیدکننده غالب است که می‌تواند با به‌کارگیری قدرت بازار، بازار را از سطح رقابتی دور کند. استراتژی به کارگیری قدرت بازار این تولیدکننده غالب احتکار ظرفیت درنظر گرفته شده است.

جهت ارزیابی عملکرد سیاست‌واگذاری مجازی- مالی میزان دور شدن بازار از سطح رقابتی به کمک شاخص‌های زیر اندازه‌گیری می‌شود:

در انحراف هزینه پرداختی مصرف‌کنندگان از مقدار رقابتی به عنوان شاخص ارزیابی عملکرد سیاست واگذاری مجازی-مالی به صورت زیر معرفی می‌شود: در این رابطه بالانویس UC برای شرایط غیر رقابتی و بالانویس C برای شرایط رقابتی درنظر گرفته شده‌اند.

$$OCD = \frac{OC^{UC} - OC^{C}}{OC^{C}} \qquad (۴-۱)$$

با توجه به توانایی تولیدکننده غالب برای احتکار ظرفیت، ممکن است مقداری از توان مورد نیاز مصرف‌کنندگان تامین نشود. طبق تعریف این شاخص بیانگر انحراف میزان کل توان مبادله شده در طی یک روز از شرایط رقابتی است که با تقسیم شدن بر میزان رقابتی پریونیت شده‌است.

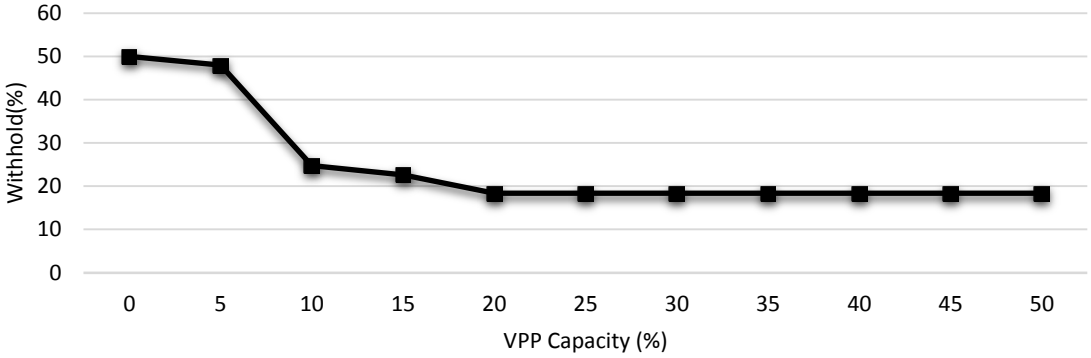
$$PTD = \frac{PT^{UC} - PT^{C}}{PT^{C}} \qquad (۴-۲)$$

انتخاب قیمت‌های قطعی برای نیروگاه‌های مجازی بارپایه و پیک است که در تجربیات به‌کار گیری شده در حدود هزینه بهره‌برداری متناسب با آن نیروگاه‌هاست. لذا برای انتخاب درست آن ابتدا شبیه سازی رقابتی انجام شده است و متوسط قیمت‌های رقابتی در ساعات بار پایه را به عنوان قیمت قطعی نیروگاه مجازی بارپایه و متوسط قیمت‌ها در ساعات پیک را به عنوان قیمت قطعی نیروگاه‌های پیک در نظر گرفته‌ایم.

۴-۵ تحلیل نحوه اثرگذاری سیاست واگذاری مجازی مالی روی یک حالت نمونه

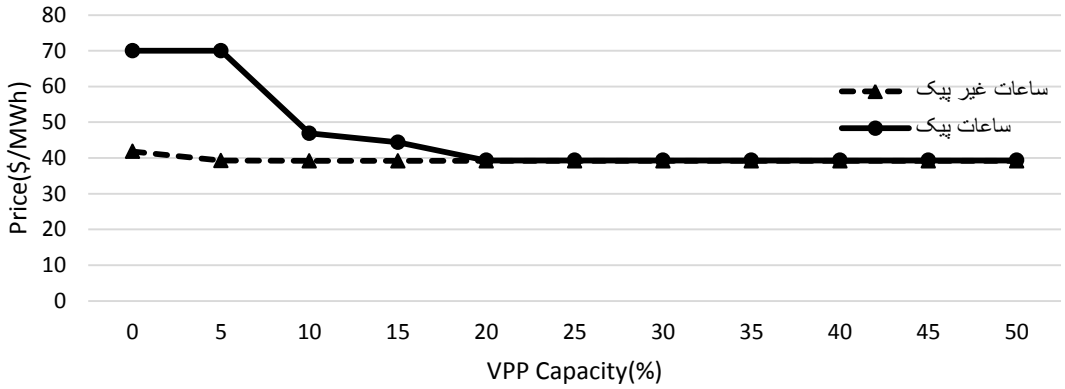
در این بخش هدف ارائه دقیق و جزئی نتایج حاصل از اجرای سیاست واگذاری مجازی برای یک حالت نمونه است. تولیدکننده غالب سهم بازار ۵۰٪ تکنولوژی‌های بار پایه و بار میانی را در اختیار دارد. فرض می‌شود تقاضا ناکشسان است و به تغییرات قیمت پاسخی نمی‌دهد. سطح بار را متوسط در نظر گرفته می‌شود که در این‌صورت پیک بار شبکه RTS، برابر با ۲۵۰۰ مگاوات می‌باشد.

شکل (۴-۲) متوسط احتکار ظرفیت تولیدکننده غالب را به صورتی درصدی از کل ظرفیت در دسترس وی بر حسب میزان ظرفیت نیروگاه مجازی نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است تولیدکننده غالب بدون قرارداد نیروگاه مجازی (ظرفیت نیروگاه مجازی۰٪)، ۵۰٪ از کل ظرفیتش را احتکار و تنها با نیمی از ظرفیتش در بازار شرکت می‌کند. پس از اعمال سیاست واگذاری مجازی (ظرفیت نیروگاه مجازی ٪۵) میزان احتکار ظرفیت کمی کاهش پیدا می‌کند. اما با افزایش ظرفیت نیروگاه مجازی به میزان ۱۰٪، احتکار به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد و به ۲۴٪ می‌رسد. به‌عبارت دیگر با افزایش ظرفیت نیروگاه مجازی میزان احتکار ظرفیت تولیدکننده غالب کاهش می‌یابد. به این ترتیب می‌توان نتیجه گرفت که تولیدکننده غالب با منعقد کردن قرارداد نیروگاه مجازی-مالی مجبور به ارائه ظرفیتش به بازار می‌شود. در نتیجه میزان به‌کارگیری قدرت بازار توسط تولید کننده غالب کاهش می‌یابد.



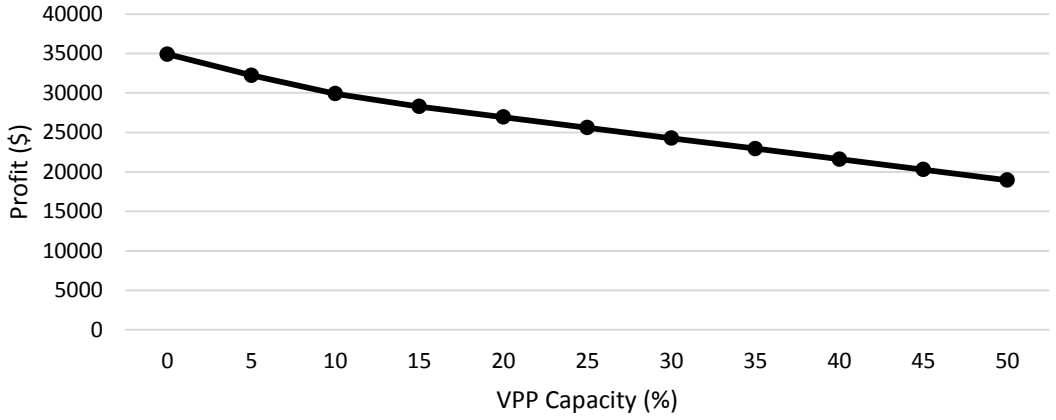
شکل (۴-۲)- احتکار ظرفیت بر حسب ظرفیت نیروگاه مجازی

شکل (۴-۳) نشان می‌دهد متوسط قیمت بازار در ساعات پیک به علت احتکار ظرفیت تولیدکننده غالب به ۷۰ دلار بازای مگاوات ساعت می‌رسد. با افزایش ظرفیت نیروگاه مجازی، متوسط قیمت بازار در ساعات پیک کاهش چشمگیری می‌یابد و به ۴۰ دلار بازای هر مگاوات ساعت می‌رسد. بالعکس افزایش میزان نیروگاه مجازی اثر قابل توجهی بر قیمت بازار در ساعات غیر پیک ندارد. نتایج نشان می‌دهد در این مورد تنها نیاز به اجرای سیاست واگذاری مجازی در ساعات پیک است.



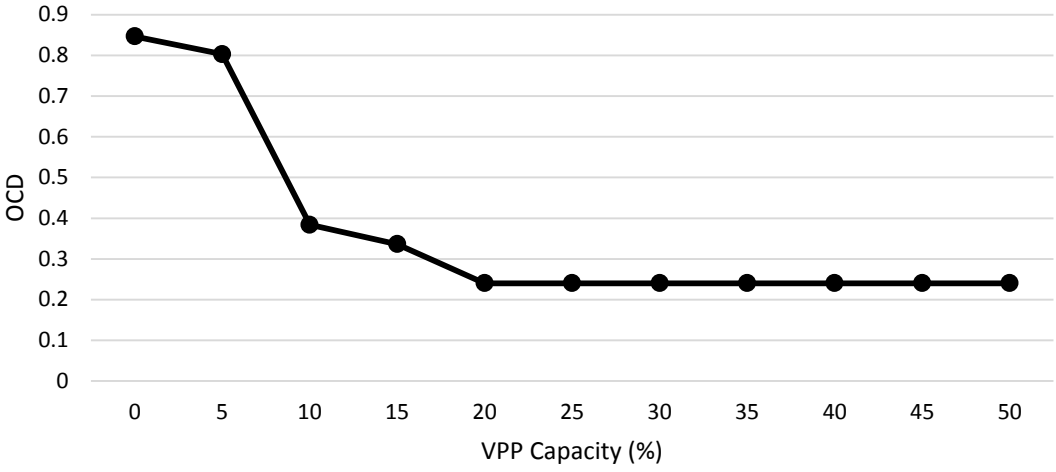
شکل (۴-۳)- متوسط قیمت بازار در ساعات پیک و غیر پیک بر حسب ظرفیت نیروگاه مجازی

شکل (۴-۴) نشان می‌دهد که این سیاست مستقیماً روی سود تولیدکننده غالب تاثیر می-گذارد. با افزایش ظرفیت نیروگاه مجازی، میزان سود تولیدکننده غالب کاهش می‌یابد. البته ذکر این نکته لازم است که شکل (۴-۴) میزان سود تولیدکننده غالب را در طول یک روز خاص و بدون در نظر گرفتن اثر میزان بیمه ماهیانه نشان می‌دهد.



شکل (۴-۴)- سود تولیدکننده غالب در طول یک روز بر حسب ظرفیت نیروگاه مجازی

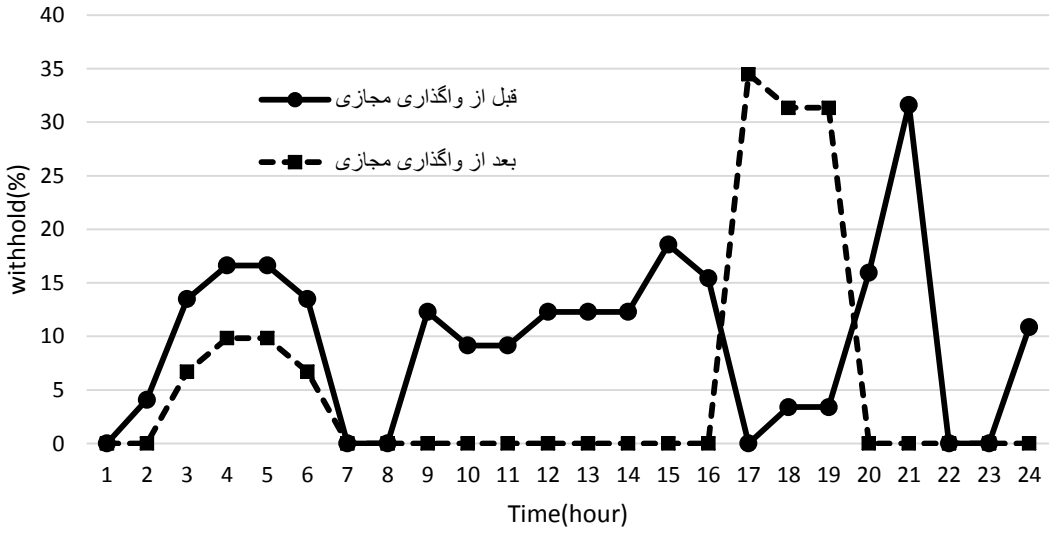
طبق شکل (۴-۵) شاخص انحراف هزینه مصرف‌کنندگان نیز این نتایج را تأیید می‌کند. شاخص انحراف از هزینه مصرف‌کنندگان در میزان ظرفیت نیروگاه مجازی صفر، به مقدار ۸۵٪ می‌رسد و با افزایش ظرفیت نیروگاه مجازی این شاخص کاهش پیدا می‌کند و در نهایت به میزان ۲۴٪ می‌رسد. کاهش این شاخص به معنای کاهش به‌کارگیری قدرت بازار تولیدکننده غالب است.



شکل (۴-۵)- شاخص انحراف از هزینه مصرف‌کنندگان بر حسب ظرفیت نیروگاه مجازی

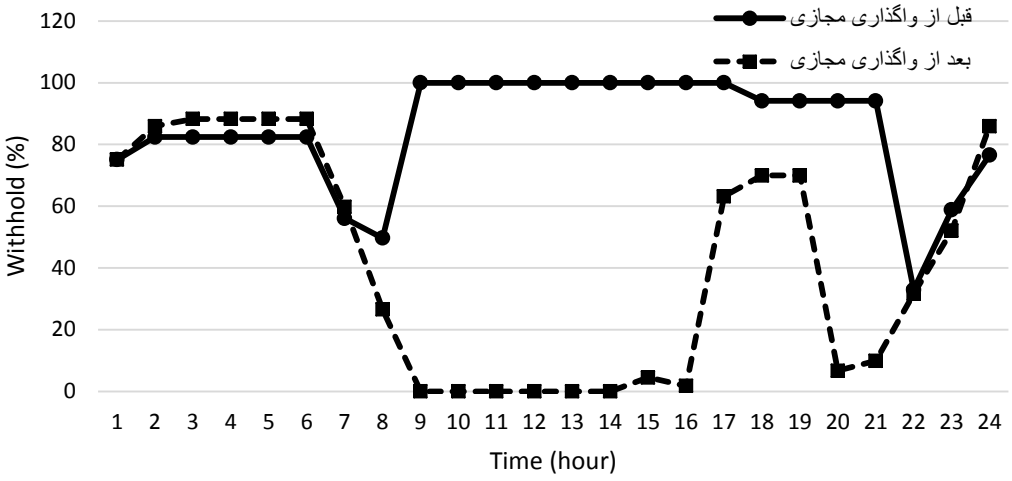
برای بررسی دقیق‌تر نحوه اثرگذاری این سیاست، به نحوه احتکار ظرفیت از تکنولوژی‌های مختلف در اختیار تولیدکننده غالب می‌پردازیم. شکل‌های (۴-۶) و (۴-۷) به ترتیب نحوه احتکار ظرفیت از تکنولوژی بار پایه و بار میانی را در طول ۲۴ ساعت روز، برای دو حالت قبل و بعد از اجرای

سیاست واگذاری مجازی با ظرفیت نیروگاه مجازی ۱۰٪ از کل ظرفیت در دسترس تولیدکننده غالب را نشان می‌دهد. شکل (۴-۶) نشان می‌دهد که تولیدکننده غالب میزان کمی، به طور متوسط ۹٪، از تکنولوژی بار پایه را احتکار کرده است و پس از اجرای سیاست واگذاری مجازی این میزان احتکار نیز کاهش پیدا می‌کند و به طور متوسط به ۵٪ می‌رسد. علاوه بر این در اکثر ساعات پیک (۹ الی ۲۰) میزان احتکار به صفر رسیده و این نشان از کارایی این سیاست در ساعات پیک است. در ساعات ۱۷ تا ۱۹ ظرفیت نیروگاه مجازی بر احتکار از تکنولوژی‌های بار پایه اثرگذار نمی‌باشد. از آنجا که در این ساعات بنا به قیود بهره‌برداری تولیدکننده غالب نمی‌تواند از تکنولوژی بار میانی خود احتکار کند آنرا به تکنولوژی بار پایه خود انتقال داده است.



شکل (۴-۶)- احتکار ظرفیت از تکنولوژی بار پایه قبل و بعد از اجرای سیاست واگذاری مجازی در ۲۴ ساعت روز

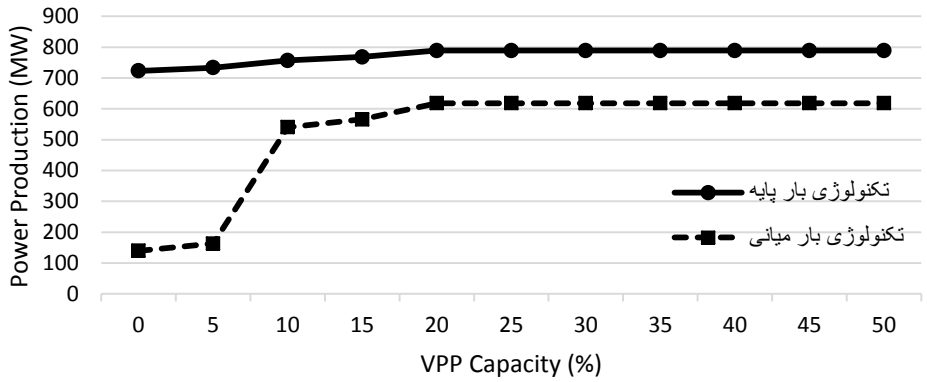
شکل (۴-۷) نشان می‌دهد که تولید کننده غالب برخلاف تکنولوژی بار پایه، از تکنولوژی بار میانی به میزان قابل توجهی احتکار ظرفیت انجام می‌دهد. پس از اعمال سیاست واگذاری مجازی به طور واضح تولیدکننده غالب میزان احتکار خود را در ساعات پیک، ساعت ۹ تا ساعت ۲۰، به صفر می‌رساند و مجبور می‌شود تمام ظرفیتش را به بازار ارائه دهد. در نتیجه قدرت بازارش کاهش می‌یابد.



شکل (۴-۷)- احتکار ظرفیت از تکنولوژی بار میانی قبل و بعد از اجرای سیاست واگذاری مجازی در ۲۴ ساعت روز

نکته قابل توجه و جذاب که از تأمل در دو شکل قبل می‌توان دریافت این است که میزان احتکار ظرفیت در این حالت بیشتر از تکنولوژی گران‌تر، بارمیانی، است. برای مثال در ساعات پیک، ساعت ۹ تا ۲۱، کل ظرفیت تکنولوژی بارمیانی، در شکل (۴-۷)، را احتکار کرده است اما میزان احتکار از تکنولوژی بارپایه، در شکل (۴-۶)، در همین ساعات کمتر از ٪۲۰ است. این حکایت از آن دارد که تولیدکننده‌ها بیشتر تمایل به تولید از واحدهای ارزان‌تر دارند. در شرایط برابر که میزان ظرفیت تولید در دسترس بارپایه و بارمیانی یکسان باشد، احتکار ظرفیت از واحدهای گران قیمت اتفاق می‌افتد. دلیل این موضوع هزینه حاشیه‌ای کمتر نیروگاه‌های ارزان است. این مهم اساس تحلیل و زیربنای تفاوت در ترکیب تکنولوژی‌های مختلف است. پس می‌توان انتظار داشت که هرچه تولیدکننده‌ای از تکنولوژی‌های ارزان‌تر در اختیار داشته باشد، با ظرفیت نیروگاه مجازی کوچک‌تری، میزان احتکار ظرفیت تولیدکننده کاهش می‌یابد.

شکل (۴-۸) نیز متوسط تولید انرژی از هر تکنولوژی را بر حسب ظرفیت نیروگاه مجازی نشان می‌دهد. در ابتدا میزان تولید انرژی از تکنولوژی بار پایه حدود ۷۰۰ مگاوات و تکنولوژی بار میانی حدود ۱۴۰ مگاوات است. پس از اجرای سیاست واگذاری مجازی با ظرفیت ۱۰٪، تولیدکننده غالب مجبور به افزایش تولید از تکنولوژی بار میانی شده و تولیدش از این تکنولوژی را به میزان ۵۴۰ مگاوات رسانده است.



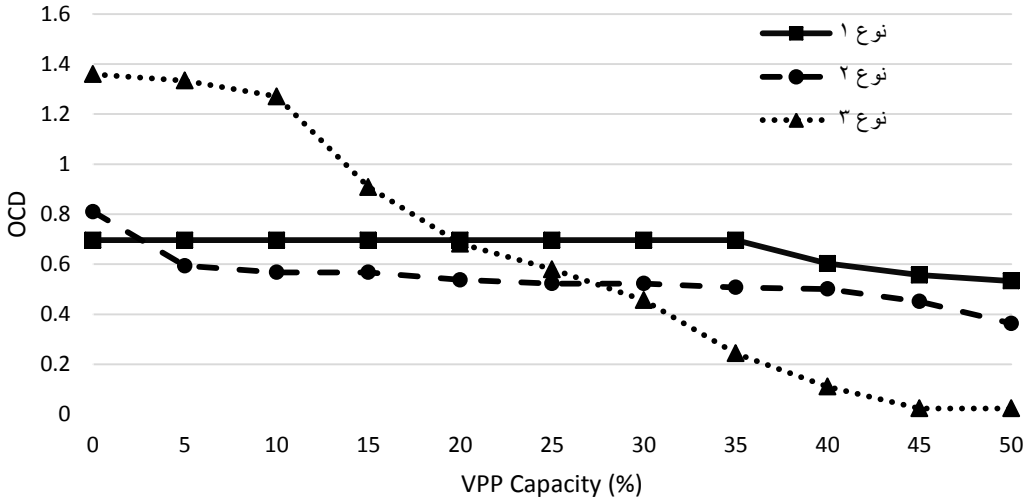
شکل (۴-۸)-متوسط انرژی تولیدی از تکنولوژی‌های مختلف بر حسب ظرفیت نیروگاه مجازی

۴-۶ سناریوی اول: تقاضا ناکشسان و سهم بازار ۵۰٪

در این بخش نتایج اجرای سیاست واگذاری مجازی-مالی روی سطح بارهای مختلف در سناریوی تقاضای ناکشسان و با سهم بازار ۵۰٪، تحلیل و بررسی می‌شود. قیمت قطعی نیروگاه‌های مجازی بارپایه و بارپیک بر اساس متوسط قیمت بازار در شرایط رقابتی در ساعات متناظر برای هر یک در نظر گرفته شده است. در این سناریو قیمت قطعی نیروگاه بارپایه و بارپیک به ترتیب ۲۰ و ۳۹ دلار بازای هرمگاوات ساعت در نظر گرفته شده است.

۴-۶-۱ سطح بار کم

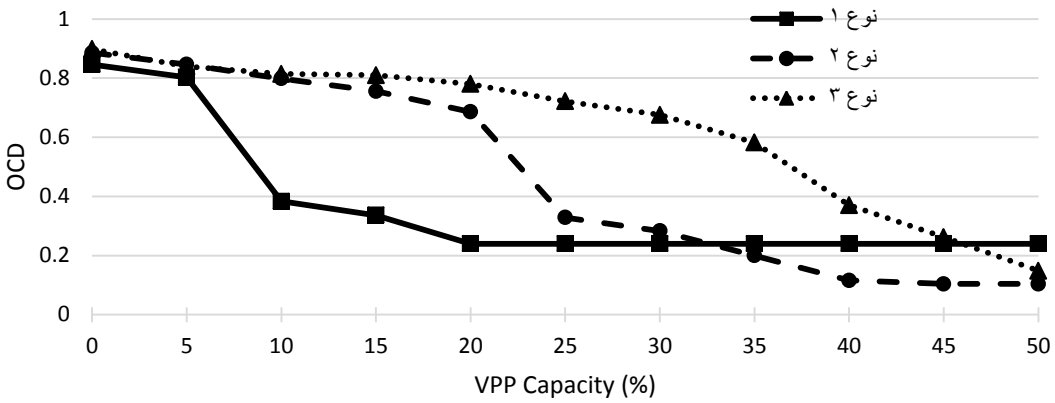
در این سطح بار، پیک بار ۲۱۰۰ مگاوات است. شاخص انحراف هزینه مصرف‌کنندگان در شکل (۴-۹) نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد به کارگیری قدرت بازار تولیدکننده غالب در این سطح بار با داشتن ترکیب تکنولوژی نوع ۳، تکنولوژی‌های بار میانی و پیک، از دیگر ترکیب تکنولوژی‌ها بیشتر است. قبل از اجرای سیاست‌واگذاری مجازی، این شاخص مقدار ۱/۳۵می‌پذیرد و این بدان معناست که هزینه بهره‌برداری نسبت به حالت رقابتی ۲/۳۵ برابر شده است. به علت پایین بودن سطح بار، تولیدکننده با این ترکیب تکنولوژی، به علت گران بودن واحدهای در اختیارش تنها در ساعات پیک می‌تواند قدرت بازارش را به کار بگیرد و بازار را از سطح رقابتی به کلی دور کند. با اجرای سیاست واگذاری مجازی، قدرت بازار تولیدکننده غالب کاهش پیدا می‌کند و در نهایت در ظرفیت نیروگاه مجازی ۳۵٪ مقدار این شاخص به ۰/۲ می‌رسد. همانطور که مشخص است روی این مقدار ظرفیت نیروگاه مجازی بازار سطح رقابتی بسیار نزدیک می‌شود. در مقابل در دو ترکیب تکنولوژی نوع ۱ و ۲، اجرای سیاست واگذاری مجازی اثر چندانی ندارد. زیرا در این شرایط به علت پاییت بودن سطح بار و نیز در اختیار داشتن تکنولوژی ارزان بیشتر تمایل به تولید توان دارند.



شکل (۴-۹)- شاخص انحراف هزینه مصرف‌کنندگان برای تکنولوژی نوع ۲،۱ و ۳ بر حسب ظرفیت نیروگاه مجازی در سطح بار کم سناریوی اول

۴-۶-۲ سطح بار متوسط

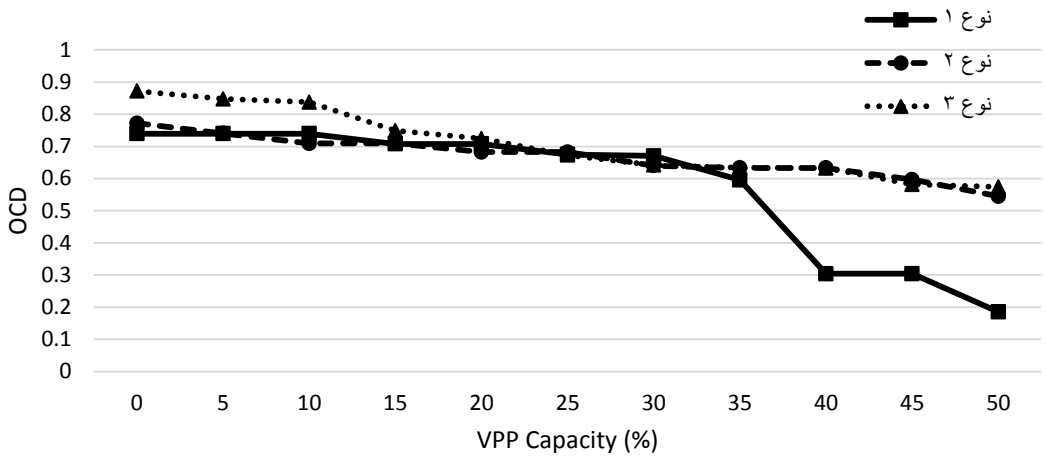
در سطح بار متوسط، پیش از اجرای سیاست واگذاری مجازی، قدرت بازار هر سه نوع تکنولوژی بر اساس شاخص هزینه مصرف‌کنندگان ۰/۹، است. در هر سه ترکیب تکنولوژی، اجرای سیاست واگذاری مجازی اثر بخش است. اما ظرفیت اثرگزاری متفاوت است. اثرگذاری واگذاری مجازی- مالی برای ترکیب تکنولوژی‌های نوع ۱، ۲ و ۳ به ترتیب در ظرفیت ۱۰، ۲۵ و ۴۵ ٪ اتفاق می‌افتد. همانطور که مشاهده می‌شود هرچه نیروگاه‌های ارزان‌تر در اختیار تولیدکننده غالب باشد با ظرفیت نیروگاه مجازی کوچکتری قدرت بازارش کاهش می‌یابد. در واقع این نمودار نشان می‌دهد که هر چه نیروگاه-های در اختیار تولیدکننده غالب از تکنولوژی‌های ارزان قیمت، ترکیب تکنولوژی نوع ۱، باشد، با اجرای سیاست واگذاری مجازی تولیدکننده سعی بر افزایش تولید دارد زیرا هزینه تولیدش پائین است. بالعکس اگر تولیدکننده غالب نیروگاه‌های گران قیمت، ترکیب تکنولوژی نوع ۲ و ۳، را در اختیار داشته باشد، پس از اجرای سیاست واگذاری مجازی برای بیشینه‌سازی سود بیشتر سعی بر بالا نگه داشتن قیمت‌ها، با احتکارظرفیت دارد. این تفاوت ناشی از تفاوت در هزینه تولید در تکنولوژی‌های مختلف است. از همین رو، سیاست واگذاری مجازی با ظرفیت نیروگاه مجازی کمتری برای ترکیب تکنولوژی نوع ۳ در مقایسه، ترکیب تکنولوژی نوع ۲ اثرگذار است. به همین دلیل است که در ظرفیت نیروگاه مجازی بالاتری شروع به افزایش تولید می‌دهد.



شکل (۴-۱۰)- شاخص انحراف هزینه مصرف‌کنندگان برای تکنولوژی نوع ۱،۲ و ۳ بر حسب ظرفیت نیروگاه مجازی در سطح بار متوسط سناریوی اول

۴-۶-۳ سطح بار زیاد

در سطح بار زیاد، پیک ۲۸۰۰ مگاوات، هر سه نوع تکنولوژی قدرت بازار تقریباً برابری دارند و با افزایش ظرفیت نیروگاه مجازی شاخص انحراف هرینه مصرف‌کنندگان کاهش می‌یابد. مقدار این شاخص با ظرفیت نیروگاه مجازی ۰٪ کمتر از ۰/۸۵ است. در این سناریو اثرگذاری هر سه نوع ترکیب تکنولوژی تا ظرفیت نیروگاه مجازی ۳۵٪ مشابه است و تفاوت چندانی ندارد. برای تکنولوژی نوع ۱ ظرفیت نیروگاه مجازی بیش از ۳۵٪ اثر بیشتری دارد و در ظرفیت ۴۰٪ مقدار این شاخص به کمتر از ۰/۳ می‌رسد. اجرای این سیاست روی ترکیب تکنولوژی ۲ و ۳ اثر چشمگیری ندارد. میزان شاخص انحراف هزینه مصرف‌کنندگان در این دو ترکیب تکنولوژی به ازای ظرفیت نیروگاه مجازی ۵۰٪ به مقدار ۰/۵۷ رسیده است.



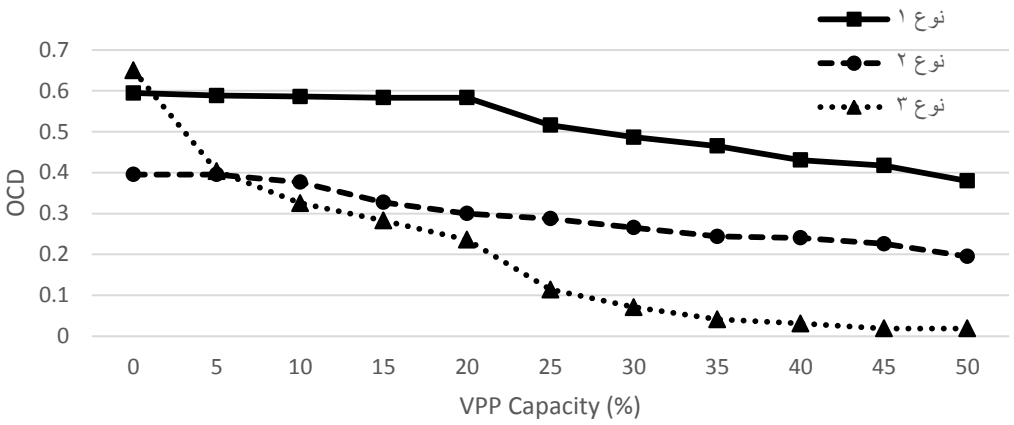
شکل (۴-۱۱)- شاخص انحراف هزینه مصرف‌کنندگان برای تکنولوژی نوع ۲،۱ و ۳ بر حسب ظرفیت نیروگاه مجازی در سطح بار زیاد سناریوی اول

۴-۷ سناریوی دوم: تقاضا کمی کشسان و سهم بازار ۵۰٪

پس از بررسی سناریوی تقاضای ناکسشان، در این سناریو حساسیت تقاضا به تغییرات قیمت کمی حساس می‌کنیم. در این سناریو سهم بازار ۵۰٪ در نظر گرفته می‌شود. نتایج اجرای سیاست واگذاری مجازی-مالی روی سطح بارهای مختلف تحلیل و بررسی می‌شود. در این سناریو قیمت قطعی نیروگاه بارپایه و بارپیک، براساس شبیه‌سازی حالت رقابتی به ترتیب ۲۰ و ۳۵ دلار بازای هرمگاوات ساعت در نظر گرفته شده است.

۴-۷-۱ سطح بار کم

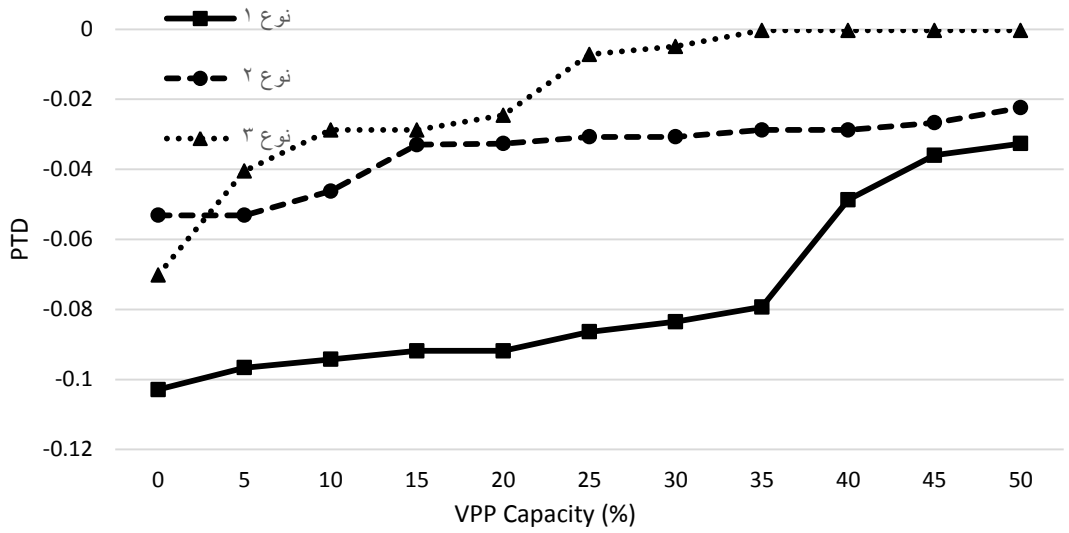
در این سناریو میزان شاخص انحراف هزینه مصرف‌کنندگان قبل از اجرای سیاست واگذاری مجازی در حدود ۰/۶ است. اجرای سیاست واگذاری مجازی و افزایش ظرفیت آن، در هر سه نوع ترکیب تکنولوژی تأثیرگذار است. در این سناریو هرچه تولیدکننده غالب تکنولوژی‌های گران‌تری در اختیار داشته باشد، اجرای سیاست واگذاری مجازی موثرتر است. زیرا به علت کم بودن سطح بار، نیروگاه‌های گران قیمت در بیشتر ساعات در بازار موفق به تولید نمی‌شوند. در واقع در این شرایط تولیدکننده از آزادی عمل کمتری برخوردار است زیرا تنها با تکنولوژی بار میانی می‌تواند رفتار استراتژیک انجام دهد. در صورتی که تولیدکننده با دو ترکیب تکنولوژی دیگر حتی با احتکار ظرفیت تکنولوژی بار میانی می‌تواند با واحدهای بارپایه تولید داشته باشد و سود خود را بالا نگه دارد.



شکل (۴-۱۲)- شاخص انحراف هزینه مصرف‌کنندگان برای تکنولوژی نوع ۲،۱ و ۳ بر حسب ظرفیت نیروگاه مجازی در سطح بار کم سناریوی دوم

اگرچه در سناریوی قبلی به علت ناکشسانی بار، بررسی حجم توان مبادله‌ای بی‌معنی بود، اما در این سناریو با افزایش حساسیت تغییرات تقاضا به قیمت، بررسی میزان تبادلات در بازار نیز امکان‌پذیر است.

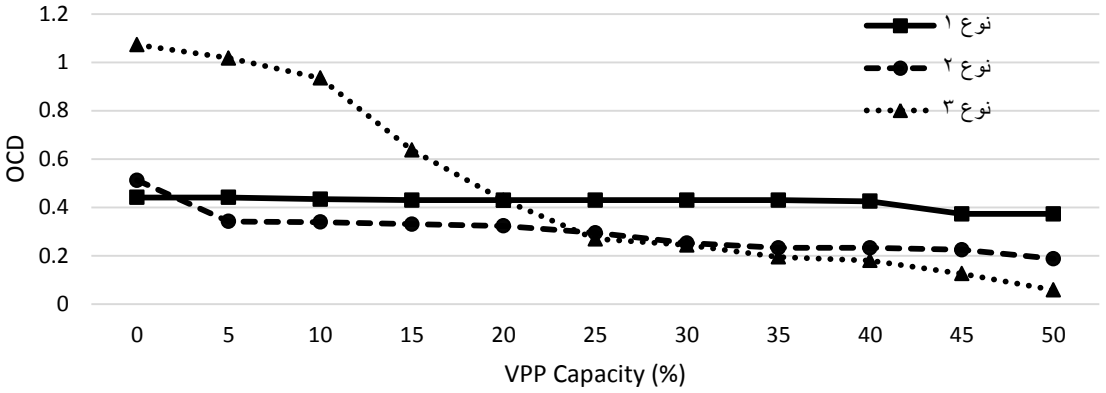
شکل (۴-۱۳) نحوه تغییر انحراف توان مبادله شده در یک روز را برحسب ظرفیت نیروگاه مجازی نشان می‌دهد. این شاخص قبل از اجرای سیاست واگذاری مجازی، ظرفیت نیروگاه مجازی ۰٪، منفی است. مقادیر منفی بیانگر کاهش حجم توان مبادله شده در شرایط غیر رقابتی نسبت به شرایط رقابتی است. به بیان دیگر وجود قدرت بازار سبب کاهش تبادلات انرژی شده است. این مسأله به دو دلیل اتفاق می‌افتد، احتکار ظرفیت توسط تولیدکننده غالب و پاسخ مصرف‌کنندگان نسبت به افزایش قیمت و کاهش مصرف آن‌ها. در این شکل مشخص است که با افزایش ظرفیت نیروگاه مجازی، میزان تبادلات توان نیز افزایش می‌یابد و شاخص انحراف توان مبادله شده مقادیر بزرگتری را تجربه می‌کند. در نهایت، با نزدیک شدن حجم توان مبادله شده به شرایط رقابتی میزان شاخص به صفر می‌رسد. همانطور که مشخص است میزان انحراف توان مبادله شده برای ترکیب تکنولوژی نوع ۱، با ظرفیت نیروگاه مجازی ۰٪، برابر با ۰/۱- است و در ظرفیت نیروگاه مجازی ۴۰٪ به ۰/۴۵ می‌رسد. می‌توان گفت که در هر دو نوع ترکیب تکنولوژی ۲ و ۳، میزان اثرگذاری حجم تبادل توان ناچیز است.



شکل (۴-۱۳)- شاخص انحراف حجم توان مبادله شده بر حسب ظرفیت نیروگاه مجازی در سطح بار کم سناریوی دوم

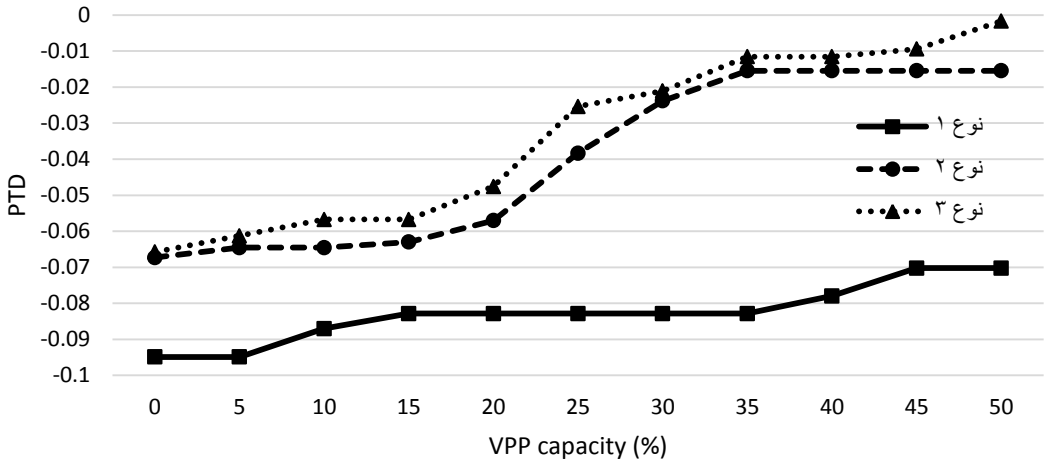
۴-۷-۲ سطح بار متوسط

در این زیر بخش، اثر افزایش سطح بار را بررسی می‌کنیم. شکل (۴-۱۴) نحوه تغییرات شاخص انحراف هزینه مصرف‌کنندگان را بر حسب ظرفیت نیروگاه مجازی نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود قبل از اجرای سیاست واگذاری مجازی، ظرفیت نیروگاه مجازی ۰٪، تولیدکننده غالب با ترکیب تکنولوژی نوع ۳ می‌تواند اثر قابل توجهی روی بازار داشته باشد و بیش از دو ترکیب تکنولوژی دیگر هزینه بهره‌برداری را نسبت به شرایط رقابتی دور کند. این میزان اثر گذاری ناشی از دارا بودن نیروگاه‌های گران قیمت و همچنین تعیین کننده قیمت است. حال نحوه اثرگذاری سیاست واگذاری مجازی روی هر سه نوع ترکیب تکنولوژی تحلیل می‌شود. همانطور که انتظار می‌رود از آنجا که ترکیب تکنولوژی نوع ۳، قدرت بازار قابل توجهی داشته است، اجرای سیاست واگذاری روی آن اثر گذاشته و قدرت بازارش را کاهش دهد. از این رو می‌بینیم که اجرای این سیاست توانسته مقدار شاخص را کاهش دهد و از مقدار بیش از ۱ در ظرفیت نیروگاه مجازی ۰٪ به مقدار ۰/۴ در ظرفیت نیروگاه مجازی۲۰٪ برسد. همچنین مشاهده می‌شود که اجرای سیاست واگذاری مجازی روی ترکیب تکنولوژی نوع ۱ و ۲ اثری ندارد. با توجه به اینکه قدرت بازار این دو ترکیب تکنولوژی کم می‌باشد، اجرای این سیاست نیز چندان موثر نبوده است.



شکل (۴-۱۴)- شاخص انحراف از هزینه مصرف‌کنندگان برای تکنولوژی نوع ۲،۱ و ۳ بر حسب ظرفیت نیروگاه مجازی در سطح بار متوسط سناریوی دوم

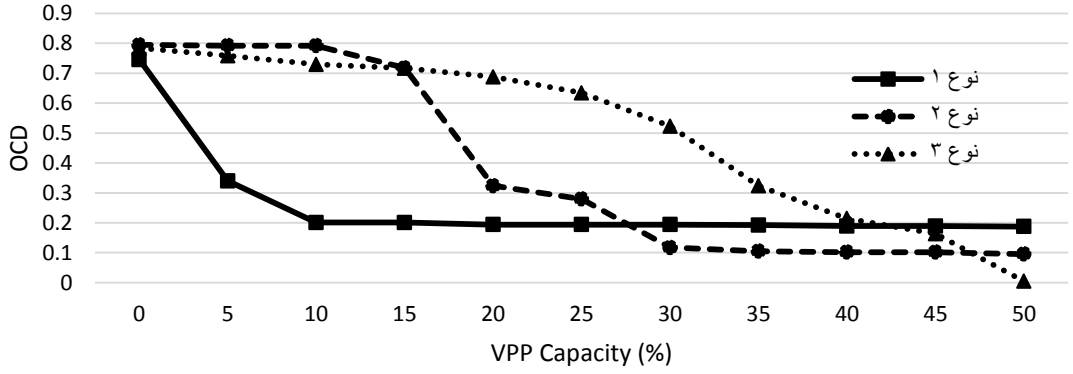
شاخص انحراف حجم توان مبادله شده در شکل (۴-۱۵) نشان می‌دهد انحراف از حجم مبادلات توان بسیار ناچیز است. این موضوع بیانگر آن است که تغییرات شاخص انحراف از هزینه مصرف‌کنندگان به دلیل افزایش در قیمت‌ها بوده است و نه به خاطر کاهش توان مبادله شده. همچنین هرچه تولیدکننده غالب تکنولوژی‌های گران‌تر در اختیار داشته باشد اثر کمتری روی مبادلات بازار دارد. این موضوع به دلیل بازنده بودن واحدهای بار پیک در این سطح بار است.



شکل (۴-۱۵)- شاخص انحراف حجم توان مبادله شده بر حسب ظرفیت نیروگاه مجازی درسطح بار متوسط سناریوی دوم

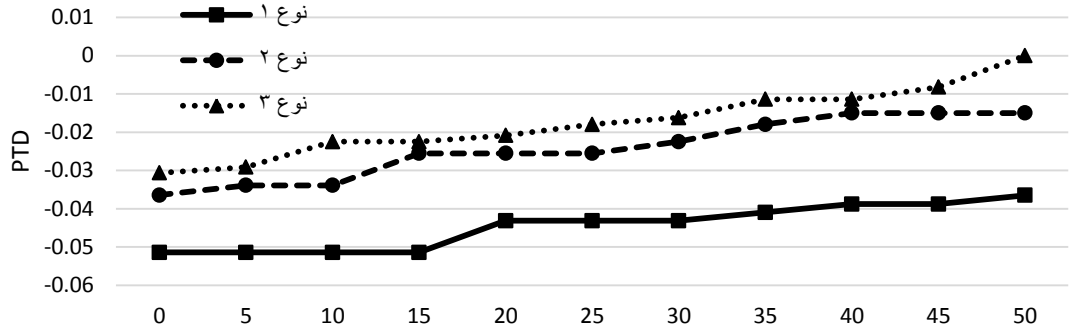
۴-۷-۳ سطح بار زیاد

در این سطح بار، میزان بار هر مصرف‌کننده ۲۰٪ نسبت به سطح بار متوسط افزایش یافته است. پیش از اجرای سیاست واگذاری مجازی، ظرفیت نیروگاه مجازی ۰٪، شاخص انحراف هزینه مصرف‌کنندگان برای هر سه نوع تکنولوژی به یک میزان، میزان ۰/۸ است. در هر سه ترکیب تکنولوژی، اجرای سیاست واگذاری مجازی اثر بخش است. اما حجم ظرفیت اثرگذار متفاوت است. اثرگذاری واگذاری مجازی برای ترکیب تکنولوژی‌های نوع ۱، ۲ و ۳ به ترتیب در ظرفیت ۱۰، ۲۰ و ۴۵٪ اتفاق می‌افتد و مقدار شاخص به ۰/۲ کاهش می‌یابد. همانطور که مشاهده می‌شود هرچه نیروگاه‌های ارزان‌تر در اختیار تولیدکننده غالب باشد با ظرفیت نیروگاه مجازی کوچکتری قدرت بازارش کاهش می‌یابد. این نتیجه همسان با نتیجه حاصل شده از سناریوی اول در سطح بار متوسط است. می‌بینیم که با حساس شدن تقاضا به تغییرات قیمت نتایج مربوط به سطح بار متوسط در سناریوی ناکشسان به سطح بار زیاد منتقل شده است.



شکل (۴-۱۶)- شاخص انحراف از هزینه مصرف‌کنندگان برای ترکیب تکنولوژی نوع ۲،۱ و ۳ بر حسب ظرفیت نیروگاه مجازی در سطح بار زیاد سناریوی دوم

با توجه به شکل (۴-۱۷) واضح است که میزان انحراف حجم توان مبادله شده ناچیز است و به طور تقریبی تمام توان مورد تقاضای مصرف‌کنندگان پاسخ داده شده است. پس با توجه به اینکه هزینه مصرف‌کنندگان از ضرب مصرف در قیمت بدست می‌آید، چون میزان مصرف کم نشده است، بنابراین قیمت بازار افزایش یافته است و اثر احتکار تولیدکننده غالب بیشتر روی افزایش قیمت‌ها بوده است تا کاهش تولید.



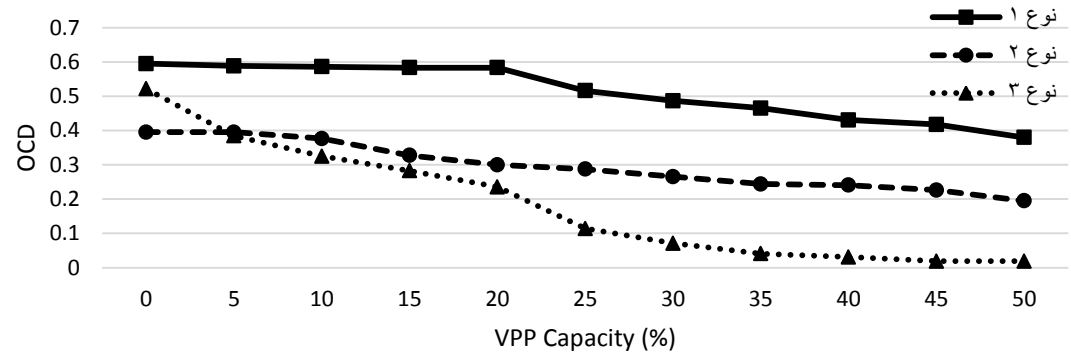
شکل (۴-۱۷)- شاخص انحراف حجم توان مبادله شده بر حسب ظرفیت نیروگاه مجازی در سطح بار زیاد سناریوی دوم

۴-۸ سناریوی سوم: تقاضا کشسان و سهم بازار ۵۰٪

در این سناریو قیمت قطعی نیروگاه بارپایه و بارپیک، براساس شبیه‌سازی حالت رقابتی به ترتیب ۲۰ و ۳۵ دلار بازای هرمگاوات ساعت در نظر گرفته شده است.

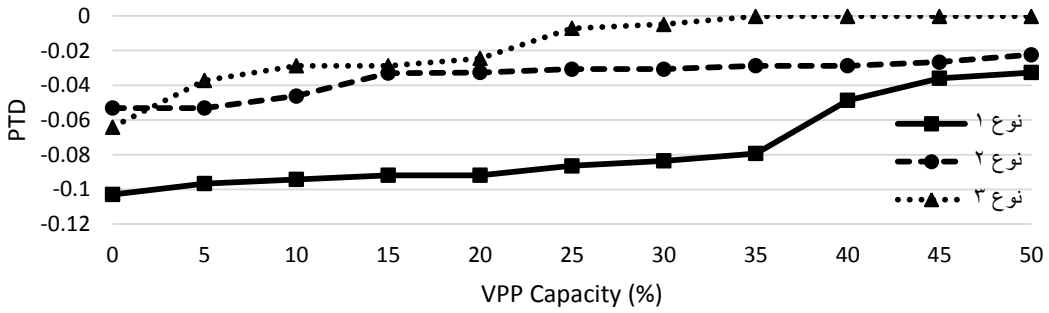
۴-۸-۱ سطح بار کم

شکل (۴-۱۸) شاخص انحراف هزینه مصرف‌کنندگان را نشان می‌دهد. با مقایسه سناریوهای قبل می‌توان گفت که با حساسیت تقاضا به قیمت در این سطح بار قدرت بازار کاهش پیدا کرده است و تولیدکننده غالب تنها با دارا بودن ترکیب تکنولوژی نوع ۱ توانسته است تا حدودی روی بازار اثر بگذارد. دیگر ترکیب تکنولوژی‌ها نیز اثر چندانی روی افزایش هزینه مصرف‌کنندگان ندارند. با توجه به شکل (۴-۱۹) درمی‌یابیم که میزان تبادلات توان در بازار کاهش می‌یابد و اثر سیاست واگذاری مجازی در ظرفیت‌های بالای نیروگاه مجازی اتفاق می‌افتد. پس به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت در این سطح بار از این سناریو اجرای سیاست واگذاری مجازی لزومی ندارد.



شکل (۴-۱۸)- شاخص انحراف هزینه مصرف‌کنندگان برای ترکیب تکنولوژی نوع ۲،۱ و ۳ بر حسب ظرفیت نیروگاه مجازی در سطح بار کم سناریوی سوم

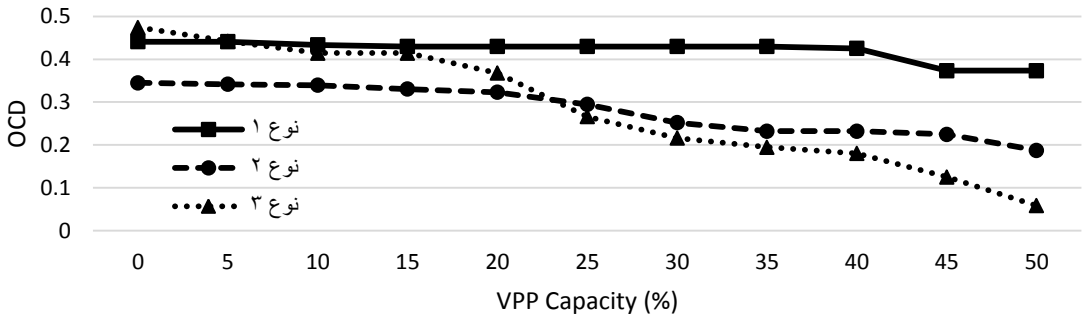
همانطور که در شکل (۴-۱۹) نشان داده شده است انحراف در حجم توان مبادله شده در این سطح بار کم است. تنها ترکیب تکنولوژی نوع ۱، به علت دارا بودن واحدهای ارزان قیمت که همیشه در بازار برنده هستند، توانسته است با احتکار ظرفیت تاثیر قابل توجهی روی این شاخص بگذارد. همچنین مشاهده می‌شود سیاست واگذاری مجازی توانسته است بر این ترکیب تکنولوژی اثر بگذارد و میزان توان مبادله شده را در ظرفیت نیروگاه مجازی ۵۰٪، به شرایط رقابتی نزدیک شود.



شکل (۴-۱۹)- شاخص انحراف حجم توان مبادله شده بر حسب ظرفیت نیروگاه مجازی در سطح بار کم سناریوی سوم

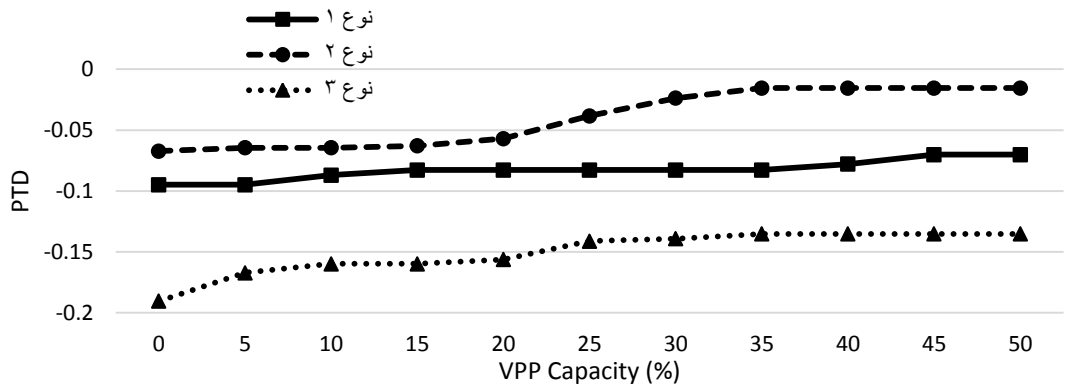
۴-۸-۲ سطح بار متوسط

در این سطح بار نیز همانند سطح بار کم، به دلیل افزایش حساسیت تقاضا به تغییرات قیمت، قدرت بازار تولیدکننده غالب کم شده است. میزان اثرگذاری همه ترکیب تکنولوژی‌ها روی شاخص انحراف هزینه مصرف‌کنندگان به یک میزان است. از آنجا که مقدار این شاخص برای تمام ترکیب تکنولوژی‌ها کمتر از ۰/۵ است، اجرای سیاست واگذاری مجازی لزومی ندارد.



شکل (۴-۲۰)- شاخص انحراف هزینه مصرف‌کنندگان برای ترکیب تکنولوژی نوع ۲،۱ و ۳ بر حسب ظرفیت نیروگاه مجازی در سطح بار متوسط سناریوی سوم

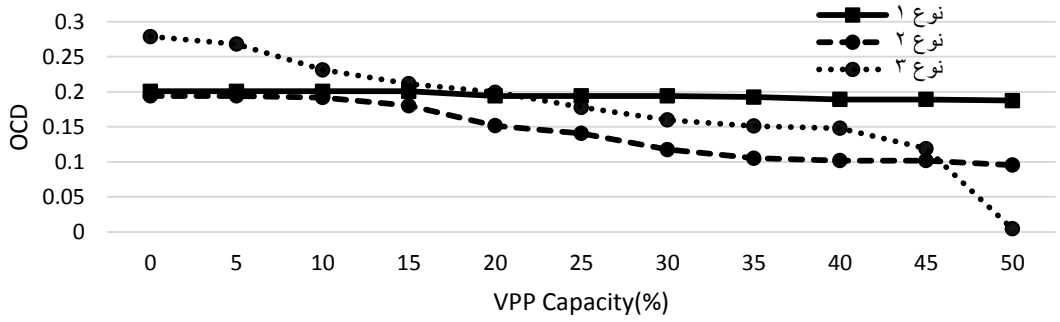
همانطور که انتظار می‌رود به علت افزایش حساسیت تقاضا به تغییرات قیمت، میزان توان تأمین شده کاهش پیدا کرده است. این موضوع را می‌توان با دقت در شکل (۴-۲۱) دریافت کرد. همانطور که در این شکل مشخص است تولید کننده غالب با دارا بودن ترکیب تکنولوژی نوع ۳، حجم تبادلات توان را نسبت به شرایط رقابتی به طور قابل توجهی کاهش داده است. این مشاهدات به علت تلاش تولید تولیدکننده غالب برای احتکار ظرفیت تکنولوژی‌های گران قیمت است.



شکل (۴-۲۱)- شاخص انحراف توان مبادله شده بر حسب ظرفیت نیروگاه مجازی در سطح بار متوسط سناریوی سوم

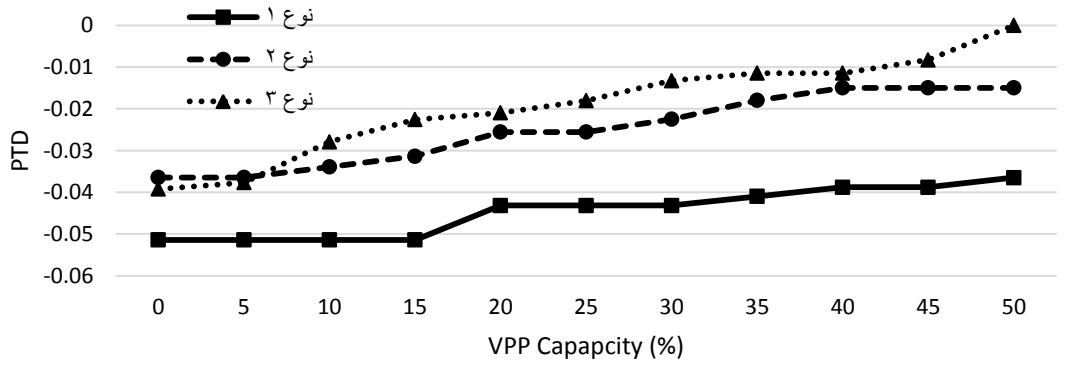
۴-۸-۳ سطح بار زیاد

در این سطح بار نیز همانند سایر سطح بارهای این سناریو، به علت افزایش حساسیت تقاضا به تغییرات قیمت، قدرت بازار تولیدکننده غالب قابل توجه نیست. در نتیجه برای این سطح بار اجرای سیاست واگذاری مجازی ضرورت ندارد.



شکل (۴-۲۲)- شاخص انحراف از هزینه مصرف‌کنندگان برای ترکیب تکنولوژی نوع ۲،۱ و ۳ بر حسب ظرفیت نیروگاه مجازی در سطح بار زیاد سناریوی سوم

به علاوه، در این سناریو حتی با افزایش پاسخ تقاضا به قیمت، حجم توان مبادله شده در بازار کاهش چشمگیری پیدا نکرده است. زیرا در این شرایط قدرت بازار تولیدکننده غالب برای احتکارکم است.



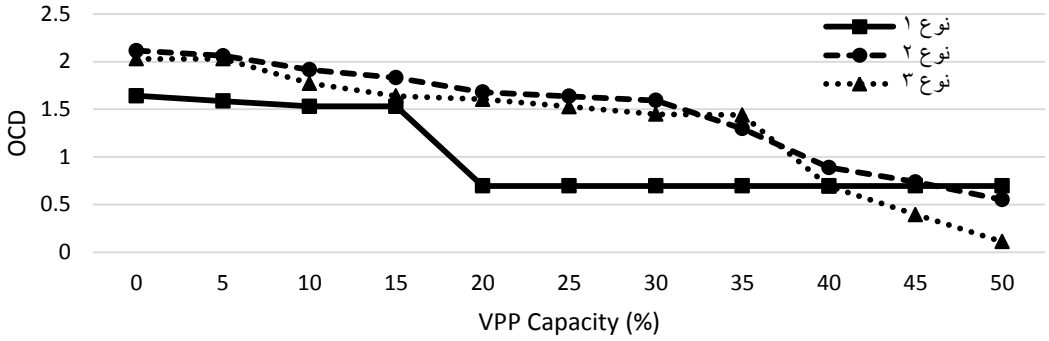
شکل (۴-۲۳)- شاخص انحراف توان مبادله شده بر حسب ظرفیت نیروگاه مجازی در سطح بار زیاد سناریوی سوم

۴-۹ سناریوی چهارم: تقاضا ناکشسان و سهم بازار ۷۰٪

این سناریو همانند سناریوی اول است، با این تفاوت که سهم بازار تولیدکننده غالب افزایش یافته است. در این سناریو سهم بازار تولیدکننده غالب ۷۰٪ از کل ظرفیت تولید در بازار است. انتظار می‌رود با افزایش سهم بازار، تولیدکننده غالب بتواند اثر بیشتری روی انحراف بازار از سطح رقابتی بگذارد. در ادامه اثر ترکیب تکنولوژی‌های مختلف در سطح بارهای متفاوت بررسی می‌شود. قیمت قطعی در این سناریو برابر با سناریوی اول است. زیرا تقاضا همچنان ناکشسان است و سهم بازار اگر رفتار استراتژیکی وجود نداشته باشد بر قیمت بازار در شرایط رقابتی اثری ندارد.

۴-۹-۱ سطح بار کم

شکل (۴-۲۴) شاخص انحراف هزینه مصرف‌کنندگان را در این سطح بار نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است پیش از اجرای سیاست واگذاری مجازی، تولیدکننده غالب از قدرت بازارش استفاده می‌کند و بازار را به میزان قابل توجهی از شرایط رقابتی دور می‌کند. تا جایی که در این شرایط شاخص انحراف هزینه مصرف‌کنندگان به مقدار ۲ می‌رسد. هزینه بهره‌برداری در این حالت نسبت به شرایط رقابتی ۳ برابر شده است. واضح است در این شرایط اجرای سیاست‌های کاهش قدرت بازار الزامی است.



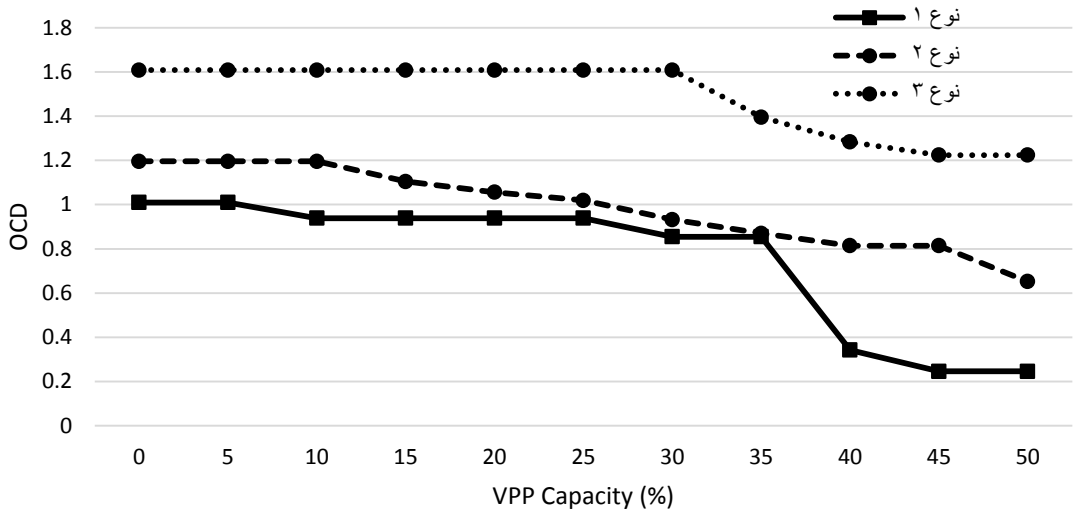
شکل (۴-۲۴)- شاخص انحراف از هزینه مصرف‌کنندگان برای ترکیب تکنولوژی نوع ۲،۱ و ۳ بر حسب ظرفیت نیروگاه مجازی در سطح بار کم سناریوی چهارم

با دقت در شکل (۴-۲۴) مشخص است پیش از اجرای سیاست واگذاری مجازی در ترکیب تکنولوژی نوع ۱، میزان شاخص انحراف هزینه مصرف‌کنندگان پایین‌تر از دو ترکیب تکنولوژی دیگر است. این بدان دلیل است که در این سطح بار واحدهای تکنولوژی بارمیانی، تعیین‌کننده قیمت در بازار هستند. در ترکیب تکنولوژی نوع ۱، چون تکنولوژی بارپایه هزینه تولید کمی دارد، بر طبق توضیحات بیان شده در مورد شکل‌های (۴-۶) و (۴-۷)، تولیدکننده‌ای که واحدهای ارزان قیمت در اختیار دارد تمایل به تولید بیشتر دارد. به همین دلیل میزان شاخص انحراف هزینه مصرف‌کنندگان کمتر است. در حالی‌که دو ترکیب تکنولوژی دیگر تمایل به تولید کمتر و احتکار ظرفیت بیشتر دارند. همچنین مشخص است که اجرای سیاست واگذاری مجازی می‌تواند مؤثر واقع شود و قدرت بازار تولیدکننده غالب را کاهش دهد. این کاهش قدرت بازار در ترکیب تکنولوژی‌های مختلف متفاوت است. اثرگذاری سیاست واگذاری مجازی به ترتیب در ۲۰٪، ۴۰٪ و ۴۰٪ برای ترکیب تکنولوژی‌های نوع ۱، ۲ و ۳ اتفاق می‌افتد. در ترکیب تکنولوژی نوع ۱ به علت دارا بودن تکنولوژی با هزینه تولید پایین، با ظرفیت نیروگاه مجازی کمتری نسبت به سایر ترکیب تکنولوژی‌ها قدرت بازار کاهش پیدا می‌کند. دو ترکیب تکنولوژی ۲ و ۳ نیز با تقریب خوبی به‌طور مشابه عمل می‌کنند که این به علت آن است که در این سطح بار، تکنولوژی نوع پیک در بازار موفق به تولید نمی‌شود. شباهت این دو ترکیب تکنولوژی به دلیل احتکار ظرفیت تکنولوژی بار میانی در تمام ساعات است.

۴-۹-۲ سطح بار متوسط

با افزایش سطح بار ترکیب تکنولوژی‌هایی که واحدهای گران قیمت دارند و می‌توانند واحد حاشیه‌ای در بازار باشند، قدرت بازار بیشتری خواهند داشت. شکل (۴-۲۵) نیز دلیلی بر این مدعاست. در این شکل می‌بینیم که ترکیب تکنولوژی نوع ۳، سپس ترکیب تکنولوژی نوع ۲ و در در نهایت

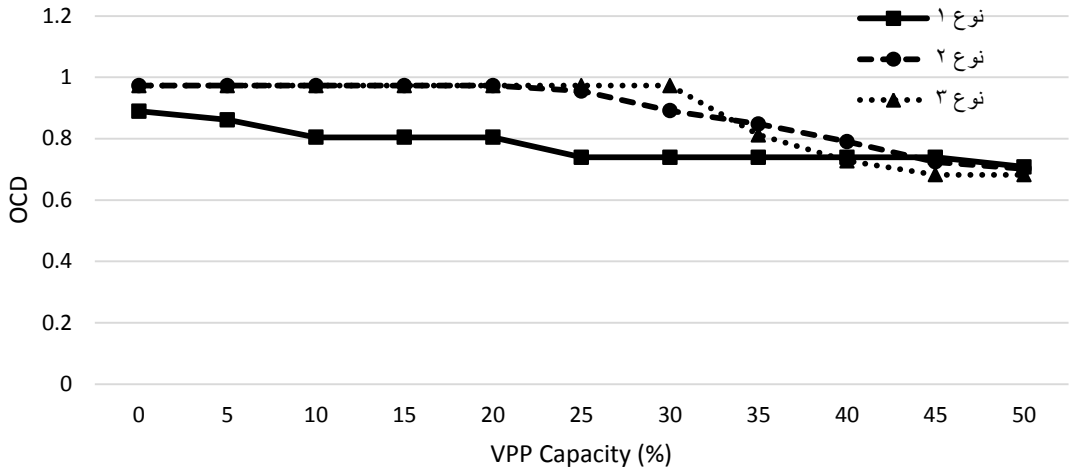
ترکیب تکنولوژی نوع ۱، بیشترین اثر را بر روی بازار داشته اند. مشابه سناریوهای قبلی می‌توان عنوان کرد که ترکیب تکنولوژی نوع ۱ با ظرفیت نیروگاه مجازی کمتری قابل کنترل است. اگرچه در ترکیب تکنولوژی نوع ۲ و نوع ۳ نیاز به ظرفیت بیشتری برای کاهش قدرت تولیدکننده غالب می‌باشد. البته اثرگذاری سیاست واگذاری مجازی برای ترکیب تکنولوژی نوع ۱ و ۲ به ترتیب در ظرفیت نیروگاه مجازی ۴۰٪ و ۵۰٪ اتفاق افتاده است. برای اثرگزاری این سیاست در ترکیب تکنولوژی نوع ۳ نیاز به ظرفیت بیش از ۵۰٪ است.



شکل (۴-۲۵)- شاخص انحراف از هزینه مصرف‌کنندگان برای ترکیب تکنولوژی نوع ۲،۱ و ۳ بر حسب ظرفیت نیروگاه مجازی در سطح بار متوسط سناریوی چهارم

۴-۹-۳ سطح بار زیاد

در این سطح بار، قدرت بازار تولیدکننده غالب برای هر سه نوع ترکیب تکنولوژی به طور تقریبی یکسان است. آنچه که در این سطح بار اهمیت ویژه‌ای دارد ناتوانی سیاست واگذاری مجازی در نزدیک کردن بازار به شرایط رقابتی است. همانطور که در شکل (۴-۲۶) مشاهده می‌شود، پس از اجرای سیاست واگذاری مجازی با ظرفیت ۵۰٪، کماکان شاخص انحراف هزینه مصرف‌کنندگان نتوانسته است به میزان مورد انتظار کاهش یابد. این نشان می‌دهد که اگر سطح بار زیاد باشد، تقاضا نیز ناکشسان باشد و تولیدکننده غالب سهم بازار بالایی داشته باشد آنگاه سیاست واگذاری مجازی به تنهایی نمی‌تواند بازار را به سطح رقابتی برساند. لازم به ذکر است که واگذاری مجازی در این شرایط اثر کاهشی بر قدرت بازار دارد، اما این میزان مطلوب نیست و باید با سیاست‌های دیگر کاهش قدرت بازار، مانند حساسیت تقاضا به تغییرات قیمت، به طور تلفیقی مورد استفاده قرار گیرد.



شکل (۴-۲۶)- شاخص انحراف از هزینه مصرف‌کنندگان برای ترکیب تکنولوژی نوع ۲،۱ و ۳ بر حسب ظرفیت نیروگاه مجازی در سطح بار زیاد سناریوی چهارم

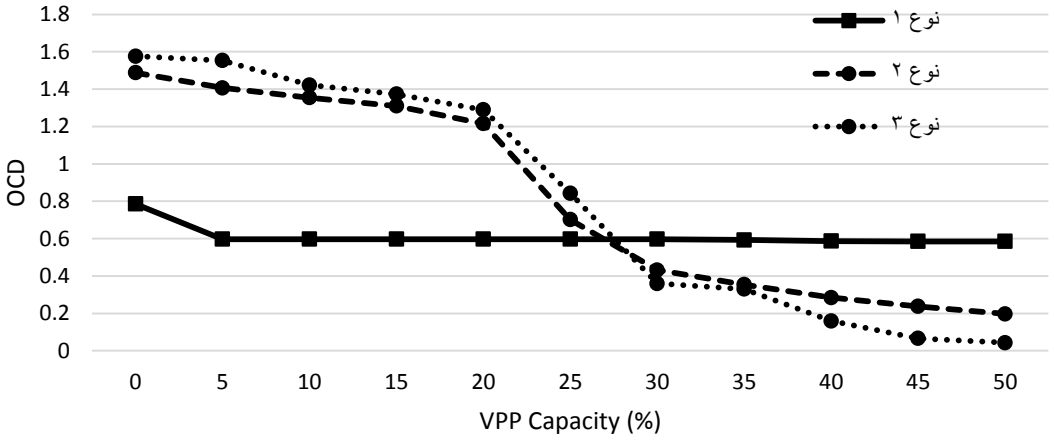
۴-۱۰ سناریوی پنجم: تقاضا کمی‌کشسان و سهم بازار ۷۰٪

این سناریو همانند سناریوی دوم است، با این تفاوت که سهم بازار تولیدکننده غالب افزایش یافته است. در این سناریو سهم بازار تولیدکننده غالب ۷۰٪ از کل ظرفیت تولید در بازار است. انتظار می‌رود با افزایش سهم بازار، تولیدکننده غالب بتواند اثر بیشتری روی انحراف بازار از سطح رقابتی بگذارد. در ادامه اثر ترکیب تکنولوژی‌های مختلف در سطح بارهای متفاوت بررسی می‌شود. قیمت قطعی در این سناریو نیز برابر با سناریوی دوم است. زیرا تقاضا در هر دو سناریو کمی کشسان است و سهم بازار اگر رفتار استراتژیکی وجود نداشته باشد بر قیمت بازار در شرایط رقابتی اثری ندارد.

۴-۱۰-۱ سطح بار کم

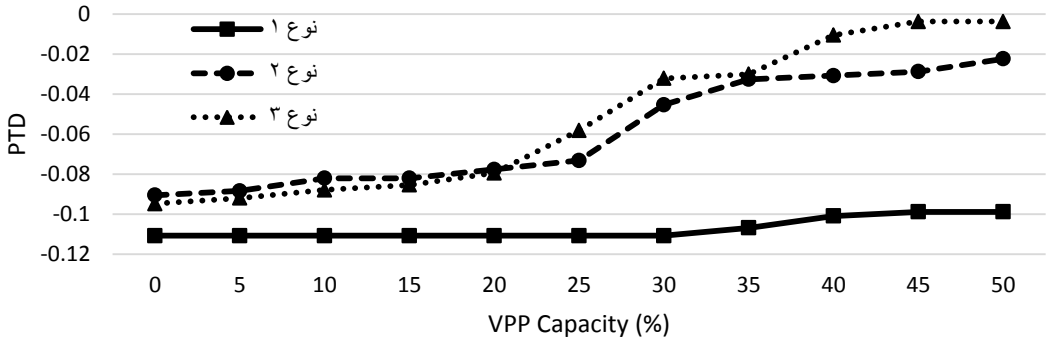
شکل (۴-۲۷) شاخص انحراف از هزینه مصرف‌کنندگان را برحسب ظرفیت نیروگاه مجازی برای سطح بار کم در این سناریو نشان می‌دهد. توجه داشته باشید مقایسه بین نتایج در تقاضای کشسان با تقاضای کمی کشسان و ناکشسان به دلیل تفاوت قیمت قطعی چندان منطقی نیست. همانطور که از شکل (۴-۲۷) معلوم است انحراف هزینه مصرف‌کنندگان پیش از اجرای سیاست واگذاری مجازی-مالی در ترکیب تکنولوژی نوع ۱، از مقدار کمتری در مقایسه با دو ترکیب تکنولوژی دیگر برخوردار است. همچنین دو ترکیب تکنولوژی نوع ۲ و ۳، همانند سناریو ۲، مشابه تغییر می‌کنند. در ترکیب تکنولوژی نوع ۱، شاخص انحراف هزینه مصرف‌کنندگان در ظرفیت ۰٪ برابر با ۰/۷۵ است و با اجرای سیاست واگذاری مجازی با ظرفیت ۵۰٪ مقدار این شاخص به کمتر از ۰/۶ می‌رسد. البته با افزایش ظرفیت نیروگاه مجازی دیگر اثری از کاهش این شاخص ملاحظه نمی‌شود.مقدار شاخص انحراف هزینه مصرف‌کنندگان در دو ترکیب تکنولوژی نوع ۲ و ۳ نیز با اجرای سیاست واگذاری مجازی از

مقدار ۱/۵ در ظرفیت ۰٪ به مقدار ۰/۴ در ظرفیت ۳۰٪ می‌رسد. این نشان از کارا بودن این سیاست برای این دو ترکیب تکنولوژی است.



شکل (۴-۲۷)- شاخص انحراف از هزینه مصرف‌کنندگان برای ترکیب تکنولوژی نوع ۲،۱ و ۳ بر حسب ظرفیت نیروگاه مجازی در سطح بار کم سناریوی پنجم

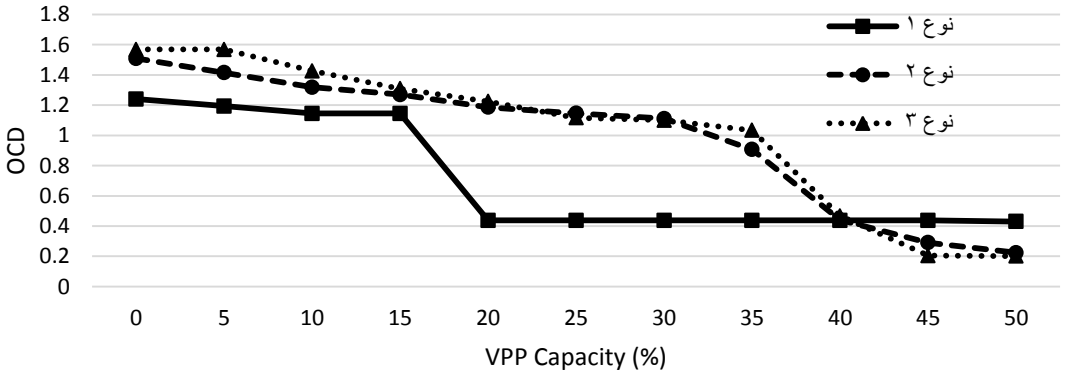
شکل (۴-۲۸) شاخص انحراف توان مبادله شده را برای سطح بار کم از سناریوی پنجم نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است میزان انحراف این شاخص برای همه ترکیب تکنولوژی‌ها در ظرفیت ۰٪، یکسان است. پس از اجرای این سیاست تبادلات توان برای هردو نوع تکنولوژی ۲ و ۳ بهبود می‌یابد و به علت کاهش احتکار تولیدکننده غالب و افزایش تولید در بازار، میزان تبادلات توان بهبود می‌یابد. مقدار شاخص انحراف توان مبادله شده در ظرفیت نیروگاه مجازی ۳۰٪ به کمتر از ۰/۰۵می‌رسد. در این سطح بار تکنولوژی‌های گران قیمت در بیشتر ساعات در بازار بازنده هستند. به همین دلیل در صورت احتکار تکنولوژی‌های ارزان قیمت، روی شاخص انحراف توان مبادله شده اثر چشمگیری می‌گذارد. توجه به این نکته مهم است که در صورتی تکنولوژی ارزان قیمت، که همواره در بازار برنده است، احتکار ظرفیت انجام می‌دهد که افزایش چشمگیری در قیمت اتفاق بیفتد و با تولید کمتر، سود بیشتری بدست آورده شود. دراین شرایط برای ترکیب تکنولوژی نوع ۱، به ظرفیت نیروگاه مجازی بزرگی برای اثرگذاری بر توان مبادله شده است. پس با این ترکیب تکنولوژی سیاست واگذاری مجازی ضعیف عمل می‌کند.



شکل (۴-۲۸)- شاخص انحراف توان مبادله شده بر حسب ظرفیت نیروگاه مجازی درسطح بار کم سناریوی پنجم

۴-۱۰-۲ سطح بار متوسط

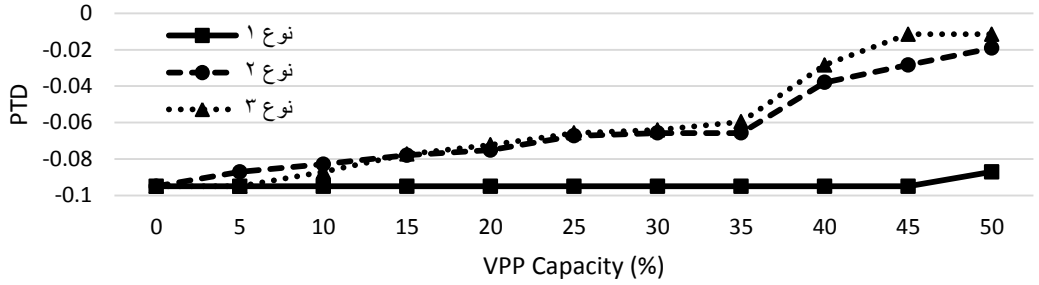
در این سطح بار همانطور که از نحوه تغییرات شاخص انحراف هزینه مصرف‌کنندگان نسبت به ظرفیت نیروگاه مجازی در شکل (۴-۲۹) مشخص است اجرای سیاست واگذاری می‌تواند قدرت بازار تولیدکننده غالب را کاهش دهد. در این شرایط، با ظرفیت نیروگاه مجازی کمتری می‌توان قدرت بازار تولیدکننده غالب مالک نیروگاه‌های ارزان‌تر را کاهش داد. از این رو مقدار شاخص انحراف هزینه مصرف‌کنندگان در ترکیب تکنولوژی نوع ۱، از ۱/۲۵ در ظرفیت نیروگاه مجازی ۰٪ به ۰/۴۳ در ظرفیت نیروگاه مجازی ۲۰٪ کاهش می‌یابد. تکنولوژی‌های نوع ۲ و ۳ نیز از مقدار شاخص ۱/۵۵ در ظرفیت نیروگاه مجازی ۰٪ به ۰/۴۵ در ظرفیت نیروگاه مجازی ۴۰٪ کاهش پیدا می‌کنند.



شکل (۴-۲۹)- شاخص انحراف از هزینه مصرف‌کنندگان برای ترکیب تکنولوژی نوع ۲،۱ و ۳ بر حسب ظرفیت نیروگاه مجازی در سطح بار متوسط سناریوی پنجم

انحراف توان مبادله شده در شکل (۴-۳۰) نشان می‌دهد در این سناریو میزان انحراف توان مبادله شده، ناچیز است. قبل از اجرای سیاست واگذاری مجازی-مالی، ظرفیت نیروگاه مجازی ۰٪، هر

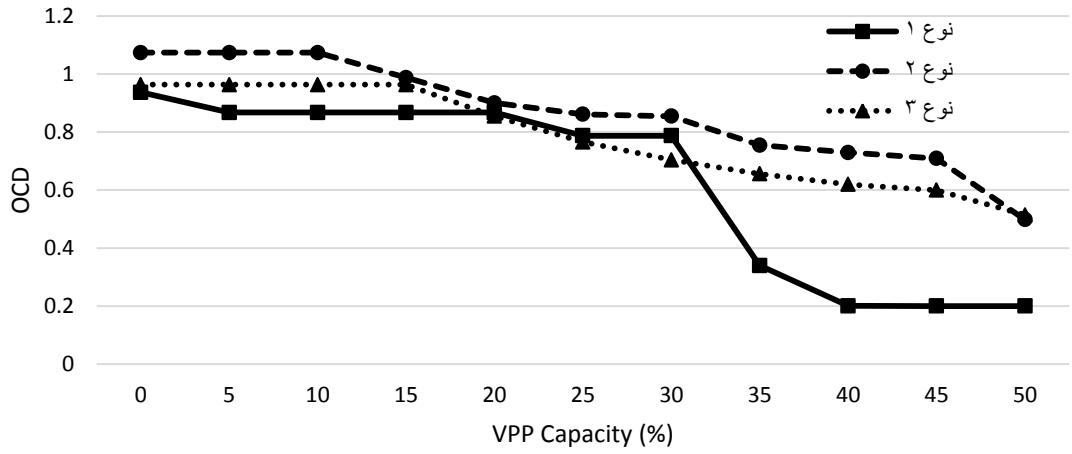
سه نوع ترکیب تکنولوژی اثر یکسانی دارد. و مقدار این شاخص برابر با ۰/۰۹- است. اجرای سیاست واگذاری مجازی-مالی ترکیب تکنولوژی نوع ۱ اثری ندارد. در حالیکه این سیاست روی ترکیب تکنولوژی نوع ۲ و۳ اثرگذار است. پس به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت قدرت بازار اعمال شده در تمام ترکیب تکنولوژی‌های این سطح بار موجب افزایش قیمت می‌شود ونه کاهش توان مبادله شده.



شکل (۴-۳۰)- شاخص انحراف توان مبادله شده بر حسب ظرفیت نیروگاه مجازی در سطح بار متوسط سناریوی پنجم

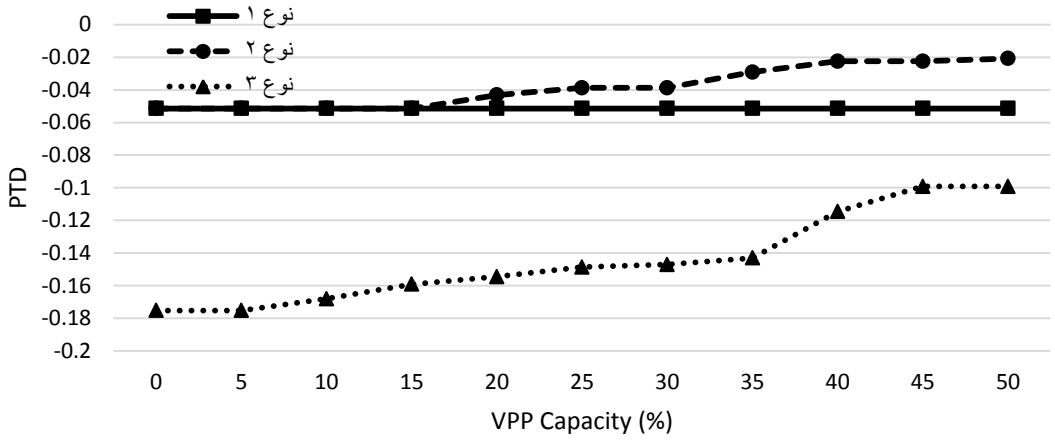
۴-۱۰-۳ سطح بار زیاد

در این سطح بار پیش از اجرای سیاست واگذاری مجازی، تولیدکننده غالب با هر نوع ترکیب تکنولوژی هزینه بهره‌برداری را به ۲ برابر نسبت به شرایط رقابتی رسانده است. همانطور که از شکل (۴-۳۱) مشخص است به علت بالا بودن سطح بار در این سناریو، کاهش قدرت بازار تولیدکننده غالب نیاز به ظرفیت نیروگاه مجازی نسبتاً زیادی دارد. با افزایش ظرفیت نیروگاه مجازی از ۰٪ تا ۳۰٪ هر سه نوع ترکیب تکنولوژی روند یکسانی را طی می‌کنند. اما با افزایش ظرفیت نیروگاه مجازی، میزان احتکار تولیدکننده غالب در ترکیب تکنولوژی نوع ۱ به علت در اختیار داشتن واحدهای ارزان‌تر کاهش می‌یابد. در حالیکه دو ترکیب تکنولوژی دیگر، به علت گران بودن تکنولوژی‌های در اختیار، تولیدکننده غالب تصمیم به احتکار ظرفیت از تکنولوژی‌های گران می‌گیرد و سعی بر بالا نگه‌داشتن قیمت بازار دارد. در نهایت در ترکیب تکنولوژی نوع ۲ و ۳ نیز در ظرفیت نیروگاه مجازی ۵۰٪، شاخص انحراف هزینه مصرف‌کنندگان، حدود ۰/۵ می‌رسد. البته نبایستی اثر حساسیت تقاضا را در کنار سیاست واگذاری مجازی-مالی برای کاهش قدرت بازار در این سناریو نادیده گرفت.



شکل (۴-۳۱)- شاخص انحراف از هزینه مصرف‌کنندگان برای ترکیب تکنولوژی نوع ۲،۱ و ۳ بر حسب ظرفیت نیروگاه مجازی در سطح بار زیاد سناریوی پنجم

همانطور که در شکل (۴-۳۲) نشان داده شده است، انحراف توان مبادله شده در ترکیب تکنولوژی‌های نوع ۱و۲ بسیار ناچیز است. دلیل آن نیز بالا بودن سطح بار است و تکنولوژی‌های ارزان بر طبق مسأله بیشینه‌سازی سود، تمایل به تولید بیشتر دارند. پس ۲ برابر شدن هزینه مصرف-کنندگان تنها به دلیل افزایش قیمت است و نه بخاطر کاهش توان مبادله شده. ترکیب تکنولوژی نوع ۳، به علت دارا بودن واحدهای گران قیمت، تمایل به کاهش تولید و افزایش احتکار داشته است. سیاست واگذاری مجازی-مالی روی ترکیب تکنولوژی نوع ۳، برای افزایش مبادلات توان اثر کمی داشته است.



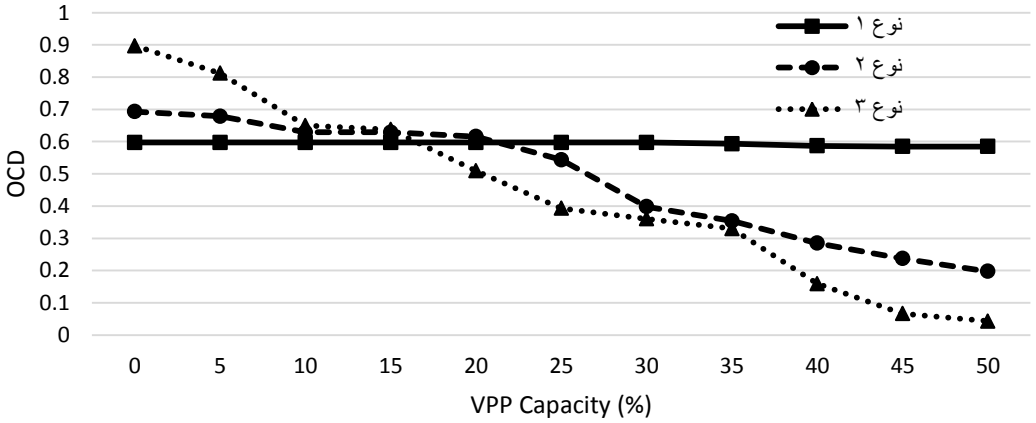
شکل (۴-۳۲)- شاخص انحراف توان مبادله شده بر حسب ظرفیت نیروگاه مجازی درسطح بار زیاد سناریوی پنجم

۴-۱۱ سناریوی ششم: تقاضا کشسان و سهم بازار ۷۰٪

این سناریو همانند سناریوی سوم است، با این تفاوت که سهم بازار تولیدکننده غالب افزایش یافته است. در این سناریو سهم بازار تولیدکننده غالب ۷۰٪ از کل ظرفیت تولید در بازار است. در ادامه اثر ترکیب تکنولوژی‌های مختلف در سطح بارهای متفاوت بررسی می‌شود. قیمت قطعی در این سناریو نیز برابر با سناریوی سوم است. زیرا تقاضا در هر دو سناریو کشسان است و سهم بازار اگر رفتار استراتژیکی وجود نداشته باشد بر قیمت بازار در شرایط رقابتی اثری ندارد.

۴-۱۱-۱ سطح بار کم

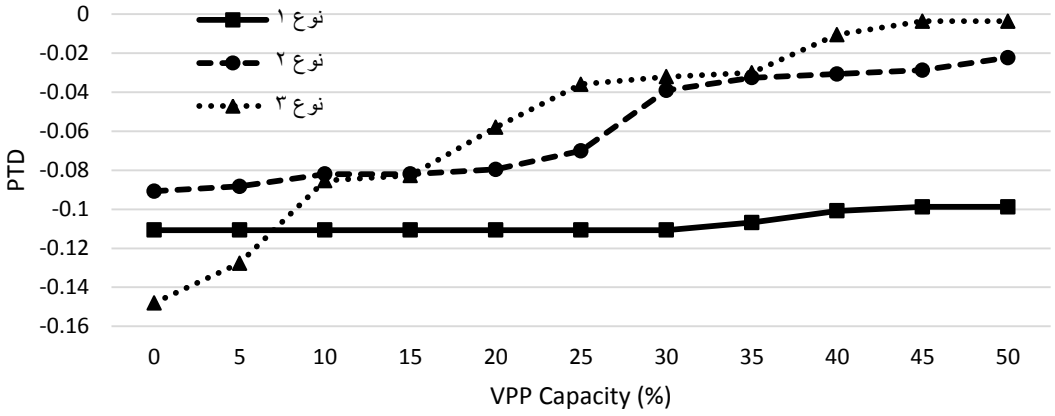
همانطور که انتظار می‌رود با افزایش حساسیت تقاضا به حالت کشسان میزان شاخص انحراف هزینه مصرف‌کنندگان در این سناریو نسبت به سناریوهای چهارم و پنجم کاهش پیدا کرده است.



شکل (۴-۳۳)- شاخص انحراف از هزینه مصرف‌کنندگان برای ترکیب تکنولوژی نوع ۲،۱ و ۳ بر حسب ظرفیت نیروگاه مجازی در سطح بار کم سناریوی ششم

نکته جالب توجه در شکل (۴-۳۳) این است که کشسان شدن تقاضا اثر کمتری روی شاخص انحراف هزینه مصرف‌کنندگان در ترکیب تکنولوژی نوع ۳ دارد. این بدان معناست که قدرت بازار تولیدکننده غالب با ترکیب تکنولوژی نوع ۳ بیشتر از قدرت بازار وی در سایر ترکیب تکنولوژی‌هاست. پس می‌توان بیان کرد که حساس شدن تقاضا روی ترکیب تکنولوژی‌های ارزان قیمت نسبت به تکنولوژی‌های گران قیمت، اثر بیشتری دارد.

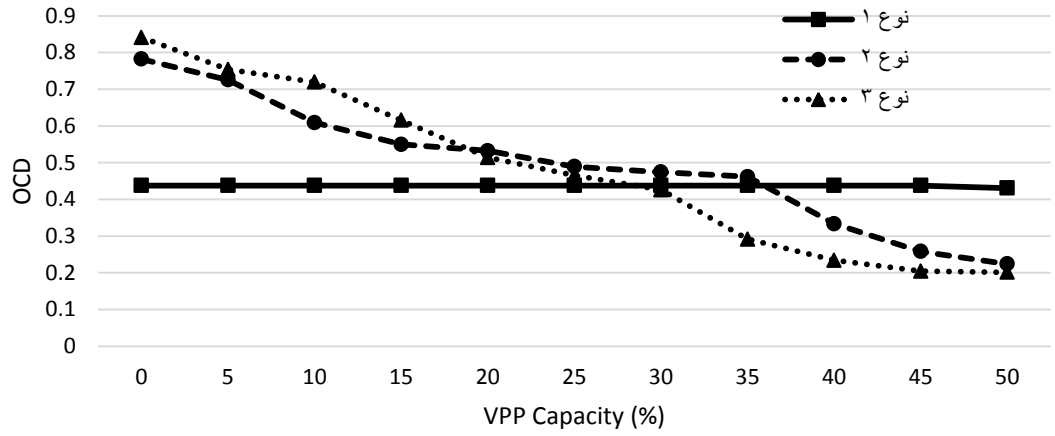
همانگونه که انتظار می‌رفت کشسان شدن تقاضا موجب کاهش توان مبادله شده شده است. این موضوع در شکل (۴-۳۴) نشان داده شده است. مشابه نتیجه گرفته شده از شکل (۴-۳۳)، در شکل (۴-۳۴) نیز می‌توان بیان کرد که تولیدکننده غالب با ترکیب تکنولوژی نوع ۳ قدرت بازار بیشتری نسبت به سایر ترکیب تکنولوژی‌ها داشته است.



شکل (۴-۳۴)- شاخص انحراف توان مبادله شده بر حسب ظرفیت نیروگاه مجازی در سطح بار کم سناریوی ششم

۴-۱۱-۲ سطح بار متوسط

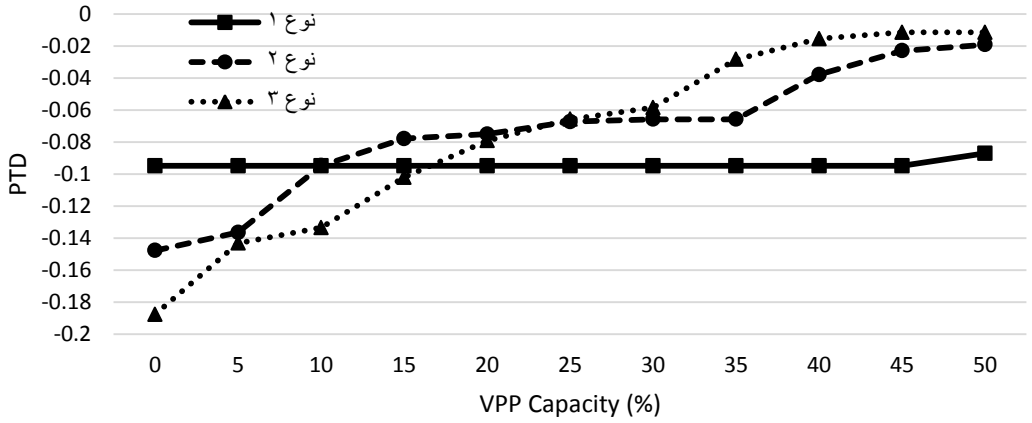
با افزایش سطح بار نسبت به شکل (۴-۳۴) میزان انحراف هزینه مصرف‌کنندگان کاهش یافته است. دلیل این کاهش نیز به کشسان بودن تقاضا مربوط است. زیرا در حالت کشسان بودن تقاضا، با افزایش سطح بار، بار بیشتری به قیمت‌ها پاسخ می‌دهد و مانع از به کارگیری قدرت بازار توسط تولیدکننده غالب می‌گردد. همچنان تکنولوژی‌های گران، نوع ۲ و نوع ۳، سعی بر احتکار ظرفیت و افزایش قیمت‌ها دارند. اگرچه با کشسان بودن بخش بزرگی از بار انتظار می‌رود که توان مبادله شده در این شرایط کاهش یابد.



شکل (۴-۳۵)- شاخص انحراف از هزینه مصرف‌کنندگان برای ترکیب تکنولوژی نوع ۲،۱ و ۳ بر حسب ظرفیت نیروگاه مجازی در سطح بار متوسط سناریوی ششم

همانطور که انتظار می‌رفت با افزایش میزان بار پاسخ‌گو به قیمت، توان مبادله شده نسبت

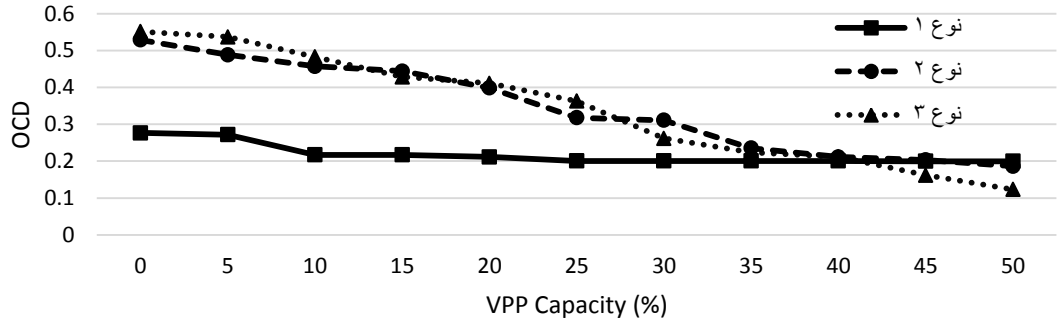
به سطح بارکم همین سناریو، کاهش بیشتری پیدا کند. همچنین مشخص است پیش از اجرای سیاست واگذاری مجازی، هرچه تکنولوژی‌های در اختیار تولیدکننده غالب گران‌تر باشد، میزان انحراف توان مبادله شده هم بیشتر است. این موید همان نتیجه گرفته شده در قسمت‌های قبل است که اگر هرچه تکنولوژی‌های در اختیار تولیدکننده غالب گران‌تر باشد، تولیدکننده غالب برای افزایش سود سعی بر بالا نگه‌داشتن قیمت‌ها، با احتکار ظرفیت، دارد. این در حالی است که حساسیت تقاضا موجب کاهش توان مبادله شده می‌گردد. به همین دلیل است که در ترکیب تکنولوژی نوع ۳، انحراف شاخص توان مبادله شده بیشتر از سایر ترکیب تکنولوژی‌هاست. اجرای سیاست واگذاری مجازی-مالی نیز برای این ترکیب تکنولوژی مناسب است.



شکل (۴-۳۶)- شاخص انحراف توان مبادله شده بر حسب ظرفیت نیروگاه مجازی در سطح بار متوسط سناریوی ششم

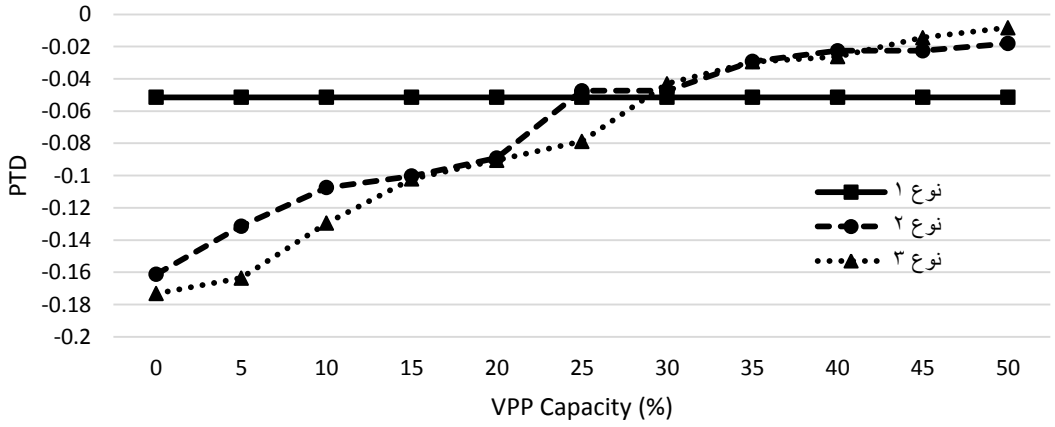
۴-۱۱-۳ سطح بار زیاد

نتایج ارائه شده، در شکل (۴-۳۷) نشان می‌دهد تولیدکننده غالب توانایی به‌کارگیری قدرت بازار را در سطح قابل توجهی ندارد. در نتیجه اجرای سیاست‌های کاهش قدرت بازار نیز ضرورتی ندارد.



شکل (۴-۳۷)- شاخص انحراف از هزینه مصرف‌کنندگان برای ترکیب تکنولوژی نوع ۲،۱ و ۳ بر حسب ظرفیت نیروگاه مجازی در سطح بار زیاد سناریوی ششم

شاخص انحراف توان مبادله شده در شکل (۴-۳۷) مقادیر منفی بزرگی می‌پذیرد. این نشان از کاهش تبادلات در بازار است. زیرا در این حالت با افزایش قیمت میزان تقاضا به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد.



شکل (۴-۳۸)- شاخص انحراف توان مبادله شده بر حسب ظرفیت نیروگاه مجازی درسطح بار زیاد سناریوی ششم

۴-۱۲ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این فصل سیاست واگذاری مجازی در سناریوهای مختلف با هدف کاهش قدرت بازار تولیدکننده غالب مطالعه شد. نتایج نشان می‌دهد انتخاب میزان ظرفیت نیروگاه مجازی از اهمیت بالایی برخوردار است. براساس شرایط بازار و تکنولوژی‌های در اختیار تولیدکننده غالب میزان مناسب ظرفیت نیروگاه مجازی تغییر می‌کند. ، هر چه تولیدکننده غالب ظرفیت بیشتری از تکنولوژی‌های گران قیمت در اختیار داشته باشد، ظرفیت نیروگاه مجازی بزرگتری برای کاهش قدرت بازار وی مورد نیاز است.

شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهند هرچه سهم بازار تولیدکننده غالب بیشتر باشد، قدرت بازار بیشتری دارد و شاخص انحراف هزینه مصرف‌کنندگان مقادیر بزرگتری اختیار می‌کند. همچنین برای کاهش قدرت بازار نیز نیاز به اعمال ظرفیت نیروگاه مجازی بزرگتری می‌باشد اگر در شرایط ناکشسانی تقاضا، سهم بازار تولیدکننده غالب زیاد باشد، سیاست واگذاری مجازی به تنهایی نمی‌تواند قدرت بازار را به میزان قابل ملاحظه‌ای کاهش دهد و نیاز است از روش‌های تلفیقی، مانند پاسخ گویی تقاضا به قیمت‌ها، استفاده کرد.

اثر پاسخ تقاضا به قیمت نیز در سناریوهای این فصل بررسی شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد قدرت بازار تولیدکننده غالب با افزایش کشسانی تقاضا ، کاهش می‌یابد. در سناریوهای دوم و پنجم

دیده شد که در حالت بار کمی کشسان، پتانسیل به کارگیری قدرت بازار وجود دارد. پس می‌توان نتیجه گرفت که پاسخ تقاضا به قیمت به تنهایی نمی‌تواند قدرت بازار را به طور کامل حذف کند و فقط می‌تواند آن را تا حدی کاهش دهد.

فصل پنجم

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۵-۱ مقدمه

کاهش قدرت بازار همواره مطلوب سیاست‌گذاران بوده است. زیرا منجر به کاهش انحصارات و افزایش سطح رقابت در بازارهای برق می‌شود. در نتیجه رفاه اجتماعی افزایش می‌یابد. از این رو در این پایان نامه یکی از روش‌های کاهش قدرت بازار یا همان سیاست واگذاری مجازی-مالی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. همچنین عوامل تاثیرگذار بر اجرای سیاست واگذاری مجازی-مالی به عنوان یک ابزار مناسب برای کاهش قدرت بازار ارزیابی شده است.

۵-۲ کارهای انجام شده

در این پایان نامه، آثار کوتاه مدت سیاست واگذاری مجازی- مالی بر بازار روز قبل مطالعه شد. جهت کسب بینش عمیق‌تر نسبت به نحوه اثرگذاری این سیاست در کاهش قدرت بازار، شیبه‌سازی‌ها برای ویژگی‌های مختلف سیاست واگذاری و ساختار بازار انجام شد.

در ابتدا به مدل‌سازی ریاضی رفتار تولیدکننده غالب مقید به سیاست واگذاری مجازی-مالی به صورت مسأله بهینه‌سازی دوسطحی انجام شد. سپس مسأله دوسطحی به یک مسأله بهینه‌سازی تک سطحی تبدیل شد. سپس با روش‌های ابتکاری و ترکیبی مسأله خطی سازی شد. این مدل برای اولین بار ارائه شده است و یکی از نوآوری‌های این پایان نامه است. جزئیات در نظر گرفته شده قیدهای زمانی واحدهای حرارتی و محدودیت‌های تولید واحدهای مختلف نیروگاهی است.

پس از مدل‌سازی مسأله در ۶ سناریوی مجزا، آثار اجرای سیاست واگذاری مجازی-مالی در ساختارهای مختلف بازار بررسی شد. در این شبیه سازی‌ها اثر سهم بازار و ترکیب تکنولوژی‌های در اختیار تولیدکننده غالب، کشسانی تقاضا و میزان سطح بار و همچنین ظرفیت مناسب برای نیروگاه مجازی-مالی بررسی شده است. بررسی با این گستردگی نیز دیگر نوآوری این پایان نامه است.

۵-۳ نتایج

مدل برنامه‌ریزی ریاضی با قیود تعادل ارائه شده در فصل سوم این پایان نامه، ابزاری مناسب برای سیاست گذاران برای انتخاب ظرفیت نیروگاه مجازی مناسب برای ساختار بازارهای مختلف است. این مدل با دقت بالایی می‌تواند میزان اثرگذاری اجرای سیاست واگذاری مجازی-مالی را بر کاهش قدرت بازار تولیدکننده غالب در بازار روز قبل تحلیل کند.

برخی نتایج مهم به دست آمده از این تحقیق به شرح زیر است:

نتایج نشان می‌دهد که سیاست واگذاری مجازی-مالی بر کاهش قدرت بازار تولیدکننده غالب تاثیر می‌گذارد و سهم بازار تولیدکننده غالب را به طور مجازی کاهش می‌دهد. به‌طور کلی هرچه

تولیدکننده غالب سهم بازار بیشتری داشته باشد، قدرت بازار بیشتری هم دارد. همچنین برای کاهش قدرت بازار و نزدیک کردن بازار به شرایط رقابتی باید از ظرفیت نیروگاه مجازی بیشتری نیز استفاده کرد.

همچنین نتایج نشان می‌دهد در سطح بارهای کم، قدرت بازار به کارگرفته شده توسط تولیدکننده غالب با تکنولوژی‌های گران بیشتر در ساعات پیک اتفاق می‌افتد لذا در این شرایط استفاده از نیروگاه مجازی-مالی بار پیک لازم است. زیرا با هزینه ماهیانه کمتر می‌توان قدرت بازار را کاهش داد. در حالیکه با تکنولوژی‌های ارزان، در سطح بار کم، تولیدکننده غالب می‌تواند هم در ساعت‌های پیک اثر بگذارد و هم در ساعت‌های غیر پیک. در این‌صورت نیاز به ظرفیت هر دو نوع نیروگاه مجازی-مالی بارپایه و پیک است. در سطح بار متوسط، قدرت بازار در همه ساعت‌ها اتفاق می‌افتد و ترکیب استفاده از نیروگاه مجازی بار پایه و بار پیک می‌تواند موثر باشد. در سطح بارهای زیاد هم اجرای سیاست واگذاری مجازی به تنهایی نمی‌تواند موثر واقع شود و باید به صورت ترکیبی از روش‌های کاهش قدرت بازار مورد استفاده قرارگیرد.

افزایش کشسانی تقاضا به طور کلی قدرت بازار تولیدکننده غالب را کاهش می‌دهد. به عبارت دیگر با کاهش تقاضا هنگام افزایش قیمت، موجب کاهش قدرت بازار تولیدکننده غالب می‌شود. اما همیشه کشسان شدن تقاضا به تنهایی نمی‌تواند بازار را به سطح رقابتی برساند. البته با گسترش شبکه‌های هوشمند و حساسیت حجم زیادی از تقاضا به تغییرات قیمت، می‌توان انتظار داشت که دیگری نیازی به اجرای سیاست واگذاری مجازی نیست.

از نتایج می‌توان دریافت که هنگامی اجرای سیاست واگذاری مجازی-مالی موثر خواهد بود که قدرت بازار تولیدکننده غالب در حد قابل ملاحظه‌ای باشد. اگر قدرت بازار تولیدکننده غالب بسیار کوچک باشد و انحراف بازار از سطح رقابتی ناچیز باشد اجرای این سیاست مناسب نخواهد بود.

همانطور که از نتایج معلوم می‌شود تنوع تکنولوژی‌های در اختیار تولیدکننده غالب روی میزان اثرگذاری سیاست واگذاری مجازی-مالی تفاوت ایجاد می‌کند. پس سیاست گذاران باید با عنایت به این موضوع نسبت به اجرای این سیاست اقدام نمایند. همچنین نتایج نشان می‌دهد هرچه تولیدکننده نیروگاه‌های گران قیمت در اختیار داشته باشد، برای افزایش سودش تمایل به تولید کمتر و در نتیجه بالا نگه‌داشتن قیمت‌ها دارد. این موضوع موجب می‌شود در این شرایط نیاز به ظرفیت بالایی از نیروگاه مجازی دارد تا بتواند سیاست واگذاری مجازی تا حد قابل قبولی بازار را به شرایط رقابتی نزدیک کند. عکس این مطلب نیز صادق است، هرچه تولیدکننده غالب نیروگاه‌های ارزان قیمت در اختیار داشته باشد، با اجرای سیاست واگذاری مجازی زودتر (با ظرفیت نیروگاه مجازی کوچکتر) ظرفیت احتکار شده را به بازار ارائه می‌دهد و تولیدش را افزایش می‌دهد تا سود خودش را بالا ببرد.

پس به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت هرچه تولیدکننده غالب از انرژی‌های ارزان در اختیار داشته باشد اجرای سیاست واگذاری مجازی-مالی تاثیر بیشتری بر کاهش قدرت بازار خواهد داشت. این موضوع به دلیل هزینه پایین تولید این واحدهای نیروگاهی است.

۵-۴ پیشنهادها

برخی از پیشنهادها جهت ادامه این تحقیق به شرح زیر است:

بررسی چگونگی اثرگذاری تکنولوژی‌های انرژی تجدید پذیر، به عبارت دیگر اگر تولیدکننده غالب از تکنولوژی‌های تجدیدپذیر علاوه بر سایر تکنولوژی‌ها در اختیار داشته باشد، نحوه تغییر استراتژی احتکار ظرفیت به چه صورت خواهد بود. و اجرای سیاست واگذاری مجازی-مالی چگونه اثر خواهد گذاشت.

همچنین توسعه مدل ارائه شده در این پایان نامه، برای سیاست واگذاری مجازی-فیزیکی جذاب خواهد بود و برای تحقیقات آینده پیشنهاد می‌شود.

از دیگر موضوعات جذاب برای ادامه این پایان نامه می‌توان در نظر گرفت بجای یک تولیدکننده غالب دو یا چند تولیدکننده غالب وجود داشته باشد و در بازار به رقابت بپردازند. در این حالت اثر اجرای سیاست واگذاری مجازی-مالی بر تغییر استراتژی هرکدام چطور خواهد بود. این مسأله می‌تواند برای تنوع تکنولوژی‌های مختلف در نظرگرفته شود. البته این مسأله نیاز به حل یک مسأله برنامه‌ریزی تعادل با قیود تعادل دارد. حل این‌گونه مسائل از پیچیدگی بیشتری نسبت به برنامه‌ریزی ریاضی با قیود تعادل که در این پایان نامه انجام گرفت، دارد.

مطالعه اثر سیاست واگذاری مجازی در صورتی که رفتار استراتژیک تولیدکننده غالب احتکار مالی باشد، نیز می‌تواند به عنوان یکی از موضوعات جالب برای محققان باشد.

پیوست‌ها

پیوست الف

در محیط بازارهای برق تجدید ساخته یافته، خواه رقابتی کامل خواه رقابتی ناقص، نیاز به مدل‌های دقیق و مقاوم برای تصمیم‌گیران شدت یافته است[۲۴]. از این رو مدل‌های مکمل[۱] می‌توانند پاسخ گوی این نیاز باشند. مدل‌های مکمل شامل برنامه‌ریزی خطی[۲] و محدب[۳]، برنامه‌ریزی درجه دوم[۴] و محدب، برنامه‌ریزی غیرخطی[۵] و محدب می‌باشد. این مدل‌ها با محاسبه شرایط بهینگی کیروش-کان-تاکر بوجود می‌آیند. ارتباط بین مسأله‌های نامحدب (مقعر) و مدل‌های مکمل در صورت نامفهوم بودن شرایط کیروش-کان-تاکر از بین می‌رود.

مسأله‌های مکمل غیرخطی[۶] (NCP)

این مسائل به طور کلی به شکل زیر تعریف می‌شوند:

$$NCP(F) \quad F:\Re^n \to \Re^n(t)$$

برای یافتن $x \in \Re^n$ که برای تمام i ها داشته باشیم:

1. $F_i(x) \geq 0$
2. $x_i \geq 0$
3. $x_i \cdot F_i(x) = 0$

مسأله‌های مکمل مختلط[۷] (MCP)

این مسأله‌ها به صورت به طور کلی به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$MCP(F) \quad F:\Re^n \to \Re^n(t)$$

برای یافتن $x \in \Re^{n1}$ و $y \in \Re^{n2}$ که برای تمام i ها داشته باشیم:

1. $F_i(x,y) \geq 0, \quad x_i \geq 0, \; x_i \cdot F_i(x) = 0, i = 1,\cdots,n1$

---

[1] Complementarity Models
[2] Linear Programming
[3] Convex
[4] Quadratic Programming
[5] Non-Linear Programming
[6] Non-Linear Complementarity Programming
[7] Mixed Complementarity Programming

2. $F_{j+n1}(x,y) \geq 0, \quad y_i \ free, \quad j = 1, \cdots, n2$

ساختارهای ریاضی که برای تحلیل بازارهای برق به کار می‌رود در چهار دسته قرار می‌گیرند:

۱. مسائل بهینه سازی
۲. مسائل تعادل
۳. برنامه ریزی ریاضی با قیود تعادل
۴. مسائل تعادل با قیود تعادل

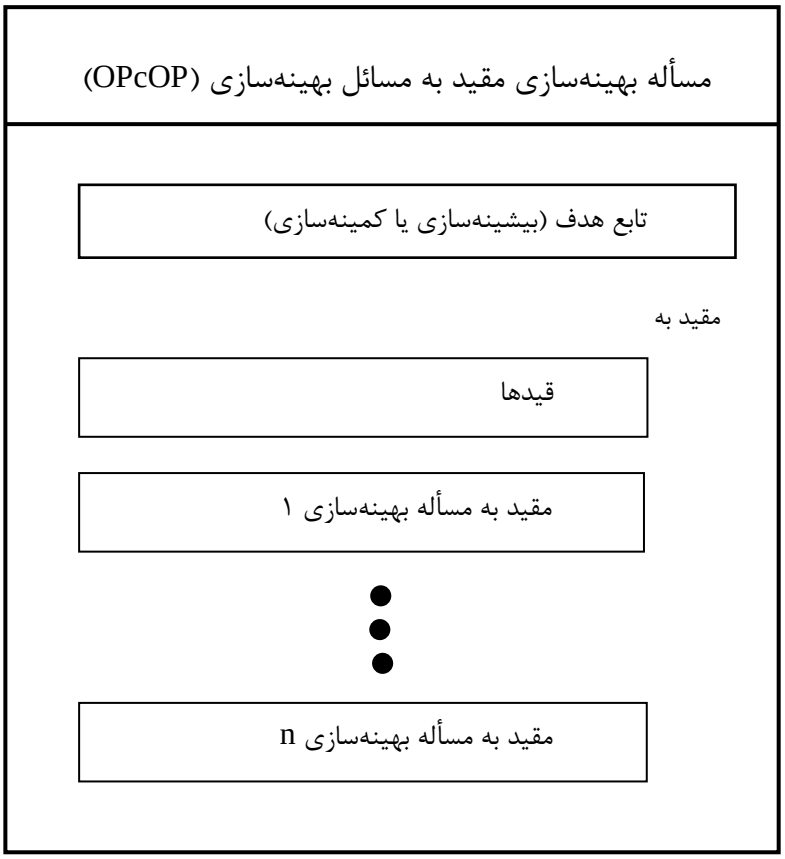
مسائل بهینه سازی، برای مدلسازی رفتار شرکت‌کنندگان در یک بازار رقابتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این گونه مسأله‌ها نسبتاً به سادگی قابل حل می‌باشند. اگر این مسائل خطی باشند، حتی اگر میلیون‌ها متغیر و میلیون‌ها قید داشته باشند بازهم قابل حل می‌باشند. اگر این مسائل غیرخطی و شامل عدد صحیح باشند حل آن‌ها مشکل می‌شود و باید از روش‌های جداسازی استفاده شود. مسائل تعادل، برای مدلسازی اثر متقابل بین شرکت کنندگان رقابتی و مشخص نمودن خروجی‌های بازار به کار می‌رود. میزان سختی محاسبات حل این مسائل نیز شبیه به مسائل بهینه سازی است. برنامه ریزی ریاضی با قیود تعادل برای مدلسازی نحوه اثرگذاری رفتار یک شرکت‌کننده استراتژیک بر خروجی‌های بازار مناسب است. عموماً حل این نوع مسائل مشکل است و تنها در صورتی که شرایط تعادل مربوط به مسائل خطی و یا محدب باشند. در غیر این صورت برخی روش‌هایی برای حل این مسائل وجود دارد. و در نهایت مسائل تعادل با قیود تعادل، برای مدلسازی رفتار چندین شرکت‌کننده استراتژیک بر خروجی‌های بازار مورد استفاده قرار می‌گیرد. از آنجا که شرایط بهینگی در این مسائل به سادگی قابل دستیابی نیست، مگر در ساختار خاصی، امید چندانی به حل این مسائل نیست. روش-های ابتکاری و تقریبی برای یافتن همسایگی بهینه در حل این مسائل استفاده می‌شود. ما در اینجا به معرفی مدل برنامه‌ریزی ریاضی با قیود تعادل می‌پردازیم که مورد استفاده در این پایان نامه بوده است.

مسأله بهینه‌سازی مقید به مسائل بهینه‌سازی (OPcOP)

یک مسأله کمینه‌سازی و یا بیشینه‌سازی است که علاوه بر قیدهای آن، یک یا چند مسأله بهینه‌سازی دیگر به عنوان قیدهای مسأله اصلی می‌باشند. به این نوع مسائل چندسطحی نیز می-گویند. شکل (۶-۱) شمای کلی این نوع مسائل را نشان می‌دهد.

فرمول‌بندی کلی این نوع مسائل به صورت زیر است:

$$
\begin{aligned}
&Minimize_{\{x\}\cup\{x^1,\ldots,x^n\}\cup\{\lambda^1,\ldots,\lambda^n,\mu^1,\ldots,\mu^n\}}\\
&f(x,x^1,\ldots,x^n,\lambda^1,\ldots,\lambda^n,\mu^1,\ldots,\mu^n)\\
&s.t.\\
&h\left(x\ ,x^1,\ldots,x^n,\lambda^1,\ldots,\lambda^n,\mu^1,\ldots,\mu^n\right)=0\\
&g\left(x\ ,x^1,\ldots,x^n,\lambda^1,\ldots,\lambda^n,\mu^1,\ldots,\mu^n\right)\le 0,\\
&\quad\begin{cases}
Minimize_{x^1}\ f^1\left(x,x^1,\ldots,x^n\right)\\
s.t.\\
h^1\left(x,x^1,\ldots,x^n\right)=0 \quad \left(\lambda^1\right)\\
g^1\left(x,x^1,\ldots,x^n\right)\le 0 \quad \left(\mu^1\right),
\end{cases}\\
&\qquad\qquad\vdots\\
&\quad\begin{cases}
Minimize_{x^i}\ f^i\left(x\ ,x^1,\ldots,x^n\right)\\
s.t.\\
h^i\left(x\ ,x^1,\ldots,x^n\right)=0 \qquad \left(\lambda^i\right)\\
g^i\left(x\ ,x^1,\ldots,x^n\right)\le 0 \quad \left(\mu^i\right),
\end{cases}\\
&\qquad\qquad\vdots\\
&\quad\begin{cases}
Minimize_{x^n}\ f^n\left(x\ ,x^1,\ldots,x^n\right)\\
s.t.\\
h^n\left(x\ ,x^1,\ldots,x^n\right)=0 \qquad \left(\lambda^n\right)\\
g^n\left(x\ ,x^1,\ldots,x^n\right)\le 0 \quad \left(\mu^n\right).
\end{cases}
\end{aligned}
$$



شکل (۶-۱)- شمای کلی مسائل بهینه‌سازی مقید به مسائل بهینه‌سازی

مسأله برنامه‌ریزی ریاضی باقیود مکمل (MPCC)

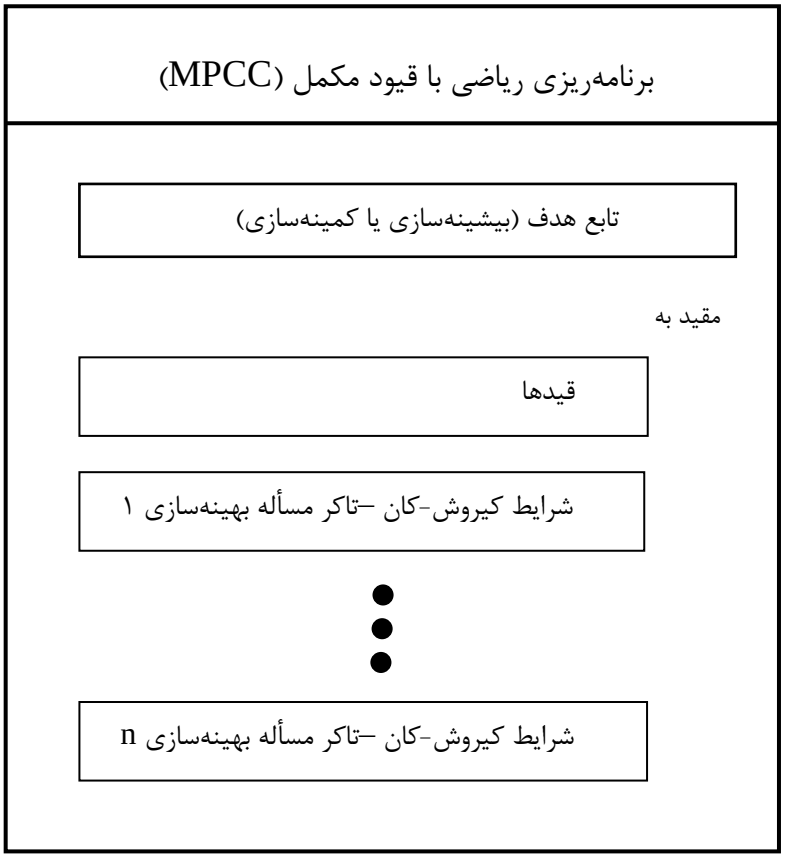
این نوع مسائل از جایگزینی شرایط بهینگی کیروش-کان-تاکر به جای مسائل سطح پایین در مسائل بهینه‌سازی مقید به مسائل بهینه‌سازی بدست می‌آیند. نکته مهم و قابل توجه برای این جایگزینی، محدب بودن مسائل سطح پایین است. به‌عبارت دیگر شرایط کیروش-کان-تاکر برای بهینه بودن جواب این مسأله، شرط لازم و کافی است.

فرمول‌بندی کلی این نوع مسائل به صورت زیر است:

$$Minimize\{x\}\cup\{x^1,...,x^n\}\cup\{\lambda^1,...,\lambda^n,\mu^1,...,\mu^n\}$$
$$f(x,x^1,...,x^n,\lambda^1,...,\lambda^n,\mu^1,...,\mu^n)$$
$$s.t.$$
$$h\left(x\ ,x^1,...,x^n,\lambda^1,...,\lambda^n,\mu^1,...,\mu^n\right)=0$$
$$g\left(x\ ,x^1,...,x^n,\lambda^1,...,\lambda^n,\mu^1,...,\mu^n\right)\le 0,$$

$$\nabla_{x^i} f^i\left(x\ ,x^1,...,x^n\right)+\lambda^{iT}\nabla_{x^i} h^i\left(x,\ x^1,...,x^n\right)+$$
$$\mu^{iT}\nabla_{x^i} g^i\left(x\ ,x^1,...,x^n\right)=0,\quad i=1,...,n$$
$$h^i\left(x\ ,x^1,...,x^n\right)=0,\quad i=1,...,n$$
$$0\le\mu^i\perp -h^i\left(x\ ,x^1,...,x^n\right)\ge 0,\quad i=1,...,n.$$

شمای کلی این نوع مسائل در شکل (۶-۲) نشان داده شده است.



شکل (۶-۲)- شمای کلی مسأله برنامه‌ریزی ریاضی باقیود مکمل (MPCC)

مدل برنامه‌ریزی ریاضی با قیود تعادل

نوع گسترش یافته مسائل‌های مکمل مختلط، مسأله‌های دوسطحی هستند که به آن‌ها مسائل برنامه‌ریزی ریاضی با قیود تعادل نیز گفته می‌شود. اگر مسائل سطح پایین در مسأله برنامه‌ریزی

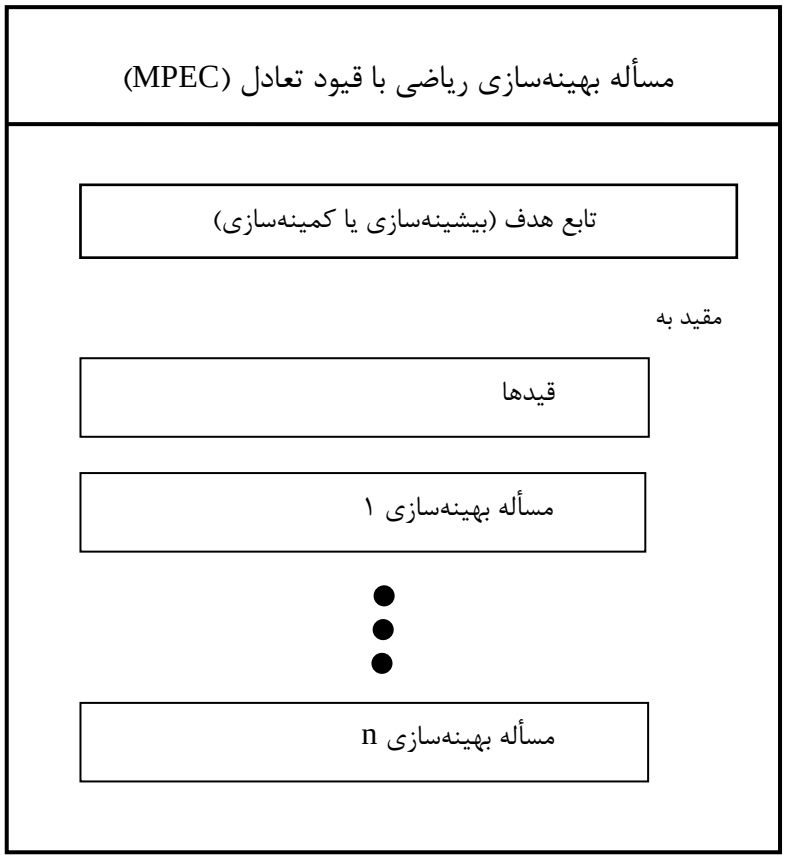
ریاضی باقیود مکمل (MPCC) از نوع مسائل بهینه‌سازی نقطه تعادل باشند به آن‌ها برنامه‌ریزی ریاضی با قیود تعادل گفته می‌شود.

فرم مسأله دوسطحی این مسائل در ادامه بیان شده است.

$$\begin{aligned} &Minimize \quad f(x,y) \\ &s.t. \\ &(x,y) \in \Omega \\ &y \in S(x) \end{aligned}$$

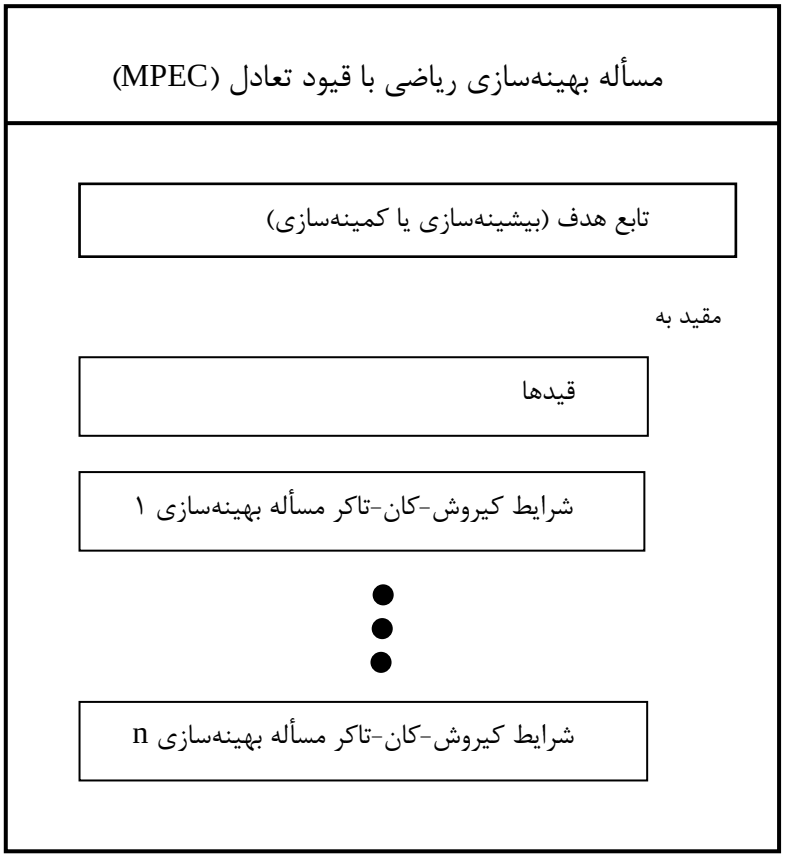
که در آن بردار x مربوط مجموعه تصمیم‌های مسأله سطح بالا برای تولیدکننده غالب و بردار y مربوط به مجموعه تصمیم‌های مسأله سطح پایین است. این مسائل در مرجع‌های [۲۵]،[۲۶] و [۲۷] استفاده شده است.حل این گونه مسائل در برخی مواقع تبدیل به سختی امکان پذیر است و نیاز به استفاده از روش‌های ابتکاری برای خطی‌سازی هستند.

یک مسأله بهینه سازی برنامه ریزی ریاضی با قیود تعادل، مسأله‌ای است شامل قیدهایی است که محدودیت‌های تعادل را بیان می‌کنند. برای مثال شرایط کیروش-کان-تاکر برای یک یا چند مسأله تعادل مرتبط در یک بازار برق یک نمونه از آن است. به عبارت دیگر مسأله برنامه ریزی ریاضی با قیود تعادل مسأله‌ای است که قیودش شامل دیگر مسأله‌های بهینه سازی مرتبط و یا مسائل مکمل باشد. شکل زیر نمای کلی یک مسأله بهینه‌سازی برنامه‌ریزی ریاضی با قیود تعادل را نشان می‌دهد.



شکل (۶-۳)- فرم کلی مسائل برنامه‌ریزی ریاضی با قیود تعادل

شکل (۶-۳) را در صورت محدب بودن مسأله‌های بهینه‌سازی ۱ تا n می‌توان با شرایط کیروش-کان-تاکر جایگزین کرد. شکل (۶-۴) این جایگزینی را نشان می‌دهد.



شکل (۶-۴)- فرم کلی مسائل برنامه‌ریزی ریاضی با قیود تعادل که مسائل سطح پایین آن با شرایط کیروش-کان-تاکر جایگزین شده‌اند.

لازم به ذکر است اگر مسأله بهینه سازی برنامه‌ریزی ریاضی با قیود تعادل شامل تنها یک مسأله بهینه سازی سطح پایین باشد به آن برنامه ریزی ریاضی با قیود مکمل[1] می‌گویند.

[1] MPCC: Mathematical Programming with Complementarity (KKT) Constraints

مراجع

[1] Mas-Colell, A., Whinston, M. D., and Green, J. R. (1995). "*Microeconomic theory*," (Vol. 1). New York: Oxford university press.

[2] Stoft, S. (2002). "Power system economics," *Journal of Energy Literature*, *8*, 94-99.

[3] B. Willems, "Market power mitigation by contracts,"TILEC, Tilburg Law and Economics Center, the Netherlands.

[4] C.J.Day and D.W.Bunn, "Divestiture of generation assets in the England and Wales electricity market: a computational approach to analyzing market power," *Regulatory Economics*, vol. 19, no. 2, pp. 123–141, 2001.

[5] L. M. Ausubel and P. Cramton, "Virtual Power Plant Auctions," *Utilities Policy*, vol. 18, pp. 201-208, 2010

[6] B. Willems, "Virtual divestitures, will they make a difference?," Working paper, CSEM, WP 150, (Leuven), 2006.

[7] B. Willems, "Physical and Financial Virtual Power Plant," Discussions Paper Series (DPS), (Leuven), 2005.

[8] Maurer, L., & Barroso, L. A. (2011). *Electricity auctions: an overview of efficient practices*. World Bank Publications.

[9] https://www.endesa-iberdrola-vpp.com/en/public

[10] http://www.edf.fr/

[11] Zhang, Y and Zwart, G. (2006), "Virtual Power Plant and Market Power", working paper

[12] Belpex (2006): Electrabel Virtual Power Plant Capacity Auctions. General Context for the VPP Auctions. Brussels, 1 January 2006.

[13] Hirschhausen, C. Von, A. Neumann, and H. Weigt (2007): Divestiture as an Instrument of a Pro-Active Competition Policy: Conceptual Issues and Lessons from International Experiences.

[14] M. Armstrong and A. Galli, A. kapoor, "French VPP: are buyers making a profit?," working paper, Nowember 2007.

[15] M. Armstrong and A. Galli, "The impact of a virtual power plant on the day-ahead market in France," *Energy Markets*, vol.3, no. 1, pp. 53-71, Spring 2010.

[16] Chao, H. P., & Wilson, R. (2004). Resource adequacy and market power mitigation via option contracts. *EPRI, Palo Alto, CA*.

[17] G. Federico and A. L. Lopez, "Optimal asset divestments with homogeneous products," *Industrial Organization*, vol. 31, pp. 12-25, 2013.

[18] B. Allaz, J.-L. Vila, Cournot competition, forward markets and efficiency, J. Econom. Theory 59 (1993) 1–16.

[19] C. Schultz, "Virtual capacity and competition," *Centre for Industrial Economics*, University of Copenhagen, 2009.

[20] Borenstein, S. and J. Bushnell. 1999. An empirical analysis of the potential for market power in California's electricity industry. Journal of Industrial Economics 47(3), September: 285–323.

[21] C. Ruiz and A.J. Conejo. Pool strategy of a producer with endogenous formation of locational marginal prices. IEEE Transactions on Power Systems, 24(4):1855-1866, 2009.

[22] Reliability Test System Task Force,"The IEEE reliability test system-1996," *IEEE Transaction on Power System.*, vol. 14, pp. 1010-1020, Aug 1999.

[23] Bunn, D. W., & Oliveira, F. S. (2007). Agent-based analysis of technological diversification and specialization in electricity markets. *European Journal of Operational Research*, *181*(3), 1265-1278.

[24] Gabriel, S. A., Conejo, A. J., Fuller, J. D., Hobbs, B. F., & Ruiz, C. (2012).*Complementarity modeling in energy markets* (Vol. 180). Springer Science & Business Media.

[25] G. Brown, M. Carlyle, J. Salmer´on, and K. Wood. Interfaces, 36(6):530-544, 2006.

[26] J. Fortuny-Amat and B. McCarl. A representation and economic interpretation of a two-level programming problem. Journal of the Operational Research Society, 32(9):783-792, 1981.

[27] S.A. Gabriel and F.U. Leuthold. Solving discretely-constrained MPEC problems with applications in electric power markets. Energy Economics, 32:3-14, 2010.

Abstract

For one decade ago, virtual divestiture has been used as a suitable alternative for physical divestiture of generation assets of dominant producers in electricity markets. Market monitoring unit concerns about potential impact of such market power mitigation policies. To this end, this paper develops an equilibrium-based simulation tool for ex-ante analysis of impact of financial virtual divestiture on market power mitigation in a day-ahead market. We consider that generation assets of a dominant producer are partly constrained by financial virtual divestiture. We model the offering problem of this dominant producer in the day-ahead market as bi-level optimization problem. In upper-level problem, the dominant producer derives optimal strategy of capacity withholding that is subject to inter-temporal constraints of its generating units and conditions stated in the virtual divestiture. In lower-level problem, market operator clears the day-ahead market on an hourly basis. We recast the bi-level optimization problem as a mathematical programming with equilibrium constraints problem and convert it to a mixed integer linear programming problem by some linearization techniques. We through a case study show how the application of this policy may control market power in the day-ahead market. The numerical results demonstrate that the dominant producer can exploit technological diversification of own generating units to exercise market power, even in the presence of virtual divestiture as a market power mitigation policy.

Keywords: virtual divestiture, equilibrium-based simulation, suitable alternative

University of Shahrood

Department of Electrical Engineering

Short Term Impact Of Financial Virtual Divestiture On Day Ahead Markets

Massoud Ameri

Supervisor

Dr. Morteza Rahimiyan

Advisor

Dr. Mohamad Amin Latifi

September 2015