

ارائه مدل دوسطحی برای برنامه‌ریزی توسعه تولید با تعیین قیمت خرید تضمینی انرژی‌های تجدیدپذیر

سیدآرش رفیعی^۱، دانشجوی دکتری؛ سعیدرضا گلدانی^۲، استادیار؛ بهنام محمدی ایواتلو^۳، دانشیار؛ حمید فلقی، دانشیار^۴

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه بیرجند - بیرجند - ایران - arash.rafeei@birjand.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه بیرجند - بیرجند - ایران - sgoldani@birjand.ac.ir

۳- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه تبریز - تبریز - ایران - bmohammadi@tabrizu.ac.ir

۴- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه بیرجند - بیرجند - ایران - falaghi@birjand.ac.ir

چکیده: در این مقاله، چارچوبی جدید برای حل مسئله برنامه‌ریزی توسعه تولید با در نظر گرفتن مشوق‌های سرمایه‌گذاری ارائه می‌شود. در مدل پیشنهادی، مشوق سرمایه‌گذاری قرارداد خرید تضمینی است. مسئله برنامه‌ریزی توسعه تولید، در قالب یک مدل دوسطحی ارائه می‌شود که سطح بالا بیشینه‌سازی سود سرمایه‌گذار واحد بادی را هدف قرار داده است و سطح پایین شامل مسئله بهینه‌سازی تسویه بازار با هدف بیشینه‌سازی رفاه اجتماعی توسط بهره‌بردار مستقل سیستم (ISO) می‌باشد. این مسئله دوسطحی با استفاده از شرایط KKT به یک مسئله یک سطحی برنامه‌ریزی ریاضی با قیود تعادل (MPEC) تبدیل می‌شود. در این مقاله قیمت قرارداد تضمینی و قیمت بازار در اثنای معادلات تسویه بازار به دست می‌آیند و با استفاده از آن‌ها و پیشنهاد استراتژیک قیمت توسط واحد بادی، در مورد سرمایه‌گذاری تصمیم‌گیری می‌شود.

واژه‌های کلیدی: برنامه‌ریزی توسعه تولید، مسئله دوسطحی، تعیین (پیش‌بینی) قیمت قرارداد، پیشنهاد استراتژیک قیمت.

A Bilevel Model for Generation Expansion Planning with Contract Pricing of Renewable Energy

S. A. Rafeei¹, PhD Student; S. Goldani², Assistant Professor; B. Mohammadi Ivatloo³, Associate Professor;
H. Falaghi⁴, Associate Professor

1- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran, Email: arash.rafeei@birjand.ac.ir

2- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran, Email: sgoldani@birjand.ac.ir

3- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran, Email: bmohammadi@tabrizu.ac.ir

4- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran, Email: falaghi@birjand.ac.ir

Abstract: In this paper, a novel framework is presented to solve generation expansion planning problem in the presence of investment incentives. In the proposed model, investment incentive is a guaranteed purchase contract. Generation expansion planning is presented as a bilevel model, where the goal of upper level is maximizing profit of wind unit investor and the low level includes the market clearing optimization problem with maximizing of social welfare powered by independent system operator (ISO). This bilevel problem is transformed into an mathematical programming with equilibrium constraints problem (MPEC) using the KKT conditions. In this paper, the guaranteed contract price and the market price are obtained in the market clearing equations, and by using them and the strategic bidding by wind unit, it is decided on investment.

Keywords: Generation expansion planning, bilevel problem, contract pricing, strategic offering.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۶/۰۹/۲۷

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۷/۰۱/۲۲ و ۱۳۹۷/۰۳/۲۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۴/۰۳

نام نویسنده مسئول: سعید رضا گلدانی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - بیرجند - کیلومتر ۵ جاده زاهدان - پردیس شوکت آباد دانشگاه بیرجند - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر.

		اندیس‌ها
x_{okt}	قیمت پیشنهادی واحد رقیب k ام در دوره t	شمارنده واحدهای تولیدی موجود
y_{dt}	قیمت پیشنهادی مصرف‌کننده d ام در دوره t	i
P_{wt}	ظرفیت احداثی واحد بادی در دوره t	k
P_{cwt}	توان قراردادی واحد بادی در دوره t	o
P_{mwt}	توان ارائه‌شده در بازار توسط واحد بادی در دوره t	d
P_{eit}	ظرفیت واحد موجود am در دوره t	t
P_{ceit}	توان قراردادی واحد موجود am در دوره t	r
P_{meit}	توان ارائه‌شده در بازار توسط واحد موجود am در دوره t	
P_{okt}	ظرفیت احداثی واحد رقیب k ام در دوره t	a_{ct}
P_{cokt}	توان قراردادی واحد رقیب k ام در دوره t	λ_{mt}
P_{mokt}	توان ارائه‌شده در بازار توسط واحد رقیب k ام در دوره t	IC_{wt}
P_{dt}	توان تأمین‌شده مصرف‌کننده d ام در دوره t	OC_{wt}
$p_d^{D,max}$	توان مورد تقاضای مصرف‌کننده d ام در دوره t	x_{wt}
ρ_o	احتمال رخداد سطح بار o	x_{eit}
		متغیرها و پارامترها
		قیمت قراردادی در دوره t
		قیمت بازار در دوره t
		هزینه سرمایه‌گذاری واحد بادی در دوره t
		هزینه جاری سالانه واحد بادی در دوره t
		قیمت پیشنهادی واحد بادی در دوره t
		قیمت پیشنهادی واحد تولیدی موجود am در دوره t

۱- مقدمه

سیستم (ISO) را می‌توان به‌عنوان یکی از بهترین مشوق‌های سرمایه‌گذاری در نظر گرفت [۵]. پرداخت بابت آمادگی ظرفیت به‌عنوان مشوق در [۶] آمده است.

در [۷] قیمت‌گذاری نقطه‌ای جهت کاهش هزینه مسئله بخش اقتصادی فرمول‌بندی شده است. مرجع [۸] از رویکرد قیمت حدی محلی برای قیمت‌گذاری واحدها با در نظر داشتن عدم قطعیت بار، استفاده کرده است. کارهای مشابهی در این زمینه توسط [۹] انجام شده است. در [۱۰] تعیین قیمت قراردادی به صورت بهینه مطالعه شده است. مرجع [۱۱] از روش فراابتکاری جهت پیش‌بینی قیمت بازار استفاده کرده است. در مدل‌سازی مسئله پیش‌بینی قیمت برق در بازار رقابتی این مرجع خصوصیات عدم قابلیت ذخیره‌سازی، کم‌کشش بودن و فصلی بودن تقاضا در نظر گرفته شده است.

روش بهینه‌سازی دوسطحی در [۱۲] برای یافتن قیمت قراردادی بهینه واحد تولید پراکنده (DG) استفاده شده است. در این منبع سود کل واحد تولیدی توسط خود واحد بیشینه می‌شود، در حالی که شرکت عمده‌فروشی به فکر کمینه‌سازی پرداختی‌هایش است. در این صورت است که یک برنامه ریاضیاتی با قیود تعادل (MPEC) به‌وجود می‌آید. در [۱۳] یک مسئله دوسطحی حل شده است که به دنبال سرمایه‌گذاری واحدهای استراتژیک است. این منبع در مسئله بالادست سود واحدهای استراتژیک را بیشینه می‌کند و در پایین‌دست به دنبال

با توجه به محدودیت منابع انرژی و مسائل زیست‌محیطی، سیاست‌های مختلفی در مسیر کاهش آلودگی محیط زیست و همچنین کاهش وابستگی به انرژی‌های فسیلی اتخاذ شده است. از جمله این سیاست‌ها می‌توان به طرح‌های حمایتی از منابع انرژی تجدیدپذیر اشاره کرد. اتحادیه اروپا در سال ۲۰۰۷ طرح ۲۰/۲۰/۲۰ را تصویب کرد که در این طرح قرار شد تا سال ۲۰۲۰ به میزان ۲۰ درصد از انرژی مصرفی توسط منابع انرژی تجدیدپذیر تأمین شود و ۲۰ درصد از انتشار آلودگی کاسته شود و همچنین ۲۰ درصد بر بازدهی انرژی افزوده گردد [۱]. باین‌حال نیاز به برنامه‌ریزی دقیق در حوزه توسعه تولید منابع تجدیدپذیر بیش‌ازپیش نمایان می‌شود.

با تغییر ساختار صنعت برق و ورود به بازار رقابتی، بازیگران این بازار با دید گزینه‌های مختلفی از سرمایه‌گذاری را در برنامه‌ریزی‌های توسعه داشته باشند تا بتوانند بهترین گزینه را که با شرایط آن‌ها سازگار است، انتخاب نمایند. امروزه یکی از گزینه‌های سرمایه‌گذاری استفاده از منابع تجدیدپذیر است که بیشتر در زمینه منابع بادی و خورشیدی می‌باشند [۴-۲]. به دلیل عدم قطعیت موجود در منابع تجدیدپذیر، وجود مشوق‌های سرمایه‌گذاری می‌تواند در زمینه جذب سرمایه‌گذار بسیار مؤثر باشد. قرارداد خرید تضمینی توان توسط بهره‌بردار مستقل

- ارائه مدل غیرخطی ریا ضیاتی برای برنامه‌ریزی توسعه تولید واحد بادی با در نظر داشتن تعیین هم‌زمان قیمت خرید تضمینی و بازار لحظه‌ای.
- مقالات مشابه، قیمت قراردادی را به صورت ورودی در نظر می‌گیرند که در این مقاله قیمت قرارداد خرید تضمینی، قیمت بازار و قیمت پیشنهاد فروش تولیدکننده بادی به صورت هم‌زمان به عنوان متغیر درونی مسئله بوده که در خروجی‌های مسئله قرار خواهند داشت.
- ارائه الگوریتم جدید برای حل مسئله برنامه‌ریزی توسعه تولید.

در ادامه، بخش دوم مقاله شامل ویژگی‌های مدل پیشنهادی خواهد بود. در بخش سوم به فرمول‌بندی ریاضیاتی مسئله پرداخته خواهد شد. در بخش چهارم مطالعات عددی مدل ارائه شده گنجانده خواهد شد و بخش پنجم شامل نتیجه‌گیری پیرامون مطالعات موجود خواهد بود.

۲- ویژگی‌های مدل

در این بخش مقاله به ویژگی‌های کلی مدل پیشنهادی پرداخته خواهد شد.

۲-۱- افق برنامه‌ریزی، بار مورد تقاضا و مشخصات باد

افق برنامه‌ریزی در این مقاله ۳۰ سال در نظر گرفته شده است که این مدت به صورت دوره‌های ۵ ساله می‌باشد. در این افق زمانی می‌توان برنامه‌ریزی را به صورت یک‌جا برای ۳۰ سال آینده انجام داد که به روش استاتیک معروف است. اما در این‌جا قصد بر این است که سال هدف، ۵ سال آینده باشد و به‌ازای هر ۵ سال، مطالعات توسعه تولید، تکرار شود. هرچه بازه زمانی مطالعات کمتر باشد، نتایج دقیق‌تر و منطقی‌تر هستند؛ زیرا هر پیش‌بینی در مورد شبکه با خطا و عدم قطعیت‌هایی همراه است.

بار مورد تقاضا برای هر سال هدف برنامه‌ریزی که با پیش‌بینی به دست می‌آید، با استفاده از منحنی بار تداومی (LDC) به صورت گام‌به‌گام در نظر گرفته می‌شود. شکل ۱ نمونه‌ای از منحنی بار را نمایش می‌دهد.

مشخصات باد نیز با پیش‌بینی و با توجه به شرایط آب‌وهوایی و داده‌های ثبت‌شده پیشین به دست می‌آید. مشخصات باد به صورت سناریوهای مختلف در مسئله گنجانده شده است.

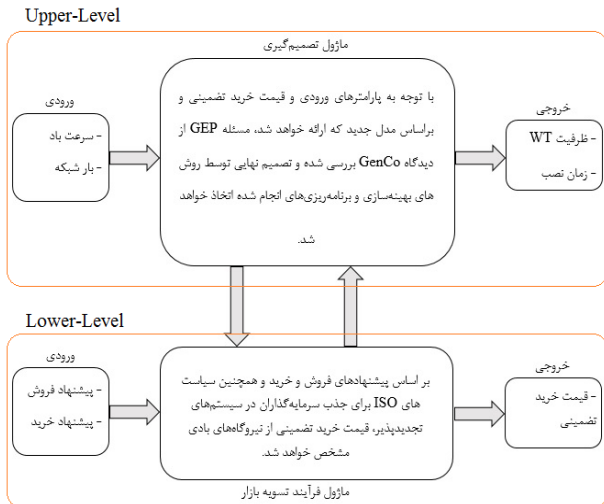
بیشینه‌سازی رفاه اجتماعی توسط ISO است و خروجی آن تعیین بهینه قیمت پیشنهادی واحدهای استراتژیک و قیمت بازار لحظه‌ای است. در تحقیق حاضر قیمت قراردادی خرید تضمینی برق به عنوان متغیر می‌باشد که در [۱۳] بازار قراردادی موجود نیست و وجه تمایز این مقاله با مرجع [۱۳] وجود بازار قراردادی خرید تضمینی می‌باشد. مرجع [۱۴] نیز در پیشنهاد قیمت به صورت استراتژیک عمل کرده و از روش یادگیری رقابتی جهت شرکت در بازار بهره برده است. فرآیند تسویه بازار در این مرجع بر اساس قیمت‌گذاری حدی محلی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج [۱۴] حاکی از آن است که تصمیم‌گیری استراتژیک در قیمت‌دهی، می‌تواند سود بیشتری را به دست آورد. مرجع [۱۵] به دنبال ایجاد تعادل میان شرکت توزیع (DisCo) و واحد تولید پراکنده است. این تحقیق نیز یک مسئله دوسطحی است که هدف بالادست افزایش سود DG بوده و پایین‌دست کمینه‌سازی هزینه پرداختی DisCo را هدف قرار داده است. در این منبع قراردادهای دوجانبه میان DGها و DisCo به صورت بهینه تعیین قیمت می‌شوند. متفاوت بودن این مقاله با [۱۵] در این است که [۱۵] صرفاً تعیین قیمت قراردادی در بازار رقابتی می‌باشد و مسئله توسعه تولید مطرح نیست.

باتوجه به مقالات مورد بررسی، می‌توان دریافت که مدل‌های ارائه شده در مراجع مذکور کامل نیستند و همه جوانب موجود در بازار را در نظر نگرفته‌اند. از نواقص موجود در مراجع بالا می‌توان به عدم استفاده از تعیین قیمت قراردادی در کنار قیمت بازار لحظه‌ای جهت حل مسئله توسعه تولید و همچنین تعیین قیمت قراردادی در بازار موجود بدون توجه به مسئله توسعه اشاره کرد. این مقاله سعی بر آن داشته تا بتواند یک مدل کامل در بحث برنامه‌ریزی توسعه تولید با رفع نواقص مطروحه را ارائه دهد.

در این مقاله، چارچوبی جدید برای حل مسئله برنامه‌ریزی توسعه تولید با در نظر گرفتن سرمایه‌گذاری در ظرفیت واحدهای بادی در یک مدل دوسطحی ارائه می‌شود. در مسئله بالادست، سود سرمایه‌گذار بادی بیشینه شده و در مسئله پایین‌دست رفاه اجتماعی بیشینه می‌شود. مشوق‌های سرمایه‌گذاری شامل قراردادهای تضمینی خرید توان است. مسئله دوسطحی با استفاده از روش برنامه‌ریزی ریاضیاتی مشتمل بر قیود تعادل که با به‌کارگیری شرایط کاروش-کان-تاکر (KKT) میسر می‌شود، به یک مسئله یک سطحی MPEC تبدیل می‌شود. باتوجه به منابع بررسی‌شده، نوآوری‌های این مقاله به صورت زیر می‌باشد:

۳- فرمول‌بندی ریاضیاتی

شکل ۲ شماتیک چارچوب پیشنهادی را نشان می‌دهد. بلوک اصلی چارچوب پیشنهادی شامل مدلی دو سطحی هست که در آن مسائل مربوط به هر یک از سطوح نشان داده شده‌است.

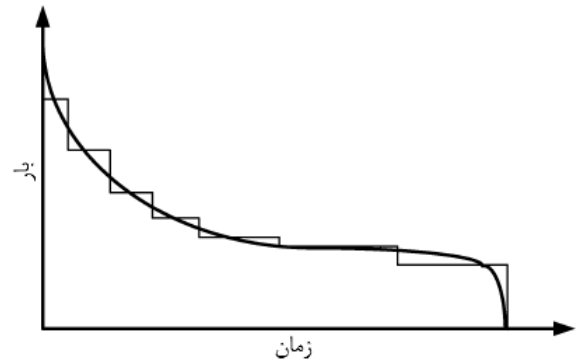


شکل ۲: چارچوب پیشنهادی مسئله دوسطحی

مسائل مرتبط با سطح بالا شامل مسئله سرمایه‌گذاری با هدف حداکثرسازی سود سرمایه‌گذار در حضور مشوق‌های سرمایه‌گذاری و همچنین محدودیت‌های حاکم در دوره برنامه‌ریزی است. سازوکارهای قرارداد تضمینی و آمادگی نیز در مسئله سطح بالا لحاظ شده‌است. مسئله سطح پایین از دیدگاه بهره‌بردار مستقل شبکه است، که در آن ارتقای رفاه اجتماعی، با مشاهده محدودیت‌های حاکم مدنظر است. ظرفیت سرمایه‌گذاری شده واحد بادی، سود مالکان واحد بادی، انرژی خریداری شده از واحد بادی، قیمت بازار و قیمت قرارداد خرید تضمینی مواردی از خروجی چارچوب است.

۳-۱- مسئله دوسطحی

تابع هدف مسئله سطح بالا طبق رابطه (۱)، سود سرمایه‌گذار بادی است و مشتمل بر چهار عبارت است. عبارت اول مربوط به درآمد فروش توان واحد بادی در قالب قرارداد تضمینی است که در آن مقداری از توان با قیمتی که به‌عنوان خروجی است، توسط بهره‌بردار شبکه خریداری می‌شود. عبارت دوم مربوط به درآمد فروش توان تولیدی در بازارهای لحظه‌ای علاوه بر بازار قراردادی است. عبارت سوم و چهارم به ترتیب، هزینه سرمایه‌گذاری اولیه توسط واحد تولیدی بادی و هزینه جاری نیروگاه بادی است.



شکل ۱: منحنی بار تداومی پیش‌بینی‌شده

۳-۲- مدل سرمایه‌گذاری دوسطحی

تصمیم‌گیری در مورد سرمایه‌گذاری و پیشنهاد استراتژیک قیمت توسط واحد تولیدی به صورت یک مدل دو سطحی توصیف می‌شود. مسئله بالادست، نشان‌دهنده تصمیم‌گیری در مورد سرمایه‌گذاری واحد تولیدی و پیشنهاد استراتژیک آن مربوط به هر سناریو است. هدف این بخش از مسئله، بهینه‌سازی سود سرمایه‌گذار قرار داده شده‌است.

این مسئله بالادست توسط مجموعه‌ای از مسائل پایین‌دست محدود شده‌است که نمایش‌گر تسویه بازار برای هر سناریو می‌باشد. هدف مسئله پایین‌دست افزایش رفاه اجتماعی که توسط بهره‌بردار مستقل سیستم برنامه‌ریزی می‌شود. قیمت حاشیه‌ای محلی (LMP) برای این‌گونه مسائل به‌عنوان متغیرهای دوگان، از قید تعادل توان به‌دست می‌آید.

ناحیه مطلوب هر یک از مسائل پایین‌دست با شرایط KKT نشان داده شده‌است. با توجه به مسئله بالادست و همچنین جایگزین کردن مسائل پایین‌دست با شرایط KKT، یک مسئله MPEC به‌وجود می‌آید. قیود تعادل، مجموعه‌ای از شرایط KKT است که تسویه بازار در هر سناریو را نشان می‌دهند.

۳-۲- عدم قطعیت در پیشنهاد قیمت و سرمایه‌گذاری رقبا

پیشنهاد قیمت فروش توسط واحدهای تولیدی رقیب از طریق سناریوها نشان داده شده‌است. این سناریوها را می‌توان براساس اطلاعات گذشته مربوط به پیشنهادات رقیب ایجاد کرد.

اقدامات سرمایه‌گذاری توسط تولیدکنندگان رقیب نیز به صورت سناریوها مدل‌سازی شده‌است. از آنجایی که گزینه‌های سرمایه‌گذاری خیلی زیاد نیست، تعداد قابل توجهی از سناریوهای جایگزین، به‌درستی نشانگر سرمایه‌گذاری رقیب در سال هدف برنامه‌ریزی است.

$$0 \leq P_{mwt} \leq (1 - A) * P_{wt} ; \mu_{wt}^{min}, \mu_{wt}^{max} \quad (۶)$$

$$0 \leq P_{ceit} \leq B * P_{eit} ; \mu_{ceit}^{min}, \mu_{ceit}^{max} \quad (۷)$$

$$0 \leq P_{ceit} + P_{meit} \leq P_{eit} ; \mu_{eit}^{min}, \mu_{eit}^{max} \quad (۸)$$

$$0 \leq P_{cokt} \leq C * P_{okt} ; \mu_{cokt}^{min}, \mu_{cokt}^{max} \quad (۹)$$

$$0 \leq P_{cokt} + P_{mokt} \leq P_{okt} ; \mu_{okt}^{min}, \mu_{okt}^{max} \quad (۱۰)$$

$$0 \leq P_d \leq P_d^{D,max} ; \mu_{dt}^{min}, \mu_{dt}^{max} \quad (۱۱)$$

قیود و محدودیت‌های مسئله علاوه بر رابطه (۲) در سطح بالا، طی روابط (۴) الی (۱۰) به صورت ذکر شده در بالا آمده است. برای حل مسائل دوسطحی همان‌طور که در بخش ۲-۲ ذکر شد، باید از شرایط KKT استفاده شود و استفاده از این شرایط مذکور دخالت مسئله دوگان را می‌طلبد. به همین منظور، دوگان‌های قیود مسئله (برای هر قید یک دوگان تعریف می‌شود) نیز در کنارشان آورده شده‌است که در ادامه به معرفی تک‌تک آن‌ها پرداخته خواهد شد. رابطه (۴) همان قید تعادل توان در بازار است که باید در هر ساعت با توجه به تسویه بازار میزان توان ارائه شده به بازار برابر با میزان توان خریداری شده از بازار باشد. دوگان قید تعادل بار در بازار با λ_t نشان داده می‌شود که همان قیمت بازار لحظه‌ای (LMP) است. رابطه (۵) حداکثر میزان مشارکت نیروگاه بادی مورد نظر در بازار قرارداد خرید تضمینی نسبت به کل ظرفیت نیروگاه را نشان می‌دهد. عبارات $\mu_{cwt}^{min}, \mu_{cwt}^{max}$ دوگان‌های حد بالا و حد پایین قید (۵) هستند. رابطه (۶) نشان‌گر حدود میزان تولید توان در نیروگاه بادی می‌باشد که نباید از مقدار ظرفیت کل بیشتر باشد. عبارات $\mu_{wt}^{min}, \mu_{wt}^{max}$ دوگان‌های حد بالا و حد پایین قید (۶) را نشان می‌دهند. قیود (۷) و (۸) به ترتیب، حداکثر میزان مشارکت نیروگاه‌های موجود در بازار قرارداد خرید تضمینی و حداکثر میزان تولید نیروگاه‌های موجود (که نباید بیشتر از ظرفیت آن‌ها باشد) را نشان می‌دهد. عبارات $\mu_{ceit}^{min}, \mu_{ceit}^{max}$ دوگان‌های حدود بالا و پایین قید (۷) و عبارات $\mu_{eit}^{min}, \mu_{eit}^{max}$ دوگان‌های حدود بالا و پایین قید (۸) می‌باشند. قیود (۹) و (۱۰) همانند روابط (۷) و (۸) هستند که در مورد نیروگاه‌ها و واحدهای تولیدی جدید می‌باشند. رابطه (۹) نشان‌گر حداکثر میزان مشارکت در بازار قرارداد خرید تضمینی واحد تولیدی جدید نسبت به کل ظرفیت آن واحد است که می‌خواهد سرمایه‌گذاری کند. دوگان‌های قید مذکور با عبارات $\mu_{cokt}^{min}, \mu_{cokt}^{max}$ نشان داده می‌شوند که مربوط به حدود بالا و پایین رابطه (۹) هستند. رابطه

رابطه (۲) حداکثر میزان سرمایه‌گذاری در هر زمان را نشان می‌دهد. این قید دارای دوگان نیست؛ زیرا مربوط به تابع هدف بالادست است و در تبدیل KKT تغییر شکل نخواهد داشت.

تابع هدف مسئله سطح پایین مطابق رابطه (۳)، بیشینه‌سازی رفاه اجتماعی است و مشتمل بر هفت جمله است. جملات اول و دوم به ترتیب، هزینه مربوط به خرید توان از واحد بادی به صورت قرارداد تضمینی و شرکت در بازار لحظه‌ای است. عبارات سوم و چهارم، هزینه‌های قراردادی و بازار لحظه‌ای پرداختی بابت خرید توان از واحدهای موجود می‌باشد. عبارات پنجم و ششم مربوط به هزینه پرداختی به واحدهای رقیب نیروگاه بادی به صورت قراردادی و بازار لحظه‌ای توسط بهره‌بردار مستقل سیستم است. جمله هفتم، دریافتی ISO از متقاضیان توان و مصرف‌کنندگان است.

$$\max: (1+r)^{-t} \left\{ -[IC_{wt} * P_{wt}] + \sum_{o \in O} \rho_o \sum_{t \in T} \{ [a_{ct} * P_{cwt}] + [\lambda_{mt} * P_{mwt}] - [OC_{wt} * (P_{cwt} + P_{mwt})] \} \right. \quad (۱)$$

$$0 \leq P_{wt} \leq P_{wt}^{max} \quad (۲)$$

$$\max: \sum_{t \in T} \left\{ -[a_{ct} * P_{cwt}] - [x_{wt} * P_{mwt}] - \sum_{i \in I} ([a_{ct} * P_{ceit}] + [x_{eit} * P_{meit}]) - \sum_{k \in K} ([a_{ct} * P_{cokt}] + [x_{okt} * P_{mokt}]) + \sum_{d \in D} [y_{dt} * P_{dt}] \right\} \quad (۳)$$

$$\sum_d P_{dt} - \left(P_{cwt} + P_{mwt} + \sum_i [P_{ceit} + P_{meit}] + \sum_k [P_{cokt} + P_{mokt}] \right) = 0 ; \lambda_t \quad (۴)$$

$$0 \leq P_{cwt} \leq A * P_{wt} ; \mu_{cwt}^{min}, \mu_{cwt}^{max} \quad (۵)$$

علاوه بر مشتقات رابطه لاگرانژین، در MPEC تمامی قیود (۳) الی (۱۱) شکل فعلی خود را حفظ می‌کنند و تمامی قیودی که مختص پایین دست هستند، دست‌خوش تغییرات KKT خواهند شد. در همه قیود مسئله به‌جز قید (۴) شرایط KKT اعمال شده است [۱۳]. با اعمال شرایط KKT هر قید در مسئله اصلی، تبدیل به دو قید در مسئله دوگان می‌شود که در روابط (۲۰) تا (۳۳) در ادامه نشان داده شده است:

$$0 \leq P_{cwt} \perp \mu_{cwt}^{min} \geq 0 \quad (20)$$

$$0 \leq A * P_{wt} - P_{cwt} \perp \mu_{cwt}^{max} \geq 0 \quad (21)$$

$$0 \leq P_{cwt} + P_{mwt} \perp \mu_{wt}^{min} \geq 0 \quad (22)$$

$$0 \leq P_{wt} - (P_{cwt} + P_{mwt}) \perp \mu_{wt}^{max} \geq 0 \quad (23)$$

$$0 \leq P_{ceit} \perp \mu_{ceit}^{min} \geq 0 \quad (24)$$

$$0 \leq B * P_{eit} - P_{ceit} \perp \mu_{ceit}^{max} \geq 0 \quad (25)$$

$$0 \leq P_{ceit} + P_{meit} \perp \mu_{eit}^{min} \geq 0 \quad (26)$$

$$0 \leq P_{eit} - (P_{ceit} + P_{meit}) \perp \mu_{eit}^{max} \geq 0 \quad (27)$$

$$0 \leq P_{cokt} \perp \mu_{cokt}^{min} \geq 0 \quad (28)$$

$$0 \leq C * P_{okt} - P_{cokt} \perp \mu_{cokt}^{max} \geq 0 \quad (29)$$

$$0 \leq P_{cokt} + P_{mokt} \perp \mu_{okt}^{min} \geq 0 \quad (30)$$

$$0 \leq P_{okt} - (P_{cokt} + P_{mokt}) \perp \mu_{okt}^{max} \geq 0 \quad (31)$$

$$0 \leq P_d \perp \mu_{dt}^{min} \geq 0 \quad (32)$$

$$0 \leq P_d^{D,max} - P_d \perp \mu_{dt}^{max} \geq 0 \quad (33)$$

مسئله MPEC نهایی به‌دست‌آمده در این مقاله شامل ۳۱ رابطه به‌صورت مجموعه روابط (۱)، (۲) و (۴) الی (۱۱) و (۱۳) الی (۳۳) می‌باشد.

۴- مطالعات عددی

در این بخش کارایی چارچوب پیشنهادی در یک شبکه تک شینه بررسی می‌شود.

(۱۰) حداکثر میزان توان ارائه شده توسط واحد تولیدی جدید را نشان می‌دهد که نباید بیش از ظرفیت کل واحد باشد. عبارت μ_{okt}^{max} دوگان حد بالا و عبارت μ_{okt}^{min} دوگان حد پایین قید (۱۰) را نمایش می‌دهد. رابطه (۱۱) قید بار مورد تقاضا است که در عملیات تسویه بازار تأمین می‌شود. مقدار حداکثر موجود در رابطه مذکور همان کل بار مورد تقاضا است. عبارات μ_{dt}^{min} ، μ_{dt}^{max} دوگان‌های حدود بالا و پایین قید (۱۱) هستند.

۳-۲- تبدیل مسئله دوسطحی به MPEC

مسئله دوسطحی موجود که توسط روابط (۱) الی (۱۱) ارائه شد را می‌توان با اعمال شرایط KKT به مسئله پایین دست، به صورت یک مسئله یک سطحی ریاضیاتی با قیود تعادل یا MPEC درآورد. در این تبدیل باید در نظر داشت که تابع هدف مسئله MPEC همان تابع هدف سطح بالا است.

تابع هدف سطح پایین مسئله اصلی به‌علاوه مجموع حاصل ضرب قیود در دوگان خود، تشکیل رابطه لاگرانژین را می‌دهند که به‌صورت رابطه (۱۲) در زیر آمده است [۱۳].

$$\mathcal{L} = (\text{Lower_Level Problem}) + \sum \lambda * h \quad (12) \\ + \sum \mu * g$$

مشتقات رابطه لاگرانژین نسبت به متغیرهای مسئله پایین دست به‌عنوان بخشی از تغییرات شرایط KKT می‌باشد که در روابط (۱۳) الی (۱۹) نشان داده شده است.

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial P_{cwt}} = a_{ct} - \lambda_t - \mu_{cwt}^{min} + \mu_{cwt}^{max} - \mu_{wt}^{min} + \quad (13)$$

$$\mu_{wt}^{max} = 0$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial P_{mwt}} = x_{wt} - \lambda_t - \mu_{wt}^{min} + \mu_{wt}^{max} = 0 \quad (14)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial P_{ceit}} = a_{ct} - \lambda_t - \mu_{ceit}^{min} + \mu_{ceit}^{max} - \mu_{eit}^{min} + \quad (15)$$

$$\mu_{eit}^{max} = 0$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial P_{meit}} = x_{eit} - \lambda_t - \mu_{eit}^{min} + \mu_{eit}^{max} = 0 \quad (16)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial P_{cokt}} = a_{ct} - \lambda_t - \mu_{cokt}^{min} + \mu_{cokt}^{max} - \mu_{okt}^{min} + \quad (17)$$

$$\mu_{okt}^{max} = 0$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial P_{mokt}} = x_{okt} - \mu_{okt}^{min} + \mu_{okt}^{max} = 0 \quad (18)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial P_d} = -y_{dt} + \lambda_t - \mu_{dt}^{min} + \mu_{dt}^{max} = 0 \quad (19)$$

۴-۱- مورد مطالعاتی

در این مقاله از مدل سطح یک برای برنامه‌ریزی استفاده شده است و معادلات پخش بار در نظر گرفته نشده است. اطلاعات بار طبق جدول ۱ می‌باشد که دارای هفت پله است و به‌ازای هر پله قیمت پیشنهادی متفاوتی از سمت متقاضیان در ستون سوم ارائه شده است. مدت زمان استقرار هر مقدار بار (هر پله) در شبکه به صورت نسبت به کل زمان (درصد) در ستون دوم جدول نشان داده شده است [۱۳]. جدول ۲ اطلاعات واحدهای تولیدی موجود در شبکه را در بر دارد که شامل نوع، ظرفیت و هزینه حدی این واحدهای تولیدی است [۱۳]. اطلاعات واحدهای تولیدی جدید برای سرمایه‌گذاری در برنامه‌ریزی توسعه تولید در جدول ۳ آورده شده است که این جدول هم مشابه جدول ۲ دارای سه ستون نوع، ظرفیت و هزینه حدی می‌باشد [۱۳]. جدول ۴ سناریوهای مختلف برای حل این مسئله را مشخص می‌کند. مشخصات باد در این مقاله به صورت تصادفی و هم‌بسته با تقاضا خوشه‌بندی شده است. اطلاعات مربوط به باد در جدول ۵ آمده است و احتمال رخداد هر سطح باد را نشان داده است [۱۳]. در این مقاله از نمودار شکل ۳ برای تبدیل سرعت باد به توان خروجی توربین بادی استفاده شده است که طبق مشخصات خود توربین بادی است [۱۶]. باتوجه به این که در مطالعات قبلی اثبات شده است توزیع وی‌بال می‌تواند رفتار سرعت باد را دقیق‌تر مدل‌سازی نماید [۱۷ و ۱۸]. به همین جهت در این مقاله، سرعت باد به صورت تابع وی‌بال مدل شده است.

جدول ۲: اطلاعات واحدهای تولیدی موجود

نوع	ظرفیت (MW)	هزینه حدی (€/MW)
آبی	۵۰	۰
ذغال سنگ ۱	۷۶	۱۱.۷۱
ذغال سنگ ۲	۱۵۵	۱۰.۰۸
ذغال سنگ ۳	۳۵۰	۱۹.۷۶
سوخت فسیلی ۱	۱۲	۲۳.۶۰
سوخت فسیلی ۱	۲۰	۱۱.۲۵
سوخت فسیلی ۱	۱۰۰	۱۹.۳۱
سوخت فسیلی ۱	۱۹۷	۱۰.۳۷
هسته‌ای	۴۰۰	۵.۳۵

جدول ۳ اطلاعات واحدهای جدید سرمایه‌گذاری

نوع	ظرفیت (MW)	هزینه حدی (€/MW)
پایه	۱۰۰۰ و ۷۵۰ و ۵۰۰ و ۰	۶.۱۶
پیک	۳۰۰ و ۲۵۰ و ۲۰۰ و ۰ و ۱۰۰۰ و ۳۵۰	۱۴.۹۶

جدول ۴: سناریوهای شبیه‌سازی شده

شماره سناریو	شرکت در بازار تجدید ساختار	قرارداد خرید تضمینی	پیشنهاد استراتژیک قیمت
۱	-	-	-
۲	✓	-	-
۳	✓	✓	-
۴	✓	✓	✓

جدول ۵: اطلاعات باد

سرعت باد (m/s)	احتمال رخداد (%)
۰	۲۳
۲	۱۹
۳.۷	۱۴
۵.۱	۸
۷.۳	۱۴
۹.۸	۱۲
۱۴.۲	۱۰

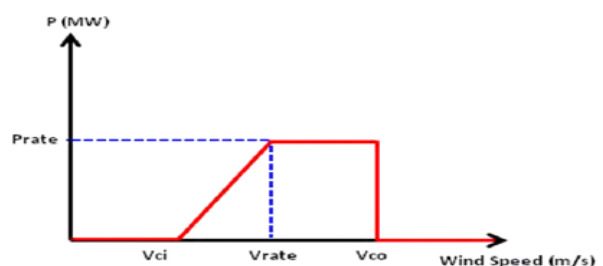
مدل پیشنهادی با استفاده از نرم‌افزار GAMS حل شده است.

۴-۲- تحلیل نتایج شبیه‌سازی

جهت صحت‌سنجی نتایج، مدل پیشنهادی ابتدا براساس یکی از سناریوهای موجود در مرجع [۱۳] پیاده‌سازی شده است که به

جدول ۱: اطلاعات بار

مقدار بار (MWh)	نسبت استقرار (%)	قیمت پیشنهادی (€/MWh)
۱۲۵۰	۵	۳۸.۳۶
۱۰۵۰	۸	۳۳.۳۵
۸۸۷.۵	۸	۳۰.۳۵
۷۶۲.۵	۱۲	۲۷.۸
۶۰۰	۱۸	۲۵.۴۳
۵۱۲.۵	۲۷	۲۳.۲۶
۴۲۵	۲۲	۲۲.۵۳



شکل ۳: رابطه سرعت باد و توان خروجی واحد بادی

جدول ۶: خروجی‌های شبیه‌سازی

سناریو ۴	سناریو ۳	سناریو ۲	سناریو ۱	
-	-	-	-	دوره ۱ (MW)
۱۰۰	۱۰۰	-	-	دوره ۲ (MW)
۱۵۰	۱۰۰	۵۰	-	دوره ۳ (MW)
۱۰۰	-	-	-	دوره ۴ (MW)
۱۰۰	۱۵۰	-	-	دوره ۵ (MW)
۱۵۰	۱۰۰	۷۰	-	دوره ۶ (MW)
۶۰۰	۴۵۰	۱۲۰	-	توان کل (MW)
۴۷۳	۲۹۷	۸۳	-	سرمایه کل (M€)
۶۸۵	۵۰۷	۱۳۰	-	سود کل (M€)

جدول ۷: قیمت بازار و قرارداد تضمینی

قیمت قرارداد	قیمت بازار	
۳۶،۱۲	۳۳،۷۶	دوره ۱ (€)
۳۸،۰۶	۳۴،۶۲	دوره ۲ (€)
۳۶،۲۸	۳۲،۸۱	دوره ۳ (€)
۳۵،۴۱	۳۲،۳۴	دوره ۴ (€)
۳۵،۶۸	۳۲،۷۰	دوره ۵ (€)
۳۵،۱۸	۳۲،۰۸	دوره ۶ (€)

۴-۲-۱- تأثیر تغییرات نرخ رشد بار

میزان تقاضا، عاملی تأثیرگذار بر استراتژی توسعه واحدهای تولیدی است. در این تحقیق نرخ رشد بار ۰.۲٪، ۰.۴٪ و ۰.۷٪ در نظر گرفته شده‌است تا تأثیرات آن بر نتایج بررسی شود. جدول ۸ نشان‌دهنده این تأثیرات می‌باشد.

۴-۲-۲- تأثیر تغییرات ضریب مشارکت در بازار قراردادی

در هر بازاری خرید و فروش به‌صورت تضمینی، منطقی به نظر می‌رسد. هرچه میزان قرارداد تضمینی بیشتر باشد، سرمایه‌گذاران بیشتری در بازار شرکت خواهند کرد. ارائه تغییرات در میزان مشارکت واحد بادی در بازار قرارداد تضمینی و مشاهده نتایج، مهر تأییدی بر جمله مذکور است. نتایج این تغییرات در جدول ۹ قابل مشاهده است.

جدول ۸: تأثیر تغییرات نرخ رشد بار

میزان ظرفیت سرمایه‌گذاری (MW)	نرخ رشد بار (%)
۶۰۰	۲
۶۷۰	۴
۷۲۰	۷

نتایج مشابهی دست یافته است. در ادامه نتایج مربوط به هر سناریو بررسی شده‌است.

سناریوی شماره ۱: در این سناریو، سیستم بازار به صورت

انحصاری در نظر گرفته شده است. طبق نتایج به دست آمده هیچ ظرفیتی از توربین بادی نمی‌تواند در شبکه نصب شود؛ زیرا هزینه سرمایه‌گذاری هر مگاوات توربین بادی ۱ M€ در نظر گرفته شده‌است که در مقایسه با هزینه سرمایه‌گذاری سایر تکنولوژی‌ها، رقم بسیار بزرگی است. در بازارهای انحصاری برق صرفاً کاهش هزینه مدنظر می‌باشد.

سناریوی شماره ۲: در این سناریو، شرکت در بازار برق

برای توربین بادی امکان‌پذیر است و واحد تولیدی بادی می‌تواند با شرکت در بازار سود خود را بیشینه نماید. طبق نتایج به دست آمده در دوره‌های سوم و پنجم به ترتیب در ظرفیت‌های ۵۰ و ۷۰ مگاوات موفق به سرمایه‌گذاری شده‌است. مطابق جدول ۶ با سرمایه‌گذاری حدود ۸۳ M€ سودی بالغ بر ۱۳۰ M€ می‌تواند در بازه ۳۰ ساله به دست آورد.

سناریوی شماره ۳: با افزودن مشوق‌های سرمایه‌گذاری

مانند قرارداد خرید تضمینی به بازار، سرمایه‌گذاری‌های زیادی از جانب واحدهای بادی انجام گیرد. با توجه به نتایج به دست آمده که در جدول ۶ ارائه شده‌است، واحد تولیدی بادی حدود ۴۵۰ MW سرمایه‌گذاری انجام داده که سود ۵۰۷ M€ را در پی داشته است. هزینه سرمایه اولیه واحد بادی در این سناریو حدود ۲۹۷ M€ بوده است. افزوده شدن قرارداد خرید تضمینی به عنوان مشوق سرمایه‌گذاری می‌تواند سرمایه‌گذاران بسیاری را جذب نماید.

سناریوی شماره ۴: در سناریوهای قبلی، قیمت پیشنهادی

فروش از سوی واحد تولیدی بادی به عنوان ورودی مسئله ارائه می‌شد. اما در این سناریو علاوه بر قیمت بازار و قیمت قرارداد خرید تضمینی، قیمت پیشنهادی فروش توان واحد بادی نیز به عنوان متغیر در مسئله قرار داده شده‌است. طبق نتایج موجود در جدول ۶ پیشنهاد استراتژیک قیمت، می‌تواند سود بیشتری را نیز دربر داشته باشد. قیمت بازار و قیمت قرارداد خرید تضمینی در جدول ۷ ارائه شده‌است.

جدول ۶ با نرخ رشد بار سالانه ۰.۲٪ و ضریب شرکت در بازار

قرارداد خرید تضمینی ۵۰٪ به دست آمده است. در ادامه به تأثیرات این دو عامل در نتایج مسئله پرداخته شده‌است.

جدول ۹: تأثیر تغییرات میزان مشارکت در بازار قراردادی

میزان مشارکت (%)	میزان ظرفیت سرمایه‌گذاری (MW)
۵۰	۶۰۰
۶۵	۷۰۰
۸۰	۷۷۰

- مشارکت کامل در بازار برق سود سرمایه‌گذار را کاهش می‌دهد. از طرفی فروش کامل ظرفیت به صورت قراردادی، قیمت بازار را تحت تأثیر قرار داده و پرداختی‌های بهره‌بردار و متقاضی را افزایش می‌دهد.
- افزایش نرخ رشد بار، موجب توسعه ظرفیت واحدهای تولیدی را به همراه خواهد داشت.

افزودن ذخیره‌ساز علاوه بر واحدهای بادی به مسئله دوسطحی ارائه شده در این مقاله و همچنین بررسی مسئله در سطح HL2 از برنامه‌های آینده تحقیق در این زمینه می‌باشد.

مراجع

- [1] L. Stankeviciute, P. Criqui, "Energy and climate policies to 2020: the impacts of the European "20/20/20" approach," International journal of energy sector management, vol. 2, no. 2, pp. 252-273, 2008.
- [2] M. Aien, M. Fotuhi-Firuzabad, M. Rashidinejad, "Probabilistic optimal power flow in correlated hybrid wind-photovoltaic power systems," IEEE transactions on smart grid, Vol. 5, no. 1, pp. 130-138, 2014.
- [3] E. Hajipour, M. Bozorg, M. Fotuhi-Firuzabad, "Stochastic capacity expansion planning of remote microgrids with wind farms and energy storage," IEEE transactions on sustainable energy, Vol. 6, no. 2, 2015.
- [4] Y. Cao, Y. Zhang, H. Zhang, X. Shi, V. Terzija, "Probabilistic optimal PV capacity planning for wind farm expansion based on NASA data," IEEE transactions on sustainable energy, Vol. 8, no. 3, 2017.
- [5] S. Shenoy, D. Gorinevsky, "Data-driven stochastic pricing and application to electricity market," IEEE journal of selected topics in signal processing, Vol. 10, no. 6, pp. 1029-1039, 2016.
- [6] A. Galetovic, C. M. Muñoz, and F. A. Wolak, "Capacity payments in a cost-based wholesale electricity market: the case of Chile," The Electricity journal, vol. 28, no. 10, pp. 80-96, 2013.
- [7] P. M. Sotkiewicz, J. M. Vignolo, "Nodal pricing for distribution networks: efficient pricing for efficiency enhancing DG," IEEE transactions on power systems, vol. 21, no. 2, pp. 1013-1014, 2006.
- [8] K. Shaloudegi, N. Madinehi, S. H. Hosseini, H. A. Abyaneh, "A novel policy for locational marginal price calculation in distribution systems based on loss reduction allocation using game theory," IEEE transactions on power systems, vol. 27, no. 2, pp. 811-820, 2012.
- [9] R. K. Singh, S. K. Goswami, "Optimum allocation of distributed generations based on nodal pricing for profit, loss reduction, and voltage improvement including voltage rise issue," International journal of electrical power & energy systems, vol. 32, no. 6, pp. 637-644, 2010.
- [10] M. J. Rider, J. M. Lopez-Lezama, J. Contreras, A. Padilha-Feltrin, "Bilevel approach for optimal location and contract pricing of distributed generation in radial distribution systems using mixed-integer linear programming," IET generation, transmission and distribution, vol. 7, no. 7, pp. 724-734, 2013.

[۱۱] ح. شایقی و ع. قاسمی، «پیش‌بینی قیمت روزانه برق با شبکه عصبی بهبود یافته مبتنی بر تبدیل موجک و روش آشوبناک

۲-۳-۴- تأثیر تغییرات هزینه حدی واحدهای جدید

افزایش هزینه‌های حدی واحدهای تولیدی باعث افزایش قیمت تمام شده انرژی می‌باشد و کاهش آن موجب کاهش قیمت انرژی خواهد بود. به همین دلیل با افزایش هزینه حدی، استفاده از این واحدها برای سرمایه‌گذاری کم شده و جهت تأمین نیازهای شبکه واحدهای بادی بیشتری وارد شبکه می‌شوند و با کاهش هزینه‌های حدی واحدهای تولیدی جدید، تقاضا برای استفاده از این واحدها برای سرمایه‌گذاری در شبکه افزایش و از واحدهای بادی کمتری استفاده می‌شود. جدول ۱۰ مؤید این موضوع است.

جدول ۱۰: تأثیر تغییرات هزینه حدی واحدهای جدید

میزان ظرفیت سرمایه‌گذاری (MW)	تغییر هزینه حدی نسبت به جدول ۳
۵۰۰	٪۷۰
۵۳۰	٪۸۰
۵۵۵	٪۹۰
۶۰۰	٪۱۰۰
۶۲۰	٪۱۱۰
۶۵۰	٪۱۲۰
۶۸۵	٪۱۳۰

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله چارچوبی جدید برای حل مسئله برنامه‌ریزی توسعه تولید در حضور مشوق‌های سرمایه‌گذاری ارائه شده است. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داده‌اند که:

- قرارداد خرید تضمینی و میزان مشارکت در بازار قراردادی در رفتار سرمایه‌گذاران واحدهای بادی اثرگذار شناخته شده‌اند. مشوق قرارداد تضمینی منجر به افزایش میل به سرمایه‌گذاری در واحدهای بادی و همچنین افزایش سود می‌شوند.
- پیشنهاد استراتژیک قیمت فروش توسط واحد تولیدی (که در اثنای تسویه بازار قیمت پیشنهادی تعیین می‌شود)، باعث افزایش سرمایه‌گذاری و همچنین سود واحد تولیدی بادی می‌شود.

- pricing of independent dispatchable DG units in distribution networks,” International transaction on electrical energy systems, vol. 28, no. 8, pp. 1685-1704, 2016.
- [۱۶] م. نوجوان گل‌تپه، ه. سیدی و ب. محمدی ایواتلو، «ارزیابی راهکارهای پیشگیری از ناپایداری ولتاژ با در نظر گرفتن تلفات، عدم قطعیت توربین‌های بادی همبسته به هم و تغییرات بار»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۷، شماره ۱، صفحه ۳۰۵-۳۱۸، بهار ۱۳۹۶.
- [17] A. Dolatabadi, B. Mohammadi-ivatloo, M. Abapour, and S. Tohidi. “Optimal stochastic design of wind integrated energy hub.” IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 13, no. 5, pp. 2379-2388, 2017.
- [18] A. Dolatabadi and B. Mohammadi-ivatloo, “Stochastic risk-constrained scheduling of smart energy hub in the presence of wind power and demand response,” Applied Thermal Engineering, vol. 123, pp. 40-49, 2017.
- جستجوی گرانشی»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۵، شماره ۴، صفحه ۱۰۵-۱۱۵، زمستان ۱۳۹۴.
- [12] J. M. Lopez-Lezama, A. Padilha-Feltrin, J. Contreras, J. I. Munoz, “Optimal contract pricing of distributed generation in distribution networks,” IEEE transactions on power systems, vol. 26, no. 1, pp. 128-136, 2011.
- [13] S. J. Kazempour, A. J. Conejo, C. Ruiz, “Strategic generation investment using a complementarity approach,” IEEE transactions on power systems, vol. 26, no. 2, pp. 940-948, 2011.
- [۱۴] م. رمضان‌یان لنگرودی، س. م. میرحسینی مقدم و ب. علیزاده، «استفاده از روش یادگیری رقابتی برای قیمت‌دهی ایتراژیک شرکت‌های تولید بر اساس LMP در بازار برق»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۷، شماره ۲، صفحه ۵۳۸-۵۴۹، تابستان ۱۳۹۴.
- [15] A. Sadeghi Mobarakeh, A. Rajabi-Ghahnavieh, H. Haghghat, “A bi-level approach for optimal contract