

مطالعه تأثیر قراردادهای تضمینی خرید برق در توسعه تولیدات پراکنده در پستهای فوق توزیع و توسعه پستهای انتقال (مطالعه موردی: شبکه فوق توزیع غرب استان مازندران)

فرشیدمیثاقی^۱، دانشجوی کارشناسی ارشد، تقی بارفروشی^۱، استادیار، میثم جعفری^۱، استادیار
۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه صنعتی بابل - بابل - ایران
m.jafari@nit.ac.ir - barforoshi@nit.ac.ir - farshid.misaghi149@gmail.com

چکیده - در این مقاله، چارچوبی جدید برای مطالعه‌ی اثربخشی مکانیزم توسعه مولدهای مقیاس کوچک در رفتار سرمایه‌گذاری تولیدات پراکنده با امکان ارتقای ظرفیت پستهای انتقال در سیستم‌های فوق توزیع ارائه می‌شود. مشوق‌های سرمایه‌گذاری مورد مطالعه قراردادهای تضمینی خرید برق و پرداخت‌های ظرفیت را شامل می‌شود. برنامه‌ریزی در قالب مدل دوسطحی ارائه می‌شود. سطح اول شامل بهینه‌سازی تصمیمات سرمایه‌گذار با هدف کسب سود حداکثر و سطح دوم شامل مسئله بهینه‌سازی تسویه بازار و تصمیم‌گیری در مورد توسعه پست انتقال می‌باشد. با حضور متغیر باینری در مسئله سطح پایین و عدم محدب آن، امکان تبدیل مسئله دوسطحی به مسئله برنامه‌ریزی ریاضی با قیود تعادل (MPEC) و همچنین محاسبه قیمت‌های حاشیه‌ای مکانی (LMP) با روشهای ریاضی غیر ممکن می‌باشد. لذا از روشی نوین که ترکیبی از روش بهینه‌سازی ریاضی به همراه الگوریتم یکایک شماری می‌باشد استفاده شده است. این روش، تمامی حالات توسعه پستهای انتقال بصورت یکایک شماری در نظر گرفته شده و برای هر یک از ترکیبها، یک مسئله برنامه‌ریزی خطی صحیح آمیخته (MILP) حل می‌شود که گزینه متناظر با حداقل پرداختی، بعنوان جواب بهینه توسعه انتخاب می‌شود. کارآیی چارچوب پیشنهادی بر روی شبکه فوق توزیع غرب استان مازندران و با استفاده از اطلاعات مبتنی بر دستورالعمل توسعه مولدهای مقیاس کوچک وزارت نیرو و انجام شبیه‌سازی‌ها و تحلیل‌های لازم، مطالعه می‌شود.

کلید واژه: برنامه‌ریزی ریاضی با قیود تعادل (MPEC)، برنامه‌ریزی خطی صحیح آمیخته (MILP)، پرداخت ظرفیت (CPR)، تولید پراکنده (DG)، قرارداد تضمینی، یکایک شماری.

۱- مقدمه

تعداد، ظرفیت و مکان آنها از فاکتورهای موثر بر استراتژی‌های توسعه در برنامه‌ریزی به شمار می‌روند. در غیاب DGها، سیستم‌های سنتی برای پاسخگویی به رشد بار در افق برنامه‌ریزی بلندمدت نیاز به ارتقاء شبکه از طریق توسعه پست‌های موجود با نصب ترانس و احداث پست‌های جدید دارند [۳-۴]. لحاظ نمودن همزمان گزینه‌های ارتقاء پست و مشارکت DGها می‌تواند استراتژی مناسب‌تری جهت برنامه‌ریزی توسعه شبکه باشد [۵]. سرمایه‌گذاری در توسعه ظرفیت DGها از جمله سرمایه‌گذاری‌های برگشت‌ناپذیر به شمار می‌آید که به علت خطا در پیش‌بینی، ممکن است هزینه قابل توجهی را در بلندمدت به سرمایه‌گذار تحمیل کند. برای سرمایه‌گذاری در چنین محیطی باید اطمینان از بازگشت سرمایه در بلندمدت وجود داشته‌باشد [۶]. بسیاری از کشورها در این راستا مکانیزم‌هایی را برای تشویق و کنترل سرمایه‌گذاری در بخش تولید طراحی نموده‌اند [۷]. در [۸] بهره‌برداری بازار برق شیلی در حضور پرداخت بابت آمادگی ظرفیت بررسی شده است.

صنعت برق در چند دهه اخیر با تغییرات زیادی در زمینه‌های ساختاری، بازار و مدیریتی مواجه بوده است. یکی از این تغییرات ورود به محیط رقابتی جدید توسط سرمایه‌گذاران بخش خصوصی است. در این محیط شرکت‌های برق باید گزینه‌های مختلفی از سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری را در برنامه‌ریزی‌های بلندمدت و کوتاه‌مدت انتخاب نمایند. امروزه در محیط رقابتی بازار، استفاده از منابع تولید پراکنده (DG^a) به عنوان یکی از گزینه‌های سرمایه‌گذاری در مساله برنامه‌ریزی توسعه، افزایش یافته است. همچنین میتوان پستهای فوق توزیع را مکان مناسبی برای نصب منابع DG نام برد. دلیل اول آن است که پستهای فوق توزیع پل ارتباطی بین شبکه انتقال و توزیع بوده و محل تزریق انرژی به شبکه توزیع است و دلیل دوم حضور اپراتور و سیستم‌های SCADA در این پستها می‌باشد [۱-۲]. برنامه‌ریزی سیستم فوق توزیع با حضور انواع مختلف منابع DG از چالش‌های پیش روی شرکت‌ها است. نوع تکنولوژی،

دستورالعمل توسعه مولدهای مقیاس کوچک وزارت نیرو نشان می‌دهد. در بلوک اصلی چارچوب پیشنهادی شامل یک مدل دوسطحی هست که در آن مسائل مربوط به هر یک از سطوح نشان داده شده‌است. مسائل مرتبط با سطح بالا شامل مسئله سرمایه‌گذاری باهدف کسب سود حداکثر سرمایه‌گذار در حضور مشوقهای سرمایه‌گذاری و همچنین محدودیت‌های حاکم در دوره برنامه‌ریزی است. سازوکارهای قرارداد تضمینی و آمادگی نیز در مسئله سطح بالا لحاظ شده است. مسئله سطح پایین با ناحیه جواب نامحذب ناشی از حضور متغیر باینری در آن، مربوط به تسویه بازار و تعیین استراتژی بهینه توسعه DG و یا پستهای انتقال با هدف حداقل نمودن کل هزینه‌های بهره‌برداری و توسعه پستهای انتقال و محدودیت‌های واحدهای تولید، تعادل توان در هر شین (معادلات پخش تقاضا DC) و توان عبوری از خطوط فوق توزیع هست. خروجیهای چارچوب عبارتند از: مکان و ظرفیت سرمایه‌گذاری شده DG، انرژی خریداری شده از DG در قالب قرارداد تضمینی، انرژی خریداری شده از پستهای انتقال بالادست و برنامه توسعه آنها، میزان سود مالکان DG و پرداختی بهره‌بردار.

۱-۲- فرمول بندی مسأله ریاضی دو سطحی

روابط (۱) تا (۱۳) مدل ریاضی مسئله بهینه‌سازی دو سطحی را در یک دوره زمانی معین نشان می‌دهد. معرفی متغیرهای موجود در این مدل ریاضی در جدول (۴) در بخش ضمیمه آمده است. تابع هدف (۱) سود سرمایه‌گذار، مشتمل بر سه بخش است. بخش اول مربوط به درآمد فروش توان DG در قالب قرارداد تضمینی می باشد که با قیمتی معین خریداری می‌شود. بخش دوم مربوط به درآمد حاصل از پرداخت ظرفیت به تولیدات پراکنده در قالب قرارداد تضمینی است. شایان ذکر است در صورت عدم نیاز شبکه به تولید توان پرداخت ظرفیت مشروط بر آماده بودن واحد برای تولید، پرداخت می‌گردد. با توجه به مقررات فروش تضمینی توان DGها مندرج در دستورالعمل مولدهای مقیاس کوچک وزارت نیرو، پرداخت ظرفیت بر اساس نرخ پرداخت ظرفیت (CPR) که ۸۳/۳۳ درصد قیمت قرارداد است، انجام می‌شود و همچنین پرداخت هزینه بهره برداری توان تولیدی DG در قرارداد تضمینی، بر عهده بهره بردار شبکه است. بخش سوم هزینه سرمایه‌گذاری DGها می‌باشد. رابطه (۲) و (۳) به این معنی است که بین گزینه‌های مختلف سرمایه‌گذاری فقط یک مورد جهت سرمایه‌گذاری در هر شین انتخاب شود. محدودیت مالی شرکت سرمایه‌گذار DG در قید (۴) لحاظ شده است. قید (۵) مربوط به حداکثر میزان تقاضا در هر شین و قید (۶) نیز ضریب نفوذ (PF) تولیدات پراکنده در شبکه لحاظ شده است. حداقل سازی هزینه بهره‌برداری و توسعه ظرفیت

برای برنامه‌ریزی توسعه DGها و مطالعه تاثیر طرح‌های مختلف بازار در سرمایه‌گذاری، انتخاب مدل مناسب بسیار حائز اهمیت می‌باشد. در [۹] مدلی دو سطحی به منظور برنامه‌ریزی توسعه ظرفیت DG با مدل سازی کارنو^b در غیاب تاثیر شبکه انتقال ارائه میشود. در [۱۰]، مسئله مدیریت انرژی و استفاده بهینه از منابع DG، در قالب یک مسئله غیرخطی آمیخته با اعداد صحیح تعریف شده است. در [۱۱] یک مدل دوسطحی ارائه شده، تا خط مشی پیشنهاد مالک خصوصی درمورد حجم قرارداد و قیمت توان تولیدی DGها را تعیین کند. در این مدل، سطح بالا از دیدگاه مالک و مسئله سطح پایین برای تسویه بازار از پخش بار DC استفاده می‌شود. مرجع [۱۲] از روش تجزیه بندر^c برای حل مسئله دو سطحی مدل پیشنهادی استفاده کرده که در مسأله سطح بالا، سود مالک DG حداکثر شده و در مسأله سطح پایین تسویه بازار انجام شده است.

در این مقاله، چارچوبی برای حل مسئله برنامه‌ریزی توسعه سیستم‌های فوق توزیع با در نظر گرفتن سرمایه‌گذاری در ظرفیت منابع DG در حضور بهره‌بردار مستقل سیستم با امکان توسعه منابع بالادست (ظرفیت پستهای انتقال) در یک مدل دوسطحی ارائه می‌شود. مشوق‌های سرمایه‌گذاری مورد مطالعه قراردادهای تضمینی خرید برق و پرداخت‌های ظرفیت را شامل می‌شود. مسئله بهینه‌سازی مورد نظر با استفاده از تکنیک برنامه‌ریزی ریاضی و به کمک الگوریتم یکایک شماری، مشتمل بر محدودیت‌های تعادل به یک مسئله یک سطحی (MPEC)^d تبدیل می‌شود و پس از خطی سازی، در قالب یک مسئله برنامه‌ریزی آمیخته صحیح خطی (MILP)^e به همراه الگوریتم یکایک شماری حل می‌شود. با توجه به مراجع بررسی شده نوآوری‌های مقاله حاضر به شرح زیر هست:

- مدل سازی مسئله برنامه‌ریزی توسعه همزمان DGها و پست انتقال در قالب مسئله بهینه‌سازی دوسطحی.
- ارائه الگوریتم ترکیبی مبتنی بر روش‌های یکایک شماری و بهینه‌سازی ریاضی.
- افزودن قراردادهای تضمینی به همراه پرداخت‌های ظرفیت به مدل برنامه‌ریزی توسعه تولیدات پراکنده.
- پیاده سازی مدل پیشنهادی روی بخشی از شبکه فوق توزیع واقعی، به منظور ارزیابی اثربخشی دستورالعمل توسعه مولدهای مقیاس کوچک وزارت نیرو.

۲- معرفی چارچوب پیشنهادی

شکل (۱) شماتیک چارچوب پیشنهادی را برای حل مسئله سرمایه‌گذاری در منابع DG و به منظور ارزیابی اثربخشی

max

$$\left[\begin{array}{l}
 \sum_{l \in \Phi_{ll}} \sigma_l \sum_{n \in \Phi_{20}^{bus}} P_{ln}^{dgc} CP_{ln}^{dg} + \\
 \sum_{l \in \Phi_{ll}} \sigma_l \sum_{n \in \Phi_{20}^{bus}} (X_n^{dg} - P_{ln}^{dgc}) CPR^{dgc} (1 - FOR^{dg}) \\
 - \sum_{n \in \Phi_{20}^{bus}} X_n^{dg} AIC^{dg}
 \end{array} \right] \quad (1)$$

$$X_n^{dg} = \sum_{b \in \Phi_b} u_{bn}^{dg} X_{bn}^{dg \max} : \forall n \quad (2)$$

$$\sum_{b \in \Phi_b} u_{bn}^{dg} = 1, u_{bn}^{dg} \in \{0,1\}, \forall n \quad (3)$$

$$\sum_{n \in \Phi_{20}^{bus}} X_n^{dg} AIC^{dg} \leq IC^{max} \quad (4)$$

$$D_n^{peak} = \max \{ P_{ln}^D, \forall l \} \quad \forall n \quad (5)$$

$$\sum_{n \in \Phi_{20}^{bus}} X_n^{dg} \leq PF \sum_{n \in \Phi_{20}^{bus}} D_n^{peak} \quad (6)$$

$$\lambda_{lj} \cdot P_{il}^S, P_{ln}^{dgc} \arg \min \{$$

$$\left[\begin{array}{l}
 \sum_{n \in \Phi_{20}^{bus}} P_{ln}^{dgc} CP_{ln}^{dg} + \sum_{n \in \Phi_{20}^{bus}} P_{ln}^{dgc} MC_n \\
 \sum_{n \in \Phi_{20}^{bus}} (X_n^{dg} - P_{ln}^{dgc}) CPR^{dgc} (1 - FOR^{dg}) \\
 + \sum_{i \in \Phi_{63}^{bus}} P_{li}^S EP_i + \sum_{i \in \Phi_{63}^{bus}} u_{li}^S AC_{li}^S
 \end{array} \right] \quad (7)$$

$$\sum_{n \in \Phi_{20}^{bus}} P_{ln}^D + \sum_{k \in \Phi_j} B_{jk}^{PU} S_b (\theta_{lj} - \theta_{lk}) - \quad (8)$$

$$\sum_{i \in \Phi_{63}^{bus}} P_{li}^S - \sum_{n \in \Phi_{20}^{bus}} P_{ln}^{dgc} = 0 : \lambda_{lj}, \forall j$$

$$0 \leq P_{li}^S \leq X_i^{ES} + X_{u_i}^S : \quad (9)$$

$$S_{\mu_{li}}^S \min, \mu_{li}^S \max, \forall i$$

داده های ورودی :

- ۱- الگوی بار پیش بینی شده
- ۲- اطلاعات واحدهای تولید کاندیدای توسعه
- ۳- اطلاعات پستهای انتقال و فوق توزیع
- ۴- قیمت و حجم قرارداد
- ۵- هزینه بهره برداری منابع تولیدپراکنده
- ۶- مشخصه و هزینه پستهای کاندیدای توسعه
- ۷- اطلاعات پرداخت آمادگی ظرفیت

مسئله سطح بالا (حداکثرسازی سود سرمایه گذار)
مشوق های سرمایه گذاری (قرارداد و آمادگی) به همراه قیود حاکم

استراتژی توسعه DGها
قیمتهای مکانی تولید واحدها ارتقای پست

مسئله سطح پایین (حداقل سازی هزینه بهره برداری و توسعه پستهای انتقال - تسویه بازار)
تعادل عرضه و تقاضا (معادلات پخش بار DC) و محدودیتهای شبکه فوق توزیع و قیود واحدهای تولیدی

خروجی ها :

- ۱- مکان و ظرفیت بهینه DGها
- ۲- انرژی خریداری شده از تولیدات پراکنده
- ۳- برنامه توسعه پست های انتقال موجود
- ۴- انرژی خریداری شده از سیستم انتقال
- ۵- سود سرمایه گذار تولیدات پراکنده و پرداختی بهره بردار

شکل (۱): شماتیک چارچوب پیشنهادی

پستهای انتقال در رابطه (۷) لحاظ شده است. رابطه (۷) مشتمل بر پنج بخش می باشد که سه بخش اول آن به ترتیب مربوط به خرید توان، پرداخت هزینه بهره برداری و پرداخت ظرفیت به DGها در قالب قرارداد تضمینی است. پرداختی بهره بردار برای خرید توان از شبکه بالادست در بخش چهارم رابطه (۷) آمده است. بخش انتهایی پرداختی هزینه توسعه پستهای بالادست می باشد که مقدار متغیر باینری در هر بازه زمانی برابر است. رابطه (۸) معادلات پخش بار مستقیم (DC) را نشان می دهد. قیمت های مکانی (LMPS) متغیرهای دوگان قیود مربوط به تعادل توان می باشند. روابط (۹) و (۱۰) به ترتیب مربوط به محدودیتهای توان تولیدی شبکه بالادست و DGها می باشند. قیود (۱۱) و (۱۲) مرتبط با محدودیتهای توان عبوری از خطوط و ولتاژ زاویه شین ها در پخش بار DC هستند که در آن S_b قدرت مینا است. $k \in \Phi_j$ نشان می دهد که شین k متصل به شین j است. رابطه (۱۳) مربوط به زاویه ولتاژ شین اسلک هست. متغیرهای دوگان هر قید در مقابل قید مربوطه بیان شده اند.

کاندیدای نصب DGها و پست‌های ROYAN و DANIYAL و کاندیدای توسعه ظرفیت (به ترتیب افزایش ظرفیت ۱۲۵ و ۷۰ مگاواتی) می‌باشند. شایان ذکر است، در عمل واحدهای DG به شینه‌های ۲۰ کیلوولت پستهای ۶۳/۲۰ کیلوولت متصل می‌شوند، لیکن برای سادگی در مطالعات، به شینه‌های ۶۳ کیلوولت متصل شده‌اند. قیمت ترانسفورماتور ۱۲۵ و ۷۰ مگاواتی به ترتیب ۵ و ۲/۵ میلیارد تومان در نظر گرفته شده است. حداکثر ظرفیت DGهای قابل نصب در هر شین ۲۵ مگاوات و در پله‌های ۵ مگاواتی فرض شده است. قیمت خرید قراردادی توان DGها در همه سطوح بار ۲۶،۵ دلار بر مگاوات ساعت می‌باشد. بار کل شبکه ۶۷۵ مگاوات می‌باشد. در جدول (۱) اطلاعات مورد نیاز شبیه‌سازی نشان داده است.

تحلیل نتایج شبیه سازی :

سناریوی اول: سناریوی اول، سناریوی پایه می‌باشد. بر اساس مقررات موجود [۱۷]، مالکان DGها در شبکه موظف به فروش تمام توان تولیدی DG در قالب قرارداد تضمینی می‌باشند. در غیاب DGها با توجه به مقدار تقاضای شبکه، به علت محدودیت خطوط انتقال، جواب حاصل نشده است. در صورت تقویت خطوط و توسعه پست‌های DANIYAL، پرداختی بهره‌بردار به ۶۶/۵۳ میلیون دلار رسیده و پاسخ بهینه حاصل می‌شود. در حالت دیگر (حالت پایه)، در حضور DGها نیز توسعه پست‌های بالادست حذف شده و پرداختی بهره‌بردار به میزان ۴۴ درصد افزایش می‌یابد. نتایج در جدول (۲) نشان داده شده است. با توجه به رشد بار شبکه، توسعه شبکه در سال‌های آتی برای پاسخگویی به تقاضای ضروری است. استراتژی توسعه DGها نسبت به توسعه شبکه، به علت نصب در محل بار، باعث آزادسازی ظرفیت خطوط انتقال شده و نیازی به تقویت خطوط را به تعویق می‌اندازد. اما با توجه به قیمت بالای خرید توان DGها در قرارداد تضمینی و مشارکت آنها در پاسخگویی تقاضا، پرداختی بهره‌بردار افزایش چشمگیری داشته است.

شایان ذکر است که با توجه به جدول (۲)، هیچ یک از واحدهای نصب شده DG با ظرفیت کامل خود در تولید مشارکت ندارند، اما با توجه به مشوقهای سرمایه‌گذاری مناسبی که در دستورالعمل مولدهای مقیاس کوچک وزارت نیرو پیش بینی شده است، سود مناسبی برای مالکان حاصل شده است که حاکی از وجود فضای مطلوبی برای سرمایه‌گذاری بر روی تولیدات پراکنده می‌باشد.

سناریوی دوم : مطالعات انجام شده در سناریوی دوم، به منظور بررسی حجم قرارداد تضمینی (CV) انجام شده است. نتایج سناریوی دوم در جدول (۲) آمده است. ملاحظه می‌شود که کاهش حجم قرارداد سبب کاهش ۱۸ درصدی در توان خریداری شده از DGها

$$0 \leq P_n^{dgc} \leq CV X_n^{dg} : \quad (10)$$

$$\mu_n^{dgc} \min, \mu_n^{dgc} \max, \forall n$$

$$- F_{jk}^{\max} \leq B_{jk}^{P.U} S_b (\theta_{lj} - \theta_{lk}) \leq F_{jk}^{\max} : \quad (11)$$

$$V_{lj}^{\min}, V_{lj}^{\max}, \forall j, \forall k \in \Phi_j$$

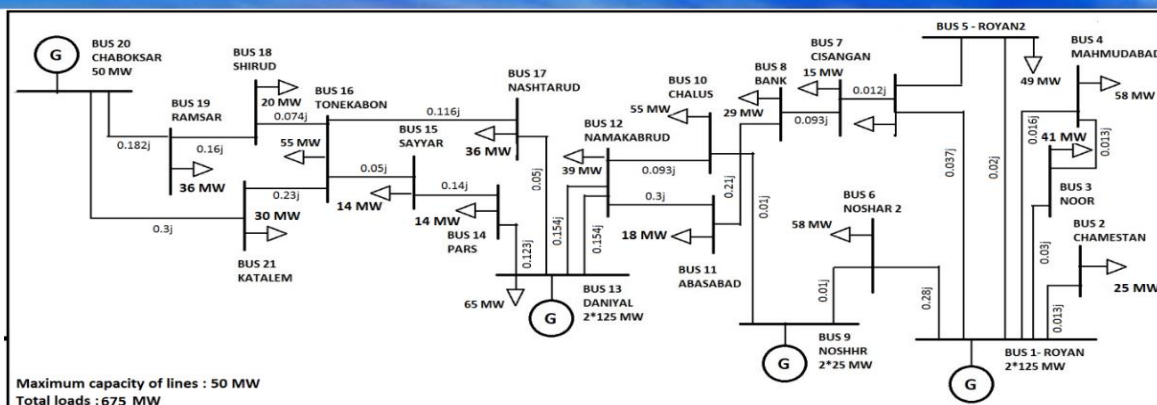
$$- \pi \leq \theta_{lj} \leq \pi : \xi_{lj}^{\min}, \zeta_{lj}^{\max}, \forall j \quad (12)$$

$$\theta_{lj} = 0 : \xi_l^1, j = 1 \forall l. \quad (13)$$

عبارت $X^S u_i^S$ در رابطه (۹) مربوط به تصمیم‌گیری در مورد توسعه شبکه بالادست می‌باشد. حضور متغیر باینری در مسأله سطح پایین یکی از نوآوری‌های اصلی این مقاله می‌باشد. وجود این عبارت در مسأله سطح پایین باعث ایجاد ناحیه نامحدب در مجموعه جواب شده، فضای جستجو را محدود می‌کند. لذا امکان تبدیل مسئله دوسطحی به مسئله برنامه‌ریزی ریاضی با قیود تعادل (MPEC) و سپس خطی‌سازی در قالب مسئله برنامه‌ریزی خطی صحیح آمیخته (MILP) وجود ندارد. با توجه به عدم امکان حل مسأله پیش رو با روش‌های موجود، باید از روش جدیدی برای حل مشکل خطی‌سازی و ایجاد فضای مناسب جستجو برای جواب استفاده کرد. مدل پیشنهادی این مقاله ترکیبی از روش‌های بهینه‌سازی ریاضی با الگوریتم یکایک شماری می‌باشد. در این روش، تمامی حالات توسعه پست‌های انتقال بصورت یکایک شماری در نظر گرفته شده و برای هر یک از ترکیبها، یک مسئله برنامه‌ریزی آمیخته صحیح خطی حل می‌شود که جواب متناظر با حداقل هزینه بهره‌برداری و توسعه ظرفیت پست‌های انتقال به عنوان جواب بهینه انتخاب می‌شود. استفاده از الگوریتم یکایک شماری مشکلات خطی‌سازی را برطرف کرده و در فضای جستجوی موجود، روند حل مسأله را ممکن می‌سازد. تبدیل مسئله دوسطحی به یک سطحی در مراجع [۱۳-۱۴] و تکنیک‌های خطی‌سازی مربوطه در [۱۵-۱۶] آمده است.

۳- مطالعات عددی

در این بخش، کارآیی چارچوب پیشنهادی بر روی شبکه فوق توزیع غرب استان مازندران بررسی می‌شود. مدل پیشنهادی با استفاده از حل‌کننده CPLEX در نرم‌افزار GAMS حل شده است. دیاگرام تک‌خطی شبکه در شکل (۲) نشان داده شده است. در این شبکه ۴ پست اصلی ۶۳/۲۰ کیلوولت وجود دارد که مطابق ظرفیت‌شان به صورت واحد تولید مدل می‌شوند. ۱۴ شین ۶۳ کیلوولت بعنوان



شکل (۲): دیاگرام تک خطی شبکه فوق توزیع غرب مازندران

سناریوی سوم: در این سناریو تأثیر تغییرات قیمت انرژی در شبکه بالادست مطالعه می‌شود. در جدول (۳)، نتایج این سناریو مشاهده می‌شود. در حالت ۱ و با کاهش قیمت شبکه بالادست نسبت به حالت پایه، پرداختی بهره بردار ۵ درصد کاهش می‌یابد. اما محدودیت توان عبوری از خطوط انتقال در کنار این تغییر نقش مهمی را ایفا می‌نماید. مشاهده می‌شود در حالت ۳ و در غیاب محدودیت توان عبوری از خطوط، توان خریداری شده از شبکه بالادست با توسعه پست ROYAN به میزان ۱۰ درصد افزایش یافته و به میزان ۵۲۰ مگاوات رسیده است. لذا پرداختی بهره بردار به میزان ۹ درصد کاهش می‌یابد. مجموع توان خریداری شده از شبکه بالادست در این سناریو در شکل (۳) آمده است. با افزایش قیمت انرژی در شبکه انتقال، توان خریداری شده از آن کاهش یافته و به تبع آن سود مالکان DGها افزایش می‌یابد.

جدول (۳) - بررسی تغییر قیمت انرژی در سناریوی سوم

شماره حالت	۱	۲	۳
قیمت شبکه بالادست در پیک بار (دلار)	۱۵/۵	۲۱/۵	۱۵/۵
حالت توسعه	--	--	شین ۱
درآمد مالکان DG (میلیون دلار)	۱۷/۵۷	۴۹/۱۴	۱۴/۱۴
هزینه مسأله سطح پایین (میلیون دلار)	۷۶/۰۳	۱۰۵/۴	۶۹/۶۶

تأثیر تغییرات نرخ رشد تقاضا: با افزایش نرخ رشد بار به ۱۰ درصد، مشارکت DGها در تولید نسبت به حالت پایه به افزایش می‌یابد و منجر به توسعه پست ROYAN می‌شود. افزایش مشارکت DG، افزایش سود ۲۵ درصدی را نسبت به حالت پایه برای سرمایه‌گذار در پی داشته، همچنین پرداختی بهره بردار به میزان ۸ درصد، افزایش می‌یابد. شایان ذکر است، افزایش نرخ رشد بار موجب افزایش مشارکت DGها در توسعه و ارتقاء شبکه و افزایش هزینه کل سیستم می‌گردد.

جدول (۱) - اطلاعات شبیه سازی غرب شبکه مازندران

هزینه سرمایه‌گذاری مولدهای گازی (میلیون دلار بر مگاوات آمپر)	۰/۹۵
هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری مولدهای گازی (دلار بر مگاوات ساعت)	۷/۵
قیمت خرید برق از در ساعات پر، میان و کم باری (دلار بر مگاوات ساعت)	۱۲ - ۱۴/۵ - ۱۷

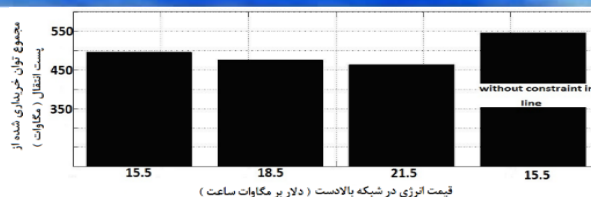
جدول (۲) - نتایج سناریوهای اول و دوم

شماره سناریو	۱	۲
حجم قرارداد	۱	۰/۶
مکان و ظرفیت DG نصب شده (مگاوات)	۱۵ (۳/۵) و ۲۰ (۱۷)	۲۵ (۲/۱) و ۱۷ (۱۶) و ۱۹ (۱۷) و ۱۴ (۲۰)
توان خریداری شده از DG (مگاوات)	۱۶ (۴/۱۸) و ۱۶ (۲۳/۵۸)	۱۷ (۱۰/۵) و ۱۶ (۴/۱۸) و ۱۶ (۱۷/۵۸) و ۱۷ (۱۶)
سود مالکان DG	۱۸/۵۷ میلیون دلار	۱۳/۶۳ میلیون دلار
هزینه مسأله سطح پایین	۹۷ میلیون دلار	۹۰ میلیون دلار
توان خریداری شده از شبکه بالادست (مگاوات)	۱۳ (۱۶۲/۶) و ۱۳ (۱۹/۳)	۱۱ (۲۴۳/۳) و ۹ (۵۰) و ۱۱ (۲۴۲/۳) و ۱۳ (۲۳۵/۱)

شده و به تبع آن سود مالکان به میزان ۲۶ درصد نسبت به حالت پایه کاهش یافته است. در این شرایط پستهای انتقال در تولید مشارکت بیشتری داشته و به علت پایین تر بودن قیمت انرژی در شبکه بالادست نسبت به قیمت قرارداد تضمینی، هزینه مسأله سطح پایین به میزان ۷ درصد کاهش داشته است. بر اساس قوانین پرداخت هزینه بهره‌برداری DGها برعهده بهره‌بردار شبکه بوده، لذا با مقایسه قیمت‌های انرژی، توسعه شبکه بالادست در صورت امکان (توجه به محدودیت خطوط فوق توزیع) می‌تواند هزینه مسأله سطح پایین را کاهش دهد.

- [۳] T. Gonen and I. Ramirez-Rosado, "Review of distribution system planning models: A model for optimal multistage planning," *Proc. Inst. Elect. Eng.*, vol. ۱۳۳, pp. ۳۹۷-۴۰۸, ۱۹۸۶.
- [۴] S. K. Khator and L. C. Leung, "Power distribution planning: A review of models and issues," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. ۱۲, no. ۳, pp. ۱۱۵۱-۱۱۵۹, Aug. ۱۹۹۷.
- [۵] Pathomthat Chiradeja and R. Ramakumar, "An Approach to Quantify the Technical Benefits of Distributed Generation," *IEEE Transactions on Energy Conversation*, Vol. ۱۹, No. ۴, December. ۲۰۰۴.
- [۶] A. Ford, "Waiting for the boom: a simulation study of power plant construction in California," *Energy Policy*, vol. ۲۹, ۲۰۰۱, pp. ۸۴۷-۸۶۹.
- [۷] G. L. Doorman and A. Botterud, "Analysis of Generation Investment Under Different Market Designs," *IEEE Trans. Power Syst.*, No. ۳, Aug ۲۰۰۸.
- [۸] S.J. Kazempour, A.J. Conejo, and Carlos Ruiz, "Strategic Generation Investment Using a Complementarity Approach," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. ۲۶, no. ۲, May ۲۰۱۱.
- [۹] F. H. Murphy and Y. Smeers, "Generation capacity expansion in imperfectly competitive restructured electricity markets," *Oper. Res.*, vol. ۵۳, no. ۴, pp. ۶۴۶-۶۶۱, Jul. ۲۰۰۵.
- [۱۰] Marzband M., Sumper A., Domínguez-García J. L., Gumara-Ferret R., "Experimental Validation of a Real Time Energy Management System for Micro grids in Islanded Mode Using a Local Day-Ahead Electricity Market and MINLP," *Energy Conversion and Management*, Vol. ۷۶, pp. ۳۱۴-۳۲۲, ۲۰۱۳.
- [۱۱] Jesús María López-Lezama and Javier Contreras "Location and contract pricing of distributed generation using a genetic algorithm" *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. Volume ۳۶, Issue ۱, March ۲۰۱۲.
- [۱۲] S. J. Kazempour, A. J. Conejo, "Strategic Generation under Uncertainty via Benders Decomposition," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. ۲۷, no. ۱, Feb ۲۰۱۲.
- [۱۳] F. Facchinei and J.-S. Pang, *Finite Dimensional Variational Inequalities and Complementarity Problems*. New York: Springer-Verlag, ۲۰۰۳, vol. ۱.
- [۱۴] B. F. Hobbs, C. B. Metzler, and J.-S. Pang, "Calculating equilibria in imperfectly competitive power markets: An MPEC approach," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. ۱۵, no. ۲, pp. ۶۳۸-۶۴۵, May ۲۰۰۰.
- [۱۵] S.J. Kazempour, A.J. Conejo, and Carlos Ruiz, "Strategic Generation Investment Using a Complementarity Approach," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. ۲۶, no. ۲, May ۲۰۱۱.
- [۱۶] Baringo, L.; Conejo, A.J., "Transmission and Wind Power Investment", *Power Systems, IEEE Transactions on*, on page(s): ۸۸۵ - ۸۹۳ Volume: ۲۷, Issue: ۲, May ۲۰۱۲.

[۱۷] دستور العمل و قوانین توسعه مولد های مقیاس کوچک در شبکه های برق کشور، وزارت نیرو.



شکل (۳) - مجموع توان خریداری شده از شبکه بالادست

۴- نتیجه گیری

در این مقاله، برای حل مسئله برنامه ریزی توسعه سیستم های فوق توزیع با چهارچوبی جدید در نظر گرفتن سرمایه گذاری در ظرفیت منابع تولید پراکنده و امکان توسعه ظرفیت پست های انتقال ارائه شده است. نتایج شبیه سازیها نشان داده اند:

- ✓ استفاده از الگوریتم یکپارچه شماری، مشکل خطی سازی ناشی از عدم تحدب مسأله سطح پایین را به خوبی حل کرده است و مدل برای شبکه های آزمون بزرگ هم کارایی دارد.
- ✓ قرارداد تضمینی و پرداخت آمادگی ظرفیت منجر به افزایش میل به سرمایه گذاری، سود شرکت های تولید می شوند؛ اما لزوماً باعث کاهش هزینه های پرداختی بهره بردار نمی شوند. میل به سرمایه گذاری در قراردادهای با قیمت بالا نسبتاً بالا کم هست. زیرا توسعه پستهای انتقال هزینه کمتری خواهد داشت. هر اندازه قیمت قرارداد تضمینی بیشتر باشد مالکان DGها میل بیشتری برای احداث واحدهای جدید خواهند داشت. همچنین افزایش نرخ پرداخت ظرفیت سبب افزایش سرمایه گذاری و سود مالکان DGها می شود.
- ✓ توسعه DG نسبت به توسعه شبکه بالادست، به این علت که در محل بار نصب می شوند، نیازی به تقویت خطوط انتقال شبکه نداشته و توسعه شبکه بالادست را به تعویق انداخته، لیکن هزینه پرداختی بهره بردار را به علت قیمت بالای قرارداد تضمینی افزایش می دهد.
- ✓ کاهش قیمت انرژی در شبکه بالادست منجر به خرید توان بیشتر از آنها می شود و توسعه پستهای انتقال را به همراه دارد.
- ✓ کاهش ظرفیت حرارتی خطوط فوق توزیع موجب تغییر استراتژی توسعه مولدها شده است، بطوریکه موجب محلی شدن تولید و کاهش توان عبوری از شبکه می شود.

منابع

- [۱] Interim Report on Distributed Generation. Maine Public Utilities Commission. [Online]. Available: http://www.state.me.us/mpuc/2001legislation/DG_Rpt_Final.htm.
- [۲] X. Wang, J. R. McDonald, "Modern Power System Planning", MCGRAW-HILL Publication, ۱۹۹۴.

جدول (۴): معرفی واژه‌ها و عبارات

مجموعه ها		مجموعه ی شین ها Φ_j	مجموعه ی شین های ۶۳ کیلوولت $\Phi_{۶۳}^{bus}$	مجموعه ی سطوح بار Φ_{il}
مجموعه ها		مجموعه ی شین های ۲۰ کیلوولت $\Phi_{۲۰}^{bus}$	مجموعه ی بلاک های ظرفیتی DGها Φ_b	
انديس‌ها	ورودی‌ها			خروجی‌ها
i, k : شماره شین‌ها n : شماره شین‌های ۲۰ کیلوولت $n \in \Phi_{۲۰}^{bus}$ i : شماره شین‌های ژنراتوری $i \in \Phi_{۶۳}^{bus}$ l : شماره سطوح بار $l \in \Phi_{il}$ d : شماره تقاضا، b : شماره هریک از بلاک های توانی DG $b \in \Phi_b$	CV_n : حجم قرارداد در شین n CP_{ln}^{dg} : قیمت قرارداد شین n و سطح بار l (\$/MWh) EP_{il} : قیمت انرژی در شبکه بالادست (\$/MWh) w_{ln}^{dg} : احتمال نیاز شبکه به تولید DG σ_l : تعداد ساعت سطوح بار (h) CPR_{ln}^{dgc} : قیمت پرداخت ظرفیت در قرارداد در شین n و سطح بار l (\$/MWh) AIC^{dg} : هزینه سرمایه‌گذاری سالیانه واحد DG (\$/MW) IC^{max} : حداکثر بودجه سرمایه‌گذاری (\$) (\$) F_{jk}^{max} : ظرفیت خطوط (MW)	MC_n : هزینه نهایی DG در شین n (\$/MWh) $B_{jk}^{p.u.}$: سوسپتانس خطوط (p.u.) X_{nb}^{dgcmax} : ظرفیت قابل سرمایه‌گذاری (MW) X_{il}^{ES} : ظرفیت واحد موجود در شبکه بالادست (MW) X_i^S : ظرفیت پستهای کاندیدای نصب در شبکه بالادست (MW) P_{id}^D : تقاضا (MW) FOR^{dg} : نرخ خروج اجباری DGها AC^S : هزینه سالیانه سرمایه‌گذاری توسعه پست انتقال (\$)	X_n^{dg} : ظرفیت سرمایه‌گذاری واحد جدید تولید پراکنده (MW) p_{ln}^{dgc} : توان تولیدی DGها در قرارداد (MW) p_{li}^{ss} : توان خریداری شده از شبکه بالادست (MW) U_{nb}^{dg} : متغیر باینری تصمیم توسعه DG U_i^S : متغیر باینری تصمیم توسعه پست انتقال θ_{jl} : زاویه ولتاژ شین λ_{jl} : قیمت مکانی (\$/MWh)	

زیر نویس‌ها :

- ^a Distributed Generation (DG)
- ^b Cournot
- ^c Benders decomposition
- ^d Mathematical programming with equilibrium constraints (MPEC)
- ^e Mixed integer linear programming (MILP)
- ^f Capacity payment rate (CPR)
- ^g Penetration factor (PF)
- ^h Local marginal price (LMP)