

ارائه یک رویه دوسطحی ریاضی برای حل مسئله توسعه شبکه انتقال انرژی الکتریکی با در نظر گرفتن قید توسعه تولید توان

سیدسعید طاهری^۱، دانشجوی دکتری؛ سیدجلال سیدشنوا^۲، دانشیار

۱- دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه محقق اردبیلی - اردبیل - ایران - taheri@iausa.ac.ir

۲- دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه محقق اردبیلی - اردبیل - ایران - seyedshenava@uma.ac.ir

چکیده: در این مقاله، یک رویه دوسطحی ریاضی به منظور حل مسئله توسعه شبکه انتقال انرژی الکتریکی با در نظر گرفتن قید ناشی از توسعه تولید پیشنهاد شده است. مدل پیشنهادی یک ساختار بهینه‌سازی دوسطحی ریاضی است که در سطح بالا مسئله توسعه شبکه انتقال را با در نظر گرفتن قید توسعه تولید توان به عنوان سطح پایین آن مسئله بهینه می‌کند. در این رویه، شبکه بر اساس مدل‌های پخش بار DC مدل‌سازی شده و از متغیرهای پیوسته برای مدل‌سازی در سطح توسعه شبکه انتقال استفاده شده است. استفاده از متغیرهای پیوسته در مدل‌سازی باعث ایجاد مزیت‌های فنی شده و بر تسهیل روش محاسباتی تأثیر فراوان گذاشته است. این مدل با استفاده از روش مربوط به مسائل ریاضی با قیود بهینه‌سازی حل شده است. در حل مسئله از روش جدید SOS1 برای خطی‌سازی استفاده شده و مزیت‌های محاسباتی آن نشان داده شده است. مدل طی مثال‌های موردی متنوعی در دو شبکه ۶ شینه گارور و سیستم ۲۴ شینه IEEE-RTS پیاده‌سازی و صحت و قابلیت آن توسط مدل‌سازی در نرم‌افزار GAMS مورد بررسی قرار گرفته است.

واژه‌های کلیدی: مدل‌سازی دوسطحی، توسعه شبکه انتقال، توسعه تولید، مسئله ریاضی با قیود بهینه‌سازی، خطی‌سازی SOS1.

A Bilevel Approach for Electrical Transmission Network Expansion Planning Considering Power Generation Expansion Planning

S. S. Taheri¹, PhD Student; S. J. Seyedshenava², Associate Professor²

1- Department of Electrical Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran, Email: taheri@iausa.ac.ir

2- Department of Electrical Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran, Email: seyedshenava@uma.ac.ir

Abstract: In this paper, a mathematical model has been proposed for organizing of electrical transmission network expansion planning (TNEP) and power generation expansion planning (GEP) together. The mentioned model is a bilevel optimization model that considers TNEP problem at the upper level and GEP in the lower level as a constraint of upper level. The decision variables of TNEP are defined as continuous and the model considers transmission network constraints through a lossless DC approximation of Kirchhoff's laws. Using continuous decision variable for TNEP causes technical advantages and make the model solution easier than common binary variable structure. This model could be reformulated using Mathematical Program with Equilibrium Constraint (MPEC) method as a single level optimization problem and linearized with new SOS1 linearization technique that has considerable advantage for the solvers. The model is applied to in different cases for Garver model and IEEE 24-bus RTS system using GAMS software to illustrate the methodology and proper conclusions are reached.

Keywords: Bilevel modelling, transmission network expansion, generation expansion, MPEC, SOS1 linearization.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۰۱/۲۵

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۵/۰۳/۲۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۶/۰۲

نام نویسنده مسئول: سیدجلال سیدشنوا

نشانی نویسنده مسئول: ایران - اردبیل - خیابان دانشگاه - دانشگاه محقق اردبیلی - دانشکده فنی و مهندسی.

۱- مقدمه

یکی از موارد مهم در حل مسائل مربوط به توسعه شبکه انتقال انرژی الکتریکی، وابستگی بسیار زیاد پاسخ‌های آن به مسئله توسعه تولید توان است. در واقع، نتایج به‌دست‌آمده از مسئله توسعه تولید است که سیگنال‌های مناسب را برای انجام توسعه شبکه انتقال فراهم می‌نماید. به‌عبارت بهتر، حل هر دوی این مسائل می‌بایست در یک فرآیند توأمان صورت پذیرد تا بتوان به واقعی بودن و قابل اتکا بودن نتایج حاصل اعتماد کرد. علاوه بر آن، با حل توأمان این دو مسئله می‌توان هزینه تحمیل‌شده به کل سیستم را تا حدود زیادی کاهش داد. بنابراین، توسعه یک مدل واحد که بتواند هر دوی این مسائل را با رعایت ترتیب در کنار هم حل نماید، بسیار مفید و قابل استفاده خواهد بود.

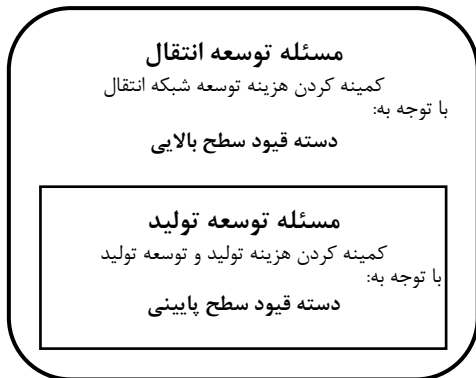
مقالات زیادی صرفاً برای مدل‌سازی توسعه تولید و یا انتقال ارائه شده‌اند [۱-۴]. مقاله [۲]، سعی کرده است تا با استفاده از یک تکنیک جدید، امر برنامه‌ریزی توسعه تولید را به انجام برساند. در بین مقالات ذکرشده مقالات [۳، ۴] مدل‌سازی‌های دوسطحی را ارائه نموده‌اند که توسط تکنیک‌های ریاضی سعی کرده‌اند با ایده و دیدگاه مربوط به خودشان، مسئله سرمایه‌گذاری تولید را ارزیابی کنند. در برخی از این منابع، از مدل‌سازی تک‌سطحی ریاضی صرفاً برای حل مسئله توسعه شبکه انتقال استفاده شده است. در تحقیق دیگری نیز سعی کرده است تا یک مدل برای توسعه شبکه انتقال پیشنهاد دهد که می‌تواند با در نظر گرفتن مدل بازار برق اشتراکی، از مدل‌سازی دوسطحی خطی آمیخته با اعداد صحیح استفاده نماید [۵]. در روش مشابهی، [۶] یک مدل دوسطحی را پیشنهاد کرده است که در سطح بالا، کاهش هزینه انتقال مدنظر بوده و در سطح زیرین تسویه بازار در یک بازار اشتراکی انجام می‌شود. در مقاله مزبور، مدل دوسطحی با استفاده از تئوری دوگان^۱ به یک مدل تک‌سطحی آمیخته با اعداد صحیح تبدیل شده است. از سوی دیگر مرجع [۷]، مسئله توسعه تولید را به‌صورت یک مدل دوسطحی ریاضی حل نموده است. به این شکل که در سطح بالاتر توسعه‌دهندگان تولید سعی در حداکثر کردن سود خود دارند و در سطح زیرین مدل‌سازی تقریبی بازار برای حالت‌های مختلف رقابتی انجام شده است. با این حال مدل مزبور به هیچ‌وجه توسعه شبکه انتقال را مورد توجه قرار نداده است. مقاله [۸] با استفاده از مدل‌های ارائه‌شده بر اساس نظریه بازی‌ها، مسئله توسعه شبکه انتقال و تولید را به‌صورت هم‌زمان در محیط بازار تحلیل نموده است. مقاله مزبور، با استفاده از روش‌های کامپیوتری و به‌صورت بازگشتی، توانسته مدل خود را تحلیل نماید.

در این میان در مقالات [۹، ۱۰] به مطالعه تأثیر اقتصادی تحلیل هم‌زمان و نه وابسته مسئله توسعه خطوط و تولید به‌صورت تقریبی پرداخته شده است. در مقالات مزبور توسعه تولید بر عهده اپراتور شبکه نیست و صرفاً سرمایه‌گذاران استراتژیک با در نظر گرفتن بازخورد بازار اقدام به سرمایه‌گذاری می‌کنند. مدل‌های ارائه‌شده در این مقالات بر اساس فرآیند تکرار و جستجو برنامه‌ریزی شده است و لزوماً نقطه بهینه

کلی را ارائه نمی‌نماید. مقالات مشابه دیگری نیز سعی کرده‌اند تا با استفاده از روش جستجو- تکرار و یا الگوریتم‌های فراابتکاری، مسئله موردنظر را تحلیل کنند [۱۱-۱۳]. با توجه به معایب روش جستجو- تکرار و ارجحیت روش مدل‌سازی ریاضی خطی شده بر آن، در اینجا به جزئیات مقالات مزبور پرداخته نمی‌شود. مقالات دیگری نیز سعی کرده‌اند تا توسعه هم‌زمان تولید و انتقال را مدل‌سازی نمایند [۱۶-۱۴]. در مقاله [۱۵] با اشاره به این مهم که کماکان در بسیاری از کشورها ساختارهای سنتی و یا شبه‌سنتی بخش برنامه‌ریزی سیستم را عهده‌دار هستند، سعی شده است مدلی را برای توسعه هم‌زمان تولید و انتقال با استفاده از ساختار تک‌لایه ریاضی ارائه نمایند. مقاله [۱۶] نیز با رویکردی متفاوت یک مدل‌سازی تک‌سطحی دیگر ریاضی برای مسئله توسعه هم‌زمان تولید و انتقال ارائه نموده است. مقاله [۱۷] با رویکرد متفاوتی به این مسئله توانسته است یک مدل ریاضی چندسطحی خطی‌سازی‌شده برای توسعه شبکه انتقال وابسته به توسعه تولید در ساختار بازار ارائه نماید. با این حال در مرجع مزبور، هم شبکه و هم رفتار بازار به‌صورت تقریبی مدل شده است. همچنین، توان سرمایه‌گذاری شده و تولیدی در هر باس فقط می‌تواند به یک تکنولوژی یا سرمایه‌گذار متعلق باشد که واقع‌بینانه نمی‌باشد.

بررسی مسئله انتقال و تولید به‌صورت مجزا با توجه به وابستگی جدی این دو مسئله نمی‌تواند واقع‌بینانه باشد و پاسخ بهینه توسعه سیستم را ارائه نماید. در حقیقت توسعه انتقال زمانی می‌تواند به‌درستی انجام گیرد که مرتبط و مشروط به توسعه تولید انجام شده باشد [۱۸]. در واقع، نتایج به‌دست‌آمده از مسئله توسعه تولید است که می‌تواند سیگنال‌های مناسب را برای انجام توسعه شبکه انتقال فراهم نماید. به‌عبارت بهتر پاسخ بهینه مسئله انتقال مقید به حل بهینه مسئله تولید است. در یک مسئله بهینه‌سازی دوسطحی، تصمیمات لایه بالایی محدوده شدنی را برای لایه پایینی تعیین می‌کند و تصمیمات لایه پایینی نیز نقش اساسی را در یافتن پاسخ بهینه کل مسئله ایفا می‌نماید [۱۹]. در این مقاله برای حل مسئله توسعه شبکه انتقال یک مدل دوسطحی ارائه شده است، این ساختار دوسطحی برای توسعه شبکه انتقال، به یک قید توسعه تولید توان در سطح زیرین وابسته است. سطح توسعه تولید شبکه را به‌طور غیرتقریبی مدل نموده است و روابط شبکه DC را در درون خود دارد. مدل ارائه‌شده، با استفاده از روش مدل‌سازی مسائل ریاضی با قیود بهینه‌سازی (MPEC) به یک مسئله تک‌سطحی تبدیل شده است و در نتیجه پس از آن قادر خواهد بود تا نقطه بهینه را با توجه به این مدل‌سازی بیابد. در مقاله حاضر، موضوع وجود دو بازیگر مجزا برای حل مسئله مطرح نیست و صرفاً نحوه ارتباط دو مسئله با همدیگر است که با استفاده از روش‌های جدید محاسباتی می‌توان آن را تحلیل نمود. مدل به‌دست‌آمده یک مسئله غیرخطی خواهد بود که می‌بایست خطی‌سازی گردد. برای خطی‌سازی این معادلات از یک روش جدید مبتنی بر برخی متغیرهای خاص بنام SOS^۲ استفاده شده است که به‌تازگی در برخی از مقالات

نحوه کار این مسئله دوسطحی را می‌توان با شکل ۱ نمایش داد. این شکل نشان می‌دهد که مسئله مورد اشاره در اصل یک مسئله توسعه شبکه انتقال است که توسعه تولید را هم در نظر گرفته است.



شکل ۱: ساختار مسئله توسعه انتقال به صورت یک مسئله دوسطحی

۲-۱- مسئله سطح بالایی (مسئله توسعه انتقال)

فرمول‌بندی‌های مربوط به این سطح در مجموعه روابط (۱) ارائه شده‌اند. در این سطح از مسئله همان‌طور که در رابطه (۱-الف) نمایش داده شده است، هدف کمینه‌کردن هزینه توسعه انتقال و مقدار بار قطع‌شده با در نظر گرفتن یک ضریب جریمه برای آن می‌باشد. این تابع هدف با توجه به یک سری قیود مربوط، سطح بالای مسئله را تشکیل می‌دهد. همان‌طور که در این معادلات دیده می‌شود، یکی از متغیرهای این سطح عبارت است از حداکثر توان قابل عبور از خط (f_{nm}) که برای افزایش انعطاف تصمیم‌گیری و تسهیل محاسبات این متغیر به صورت یک متغیر پیوسته در نظر گرفته شده است [۱۷]. در این رابطه برای محاسبه هزینه سرمایه‌گذاری انجام‌شده برای تقویت خطوط، مقدار ظرفیت نصب‌شده فعلی خط از مقدار ظرفیت تصمیم‌گیری‌شده نهایی خط کسر شده و در هزینه سرمایه‌گذاری یکنواخت سالیانه خط مربوطه به‌ازای هر مگاوات ضرب شده است. علاوه بر آن حداکثر بار قابل قطع هر شین در هر بازه زمانی از مصرف که در شبکه با r_{nt} نمایش داده می‌شود، جزو متغیرهای سطح بالا می‌باشد. درعین حال کلیه متغیرهای مسئله سطح پایین به همراه متغیرهای دوگان مربوط به آن‌ها که با علامت‌های π_D^{LL} و π_P^{LL} نمایش داده می‌شوند، جزو متغیرهای سطح بالا محسوب می‌شوند.

$$\min_{f, r, \pi^{LL}} \left\{ \sum_{n, m \in \Omega_n} C_{nm} \cdot (f_{nm} - \underline{f}_{nm}) + Y \sum_{n, t} r_{nt} \right\} \quad (1-f)$$

با توجه به:

$$\underline{f}_{nm} \leq f_{nm} \leq \bar{f}_{nm} \quad \forall n, m \in \Omega_n \quad (1-b)$$

$$\sum_{n, m \in \Omega_n} C_{nm} \cdot (f_{nm} - \underline{f}_{nm}) \leq \bar{C}_{line} \quad (1-c)$$

$$r_{nt} \geq 0 \quad \forall n, t \quad (1-d)$$

$$\text{مسئله توسعه تولید} \quad (1-e)$$

مورد استفاده قرار گرفته است [۲۰، ۲۱]. مزیت این روش در این است که علاوه بر این که می‌توان آن را با یک روش آمیخته تقریبی ترکیب کرد، سرعت محاسبات الگوریتم‌های مرتبط با این نوع متغیر بسیار بیش‌تر از روش‌های متداول استفاده از متغیرهای دودویی است [۲۲]. در این مقاله از متغیرهای پیوسته برای توسعه خطوط استفاده شده است که می‌تواند هزینه کلی سرمایه‌گذاری خط را کاهش دهد. با توجه به اینکه مقدار موردنیاز افزایش ظرفیت هر خط به‌صورت پیوسته نشان داده می‌شود، اگر نیاز به افزایش ظرفیت محدود باشد، میزان سرمایه‌گذاری نیز کم خواهد بود. علاوه بر آن این روش با توجه به حذف تعداد زیادی از متغیرهای گسسته، توانایی نرم‌افزار را در حل هرچه بهتر مدل میسر می‌کند. بر اساس آنچه ذکر شد در این مقاله یک مدل‌سازی جدید ریاضی کامل و غیرتقریبی MILP قابل‌استفاده برای مسائل توسعه شبکه انتقال ارائه شده است که با در نظر گرفتن قید توسعه تولید توان برای حل مسئله دوسطحی توسعه شبکه انتقال در ساختارهای سنتی می‌تواند سیگنال‌های مناسب برای سرمایه‌گذاری در برخی از محیط‌های رقابتی را نیز فراهم نماید. مدل یادشده با استفاده از روش نوین خطی‌سازی، توانسته است تا با بهره‌گیری از متغیرهای پیوسته به‌جای متغیرهای گسسته برای توسعه شبکه انتقال برداشت‌های جدیدی را برای سرمایه‌گذار خطوط انتقال فراهم نماید.

در ادامه مقاله بخش دوم به تشریح مدل اختصاص دارد. در این بخش ابتدا به نحوه تعریف مدل و نیز توسعه آن پرداخته شده است که شامل دسته معادلات مسئله توسعه شبکه انتقال و تولید است. سپس نحوه تبدیل این مدل به یک مدل تک‌سطحی بیان شده است. در بخش سوم نحوه خطی‌سازی مدل تک‌سطحی حاصل تشریح شده است. پس از ارائه مدل خطی، در بخش چهارم مسئله مذکور در بخش مطالعات عددی بر روی دو سیستم ۶ شینه گارور و ۲۴ شینه IEEE در حالت‌های متنوعی، پیاده‌سازی شده است و نتایج حاصل از آن به‌نحوی که کارایی مدل را نمایش بدهد، مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. مدل‌سازی توسط نرم‌افزار GAMS و به‌صورت خطی آمیخته با اعداد صحیح انجام شده و در بخش نتیجه‌گیری به‌اختصار نکات حاصل از مقاله ارائه شده است.

۲- تشریح مدل پیشنهادی

مدل ارائه‌شده در این مقاله مربوط به سیستمی است که در آن یک اپراتور انتقال^۲ با هدف کمینه‌سازی هزینه توسعه، مسئول توسعه شبکه انتقال می‌باشد. علاوه بر آن، تمامی و یا اکثر نیروگاه‌های مؤثر تولیدی آن سیستم تحت نظر بهره‌بردار مستقل سیستم^۴ هستند که به‌نحوی با اپراتور انتقال در ارتباط است و هدف آن تأمین انرژی الکتریکی و توسعه تولید با کمینه‌کردن هزینه تولید و توسعه منابع تولیدی با فناوری‌های متنوع می‌باشد. حاصل چنین تعاملی بین اپراتورها، یک مسئله بهینه‌سازی دوسطحی است که سطح پایینی مسئول توسعه تولید با قیود مربوط به خود می‌باشد و در سطح بالاتر مسئله توسعه انتقال با قیود مربوط به خود به همراه قید توسعه تولید حل می‌شود.

قید (۲-ب) به قید تعادل تولید و مصرف معروف است و در هر گره و به ازای هر سطح از مصرف در بازه زمانی مربوط به خود مورد بررسی قرار می‌گیرد. در قید (۲-ج) حداقل و حداکثر میزان ظرفیت قابل سرمایه‌گذاری برای هر واحد تولیدی اعمال می‌شود. بدیهی است که حداقل میزان توان قابل سرمایه‌گذاری به مقدار ظرفیت قبل از توسعه تولید یا همان توان قابل استحصال موجود در آن واحد برمی‌گردد و میزان بیشینه نیز حداکثر مقدار ظرفیت قابل توسعه هر واحد را نمایان می‌سازد. در قید (۲-د) محدودیت قابلیت تولید هر واحد در دوره‌های زمانی متفاوت مصرف مشخص می‌شود که نمی‌بایست از حداکثر توان سرمایه‌گذاری شده بیش‌تر باشد. قیود مربوط به حداکثر بار قطع‌شده و بار پذیرفته‌شده نیز در روابط (۲-ه) و (۲-و) اعمال شده است. محدودیت حداکثر بار مجاز هر خط در قید (۲-ز) اعمال شده است. لازم به ذکر است که در این رابطه f_{nm} که برای سطح بالادست به‌عنوان متغیر شناخته می‌شود و برای سطح پایینی، یک مقدار ثابت فرض شده است. در مدل‌سازی MPEC برای تمامی متغیرهایی که در لایه پایینی وجود دارد یک شرط در حالت تک‌سطحی (شرط KKT) در نظر گرفته می‌شود و در صورتی که چنین کاری برای یک متغیر انجام نشود در حکم این است که آن متغیر در لایه پایینی ثابت فرض شده است در حالی که برای لایه بالاتر کماکان متغیر محسوب می‌شود و حد و حدود آن اعمال می‌گردد. قیود بعدی (۲-ح) و (۲-ط)، محدودیت‌های مربوط به زاویه بار را در شینه‌ها و در زمان‌های مختلف در مدل اعمال می‌کنند. متغیرهای دوگان برای هر رابطه در مقابل هر قید مشخص شده است که در ساختن مدل MPEC به کار برده خواهند شد.

۲-۳- تبدیل مدل دوسطحی به مدل تک‌سطحی (MPEC)

روابط ارائه‌شده برای مدل دوسطحی (۱-۲) می‌توانند با استفاده از دو روش معمول به یک مسئله تک‌سطحی تبدیل شوند [۲۳]. هر دوی این روش‌ها معادل هم هستند و می‌توانند به‌جای همدیگر مورد استفاده قرار گیرند. یکی از این روش‌ها استفاده از دوگان مسئله بهینه‌سازی و تشکیل قیدهای مربوط و همچنین قید دوگان قوی (SDC^o) می‌باشد که می‌تواند بسته به نوع مسئله قیدهای غیرخطی و یا خطی را تشکیل دهد. روش دیگر استفاده از شروط بهینگی کاروش-کان-تاگر (KKT) می‌باشد که از یک سری قیود مساوی و نامساوی جدید که ذاتاً غیرخطی هستند، تشکیل شده است. دلیل غیرخطی بودن قطعی این روش وجود قیود مکمل^۶ در آن است که به‌صورت وجود ندارد و وجود آن‌ها معادل همان قید SDC در روش استفاده از دوگان مسئله می‌باشد. پس از تک‌سطحی کردن مسئله و خطی‌سازی آن، یک مسئله بهینه‌سازی ساده با یکسری قیود به‌دست می‌آید که به آن MPEC اطلاق می‌شود و توسط حل‌کننده‌های ریاضی قابل تحلیل است. در این مقاله از روش KKT برای تک‌سطحی کردن مدل استفاده و پس از به‌دست آوردن مدل غیرخطی، با استفاده از یک روش جدید

قید (۱-ب) حداکثر توان عبوری از خطوط را در بین حداقل و حداکثر مجاز خود محدود می‌نماید. حداقل این قید مربوط به وضعیت موجود (حداکثر توان مجاز عبوری از خطوط فعلی) می‌باشد و حداکثر آن نشان‌دهنده حداکثر تقویت ممکن در مسیر مشخص‌شده با استفاده از گزینه‌هایی همچون نصب خط جدید، تقویت خطوط موجود و یا نصب ادواتی همچون ادوات FACTS است. قید (۱-ج) نشان می‌دهد که حداکثر مقدار هزینه سرمایه‌گذاری ممکن برای توسعه خطوط محدود است و می‌بایست از یک مقدار بیشینه کم‌تر باشد. همچنین بدیهی است که مقدار توان قطع‌شده در هر شین می‌بایست یک مقدار مثبت باشد که توسط قید (۱-د) این محدودیت به مدل اعمال شده است. شایان ذکر است که اگر قید مذکور حذف گردد می‌بایست با قید دیگری حداکثر مقدار متغیر Pd_{nt} محدود گردد تا مقدار متغیر r_{nt} در بهینه‌سازی منفی انتخاب نشود. در نهایت قید (۱-ه) بیان می‌کند که حل مسئله لایه پایینی به‌عنوان قید برای لایه بالایی می‌باشد و پاسخ آن چنانچه قبلاً هم در بخش مقدمه ذکر گردید، سیگنال‌های مناسب را برای مسئله توسعه انتقال فراهم می‌نماید.

۲-۲- مسئله سطح پایینی (مسئله توسعه تولید)

توسعه تولید که به‌عنوان یک قید در مسئله سطح بالا در نظر گرفته شده است، خود به‌صورت یک مسئله بهینه‌سازی در سطح پایین مسئله اصلی، مدل‌سازی شده است. در این سطح، همان‌طور که در رابطه (۲-الف) نیز مشخص است، کمینه‌سازی هزینه سرمایه‌گذاری تولید به‌علاوه هزینه تولید نیروگاه‌ها به‌عنوان هدف در نظر گرفته شده است. در اینجا نیز مشابه تابع هدف سطح بالایی برای محاسبه هزینه سرمایه‌گذاری انجام‌شده برای افزایش ظرفیت نیروگاه‌ها، مقدار ظرفیت فعلی نیروگاه‌ها از مقدار سرمایه‌گذاری تولید جدید انجام‌شده کم شده است. بر اساس آنچه گفته شد مدل‌سازی سطح سرمایه‌گذاری تولید به‌صورت زیر خواهد بود:

$$\min_{x, Pg, Pd, \delta} \left\{ \sum_j (x_{i \in j} - x_i) \alpha_j + \sum_{j,t} Pg_{(i \in j)t} \beta_j \rho_t \right\} \quad (2-f)$$

با توجه به:

$$\sum_{i \in n} Pg_{it} - Pd_{nt} = B_{nm} (\delta_n - \delta_m) \quad \forall t, \forall n, m \in \Omega_n : \lambda_n \quad (2-b)$$

$$x_i \leq x_i \leq \bar{x}_i \quad \forall i : \eta_i^{\min}, \eta_i^{\max} \quad (2-c)$$

$$0 \leq Pg_{it} \leq x_i \quad \forall i, t : \mu_{it}^{\min}, \mu_{it}^{\max} \quad (2-d)$$

$$r_{nt} + Pd_{nt} = Pd_{nt}^{\max} \quad \forall n, t : \sigma_n \quad (2-e)$$

$$Pd_{nt} \geq 0 \quad \forall n, t : \mu_n^D \quad (2-g)$$

$$B_{nm} (\delta_n - \delta_m) \leq f_{nm} \quad \forall t, \forall n, m \in \Omega_n : v_{nm}^{\max} \quad (2-z)$$

$$-\pi \leq \delta_n \leq \pi \quad \forall n, t : \xi_n^{\min}, \xi_n^{\max} \quad (2-h)$$

$$\delta_n = 0 \quad \forall t, \forall n = 1 : \xi_1^1 \quad (2-t)$$

$$r_{nt} + Pd_{nt} = Pd_{nt}^{max} \quad \forall n, t \quad (و-۳)$$

$$\delta_{nt} = 0 \quad \forall t, \forall n = 1 \quad (ز-۳)$$

$$\alpha_{j:(i \in j)} - \eta_i^{min} + \eta_i^{max} - \sum_t \mu_{it}^{Gmax} = 0 \quad \forall i \quad (ح-۳)$$

$$\beta_{j:(i \in j)} \cdot \rho_i - \lambda_{nt} - \mu_{it}^{Gmin} + \mu_{it}^{Gmax} = 0 \quad \forall i, t \quad (ط-۳)$$

$$\lambda_{nt} + \sigma_{nt} - \mu_{nt}^D = 0 \quad \forall n, t \quad (ی-۳)$$

$$\sum_{m \in \Omega_n} B_{nm} (\lambda_{nt} - \lambda_{mt}) + \sum_{m \in \Omega_n} B_{nm} (v_{nm}^{max} - v_{mn}^{max}) + \xi_{nt}^{max} - \xi_{nt}^{min} + (\xi_t^1)_{n=1} = 0 \quad \forall n \quad (ک-۳)$$

$$0 \leq x_i - \underline{x}_i \perp \eta_i^{min} \geq 0 \quad \forall i \quad (ل-۳)$$

$$0 \leq \bar{x}_i - x_i \perp \eta_i^{max} \geq 0 \quad \forall i \quad (م-۳)$$

$$0 \leq Pg_{it} \perp \mu_{it}^{Gmin} \geq 0 \quad \forall i, t \quad (ن-۳)$$

$$0 \leq x_i - Pg_{it} \perp \mu_{it}^{Gmax} \geq 0 \quad \forall i, t \quad (س-۳)$$

$$0 \leq Pd_{nt} \perp \mu_{nt}^D \geq 0 \quad \forall n, t \quad (ع-۳)$$

$$0 \leq f_{nm} - B_{nm} (\delta_{nt} - \delta_{mt}) \perp v_{nm}^{max} \geq 0 \quad \forall t, \forall n, m \in \Omega_n \quad (ف-۳)$$

$$0 \leq \pi + \delta_{nt} \perp \xi_{nt}^{min} \geq 0 \quad \forall n, t \quad (ص-۳)$$

۳- خطی سازی مدل

بر اساس آنچه در روابط MPEC می توان مشاهده کرد، این روابط صرفاً به دلیل وجود قیدهای مکمل، غیرخطی می باشند. همین امر می تواند منجر به غیرمحدب شدن^۹ مدل و ارائه جواب های بهینه محلی برای مسئله شود. بنابراین می بایست قیود غیرخطی توسط روش های مناسب خطی سازی شوند. موارد زیر را می توان در خصوص دلایل وجوب خطی سازی مدل بیان نمود [۱۹]:

- یکی از مشکلات موتورهای حل غیرخطی در این است که این موتورهای زمانی که قیودشان ارضا شد به ارائه پاسخ می پردازند و نیازی به آزمون ضرایب لاگرانژ نمی بینند. همین امر می تواند حتی منجر به ارائه پاسخ ناصحیح نیز بشود.
- علاوه بر آن، وجود قیود غیرخطی، ناحیه شدنی را غیر محدود می کند و بنابراین موتورهای جستجوی غیرخطی عموماً در نقاط بهینه محلی متوقف می شوند و نمی توانند یافتن نقطه بهینه مطلق را تضمین کنند. مفهوم این جمله این است که شاید هم به جواب بهینه مطلق برسند ولی نمی توان آن را تضمین نمود. در حالی که پاسخ مدل های خطی سازی شده، قطعاً بهینه مطلق است.
- در این گونه مسائل غیرخطی عموماً از یک روش مبتنی بر متغیرهای دودویی و یک مقدار صحیح مثبت بزرگ، استفاده می شود. استفاده از متغیرهای گسسته در خطی سازی، می تواند در پیچیده تر شدن حل مسئله و همچنین به وجود آمدن مشکلاتی نظیر نیاز به تنظیم مداوم پارامترها تأثیر بسزایی داشته باشد. بر همین اساس در

اقدام به خطی سازی مسئله و قیود مربوطه شده است. شکل ۲ به صورت شماتیک چنین مسئله ای را برای مدل ارائه شده نمایش می دهد. بنابراین مسئله توسعه تولید مورد بحث در بخش قبلی، با استفاده از قیود قبلی خود که بنام ULC^۷ در شکل نمایش داده شده اند و یک سری قیود جدید، به یک مسئله بهینه سازی تک سطحی قابل حل تبدیل شده است. این قیود جدید، تمامی سطح پایین تر از جمله تابع هدف مسئله را در خود دارند. علاوه بر آن، دسته قیود سطح پایین تر مسئله که به عنوان LLC^۸ شناخته می شوند، جزو قیدهای سطح بالایی در نظر گرفته شده است.



شکل ۲: ساختار مدل ارائه شده به عنوان یک MPEC

مدل تک سطحی یاد شده در رابطه (۳) برای مدل دوسطحی (۱) و (۲) ارائه شده است. در این رابطه، (۳-الف) تابع هدف سطح بالا می باشد که در اینجا هم به عنوان تابع هدف ذکر شده است. قیود قبلی سطوح بالا و پایینی نیز در این روابط عیناً دیده می شوند. علاوه بر قیدهای یاد شده، قیود (۳-ح) الی (۳-ک)، قیود مربوط به شروط KKT سطح پایینی می باشند. این دسته از قیود برای هر متغیر لایه پایینی نوشته می شوند. به عنوان مثال برای متغیر x_i با توجه به متغیرهای دوگان موجود در هریک از روابط مرتبط با این متغیر، قید (۳-ح) نوشته می شود. همچنین دسته قیود مکمل طی روابط (۳-ل) الی (۳-ص) برای قیود نامساوی سطح پایینی ارائه شده اند.

$$\min_{f, r, \xi^{LL}} \left\{ \sum_{n, m \in \Omega_n} C_{nm} \cdot (f_{nm} - \underline{f}_{nm}) + Y \sum_{n, t} r_{nt} \right\} \quad (۳-الف)$$

با توجه به:

$$\underline{f}_{nm} \leq f_{nm} \leq \bar{f}_{nm} \quad \forall n, m \in \Omega_n \quad (۳-ب)$$

$$\sum_{n, m \in \Omega_n} C_{nm} \cdot (f_{nm} - \underline{f}_{nm}) \leq \bar{C}_{line} \quad (۳-ج)$$

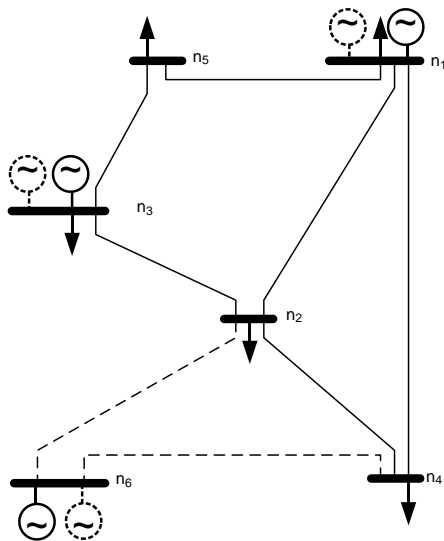
$$r_{nt} \geq 0 \quad \forall n, t \quad (۳-د)$$

$$\sum_{icn} Pg_{it} - Pd_{nt} = B_{nm} (\delta_{nt} - \delta_{mt}) \quad \forall t, \forall n, m \in \Omega_n \quad (۳-ه)$$

باشد. در مطالعه موردی دوم همان شبکه با افزایش میزان بار دوباره به نحوی بررسی می‌شود که هم توسعه شبکه انتقال و هم توسعه تولید صورت گرفته و نتایج حاصل مورد تحلیل قرار گیرد. در مطالعه موردی سوم، مدل بر روی یک شبکه بزرگ‌تر پیاده‌سازی و نتایج حاصل از آن ارائه شده است. شبکه موردنظر شبکه ۲۴ شینه IEEE-RTS است که از هر حیث شبکه مناسبی برای بررسی و تحلیل مدل پیشنهادی این مقاله می‌باشد.

۱-۴ - شبکه گارور

یکی از متداول‌ترین شبکه‌هایی که در مطالعات برنامه‌ریزی توسعه انتقال مورد استفاده قرار می‌گیرد، شبکه ۶ شینه گارور است. این شبکه دارای ۶ خط انتقال و ۵ شینه در حالت پایه خود می‌باشد. سه واحد تولیدی مسئولیت تأمین مجموع بار این شبکه به میزان ۷۶۰ مگاوات را بر عهده دارند و مجموع خطوط موجود و پیشنهادی این شبکه می‌تواند تا ۱۵ مسیر افزایش یابد. سایر اطلاعات پایه برای این شبکه در مرجع [۲۴] ذکر شده است. مدل اولیه این سیستم به همراه ظرفیت‌های تولیدی قابل توسعه و خطوط پیشنهادی جدید در شکل زیر نمایش داده شده است. در این بخش دو مطالعه موردی بر روی این شبکه انجام یافته است.



شکل ۳: شبکه تست گارور

مطالعه موردی ۱ - مقایسه نتایج حاصل از این مقاله با تجربیات دیگران بسیار ارزشمند خواهد بود. اما با توجه به ماهیت مدل و در نظر گرفتن توسعه انتقال مقید به توسعه تولید، نمی‌توان نتایج دیگر مقالات را با این مقاله مقایسه نمود. بدین معنا که هیچ‌کدام از مقالات دیگر از چنین مدلی چه به صورت ریاضی و چه به صورت الگوریتم‌های جستجو استفاده ننموده‌اند. در این قسمت سعی شده است تا با کافی قرار دادن نیاز شبکه به تولید، حالتی را مشابه مقالات توسعه انتقال معمول در دیگر مقالات مرتبط را ایجاد نماییم. اولاً با توجه به اینکه می‌بایست مقدار بار در دوره‌های زمانی مصرف در دوره‌های بار میانه و بار پایه

این مقاله از یک روش ترکیبی که مبتنی بر استفاده از متغیرهای SOS1 و یک ضریب جریمه برای متغیرهای پیوسته مثبت است، بهره گرفته شده است که از قابلیت‌های محاسباتی چشم‌گیری نسبت به روش‌های قبلی برای خطی‌سازی قیود مکمل برخوردار است [۲۲]. در صورتی که بخواهیم یک قید مکمل مانند $0 \leq a \perp b \geq 0$ را با استفاده از متغیرهای SOS1 خطی‌سازی کنیم، کافی است که آن قید با روابط زیر جایگزین شوند:

$$a \geq 0, b \geq 0$$

$$v^+ + v^- = (a+b)/2$$

$$v^+ - v^- = (a-b)/2$$

$$v^+, v^- \in \text{SOS1 variables.} \quad (4)$$

متغیرهای SOS1، متغیرهایی هستند که فقط یک درایه از بردارهای آن می‌تواند دارای عددی صحیح بوده و مابقی مقادیر آن می‌بایست صفر باشند. این متغیرها برای تمامی حل‌کننده‌های MILP قابل تعریف و استفاده می‌باشد. با این حال به منظور کاهش تعداد این متغیرها می‌توان با افزودن یک جمله جریمه در تابع هدف به نحو مناسبی به ساده‌تر کردن محاسبات کمک کرد. بنابراین می‌بایست تابع هدف مسئله خود را به صورت ذیل عوض کرد و نوع متغیرهای خطی‌سازی را به شکل زیر در نظر گرفت:

$$\min_{f, r, \Xi^{LL}} \left\{ \begin{array}{l} \sum_{n,m \in \Omega_n} C_{nm} \cdot (f_{nm} - \underline{f}_{nm}) + \gamma \sum_{n,t} r_{nt} \\ + L \sum_i (v_i^+ + v_i^-) \end{array} \right\}$$

دیگر قیود مسئله علاوه بر قیود زیر

$$a \geq 0, b \geq 0, v_i^+ \geq 0, v_i^- \geq 0$$

$$v^+ + v^- = (a+b)/2$$

$$v^+ - v^- = (a-b)/2 \quad (5)$$

اگر در جواب به دست آمده، قیدی از بین قیود مکمل ارضا نشود، می‌توان متغیرهای آن قید را از نوع SOS1 در نظر گرفت و بدین طریق از مقدار پیچیدگی مسئله تا حد زیادی کاست.

۴ - مطالعات موردی

بر اساس آنچه در بخش‌های قبل بیان شد، مدل پیشنهادی دارای مزیت حل مسئله توسعه شبکه انتقال با در نظر گرفتن توسعه تولید می‌باشد. ولی می‌بایست قابلیت‌های یادشده، در عمل نیز با ارائه نتایج قابل قبول، کارایی مدل را به نحو مناسبی مشخص کند. بدین منظور در این بخش دو شبکه استاندارد مورد مطالعه قرار گرفته است. شبکه‌های استاندارد مورد مطالعه شبکه‌های ۶ شینه گارور و ۲۴ شینه IEEE-RTS است. در مطالعه موردی اول، بررسی بر روی شبکه ۶ شینه گارور به نحوی صورت می‌پذیرد که نیازی به توسعه تولید در آن وجود نداشته

تفاوت فرض شود، مقدار بار در این دوره‌ها، به ترتیب ۶۵ و ۳۰ درصد کل بار شینه‌ها در نظر گرفته شده است. طول دوره زمانی بار پیک، میانه و پایه به ترتیب برابر با ۱۲۸۰، ۳۲۵۰ و ۴۲۳۰ ساعت از یک سال در نظر گرفته شده است. ثانیاً با توجه به اینکه مقدار پارامتر C_{nm} می‌بایست به صورت سالیانه^{۱۰} و به‌ازای هر مگاوات محاسبه گردد، این پارامتر معادل هزینه یکنواخت سالیانه هر خط در نظر گرفته شده است. این مقدار برابر ۱۰ درصد از کل هزینه خط است [۲۵] و به نسبت ظرفیت هر خط، محاسبه و جایگذاری شده است. در انتها کلیه ظرفیت‌های تولیدی موجود صفر در نظر گرفته شده و حداکثر آن‌ها تنها از یک نوع تکنولوژی بر روی مقدار ظرفیت موجود تولیدی در شبکه پایه قرار داده شده است. با این کار عملاً توسعه ظرفیتی تولیدی در شبکه انجام نمی‌شود و می‌توان صرفاً توسعه شبکه انتقال را مطالعه کرد. در مطالعات گزارش شده در مراجع قبلقبلی [۲۸-۲۶] همواره خطوط ۳-۵ و ۴-۶ به‌عنوان خطوط قابل توسعه برای مدل پایه پیشنهاد شده‌اند. بنابراین در این بخش نیز با در نظر گرفتن حداکثر پنج برابر ظرفیت نامی برای این خطوط، مطالعه انجام شده است. با در نظر گرفتن تنظیم مجدد تولید، توسعه انتقال پیشنهاد شده در جدول ۱ نمایش داده شده است. خروجی‌های جدول به این صورت است که ظرفیت خط ۳-۵ تا ۱۴۵ مگاوات (افزایشی در حدود نصف ظرفیت نامی) و خط ۴-۶ نیز تا ۳۱۰ مگاوات (ایجاد ظرفیت بیش از ۳ برابر نامی) با هزینه ۱۰۲ میلیون دلار انجام گردد. اگر این نتایج با نتایج مقالات یادشده مقایسه شود، شباهت قابل توجهی را می‌توان مشاهده کرد. مقالات یادشده پیشنهاد نموده‌اند که تعداد ۱ خط برای مسیر ۵-۳ و ۳ خط برای مسیر ۴-۶ با مجموع هزینه ۱۱۰ میلیون دلار اضافه گردد. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم‌های مبتنی بر متغیرهای گسسته، حتی در مواقعی که با مقدار اندکی تقویت ظرفیت خط مثلاً با تغییر نوع هادی‌ها می‌توان مشکل را برطرف کرد، احداث یک خط جدید را پیشنهاد می‌دهند. این مقایسه نشان می‌دهد که در صورتی که بتوان شرایط سایر مقالات را در مدل پیاده‌سازی نمود، کارایی مدل به‌وضوح قابل رؤیت خواهد بود.

نتایج حاصل از اعمال مدل و حل آن نشان می‌دهد که با توجه به ظرفیت‌های توسعه شبکه می‌بایست مقدار ۱۷۲/۸۷ مگاوات در شین ۳ و مقدار ۳۰۰ مگاوات در شین ۶ از تکنولوژی پیک سرمایه‌گذاری در بخش تولید انجام شود. جدول ۴ مقدار تولید واحدها را در بازه‌های زمانی مختلف با توجه به سرمایه‌گذاری انجام شده نشان می‌دهد. جدول مورد اشاره نشان می‌دهد، علی‌رغم اینکه سرمایه‌گذاری انجام شده بر روی تکنولوژی پیک بوده است، ولی تولید انجام شده در اکثر ساعت‌های سال (بازه‌های زمانی بار میانی و پایه) توسط ژنراتورهای پایه خواهد بود. بنابراین انتخاب سرمایه‌گذاری بر روی تکنولوژی پیک منطقی می‌باشد. از سوی دیگر مقدار ظرفیت مورد نیاز برای توسعه خطوط انتقال شبکه در جدول ۵ نمایش داده شده است. بر اساس این مقادیر در دوره برنامه‌ریزی نیازی نیست در مسیرهای ۱-۲ و ۱-۴ خط جدیدی احداث شود و صرفاً می‌توان با تقویت خطوط این مسیر ظرفیت مورد نیاز را برای شبکه تأمین کرد.

۴-۲- شبکه ۲۴ شینه IEEE-RTS

در این بخش قابلیت‌های مدل پیشنهادی در یک شبکه بزرگ‌تر که عبارت از شبکه ۲۴ شینه IEEE-RTS است، بررسی می‌شود. وضعیت فعلی این شبکه در شکل ۴ به همراه ژنراتورها و خطوط پیشنهادی نمایش داده شده است. ۹ مسیر جدید برای توسعه شبکه و ۴ محل برای نصب ژنراتور از تکنولوژی‌های مختلف پیشنهاد شده است. کلیه

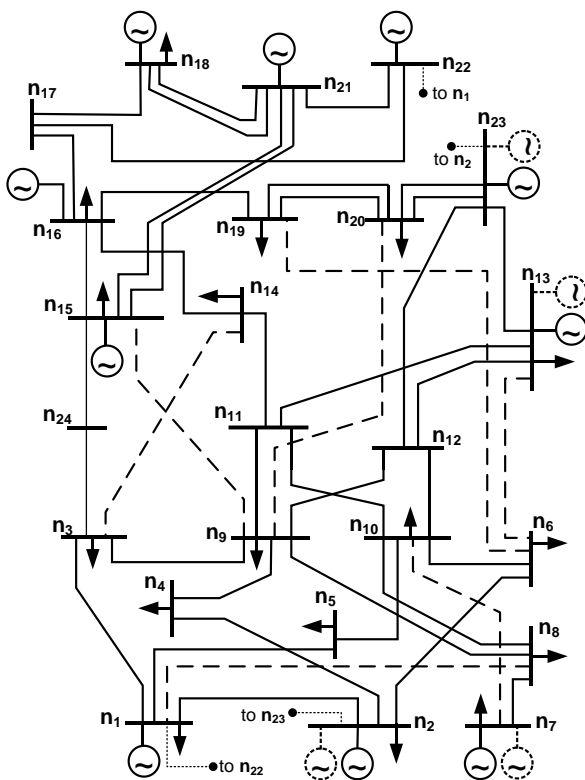
جدول ۱: ظرفیت‌های مورد نیاز برای توسعه خطوط شبکه گارور با در نظر گرفتن جابجایی تولید

ظرفیت پیشنهادی برای توسعه خطوط [MS]	هزینه توسعه
خط ۳-۵ (۱۴۵ MW)	۱۰۲
خط ۴-۶ (۳۱۰ MW)	
خط ۳-۵ (۲۰۰ MW)	۱۱۰
خط ۴-۶ (۳۰۰ MW)	

مطالعه موردی ۲- در مطالعه موردی دوم، ظرفیت‌های موجود از تکنولوژی‌های مختلف و مطابق جدول ۲ فرض شده است. همچنین فرض شده است که بار شبکه در تمامی شینه‌ها ۲ برابر شده است. هزینه یکنواخت سالیانه برای احداث هر مگاوات تولید برای

علاوه بر توسعه خطوط، ظرفیت‌هایی برای توسعه ظرفیت تولیدی از تکنولوژی‌های مختلف پیشنهاد شده است که بهینه‌ترین وضعیت توسعه همزمان تولید و خطوط را برای شبکه موردنظر نمایش می‌دهد. لازم به ذکر است که تکنولوژی مورد استفاده هر یک از نیروگاه‌های موجود بر اساس قیمت حاشیه‌ای تولید هر یک از واحدها تعیین شده است. همان‌طور که در جدول ۸ مشاهده می‌شود، عمده توسعه ظرفیت تولیدی بر روی شین ۷ و ۱۳ انجام شده است که دارای بیش‌ترین ظرفیت توسعه خطوط مربوط بودند.

مدل ارائه‌شده در نرم‌افزار GAMS^{۱۱} پیاده و از حل‌کننده مسائل خطی آمیخته با اعداد صحیح CPLEX برای تحلیل استفاده شده است. سیستم مورد استفاده برای شبیه‌سازی دارای پردازنده Intel Core i7 چهار هسته‌ای 3.4 GHz می‌باشد که از حافظه 4GB برخوردار می‌باشد. مقدار زمان صرف‌شده برای تحلیل مدل در مطالعات موردی ۱ و ۲ تقریباً برابر صفر بوده و برای شبکه ۲۴ شینه RTS زمانی در حدود ۱۰ ساعت و ۱۰ دقیقه برای حل استفاده شده است که نشان‌دهنده مقدار پیچیدگی مسئله در این حالت است.



شکل ۴: شبکه ۲۴ شینه IEEE به همراه خطوط و نیروگاه‌های پیشنهادی

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک مدل دوسطحی ریاضی با قیود بهینه‌سازی برای برنامه‌ریزی همزمان توسعه شبکه انتقال و توسعه ظرفیت تولیدی آن بدون هیچ‌گونه استفاده‌ای از روش‌های تجزیه، تقریب و یا حتی تکرار ارائه شده است. این مدل می‌تواند در شبکه‌هایی که عمده توسعه

پارامترهای شبکه بر اساس مقادیر اعلام‌شده در منابع [۲۹، ۳۰] می‌باشد. در خصوص ژنراتورهای پیشنهادی، هزینه یکنواخت سالیانه نصب برای ژنراتورهای پیک، میانه و پایه به ترتیب ۲۲، ۴۵ و ۵۵ هزار دلار و هزینه بهره‌برداری از این تکنولوژی‌ها به ترتیب ۳۱، ۲۳ و ۱۰/۵ دلار در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که هر یک از تکنولوژی‌های مختلف تولید در محل‌های پیشنهادی قابل نصب هستند و مقدار ظرفیت قابل توسعه برای هر یک از تکنولوژی‌های ذکر شده به ترتیب برابر با ۲۵۰، ۶۰۰ و ۱۰۰۰ مگاوات در نظر گرفته شده است. لیست خطوط جدید پیشنهادی به همراه مشخصات مربوط به آن‌ها در جدول ۶ ارائه شده است. پیش‌بینی شده است که بار مصرفی در سال هدف ۲۰ درصد نسبت به مقدار فعلی آن افزایش داشته باشد.

جدول ۴: تولید انجام‌شده از تکنولوژی‌های مختلف در دوره‌های

مختلف مصرف		شین ۱	شین ۳	شین ۶	
تکنولوژی	بار پیک	-	۳۶۰	۶۰۰	
تولید پایه	بار میانه	-	۳۵۷/۶۲	۶۰۰	
[MW]	بار پایه	-	۱۶۵/۰۵	۲۹۰/۹۵	
تکنولوژی	بار پیک	۶۲/۹۱	۱۷۲/۸۷	۳۰۰	
تولید پیک	بار میانه	-	-	۳۰/۳۸	
[MW]	بار پایه	-	-	-	

جدول ۵: ظرفیت‌های مورد نیاز برای توسعه خطوط در شبکه گارور

ظرفیت مورد نیاز برای توسعه		[MW]
خط ۱-۲	۳/۵۷	
خط ۱-۴	۱۳/۵۲	
خط ۲-۶	۴۷۴/۲۷	
خط ۳-۵	۲۸۰	
خط ۴-۶	۴۲۵/۷۴	

با توجه به ورودی‌های ذکر شده برای مسئله و نیز مدل‌سازی آن، نتایج ذیل برای توسعه خطوط توأم با توسعه تولید حاصل می‌شوند. جدول ۷ نتایج حاصل برای توسعه خطوط را به صورت پیوسته نمایش می‌دهد که شامل ظرفیت‌های توسعه‌ای در نظر گرفته شده برای توسعه خطوط جدید و قبلی می‌باشد. در این بین خطوط n1-n5، n7-n8 و n15-n21 جزو خطوط موجود بوده و باقی خطوط جزو خطوط جدید به حساب می‌آیند. در خصوص ظرفیت‌های مورد نیاز برای توسعه خطوط موجود به جز خط n7-n8 که نیاز به توسعه قابل توجهی را نسبت به ظرفیت قبلی خود (۱۷۵ مگاوات) دارا می‌باشد، باقی خطوط موجود را می‌توان با راهکارهایی مانند نصب ادوات FACTS، افزایش باندل‌های خط و ... توسعه ظرفیت داد به نحوی که نیازی به نصب مدار جدید نداشته باشند. در خصوص باقی خطوط پیشنهادی نیز می‌توان با نصب ظرفیت ارائه‌شده در جدول ۷ وضعیت شبکه را به نحوی توسعه داد که بتواند افزایش بار مصرفی را در سال هدف، پاسخ‌گو باشد.

گزینه‌های بیش‌تری را برای توسعه انتقال هم در پیش روی سرمایه‌گذار بگذارد. بنابراین با توجه به رشد و گسترش منابع تولید پراکنده، پیشنهاد می‌شود مدل ارائه‌شده را با ایجاد تغییراتی به مدل مناسب برای این منابع و مسائل، تبدیل نمود.

جدول ۸: خروجی موردنیاز برای توسعه ظرفیت‌های تولید شین‌های

مختلف شبکه ۲۴ شینه

تکنولوژی تولید	ظرفیت موردنیاز توسعه [MW]	شین
بار میانه	۴۹/۸	۲
پیک	۷۳/۵۵	
پیک	۱۳۵/۵۱	۷
میانه	۱۱۵/۹	۱۳
پیک	۲۵۰	

ظرفیت خطوط و ظرفیت تولید بر عهده یک مرجع می‌باشد، مورد استفاده قرار گیرد. همچنین این روش می‌تواند در سیستم‌های تجدید ساختاریافته که اپراتور مستقل سیستم متولی ارائه سیگنال سرمایه‌گذاری است، مورد استفاده قرار گیرد. مدل ارائه‌شده در این مقاله می‌تواند به‌نحو مؤثری به برنامه‌ریزان توسعه در یک سیستم کمک کند تا تصمیم‌های توسعه‌ای منطقی‌تر و واقعی‌تری را با هزینه کم‌تر اتخاذ نمایند. استفاده از متغیرهای پیوسته برای توسعه خطوط به سرمایه‌گذار اجازه می‌دهد تا خطوطی را که صرفاً نیاز به تقویت دارند، شناسایی کرده و با هزینه‌ای بسیار کم‌تر از سرمایه‌گذاری برای نصب خطوط جدید، به تقویت آن‌ها بپردازد. با توجه به اینکه مدل به‌دست‌آمده یک مدل غیرخطی می‌باشد، لذا از یک روش خطی‌سازی جدید بنام SOS1 که می‌تواند سرعت ارائه پاسخ را در این‌گونه مدل‌ها افزایش دهد، استفاده شده است. مثال‌های عددی از شبکه‌های کوچک و بزرگ‌تر برای تشریح هرچه بهتر عملکرد مدل ارائه شدند که هر یک از ویژگی‌های پیش‌بینی‌شده مدل را به‌خوبی نمایان کرده‌اند.

اندیس‌ها

n, m	اندیس شماره شینه‌ها.
t	اندیس دوره زمانی مصرف بار.
i	اندیس واحدهای تولیدی.
j	اندیس مربوط به تکنولوژی تولید مورد استفاده در واحدها.

متغیرها

f_{nm}	حداکثر توان قابل عبور از خط $n-m$ پس از توسعه ظرفیت خط [MW].
r_{nt}	مقدار بار قطع‌شده از شین n در دوره زمانی مصرف t [MW].
x_i	حداکثر ظرفیت قابل تولید سرمایه‌گذاری شده در واحد i [MW].
Pg_{it}	مقدار تولید نیروگاه i در بازه زمانی مصرف t [MW].
Pd_{nt}	مقدار مصرف انجام‌شده در شینه n در بازه زمانی مصرف t [MW].
δ_{nt}	زاویه شین n در بازه زمانی مصرف t ام.

پارامترها

C_{nm}	هزینه یکنواخت سالانه توسعه هر مگاوات ظرفیت در خط [\$/MW].
\bar{C}_{line}	حداکثر بودجه ممکن برای توسعه خطوط انتقال [\$/].
\bar{f}_{nm}	ظرفیت موجود خط انتقال خط $n-m$ [MW].
\bar{f}_{nm}	حداکثر ظرفیت قابل توسعه خط $n-m$ [MW].
B_{nm}	سوسپتانس خط $n-m$ [s].
γ	ضریب جریمه برای حداقل کردن مقدار بار قطع‌شده.
\bar{x}_i	ظرفیت نصب‌شده فعلی در واحد i [MW].
\bar{x}_i	حداکثر ظرفیت قابل توسعه در واحد i [MW].

جدول ۶: ویژگی‌های خطوط قابل نصب در شبکه ۲۴ شینه

خطوط کاندیدا	سوسپتانس خط	حداکثر ظرفیت خط [MW]	هزینه سرمایه‌گذاری سالانه [\$/]
n_1-n_{18}	۵۰۰	۱۵۰	۸۰۰۰
n_1-n_{22}	۵۰۰	۱۵۰	۸۶۶۷
n_2-n_{23}	۵۰۰	۱۵۰	۷۳۳۳
n_3-n_{14}	۵۰۰	۱۵۰	۴۶۶۷
n_6-n_{13}	۱۰۰۰	۱۵۰	۷۳۳۳
n_6-n_{19}	۵۰۰	۱۵۰	۶۰۰۰
n_7-n_{10}	۱۰۰۰	۱۵۰	۷۳۳۳
n_9-n_{15}	۵۰۰	۱۵۰	۵۳۳۳
n_9-n_{20}	۵۰۰	۱۵۰	۶۶۶۷

جدول ۷: خروجی موردنیاز برای توسعه ظرفیت‌های خطوط شبکه ۲۴ شینه

شین			
خطوط کاندیدا	حداکثر ظرفیت خط [MW]	خطوط کاندیدا	حداکثر ظرفیت خط [MW]
n_1-n_5	۰/۲۶	n_7-n_8	۱۰۳/۸۳
n_1-n_{18}	۲۹/۷۴	n_7-n_{10}	۹۴/۱۸
n_1-n_{22}	۷۱/۶۱	n_9-n_{15}	۳۵/۳۱
n_3-n_{14}	۲۳/۶۴	n_9-n_{20}	۳۱/۶۴
n_6-n_{13}	۱۴۳/۹۵	$n_{15}-n_{21}$	۲۴/۸۴

یکی از کاربردهای مهم این مدل، در مدل‌سازی مسئله و استفاده سرمایه‌گذاران تولیدات پراکنده می‌باشد. بدین معنی که با توجه به ماهیت انرژی‌های نو، این نوع از تولیدات عموماً در مناطقی قابل سرمایه‌گذاری هستند که عدم دسترسی به شبکه می‌تواند

- planning," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 22, pp. 1406-1419, 2007.
- [12] L. Wenyuan and R. Billinton, "A minimum cost assessment method for composite generation and transmission system expansion planning," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 8, pp. 628-635, 1993.
- [13] R. Hemmati, R.-A. Hooshmand, and A. Khodabakhshian, "Coordinated generation and transmission expansion planning in deregulated electricity market considering wind farms," *Renewable Energy*, vol. 85, pp. 620-630, 2016.
- [14] R. M. Sawey and C. D. Zinn, "A mathematical model for long range expansion planning of generation and transmission in electric utility systems," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 96, pp. 657-666, 1977.
- [15] B. Alizadeh and S. Jadid, "Reliability constrained coordination of generation and transmission expansion planning in power systems using mixed integer programming," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 5, pp. 948-960, 2011.
- [16] J. Aghaei, N. Amjady, A. Baharvandi, and M.-A. Akbari, "Generation and transmission expansion planning: MILP-based probabilistic model," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 29, pp. 1592-1601, 2014.
- [17] D. Pozo, E. E. Sauma, and J. Contreras, "A three-level static MILP model for generation and transmission expansion planning," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, pp. 202 - 210, 2013.
- [18] R. Hemmati, R. A. Hooshmand, and A. Khodabakhshian, "Comprehensive review of generation and transmission expansion planning," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 7, pp. 955-964, 2013.
- [19] S. Dempe, V. Kalashnikov, G. A. Pérez-Valdés, and N. Kalashnykova, *Bilevel programming problems: theory, algorithms and applications to energy networks*, Springer, 2015.
- [20] Y. Tohidi and M. R. Hesamzadeh, "Multi-Regional Transmission Planning as a Non-Cooperative Decision-Making," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 29, pp. 2662-2671, 2014.
- [21] W. Wei, F. Liu, and S. Mei, "Dispatchable region of the variable wind generation," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 3, pp. 2755-2765, 2015.
- [22] C. Guéret, C. Prins, and M. Seveaux. (2000). *Applications of Optimization With Xpress-MP*. Available: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.69.9634&rep=rep1&type=pdf>.
- [23] C. Ruiz, A. J. Conejo, and Y. Smeers, "Equilibria in an oligopolistic electricity pool with stepwise offer curves," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 27, pp. 752-761, 2012.
- [24] R. Romero, A. Monticelli, A. Garcia and S. Haffner, "Test systems and mathematical models for transmission network expansion planning," *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, vol. 149, pp. 27-36, 2002.
- α_j هزینه یکنواخت سالیانه سرمایه‌گذاری در تولید برای هر مگاوات [\$/MW].
- β_j هزینه حاشیه‌ای تولید [\$/MWh].
- ρ_t طول دوره زمانی مصرف [h].
- Pd_{nt}^{max} حداکثر بار قابل مصرف در شین n ام در دوره زمانی مصرف t ام [MW].
- ### مراجع
- [1] C. Ruiz and A. Conejo, "Robust transmission expansion planning," *European Journal of Operational Research*, vol. 242, pp. 390-401, 2015.
- [۲] رضا اعتماد، محسن کیا، محمدصادق سپاسیان، مهرداد ستایش‌نظر و محمدصادق قاضی‌زاده، «پیشنهاد یک روش جدید جهت برنامه‌ریزی توسعه تولید (GEP) بر مبنای تحلیل سلسله مراتبی فازی (FAHP)»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، دوره ۴۴، شماره ۲، صفحه ۱۰-۱، ۱۳۹۳.
- [۳] جابر ولی‌نژاد و تقی بارفروشی، «ارزیابی تأثیر مشوق‌های سرمایه‌گذاری تحت شرایط عدم قطعیت روی برنامه‌ریزی توسعه تولید در بازارهای رقابتی برق»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، دوره ۴۶، شماره ۱، صفحه ۳۶۸-۳۵۷، ۱۳۹۵.
- [4] S. Dehghan, N. Amjady, and A. Kazemi, "Two-stage robust generation expansion planning: a mixed integer linear programming model," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 29, pp. 584-597, 2014.
- [5] S. de la Torre, A. J. Conejo, and J. Contreras, "Transmission expansion planning in electricity markets," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 23, pp. 238-248, 2008.
- [6] L. P. Garcés, A. J. Conejo, R. García-Bertrand, and R. Romero, "A bilevel approach to transmission expansion planning within a market environment," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 24, pp. 1513-1522, 2009.
- [7] S. Wogrin, J. Barquín, and E. Centeno, "Capacity expansion equilibria in liberalized electricity markets: an EPEC approach," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, pp. 1531 - 1539, 2013.
- [8] A. Motamedi, H. Zareipour, M. O. Buygi, and W. D. Rosehart, "A transmission planning framework considering future generation expansions in electricity markets," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 25, pp. 1987-1995, 2010.
- [9] E. E. Sauma and S. S. Oren, "Proactive planning and valuation of transmission investments in restructured electricity markets," *Journal of Regulatory Economics*, vol. 30, pp. 261-290, 2006.
- [10] E. E. Sauma and S. S. Oren, "Economic criteria for planning transmission investment in restructured electricity markets," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 22, pp. 1394-1405, 2007.
- [11] J. H. Roh, M. Shahidehpour, and Y. Fu, "Market-based coordination of transmission and generation capacity

- [28] I. de J Silva, M. Rider, R. Romero, A. Garcia, and C. Murari, "Transmission network expansion planning with security constraints," *IEE Proceedings in Generation, Transmission and Distribution*, pp. 828-836, 2005.
- [29] C. Grigg, P. Wong, P. Albrecht, R. Allan, M. Bhavaraju, R. Billinton, *et al.*, "The IEEE reliability test system-1996. A report prepared by the reliability test system task force of the application of probability methods subcommittee," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 14, pp. 1010-1020, 1999.
- [30] R. Fang and D. J. Hill, "A new strategy for transmission expansion in competitive electricity markets," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol 18, pp. 374-380, 2003.
- [25] L. Baringo and A. J. Conejo, "Transmission and wind power investment," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 27, pp. 885-893, 2012.
- [26] S. S. Taheri, S. J. Seyed-Shenava, and M. Modiri-Delshad, "Transmission network expansion planning under wind farm uncertainties using cuckoo search algorithm," *3rd IET International Conference on Clean Energy and Technology (CEAT)*, pp. 1-6, 2014.
- [27] S. Haffner, A. Monticelli, A. Garcia, J. Mantovani, and R. Romero, "Branch and bound algorithm for transmission system expansion planning using a transportation model," *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, vol. 147, pp. 149-156, 2000.

زیر نویس ها

- ¹ Duality Theory
- ² Special Ordered Set of type 1.
- ³ Transmission System Operator (TSO)
- ⁴ Independent System Operator (ISO)
- ⁵ Strong Duality Condition
- ⁶ Complementarity Constraints
- ⁷ Upper Level Constraints
- ⁸ Lower Level Constraints
- ⁹ Non-convexity
- ¹⁰ Annualized Cost
- ¹¹ General Algebraic Modeling System