

روش نوین مدل سازی و پاسخ یابی بهینه مطلق برنامه ریزی توسعه شبکه انتقال با لحاظ شرایط پیشامد

ابوالفضل ناطقی، حسین سیفی، محمد کاظم شیخ الاسلامی و محمدصادق سپاسیان

محور زاویه در حالت نرمال (۰ یا ۱)
 Z_m^{c-} و Z_m^{c+} : مقدار متناظر با وجود تکه m در تقریب خطی
 تکه ای تلفات برای خط کاندید c به ترتیب در سمت مثبت و منفی
 محور زاویه در حالت نرمال (۰ یا ۱)
 δ_r و δ_s : زاویه ولتاژ شین ابتدایی و زاویه ولتاژ شین انتهایی خط
 در حالت نرمال (rad)
 δ_r^{ee} و δ_s^{ee} : زاویه ولتاژ شین ابتدایی و زاویه ولتاژ شین انتهایی
 خط در حالت وقوع پیشامد بر روی خط موجود ee (rad)
 δ_r^{cc} و δ_s^{cc} : زاویه ولتاژ شین ابتدایی و زاویه ولتاژ شین انتهایی
 خط در حالت وقوع پیشامد بر روی خط کاندید cc (rad)
 δ_r^g و δ_s^g : زاویه ولتاژ شین ابتدایی و زاویه ولتاژ شین انتهایی خط
 در حالت وقوع پیشامد بر روی نیروگاه g (rad)

ب) متغیرهای وابسته

P_b^G : مقدار تولید نیروگاه روی شین b در حالت نرمال (MW)
 P_b^g : مقدار تولید نیروگاه روی شین b در حالت وقوع پیشامد بر
 روی نیروگاه g (MW)
 P_b : مجموع توان های خطوط خروجی از شین b منهای مجموع
 توان های خطوط ورودی به شین b در حالت نرمال (MW)
 P_b^{ee} : مجموع توان های خطوط خروجی از شین b منهای مجموع
 توان های خطوط ورودی به شین b در حالت وقوع پیشامد بر روی
 خط موجود ee (MW)
 P_b^{cc} : مجموع توان های خطوط خروجی از شین b منهای مجموع
 توان های خطوط ورودی به شین b در حالت وقوع پیشامد بر روی
 خط کاندید cc (MW)
 P_b^g : مجموع توان های خطوط خروجی از شین b منهای مجموع
 توان های خطوط ورودی به شین b در حالت وقوع پیشامد بر روی
 نیروگاه g (MW)
 PL^e و PL^c : مقدار توان عبوری از خط موجود e و خط کاندید
 c در حالت نرمال (MW)
 PL^{ee} و PL^{cc} : مقدار توان عبوری از خط موجود e و خط کاندید
 c در حالت وقوع پیشامد بر روی خط موجود ee (MW)
 PL^{cc} و PL^{ee} : مقدار توان عبوری از خط موجود e و خط کاندید
 c در حالت وقوع پیشامد بر روی خط کاندید cc (MW)
 PL^g و PL^e : مقدار توان عبوری از خط موجود e و خط کاندید
 c در حالت وقوع پیشامد بر روی نیروگاه g (MW)
 P_{Loss}^e و P_{Loss}^c : توان عبوری از خط موجود e و خط کاندید
 c با در نظرگیری تلفات در حالت نرمال (MW)
 P_{Loss}^{ee} و P_{Loss}^{cc} : توان عبوری از خط موجود e و خط
 کاندید c با در نظرگیری تلفات در حالت وقوع پیشامد بر روی خط
 موجود ee (MW)

چکیده: برنامه ریزی توسعه شبکه انتقال، یکی از مهم ترین بخش های
 برنامه ریزی توسعه شبکه برق می باشد. تا کنون روش های مختلفی جهت انجام
 این برنامه ریزی مورد استفاده قرار گرفته اند تا بتوانند بهترین حالت توسعه شبکه
 انتقال را ارائه دهند. در این مقاله، روش های برنامه ریزی خطی ترکیبی عدد-
 صحیح (MILP) و برنامه ریزی غیر خطی ترکیبی عدد-صحیح (MINLP) جهت
 انجام مطالعات برنامه ریزی توسعه شبکه انتقال مورد استفاده قرار گرفته و روش
 جدید برنامه ریزی غیر خطی (NLP) با حذف عدد صحیح به عنوان روشی جدید
 معرفی گشته است. همچنین در انجام مسأله برنامه ریزی، حالات مختلف وقوع
 پیشامد نیز در حل مسأله وارد شده است که در مطالعات گذشته، این مهم صورت
 نگرفته بود. برای حل مسأله، ترکیب های مختلفی از توابع هدف شامل هزینه
 توسعه، هزینه بهره برداری و هزینه تلفات مورد توجه قرار گرفته و نتایج حالات
 مختلف با یکدیگر مقایسه شده اند. برای بررسی امکان دسترسی به نقطه بهینه
 مطلق در مسأله حاضر، روش حل BARON^۴ به عنوان روش حل مناسب مورد
 استفاده قرار گرفته است. روش های ارائه شده بر روی شبکه نمونه ۶ شینه کارور و
 شبکه ۱۱۸ شینه IEEE اعمال شده است. نتایج به دست آمده، نشان دهنده امکان
 دسترسی به نقطه بهینه مطلق با دقت و سرعت بالا با استفاده از روش های
 مدل سازی MINLP و NLP است. همچنین مشاهده می شود که با در نظرگیری
 حالات وقوع پیشامد، نتایج توسعه شبکه، دقیق تر و صحیح تر خواهد بود.

کلید واژه: روش های مدل سازی MILP، MINLP و NLP، وقوع پیشامد،
 روش حل BARON.

علائم اختصاری

الف) متغیرهای اصلی

L^c : مقدار متناظر با انتخاب خط کاندید c (۰ یا ۱)
 N^c : تعداد خطوط در کریدور c بین ۱ تا N_{Lmax}
 Z_m^{e-} و Z_m^{e+} : مقدار متناظر با وجود تکه m در تقریب خطی
 تکه ای تلفات برای خط موجود e به ترتیب در سمت مثبت و منفی

این مقاله در تاریخ ۴ بهمن ماه ۱۳۹۰ دریافت و در تاریخ ۲۲ تیر ماه ۱۳۹۱
 بازنگری شد.
 ابوالفضل ناطقی، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تربیت مدرس، تهران،
 (email: a.nateghi@modares.ac.ir).
 حسین سیفی، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تربیت مدرس، تهران،
 (email: seifi_ho@modares.ac.ir).
 محمد کاظم شیخ الاسلامی، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تربیت مدرس،
 تهران، (email: aleslam@modares.ac.ir).
 محمدصادق سپاسیان، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعت آب و برق
 شهید عباسپور، تهران، (email: sepasian@pwut.ac.ir).

1. Mixed Integer Linear Programming
2. Mixed Integer Non-Linear Programming
3. Non-Linear Programming
4. Branch and Reduce Optimization Navigator

۱- مقدمه

برنامه‌ریزی توسعه شبکه انتقال^(۱) (TEP)، یکی از مهم‌ترین بخش‌های برنامه‌ریزی توسعه شبکه برق است. نتایج این برنامه‌ریزی مشخص‌کننده زمان، مکان و نوع خطوط انتقال جهت نصب در سال‌های آتی سیستم می‌باشد.

تا کنون مطالعات زیادی در زمینه برنامه‌ریزی توسعه شبکه انتقال صورت گرفته‌اند که در یک نوع تقسیم‌بندی می‌توان آنها را به دو نوع مطالعه در محیط انحصاری و یا محیط تجدید ساختار یافته تقسیم نمود. در این مقاله، روش ارائه‌شده جهت استفاده در سیستم‌های نوع سنتی می‌باشد و برنامه‌ریزی توسعه شبکه انتقال با فرض معلوم بودن نتیجه توسعه بخش تولید انجام گرفته است. در یک نوع تقسیم‌بندی دیگر، برنامه‌ریزی توسعه شبکه به دو صورت استاتیکی و دینامیکی انجام می‌پذیرد. در مقاله حاضر، مطالعه انجام‌شده از نوع استاتیکی بوده و معیار زمان در محاسبات وارد نشده است.

جهت انجام مطالعات TEP، روش‌ها، مدل‌ها و تکنیک‌های مختلف همراه با معیارهای متفاوتی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. مسئله TEP همواره به‌عنوان یک مسئله بهینه‌سازی مورد توجه بوده است و جهت حل آن در حالت کلی سه دسته روش‌های ریاضیاتی، روش‌های ابتکاری و روش‌های فراابتکاری موسوم به روش‌های ترکیبی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. از جمله روش‌های ریاضیاتی می‌توان به استفاده از روش برنامه‌ریزی خطی (LP) [۱]، روش برنامه‌ریزی ترکیبی عدد صحیح (MILP) [۲] و [۳]، تجزیه بندر [۴]، تجزیه سلسله مراتبی [۵]، روش نقطه درونی [۶] و الگوریتم شاخه و کران [۷] و [۸] اشاره کرد. از میان روش‌های ابتکاری و فراابتکاری می‌توان به روش آنالیز حساسیت [۹]، روش پیشرو-پسرو [۱۰] و روش‌های هوشمند مانند سیستم‌های خبره [۱۱]، الگوریتم ژنتیک [۱۲] و [۱۳]، آبرازی فولاد [۱۴]، الگوریتم جستجوی ممنوعه [۱۵]، الگوریتم تکاملی دیفرانسیلی [۱۶] و تئوری فازی [۱۷] اشاره کرد. یکی از مزایای روش‌های ابتکاری و فراابتکاری، امکان دسترسی به یک جواب ممکن در مدت زمان معقول می‌باشد. به عبارت دیگر در این گونه روش‌ها، مدت زمان حل مسأله برای شبکه‌های بزرگ، خیلی زیاد نبوده و دسترسی به یک جواب ممکن (که الزاماً بهینه مطلق نیست) امکان‌پذیر می‌باشد. در عین حال، عدم تضمین دسترسی به نقطه بهینه مطلق، یکی از نقاط ضعف این گونه روش‌ها به شمار می‌رود. از طرف دیگر، در حل مسأله برای شبکه‌های بزرگ با استفاده از روش‌های ریاضیاتی، همگرایی حل مسأله به‌عنوان یکی از مشکلات این گونه روش‌ها در دسترسی به یک جواب بهینه (هر چند غیر مطلق) به شمار می‌رود. مقایسه بسیاری از روش‌های اشاره‌شده با جزئیات بیشتر و نیز مزایا و معایب آنها به‌صورت مناسبی در [۱۸] آورده شده است.

جهت حل مسأله TEP با استفاده از روش‌های ریاضیاتی، با توجه به خاصیت انتخاب یا عدم انتخاب خطوط کاندید، این برنامه‌ریزی ذاتاً به‌صورت عدد صحیح می‌باشد. با توجه به این مطلب، مدل‌سازی این مسأله به‌صورت MINLP توسط مطالعات مختلف مورد استفاده قرار گرفته است [۱۹]. این در حالی است که در مدل‌های قدیمی‌تر، به علت عدم امکان در نظرگیری عدد صحیح، این مسأله تنها به‌صورت LP قابل مدل‌سازی بود [۱]. در مدل‌های جدیدتر و با ارائه ایده‌های جدیدتر، قابلیت تبدیل مدل‌سازی MINLP به مدل‌سازی MILP مطرح گردید [۲] و [۳].

P_{Loss}^{cc} و P_{Loss}^{cc} : توان عبوری از خط موجود e و خط کاندید c با در نظرگیری تلفات در حالت وقوع پیشامد بر روی خط کاندید cc (MW)

P_{Loss}^{ss} و P_{Loss}^{ss} : توان عبوری از خط موجود e و خط کاندید c با در نظرگیری تلفات در حالت وقوع پیشامد بر روی نیروگاه g (MW)

$Loss^c$ و $Loss^e$: تلفات توان عبوری از خط موجود e و خط کاندید c در حالت نرمال (MW)

$Loss^{ee}$ و $Loss^{cc}$: تلفات توان عبوری از خط موجود e و خط کاندید c در حالت وقوع پیشامد بر روی خط موجود ee (MW)

$Loss^{cc}$ و $Loss^{cc}$: تلفات توان عبوری از خط موجود e و خط کاندید c در حالت وقوع پیشامد بر روی خط کاندید cc (MW)

$Loss^{ss}$ و $Loss^{ss}$: تلفات توان عبوری از خط موجود e و خط کاندید c در حالت وقوع پیشامد بر روی نیروگاه g (MW)

ج) مقادیر ثابت

CL^e : هزینه احداث خط کاندید c (\$)

C_{loss} : هزینه تلفات خطوط (\$/MW)

λ_b^G : هزینه تولید نیروگاه روی شین b (\$/MW)

P_b^D : مقدار بار روی شین b (MW)

B^e : مقدار کنداکتانس خط کاندید c (p.u.)

B^e : مقدار کنداکتانس خط موجود e (p.u.)

G^c : مقدار هدایت خط کاندید c (p.u.)

G^e : مقدار هدایت خط موجود e (p.u.)

S_m : مقدار شیب تکه m در تقریب خطی تکه‌ای تلفات (MW/rad)

α_m : مقدار زاویه تکه m در تقریب خطی تکه‌ای تلفات (MW/rad)

PL_{max}^c و PL_{max}^e : مقدار ماکزیمم توان مجاز عبوری از خط موجود e و خط کاندید c

PL_b^{Gmin} و PL_b^{Gmax} : مقدار ماکزیمم و مینیمم توان تولیدی نیروگاه

متصل به شین b

P_b^{Gmin} و P_b^{Gmax} : مقدار ماکزیمم و مینیمم تولید نیروگاه روی

شین b (MW)

N_{max} : ماکزیمم تعداد خطوط کاندید در هر کریدور

د) مجموعه‌ها

ω_n^G : مجموعه نیروگاه‌های متصل به شین n

ω_n^D : مجموعه بارهای متصل به شین n

ϕ_n : مجموعه شین‌های متصل به شین n

π_n^e : مجموعه خطوط موجود متصل به شین n

π_n^c : مجموعه خطوط کاندید متصل به شین n

N : مجموعه شین‌های شبکه

E : مجموعه خطوط موجود شبکه

C : مجموعه خطوط کاندید شبکه

γ : مجموعه تکه‌ها در تقریب خطی تکه‌ای تلفات

K : عدد ثابت برابر با ۱۴

بخش ۳ نحوه مدل‌سازی شرایط وقوع پیشامد در این حالات آمده است. بخش ۴ به روش‌های حل مسأله جهت دستیابی به نقطه بهینه مطلق شامل BARON، OQNLP و LGO اختصاص داده شده است. در بخش ۵ برای بررسی صحت مدل‌های ارائه‌شده، این مدل‌ها بر روی شبکه آزمایشی ۶ شینه گارور و شبکه ۱۸ شینه IEEE اعمال شده و برنامه‌ریزی توسعه این شبکه انجام شده و همچنین نتایج حاصل از این برنامه‌ریزی ارائه و تحلیل این نتایج در ادامه آورده شده است. با توجه به نتایج به‌دست آمده حاصل از مدل ارائه‌شده در این مقاله، جمع‌بندی و نتیجه‌گیری کلی نیز در بخش ۶ آمده است.

۲- مدل‌سازی و فرمول‌بندی مسأله

در حل هر مسأله بهینه‌سازی توسط روش‌های ریاضیاتی، باید متغیرهای مسأله مشخص شده و بر حسب این متغیرها، تابع هدف و قیود مسأله مشخص گردند. در حل مسأله TEP، تابع هدف بسته به پارامترهای مورد نظر در برنامه‌ریزی متفاوت خواهد بود و می‌تواند فاکتورهای مختلفی مانند هزینه، قابلیت اطمینان و ... را شامل گردد.

در مقاله حاضر برای فرمول‌بندی مسأله، حالت‌های مختلف مسأله ناشی از در نظرگیری ترکیبات توابع هدف، قیود و متغیرهای مسأله مورد بررسی قرار گرفته‌اند که این حالات در جدول ۱ نشان داده شده‌اند. دسته‌بندی این حالات بر اساس مجموعه توابع مورد استفاده در تابع هدف شامل هزینه توسعه، هزینه بهره‌برداری و هزینه تلفات، حالت‌های مختلف قیود مسأله شامل در نظرگیری یا عدم در نظرگیری تلفات در پخش بار و حالت‌های مختلف متغیرها شامل در نظرگیری تولید نیروگاه‌ها به‌صورت معلوم یا مجهول می‌باشد.

در جدول ۱، حرف A برای نشان‌دادن حالات بدون در نظرگیری وقوع پیشامد و حرف B برای نشان‌دادن حالات با در نظرگیری وقوع پیشامد استفاده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، از مجموع ۱۶ حالت جدول، ۵ حالت حذف شده‌اند. حالت‌های A6، A8، A14 و A16 به علت در نظرگیری هزینه بهره‌برداری در تابع هدف و ثابت فرض کردن تولید نیروگاه‌ها، حالات غیر منطقی بوده و حذف شده‌اند. برای مثال در حالت A6، هزینه بهره‌برداری در تابع هدف وارد شده، در حالی که مقدار تولید نیروگاه‌ها معلوم فرض شده است. بنابراین این حالت همان نتایج حالت ۱ را به ما خواهد داد و تکراری می‌باشد. در حالت A15 نیز به علت این که تلفات در پخش بار وارد شده است، مقدار آن در تولید نیروگاه‌ها وارد شده و به‌صورت هزینه بهره‌برداری در تابع هدف وارد می‌شود. لذا دیدن هزینه تلفات به‌صورت جداگانه در تابع هدف صحیح نمی‌باشد و این حالت نیز حذف شده است. در ادامه، جهت نوشتن معادلات مسأله TEP در حالات مختلف مدل‌سازی، حالت‌های A13 و B1 از نمونه حالات جدول ۱ مورد بررسی قرار می‌گیرد. در مواردی که توضیح مسأله در رابطه با در نظرگیری تلفات در پخش بار مد نظر باشد، حالت A12 مورد بحث قرار می‌گیرد. سایر حالات این جدول با توجه به این حالت قابل استخراج می‌باشند.

۲-۱ مدل‌سازی به‌صورت MINLP

در مدل‌های اولیه ارائه‌شده برای حل مسأله TEP توسط روش‌های ریاضیاتی، این مدل‌ها به‌صورت LP بودند و امکان واردکردن "انتخاب یا عدم انتخاب یک خط" به‌صورت عدد صحیح وجود نداشت [۲۲]. در این نوع مدل‌سازی، با در نظرگیری متغیر مربوط به انتخاب خطوط کاندید به‌صورت یک عدد طبیعی، این مقادیر پس از حل مسأله به نزدیک‌ترین عدد صحیح گرد می‌شدند. با بروز روش‌های حل ریاضیاتی با وجود متغیر

در این مراجع، با وجود این که خاصیت غیر خطی مسأله حذف گردید، اما با توجه به مدل‌سازی خطی-تکه‌ای تلفات، دقت مسأله پایین‌تر آمده است. در مقاله حاضر، با تغییر نوع در نظرگیری خاصیت عدد صحیح "انتخاب یا عدم انتخاب خطوط کاندید" به‌صورت عدد حقیقی، مدل جدیدی برای مسأله به‌صورت NLP ارائه شده و دقت و سرعت حل مسأله بسیار بالاتر رفته است.

با توجه به این که مدل‌های LP نسبت به NLP امکان دسترسی به نقاط بهینه محلی بهتری را فراهم می‌کردند، تا کنون بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. لذا مدل NLP ارائه‌شده در این مقاله زمانی مفید خواهد بود که قابلیت دسترسی به نقاط بهینه بهتری را نسبت به LP فراهم کند. روش حل مورد استفاده برای مدل‌های LP ارائه‌شده، تا کنون، عموماً CPLEX بوده است که دسترسی به نقطه بهینه مطلق را تضمین نمی‌کند [۲] و [۳]. لذا در این مقاله از روش‌های حلی استفاده شده که قابلیت دسترسی به نقطه بهینه مطلق را فراهم نمایند. از جمله بهترین این روش‌ها می‌توان به روش‌های BARON، OQNLP و LGO اشاره کرد. در مقاله حاضر، حل مسأله TEP توسط این سه روش برای حالت‌های مختلف مدل‌سازی MILP، MINLP و NLP مورد توجه قرار گرفته و با توجه به قابلیت‌های روش BARON، این روش برای تمامی حالت‌های حل مسأله مورد استفاده قرار گرفته است.

در مدل‌های ریاضیاتی ارائه‌شده، حل مسأله تنها برای حالت نرمال انجام شده و به عبارت دیگر، شرایط وقوع پیشامد در این مدل‌ها مورد توجه قرار نگرفته است [۲] و [۳]. این در حالی است که در نظرگیری شرایط وقوع پیشامد، تأثیر قابل توجهی در نتایج حل مسأله TEP دارد و می‌تواند ترکیب خطوط انتخاب‌شده برای توسعه شبکه انتقال را تحت تأثیر قرار دهد [۲۰] و [۲۱]. در این مقاله، علاوه بر مدل‌سازی حالت نرمال، مدل‌سازی شرایط وقوع پیشامد نیز در حالت‌های مختلف MILP، MINLP و NLP ارائه شده است. در واقع در این حالت، حل مسأله TEP با در نظرگیری هم‌زمان حالت نرمال و شرایط وقوع پیشامد انجام می‌پذیرد. جهت بررسی میزان تأثیر این موضوع، حل مسأله در حالات مختلف بدون در نظرگیری و با در نظرگیری شرایط وقوع پیشامد ارائه شده است.

با توجه به مطالب گفته‌شده، نوآوری‌های ارائه‌شده در این مقاله به‌ترتیب اشاره در آن به‌صورت زیر می‌باشند:

- اصلاح روش MILP ارائه‌شده جهت دسترسی به سرعت حل بالاتر.
- ارائه مدل‌سازی جدید مسئله TEP به‌صورت NLP علاوه بر MILP و MINLP و حذف عدد صحیح از مدل‌سازی.
- ارائه معادلات جدید جهت در نظرگیری شرایط وقوع پیشامد در تمامی مدل‌های فوق.
- به‌کارگیری روش‌های حل مناسب جهت دستیابی به نقطه بهینه مطلق در تمامی مدل‌های فوق.

ترکیبی از نوآوری‌های فوق به‌گونه‌ای در مسأله وارد شده است که با در نظرگیری همه حالت‌های وقوع پیشامد در مسأله TEP و با استفاده از یک روش حل مناسب، دسترسی به نقطه بهینه مطلق امکان‌پذیر گردد. حال بسته به مدل‌سازی مورد استفاده MILP، MINLP یا NLP، سرعت دستیابی به نقطه بهینه و دقت جواب به‌دست آمده تغییر می‌کند.

در این مقاله همان‌گونه که ذکر شد، برنامه‌ریزی توسعه شبکه به‌صورت استاتیکی مورد توجه قرار گرفته و با لحاظ شرایط وقوع پیشامد، حل مسئله انجام گرفته است. به همین منظور در بخش ۲ مدل‌سازی مسئله TEP در سه حالت MINLP، MILP و NLP ارائه شده است. در

جدول ۱: تقسیم‌بندی حالات مختلف بررسی مسئله TEP.

نام حالت	تابع هدف	قیود	متغیرها
بدون در نظرگیری وقوع پیشامد	هزینه توسعه	در نظرگیری تلفات	تولید نیروگاه‌ها معلوم (F)/مجهول (V)
با در نظرگیری وقوع پیشامد	هزینه بهره‌برداری	در پخش بار	
A1	Y	N	V
A2	Y	N	F
A3	Y	N	V
A4	Y	N	F
A5	Y	N	V
A6	Y	N	F
A7	Y	N	V
A8	Y	N	F
A9	Y	Y	V
A10	Y	Y	F
A11	Y	Y	V
A12	Y	Y	F
A13	Y	Y	V
A14	Y	Y	F
A15	Y	Y	V
A16	Y	Y	F

محاسبه توان‌های عبوری از کریدورها، (۶) و (۷) نشان‌دهنده محدودیت توان عبوری از خطوط موجود و کاندید، (۸) نشان‌دهنده محدودیت تولید توان در نیروگاه‌ها و (۹) نیز نشان‌دهنده تعداد خطوط در هر کریدور است. با دقت در روابط فوق می‌توان مشاهده کرد که به علت حضور (۴) و (۵)، مسأله از نوع غیر خطی می‌باشد. با استفاده از تقریب رابطه سینوسی زاویه برابر با خود زاویه و نیز وارد کردن تلفات در پخش بار (برای حالت A12)، (۳) تا (۵) به شکل زیر در می‌آیند [۳]

$$P_n = \sum_{e \in \pi_n^e} P_{Loss}^e - \sum_{c \in \pi_n^c} P_{Loss}^c, \quad \forall n \in N \quad (10)$$

$$P_{Loss}^e = PL^e + Loss^e, \quad \forall e \in E \quad (11)$$

$$P_{Loss}^c = PL^c + Loss^c, \quad \forall c \in C \quad (12)$$

$$PL^e = B^e (\delta_r - \delta_s), \quad \forall e \in E \quad (13)$$

$$PL^c = B^c (\delta_r - \delta_s) N_L L^c, \quad \forall c \in C \quad (14)$$

$$Loss^e = \frac{1}{\gamma} G^e (\delta_r - \delta_s)^2, \quad \forall e \in E \quad (15)$$

$$Loss^c = \frac{1}{\gamma} G^c (\delta_r - \delta_s)^2 L^c, \quad \forall c \in C \quad (16)$$

۲-۲ مدل‌سازی به صورت MILP

برای مدل‌سازی مسأله به صورت MILP و حل مشکل غیر خطی بودن برخی روابط، از راه حل ارائه شده در [۲] کمک گرفته شده است. با توجه به این راه حل، می‌توان تساوی (۱۴) را به دو نامساوی متناظر با آن تبدیل کرد، به گونه‌ای که حاصل ضرب دو متغیر حذف شود. با استفاده از این راه حل، (۱۴) به صورت (۱۷) تا (۲۰) تغییر می‌یابد (e در (۲۰) به c تبدیل شد)

$$PL^c - B^c (\delta_r - \delta_s) \leq (1-L^c)K, \quad \forall c \in C \quad (17)$$

$$-(1-L^c)K \leq PL^c - B^c (\delta_r - \delta_s), \quad \forall c \in C \quad (18)$$

$$PL^c \leq L^c K, \quad \forall c \in C \quad (19)$$

عدد صحیح، امکان مدل‌سازی مسأله TEP به صورت MINLP به وجود آمد. در ادامه به نحوه مدل‌سازی اشاره شده پرداخته می‌شود. همان طور که در جدول ۱ اشاره شد، در حالت A13، تابع هدف شامل هزینه توسعه، هزینه بهره‌برداری و هزینه تلفات می‌باشد و مقادیر تولید نیروگاه‌ها مجهول فرض می‌شوند. معادلات (۱) تا (۸ یا ۹)، تابع هدف و قیود مسأله TEP را برای این حالت نشان می‌دهند

$$\begin{aligned} & \text{Minimize} \\ & L^e, P_b^G, P_n, P_{Loss}^e, P_{Loss}^c, PL^e, PL^c, Loss^e, Loss^c, \delta_r^e, \delta_s^e, \delta_r^c, \delta_s^c \end{aligned} \quad (1)$$

$$\sum_{c \in C} N_L L^c CL^c$$

$$+ \mu \left(\sum_{b \in N} P_b^G \lambda_b^G + C_{loss} \left[\sum_{c \in C} Loss^c + \sum_{e \in E} Loss^e \right] \right)$$

Subject to

$$\sum_{b \in \omega_n^c} P_b^G - \sum_{b \in \omega_n^D} P_b^D - P_n = 0, \quad \forall n \in N \quad (2)$$

$$P_n = \sum_{e \in \pi_n^e} PL^e - \sum_{c \in \pi_n^c} PL^c, \quad \forall n \in N \quad (3)$$

$$PL^e = B^e \sin(\delta_r - \delta_s), \quad \forall e \in E \quad (4)$$

$$PL^c = B^c \sin(\delta_r - \delta_s) N_L L^c, \quad \forall c \in C \quad (5)$$

$$-PL_{max}^e \leq PL^e \leq PL_{max}^e, \quad \forall e \in E \quad (6)$$

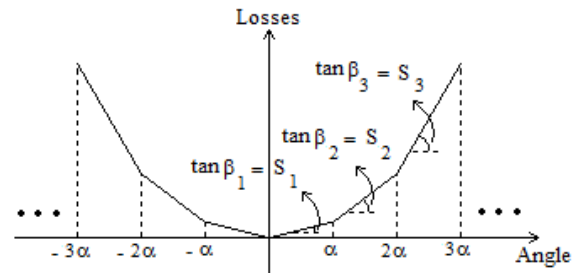
$$-PL_{max}^c \leq PL^c \leq PL_{max}^c, \quad \forall c \in C \quad (7)$$

$$P_b^{G \min} \leq P_b^G \leq P_b^{G \max}, \quad \forall b \in N \quad (8)$$

$$0 \leq N^c \leq N_{max}^c, \quad \forall c \in C \quad (9)$$

رابطه (۱) نشان‌دهنده ترکیب تابع هدف شامل سه بخش از هزینه‌ها است. بخش اول نشان‌دهنده هزینه توسعه خطوط، بخش دوم نشان‌دهنده هزینه بهره‌برداری و بخش سوم نشان‌دهنده هزینه تلفات بوده و ضریب μ در این رابطه، ضریب تبدیل هزینه‌ها است. رابطه (۲)، قید برابری توان‌های ورودی و خروجی در هر شین را نشان می‌دهد. روابط (۳) تا (۵) مربوط به

رابطه (۲۱) نحوه محاسبه تلفات را برای خطوط موجود با استفاده از تقریب خطی-تکه‌ای مطابق شکل ۱ نشان می‌دهد. مقدار داخل سیگمای اول برابر با حاصل‌ضرب شیب منحنی در هر تکه در مقدار زاویه هر تکه در مقدار متناظر با وجود هر تکه (۰ یا ۱) می‌باشد. مقدار داخل سیگمای دوم نیز برابر با همین مقدار برای زاویه منفی را نشان می‌دهد. با توجه به این که تفاضل زوایای شین‌های دو طرف خط می‌تواند مثبت یا منفی باشد، رابطه فوق به صورت مجموع دو سیگما به کار رفته است. رابطه (۲۶) برابری تفاضل زوایای شین‌های دو طرف خط با مجموع زوایای خطی-تکه‌ای را نشان می‌دهد. رابطه (۲۸) نیز این اجبار را به وجود می‌آورد که یا زوایای تکه‌ای سمت مثبت و یا سمت منفی منحنی انتخاب شوند. روابط (۳۰) و (۳۱) نیز موجب می‌گردند که مجموعه تکه‌های متوالی و به سمت مبدأ انتخاب شوند.



شکل ۱: تقریب خطی-تکه‌ای تلفات خطوط انتقال.

$$-L^c K \leq PL^c, \quad \forall c \in C \quad (20)$$

برای مدل‌سازی (۱۵) و (۱۶) جهت استفاده در MILP نیز از تقریب خطی-تکه‌ای ارائه‌شده در [۳] استفاده شده است. البته در مقاله حاضر به نحوه واردکردن تقریب خطی-تکه‌ای تلفات در برنامه‌ریزی MILP با جزئیات بیشتری پرداخته شده است. همان طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، در صورتی که تفاضل زاویه ولتاژ شین‌های دو طرف خط را با Angle نشان دهیم، این زاویه به زوایای مساوی α و تعداد d تکه تقسیم می‌شود. با توجه به این که تفاضل زاویه شین‌های دو طرف خط می‌تواند مثبت یا منفی باشد، محور افقی این شکل دارای دو مجموعه زوایای مثبت و منفی است. شیب هر تکه در شکل با S_i نشان داده شده و برابر با $(2i-1)\alpha$ می‌باشد [۳].

روابط (۲۱)، (۲۶)، (۲۸)، (۳۰) و (۳۱) نحوه محاسبه تلفات توان عبوری از خط را برای خطوط موجود نشان می‌دهند. سایر روابط نیز نحوه محاسبه آن را برای خطوط کاندید نشان می‌دهند (پرانتز (۲۶) و (۲۷) حذف شد)

$$Loss^e = G^e \left[\sum_{m \in \gamma} S_m \alpha z_m^{e+} + \sum_{m \in \gamma} S_m \alpha z_m^{e-} \right], \quad \forall e \in E \quad (21)$$

$$Loss^c - G^c \left[\sum_{m \in \gamma} S_m \alpha z_m^{c+} + \sum_{m \in \gamma} S_m \alpha z_m^{c-} \right] \leq (1-L^c)K, \quad \forall c \in C \quad (22)$$

$$-(1-L^c)K \leq Loss^c - G^c \left[\sum_{m \in \gamma} S_m \alpha z_m^{c+} + \sum_{m \in \gamma} S_m \alpha z_m^{c-} \right], \quad \forall c \in C \quad (23)$$

$$Loss^c \leq L^c K, \quad \forall c \in C \quad (24)$$

$$-L^c K \leq Loss^c, \quad \forall e \in E \quad (25)$$

$$\delta_r - \delta_s = \sum_{m \in \gamma} \alpha z_m^{e+} - \sum_{m \in \gamma} \alpha z_m^{e-}, \quad \forall e \in E \quad (26)$$

$$\delta_r - \delta_s = \sum_{m \in \gamma} \alpha z_m^{c+} - \sum_{m \in \gamma} \alpha z_m^{c-}, \quad \forall c \in C \quad (27)$$

$$z_m^{e+} + z_m^{e-} \leq 1, \quad \forall e \in E, \forall m \in \gamma \quad (28)$$

$$z_m^{c+} + z_m^{c-} \leq 1, \quad \forall c \in C, \forall m \in \gamma \quad (29)$$

$$z_{m+1}^{e+} \leq z_m^{e+}, \quad \forall e \in E, \forall m \in \gamma \quad (30)$$

$$z_{m+1}^{e-} \leq z_m^{e-}, \quad \forall e \in E, \forall m \in \gamma \quad (31)$$

$$z_{m+1}^{c+} \leq z_m^{c+}, \quad \forall c \in C, \forall m \in \gamma \quad (32)$$

$$z_{m+1}^{c-} \leq z_m^{c-}, \quad \forall c \in C, \forall m \in \gamma \quad (33)$$

محاسبه تلفات برای خطوط کاندید همانند این محاسبات برای خطوط موجود انجام می‌گیرد، با این تفاوت که روابط تساوی مشابه با (۱۷) تا (۲۰) به روابط نامساوی معادلشان تبدیل می‌شوند.

با در نظرگیری تمامی روابط اشاره‌شده، می‌توان دید که تعداد روابط و نیز تعداد متغیرها در حالت در نظرگیری تلفات به صورت قابل توجهی افزایش می‌یابد. یکی از راه‌های کاهش تعداد روابط و متغیرهای مسئله، تلفیق روابط با مفهوم یکسان است که در [۳] مورد توجه قرار نگرفته است. با دقت در روابط اشاره‌شده می‌توان مشاهده کرد مجموعه (۱۹)، (۲۰)، (۲۴) و (۲۵) به‌ازای همه خطوط کاندید می‌توانند حذف شده و با تلفیق در (۷) به صورت (۳۴) نوشته شوند. چرا که با وجود (۱۲)، در صورتی که خط کاندیدی انتخاب نشود، توان عبوری از آن و تلفات آن خط نیز برابر صفر خواهند شد. با توجه به این نکته، افزایش قابل توجهی در سرعت حل مسئله به روش MILP به وجود می‌آید

$$-PL_{\max}^c L^c \leq PL^c \leq PL_{\max}^c L^c, \quad \forall c \in C \quad (34)$$

۳-۲ مدل‌سازی به صورت NLP

با توجه به این که در مسئله TEP، برنامه‌ریزی انتخاب یا عدم انتخاب خطوط کاندید مد نظر است، مسئله ذاتاً از جنس عدد صحیح می‌باشد. این امر موجب آن گشته است که همواره حل این مسئله به صورت ترکیبی عدد صحیح (MI) مورد توجه قرار گرفته و مدل‌سازی آن به صورت MILP و یا MINLP انجام گیرد. هر چند در مطالعات قدیمی‌تر به علت عدم امکان در نظرگیری عدد صحیح در برنامه‌ریزی، متغیر مربوطه به صورت عدد حقیقی در نظر گرفته شده و پس از حل مسئله، از روش گردکردن به نزدیک‌ترین عدد صحیح استفاده می‌شد [۱].

در مقاله حاضر، روشی ارائه شده است تا بر اساس آن بدون لطمه‌زدن به پایه‌های مسئله TEP، متغیر اشاره‌شده به‌جای عدد صحیح گسسته به صورت یک عدد طبیعی پیوسته در نظر گرفته شود. برای این منظور به‌جای در نظرگیری متغیر به صورت عدد صحیح، روابط زیر به مجموعه روابط مسئله اضافه می‌شوند

$$(L^c)^+ - L^c = 0, \quad \forall c \in C \quad (35)$$

$$0 \leq L^c \leq 1, \quad \forall c \in C \quad (36)$$

مجموعه دو معادله فوق تنها در نقاط ۰ و ۱ پاسخ دارد و موجب می‌گردند که پارامتر L^c تنها در نقاط ۰ و ۱ قرار گیرند. نکته مهم قابل ذکر آن است که با توجه به غیر خطی بودن روابط فوق، این معادلات برای مدل‌سازی MINLP و تبدیل آن به NLP قابل استفاده می‌باشند. یکی از مزایای حذف متغیر عدد صحیح، پیوسته‌نمودن فضای جستجو است و لذا

$${}^{ee}PL^c - B^c({}^{ee}\delta_r - {}^{ee}\delta_s) \leq (1-L^c)K \quad (40)$$

$$, \forall c \in C, \forall ee \in Cont_e$$

$$-(1-L^c)K \leq {}^{ee}PL^c - B^c({}^{ee}\delta_r - {}^{ee}\delta_s) \quad (41)$$

$$, \forall c \in C, \forall ee \in Cont_e$$

$${}^{ee}PL^c \leq L^c K, \forall c \in C, \forall ee \in Cont_e \quad (42)$$

$$-L^c K \leq {}^{ee}PL^c, \forall c \in C, \forall ee \in Cont_e \quad (43)$$

$$-PL_{\max}^c \leq {}^{ee}PL^c \leq PL_{\max}^c, \forall ee \in E, \forall ee \in Cont_e \quad (44)$$

$$-PL_{\max}^c L^c \leq {}^{ee}PL^c \leq PL_{\max}^c L^c \quad (45)$$

$$, \forall c \in C, \forall ee \in Cont_e$$

در (۳۹)، ${}^{ee}M^e$ عدد ثابتی است که به ازای خطوط موجود از قبل تعریف می‌شوند. این عدد به ازای هر خط موجود e در تمامی حالات وقوع پیشامد ce برابر ۱ و در حالت وقوع پیشامد بر روی همان خط برابر صفر می‌باشد. این امر باعث می‌شود در حالت بررسی وقوع پیشامد بر روی خط موجود e ، مقدار توان عبوری از آن خط برابر صفر شود و بدین وسیله خروج خط مدل‌سازی می‌شود. نکته قابل ذکر دیگر آن است که مقادیر تولید نیروگاه‌ها در حالت وقوع پیشامد بر روی خطوط برابر تولید نیروگاه‌ها در حالت نرمال قرار داده شده است. معادلات مربوط به وقوع پیشامد بر روی خطوط کاندید همانند معادلات مربوطه برای خطوط موجود است با این تفاوت که (۳۹) تا (۴۱) به صورت (۴۶) تا (۴۸) نوشته می‌شوند

$${}^{cc}PL^c = B^c({}^{cc}\delta_r - {}^{cc}\delta_s), \forall ee \in E, \forall cc \in Cont_c \quad (46)$$

$${}^{cc}PL^c - B^c({}^{cc}\delta_r - {}^{cc}\delta_s) {}^{cc}M^c \leq (1-L^c)K \quad (47)$$

$$, \forall c \in C, \forall cc \in Cont_c$$

$$-(1-L^c)K \leq {}^{cc}PL^c - B^c({}^{cc}\delta_r - {}^{cc}\delta_s) {}^{cc}M^c \quad (48)$$

$$, \forall c \in C, \forall cc \in Cont_c$$

در روابط فوق نیز ${}^{cc}M^c$ اعداد ثابتی هستند که به ازای خطوط کاندید از قبل تعریف می‌شوند. مقدار این اعداد به ازای هر خط کاندید c در تمامی حالات وقوع پیشامد cc برابر ۱ است به جز حالت وقوع پیشامد بر روی همان خط که مقدار آن برابر صفر می‌باشد.

۳-۲ معادلات در حالت وقوع پیشامد بر روی نیروگاه‌ها

در این حالت، معادلات به گونه‌ای نوشته می‌شوند که در صورت خروج هر یک از واحدهای نیروگاهی در هر نیروگاه، توان عبوری از هیچ کدام از خطوط موجود و خطوط کاندید انتخاب شده از مقدار ماکزیمم مجاز توان عبوری از آنها فراتر نرود. همچنین مقدار تولید سایر نیروگاه‌ها نیز باید در محدوده مجاز باقی بماند.

برای وارد کردن وقوع پیشامد بر روی نیروگاه‌ها، معادلات مربوط به گونه‌ای نوشته می‌شوند که در حالت خروج یک واحد از یک نیروگاه، قید مقدار ماکزیمم تولید آن نیروگاه به اندازه آن واحد خارج شده کاهش می‌یابد. لذا معادلات مربوط به صورت (۴۹) تا (۵۸) نوشته می‌شوند

$$\sum_{b \in \omega_n^c} {}^g P_b^G - \sum_{b \in \omega_n^D} P_b^D - {}^g P_n = . \quad (49)$$

$$, \forall n \in N, \forall g \in Cont_g$$

$${}^g P_n = \sum_{e \in \pi_n^e} {}^g PL^e + \sum_{c \in \pi_n^c} {}^g PL^c \quad (50)$$

$$, \forall n \in N, \forall g \in Cont_g$$

$${}^g PL^e = B^e({}^g \delta_r - {}^g \delta_s), \forall e \in E, \forall g \in Cont_g \quad (51)$$

$$, \forall e \in E, \forall ee \in Cont_e$$

امکان از دست دادن نقاط بهینه مابین را در حالت پرش از یک نقطه گسسته به نقطه گسسته دیگر از بین می‌برد.

با توجه به مطالب گفته شده و مدل‌سازی NLP، (۱۳) تا (۱۶) نیز عیناً به کار می‌روند و در مورد تلفات نیازی به در نظرگیری آن به صورت خطی-تکه‌ای نخواهد بود. این امر موجب می‌شود که تعداد معادلات و متغیرها به شکل قابل توجهی کاهش یافته و حل مسأله سریع‌تر انجام گیرد.

۳- فرمول‌بندی مسأله TEP با لحاظ وقوع پیشامد

با توجه به این که بررسی وقوع پیشامد در مسأله TEP، شامل بررسی مسأله از بابت عدم خروج از قیود ماکزیمم توان تولیدی نیروگاه‌ها و ماکزیمم توان عبوری از خطوط در حالات وقوع پیشامد در نظر گرفته شده است، وارد کردن معادلات مربوطه تأثیری در ترکیب توابع هدف و متغیرهای مسأله ایجاد نمی‌کند. به عبارت دیگر، در نظرگیری وقوع پیشامد باعث تغییر تنها در قیود مسأله می‌شود.

ترکیب‌های مختلف مسأله TEP در حالت در نظرگیری وقوع پیشامد در جدول ۱ با نام B نشان داده شده است. در این بخش به بررسی فرمول‌بندی مسأله در حالت B۱ پرداخته می‌شود. روابط مربوط به سایر حالات B با توجه به این فرمول‌بندی قابل استخراج می‌باشند.

برای بررسی نحوه فرمول‌بندی مسأله در این حالت، معادلات مربوطه به دو بخش نرمال و وقوع پیشامد تقسیم‌بندی شده است. معادلات حاکم بر مسأله در حالت نرمال همان معادلات اشاره شده به صورت MINLP، MILP و NLP در حالت A۱ می‌باشند. در این بخش، معادلات حالت نرمال در حالت مدل‌سازی به صورت MILP مورد استفاده قرار گرفته‌اند و معادلات حالات وقوع پیشامد معرفی گشته‌اند. بدیهی است که معادلات مربوطه برای مدل‌سازی به صورت MINLP و NLP نیز از این روابط قابل استخراج می‌باشند.

معادلات مربوط به حالت وقوع پیشامد را می‌توان در دو بخش کلی وقوع پیشامد در خطوط و وقوع پیشامد در واحدهای نیروگاهی در نظر گرفت. لذا در ادامه به بررسی نحوه فرمول‌بندی مسأله در حالات مختلف وقوع پیشامد پرداخته می‌شود.

۳-۱ معادلات در حالت وقوع پیشامد بر روی خطوط

موجود و کاندید

برای وارد کردن معادلات مربوط به خروج هر یک از خطوط موجود و بررسی قیود شبکه، از ضرایب ثابت و از پیش تعیین شده استفاده شده است. برای این منظور، معادلات به گونه‌ای نوشته می‌شوند که در صورت خروج هر یک از خطوط و باقی ماندن مقادیر تولید نیروگاه‌ها در مقدار تولید آنها در حالت نامی، توان عبوری از هیچ کدام از خطوط موجود و خطوط کاندید انتخاب شده از مقدار ماکزیمم مجاز آنها فراتر نرود. لذا معادلات مربوطه در حالت وقوع پیشامد بر روی خطوط موجود به صورت (۳۷) تا (۴۵) نوشته می‌شوند

$$\sum_{b \in \omega_n^c} P_b^G - \sum_{b \in \omega_n^D} P_b^D - {}^{ee} P_n = . \quad (37)$$

$$, \forall n \in N, \forall ee \in Cont_e$$

$${}^{ee} P_n = \sum_{e \in \pi_n^e} {}^{ee} PL^e + \sum_{c \in \pi_n^c} {}^{ee} PL^c \quad (38)$$

$$, \forall n \in N, \forall ee \in Cont_e$$

$${}^{ee} PL^e = B^e({}^{ee}\delta_r - {}^{ee}\delta_s) {}^{ee} M^e \quad (39)$$

$$, \forall e \in E, \forall ee \in Cont_e$$

حل مسأله TEP در حالات مختلف کمک گرفته شده است.

۵- نتایج عددی و تحلیل آنها

برای پیاده‌سازی معادلات اشاره‌شده در بخش‌های ۲ و ۳، شبیه‌سازی دو شبکه نمونه و حل مسأله TEP برای این شبکه‌ها انجام شده است. یکی از این شبکه‌ها، شبکه ۶شینه گارور و دیگری شبکه ۱۸شینه IEEE می‌باشد. برای اجرای برنامه‌ها از یک کامپیوتر با پردازنده ۳/۲ گیگاهرتزی و ۲ گیگابایت RAM استفاده شده است.

با توجه به این که نوع مسایل مورد بررسی از نوع NLP، MINLP و MILP هستند و در حل مسأله در حالات مختلف از نرم‌افزار GAMS استفاده شده، اجرای برنامه به صورت خط به خط نیست، بلکه تمامی معادلات مطرح‌شده در قیود مسأله (حالت نرمال شبکه، حالات وقوع پیشامد بر روی خطوط و حالات وقوع پیشامد بر روی نیروگاه‌ها) به طور هم‌زمان در جهت حداقل‌سازی تابع هدف حل می‌شوند. به همین علت اولییتی برای حل معادلات مذکور وجود ندارد. به عبارت بهتر، حل هم‌زمان همه معادلات (و نه به صورت گام به گام) یکی از مزایای روش برنامه‌ریزی‌های MILP، MINLP و NLP به شمار می‌رود که دسترسی به نقطه بهینه مطلق را امکان‌پذیر می‌سازد. برای تبیین بیشتر توضیحات داده‌شده، مثالی ارائه می‌شود. برای نمونه، اگر معادلات NLP برای حالت B۱ جدول ۱ تنظیم شوند، نتایج دو حالت حل مسأله را می‌توان با هم مقایسه نمود. حالت اول، شامل حل مسأله TEP به صورت جداگانه برای حالت‌های نرمال، وقوع پیشامد بر روی خطوط موجود، وقوع پیشامد بر روی خطوط کاندید و وقوع پیشامد بر روی نیروگاه‌ها می‌باشد. در این حالت حل هر مسأله به صورت جداگانه نتایج مجزایی را به دست می‌دهد. حالت دوم، حل هم‌زمان معادلات مربوط به حالت نرمال و همه حالت‌های وقوع پیشامد می‌باشد که یک نتیجه را به دست می‌دهد. نتایج مربوطه در جدول ۲ آورده شده‌اند. همان طور که در این جدول مشاهده می‌شود، در صورت حل هم‌زمان همه معادلات، جواب به دست آمده بهینه‌تر از زمانی است که معادلات به صورت جداگانه حل شده‌اند. لازم به ذکر است در جدول مذکور، هزینه کل با در نظرگیری خطوط مشترک توجیه‌شده در حالت‌های مختلف پیشامد و نرمال محاسبه شده است.

۵-۱ شبکه ۶شینه گارور

شبکه نمونه استفاده‌شده برای شبیه‌سازی اول، شبکه ۶شینه گارور می‌باشد. شبکه گارور، یک شبکه ۶شینه با ۶ خط موجود و ۳ نیروگاه است. برای انجام برنامه‌ریزی توسعه شبکه انتقال، ۱۵ کریدور کاندید با تعداد ۳ خط کاندید در هر کریدور استفاده شده است. مشخصات بار و نیروگاه‌ها در جدول ۳ و مشخصات خطوط موجود و خطوط کاندید در جدول ۴ آورده شده است (* نشان‌دهنده خطوط موجود می‌باشد).

۵-۱-۱ مقایسه نتایج MINLP، MILP و NLP

جهت مقایسه سرعت حل مسأله در مدل‌سازی‌های مختلف MINLP، MILP و NLP، نتایج برنامه‌ریزی برای حالت نمونه A۱۳ در جدول ۵ آورده شده‌اند (* نشان‌دهنده روش به کار رفته در [۳] می‌باشد). با مقایسه نتایج به دست آمده در جدول فوق می‌توان مشاهده کرد که روش‌های MINLP و NLP نسبت به MILP، سریع‌تر به پاسخ بهینه دست می‌یابند. این اختلاف زمانی در جداول فوق، مقدار قابل توجهی را نشان می‌دهد و بیانگر آن است که در حل مسأله TEP، روش‌های MINLP و NLP نسبت به MILP روش‌های با سرعت بسیار بالاتری می‌باشند. دلیل اصلی این امر، نیاز به انجام تقریب خطی - تکه‌ای جهت

$${}^g PL^c - B^c({}^g \delta_r - {}^g \delta_s) \leq (1 - L^c)K, \quad \forall c \in C, \forall g \in Cont_g \quad (52)$$

$$-(1 - L^c)K \leq {}^g PL^c - B^c({}^g \delta_r - {}^g \delta_s), \quad \forall c \in C, \forall g \in Cont_g \quad (53)$$

$${}^g PL^c \leq L^c K, \quad \forall c \in C, \forall g \in Cont_g \quad (54)$$

$$-L^c K \leq {}^g PL^c, \quad \forall c \in C, \forall g \in Cont_g \quad (55)$$

$$-PL_{\max}^e \leq {}^g PL^e \leq PL_{\max}^e, \quad \forall e \in E, \forall g \in Cont_g \quad (56)$$

$$-PL_{\max}^c L^c \leq {}^g PL^c \leq PL_{\max}^c L^c, \quad \forall c \in C, \forall g \in Cont_g \quad (57)$$

$$-P_b^{G \min} \leq {}^g PL_b^G \leq PL_b^{G \max} {}^g M_b, \quad \forall b \in N, \forall g \in Cont_g \quad (58)$$

در این روابط، ${}^g M_b$ اعداد ثابتی هستند که به‌ازای هر نیروگاه از قبل تعریف می‌شوند. مقدار این اعداد همواره کوچک‌تر مساوی ۱ بوده و به‌ازای هر نیروگاه g در تمامی حالات وقوع پیشامد cg برابر ۱ و در حالت وقوع پیشامد بر روی همان نیروگاه برابر با مقدار پریونیت ماکزیم مقدار مجاز تولید نیروگاه در حالت خروج یک واحد است. مجموعه $Cont_g$ شامل نیروگاه‌هایی می‌باشد که وقوع پیشامد بر روی آنها در نظر گرفته شده است که در مطالعات انجام‌گرفته در این مقاله، شامل همه نیروگاه‌های موجود شبکه است.

۴- روش‌های حل جهت دستیابی به نقطه بهینه مطلق

برای حل مسایل مدل‌شده به صورت MINLP، MILP و NLP از روش‌های مختلفی می‌توان استفاده کرد. یکی از بهترین این روش‌ها جهت حل مسایل MILP که در مطالعات مختلفی مورد استفاده قرار گرفته است، روش CPLEX می‌باشد [۲] و [۳]. این روش با وجود قدرت مناسب در حل مسایل اشاره‌شده، دستیابی به نقطه بهینه مطلق را تضمین نمی‌کند.

در کنار این روش، روش‌های مناسب دیگری نیز قابل استفاده می‌باشند که در دسترسی به نقطه بهینه مطلق مسأله سودمند هستند. از جمله این روش‌ها می‌توان به BARON، OQNLP و LGO، LINGO، Premium و GlobSol، COCONUT، COCOS، COS، MINOS اشاره کرد [۲۳]. از میان این روش‌ها، سه روش BARON، OQNLP و LGO به علت سرعت و دقت بالا در حل مسایل به‌عنوان بهترین روش‌های حل مسأله شناخته شده‌اند. از میان این سه روش نیز روش BARON سرعت بیشتری نسبت به OQNLP و LGO دارا می‌باشد. لازم به ذکر است که روش BARON قادر به حل مسایل از نوع MINLP، MILP و NLP است، در حالی که OQNLP تنها قادر به حل مسایل MINLP و NLP بوده و روش LGO نیز تنها در حل مسایل از نوع LP و NLP (بدون عدد صحیح) کاربرد دارند. همچنین روش BARON قدرت قابل توجهی در حل مسایل واگرا دارد [۲۳] و [۲۴]. این روش که برگرفته از روش شاخه و کران^۱ است، الگوریتم مناسبی جهت دستیابی به نقطه بهینه مطلق را ارائه داده است. توضیحات بیشتر در رابطه با نحوه عملکرد این روش در [۲۴] آورده شده است. با توجه به مطالب گفته‌شده، در مسأله حاضر از روش BARON جهت

جدول ۲: نتایج حل مسأله در دو حالت حل همزمان معادلات و حل جداگانه.

نتیجه نهایی		خطوط توجیه شده			حل معادلات به صورت جداگانه	
هزینه کل (\$)	تعداد خط	کریدور	تعداد خط	کریدور		
۲۱۰	۲	۹	۱	۱۱	نرمال	
			۳	۱۴		
			۲	۹		
			۲	۱۱		خطوط موجود
			۲	۱۴		
			۲	۹		
	۳	۱۱	۲	۹	خطوط کاندید	
			۳	۱۱		
			۲	۱۴		
			۲	۹		
			۲	۱۱		نیروگاه
			۲	۱۴		
۱۹۰	۲	۹	۲	۹	نرمال و همه پیشامدها	
			۲	۱۱		
			۲	۱۴		
			۲	۱۱		
			۲	۱۴		
			۳	۱۴		

جدول ۳: اطلاعات شین‌های شبکه گارور.

شماره شین	ماکزیم تولید (MW)	بار (MW)	هزینه تولید (\$/MWh)
۱	۱۵۰	۸۰	۵۰
۲	-	۲۴۰	-
۳	۳۸۰	۴۰	۱۶۵
۴	-	۱۸۰	-
۵	-	۲۴۰	-
۶	۶۰۰	-	۲۴۵

همان طور که در جداول اشاره شده مشاهده می‌شود، به جز حالت‌های A1، A2، A4، A5، B1 و B2، در سایر حالت‌ها، روش ارائه شده در این مقاله نتایج بهتری را نسبت به روش [۳] نشان می‌دهد. این امر گویای قدرت بالای روش ارائه شده در این مقاله جهت حل مسأله TEP، در هر دو حالت با در نظرگیری و بدون در نظرگیری وقوع پیشامد می‌باشد. در کنار امکان دسترسی به نقطه بهینه، همان طور که در بالاتر نیز اشاره شد، سرعت دستیابی به نقطه بهینه نیز در روش ارائه شده بالاتر از روش ارائه شده در [۳] می‌باشد.

لذا با توجه به همه مطالب گفته شده، مدل سازی مسأله TEP به صورت MINLP و حل آن توسط روش BARON گزینه بهتری برای این مسأله است، چرا که هم سرعت دستیابی به پاسخ را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد و نیز جواب به دست آمده به عنوان بهینه مطلق، همواره از جواب روش [۳] بهتر بوده است. با توجه به این امر، در ادامه به تحلیل نتایج حالات A و B به دست آمده از روش ارائه شده در این مقاله پرداخته می‌شود.

۱-۲- تحلیل نتایج برنامه ریزی حالات A و B

نتایج برنامه ریزی توسعه شبکه انتقال با استفاده از روش ارائه شده در این مقاله، برای حالات A در جدول ۸ و نتایج این برنامه ریزی برای حالات B در جدول ۹ آورده شده‌اند.

جهت تحلیل نتایج، ابتدا به بررسی هر کدام از جداول نتایج حالات A و B پرداخته و سپس نتایج این دو حالت با هم مقایسه می‌شوند. برای این منظور از اطلاعات آورده شده در جداول ۵ تا ۸ استفاده می‌شود.

حالات A و حالات B

الف) با مقایسه هر یک از حالات فرد با حالت زوج بعد از آن در جداول ۵ تا ۸ برای هر کدام از مجموعه حالات A و B که تنها تفاوت آنها در معلوم و مجهول فرض نمودن مقادیر تولید نیروگاه‌ها می‌باشد، می‌توان مشاهده نمود که در حالات فرد، مقدار مجموع هزینه‌ها کوچک‌تر است. در صورتی که تنها مقدار هزینه توسعه در این حالات با یکدیگر مقایسه شود، می‌توان مشاهده نمود که در تمامی حالات فرد، هزینه توسعه کمتری به دست آمده است. به

وارد کردن تلفات در مسأله و لذا افزایش قابل توجه تعداد متغیرها و قیود مسأله می‌باشد.

همچنین نکته قابل مشاهده در جدول فوق آن است که مقدار تابع هدف در حالت‌های استفاده از مدل MILP نسبت به MINLP و NLP بیشتر است. این امر به دلیل انجام تقریب خطی-تکه‌ای تلفات در مدل MILP می‌باشد که منجر به محاسبه تلفات خطوط برابر با مقداری بیشتر از مقدار دقیق آن شده و لذا توان تولیدی نیروگاه‌ها و در نتیجه مقدار تابع هدف را افزایش داده است.

با توجه به مطالب گفته شده، می‌توان نتیجه گرفت که روش‌های MINLP و NLP نسبت به MILP نتایج دقیق‌تر و سریع‌تری را ارائه می‌دهند. نکته مهم قابل ذکر آن است که نتایج به دست آمده در سایر حالات A و B، تحلیل‌های انجام شده در این بخش را تأیید می‌نمایند و لذا MINLP و NLP، روش‌های مناسبی جهت حل مسأله TEP هستند. از طرف دیگر در مقایسه روش‌های MINLP و NLP، می‌توان مشاهده کرد که نقاط بهینه به دست آمده از این دو روش بسیار نزدیک به هم هستند و هر دو مدل ارائه شده با استفاده از روش حل BARON، به نقاط بسیار نزدیک به هم دست یافته‌اند.

در ادامه، جهت مقایسه نتایج روش‌های ارائه شده در این مقاله با نتایج [۳]، بهترین جواب از مدل سازی‌های MINLP و NLP و روش حل BARON در کنار جواب‌های به دست آمده از مدل سازی MILP و روش حل CPLEX (روش [۳]) ارائه شده‌اند. جدول ۶ مقایسه این نتایج را برای حالات A و جدول ۷ مقایسه مشابه را برای حالات B نشان می‌دهد.

جدول ۴: اطلاعات خطوط شبکه کارور.

شماره خط	شین ابتدای خط	شین انتهای خط	مقاومت (p.u.)	راکتانس (p.u.)	هزینه توسعه (\$)	ظرفیت خط (MW)
*۱	۱	۲	۰٫۱۰	۰٫۴۰	-	۱۰۰
*۲	۱	۴	۰٫۱۵	۰٫۶۰	-	۸۰
*۳	۱	۵	۰٫۰۵	۰٫۲۰	-	۱۰۰
*۴	۲	۳	۰٫۰۵	۰٫۲۰	-	۱۰۰
*۵	۲	۴	۰٫۱۰	۰٫۴۰	-	۱۰۰
*۶	۳	۵	۰٫۰۵	۰٫۲۰	-	۱۰۰
۱	۱	۲	۰٫۱۰	۰٫۴۰	۴۰	۱۰۰
۲	۱	۳	۰٫۰۹	۰٫۳۸	۳۸	۱۰۰
۳	۱	۴	۰٫۱۵	۰٫۶۰	۶۰	۸۰
۴	۱	۵	۰٫۰۵	۰٫۲۰	۲۰	۱۰۰
۵	۱	۶	۰٫۱۷	۰٫۶۸	۶۸	۷۰
۶	۲	۳	۰٫۰۵	۰٫۲۰	۲۰	۱۰۰
۷	۲	۴	۰٫۱۰	۰٫۴۰	۴۰	۱۰۰
۸	۲	۵	۰٫۰۸	۰٫۳۱	۳۱	۱۰۰
۹	۲	۶	۰٫۰۸	۰٫۳۰	۳۰	۱۰۰
۱۰	۳	۴	۰٫۱۵	۰٫۵۹	۵۹	۸۲
۱۱	۳	۵	۰٫۰۵	۰٫۲۰	۲۰	۱۰۰
۱۲	۳	۶	۰٫۱۲	۰٫۴۸	۴۸	۱۰۰
۱۳	۴	۵	۰٫۱۶	۰٫۶۳	۶۳	۷۵
۱۴	۴	۶	۰٫۰۸	۰٫۳۰	۳۰	۱۰۰
۱۵	۵	۶	۰٫۱۵	۰٫۶۱	۶۱	۷۸

جدول ۷: مقادیر تابع هدف نتایج حالات B با استفاده از روش ارائه‌شده در این مقاله و روش [۳].

نام حالت	مجموع هزینه‌ها (\$)	
	مدل‌سازی MILP و روش حل CPLEX (روش [۳])	مدل‌سازی MINLP/NLP و روش حل BARON
B1	۱۹۰	۱۹۰
B2	۲۲۰	۲۲۰
B3	۱۹۰	۲۲۰
B4	۲۲۰	۲۵۰
B5	۳۶۸٫۶۹۴	۳۵۴٫۸۵۱
B7	۳۸۲٫۵۸۴	۳۶۵٫۷۹۱
B9	۲۵۹٫۱۳۰	۲۴۵٫۵۲۱
B10	۲۸۳٫۶۶۲	۲۶۸٫۴۶۶
B11	۲۱۰	۱۹۰
B12	۲۵۰	۲۲۰
B13	۴۲۵٫۶۵۳	۴۱۰٫۹۴۷

ب) برای بررسی اثر واردکردن مقدار تلفات در پخش بار، نتایج حالات مختلف $A1-A3$ ، $A1-A4$ ، $A2-A4$ ، $A1-A11$ و $A9-A12$ و $A10-A12$ در جداول ۵ و ۷ و حالت‌های $B1-B5$ ، $B9-B13$ ، $B2-B10$ ، $B7-B11$ و $B3-B7$ در جداول ۶ و ۸ مورد مقایسه قرار می‌گیرند. با مقایسه مقدار هزینه توسعه در حالات اشاره‌شده، می‌توان مشاهده نمود که این مقدار در حالت واردکردن تلفات در پخش بار افزایش یافته است. به عبارت دیگر، به علت افزایش توان عبوری از خطوط به دلیل واردکردن تلفات در پخش بار، تعداد خطوط بیشتر و یا خطوط با هزینه بالاتری جهت توسعه شبکه مورد نیاز است.

جدول ۵: مقایسه نتایج حل مسأله TEP در حالت A13.

زمان حل مسأله (ثانیه)	مقدار تابع هدف (\$)	روش حل	روش مدل‌سازی
۷۲۰	۳۴۱٫۷۲۴	BARON	MINLP
۹۱۰۸۰	۳۵۳٫۶۴۶	*CPLEX	*MILP
۱۵۲۸۰	۳۴۸٫۳۴۲	BARON	NLP
۲۸۸۰	۳۴۱٫۷۲۳	BARON	NLP

جدول ۶: مقایسه مقادیر تابع هدف نتایج حالات A با استفاده از روش ارائه‌شده در این مقاله و روش [۳].

نام حالت	مجموع هزینه‌ها (\$)	
	مدل‌سازی MILP و روش حل CPLEX (روش [۳])	مدل‌سازی MINLP/NLP و روش حل BARON
A1	۱۱۰	۱۱۰
A2	۱۴۰	۱۴۰
A3	۱۳۰	۱۴۰
A4	۱۶۰	۱۶۰
A5	۲۷۶٫۷۸۹	۲۷۶٫۷۸۹
A7	۳۲۰٫۸۴۸	۳۰۶٫۵۳۱
A9	۱۹۱٫۱۶۸	۱۷۹٫۷۲۱
A10	۲۱۲٫۷۶۲	۱۹۵٫۹۹۹
A11	۱۹۸٫۲۰۹	۱۹۲٫۷۲۹
A12	۲۲۰٫۶۳۸	۲۱۵٫۳۸۴
A13	۳۵۳٫۶۴۶	۳۴۱٫۷۲۴

بیان دیگر، در صورت تعیین مقادیر تولید نیروگاه‌ها توسط الگوریتم، می‌توان با تعداد خطوط کمتر و هزینه کمتری، توسعه شبکه را برنامه‌ریزی نمود.

جدول ۸: مقادیر تولید نیروگاه‌ها و تعداد خطوط انتخاب‌شده برای حالات A با استفاده از روش ارائه‌شده در این مقاله.

نام حالت	تعداد خطوط انتخاب‌شده برای هر کریدور				مقادیر تولید نیروگاه‌ها (MW)		
	کریدور ۶	کریدور ۹	کریدور ۱۱	کریدور ۱۴	نیروگاه شین ۱	نیروگاه شین ۳	نیروگاه شین ۶
A1	۰	۰	۱	۳	۱۵۰	۳۱۲٫۱	۲۹۷٫۹
A2	۰	۲	۱	۲	۱۲۰	۳۰۰	۳۴۰
A3	۱	۰	۱	۳	۱۵۰	۳۴۹	۳۱۲٫۸
A4	۱	۲	۱	۲	۱۲۰	۳۰۰	۳۸۰٫۳
A5	۰	۰	۱	۳	۱۵۰	۳۱۲٫۱	۲۹۷٫۹
A7	۱	۰	۱	۳	۱۵۰	۳۶۰	۲۹۸٫۴
A9	۱	۱	۱	۲	۱۵۰	۳۶۰	۲۵۰
A10	۰	۲	۱	۲	۱۲۰	۳۰۰	۳۴۰
A11	۰	۲	۱	۲	۱۵۰	۳۲۷٫۹	۳۱۷٫۲
A12	۰	۲	۲	۲	۱۲۰	۳۰۰	۳۷۶٫۹
A13	۱	۱	۱	۲	۱۵۰	۳۶۰	۲۵۰

جدول ۹: مقادیر تولید نیروگاه‌ها و تعداد خطوط انتخاب‌شده برای حالات B با استفاده از روش ارائه‌شده در این مقاله.

نام حالت	تعداد خطوط انتخاب‌شده برای هر کریدور				مقادیر تولید نیروگاه‌ها (MW)		
	کریدور ۶	کریدور ۹	کریدور ۱۱	کریدور ۱۴	نیروگاه شین ۱	نیروگاه شین ۳	نیروگاه شین ۶
B1	۰	۲	۲	۳	۱۴۵٫۴	۳۳۴٫۷	۲۷۹٫۸
B2	۰	۳	۲	۳	۱۲۰	۳۰۰	۳۴۰
B3	۰	۲	۲	۳	۱۵۰	۳۲۷٫۲	۳۲۲٫۵
B4	۰	۳	۲	۳	۱۲۰	۳۰۰	۳۷۰٫۷
B5	۰	۲	۲	۳	۱۵۰	۳۳۱٫۵	۲۷۸٫۵
B7	۰	۳	۲	۲	۱۵۰	۳۲۶٫۲	۳۱۸٫۵
B9	۰	۲	۲	۳	۱۴۶٫۹	۳۳۱٫۹	۲۸۱٫۲
B10	۰	۳	۲	۳	۱۲۰	۳۰۰	۳۴۰
B11	۰	۳	۲	۲	۱۴۹٫۵	۳۲۵٫۷	۳۱۹٫۴
B12	۰	۳	۲	۳	۱۲۰	۳۰۰	۳۷۰٫۷
B13	۰	۲	۲	۳	۱۴۶٫۱	۳۳۴٫۳	۲۷۹٫۶

وقوع پیشامد در نظر گرفته شده است، مقدار هزینه توسعه افزایش قابل محسوسی دارد. به عبارت دیگر در تمامی حالات B، خطوط مورد نیاز برای پوشاندن شرایط وقوع پیشامد بیشتر از خطوط مورد نیاز در حالت A معادل می‌باشد. به‌عنوان مثال در مقایسه حالت B13 با حالت A13، هزینه توسعه برابر ۱۹۰ در مقابل ۱۳۰ است که افزایش قابل توجهی می‌باشد. همچنین خطوط انتخابی در حالت A13، به‌ترتیب برابر ۱ خط در کریدور ۶، ۱ خط در کریدور ۹، ۱ خط در کریدور ۱۱ و ۲ خط در کریدور ۱۴ است ولی خطوط توجیه‌شده در حالت B13 برابر ۲ خط در کریدور ۹، ۲ خط در کریدور ۱۱ و ۳ خط در کریدور ۱۴ است. این افزایش تعداد خطوط و نیز تغییر ترکیب خطوط انتخابی ناشی از لحاظ شرایط وقوع پیشامد می‌باشد.

ب) نکته دیگر قابل مشاهده در مقایسه نتایج A و B آن است که با تغییر ترکیب توابع هدف و نیز با تغییر در نظریه تلفات در پخش بار یا عدم آن، تغییرات محسوسی در هزینه مشاهده نمی‌شود و خطوط توجیه‌شده نیز تغییری پیدا نمی‌کنند. لذا می‌توان نتیجه گرفت در این شبکه مورد مطالعه، در نظریه وقوع پیشامد به اندازه‌ای برنامه‌ریزی توسعه شبکه انتقال را تحت تأثیر قرار می‌دهد که بیشتر از تغییر ترکیب توابع هدف و در نظریه تلفات در پخش بار است. به عبارت بهتر در این شبکه مطالعه‌شده، در نظریه

ج) برای بررسی اثر واردکردن هزینه‌های مختلف در تابع هدف، می‌توان نتایج ترکیب حالات $A10 - A1 - A5 - A9 - A13$ ، $A2 - A10$ ، $A3 - A7 - A11$ و $A4 - A12$ در جداول ۵ و ۷ یا حالت‌های $B13 - B1 - B5 - B9 - B11$ ، $B2 - B10$ ، $B3 - B7 - B11$ و $B4 - B12$ در جداول ۶ و ۸ را با یکدیگر مقایسه نمود. برای نمونه در ترکیب $A1 - A5 - A9 - A13$ می‌توان مشاهده نمود که با اضافه‌شدن هزینه بهره‌برداری به هزینه توسعه، مقدار مجموع هزینه‌های توسعه و بهره‌برداری در حالت A5 نسبت به حالت A1 کاهش یافته است. همچنین با اضافه‌نمودن هزینه تلفات به هزینه توسعه، می‌توان مشاهده نمود که مقدار مجموع هزینه‌های توسعه و تلفات در حالت A9 نسبت به A1 کاهش یافته است، ولی در نظرگیری هزینه تلفات موجب گشته است که هزینه توسعه در حالت A9 نسبت به حالت A1 افزایش پیدا کند. به عبارت دیگر در حالتی که تلفات به‌صورت هزینه در تابع هدف وارد شده است، توسعه خطوط با هزینه بیشتری به دست آمده است. این نتایج در بررسی حالت A13 نیز قابل بررسی می‌باشد، چرا که در این حالت مقدار مجموع هزینه‌ها در حالت کلی کاهش یافته است.

مقایسه حالات A و B

الف) با بررسی نتایج به‌دست آمده برای دو سری A و B، می‌توان مشاهده کرد که در حالات B معادل A، به علت این که شرایط

جدول ۱۰: اطلاعات خطوط کاندید شبکه ۱۱۸ شیبه IEEE.

شماره خط	شین ابتدای خط	شین انتهایی خط	مقاومت (p.u.)	راکتانس (p.u.)	هزینه توسعه (\$M)	ظرفیت خط (MW)
۱	۳	۵	۰.۲۴۱	۰.۱۰۸	۸,۷۳	۱۲۰
۲	۸	۵	۰	۰.۲۶۷	۸,۱۷	۲۰۰
۳	۸	۹	۰.۲۴۴	۰.۳۰۵	۱۶,۴۳	۲۰۰
۴	۳۰	۱۷	۰	۰.۳۸۸	۲۱,۲۲	۲۰۰
۵	۸	۳۰	۰.۵۰۴۳۱	۰.۵۰۴	۸,۶۷	۱۲۰
۶	۲۶	۳۰	۰.۰۷۹۹	۰.۰۸۶	۱۱,۲۲	۲۰۰
۷	۵۵	۵۶	۰.۰۴۸۸	۰.۱۵۱	۱۴,۶۶	۱۲۰
۸	۳۸	۶۵	۰.۰۹۰۱	۰.۰۹۸۶	۱۳,۷۴	۲۰۰
۹	۷۷	۷۸	۰.۰۳۷۶	۰.۱۲۴	۸,۹۷	۱۲۰
۱۰	۸۳	۸۵	۰.۰۴۳	۰.۱۴۸	۱۰,۶۵	۱۲۰
۱۱	۸۵	۸۶	۰.۰۳۵	۰.۱۲۳	۲۲,۷۷	۲۰۰
۱۲	۶۵	۶۸	۰.۰۱۳۸	۰.۰۱۶	۱۸,۴۱	۲۰۰
۱۳	۳۸	۳۷	۰	۰.۳۷۵	۱۹,۲۴	۲۰۰
۱۴	۱۰۳	۱۱۰	۰.۰۳۹۰۶	۰.۱۸۱۳	۱۵,۷	۱۲۰
۱۵	۱۱۰	۱۱۲	۰.۰۲۴۷	۰.۰۶۴	۱۸,۷۱	۱۲۰
۱۶	۱۷	۱۱۳	۰.۰۹۱۳	۰.۰۳۰۱	۱۷,۵۴	۱۲۰
۱۷	۱۲	۱۱۷	۰.۰۳۲۹	۰.۱۴	۳,۱۸	۱۲۰

جدول ۱۱: مقایسه مقادیر تابع هدف حالات A و B با استفاده از روش ارائه‌شده در این مقاله و روش [۳] برای شبکه ۱۱۸-IEEE.

نام حالت	مجموع هزینه‌ها (M\$)	
	مدل‌سازی MILP و روش حل CPLEX (روش [۳])	مدل‌سازی MINLP/NLP و روش حل BARON
A۱	۲۵,۸۷	۲۵,۸۷
A۱۳	۵۸۱,۵۳۱	۵۷۵,۹۶۷
B۱	۶۸,۲۵	۶۸,۲۵
B۱۳	۳۷۰,۵۱۳	۲۶۵۳,۶۲

جدول ۱۲: خطوط انتخاب‌شده برای حالات A و B با استفاده از روش ارائه‌شده در این مقاله برای شبکه ۱۱۸-IEEE.

نام حالت	تعداد خطوط انتخاب‌شده برای هر کریدور					
	کریدور ۱	کریدور ۲	کریدور ۳	کریدور ۹	کریدور ۱۱	کریدور ۱۷
A۱	۱	۱	۰	۱	۰	۰
A۱۳	۱	۱	۰	۱	۰	۰
B۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
B۱۳	۱	۱	۱	۱	۱	۱

و A۱۳، به علت این که شرایط وقوع پیشامد در نظر گرفته شده، مقدار هزینه توسعه افزایش یافته است. به عبارت دیگر در حالت‌های B، خطوط مورد نیاز برای پوشاندن شرایط وقوع پیشامد بیشتر از خطوط مورد نیاز در حالت A معادل می‌باشد.

نکته دیگر قابل مشاهده در مقایسه نتایج A و B آن است که با تغییر ترکیب تابع هدف، نتایج برنامه‌ریزی TEP به اندازه محسوسی تغییر پیدا کرده است. لذا می‌توان مشاهده نمود که در شبکه ۱۱۸ شیبه IEEE به‌عنوان یک شبکه بزرگ بر خلاف شبکه گارور، در نظرگیری وقوع پیشامد نتایج مسأله را به‌طور محسوسی تغییر داده و هزینه سرمایه‌گذاری را افزایش می‌دهد.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی مسأله توسعه شبکه انتقال پرداخته شد. برای حل این مسأله از روش‌های MINLP و MILP بهره گرفته شد و روش جدیدی به شکل NLP برای این مسأله ارائه گردید.

وقوع پیشامد اهمیت بیشتری نسبت به سایر تغییرات اشاره‌شده دارد.

۵- شبکه ۱۱۸ شیبه IEEE

جهت اجرای شبیه‌سازی و اعمال روش پیشنهادی بر روی یک شبکه بزرگ، شبکه ۱۱۸ شیبه IEEE در نظر گرفته شده است. این شبکه دارای ۱۱۸ شین، ۱۸۶ خط موجود، ۵۴ نیروگاه و ۹۱ نقطه بار می‌باشد [۲۵]. جهت ایجاد تراکم در خطوط و نیاز به اجرای TEP، مقدار ظرفیت حرارتی خطوط موجود کاهش داده شده است. جهت اجرای TEP، خطوط کاندید مسأله به تعداد ۱۷ خط در ۱۷ کریدور مطابق جدول ۱۰ در نظر گرفته شده است.

در این بخش از شبیه‌سازی، چهار حالت اصلی A۱، B۱، A۱۳ و B۱۳ جهت اجرای شبیه‌سازی‌ها در نظر گرفته شده است. نتایج به‌دست آمده برای هر کدام از این حالات در جداول ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است. با بررسی نتایج به دست آمده در جداول ۱۱ و ۱۲ می‌توان مشاهده کرد که در شبکه ۱۱۸ شیبه IEEE نیز در حالت‌های B۱ و B۱۳ نسبت به A۱

- computation," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 20, no. 3, pp. 1631-1639, Aug. 2005.
- [15] E. L. Da Silva, J. M. A. Ortiz, G. C. De Oliveira, and S. Binato, "Transmission network expansion planning under a tabu search approach," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 16, no. 1, pp. 62-68, Feb. 2001.
- [16] T. Sum-Im, G. A. Taylor, M. R. Irving, and Y. H. Song, "Differential evolution algorithm for static and multistage transmission expansion planning," *IET Generation, Transmission, and Distribution*, vol. 3, no. 4, pp. 365-384, Apr. 2009.
- [17] J. Choi, A. El-Keib, and T. Tran, "A fuzzy branch and bound-based transmission system expansion planning for the highest satisfaction level of the decision maker," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 20, no. 1, pp. 476-484, Feb. 2005.
- [18] H. Seifi and M. S. Sepasian, *Electric Power System Planning: Issues, Algorithms and Solutions*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2011.
- [19] S. H. M. Hashimoto, R. Romero, and J. R. S. Mantovani, "Efficient linear programming algorithm for the transmission network expansion planning problem," *IEE Proc. on Generation, Transmission, and Distribution*, vol. 150, no. 5, pp. 536-542, 15 Sep. 2003.
- [20] J. Choi, T. D. Mount, and R. J. Thomas, "Transmission expansion planning using contingency criteria," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 22, no. 4, pp. 2249-2261, Nov. 2007.
- [21] J. Choi, T. D. Mount, R. J. Thomas, and R. Billinton, "Probabilistic reliability criterion for planning transmission system expansions," *IEE Proc. Generation, Transmission, and Distribution*, vol. 153, no. 6, pp. 719-727, Nov. 2006.
- [22] R. Villasana, L. L. Garver, and S. J. Salon, "Transmission network planning using linear programming," *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, vol. 104, no. 2, pp. 349-356, Feb. 1985.
- [23] A. Neumaier, O. Shcherbina, and W. Huyer, "A comparison of complete global optimization solvers," *Mathematical Programming B*, vol. 103, no. 2, pp. 335-356, Jun. 2005.
- [24] C. S. Pedamallu, L. Ozdamar, T. Csendes, and T. Vinko, "Efficient interval partitioning for constrained global optimization," *J. of Global Optimization*, vol. 42, no. 3, pp. 369-384, Nov. 2008.
- [25] *IEEE 118-Bus System Data*, Electrical and Computer Engineering Department, Illinois Institute of Technology (IIT). Available: http://motor.ece.iit.edu/Data/IEAS_IEEE118.doc.

ابوالفضل ناطقی تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد برق به ترتیب در سال‌های ۱۳۸۴ و ۱۳۸۶ از دانشگاه زنجان به پایان رسانده است. از سال ۱۳۸۷ تا کنون، نام‌برده به عنوان دانشجوی دکتری در دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه تربیت مدرس مشغول به تحصیل می‌باشد.

حسین سیفی در سال ۱۳۵۹ مدرک کارشناسی مهندسی برق خود را از دانشگاه شیراز و در سال‌های ۱۳۶۶ و ۱۳۶۸ مدرک کارشناسی ارشد و دکتری مهندسی برق خود را از دانشگاه بومیسف منچستر در کشور انگلستان دریافت نمود. ایشان از سال ۱۳۶۸ تاکنون به‌عنوان مدرس و هیأت علمی در دانشگاه تربیت مدرس به کار مشغول بوده و هم‌اکنون دارای جایگاه استاد تمام می‌باشد. ایشان در این سال‌ها علاوه بر انجام تحقیقات علمی دارای سوابق و مسئولیت‌هایی از جمله رئیس دانشکده مهندسی و معاون پژوهشی دانشگاه بوده‌اند و هم‌اکنون رئیس مرکز ملی مطالعات و برنامه‌ریزی شبکه‌های قدرت می‌باشند. زمینه‌های علمی مورد علاقه ایشان موضوعات برنامه‌ریزی و بهره‌برداری از شبکه‌های قدرت، بازار برق و دینامیک سیستم‌های قدرت است.

محمد کاظم شیخ‌الاسلامی تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی ارشد و دکتری مهندسی برق به ترتیب در سال‌های ۱۳۷۹ و ۱۳۸۴ از دانشگاه تربیت مدرس به پایان رسانیده است و هم‌اکنون استادیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه تربیت مدرس می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: بازار برق و مطالعات برنامه‌ریزی و بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت.

محمدصادق سپاسیان تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد برق قدرت به ترتیب در سال‌های ۱۳۶۹ و ۱۳۷۲ از دانشگاه تبریز و دانشگاه تهران و در مقطع دکتری برق قدرت از دانشگاه تربیت مدرس در سال ۱۳۷۹ به پایان رسانده است و هم‌اکنون استادیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه صنعت آب و برق شهید عباسپور می‌باشد زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان برنامه‌ریزی سیستم‌های قدرت و توزیع، مطالعات توان راکتیو و مطالعات پایداری ولتاژ می‌باشد.

نتایج به‌دست آمده، نشان‌دهنده سرعت حل بسیار بالاتر و نیز دقت بیشتر حل مسأله در حالت استفاده از روش‌های MINLP و NLP نسبت به روش MILP می‌باشد. همچنین با به‌کارگیری روش حل مناسب BARON، دسترسی به نقطه بهینه مطلق نیز امکان‌پذیر گشته است. همچنین در این مقاله، شرایط وقوع پیشامد بر روی خطوط انتقال و نیز واحدهای نیروگاهی جهت حل توسط روش‌های MINLP، MILP و NLP مدل‌سازی شد و وارد مسأله گردید. در انتها نتایج حاصل از حل مسأله برای شبکه گارور و شبکه ۱۱۸ شینه IEEE مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نتایج به‌دست آمده می‌توان نتیجه گرفت که در شبکه مطالعه‌شده، مدل‌سازی شرایط وقوع پیشامد از اهمیت بالایی برخوردار است. در تمامی مطالعات انجام‌شده در این مقاله، تمامی پیشامدها با احتمال برابر در نظر گرفته شده بودند و برای ادامه کار، در نظرگیری احتمال وقوع پیشامدها جهت اولویت‌بندی آنها پیشنهاد می‌گردد.

مراجع

- [1] L. L. Garver, "Transmission network estimation using linear programming," *IEEE Trans. on Power App. Syst.*, vol. 89, no. 7, pp. 1688-1697, Sep./Oct. 1970.
- [2] S. D. La Torre, A. J. Conejo, and J. Contreras, "Transmission expansion planning in electricity markets," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 23, no. 1, pp. 238-248, Feb. 2008.
- [3] N. Alguacil, A. L. Motto, and A. J. Conejo, "Transmission expansion planning: a mixed - integer LP approach," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 18, no. 3, pp. 1070-1076, Aug. 2003.
- [4] O. B. Tor, A. N. Guven, and M. Shahidehpour, "Congestion-driven transmission planning considering the impact of generator expansion," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 23, no. 2, pp. 781-789, May 2008.
- [5] A. Monticelli and R. Romero, "A hierarchical decomposition approach for transmission network expansion planning," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 9, no. 1, pp. 373-380, Feb. 1994.
- [6] I. G. Sanchez, R. Romero, J. R. S. Mantovani, and M. J. Rider, "Transmission - expansion planning using the DC model and nonlinear - programming technique," *IEE Proc. Generation, Transmission, and Distribution*, vol. 152, no. 6, pp. 763-769, Nov. 2005.
- [7] M. J. Rider, A. V. Garcia, and R. Romero, "Transmission system expansion planning by a branch - and - bound algorithm," *IET Generation, Transmission, and Distribution*, vol. 2, no. 1, pp. 90-99, 2008.
- [8] S. Haffner, A. Monticelli, A. Garcia, and R. Romero, "Specialised branch - and - bound algorithm for transmission network expansion planning," *IEE Proc. Generation, Transmission, and Distribution*, vol. 148, no. 5, pp. 482-488, Sep. 2001.
- [9] M. V. F. Pereira and L. M. V. G. Pinto, "Application of sensitivity analysis of load supplying capability to interactive transmission expansion planning," *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, vol. 104, no. 2, pp. 381-389, Feb. 1985.
- [10] H. Seifi, M. S. Sepasian, H. Haghghat, and A. Akbari, "Multi-voltage approach to long-term network expansion planning," *IET, Generation, Transmission, and Distribution*, vol. 1, no. 5, pp. 826-835, Sep. 2007.
- [11] R. K. Gajbhiye, D. Naik, S. Dambhare, and S. A. Soma, "An expert system approach for multi-year short-term transmission system expansion planning: an indian experience," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 23, no. 1, pp. 226-237, Feb. 2008.
- [12] R. Keypour, M. R. Haghifam, and H. Seifi, "Benefit - oriented long-term transmission expansion planning in competitive electricity markets using genetic algorithm," *J. of Iranian Association of Electrical and Electronic Engineers*, vol. 4, no. 1, pp. 13-21, Sep. 2007.
- [13] P. Murugan, S. Kannan, and S. Baskar, "Application of NSGA-II algorithm to single-objective transmission constrained generation expansion planning," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 24, no. 4, Nov. 2009.
- [14] A. S. D. Braga and J. T. Saraiva, "A multiyear dynamic approach for transmission expansion planning and long-term marginal costs