

روش نوین برنامه‌ریزی توسعه و جایابی نیروگاهها با لحاظ کردن محدودیت خطوط انتقال

سید هادی حسینی*، دکتر حسین سیفی**، دکتر محسن پارسا مقدم***، دکتر محمدرضا امیدخواه****،
مجید فرمد***** و محمود غزنوی*****
دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه زنجان
دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه تربیت مدرس
شرکت توانیر

(دریافت مقاله: ۸۲/۳/۷ - دریافت نسخه نهایی: ۸۳/۱۰/۱۶)

چکیده - برنامه‌ریزی توسعه نیروگاهها یکی از مهمترین بخشهای برنامه‌ریزی توسعه شبکه است. برنامه‌ریزی توسعه نیروگاهها برای مدت زمانی در حدود ۱۰ الی ۳۰ سال انجام می‌شود. ابعاد بزرگ این مسئله باعث شده برای حل آن از برخی ساده سازیها استفاده شود. نرم افزار WASP یکی از قویترین نرم افزارهای برنامه‌ریزی توسعه نیروگاههاست که تمام بار و تولید را متمرکز در یک شین در نظر می‌گیرد و قادر به تعیین محل احداث نیروگاهها نیست. در این مقاله روش نوینی بیان می‌شود که قادر است محل احداث نیروگاههای جدید را نیز تعیین کند. اساس این روش بر استفاده از برنامه‌ریزی دینامیکی و ضرایب حساسیت استوار است. در انتهای این مقاله نتایج اعمال این روش بر روی شبکه برق ایران برای سالهای بین ۱۳۹۰ تا ۱۴۰۰ آورده شده است.

واژگان کلیدی: برنامه‌ریزی توسعه نیروگاهها، جایابی نیروگاهها، WASP، برنامه‌ریزی توسعه شبکه

A New Generation Allocation and Expansion Planning Algorithm Including Transmission System Effects

S. H. Hosseini, H. Seifi, M. Parsa, M. R. Omidkhah, M. Farmad and M. Gaznavi
Department of Industrial Engineering, Zanjan University
Department of Industrial Engineering, Tarbiat Modares University
Department of Planning, Tavanir, Co.

Abstract: *Generation Expansion Planning (GEP) is one of major modules of power system planning studies, normally performed for the next 10-30 years horizon. The current industrial practices are to find the generation requirements based on a*

* - دانشجوی دکترا ** - استاد *** - دانشیار **** - مدیر دفتر برنامه‌ریزی تولید ***** - کارشناس دفتر برنامه‌ریزی تولید

nodal analysis. In this way, the allocations are not determined and subsequent studies are required to find the exact locations which as decomposed from the earlier stage, may result in non-optimum solution. A new approach is proposed in this paper in which, based on dynamic programming and sensitivity factors, GEP is performed with due to consideration of transmission system effects. In this way, the allocations of justified generation plants are also determined. The results for Iranian Power Grid for the years 2011 to 2021 are demonstrated.

Keywords: *Generation Expansion Planning, Network planning, Generation allocation, Power system planning*

۱- مقدمه

هزینه تأمین سوخت در تمامی قسمتهای ناحیه فوق یکسان باشد می‌توان اطمینان داشت که پاسخ WASP پاسخ بهینه است. ولی معمولاً چنین فرضهایی صادق نیستند [۱، ۴ و ۵]. اگر نیروگاههای جدید در مراکز دورتر از بارها واقع شوند امکان دارد باعث تحمیل هزینه زیاد احداث خطوط انتقال شود و یا برعکس اگر این نیروگاهها در مراکز نزدیک بارها و دورتر از منابع تأمین سوخت واقع شوند ممکن است منجر به افزایش هزینه تأمین سوخت شود [۴، ۱]. بنابراین برنامه‌ریزی توسعه نیروگاهها بدون در نظر گرفتن توزیع جغرافیایی بارها، محدودیتهای تأمین سوخت و انتقال توان الکتریکی توسط خطوط انتقال و محدودیتهای دیگر ناشی از محدودیتهای جغرافیایی و قیمت زمین و غیره به پاسخ بهینه واقعی نخواهد رسید. تحقیقات زیادی در مورد انجام این مطالعات به صورت کامل صورت گرفته است [۱ و ۴-۶]. در برخی از مقالات نیز به تاثیر شرایط زیست محیطی بر برنامه‌ریزی توسعه نیروگاهها پرداخته شده است [۷].

در روش ارائه شده در مرجع [۱] که JASP نامیده شده است توزیع جغرافیایی بارها در نظر گرفته شده و تغییرات هزینه تأمین سوخت برای نواحی مختلف نیز دیده شده است. در این روش، ناحیه مورد مطالعه به چندین منطقه تقسیم می‌شود. هزینه تأمین سوخت در هر منطقه نسبت به مناطق دیگر متفاوت است ولی در سرتاسر نقاط داخل این منطقه یکسان فرض می‌شود. مجموع بارهای درون هر منطقه به صورت متمرکز در یک نقطه که مرکز ثقل باری آن منطقه است، فرض می‌شود. برای یافتن نوع، ظرفیت، زمان و مکان احداث نیروگاههای جدید، در این روش علاوه بر روش دینامیکی پیش رو که WASP نیز از آن استفاده کرده است، از مفهوم ضرایب

برنامه‌ریزی توسعه نیروگاهها یکی از مهمترین بخشهای برنامه‌ریزی توسعه شبکه است. هدف از برنامه‌ریزی توسعه نیروگاهها یافتن ترکیبی از نیروگاههاست که با احداث آنها بار مورد نیاز مصرف کنندگان به صورت مطمئن تأمین و کمترین هزینه نیز برای تأمین بارها به شبکه تحمیل شود. در این برنامه‌ریزی باید مشخص شود که چه نوع نیروگاهی، با چه ظرفیتی، در چه زمانی و در چه مکانی باید احداث شده تا هدف فوق برآورده شود. این برنامه‌ریزی معمولاً برای یک دوره زمانی ۱۰ تا ۳۰ ساله انجام می‌شود [۱]. ابعاد بزرگ مسئله که از تعداد زیاد متغیرهای تصمیم‌گیری در آن و وجود قیود و رفتارهای غیر خطی و گسسته متغیرها ناشی می‌شود مانع از ارائه یک روش جامع برای حل کل این مسئله بهینه‌سازی شده است و روشهای ارائه شده برای حل آن از ساده‌سازی برای کاهش ابعاد آن سود برده‌اند [۱-۳] و [۸ و ۹].

نرم افزار WASP-III که امروز یکی از قویترین ابزارهای برنامه‌ریزی توسعه نیروگاههاست و از چندین دهه پیش در بسیاری از کشورها از آن استفاده شده است از پاسخ دادن به محل احداث نیروگاههای جدید دوری کرده و فرض می‌کند که تمامی بارها و تولید تمامی نیروگاهها در یک شین به طور متمرکز واقع شده‌اند. این فرض باعث کاهش زیاد ابعاد مسئله شده و آنرا قابل حل می‌کند [۱]. روشهای گوناگونی با استفاده از روشهای نوین بهینه‌یابی نظیر الگوریتم ژنتیک و غیره با استفاده از فرض مشابه فوق برای برنامه‌ریزی توسعه نیروگاهها ارائه شده است [۳، ۸ و ۹]. در صورتی که توزیع بار مصرف کنندگان در ناحیه جغرافیایی مورد مطالعه یکنواخت بوده و یا

حساسیت کمک گرفته می‌شود. بدین ترتیب که در هر مرحله از تصمیم‌گیری از میان نیروگاههای کاندید، نیروگاهی برای احداث انتخاب می‌شود که با کمترین هزینه، بیشترین تأثیر را بر بهبود رفتار شبکه بگذارد. در صورتی که بین دو منطقه تبادل توانی صورت گیرد، هزینه انتقال توان که تابعی از مقدار توان منتقله و فاصله بین مراکز ثقل باری آن دو است به مجموعه هزینه‌ها افزوده می‌شود. با توجه به مطالب گفته شده در این روش از اثر خطوط انتقال موجود بین مناطق مختلف چشم‌پوشی شده است.

در مرجع [۴] برنامه‌ریزی توسعه و جایابی نیروگاهها به دو مسئله تعیین نوع، ظرفیت نیروگاهها و تعیین محل احداث نیروگاهها تقسیم شده است. برای یافتن پاسخ قسمت اول مسئله، از روشهای مختلف ارایه شده استفاده شده و برای یافتن پاسخ مسئله دوم، با لحاظ کردن خطوط انتقال (با مدل سیستم حمل و نقل) و هزینه سوخت‌رسانی از روش برنامه‌ریزی دینامیکی پیش‌رو استفاده شده است. این موضوع باعث افزایش ابعاد مسئله و پیچیدگی آن شده که برای رفع آنها روشهای ویژه‌ای معرفی شده است. در انتهای این مقاله نتایج اجرای آن برای شبکه برق چین آورده شده است. در این مطالعه شبکه برق چین به چهار ناحیه تقسیم شده است. به سبب استفاده از تکنیکهای بهینه‌سازی مبتنی بر روشهای کلاسیک ریاضی به‌نظر می‌رسد با افزایش ابعاد مسئله، به‌طور مثال با افزایش نواحی تقسیم‌بندی شده شبکه مورد مطالعه، رسیدن به پاسخ بهینه با این روش مشکل خواهد بود [۵] و قادر به حل مسئله‌های با ابعاد بزرگ و تعداد مناطق بیشتر نیست، همچنان‌که در مرجع مورد نظر، از این روش برای برنامه‌ریزی توسعه نیروگاهها در کشور چین که به چهار منطقه تقسیم شده، استفاده شده است. در مرجع [۵] روشی ارایه شده که علی‌رغم برطرف کردن برخی از محدودیتهای روش مرجع [۴]، در آن از تفاوت قیمت سوخت در نواحی مختلف و نرخ خروج اضطراری نیروگاهها صرف‌نظر شده است. در مرجع [۶]، نحوه تغییرات و رفتار بار وارد مسئله نشده بنابراین روش ارایه شده قادر به تعیین نوع نیروگاهها نیست.

در این مقاله روشی متفاوت از روش مراجع فوق بیان می‌شود که قادر است با استفاده از نرم افزار WASP و الگوریتم دینامیکی، با لحاظ کردن محدودیتهایی همانند نرخ خروج اضطراری نیروگاهها (بر خلاف روش مرجع [۵])، علاوه بر تعیین نوع (بر خلاف روش مرجع [۶])، ظرفیت و زمان احداث نیروگاههای جدید مکان احداث آنها را نیز معین کند و علاوه بر آن قادر به در نظر گرفتن محدودیتهای تأمین سوخت و خطوط انتقال موجود نیز هست (بر خلاف روش مراجع [۱ و ۴]). همچنین به سبب تکنیک به‌کار گرفته شده در این روش، به راحتی قابل اعمال به شبکه‌های با ابعاد بزرگ بوده و حتی به‌جای مفهوم مناطق از مفهوم شین نیز در حل آن می‌توان بهره جست (همانند روش مرجع [۴] محدودیت ابعاد مسئله در اینجا وجود ندارد).

در ادامه این مقاله پس از بیان جزئیات روش، نتایج اجرای آن برای شبکه برق ایران نیز آورده شده است.

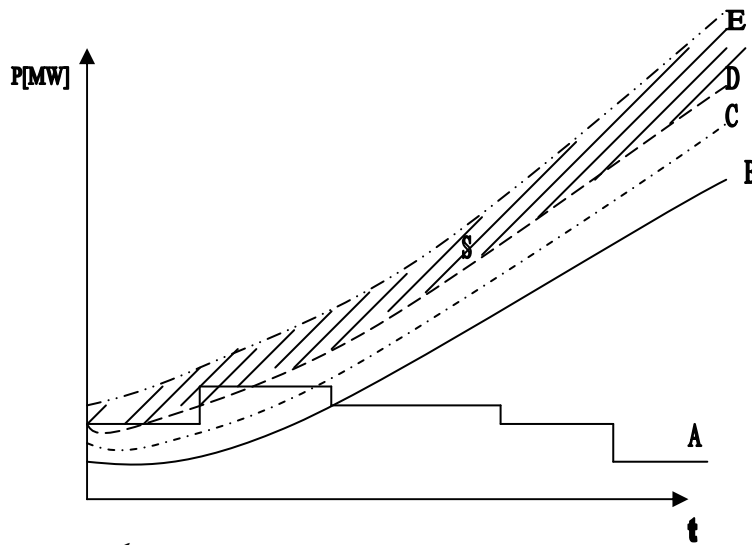
۲- بیان ریاضی برنامه‌ریزی توسعه نیروگاهها

مجموعه ظرفیت قابل تولید نیروگاههای موجود یک شبکه باید قادر به تأمین مطمئن بار باشند. اگر مجموعه توان مصرفی مصرف کنندگان در سال t ام از دوره زمانی مورد مطالعه، برابر S_t و مجموعه ظرفیت قابل تولید نیروگاهها، P_t (در کل شبکه) باشد، آن‌گاه براساس نکته فوق باید:

$$(1) \quad (1 + a)S_t \leq P_t \leq (1 + b)S_t$$

که $t = 1, 2, \dots, T$ بوده و T طول کل دوره زمانی مورد مطالعه است. در معادله فوق a حداقل ضریب ذخیره چرخان و b حداکثر مقدار آن است. مقدار ذخیره چرخان در یک شبکه برای حصول اطمینان از تغذیه مطمئن بار است. علاوه بر این مجموع ظرفیت قابل تولید نیروگاهها باید به حدی باشد که اندیس قابلیت اطمینان LOLP از مقدار مجاز و استاندارد خود فراتر نرود. به عبارت دیگر:

$$(2) \quad LOLP(t) \leq \varepsilon$$



شکل ۱- وضعیت قیود و ناحیه پاسخ برنامه‌ریزی توسعه نیروگاهها

دوره t ام است.

ترکیب نیروگاههای جدید باید به گونه‌ای باشد که هزینه تأمین بارها مینیمم باشد. مقدار هزینه از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$C = \sum_{t=1}^T (I_t + M_t + F_t) \quad (4)$$

I_t هزینه توسعه نیروگاهها، M_t هزینه تعمیر و نگهداری نیروگاهها و F_t هزینه سوخت نیروگاهها در دوره t ام است. برنامه‌ریزی توسعه نیروگاهها یک مسئله بهینه‌سازی با هدف مینیمم کردن تابع C تحت قیود (۱)، (۲) و (۳) است.

۳- مبانی روش پیشنهادی برنامه‌ریزی توسعه نیروگاهها

در این قسمت قصد بر این است مبانی و جزییات روش حلی برای برنامه‌ریزی توسعه نیروگاهها بیان شود که علاوه بر تعیین نوع، ظرفیت و زمان احداث نیروگاههای جدید، مکان احداث آنها را نیز معین کند. در این روش ابتدا نوع، ظرفیت و زمان احداث نیروگاهها تعیین شده و سپس با الگوریتم جداگانه‌ای مکان احداث آنها معین می‌شود.

برای تعیین نوع، ظرفیت و زمان احداث نیروگاهها از نرم افزار WASP-III کمک گرفته شده و برای اجرای آن از قیمت

که ε مقدار استاندارد LOLP را نشان می‌دهد.

شکل (۱) وضعیت قیود فوق و ناحیه جواب را نشان می‌دهد. شکل (۱) منحنی A، نشان‌دهنده ظرفیت نصب شده نیروگاهها در شبکه است. افزایش این منحنی بیان‌کننده افزایش ظرفیت کل سیستم ناشی از به مدار آمدن یک نیروگاه در دست احداث بوده و کاهش آن به معنای خروج یک واحد نیروگاهی در اثر پایان عمر مفید آن است. منحنی B مقدار بار مصرف کنندگان را نشان می‌دهد. صعودی بودن این منحنی به معنای افزایش بار مورد نیاز مصرف کنندگان است. منحنی C متناظر با ضریب ذخیره چرخان a و E متناظر با ضریب ذخیره چرخان b است. منحنی D نیز بیان‌کننده محدودیت قابلیت اطمینان مربوط به اندیس LOLP است. با توجه به نکات گفته شده مقدار تولید باید در ناحیه هاشور خورده S باشد.

نیروگاههایی که به شبکه افزوده می‌شوند می‌توانند آبی، بخاری، اتمی و یا از انواع دیگر باشند. اگر انواع نیروگاههای قابل احداث در شبکه N_g باشد، تعداد نیروگاهی که از هر نوع در هر سال احداث می‌شود باید در رابطه زیر صدق کند:

$$N_i^t \leq N_{g \max i}^t \quad i = 1, \dots, N_g \quad t = 1, \dots, T \quad (3)$$

N_i^t تعداد نیروگاههای احداث شده از نوع i در دوره t ام بوده و $N_{g \max i}^t$ ماکزیمم تعداد نیروگاههای قابل احداث از نوع i در

متوسط سوخت در قسمتهای مختلف ناحیه مورد مطالعه استفاده می شود (در واقع در این بخش از حل، نامساویهای ۱، ۲، ۳ و تساوی ۴ همزمان دیده می شوند). برای یافتن مکان احداث نیروگاهها، ناحیه مورد مطالعه به J منطقه مختلف تقسیم می شود (منظور صرفاً مناطق جغرافیایی نبوده و می توان هر پست را به عنوان یک منطقه در این مطالعات لحاظ کرد). بار هر قسمت در دوره t ام، $S_{i,t}$ و قیمت سوخت F_i در هر منطقه $(i=1, \dots, J)$ نیز مشخص است. به علاوه براساس خطوط انتقال موجود، ماکزیمم تبادل توان الکتریکی بین دو منطقه i و j نیز مشخص است که با T_{ij}^{\max} نمایش داده می شود. اگر میزان تولید نیروگاههای موجود در هر ناحیه در دوره t ام $P_{i,t}$ باشد، مقدار تولید نیروگاههای جدید در این دوره $P_{i,t}^{\text{new}}$ ، باید در روابط زیر صدق کند:

$$(1+a)S_{i,t} \leq P_{i,t} + \sum_{j=1}^J T_{ij,t} + P_{i,t}^{\text{new}} \leq (1+b)S_{i,t} \quad (5)$$

$$t = 1, \dots, T$$

$$T_{ij,t} \leq T_{ij}^{\max} \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^k P_{i,t}^{\text{new}} = P_t^{\text{new}} \quad (7)$$

P_t^{new} ظرفیت قابل تولید نیروگاههای جدید است که توسط WASP برای دوره t ام توجیه شده است. رابطه (۵) بیان دیگری از رابطه (۱) است و در واقع تعادل بین تولید و بار را بیان می کند. رابطه (۶) نیز محدودیت تبادل توان بین دو منطقه را نشان داده و رابطه (۷) نتایج به دست آمده از اجرای WASP را به قسمت دوم روش انتقال می دهد. برای اجرای بخش دوم روش، ابتدا اندیس زیر برای هر منطقه محاسبه می شود:

$$b_{i,t} = P_{i,t} - (1+a)S_{i,t} \quad i = 1, \dots, J \quad (8)$$

مقدار مثبت اندیس فوق در دوره t ام برای یک منطقه به معنای اضافه بودن میزان تولید در آن منطقه از مقدار بار مصرفی در آن است. مقدار اضافه تولید این منطقه باید به سایر مناطق انتقال داده شود. در اینجا تنها انتقال توان به مناطق همجوار در نظر گرفته می شود (این فرض تنها برای ساده سازی مسئله در نظر

گرفته می شود و در روند اعمال روش امکان انتقال توان به سایر مناطق نیز فراهم می آید). برای تعیین مقصد انتقال این توان اضافی، مناطق همجوار منطقه مورد نظر به صورت زیر تقسیم بندی می شوند:

مناطق i که اندیس تعریف شده توسط رابطه (۸) برای آنها منفی است و امکان تبادل توان بین این مناطق و منطقه مورد نظر بر اساس خطوط انتقال موجود، وجود دارد.

مناطق i که اندیس تعریف شده توسط رابطه (۸) برای آنها منفی است و امکان تبادل توان بین این مناطق و منطقه مورد نظر بر اساس خطوط انتقال موجود، وجود ندارد.

مناطق i که اندیس تعریف شده توسط رابطه (۸) برای آنها مثبت است و امکان تبادل توان بین این مناطق و منطقه مورد نظر بر اساس خطوط انتقال موجود وجود داشته و همچنین امکان تبادل توان بین این مناطق و سایر مناطق همجوارشان به غیر از منطقه مورد نظر نیز وجود دارد.

مناطق i که اندیس تعریف شده توسط رابطه (۸) برای آنها مثبت است و امکان تبادل توان بین این مناطق و منطقه مورد نظر بر اساس خطوط انتقال موجود وجود داشته ولی امکان تبادل توان بین این مناطق و سایر مناطق همجوارشان به غیر از منطقه مورد نظر وجود ندارد.

مناطق i که اندیس تعریف شده توسط رابطه (۸) برای آنها مثبت است و امکان تبادل توان بین این مناطق و منطقه مورد نظر بر اساس خطوط انتقال موجود، وجود نداشته ولی امکان تبادل توان بین این مناطق و سایر مناطق همجوارشان به غیر از منطقه مورد نظر وجود دارد.

مناطق i که اندیس تعریف شده توسط رابطه (۸) برای آنها مثبت است و امکان تبادل توان بین این مناطق و منطقه مورد نظر بر اساس خطوط انتقال موجود، وجود نداشته و همچنین امکان تبادل توان بین این مناطق و سایر مناطق همجوارشان به غیر از منطقه مورد نظر نیز وجود ندارد.

متناظر با هر دسته فوق، اندیسهایی برای مناطق واقع شده در آن دسته تعریف می شود. این اندیسهها به گونه ای تعریف می شوند

که در نهایت نیروگاههای جدید در مکانی احداث شوند که کمترین هزینه تولید به شبکه تحمیل شده و از طرف دیگر کمترین خطوط انتقال نیز به مجموعه شبکه اضافه شود. این اندیسها برای شش دسته فوق بصورت زیر تعریف می شوند (در واقع اندیسهای f_1 تا f_5 باعث انتقال توان به نواحی ای می شوند که از نظر بالا بودن قیمت سوخت، امکان تبادل توان با مناطق مجاور و پوشش دادن مصارف در اولویت باشند):

برای مناطق واقع شده در دسته یک، اندیسی برابر مجموع وزنی دو ضریب زیر:

$$f_1 = \frac{\text{Min}(b_{k,t})}{b_{i,t}} \quad (9)$$

$$f_2 = \frac{\text{Min}(F_k)}{F_i - \text{Min}(F_k)} \quad (10)$$

I متناظر با منطقه ای است که اندیسهای فوق برای آن معین می شود و k متناظر با مناطق همجوار منطقه مورد نظر برای تعیین تبادل توان از آن منطقه است.

برای مناطق واقع شده در دسته دو، اندیسی برابر مجموع وزنی دو ضریب دسته یک و ضریب زیر:

$$f_3 = \alpha \cdot b_{i,t} \cdot L_i \quad (11)$$

در اندیس فوق α از جنس پول بوده و بیان کننده هزینه احداث یک کیلومتر از خط انتقال برای تبادل واحد توان الکتریکی است، L_i نیز فاصله این منطقه از منطقه ای است که توان از آن منتقل می شود.

برای مناطق واقع شده در دسته سه، اندیسی برابر مجموع وزنی دو اندیس زیر تعریف می شود:

$$f_4 = \frac{\text{Min}(b_{k,t})}{\sum b_{i,t}} \quad (12)$$

$$f_5 = \frac{1}{\sum T_{i,l}} \quad (13)$$

I در دو اندیس فوق مناطق همجوار با منطقه واقع شده در این دسته است.

برای مناطق واقع شده در دسته چهار، اندیسی برابر مجموع وزنی دو اندیس f_3 و f_4 تعریف می شود که L_i متوسط فاصله مناطق واقع شده در این دسته با مناطق همجوار خود است.

برای مناطق واقع شده در دسته پنج، اندیسی برابر مجموع وزنی دو اندیس f_3 و f_4 تعریف می شود که L_i فاصله این منطقه از منطقه ای است که توان از آن منتقل می شود، می باشد.

برای مناطق واقع شده در دسته پنج، اندیسی برابر مجموع وزنی دو اندیس f_3 و f_4 تعریف می شود که L_i مجموع فاصله این منطقه از منطقه ای که توان از آن منتقل می شود و متوسط فاصله مناطق واقع شده در این دسته با مناطق همجوار خود است.

از بین مناطق همجوار، توان ابتدا به منطقه ای انتقال می یابد که کمترین اندیس را داشته باشد. توان تبدالی تا اندازه ای خواهد بود که باعث تغییر دسته منطقه مورد نظر شود. در این صورت با ترکیب جدید، اندیسهای متناظر با مناطق محاسبه شده و مقصد جدید توان انتقالی، مشخص می شود. این کار تا جایی ادامه می یابد که مقدار اضافه تولید به مناطق همجوار انتقال یابد.

با تعیین میزان تبادل، اندیسهای $b_{i,t}$ هر منطقه نیز تصحیح می شود. این کار برای تمامی مناطقی که اندیس $b_{i,t}$ آنها مثبت است انجام می شود. در صورت نیاز، با توجه به تصمیمهای اخذ شده در مورد میزان تبادلهای، مقادیر T_{ij}^{\max} نیز تصحیح می شود. در انتها تنها مناطقی باقی می ماند که اندیس $b_{i,t}$ متناظر با آنها مقداری در حدود صفر یا منفی است، که با احداث نیروگاههای جدید این مقادیر نیز باید اصلاح شوند.

برای تعیین محل احداث نیروگاههای جدید متناظر با هر نیروگاه توجه شده، اندیسی برابر مجموع وزنی سه اندیس زیر برای مناطق مختلف تعریف می شود (با تعریف اندیسهای f_6 تا f_9 نیروگاههای جدید در نواحی ای قرار می گیرند که از نظر هزینه سوخت، امکان تبادل توان با مناطق مجاور و نزدیکی به مراکز مصرف در اولویت باشند):

$$f_6 = \frac{|b_{i,t}|}{\text{Min}(|b_{k,t}|)} \quad (14)$$

$$f_7 = \frac{F_{i\max} - F_i}{F_{i\max}} \cdot \lambda \quad (15)$$

λ در رابطه فوق بازده نیروگاه متناظر است (با لحاظ کردن بازده سعی می شود نیروگاههای با بازده کمتر در نواحی با قیمت سوخت پایینتر قرار گیرند).

در صورتی که امکان تبادل با خطوط انتقال موجود با مناطق همجوار وجود داشته باشد، اندیس سوم به صورت زیر تعریف می شود:

$$f8 = \frac{\sum_{k=1}^J T_{ik}^{\max} - \sum_{j=1}^J T_{ik}}{\sum_{k=1}^J T_{ik}^{\max}} \quad (16)$$

در غیر این صورت اندیس سوم به صورت زیر تعریف می شود:

$$f9 = \frac{1}{\alpha \cdot (G - b_{i,t}) \cdot L_i} \quad (17)$$

α در اندیس فوق مشابه اندیس $f3$ است و G مقدار توان تولیدی نیروگاه جدید که اندیسهای فوق برای آن محاسبه می شود و L_i متوسط فاصله منطقه مورد نظر از مناطق همجوار با اندیس $b_{i,t}$ منفی است.

در نهایت اندیس واحدی به هر منطقه متناظر با هر نیروگاه جدید نسبت داده می شود. نیروگاه جدید مورد نظر در منطقه ای واقع می شود که بزرگترین اندیس را داشته باشد. پس از جایابی این نیروگاه، مقادیر اندیس $b_{i,t}$ متناظر با هر منطقه تصحیح شده و در صورت ظهور یک منطقه با اندیس مثبت، قبل از ادامه کار، مقدار توان اضافی این منطقه با روش گفته شده به سایر مناطق انتقال می یابد، و سپس این کار تا پایان یافتن جایابی نیروگاههای توجیه شده توسط WASP ادامه می یابد.

روند گفته شده فوق به دو صورت پیشرو و پس رو برای طول پروید زمانی مورد مطالعه قابل اعمال است. در روش پیش رو، روند گفته شده برای سال ابتدایی اعمال شده و سپس برای سالهای بعدی با تثبیت کردن نیروگاههای جایابی شده برای سالهای گذشته اعمال می شود. در روش پس رو، روند گفته شده ابتدا برای دوره t ام اجرا می شود و سپس برای سالهای بعدی به ترتیب به سمت پایین تکرار می شود. برای اجرای روش فوق در دوره $t-1$ ام، تنها باید در نظر داشت که نیروگاههایی که در یک منطقه واقع می شوند از نیروگاههای واقع شده در آن منطقه در دوره t ام بیشتر نشوند.

در بخش چهارم، نتایج اجرای این روش برای شبکه سراسری

برق ایران آورده شده است.

۴- نتایج مطالعات برای شبکه سراسری برق ایران

ایران کشور پهناوری است که از منابع سوخت فسیلی نیز برخوردار است. مراکز عمده منابع سوخت در قسمتهای جنوبی واقع شده اند که در سالهای گذشته با لوله های نفت و گاز این منابع به اکثر مناطق کشور انتقال داده شده است. مناطق شانزده گانه کشور بر حسب قیمت سوخت در این مطالعه به چهار قسمت تقسیم شده اند، مناطق واقع در قسمت اول دارای ارزانترین قیمت سوخت و مناطق واقع در قسمت چهارم گرانترین قیمت سوخت را دارا هستند. جدول (۱) این تقسیم بندی را نشان می دهد. مقدار بار مصرفی مناطق شانزده گانه ایران در جدول (۲) آورده شده است. نتایج اجرای نرم افزار WASP نیز برای سالهای بین ۱۳۹۰ تا ۱۴۰۰ در جدول (۳) آمده است. فرضیات اجرای این نرم افزار (نیروگاههای کاندید در نظر گرفته شده) در جدول (۴) آورده شده است (داده های ورودی دیگر WASP به همراه سایر اطلاعات صنعت برق ایران در مرجع [۱۰] موجود است). اطلاعات این جدول بر اساس مشخصات هر کدام از انواع نیروگاهها و اطلاعات نوعی برای نیروگاههای شبکه ایران است. در جدول (۵) نیز مقادیر T_{ij} بین مناطق شانزده گانه آورده شده است (داده های این جدول برابر با مجموع ظرفیت خطوط ۴۰۰ و ۲۳۰ کیلوولت بین مناطق در سال ۱۳۸۱ است). جدول (۶) ویژگیهای چهار اجرای جایابی نیروگاهها را نشان می دهد، جداول (۷) تا (۱۰) نیز نتایج چهار اجرای روش فوق را نشان می دهند (ظرفیت خطوط انتقال آورده شده در این جداول بر حسب پریونیت در مبنای ۱۰۰ مگاوات امپر است).

همچنان که از نتایج پیداست، در صورت در نظر نگرفتن هزینه سوخت، مجموعه های تولید در نزدیکترین نقطه به مراکز بار قرار می گیرند، ولی با لحاظ کردن هزینه سوخت، تمایل روش، به احداث واحدهای تولیدی در مناطق با دسترسی به سوخت ارزانتر است. همچنین با افزایش ضرایب وزنی مربوط

جدول ۱- تقسیم‌بندی مناطق شانزده‌گانه کشور بر حسب قیمت سوخت (میزان هزینه دسترسی به سوخت)

مناطق	توضیحات هر دسته
فارس، خراسان، خوزستان	ارزانترین مناطق
آذربایجان، باختر، اصفهان، هرمزگان، کرمان	۵ درصد گرانتر از دسته یک
غرب، زنجان، گیلان، مازندران، سمنان، تهران، یزد	۱۰ درصد گرانتر از دسته یک
سیستان و بلوچستان	گرانترین مناطق. ۲۰ درصد گرانتر از دسته یک

جدول ۲- بار مصرفی مناطق شانزده‌گانه ایران در سالهای ۱۳۹۰ تا ۱۴۰۰ (بر حسب مگاوات)

نام برق منطقه‌ای	1390	1391	1392	1393	1394	1395	1396	1397	1398	1399	1400
آذربایجان	3007	3230	3464	3711	3970	4242	4528	4826	5139	5466	5807
باختر	3201	3420	3650	3890	4140	4401	4673	4956	5250	5556	5873
اصفهان	4775	5033	5297	5568	5846	6130	6420	6715	7017	7324	7636
فارس	3173	3316	3461	3607	3755	3904	4054	4205	4357	4509	4661
غرب	1471	1576	1686	1801	1922	2049	2181	2319	2463	2613	2769
هرمزگان	1925	2066	2215	2371	2535	2707	2887	3076	3273	3479	3693
زنجان	1343	1439	1539	1645	1755	1870	1991	2117	2248	2385	2527
کرمان	1897	2018	2144	2274	2410	2550	2695	2845	3001	3161	3326
گیلان	1354	1449	1549	1653	1763	1877	1996	2120	2250	2384	2524
مازندران	2393	2556	2727	2905	3091	3285	3486	3696	3914	4140	4375
سیستان و بلوچستان	597	615	633	650	667	684	700	716	731	746	760
سمنان	452	475	499	523	547	572	598	624	650	676	703
تهران	6919	7132	7342	7548	7751	7948	8142	8330	8512	8689	8860
خراسان	3165	3330	3498	3670	3846	4025	4208	4393	4582	4773	4967
یزد	817	868	920	975	1032	1090	1151	1213	1277	1343	1411
خوزستان	5031	5219	5406	5593	5780	5965	6148	6330	6509	6687	6862

جدول ۳- نتایج اجرای نرم افزار WASP برای سالهای ۱۳۹۰ تا ۱۴۰۰

نوع نیروگاه	1390	1391	1392	1393	1394	1395	1396	1397	1398	1399	1400
گازی کوچک	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
گازی بزرگ	-	-	-	1	2	1	0	11	1	12	14
بخاری	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1
سیکل ترکیبی	-	-	-	6	9	10	11	8	12	9	11

جدول ۴- داده‌های ورودی WASP مربوط به نیروگاههای کاندید

نوع نیروگاه	توان تولیدی (MW)	زمان احداث (سال)	عمر (سال)	F.O.R. (درصد)	متوسط سالیانه زمان تعمیرات (روز)	مصرف داخلی (درصد)	راندمان (درصد)	هزینه احداث (\$/KW)	هزینه نگهداری (\$/KW)
گازی کوچک	130	1	20	9.8	35	0.8	25	620	19
گازی بزرگ	130	2	15	10.2	40	0.6	33.4	1000	11
بخاری	325	5	30	12.9	56	6.4	38.5	1733	34
سیکل ترکیبی	400	5	30	13.67	43	1.6	50	1793	12

جدول ۶- ویژگیهای چهار اجرای مختلف

شماره اجرا	ویژگی خاص اجرا
اجرای اول	بدون در نظر گرفتن ضرایب مربوط به هزینه سوخت، هزینه خطوط انتقال ارزان
اجرای دوم	بدون در نظر گرفتن ضرایب مربوط به هزینه سوخت، هزینه خطوط انتقال ۴۰ درصد گرانتر از اجرای اول
اجرای سوم	اجرای اول با در نظر گرفتن هزینه سوخت
اجرای چهارم	اجرای دوم با در نظر گرفتن هزینه سوخت

جدول ۵- مقادیر T_{ij} بر حسب مگا ولت آمپر

خوزستان	یزد	خراسان	تهران	سمنان	سیستان	مازندران	گیلان	کرمان	زنجان	هرمزگان	غرب	فارس	اصفهان	باختر	آذربایجان	آذربایجان
3643			667				939		1098		397					
5512	1292		4932						1097		3632	1500	1500			
3225			1530					1293		1271		316				
														3632	397	
					197			2455				1271				
			1528				2631							1097	1098	
	1868				836					2455		1293				
			1292			397			2631						939	
		878	2443	1581			397									
								836		197						
		909	1408			1581										
				1408		2443	1292		1528				1530	4932	667	
				909		878										
								1868								
													1292			
												3225	5512	3643		

جدول ۷ - نتایج جایابی نیروگاه و خطوط انتقال جدید اجرای اول (S نیروگاه بخاری، G نیروگاه گازی و CC نیروگاه سیکل ترکیبی)

نتایج جایابی نیروگاهها											خطوط انتقال جدید بین نواحی مختلف		
	1393	1394	1395	1396	1397	1398	1399	1400	شین ابتدا	شین انتها	ظرفیت	سال احداث	
آذربایجان									ESFAHAN FARS	FARS GHARB	3.23	1393	
باختر			1G+5CC	11CC	11G+8CC	10CC			GHARB GILAN	ZANJAN MAZANDARAN	10.38	1393	
اصفهان									KHORASAN BAKHTAR	KERMAN ESFAHAN	5.22	1393	
فارس							12G+9CC	1S+6G+11CC	ESFAHAN FARS	FARS KERMAN	2.70	1394	
غرب									BAKHTAR ESFAHAN	ESFAHAN FARS	8.91	1395	
هرمزگان									BAKHTAR ESFAHAN	ZANJAN FARS	2.51	1396	
زنجان									FARS GHARB	GHARB ZANJAN	8.00	1396	
کرمان		5CC							BAKHTAR ESFAHAN	ESFAHAN FARS	9.27	1397	
گیلان									FARS BAKHTAR	GHARB ESFAHAN	0.50	1397	
مازندران									ESFAHAN FARS	YAZD GHARB	1.97	1398	
سیستان									FARS FARS	KERMAN KERMAN	6.65	1398	
سمنان									KHORASAN SEMNAH	ESFAHAN ESFAHAN	1.06	1399	
تهران		2G+4CC				1G+2CC			BAKHTAR ESFAHAN	FARS YAZD	11.45	1399	
خراسان									SEMNAH FARS	ESFAHAN KERMAN	3.17	1400	
یزد									KHORASAN SEMNAH	KERMAN ESFAHAN	23.48	1400	
خوزستان	1G+6CC		5CC						BAKHTAR	AZARBAYJAN	5.64	1400	

جدول ۸- نتایج جایابی نیروگاه و خطوط انتقال جدید اجرای دوم

نتایج جایابی نیروگاهها									خطوط انتقال جدید بین نواحی مختلف			
	1393	1394	1395	1396	1397	1398	1399	1400	شین ابتدا	شین انتها	ظرفیت	سال
آذربایجان									ESFAHAN	FARS	3.23	1393
									FARS	GHARB	10.38	1393
باختر			8CC	11CC	9G+8CC		4G+4CC		GHARB	ZANJAN	5.22	1393
									GILAN	MAZANDARAN	2.70	1393
اصفهان								5G+11CC	KHORASAN	KERMAN	8.91	1393
									BAKHTAR	ESFAHAN	2.51	1394
فارس								1S+1G	FARS	GHARB	10.48	1395
									GHARB	ZANJAN	3.10	1395
غرب									GILAN	MAZANDARAN	2.04	1395
									ESFAHAN	TEHRAN	5.92	1396
هرمزگان		1G+1CC				2CC	4G		FARS	GHARB	1.81	1396
									BAKHTAR	ESFAHAN	36.59	1397
زنجان							5CC		FARS	GHARB	6.29	1397
									GILAN	MAZANDARAN	4.72	1397
کرمان		1G+1CC	1G+1CC			1G+3CC			BAKHTAR	ESFAHAN	27.91	1398
									ESFAHAN	FARS	3.29	1398
گیلان									ESFAHAN	YAZD	0.71	1398
									BAKHTAR	ESFAHAN	69.41	1399
مازندران									ESFAHAN	TEHRAN	41.70	1399
									ESFAHAN	KHOZESTAN	15.31	1399
سیستان			1CC						ESFAHAN	YAZD	4.77	1399
									KHORASAN	YAZD	1.21	1399
سمنان									SEMNNAN	ESFAHAN	1.55	1399
تهران		7CC				5CC			ESFAHAN	FARS	35.51	1400
									SEMNNAN	ESFAHAN	13.22	1400
خراسان					1G	1CC	4G					
یزد					1G							
خوزستان	1G+6CC					1CC						

جدول ۹- نتایج جایابی نیروگاه و خطوط انتقال جدید اجرای سوم

								خطوط انتقال جدید بین نواحی مختلف				
	1393	1394	1395	1396	1397	1398	1399	1400	شین ابتدا	شین انتها	ظرفیت	سال احداث
آذربایجان									ESFAHAN	FARS	3.23	13
									FARS	GHARB	10.38	93
باختر									GHARB	ZANJAN	5.22	139
									GILAN	MAZANDA	2.70	3
اصفهان									KHORASAN	RAN	8.91	13
									BAKHTAR	KERMAN	2.51	93
فارس			1G+2CC		6G+5CC	1G+12CC	12G+9CC	1S+6G+11CC	ESFAHAN	ESFAHAN	4.00	13
									FARS	FARS	9.27	93
غرب									FARS	KERMAN	14.46	13
									GHARB	GHARB	1.44	93
هرمزگان									ESFAHAN	ZANJAN	8.00	13
									ESFAHAN	FARS	26.50	94
زنجان									FARS	KHOZEST	15.93	13
									SEMNNAN	AN	4.32	94
کرمان									BAKHTAR	KERMAN	0.63	13
									BAKHTAR	ESFAHAN	0.52	94
گیلان									FARS	ESFAHAN	20.98	139
									FARS	KHOZEST	30.60	5
مازندران									GHARB	AN	33.60	13
									GILAN	GHARB	5.25	95
سیستان									SEMNNAN	KERMAN	0.64	13
									FARS	KHOZEST	2.03	96
سمنان									GHARB	AN	3.00	139
									KHORASAN	MAZANDA	3.30	6
تهران									SEMNNAN	RAN	1.49	139
									GHARB	ESFAHAN	47.84	6
خراسان									ZANJAN	HORMOZG	7.36	13
									GILAN	AN	9.57	96
یزد									AZARBAYJAN	ZANJAN	0.52	13
									BAKHTAR	KERMAN	23.79	97
خوزستان	1G+6C C	2G+9CC	8CC	11CC	5G+3CC				FARS	ESFAHAN	12.88	13

جدول ۱۰- نتایج جایابی نیروگاه و خطوط انتقال جدید اجرای چهارم

نتایج جایابی نیروگاهها									خطوط انتقال جدید بین نواحی مختلف			
	1393	1394	1395	1396	1397	1398	1399	1400	شین ابتدا	شین انتها	ظرفیت	سال احداث
آذربایجان									ESFAHAN	FARS	3.23	139
									FARS	GHARB	10.38	3
باختر									GHARB	ZANJAN	5.22	1393
									GILAN	MAZANDARAN	2.70	139
اصفهان									KHORASAN	KERMAN	8.91	3
									BAKHTAR	ESFAHAN	2.51	139
فارس			1G+2CC		5G+1CC	11CC	12G+9CC	1S+6G+11CC	ESFAHAN	FARS	4.00	3
									FARS	KERMAN	9.27	139
غرب									FARS	GHARB	14.46	3
									GHARB	ZANJAN	1.44	139
هرمزگان									ESFAHAN	FARS	8.00	4
									ESFAHAN	KHOZESTAN	26.50	139
زنجان									FARS	KERMAN	15.93	4
									SEMNAN	ESFAHAN	4.32	139
کرمان									BAKHTAR	ESFAHAN	0.63	4
									BAKHTAR	KHOZESTAN	0.52	1395
گیلان									FARS	GHARB	20.98	139
									GHARB	KHOZESTAN	33.60	5
مازندران									GILAN	MAZANDARAN	5.25	139
									FARS	HORMOZGAN	13.25	6
سیستان									FARS	KERMAN	29.29	1396
									HORMOZGAN	KERMAN	31.32	1396
سمنان									SEMNAN	ESFAHAN	1.32	139
تهران									ESFAHAN	YAZD	3.09	6
									BAKHTAR	KHOZESTAN	33.29	139
خراسان					6G	1G+1CC			ESFAHAN	YAZD	3.09	7
									GHARB	ZANJAN	4.00	139
یزد									SEMNAN	ESFAHAN	1.31	7
												1397
خوزستان	1G+6CC	2G+9CC	8CC	11CC	7CC							1397

به احداث خطوط انتقال (افزایش هزینه احداث خطوط انتقال)، واحدهای تولیدی در مناطقی توزیع می‌شوند که در مجموع خطوط انتقال کمتری مورد نیاز باشد.

۵ - نتیجه گیری

در این مقاله روش نوینی برای برنامه‌ریزی توسعه نیروگاهها ارائه شد که قادر است با روشهای ابتکاری مهندسی بر پایه ضرایب حساسیت با در نظر گرفتن محدودیتهای تأمین سوخت و خطوط انتقال علاوه بر تعیین نوع، ظرفیت و زمان احداث نیروگاههای جدید امکان احداث آنها را نیز بیابد. با توجه به خصوصیات این روش می‌توان از آن برای شبکه‌های با ابعاد بزرگ نیز استفاده کرد. با توجه به امکان در نظر گرفتن هر پست به عنوان یک منطقه، این روش قادر به تعیین محل دقیق احداث نیروگاه نیز خواهد بود.

براساس روش بیان شده مطالعات برنامه‌ریزی توسعه

مراجع

1. Wang, X. and McDonald, J. R. "Modern Power System Planning," McGraw-Hill Publication, 1994.
2. Smith, R. A. and Villegas, A. M. "A Comparative Analysis of Various Optimization Models for Electricity Capacity Expansion," *Int. Trans. Op. Res.* Vol. 4, No. 1, pp. 35-44., 1997.
3. Park, Y. M. Park, J. B. and Won, J. R. "A Hybrid Genetic Algorithm/Dynamic Programming Approach to Optimal Long-Term Generation Expansion Planning", *Electrical Power & Energy System*, Vol. 20, No. 4, pp. 295-303. 1998.
4. Xia, Q. Song, Y. H. and Xiang, C. N. "Novel Models and Algorithms for Generation Unit Location Optimization", *IEEE Transaction on Power Systems*, Vol. 12, No. 4, , pp. 1584-1590, 1997.
5. Liu, G. Sasaki, H. and Yorino, N. " Application of Network Topology to Long Range Composite Expansion Planning of Generation and Transmission lines," *Electric Power System Research* 57, pp. 157-162, 2001.
6. Samarakoon, H. M. D. R. H. Shrestha, R. m. and Fujiwara, O. "A Mixed Integer Linear Programming Model for Transmission with Generation Location Selection", *Electrical Power & Energy System* 23, pp. 285-293, 2001
7. Kim, Y. C. "Multicriteria Generation Expansion Planning with Global Environmental Considerations, " *IEEE Transactions on Engineering Managemen*, Vol. 40, No. 2, pp. 154-161, may 1993
8. Fukuyama, Y. and Ching, H. D. "A Parallel Genetic Algorithm for Generation Expansion Planning" *IEEE Transaction on Power System*, Vol. 11, No. 2, , pp. 955- 961. may 1996
9. Park, J. B. Park, Y. M. Won, J. R. and Lee, K. Y. "An Improved Genetic Algorithm for Generation Expansion Planning," *IEEE Transaction on Power System*, Vol. 15, No. 3, August, pp. 916-922, aug 2000
۱۰. "آمار تفصیلی صنعت برق ایران در سال ۱۳۸۱"، معاونت برنامه‌ریزی شرکت توانیر، تیر ۱۳۸۲.

نیروگاهها برای ایران بین سالهای ۱۳۹۰ تا ۱۴۰۰ اجرا شد که نتایج آن در جداول این مقاله آورده شده است.

گرچه ابعاد بزرگ مسئله مانع از به‌کارگیری روشهای کلاسیک و نوین ریاضی بررسی حل این برنامه‌ریزی می‌شود ولی در این مقاله سعی شد با به‌کارگیری مفاهیم ضرایب حساسیت روشی ارائه شود که بخشی از واقعیات موجود برای انجام این برنامه‌ریزی نظیر محدودیتهای سوخت و خطوط انتقال در مطالعات گنجانده و لحاظ شدند.

با وجود مطالعات انجام شده در این زمینه، همچنان مطالعات عمیقتری برای لحاظ کردن سطوح مختلف بار، تعیین دقیقتر نوع نیروگاه جایابی شده و تعیین انواع نیروگاه با لحاظ کردن محدودیتهای آلودگی زیست محیطی و غیره مورد نیاز است.