

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

سید هادی حسینی<sup>\*</sup>، دکتر حسین سیفی<sup>\*\*</sup>، دکتر محسن پارسا مقدم<sup>\*\*\*</sup>، دکتر محمد رضا امیدخواه<sup>\*\*\*\*</sup>،  
مجید فرمد<sup>\*\*\*\*\*</sup> و محمود غزنوی<sup>\*\*\*\*\*</sup>  
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

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 مراکزی دورتر از بارها واقع شوند امکان دارد باعث تحمیل هزینه زیاد احداث خطوط انتقال شود و یا بر عکس اگر این نیروگاهها در مراکزی نزدیک بارها و دورتر از منابع تأمین سوخت واقع شوند ممکن است منجر به افزایش هزینه تأمین سوخت شود [۱، ۴]. 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 [۶-۱۰]. در برخی از مقالات نیز به تاثیر شرایط زیست محیطی بر برنامه‌ریزی توسعه نیروگاهها پرداخته شده است [۷].

در روش ارایه 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 متتمرکز در یک نقطه که مرکز ثقل باری آن منطقه است، فرض می‌شود. برای یافتن نوع، طرفیت، 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

## ۱- مقدمه

برنامه‌ریزی توسعه نیروگاهها یکی از مهمترین بخش‌های برنامه‌ریزی توسعه شبکه است. هدف از برنامه‌ریزی توسعه نیروگاهها یافتن ترکیبی از نیروگاههای است 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 تصمیم گیری در آن وجود قیود و رفتارهای غیر خطی و گستره متغیرها ناشی می‌شود مانع از ارائه یک روش جامع برای حل کل این مسئله بهینه سازی شده است و روش‌های ارائه شده برای حل آن از ساده سازی‌هایی برای کاهش ابعاد آن سود برده‌اند [۱-۸ و ۹].

نرم افزار WASP-III که امروز یکی از قویترین ابزارهای برنامه‌ریزی توسعه نیروگاههای است 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 متتمرکز 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 ارایه شده است [۳، ۶ و ۸]. در صورتی که توزیع بار مصرف کنندگان در ناحیه جغرافیایی مورد مطالعه یکنواخت بوده و یا

در این مقاله روشی متفاوت از روش مراجع فوق بیان می‌شود که قادر است با استفاده از نرم افزار WASP و الگوریتم دینامیکی، بالحاظ کردن محدودیتهایی همانند نرخ خروج اضطراری نیروگاهها (برخلاف روش مرجع [۵])، علاوه بر تعیین نوع (برخلاف روش مرجع [۶])، ظرفیت و زمان احداث نیروگاههای جدید مکان احداث آنها را نیز تعیین کند و علاوه بر آن قادر به در نظر گرفتن محدودیتهای تأمین سوخت و خطوط انتقال موجود نیز هست (برخلاف روش مراجع [۱۴]). همچنین به سبب تکنیک به کار گرفته شده در این روش، به راحتی قابل اعمال به شبکه‌های با ابعاد بزرگ بوده و حتی به جای 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  $t$  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:

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

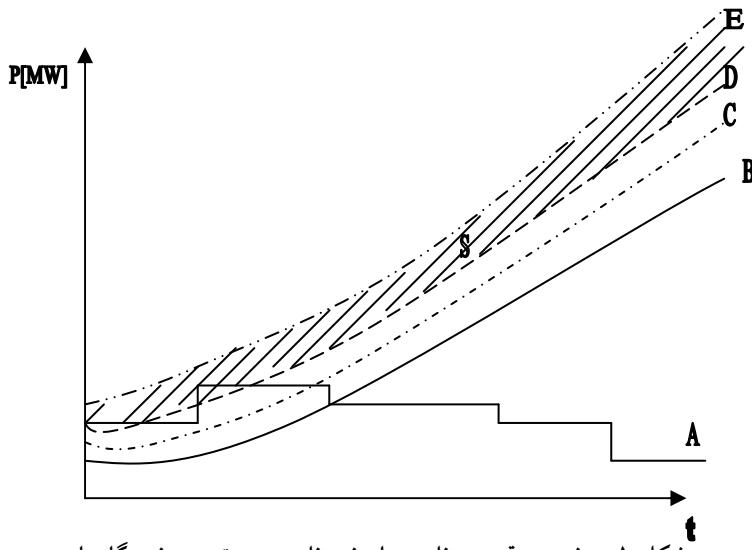
که  $t = 1, 2, \dots, T$  بوده و  $T$  طول کل دوره زمانی مورد مطالعه است. در معادله فوق  $a$  حداقل ضریب ذخیره چرخان و  $b$  حداقل مقدار آن است. مقدار ذخیره چرخان در یک شبکه برای حصول اطمینان از تغذیه مطمئن بار است. علاوه بر این مجموعه ظرفیت قابل تولید نیروگاهها باید به حدی باشد که اندیس قابلیت اطمینان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

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

حساسیت کمک گرفته می‌شود. بدین ترتیب که در هر مرحله از تصمیم گیری 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 چشم پوشی 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، بالحاظ کردن خطوط انتقال (با مدل سیستم حمل و نقل) و هزینه سوخت‌رسانی از روش برنامه‌ریزی دینامیکی پیش رو 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 به نظر می‌رسد با افزایش ابعاد مسئله، به طور 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 موردنظر، از این روش برای برنامه‌ریزی توسعه نیروگاهها 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.



شکل ۱- وضعیت قیود و ناحیه پاسخ برنامه‌ریزی توسعه نیروگاهها

دوره آم است.

که ع مقدار استاندارد LOLP را نشان می‌دهد.

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 آم است. برنامه‌ریزی توسعه نیروگاهها یک مسئله بهینه سازی با هدف مینیمم کردن تابع  $C$  تحت قیود (۱)، (۲) و (۳) است.

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 بیان کننده افزایش ظرفیت کل سیستم ناشی از به مدار آمدن یک نیروگاه در دست احداث 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 بیان کننده 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 آم بوده و  $N_{g \max i}^t$  ماکریم تعداد نیروگاههای قابل احداث از نوع i در

### ۳- مبانی روش پیشنهادی برنامه‌ریزی توسعه نیروگاهها

در این قسمت قصد بر این است مبانی و جزئیات 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

گرفته می‌شود و در روند اعمال روش امکان انتقال توان به سایر مناطق نیز فراهم می‌آید). برای تعیین مقصد انتقال این توان اضافی، مناطق همچوar منطقه مورد نظر به صورت زیر تقسیم بندی می‌شوند:

مناطقی 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.

مناطقی 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.

مناطقی 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 همچوar شان به غیر از منطقه مورد نظر نیز وجود دارد.

مناطقی 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 همچوar شان به غیر از منطقه مورد نظر وجود ندارد.

مناطقی 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 همچوar شان به غیر از منطقه مورد نظر وجود دارد.

مناطقی 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 همچوar شان به غیر از منطقه مورد نظر نیز وجود ندارد.

منتظر با هر دسته فوق، اندیسها برای مناطق واقع شده در آن دسته تعریف می‌شود. این اندیسها به گونه‌ای تعریف می‌شوند

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

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

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

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

$P_t^{\text{new}}$  ظرفیت قابل تولید نیروگاههای جدید است که توسط WASP برای دوره tام توجیه شده است. رابطه (5) بیان دیگری از رابطه (1) است و در واقع تعادل بین تولید و بار را بیان می‌کند. رابطه (6) نیز محدودیت تبادل توان بین دو منطقه را نشان داده و رابطه (7) نتایج به دست آمده از اجرای WASP را به قسمت دوم روش انتقال می‌دهد. برای اجرای بخش دوم روش، ابتدا اندیس زیر برای هر منطقه محاسبه می‌شود:

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

مقدار مثبت اندیس فوق در دوره tام 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 همچوar در نظر گرفته می‌شود (این فرض تنها برای ساده‌سازی مسئله در نظر

برای مناطق واقع شده در دسته پنج، اندیسی برابر مجموع وزنی دو اندیس  $f_4$  و  $f_3$  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  $f_4$  و  $f_3$  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 همچوار خود است.

از بین مناطق همچوار، توان ابتدا به منطقه ای انتقال می باید که

کمترین اندیس را داشته باشد. توان تبادلی 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 باید که مقدار اضافه تولید به مناطق همچوار 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 تبادلها، مقادیر  $T_{ij}^{\max}$  نیز تصحیح می شود.

در انتهای تنها مناطقی باقی می مانند 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 شودند.

برای تعیین محل احداث نیروگاههای جدید متناظر با هر

نیروگاه توجیه 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 ساخت، امکان تبادل توان با مناطق مجاور و نزدیکی به

مراکز مصرف در اولویت باشند) :

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

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

$\lambda$  در رابطه فوق بازده نیروگاه متناظر است (با لحاظ کردن بازده سعی می شود نیروگاههای با بازده کمتر در نواحی با قیمت ساخت پایینتر قرار گیرند).

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

اندیسهای 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 ساخت، 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 همچوار 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  $\alpha$  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:

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

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

۱ در دو اندیس فوق مناطق همچوار با منطقه واقع شده در این دسته است.

برای مناطق واقع شده در دسته چهار، اندیسی برابر مجموع

وزنی دو اندیس  $f_4$  و  $f_3$  تعریف می شود که  $L_i$  متوسط فاصله

مناطق واقع شده در این دسته با مناطق همچوار خود است.

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 شده‌اند که در سالهای گذشته با لوله‌های نفت و گاز این منابع به اکثر مناطق کشور انتقال داده شده است. مناطق شانزده‌گانه کشور بر حسب قیمت سوخت در این مطالعه به چهار قسمت تقسیم شده‌اند، مناطق واقع در قسمت اول دارای ارزانترین قیمت سوخت را دارا هستند. جدول (۱) این تقسیم‌بندی را نشان می‌دهد. مقدار بار مصرفی مناطق شانزده‌گانه 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 نرم‌افزار (نیروگاههای کاندید در نظر گرفته شده) در جدول (۴) آورده شده است (داده‌های 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 شانزده‌گانه آورده شده است (داده‌های 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 می‌دهد، جداول (۷) تا (۱۰) نیز نتایج چهار اجرای روش فوق را نشان می‌دهند (ظرفیت خطوط انتقال آورده شده در این جداول بر حسب پریونیت در مبنای ۱۰۰ مگاوات آمپر است).

همچنان‌که از نتایج پیداست، در صورت در نظر نگرفتن هزینه سوخت، مجموعه‌های تولید در نزدیکترین نقطه به مراکز بار قرار می‌گیرند، 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

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

$$f_8 = \frac{\sum_{k=1}^J T_{ik}^{\max} - \sum_{j=1}^J T_{ik}}{\sum_{k=1}^J T_{ik}^{\max}} \quad (16)$$

در غیر این صورت اندیس سوم به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$f_9 = \frac{1}{\alpha \cdot (G - b_{i,t}) \cdot L_i} \quad (17)$$

$\alpha$  در اندیس فوق مشابه اندیس  $f_3$  است و  $G$  مقدار توان تولیدی نیروگاه جدید که اندیسهای فوق برای آن محاسبه می‌شود 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 می‌شود. نیروگاه جدید مورد نظر در منطقه‌ای واقع می‌شود 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 می‌یابد، و سپس این کار تا پایان یافتن جایابی نیروگاههای توجیه شده توسط WASP ادامه می‌یابد.

رونده گفته شده فوق به دو صورت پیشرو و پس‌رو برای طول پریود زمانی مورد مطالعه قابل اعمال است. در روش پیشرو، روند گفته شده برای سال ابتدایی اعمال شده و سپس برای سالهای بعدی با ثبت کردن نیروگاههای جایابی شده برای سالهای گذشته اعمال می‌شود. در روش پسرو، روند گفته شده ابتدا برای دوره  $T$  ام اجرا می‌شود و سپس برای سالهای بعدی به ترتیب به سمت پایین تکرار می‌شود. برای اجرای روش فوق در دوره  $1-T$ ، تنها باید در نظر داشت که نیروگاههایی که در یک منطقه واقع می‌شوند از نیروگاههای واقع شده در آن منطقه در دوره  $T$  ام بیشتر نشوند.

در بخش چهارم، نتایج اجرای این روش برای شبکه سراسری

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	۱۴۰۰	۱۳۹۹	۱۳۹۸	۱۳۹۷	۱۳۹۶	۱۳۹۵	۱۳۹۴	۱۳۹۳	۱۳۹۲	۱۳۹۱	۱۳۹۰
آذربایجان	5807	5466	5139	4826	4528	4242	3970	3711	3464	3230	3007
باختر	5873	5556	5250	4956	4673	4401	4140	3890	3650	3420	3201
اصفهان	7636	7324	7017	6715	6420	6130	5846	5568	5297	5033	4775
فارس	4661	4509	4357	4205	4054	3904	3755	3607	3461	3316	3173
غرب	2769	2613	2463	2319	2181	2049	1922	1801	1686	1576	1471
هرمزگان	3693	3479	3273	3076	2887	2707	2535	2371	2215	2066	1925
زنجان	2527	2385	2248	2117	1991	1870	1755	1645	1539	1439	1343
کرمان	3326	3161	3001	2845	2695	2550	2410	2274	2144	2018	1897
گیلان	2524	2384	2250	2120	1996	1877	1763	1653	1549	1449	1354
مازندران	4375	4140	3914	3696	3486	3285	3091	2905	2727	2556	2393
سیستان و بلوچستان	760	746	731	716	700	684	667	650	633	615	597
سمنان	703	676	650	624	598	572	547	523	499	475	452
تهران	8860	8689	8512	8330	8142	7948	7751	7548	7342	7132	6919
خراسان	4967	4773	4582	4393	4208	4025	3846	3670	3498	3330	3165
یزد	1411	1343	1277	1213	1151	1090	1032	975	920	868	817
خوزستان	6862	6687	6509	6330	6148	5965	5780	5593	5406	5219	5031

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	14	12	1	11	0	1	2	1	-	-	-
بخاری	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
سیکل ترکیبی	11	9	12	8	11	10	9	6	-	-	-

جدول ۴- داده‌های ورودی WASP مربوط به نیروگاههای کاندید

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

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- مثادیر  $T_{ij}$  بر حسب مکان ولت آمپر**

محوزستان	بزد	خراسان	خوارگان	قهرمان	سمنان	سیستان	سیستان و بلوچستان	گلستان	کرمان	زنجان	فارس	اصفهان	اصفهان	بخار	آذربایجان	
3643		667				939			1098	397						آذربایجان
5512	1292	1530							1097	3632	1500					بخار
3225						1293		1271		316		1500				اصفهان
																فارس
																غرب
																هرمزگان
						197		2455		1271						زنجان
							1528	2631				1098	1098			کرمان
									2455	1293		1097	1097			گیلان
																مازندران
																سیستان و بلوچستان
																همدان
																بوشهر
																خوازیان
																خوزستان
																بزد
																خوزستان

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

نوع جایابی نیروگاهها	خطوط انتقال جدید بین نواحی مختلف					
	سال	آذربایجان	تبریز	شیخان	شیخون	آزادشهر
آذربایجان	1393	1394	1395	1396	1397	1398
تبریز			1G+5CC	11CC	11G+8CC	10CC
آصفهان						
فارس					12G+9CC	1S+6G+11CC
خرب						
هرمزگان						
زنجان						
کرمان		5CC				
گلستان						
مازندران						
سیستان						
سمنان						
تهران		2G+4CC			1G+2CC	
خراسان						
تهران						
خوزستان		1G+6CC		5CC		

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
باختر			8CC	11CC	9G+8CC		4G+4CC		FARS	GHARB	10.38	1393
اصفهان								5G+11CC	GHARB	ZANJAN	5.22	1393
فارس								1S+1G	GILAN	MAZANDARAN	2.70	1393
غرب									KHORASAN	KERMAN	8.91	1393
هرمزگان		1G+1CC				2CC	4G		BAKHTAR	ESFAHAN	2.51	1394
زنجان							5CC		FARS	GHARB	10.48	1395
کرمان		1G+1CC	1G+1CC			1G+3CC			GHARB	ZANJAN	3.10	1395
گلستان									GILAN	MAZANDARAN	2.04	1395
مازندران									ESFAHAN	TEHRAN	5.92	1396
سیستان			1CC						FARS	GHARB	1.81	1396
سمنان									BAKHTAR	ESFAHAN	36.59	1397
تهران		7CC				5CC			FARS	GHARB	6.29	1397
خراسان					1G	1CC	4G		GILAN	MAZANDARAN	4.72	1397
یزد					1G				BAKHTAR	ESFAHAN	27.91	1398
خوزستان	1G+6CC					1CC			ESFAHAN	FARS	3.29	1398

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

	1393	1394	1395	1396	1397	1398	1399	1400	خطوط انتقال جدید بین نواحی مختلف			
	آذربایجان								شین ابتدا	شین انتها	ظرفیت	سال احداث
باخته									ESFAHAN	FARS	3.23	13
اصفهان									FARS	GHARB	10.38	93
فارس			1G+2CC		6G+5CC	1G+12CC	12G+9CC	1S+6G+11CC	GHARB	ZANJAN	5.22	139
غرب									GILAN	MAZANDA	2.70	3
هرمزگان									KHORASAN	RAN	8.91	13
زنجان									BAKHTAR	KERMAN	2.51	93
کرمان									ESFAHAN	ESFAHAN	4.00	13
کیلان									FARS	FARS	9.27	93
مازندران									FARS	KERMAN	14.46	13
سیستان									GHARB	GHARB	1.44	93
سمنان									ESFAHAN	ZANJAN	8.00	13
تهران									ESFAHAN	FARS	26.50	94
خراسان									FARS	KHOZEST	15.93	13
بزد									SEMNAN	AN	4.32	94
خوزستان	1G+6C C	2G+9CC	8CC	11CC	5G+3CC				BAKHTAR	KERMAN	0.63	13
								BAKHTAR	ESFAHAN	0.52	94	
								FARS	ESFAHAN	20.98	139	
								FARS	KHOZEST	30.60	5	
								GHARB	AN	33.60	13	
								GILAN	GHARB	5.25	95	
								SEMNAN	KERMAN	0.64	13	
								FARS	KHOZEST	2.03	96	
								GHARB	AN	3.00	139	
								KHORASAN	MAZANDA	3.30	6	
								SEMNAN	RAN	1.49	139	
								GHARB	ESFAHAN	47.84	6	
								ZANJAN	HORMOZG	7.36	13	
								GILAN	AN	9.57	96	
								AZARBAYJAN	ZANJAN	0.52	13	
								BAKHTAR	KERMAN	23.79	97	
								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 انتهاء	ظرفیت	سال احداث
آذربایجان									ESFAHAN	FARS	3.23	139
باختر									FARS	GHARB	10.38	3
اصفهان									GHARB	ZANJAN	5.22	1393
فارس			1G+2CC		5G+1CC	11CC	12G+9CC	1S+6G+11CC	GILAN	MAZANDARAN	2.70	139
غرب									KHORASAN	KERMAN	8.91	3
هرمزگان									BAKHTAR	ESFAHAN	2.51	139
زنجان									ESFAHAN	FARS	4.00	3
کرمان									FARS	KERMAN	9.27	139
گیلان									FARS	GHARB	14.46	3
مازندران									GHARB	ZANJAN	1.44	139
سیستان									ESFAHAN	FARS	8.00	4
سمنان									ESFAHAN	KHOZESTAN	26.50	139
تهران									FARS	KERMAN	15.93	4
خراسان					6G	1G+1CC			SEMnan	ESFAHAN	4.32	139
پرد									BAKHTAR	ESFAHAN	0.63	4
خوزستان	1G+6CC	2G+9CC	8CC	11CC	7CC				BAKHTAR	KHOZESTAN	0.52	1395
									FARS	GHARB	20.98	139
									GHARB	KHOZESTAN	33.60	5
									GILAN	MAZANDARAN	5.25	139
									FARS	HORMOZGAN	13.25	6
									FARS	KERMAN	29.29	1396
									HORMOZGAN	KERMAN	31.32	1396
									SEMnan	ESFAHAN	1.32	139
									ESFAHAN	YAZD	3.09	6
									BAKHTAR	KHOZESTAN	33.29	139
									ESFAHAN	YAZD	3.09	7
									GHARB	ZANJAN	4.00	139
									SEMnan	ESFAHAN	1.31	7
												1397
												1397

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 به کارگیری روش‌های کلاسیک و نوین ریاضی بررسی حل این برنامه‌ریزی می‌شود ولی در این مقاله سعی شد با به کارگیری مفاهیم ضرایب حساسیت روشنی ارائه شود که بخشی از واقعیات موجود برای انجام این برنامه‌ریزی نظری 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.

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 - نتیجه‌گیری

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. andYorino, 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,aug2000
10. "آمار تفصیلی صنعت برق ایران در سال ۱۳۸۱", معاونت برنامه‌ریزی شرکت توانیر، تیر ۱۳۸۲.