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 nex 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

[DOR: 20.1001.1.2251600.1384.24.1.1.4]

nodal analysis. In this way, the allocations are not determined and subequent 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 demonstracted.

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

۱- مقدمه

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 دورهٔ زمانی ۱۰ تا ۳۰ ساله انجام می‌شود[۱]. ابعاد بزرگ مسئله که از تعداد زیاد متغیرهای تصمیم گیری 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 بهینه سازی شده است و روشهای ارائه شده برای حل آن از ساده سازیهایی برای کاهش ابعاد آن سود برده‌اند[۱-۳]و[۸ و۹.]

نرم افزار WASP-III که امروز یکی از قویترین ابزارهای برنامه‌ریزی توسعه نیروگاههاست و از چندین دههٔ 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 ارایه شده است[۳،۸و۹] .در صورتی‌که توزیع بار مصرف کنندگان در ناحیهٔ جغرافیایی مورد مطالعه یکنواخت بوده و یا هزینهٔ تأمین سوخت در تمامی قسمتهای ناحیهٔ فوق یکسان باشد می‌توان اطمینان داشت که پاسخ WASP پاسخ بهینه است. ولی معمولاً چنین فرضهایی صادق نیستند[۱،۴و۵]. اگر نیروگاههای جدید در مراکزی دورتر از بارها واقع شوند امکان دارد باعث تحمیل هزینهٔ زیاد احداث خطوط انتقال شود و یا برعکس اگر این نیروگاهها در مراکزی نزدیک بارها و دورتر از منابع تأمین سوخت واقع شوند ممکن است منجر به افزایش هزینهٔ 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 بهینهٔ واقعی نخواهد رسید. تحقیقات زیادی در مورد انجام این مطالعات به صورت کامل صورت گرفته است[۱و۴-۶]. 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 هزینهٔ تأمین سوخت برای نواحی مختلف نیز دیده شده است. در این روش، ناحیهٔ مورد مطالعه به چندین منطقه تقسیم می‌شود. هزینهٔ 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

[DOR: 20.1001.1.2251600.1384.24.1.1.4]

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 صورتی‌که بین دو منطقه تبادل توانی صورت گیرد، هزینهٔ انتقال توان که تابعی از مقدار توان منتقله و فاصله بین مراکز ثقل باری آن دو است به مجموعهٔ 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، 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 مسئله های 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 [٦])، 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 [۱و٤]). 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 [٤] محدودیت ابعاد مسئله در اینجا وجود ندارد).

در ادامهٔ این مقاله پس از بیان جزییات روش، نتایج اجرای آن برای شبکهٔ برق ایران نیز آورده شده است.

۲- بیان ریاضی برنامه‌ریزی توسعهٔ نیروگاهها

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

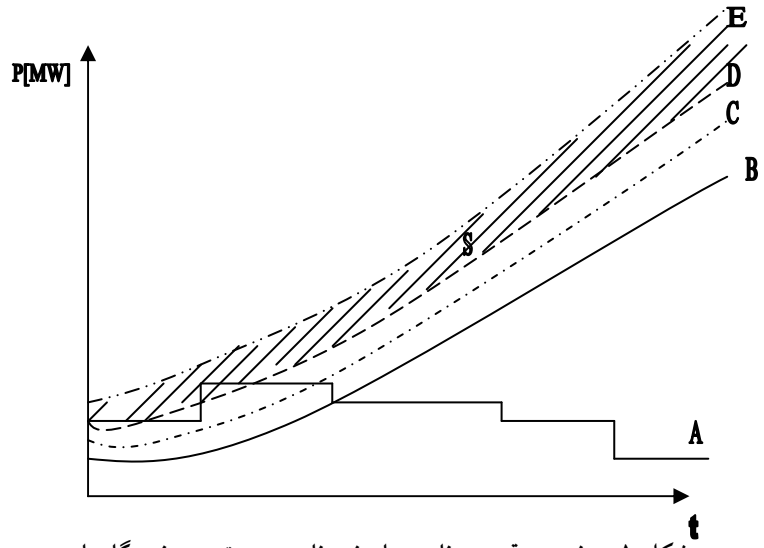
$$(1 + a)S_t \le P_t \le (1 + b)S_t \qquad (۱)$$

که $t = 1,2,\ldots,T$ بوده و T طول کل دورهٔزمانی مورد مطالعه است.

در معادله فوق a حداقل ضریب ذخیرهٔ چرخان و b حداکثر مقدار آن است. مقدار ذخیرهٔ چرخان در یک شبکه برای حصول اطمینان از تغذیهٔ 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:

$$LOLP(t) \le \varepsilon \qquad (۲)$$

[DOR: 20.1001.1.2251600.1384.24.1.1.4]



شکل ۱- وضعیت قیود و ناحیه پاسخ برنامه‌ریزی توسعه نیروگاهها

که ε مقدار استاندارد LOLP را نشان می‌دهد.

شکل (۱) وضعیت قیود فوق و ناحیهٔ جواب را نشان می‌دهد.

شکل (۱) منحنی A، نشان‌دهنده ظرفیت نصب شدهٔ نیروگاهها در شبکه است. افزایش این منحنی بیان کنندهٔ 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 ذخیرهٔ چرخان a و E متناظر با ضریب ذخیرهٔ چرخان b است. منحنی D نیز بیان کنندهٔ محدودیت قابلیت اطمینان مربوط به اندیس LOLP است. با توجه به نکات گفته شده مقدار تولید باید در ناحیهٔ هاشور خوردهٔ 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 رابطهٔ زیر صدق کند:

$$N_i^t \le N_{g\max i}^t \quad i= 1,\ldots,N_g \quad t= 1,\ldots,T \qquad (۳)$$

N_i^t تعداد نیروگاههای احداث شده از نوع i در دورهٔ tام بوده و $N_{g\max i}^t$ ماکزیمم تعداد نیروگاههای قابل احداث از نوع i در دورهٔ tام است.

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

$$C = \sum_{t=1}^{T} (I_t + M_t + F_t) \qquad (٤)$$

I_t هزینهٔ توسعهٔ نیروگاهها، M_t هزینهٔ تعمیر و نگهداری نیروگاهها و F_t هزینهٔ سوخت نیروگاهها در دورهٔ tام است.

برنامه‌ریزی توسعه نیروگاهها یک مسئله بهینه سازی 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

[DOR: 20.1001.1.2251600.1384.24.1.1.4]

متوسط سوخت در قسمتهای مختلف ناحیهٔ مورد مطالعه استفاده می‌شود (در واقع در این بخش از حل، نامساویهای ۱، ۲، ۳ و تساوی ٤ همزمان دیده می‌شوند). برای یافتن مکان احداث نیروگاهها، ناحیهٔ مورد مطالعه به J منطقهٔ مختلف تقسیم می‌شود(منظور صرفا مناطق جغرافیایی نبوده و می‌توان هر پست را به عنوان یک منطقه در این مطالعات لحاظ کرد). بار هر قسمت در دورهٔ tام، $S_{i,t}$ و قیمت سوخت F_i در هر منطقه $(i=1,...,J)$ نیز مشخص است. به‌علاوه براساس خطوط انتقال موجود، ماکزیمم 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 دورهٔ tام $P_{i,t}$ باشد، مقدار تولید نیروگاههای جدید در این دوره $P_{i,t}^{new}$ ، باید در روابط زیر صدق کند:

$$(1+a)S_{i,t} \le P_{i,t} + \sum_{j=1}^{J} T_{ij,t} + P_{i,t}^{new} \le (1+b)S_{i,t}$$
$$t = 1,\ldots,T \qquad (۵)$$

$$T_{ij,t} \le T_{ij}^{max} \qquad (٦)$$

$$\sum_{i=1}^{k} P_{i,t}^{new} = P_t^{new} \qquad (۷)$$

P_t^{new} ظرفیت قابل تولید نیروگاههای جدید است که توسط WASP برای دورهٔ tام توجیه شده است. رابطهٔ (۵) بیان دیگری از رابطهٔ (۱) است و در واقع تعادل بین تولید و بار را بیان می‌کند. رابطهٔ (٦) نیز محدودیت تبادل توان بین دو منطقه را نشان داده و رابطهٔ (۷) 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:

$$b_{i,t} = P_{i,t} - (1+a)S_{i,t} \qquad i = 1,\ldots,J \qquad (۸)$$

مقدار مثبت اندیس فوق در دورهٔ 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 همجوار در نظر گرفته می‌شود(این فرض تنها برای ساده‌سازی مسئله در نظر گرفته می‌شود و در روند اعمال روش امکان انتقال توان به سایر مناطق نیز فراهم می‌آید). برای تعیین مقصد انتقال این توان اضافی، مناطق همجوار منطقه موردنظر به‌صورت 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 همجوارشان به‌غیر 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 همجوارشان به‌غیر 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 همجوارشان به‌غیر 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 همجوارشان به‌غیر از منطقه مورد نظر نیز وجود ندارد.

متناظر با هر دسته فوق، اندیسهایی برای مناطق واقع شده در آن دسته تعریف می شود. این اندیسها به گونه‌ای تعریف می‌شوند

[DOR: 20.1001.1.2251600.1384.24.1.1.4]

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 می‌شوند(در واقع اندیسهای f_1 تا f_5 باعث انتقال توان به نواحی‌ای می‌شوند 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:

$$f_1 = \frac{Min(b_{k,t})}{b_{i,t}} \qquad (۹)$$

$$f_2 = \frac{Min(F_k)}{F_i - Min(F_k)} \qquad (۱۰)$$

i متناظر با منطقه‌ای‌است که اندیسهای فوق برای آن معین می‌شود 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:

$$f3 = \alpha.b_{i,t}.L_i \qquad (۱۱)$$

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 منطقه‌ای‌است که توان از آن منتقل می‌شود.

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

$$f4 = \frac{Min(b_{k,t})}{\sum b_{l,t}} \qquad (۱۲)$$

$$f5 = \frac{1}{\sum T_{i,l}} \qquad (۱۳)$$

l 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 f4 و f3 تعریف می‌شود 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 f4 و f3 تعریف می‌شود که L_i فاصله این منطقه از منطقه‌ای‌است که توان از آن منتقل می‌شود، می‌باشد.

برای مناطق واقع شده در دسته پنج، اندیسی برابر مجموع وزنی دو اندیس f4 و f3 تعریف می‌شود که L_i مجموع فاصله این منطقه از منطقه‌ای که توان از آن منتقل می‌شود و متوسط فاصله مناطق واقع شده در این دسته با مناطق همجوار خود است.

از بین مناطق همجوار، توان ابتدا به منطقه‌ای انتقال می‌یابد که کمترین اندیس را داشته باشد. توان تبادلی تا اندازه‌ای خواهد بود که باعث تغییر دسته منطقه مورد نظر شود. در این‌صورت با ترکیب جدید، اندیسهای متناظر با مناطق محاسبه شده و مقصد جدید توان انتقالی، مشخص می‌شود. این‌کار تا جایی ادامه می‌یابد که مقدار اضافه تولید به مناطق همجوار انتقال یابد.

با تعیین میزان تبادل، اندیسهای $b_{i,t}$ هر منطقه نیز تصحیح می‌شود. این‌کار برای تمامی مناطقی که اندیس $b_{i,t}$ آنها مثبت است انجام می‌شود. در صورت نیاز، با توجه به تصمیمهای اخذ شده در مورد میزان تبادلها، مقادیر T_{ij}^{max} نیز تصحیح می‌شود. در انتها تنها مناطقی باقی می‌مانند 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 می‌شود (با تعریف اندیسهای f_6 تا f_9 نیروگاههای جدید در نواحی‌ای قرار می‌گیرندکه از نظر هزینه سوخت، امکان تبادل توان با مناطق مجاور و نزدیکی به مراکز مصرف در اولویت باشند) :

$$f6 = \frac{|b_{i,t}|}{Min(|b_{k,t}|)} \qquad (۱۴)$$

$$f7 = \frac{F_{i\max} - F_i}{F_{i\max}}.\lambda \qquad (۱۵)$$

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

[DOR: 20.1001.1.2251600.1384.24.1.1.4]

در صورتی‌که امکان تبادل با خطوط انتقال موجود با مناطق همجوار وجود داشته باشد، اندیس سوم به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

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

در غیر این‌صورت اندیس سوم به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

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

α در اندیس فوق مشابه اندیس $f3$ 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 این‌کار تا پایان یافتن جایابی نیروگاههای توجیه شده توسط WASP ادامه می‌یابد.

روند گفته شدهٔ 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 تثبیت کردن نیروگاههای جایابی شده برای سالهای گذشته اعمال می‌شود. در روش پسرو، روند گفته شده ابتدا برای دورهٔ Tام اجرا می‌شود و سپس برای سالهای بعدی به ترتیب به سمت پایین تکرار می‌شود. برای اجرای روش فوق در دوره t-1ام، تنها باید در نظر داشت که نیروگاههایی که در یک منطقه واقع می‌شوند از نیروگاههای واقع شده در آن منطقه در دوره tام بیشتر نشوند.

در بخش چهارم، نتایج اجرای این روش برای شبکه سراسری برق ایران آورده شده است.

٤- نتایج مطالعات برای شبکه سراسری برق ایران

ایران کشور پهناوری است که از منابع سوخت فسیلی نیز برخوردار است. مراکز عمدهٔ 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 و مناطق واقع در قسمت چهارم گرانترین 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 ۱٤۰۰ 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 به‌همراه 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 ٤۰۰ 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 برحسب پریونیت در مبنای ۱۰۰ مگاولت‌آمپر 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

[DOR: 20.1001.1.2251600.1384.24.1.1.4]

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

[DOR: 20.1001.1.2251600.1384.24.1.1.4]

جدول ۳- نتایج اجرای نرم‌افزار 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 ٤- 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 ٦- 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 ٤٠ 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

[DOR: 20.1001.1.2251600.1384.24.1.1.4]

[DOR: 20.1001.1.2251600.1384.24.1.1.4]

جدول ۵- مقادیر T_{ij} برحسب مگا ولت آمپر

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

[DOR: 20.1001.1.2251600.1384.24.1.1.4]

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

خطوط انتقال جدید بین نواحی مختلف				نتایج جایابی نیروگاهها							
سال احداث	ظرفیت	شین انتها	شین ابتدا	1400	1399	1398	1397	1396	1395	1394	1393
1393		FARS	ESFAHAN								
1393	3.23	GHARB	FARS								
1393	10.38	ZANJAN	GHARB			10CC	11G+8CC	11CC	1G+5CC		
1393		MAZANDARAN	GILAN								
1393	5.22	KERMAN	KHORASAN								
1394		ESFAHAN	BAKHTAR								
1394	2.70	FARS	ESFAHAN	1S+6G+11CC	12G+9CC						
1394		KERMAN	FARS								
1395	8.91	ESFAHAN	BAKHTAR								
1395		FARS	ESFAHAN								
1396	2.51	ZANJAN	BAKHTAR								
1396		FARS	ESFAHAN								
1396	8.00	GHARB	FARS								
1396		ZANJAN	GHARB								
1397	9.27	ESFAHAN	BAKHTAR							5CC	
1397		FARS	ESFAHAN								
1397		GHARB	FARS								
1398	0.50	ESFAHAN	BAKHTAR								
1398		YAZD	ESFAHAN								
1398	1.97	GHARB	FARS								
1398		KERMAN	FARS								
1398		KERMAN	KHORASAN								
1398	6.65	ESFAHAN	SEMNAN								
1399		ESFAHAN	BAKHTAR								
1399	1.06	FARS	ESFAHAN			1G+2CC				2G+4CC	
1399	11.45	YAZD	ESFAHAN								
1399		ESFAHAN	SEMNAN								
1400	3.17	KERMAN	FARS								
1400	23.48	KERMAN	KHORASAN								
1400		ESFAHAN	SEMNAN								
1400	5.64	AZARBAYJAN	BAKHTAR						5CC		1G+6CC

	1393	1394	1395	1396	1397	1398	1399	1400
آذربایجان								
باختر			1G+5CC	11CC	11G+8CC	10CC		
اصفهان								
فارس							12G+9CC	1S+6G+11CC
غرب								
هرمزگان								
زنجان								
کرمان		5CC						
گیلان								
مازندران								
سیستان								
سمنان								
تهران		2G+4CC				1G+2CC		
خراسان								
یزد								
خوزستان	1G+6CC		5CC					

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

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

[DOR: 20.1001.1.2251600.1384.24.1.1.4]

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

	1393	1394	1395	1396	1397	1398	1399	1400
آذربایجان								
باختر								
اصفهان								
فارس			1G+2CC		6G+5CC	1G+12CC	12G+9CC	1S+6G+11CC
غرب								
هرمزگان								
زنجان								
کرمان								
گیلان								
مازندران								
سیستان								
سمنان								
تهران								
خراسان								
یزد								
خوزستان	1G+6CC	2G+9CC	8CC	11CC	5G+3CC			

خطوط انتقال جدید بین نواحی مختلف			
شین ابتدا	شین انتها	ظرفیت	سال احداث
ESFAHAN	FARS	3.23	13
FARS	GHARB	10.38	93
GHARB	ZANJAN	5.22	139
GILAN	MAZANDA	2.70	3
KHORASAN	RAN	8.91	13
BAKHTAR	KERMAN	2.51	93
ESFAHAN	ESFAHAN	4.00	13
FARS	FARS	9.27	93
FARS	KERMAN	14.46	13
GHARB	GHARB	1.44	93
ESFAHAN	ZANJAN	8.00	13
ESFAHAN	FARS	26.50	94
FARS	KHOZEST	15.93	13
SEMNAN	AN	4.32	94
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

[DOR: 20.1001.1.2251600.1384.24.1.1.4]

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

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

[DOR: 20.1001.1.2251600.1384.24.1.1.4]

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 ـ 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 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.

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 Algoritm 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

۱۰."آمار تفصیلی صنعت برق ایران در سال ۱۳۸۱"، معاونت برنامه‌ریزی شرکت توانیر، تیر ۱۳۸۲.

[DOR: 20.1001.1.2251600.1384.24.1.1.4]