برنامه ریزی دینامیکی توسعه سیستم های تولید و انتقال با در نظر گرفتن محدودیت جلوگیری از جزیره ای کار کردن شبکه

سعید احمدی[a,۱]، علی اصغر قدیمی[۲]، محمدرضا میوه[۳]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران

(sa.ahmadi۱۹۹۵@gmail.com)

۲- دانشیار، گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران (a-ghadimi@araku.ac.ir)

۳-استادیار، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه تفرش، تفرش، ایران (miveh@tafreshu.ac.ir)

خلاصه

در این مقاله یک مدل عدد صحیح مختلط خطی برای برنامه ریزی دینامیکی توسعه سیستم های تولید و انتقال با در نظر گرفتن محدودیت جلوگیری از جزیره ای کار کردن شبکه ارائه شده است. این برنامه ریزی به صورت تک هدفه و به صورت مینیمم سازی هزینه کل شامل هزینه سرمایه گذاری، هزینه بهره برداری و هزینه سوخت می باشد. از آنجایی که مسئله برنامه ریزی توسعه سیستم های قدرت یک مسئله مقیاس بزرگ است، از روش خطی سازی M بزرگ برای جلوگیری از غیرخطی شدن مدل استفاده شده است. مدل دینامیکی پیشنهادی بر روی شبکه گارور با استفاده از نرم افزار GAMS تست شده است. نتایج بدست آمده نشان می دهد که افزودن محدودیت جلوگیری از جزیره ای شدن شبکه باعث متصل شدن باس های جدا از شبکه شده و موجب می گردد تا شبکه به صورت یکپارچه کار کند.

کلمات کلیدی: برنامه ریزی سیستم های تولید و انتقال، برنامه ریزی عدد صحیح مختلط خطی، قید جلوگیری از جزیره ای شدن، روش خطی سازی M بزرگ

۱ مقدمه

انرژی الکتریکی امروزه به یک کالای راهبردی تبدیل شده و با افزایش کاربری آن نیاز به افزایش بهره‌وری و قابلیت اطمینان آن هر روز بیشتر شده است. در این میان، مطالعات برنامه‌ریزی سیستم‌های قدرت به عنوان مهم‌ترین و گسترده‌ترین مبحث در توسعه و بهبود صنعت برق کشورها از اهمیت خاصی برخوردار می‌باشد. مطالعه برنامه‌ریزی توسعه شبکه تولید و انتقال دارای قدمتی بیش از چندین دهه می باشد. به علل هزینه سرمایه گذاری بالا برای احداث نیروگاه ها و خطوط و همچنین عمر بسیار زیاد آنها از این تصمیم گیری همواره به عنوان یکی از تصمیمات کلیدی در برنامه ریزی نام برده می شود. برنامه ریزی توسعه شبکه پروسه ای است که هدفش تصمیم گیری برای ایجاد یک سیستم جدید یا ارتقاء المان های موجود می باشد. بخش های اصلی موجود در سیستم های قدرت منابع تولید، پست ها، خطوط انتقال و ادوات الکترونیک

[a] **Corresponding author: سعید احمدی**
Email: sa.ahmadi۱۹۹۵@gmail.com

قدرت می باشد. در نتیجه برنامه‌ریزی توسعه منابع تولید و خطوط انتقال یکی از مهمترین زیر مسئله های برنامه ریزی توسعه شبکه است. در برنامه ریزی یاد شده می بایست مشخص شود که نیروگاه ها و خطوط انتقال جدید با چه ظرفیتی، در چه زمانی و در چه مکانی باید احداث شوند. این برنامه ریزی معمولا برای یک دوره ۵ تا ۲۰ سال انجام می شود.

مطالعات اخیر مسئله برنامه ریزی سیستم های قدرت نشان می دهد که هزینه برنامه ریزی توسعه سیستم های تولید (GEP[b]) بیشتر از هزینه برنامه ریزی توسعه سیستم های انتقال (TEP[c]) می باشد [۱]. بنابراین در کارهای گذشته مسئله برنامه ریزی توسعه نیروگاه ها و خطوط انتقال به صورت جداگانه حل می شد. در بسیاری از مراجع تنها برنامه ریزی توسعه واحد های تولید به صورت جداگانه و بدون در نظر گرفتن توسعه خطوط انتقال حل شده است [۲-۴]، که این مدل می تواند باعث افزایش هزینه شود. در مراجع زیادی مانند [۵-۸] تنها مسئله توسعه خطوط انتقال مورد برسی قرار گرفته است.در[۹]، نشان داده شده زمانی که برنامه ریزی توسعه شبکه تولید و انتقال به صورت همزمان انجام می شود هزینه سرمایه گذاری کاهش می یابد. در [۱۰]، هر دو مسئله برنامه ریزی توسعه واحدهای تولید و انتقال به صورت همزمان حل شده است. لازم به ذکر است که هزینه سرمایه گذاری توسعه سیستم تولید در سیستم های بزرگ بسیار بالاست، بنابراین ضروری است که اقتصادی ترین روش برای حل این مسئله انتخاب شود.

مسئله برنامه ریزی توسعه شبکه قدرت را می توان به دو صورت دینامیکی و استاتیکی حل کرد که در روش استاتیکی زمان نصب المان های جدید مشخص نمی شود. همانطور که در[۱۱, ۱۲]، مسئله برنامه ریزی توسعه شبکه انتقال به صورت استاتیکی حل شده است، اما در[۱۳, ۱۴]، مسئله برنامه ریزی توسعه شبکه قدرت به صورت دینامیکی حل شده و زمان احداث خطوط و نیروگاه های جدید در یک برنامه ریزی ۵ ساله به صورت سالیانه مشخص شده است. یکی دیگر از چالش های برنامه ریزی سیستم های قدرت جزیره ای کار کردن این سیستم ها پس از برنامه ریزی است، در بسیاری از مراجع مانند [۱۳]، در پایان برنامه ریزی همچنان شبکه گارور به صورت جزیره ای بوده و هیچ خطی به باس ۶ متصل نشده است. جزیره ای کار کردن باعث می گردد که برنامه ریزی شبکه گارور به صورت یکپارچه صورت نپذیرد.

در مدل ارائه شده در این مقاله با اضافه شدن محدودیت جلوگیری از جزیره ای شدن به مدل، تمام باس های که به صورت جدا از شبکه هستند در همان سال اول برنامه ریزی از طریق بهینه ترین خط ممکن به بهینه ترین باس ممکن متصل خواهند شد. این مقاله یک مدل عدد صحیح مختلط خطی دینامیکی برای برنامه ریزی سیستم های تولید و انتقال با در نظر گرفتن محدودیت جلوگیری از جزیره ای کار کردن شبکه ارائه می دهد. تابع هدف در این مدل حداقل سازی هزینه کل، شامل هزینه سرمایه گذاری، هزینه بهره برداری و هزینه سوخت می باشد. همچنین برای خطی نگه داشتن مسئله از روش خطی سازی M بزرگ استفاده شده است. نتایج بدست آمده نشان می دهد که افزودن محدودیت جلوگیری از جزیره ای شدن شبکه باعث متصل شدن باس های جدا از شبکه شده و شبکه به صورت یکپارچه کار خواهد کرد همچنین افزودن این محدودیت باعث افزایش هزینه کل خواهد شد. ادامه این مقاله بدین صورت دسته بندی شده است: فرمول بندی مسئله در قسمت ۲ بیان شده است. قسمت ۳ اطلاعات شبکه مورد مطالعه، نتایج عددی و بحث راجع به نتایج بدست آمده را شامل می شود. نتیجه گیری نیز در قسمت ۴ گنجانده شده است.

[b] Generation Expansion Planning
[c] Transmission Expansion Planning

۲ روابط و پارامتر های مسئله

در این بخش به معرفی روابط و پارامتر های مسئله برنامه ریزی توسعه سیستم های تولید و انتقال از جمله متغیرهای تصمیم‌گیری، تابع هدف و قیود مسئله پرداخته می شود.

۲-۱ متغیرهای تصمیم گیری

در مسئله برنامه ریزی توسعه خطوط بردار $ug_{i,m,y,t}$ متغیر باینری نیروگاه های اضافه شده می باشد و مشخص می کند که چه نوع نیروگاهی (m)، با چه ظرفیتی(y)، در کدام باس(i) و در چه سالی(t) به شبکه اضافه می شود. همچنین بردار $ut_{i,j,tc,type,t}$ متغیر باینری خطوط اضافه شده به شبکه می باشد که نشان می دهد چه نوع خط انتقالی (type)، با چه ظرفیتی(tc)، بین کدام دو باس(i,j) و در چه سالی(t) به شبکه اضافه شود. این دو بردار متغیرهای تصمیم‌گیری مسئله بهینه سازی می‌باشند.

۲-۲ تابع هدف

در برنامه ریزی سیستم های قدرت جنبه های اقتصادی بیش تر مد نظر قرار دارند. در این مقاله، علاوه بر در نظر گرفتن هزینه احداث المان های جدید، هزینه بهره برداری و هزینه سوخت نیز به عنوان تابع هدف در نظر گرفته شده است:

$$\text{Total Cost} = \sum_{t}\left(\frac{c_t^{fuel} + c_t^{opertion} + c_t^{GEP} + c_t^{TEP}}{(۱+d)^t}\right) \qquad (۱)$$

در رابطه (۱) پارامتر t سال افق برنامه ریزی است که در این مقاله افق برنامه ریزی ۵ ساله در نظر گرفته شده است، پارامتر d نرخ بهره سالانه می باشد.

۲-۲-۱ هزینه سوخت

در رابطه (۱) پارامتر c_t^{fuel} هزینه سوخت مصرفی واحد های است که برای تولید انرژی نیاز به سوخت دارند، که این هزینه از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$c_t^{fuel} = \sum_{f}\sum_{i}\sum_{m} FT_{f,i,m,t} \times (Pr_f^{fuel۱} + Pr_f^{fuel۲} \times D_{f,i}) \qquad (۲)$$

در رابطه (۲) پارامتر f مربوط به منابع سوختی در دسترس، پارامتر i مربوط به باس های شبکه و پارامتر m مربوط به تکنولوژی نیروگاه های شبکه می باشد. همچنین $FT_{f,i,m,t}$ میزان سوخت مصرفی، $Pr_f^{fuel۱}$ قیمت هر واحد سوخت در منبع سوخت، $Pr_f^{fuel۲}$ هزینه انتقال هر واحد سوخت در واحد مسافت و $D_{f,i}$ مسافت بین منبع سوخت f و باس i هستند.

۲-۲-۲ هزینه بهره برداری

هزینه بهره برداری واحد به عنوان تابعی از انرژی تولید شده توسط این واحد ها و مطابق رابطه زیر مدل سازی شده است:

$$c_t^{opertion} = \sum_i \sum_m (\alpha_m \times En_{i,m,t}) \quad (۳)$$

در رابطه (۳) پارامتر α_m ضریب ربط دهنده میزان انرژی تولید شده به هزینه بهره برداری سیستم می باشد. همچنین $En_{i,m,t}$ میزان انرژی تولید شده توسط هر واحد می باشد.

۲-۲-۳ هزینه نصب نیروگاه های جدید

هزینه سرمایه گذاری برای نصب نیروگاه های جدید از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$c_t^{GEP} = \sum_m \sum_i \sum_y Pr_{m,y}^{GEP} \times (ug_{i,m,y,t} - ug_{i,m,y,t-۱}) \quad (۴)$$

در رابطه (۴) پارامتر y نشان دهنده ظرفیت نیروگاه های کاندید برای نصب، پارامتر $Pr_{m,y}^{GEP}$ هزینه نصب نیروگاه جدید با تکنولوژی m و ظرفیت y و همچنین $ug_{i,m,y,t}$ متغیر باینری برای نصب یا عدم نصب نیروکاه یاد شده می باشد.

۲-۲-۴ هزینه نصب خطوط جدید

هزینه سرمایه گذاری برای نصب نیروگاه های جدید از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$c_t^{TEP} = \sum_i \sum_j \sum_{type} \sum_{tc} Pr_{tc,type}^{TEP} \times L_{i,j} \times (ut_{i,j,tc,type,t} - ut_{i,j,tc,type,t-۱}) \quad (۵)$$

در رابطه (۵) پارامتر type نشان دهنده انواع خطوط کاندید برای نصب، پارامتر tc نشان دهنده انواع ظرفیت خطوط کاندید برای نصب، پارامتر $Pr_{tc,type}^{TEP}$ هزینه نصب خط انتقال جدید بر حسب کیلومتر با نوع type و ظرفیت tc می باشد. و همچنی $L_{i,j}$ فاصله بین باس i و j بوده و $ut_{i,j,tc,type,t}$ متغیر باینری برای نصب یا عدم نصب خط انتقال یاد شده می باشد.

۲-۳ قیود

در این بخش هر یک از قید های مسئله به صورت جداگانه شرح داده خواهد شد.

۲-۳-۱ قیود مربوط به منابع سوخت

$$\sum_i \sum_m FT_{f,i,m,t} \le FS_f^{max} \quad (۶)$$

$$FT_{f,i,m,t} \leq FTL_{f,i}^{max} \quad (۷)$$

در رابطه (۶) پارامتر FS_f^{max} نشان دهنده حداکثر ظرفیت سوخت دهی منابع سوختی می باشد و این رابطه نشان می دهد که میزان مصرف همه واحد ها نباید بیشتر از حداکثر ظرفیت سوخت دهی منابع سوختی باشد و در رابطه (۷) پارامتر $FTL_{f,i}^{max}$ حداکثر ظرفیت مسیر سوخت رسانی بین منبع سوخت f و باس i می باشد و این رابطه نشان می دهد که مقدار سوخت انتقالی در این مسیر نمی تواند بیش از حد مجاز تعیین شده باشد.

۲-۳-۲ محاسبه میزان مصرف سوخت

میزان مصرف سوخت را می توان از طریق انرژی تولید شده توسط واحد ها به صورت زیر محاسبه نمود.

$$\sum_m FT_{f,i,m,t} = \psi_m \times En_{i,m,t} \quad (۸)$$

سمت راست رابطه (۸) کل سوخت مصرفی واحد ها را نشان می دهد که توسط یک تابع خطی از انرژی تولیدی $En_{i,m,t}$ واحد ها مدل سازی شده است. و سمت چپ رابطه (۸) کل سوخت منتقل شده از منابع سوختی موجود به باس ها شبکه می باشد.

۲-۳-۳ معادله انرژی

انرژی درخواستی تابعی از بار های الکتریکی شبکه است و انرژی تولید شده توسط واحد های نیروگاهی باید بزرگتر یا مساوی انرژی درخواستی شبکه باشد.

$$TRE_t = \sum_i load_{i,t} \times HS_i \leq \sum_i \sum_m En_{i,m,t} \quad (۹)$$

$$\eta_m \times MHO_m \times \Delta P_{i,m,y,t}^g \leq En_{i,m,t} \leq MHO_m \times \Delta P_{i,m,y,t}^g \quad (۱۰)$$

در رابطه (۹) پارامتر TRE_t کل انرژی مورد نیاز شبکه می باشد و HS_i ضریبی است که از حاصل ضرب آن در مجموع بار های شبکه انرژی سالیانه مورد نیاز شبکه محاسبه می شود. این ضریب در این مقاله ۴۰۰۰ ساعت تخمین زده شده است. پارامتر $\Delta P_{i,m,y,t}^g$ تغیرات توان تولیدی در باس i است. همچنین رابطه (۱۰) نشان دهنده محدودیت انرژی تولید شده توسط واحد هاست که در این رابطه پارامتر MHO_m بیشترین ساعت تولید واحد نیروگاهی و پارامتر η_m عددی بین صفر و یک است که اگر نیروگاه در حالت پیک کار کند نزدیک به صفر و در غیر این صورت نزدیک به یک است.

۲-۳-۴ معادله تعادل توان

معادله تعادل توان می تواند به صورت زیر نوشته شود:

$$\sum_{y}\sum_{m} P^{g}_{i,m,y,k,t} - load_{i,t} + P^{shed}_{i,k,t} = \sum_{j} P^{flow}_{i,j,k,t} \quad (۱۱)$$

$$P^{shed}_{i,k,t} \le load_{i,t} \quad (۱۲)$$

$$P^{g}_{i,m,y,k,t} \le P^{g.plan}_{i,m,y,t} \quad (۱۳)$$

در رابطه (۱۱) پارامتر $P^{g}_{i,m,y,k,t}$ توان تولیدی در باس i بوده و پارامتر $P^{shed}_{i,k,t}$ میزان ریزش توان در این باس، همچنین $P^{flow}_{i,j,k,t}$ توان انتقالی از این باس به باس های دیگر می باشد. رابطه (۱۲) نشان می دهد که میزان ریزش توان یا همان توان تامین نشده نمی تواند بزرگتر از بار الکتریکی موجود در آن باس باشد. همچنین در رابطه (۱۳) پارامتر $P^{g.plan}_{i,m,y,t}$ نشان دهنده ظرفیت تولید توان در باس i پس از نصب واحد های جدید می باشد و طبق این رابطه توان تولیدی در آن باس نمی تواند بیش از ظرفیت برنامه ریزی شده باشد.

۲-۳-۵ محدودیت توان خطوط انتقال

محدودیت ظرفیت توان خطوط را می توان به صورت روابط زیر نوشت

$$-(P^{trans}_{i,j} + \Delta P^{trans}_{i,j,t}) \le P^{flow}_{i,j,k,t} \le P^{trans}_{i,j} + \Delta P^{trans}_{i,j,t} \quad (۱۴)$$

$$-P^{transmisson}_{i,j} \le P^{ini,flow}_{i,j} \le P^{transmisson}_{i,j} \quad (۱۵)$$

همانطور که در رابطه (۱۴) مشخص است بیشترین توان انتقالی هر شاخه از حاصل جمع ظرفیت خطوط موجود $P^{trans}_{i,j}$ و ظرفیت خطوط اضافه شده به شبکه $\Delta P^{trans}_{i,j,t}$ حاصل می شود. بنابراین حداکثر ظرفیت انتقال توان هر شاخه در هر سال تغییر می کند. همچنین در رابطه (۱۵) پارامتر های $P^{transmisson}_{i,j}$ و $P^{ini,flow}_{i,j}$ به ترتیب ظرفیت انتقال توان و توان انتقال در شرایط قبل از برنامه ریزی می باشند.

۲-۳-۶ معادلات پخش بار DC

قانون دوم کیرشهف زوایای ولتاژ باس ها و سوسپتانس خطوط انتقال را با هم مرتبط می سازد، که در حالت پیش از برنامه ریزی روابط زیر حاکم است:

$$P^{ini,flow}_{i,j} = B^{ini}_{i,j} \times (\theta^{ini}_{i} - \theta^{ini}_{j}) \quad (۱۶)$$

$$P^{flow}_{i,j,k,t} = B^{plan}_{i,j,t} \times (\theta^{plan}_{i,k,t} - \theta^{plan}_{j,k,t}) \quad (۱۷)$$

$$\theta^{min} \leq \theta_{i,k,t}^{plan} \leq \theta^{max} \quad (۱۸)$$

در روابط فوق پارامتر θ مربوط به زاویه ولتاژ باس ها، پارامتر B نشان دهنده سوسپتانس خطوط، اندیس ini مربوط به شرایط پیش برنامه ریزی و اندیس plan مربوط به مرحله برنامه ریزی می باشد، همچنین رابطه (۱۵) محدودیت زوایای ولتاژ را نشان می دهد. در ادامه روابط زیر به دست می آید

$$-(P_{i,j}^{trans} + \Delta P_{i,j,t}^{trans}) \leq (B_{i,j}^{ini} + \Delta B_{i,j,t}) \times (\theta_i^{ini} + \Delta\theta_{i,k,t} - \theta_j^{ini} - \Delta\theta_{j,k,t}) \leq P_{i,j}^{trans} + \Delta P_{i,j,t}^{trans} \quad (۱۹)$$

$$-P_{i,j}^{transmisson} \leq B_{i,j}^{ini} \times (\theta_i^{ini} - \theta_j^{ini}) \leq P_{i,j}^{transmisson} \quad (۲۰)$$

سپس از دو رابطه (۱۹) و (۲۰) رابطه (۲۱) بدست می آید

$$\left|B_{i,j}^{ini} \times (\Delta\theta_{i,k,t} - \Delta\theta_{j,k,t}) + \Delta B_{i,j,t} \times (\theta_i^{ini} - \theta_j^{ini}) + \Delta B_{i,j,t} \times (\Delta\theta_{i,k,t} - \Delta\theta_{j,k,t})\right| \leq \Delta P_{i,j}^{trans} \quad (۲۱)$$

قابل توجه است که پارامتر $B_{i,j,t}^{plan}$ باید سالانه بدست آید، مقدار اولیه باید به تغییرات سالیانه سوسپتانس اضافه شود. به دلیل برخورد دو پارامتر پیوسته ی $\Delta B_{i,j,t}$ و $\Delta\theta_{i,k,t}$ با یکدیگر رابطه (۲۱) غیر خطی است، به همین دلیل این رابطه باید خطی سازی شود که برای این کار از روش خطی سازی m بزرگ استفاده می شود[۱]. و پس از خطی سازی روابط به صورت زیر بدست می آید.

$$Z_{i,j,k,t} + M.ut_{i,j,tc,type,t} \leq M + \Delta\theta_{i,k,t} \times B_{tc,type}^{candidate} \text{Max } Z = c_۱x_۱ + c_۲x_۲ + \cdots + c_nx_n - MR_j \quad (۲۲)$$

$$Z_{i,j,k,t} - M.ut_{i,j,tc,type,t} \geq -M + \Delta\theta_{i,k,t} \times B_{tc,type}^{candidate} \quad (۲۳)$$

$$۰ \leq Z_{i,j,k,t} + M.\sum_{tc}\sum_{type} ut_{i,j,tc,type,t} \quad (۲۴)$$

$$Z_{i,j,k,t} - M.\sum_{tc}\sum_{type} ut_{i,j,tc,type,t} \leq 0 \quad (۲۵)$$

$$\left|B_{i,j}^{ini} \times (\Delta\theta_{i,k,t} - \Delta\theta_{j,k,t}) + \Delta B_{i,j,t} \times (\theta_i^{ini} - \theta_j^{ini}) + Z_{i,j,k,t} - Z_{i,j,k,t}\right| \leq \Delta P_{i,j}^{transmission} \quad (۲۶)$$

در روابط فوق $Z_{i,j,k,t}$ پارامتر کمکی و M عددی بزرگ است، همچنین $B_{tc,type}^{candidate}$ سوسپتانس خطوط کاندید برای اضافه شدن به شبکه می باشد و $\Delta P_{i,j}^{transmission}$ تغییرات ظرفیت انتقال بین باس های i و j می باشد. تغییرات ظرفیت خطوط انتقال، سوسپتانس آن ها و تغییرات در ظرفیت تولید در هر باس به ترتیب حاصل می شود.

$$\Delta P_{i,j,t}^{trans} = \sum_{tc}\sum_{type} ut_{i,j,tc,type,t} \times P_{tc,type}^{candidate} \quad (۲۷)$$

$$\Delta B_{i,j,t} = B_{i,j,t}^{plan} - B_{i,j}^{initial} = \sum_{tc}\sum_{type} ut_{i,j,tc,type,t} \times B_{tc,type}^{candidate} \quad (۲۸)$$

$$P_{i,m,y,t}^{g.plan} - P_{i,m,y}^{g.ini} = ug_{i,m,y,t} \times Pg_{m,y}^{candidate} \quad (۲۹)$$

همچنین در یک سیستم قدرت کل توان تولیدی باید با مجموع توان مصرفی بار ها و ریزش بار برابر باشد طبق رابطه (۳۰)

$$\sum_{i}\sum_{y}\sum_{m} P_{i,m,y,k,t}^{g} - \sum_{i} load_{i,t} + \sum_{i} P_{i,k,t}^{shed} = ۰ \quad (۳۰)$$

۲-۳-۷ ماکزیمم آلودگی مجاز

مقدار آلودگی تولید شده توسط شبکه از طریق یک تابع خطی از انرژی تولید شده توسط واحد ها به صورت زیر مدل می شود.

$$\sum_{i}\sum_{m} \gamma_m \times En_{i,m,t} \le GE_t^{max} \quad (۳۱)$$

که در این رابطه GE_t^{max} حداکثر مقدار مجاز آلودگی تولید شده در هر سال و γ_m ضریب ربط دهنده مقدار آلودگی تولید شده و مقدار انرژی تولیدی شبکه است.

۲-۳-۸ ماکزیمم مقدار ریزش بار

در این پایان نامه از تخمین بار تغذیه نشده[۱۵] برای اندازه گیری قابلیت اطمینان شبکه استفاده شده است که ماکزیمم مقدار مجاز (EENS) برای هر سال از طریق رابطه زیر محدود می شود.

$$\sum_{i} P_{i,k,t}^{shed} \le P_t^{shed.max} \quad (۳۲)$$

در این رابطه $P_t^{shed.max}$ ماکزیمم مقدار ریزش بار در هر سال است.

۲-۳-۹ افزودن محدودیت جلوگیری از جزیره ای شدن شبکه

با توجه به این که سیستم مورد مطالعه در این مقاله و در[۱۳] سیستم گارور می باشد، در این شبکه از ابتدا سیستم به صورت جزیره ای بوده و باس ۶ از شبکه جداست. اگر به نتایج بدست آمده از مدل معرفی شده در[۱۳] دقت شود، مشخص است که در پایان سال هدف (سال پنجم) همچنان شبکه به صورت جزیره ای بوده و هیچ خطی به باس ۶ متصل نشده است. در مدل ارائه شده در این مقاله با اضافه شدن محدودیت زیر به روابط گذشته، تمام باس های که به صورت جدا از شبکه هستند در همان سال اول برنامه ریزی از طریق بهینه ترین خط ممکن به بهینه ترین باس ممکن متصل خواهند شد.

$$\sum_{j}\sum_{tc}\sum_{type} ut_{a,j,tc,type,۱} \geq ۱ \qquad (۳۳)$$

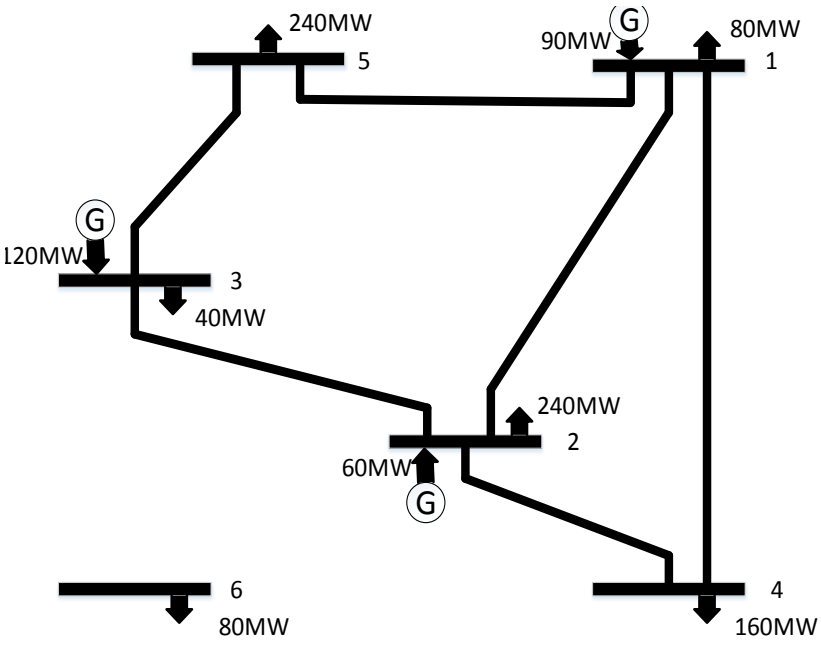
در رابطه (۳۳) پارامتر a شماره باس های است که به صورت جدا از شبکه کار میکنند و عدد ۱ که به جای t آمده یعنی در سال اول این تغییرات رخ دهد. از آنجایی که ut یک متغیر باینری است مقدار آن بزرگتر از ۱ نمیتواند باشد پس در حقیقت این رابطه برابر با ۱ است.

۳ معرفی شبکه و نتایج شبیه سازی

شبکه گارور شامل ۶ باس است که اطلاعات این سیستم در مرجع [۵] آورده شده است. در این شبکه باس شماره ۶ از شبکه جداست. طبق فرضیات [۱۳]، این شبکه دارای ۳ ژنراتور شامل ژنراتور ۹۰MW گازی در باس۱، ۶۰MW بخار در باس ۲ و ۱۲۰MW بخار در باس ۳ می باشد. همچنین بار های موجود در این شبکه در سال های برنامه ریزی به صورت جدول ۱ خواهد بود. شکل ۱ شبکه گارور را در حالت اولیه نشان می دهد.

جدول۱ اطلاعات بارها (مگاوات)

باس / سال	اول	دوم	سوم	چهارم	پنجم
۱	۸	۱۴	۲۵	۴۵	۸۰
۲	۲۴	۴۳	۷۷	۱۳۸	۲۴۰
۳	۴	۷	۱۳	۲۳	۴۰
۴	۱۶	۲۸	۵۶	۱۱۲	۱۶۰
۵	۲۴	۴۳	۷۷	۱۳۸	۲۴۰
۶	۰	۲۰	۴۰	۶۰	۸۰



شکل ۱ شبکه گارور

در این برنامه ریزی ۵ نوع نیروگاه با ظرفیت های مختلف قابلیت اضافه شدن به شبکه را دارند که در جدول۲ اطلاعات این واحد ها بیان شده است. قابل توجه است که هزینه نصب هر یک از این واحد ها سالانه افزایش می یابد. همچنین اطلاعات خطوط کاندید با ۱۴ ظرفیت متفاوت در جدول۳ بیان شده است.

جدول۲. اطلاعات واحدهای کاندید

نیروگاه/ظرفیت (مگاوات)	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
آبی	۵۰	۶۰	۷۰				
گازی	۳۰	۴۰	۵۰	۶۰			
بخار	۷۵	۱۰۰	۱۲۵	۱۵۰	۲۰۰		
سیکل ترکیبی	۱۳۵	۱۶۰	۱۸۰	۲۰۰	۲۵۰	۳۵۰	۴۰۰
اتمی	۱۰۰۰	۲۰۰۰					

جدول۳ اطلاعات واحد های کاندید

خطوط	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴
ظرفیت (مگاوات)	۵۰	۸۰	۱۰۰	۱۲۰	۱۵۰	۱۸۰	۲۰۰	۲۲۵	۲۴۰	۲۶۰	۲۸۰	۳۰۰	۵۵۰	۸۰۰

۳-۱ برنامه ریزی بدون در نظر گرفتن قید جزیره ای شدن

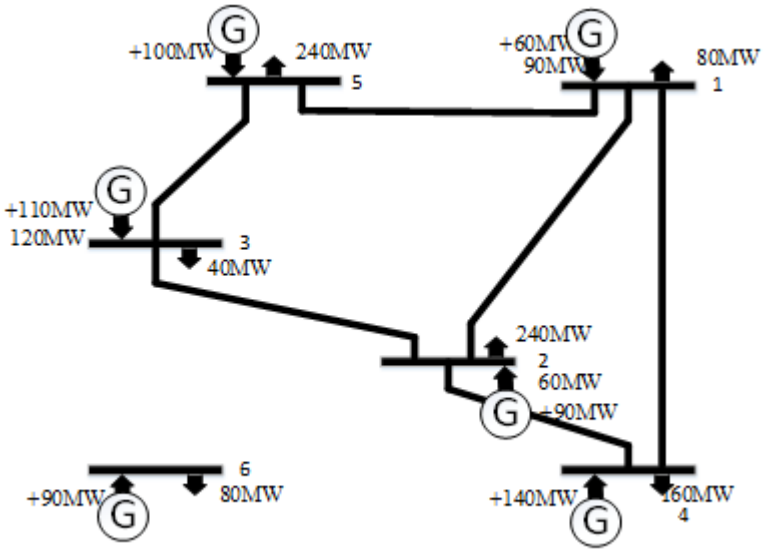
در این مرحله بدون در نظر گرفتن قید جلوگیری از جریره ای شدن برنامه ریزی ۵ ساله صورت می گیرد. قابل توجه است که میزان ریزش بار در هر سال نمی تواند بیش از ۴۰ مگاوات باشد. همانطور که در جدول ۴ مشخص است هیچ خطی در طول ۵ سال برنامه ریزی به به باس ۶ که از شبکه جداست و به صورت جزیره ای کار می کند متصل نشده است و این باس همچنان به صورت جدا از شبکه به کار خود ادامه می دهد. جدول ۵ نیز هزینه بهره برداری، هزینه سوخت و بار تامین نشده در طول ۵ سال را نشان می دهد، با افزایش تعداد و میزان تولید نیروگاه ها هزینه سوخت و بهره برداری سالانه افزایش پیدا کرده و میزان بار از دست رفته از ۴۰ مگاوات بیشتر نشده است. شکل۲ شبکه گارور پس از برنامه ریزی است که به خوبی نشان می دهد که شبکه به صورت جزیره ای در حال کار کردن است.

جدول۴ هزینه کل و المان های نصب شده بدون در نظر گرفتن قید جلوگیری از جزیره ای شدن

سال	واحد های نصب شده	خطوط نصب شده
اول	۳۰ مگاوات گازی باس ۲ ۳۰ مگاوات گازی باس ۵ ۳۰ مگاوات گازی باس ۶	-
دوم	۵۰ مگاوات گازی باس ۵	-
سوم	۶۰ مگاوات گازی باس ۵ ۶۰ مگاوات گازی باس ۶	-
چهارم	۶۰ مگاوات گازی باس ۲ ۵۰ مگاوات گازی باس ۴	
پنجم	۶۰ مگاوات گازی باس ۱ ۶۰ مگاوات گازی باس ۴ ۱۰۰ مگاوات بخار باس ۵	-
هزینه کل	۶.۲۳۸۸۳۲ E+۸	

جدول۵ هزینه سوخت، بهره برداری ومیزان بار تامین نشده بدون در نظر گرفتن قید جلوگیری از جزیره ای شدن

سال	هزینه سوخت	هزینه بهره برداری	بار تامین نشده (مگاوات)
اول	۱,۵۱۸۴۸۰ E+۶	۳,۱۳۲۰۰۰ E+۶	۱۰,۶۱۸
دوم	۲,۶۱۷۴۴۰ E+۶	۵,۳۷۶۰۰۰ E+۶	۸,۳۴۹
سوم	۵,۳۳۵۲۰۰ E+۶	۱,۰۹۲۰۰۰ E+۷	۲,۰۲۱
چهارم	۸,۴۳۶۰۰۰ E+۶	۱,۷۰۹۴۰۰ E+۷	۳۷,۷۲۲
پنجم	۲,۰۲۵۰۱۸ E+۷	۴,۷۹۵۰۰۰ E+۷	۳۵,۳۶۴



شکل۲ شبکه گارور پس از برنامه ریزی بدون در نظر گرفتن قید جزیره ای شدن

۳-۲ برنامه ریزی با در نظر گرفتن قید جزیره ای شدن

همانطور که بیان شد باس ۶ به صورت جدا از شبکه کار می کند، برای برای رفع این مشکل قید جلوگیری از جزیره ای شدن شبکه به قیود مرحله قبل اضافه شده و نتایج به صورت جدول۶ تغییر می کند. همانطور که انتظار می رفت باس ۶ در سال اول برنامه ریزی به شبکه متصل شده و شبکه به صورت یک پارچه به کار خود ادامه می دهد. اما هزینه کل نیز به دلیل به وجود آمدن این تغییرات به مقدار ۵ درصد اضافه شده است. هزینه سوخت و بهره برداری و همچنین مقدار بار از دست

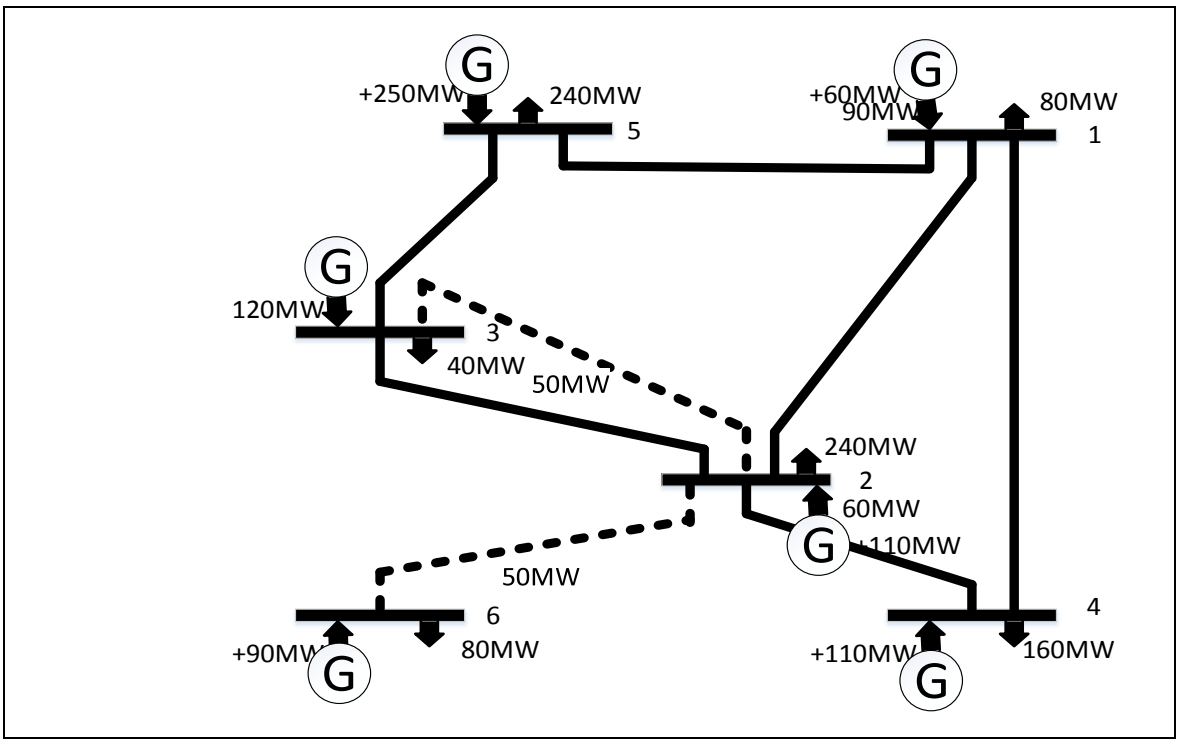
رفته در این حالت در جدول۷ بیان شده است. واضح است که در این حالت به دلیل اضافه شدن خطوط انتقال بار تامین نشده کاهش یافته است. شکل۳ نیز شبکه گارور را پس از برنامه ریزی با اضافه شدن قید جلوگیری از جزیره ای شدن نشان می دهد خط انتقال اضافه شده به شبکه به صورت خط چین مشخص شده است، همانطور که ملاحظه می شود شبکه به صورت یک پارچه در این حالت به کار خود ادامه می دهد.

جدول۶ هزینه کل و المان های نصب شده با در نظر گرفتن قید جلوگیری از جزیره ای شدن

سال	واحد های نصب شده	خطوط نصب شده
اول	۴۰ مگاوات گازی باس ۵ ۳۰ مگاوات گازی باس ۶	۵۰ مگاوات بین باس ۲و۳ ۵۰ مگاوات بین باس ۲و۶
دوم	۵۰ مگاوات گازی باس ۵	-
سوم	۶۰ مگاوات گازی باس ۶	-
چهارم	۵۰ مگاوات گازی باس ۲ ۱۱۰ مگاوات گازی باس ۴ ۶۰ مگاوات گازی باس ۵	
پنجم	۶۰ مگاوات گازی باس ۱ ۶۰ مگاوات گازی باس ۲ ۱۰۰ مگاوات بخار باس ۵	-
هزینه کل	۶,۵۵۷۸۴۷ E+۸	

جدول۷ هزینه سوخت، بهره برداری ومیزان بار تامین نشده در گام دوم

سال	هزینه سوخت	هزینه بهره برداری	بار تامین نشده (مگاوات)
اول	۱,۱۸۱۰۴۰ E+۶	۲,۴۳۶۰۰۰ E+۶	۸,۵۰۶
دوم	۲,۲۴۳۵۲۰ E+۶	۴,۶۰۸۰۰۰ E+۶	۸,۳۳۰
سوم	۳,۹۳۹۸۴۰ E+۶	۸,۰۶۴۰۰۰ E+۶	۰
چهارم	۹,۱۲۰۰۰۰ E+۶	۱,۸۴۸۰۰۰ E+۷	۹,۱۳۹
پنجم	۲,۱۰۰۲۵۸ E+۷	۴,۹۴۸۰۰۰ E+۷	۲۸,۶۲۸



شکل۳ شبکه گارور پس از برنامه ریزی با اضافه شدن قید جلوگیری از جزیره ای شدن

۴ نتیجه گیری

در این مقاله یک مدل عدد صحیح مختلط خطی برای برنامه ریزی دینامیکی سیستم های تولید و انتقال با در نظر گرفتن محدودیت جلوگیری از جزیره ای کار کردن شبکه ارائه شد. از روش خطی سازی M بزرگ برای جلوگیری از غیرخطی شدن مدل استفاده شد. مدل دینامیکی پیشنهادی بر روی شبکه گارور با استفاده از نرم افزار GAMS تست شد. نتایج بدست آمده نشان می دهد که افزودن محدودیت جلوگیری از جزیره ای شدن شبکه باعث متصل شدن باس های جدا از شبکه شده و شبکه به صورت یک پارچه کار می کند و افزودن این محدودیت باعث افزایش هزینه کل شد. همچنین افزودن قید جلوگیری از جزیره ای کار کردن شبکه گارور باعث شد در نتیجه اضافه شدن خطوط انتقال بار از دست رفته در شبکه نسبت به قبل کاهش پیدا کند.

[۱] B. Alizadeh and S. Jadid, "Reliability constrained coordination of generation and transmission expansion planning in power systems using mixed integer programming," *IET generation, transmission & distribution,* vol. ٥, pp. ٩٤٨-٩٦٠, ٢٠١١.

[۲] S. Lumbreras and A. Ramos, "The new challenges to transmission expansion planning. Survey of recent practice and literature review," *Electric Power Systems Research,* vol. ١٣٤, pp. ١٩-٢٩, ٢٠١٦/٠٥/٠١/ ٢٠١٦.

[۳] J.-B. Park, Y.-M. Park, J.-R. Won, and K. Y. Lee, "An improved genetic algorithm for generation expansion planning," *IEEE Transactions on Power Systems,* vol. ١٥, pp. ٩١٦-٩٢٢, ٢٠٠٠.

[٤] A. S. Chuang, F. Wu, and P. Varaiya, "A game-theoretic model for generation expansion planning: problem formulation and numerical comparisons," *IEEE Transactions on Power Systems,* vol. ١٦, pp. ٨٨٥-٨٩١, ٢٠٠١.

[٥] L. L. Garver, "Transmission network estimation using linear programming," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems,* pp. ١٦٨٨-١٦٩٧, ١٩٧٠.

[٦] R. Romero and A. Monticelli, "A hierarchical decomposition approach for transmission network expansion planning," *IEEE transactions on power systems,* vol. ٩, pp. ٣٧٣-٣٨٠, ١٩٩٤.

[٧] N. Alguacil, A. L. Motto, and A. J. Conejo, "Transmission expansion planning: A mixed-integer LP approach," *IEEE Transactions on Power Systems,* vol. ١٨, pp. ١٠٧٠-١٠٧٧, ٢٠٠٣.

[٨] R.-A. Hooshmand, R. Hemmati, and M. Parastegari, "Combination of AC transmission expansion planning and reactive power planning in the restructured power system," *Energy Conversion and Management,* vol. ٥٥, pp. ٢٦-٣٥, ٢٠١٢.

[٩] I. Sharan and R. Balasubramanian, "Integrated generation and transmission expansion planning including power and fuel transportation constraints," *Energy Policy,* vol. ٤٣, pp. ٢٧٥-٢٨٤, ٢٠١٢.

[١٠] H. Mavalizadeh, A. Ahmadi, and A. Heidari, "Probabilistic multi-objective generation and transmission expansion planning problem using normal boundary intersection," *IET Generation, Transmission & Distribution,* vol. ٩, pp. ٥٦٠-٥٧٠, ٢٠١٤.

[١١] X. Zhang and A .J. Conejo, "Robust Transmission Expansion Planning Representing Long- and Short-Term Uncertainty," *IEEE Transactions on Power Systems,* vol. ٣٣, pp. ١٣٢٩-١٣٣٨, ٢٠١٨.

[١٢] A. A. Fathy, M. S. Elbages, R. A. El-Sehiemy, and F. M. Bendary, "Static transmission expansion planning for realistic networks in Egypt," *Electric Power Systems Research,* vol. ١٥١, pp. ٤٠٤-٤١٨, ٢٠١٧/١٠/٠١/ ٢٠١٧.

[١٣] H. Mavalizadeh, A. Ahmadi, F. H. Gandoman, P. Siano, and H. A. Shayanfar, "Multiobjective robust power system expansion planning considering generation units retirement," *IEEE Systems Journal,* vol. ١٢, pp. ٢٦٦٤-٢٦٧٥, ٢٠١٧.

[١٤] J. Aguado, S. De La Torre, J. Contreras, A. Conejo, and A. Martínez, "Market-driven dynamic transmission expansion planning," *Electric Power Systems Research,* vol. ٨٢, pp. ٨٨-٩٤, ٢٠١٢.

[١٥] A. J. Conejo, M. Carrión, and J. M. Morales, *Decision making under uncertainty in electricity markets* vol. ١: Springer, ٢٠١٠.

به نام خدا

شماره: ۹۸۴۰/۱۶۷۴

پژوهشگر گرامی

بدینوسیله گواهی می شود مقاله شما با عنوان " برنامه ریزی دینامیکی توسعه سیستم های تولید و انتقال با در نظر گرفتن محدودیت جلوگیری از جزیره ای کار کردن شبکه " و با نویسندگی "سعید احمدی ،دکتر علی اصغر قدیمی ،دکتر محمدرضا میوه " در سومین کنفرانس ملی مهندسی برق و کامپیوتر که در روز جمعه دهم آبان ماه سال ۱۳۹۸ در محل دانشگاه علامه طباطبائی تهران برگزار شد، شرکت نموده و از سوی کمیته داوران مورد پذیرش نهایی قرار گرفته و به صورت "شفاهی" ارائه شده است. بدینوسیله ضمن تقدیر و تشکر از شما برای شرکت در این رویداد، از خداوند منان توفیق روزافزونتان را خواستاریم.

دکتر علی ریاحی

دبیر کنفرانس