مجوز اعطای درجه علمی پژوهشی:
طی نامه شماره 6/2910/3 مورخ 83/1/16
از وزارت علوم، تحقیقات و فناوری

شاپا: ISSN 1735-7152

صفحه‌آرایی و ویرایش : زهرا حق‌شنو

چاپ: انتشارات انجمن مهندسین برق و الکترونیک ایران

شمارگان:500 جلد

بها: 100000 ریال

آدرس: تهران- خیابان فلسطین شمالی – پلاک 39– ساختمان 55 – طبقه دوم- کد پستی 14158
مجله علمی پژوهشی انجمن مهندسین برق و الکترونیک ایران

تلفن: 64543504 **دور نگار**: 66406469

پست الکترونیکی: grptian@aut.ac.ir

سایت : http://www.iaeee-iran.org

نمایه شده در:
- مرکز منطقه‌ای اطلاع‌رسانی علوم و فنون، وزارت علوم، تحقیقات و فناوری در سایت www.srlst.com
- مرکز اطلاعات علمی، جهاد دانشگاهی در سایت www.sid.ir

در دسترس از طریق:
- بانک اطلاعات نشریات کشور www.magiran.com
- سایت انجمن www.iaeee-iran-org
- مرکز منطقه‌ای اطلاع‌رسانی علوم و فنون، وزارت علوم، تحقیقات و فناوری در سایت www.srlst.com
- مرکز اطلاعات علمی، جهاد دانشگاهی در سایت www.sid.ir

دو فصل نامه علمی پژوهشی
انجمن مهندسین برق و الکترونیک ایران
سال ششم – شماره دوم – پاییز و زمستان 1388

صاحب امتیاز: دکتر حسن غفوری فرد
مدیر مسئول: مهندس مسعود حجت
سردبیر: دکتر گئورگ قره پتیان
مدیر اجرایی: مهندس مصطفی غلامی
مسئول دبیرخانه: خانم زهرا حق‌شنو

مجله انجمن مهندسین برق و الکترونیک ایران دو فصل نامه علمی پژوهشی است که در آن مقالاتی پذیرفته و چاپ خواهند شد که حاصل پژوهش‌های اصیل و حاوی نتایج نو در زمینه‌های گوناگون مهندسی برق از جمله الکترونیک، قدرت، کنترل، کامپیوتر، مخابرات و مهندسی پزشکی باشند. از کلیه محققانی که برای این مجله مقاله تهیه می‌کنند درخواست می‌شود که مقالات خود را به پست الکترونیکی سردبیر ارسال نمایند. مقالات جهت پذیرش باید علاوه بر تایید توسط داوران قبلا در هیچ نشریه، کتاب و یا رسانه گروهی دیگری ارائه نشده باشند. فرمت مقالات در وب سایت مجله موجود می‌باشد.

بدیهی است مطالب مندرج در مقالات صرفاً بیانگر نقطه نظرات نویسندگان بوده و این آرا لزوماً نظر مسئولین مجله یا انجمن نمی باشند.

برنامه ریزی توسعه شبکه انتقال تحت شرایط بازار برق با در نظر گرفتن هزینه برقراری امنیت

حسین عسگریان ابیانه[1] **حسین شریعتی دهاقان**[2] **محمد حسین جاویدی دشت بیاض**[3] **فرزاد رضوی**[4]

1- استاد- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی امیرکبیر

askarian@aut.ac.ir

2- دانش آموخته کارشناسی ارشد- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی امیرکبیر

info@epsaman.com

3- استاد- گروه برق-دانشکده مهندسی- دانشگاه فردوسی مشهد

h-javidi@ferdowsi.um.ac.ir

4- استادیار- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه تفرش

Razavi.farzad@taut.ac.ir

چکیده: یک فاکتور مهم که در برنامه ریزی توسعه شبکه انتقال باید در نظر گرفته شود، وضعیت امنیت در شبکه پس از انجام توسعه است. در سیستم های تجدید ساختار یافته فاکتورهایی مانند سود شرکت کنندگان بازار یا تغییرات قیمت های ناحیه ای[1] در برنامه ریزی توسعه شبکه انتقال مورد توجه قرار گرفته اند. در نهایت برای داشتن یک شبکه (N-1)Secure این برنامه های توسعه اصلاح می شوند. این مقاله یک روش جدید برای برنامه ریزی توسعه شبکه انتقال تحت شرایط بازار برق را ارائه می دهد که در آن مالک شبکه انتقال[2] مسئولیت توسعه را بر عهده دارد. تابع هدف توسعه، سود شرکت کنندگان بازار را حداکثر و هزینه توسعه و هزینه برقراری امنیت را کاهش می دهد. این روش، حداقل هزینه برقراری امنیت را محاسبه و در کنار دیگر فاکتورهای توسعه تحت شرایط بازار برق در تابع هدف وارد می کند و در نتیجه برنامه توسعه به سمت یک برنامه امن تر و کاراتر هدایت می شود. در روش های قبلی کمینه هزینه برقراری امنیت در تابع هدف توسعه تحت شرایط بازار برق لحاظ نشده است. برای سناریو های مختلف توسعه، در ابتدا هزینه بهبود امنیت در شبکه محاسبه و سپس در تابع هدف توسعه گنجانده می شود. برای پیاده سازی روش ارائه شده بر روی شبکه های گسترده، از الگوریتم ترتیبی استفاده و نتایج شبیه سازی بر روی سیستم تست اصلاح شده گارور[3] و 24 باسه IEEE ارائه شده است.

کلمات کلیدی: توسعه شبکه، بازار برق، برنامه ریزی توسعه شبکه، هزینه بهبود امنیت، قیمت های نهایی

تاریخ ارسال مقاله : 1387/7/28

تاریخ پذیرش مقاله : 1388/8/4

نام نویسنده‌ی مسئول : حسین شریعتی دهاقان

نشانی نویسنده‌ی مسئول : ایران- تهران- خیابان حافظ دانشگاه صنعتی امیرکبیر- دانشکده فنی و مهندسی برق

1- مقدمه

پس از انجام خصوصی سازی در قسمت نیروگاه ها و سپردن سیستم انتقال به بهره بردار مستقل (ISO[4]) و با توجه به افزایش تقاضای انرژی الکتریکی، این سوال مطرح می شود که در سیستم های تجدید ساختار یافته چه تغییراتی در تدابیر توسعه شبکه و از بین بردن تراکم (Congestion) باید لحاظ نمود.

به صورت متداول، برنامه ریزی توسعه شبکه قدرت، شامل توسعه شبکه انتقال، توسط یک سیستم واحد تصمیم گیرنده انجام می شود. این سازمان بدون وابستگی به بازیگران بازار، با هدف تامین منافع شبکه توسعه را انجام می دهد. هدف از توسعه شبکه انتقال این است که زمان و محل توسعه مناسب برای شبکه انتقال را طوری پیدا کنیم که قیود تکنیکی، مالی و محیطی رعایت شوند[1].

برنامه ریزی توسعه شبکه از L.L Graver در سال 1970، با هدف حداقل کردن هزینه توسعه و در نظر گرفتن قیود تولید نیروگاه ها و ظرفیت خطوط با استفاده از روش برنامه ریزی خطی شروع شد[2]. پس از آن، تکنیک های مختلفی از جمله الگوریتم branch-and-Bound-، آنالیز حساسیت، Benders Decomposition، الگوریتم مورچه ها، الگوریتم ژنتیک، جستجوی تابو و GRASP در برنامه ریزی توسعه شبکه مورد استفاده قرار گرفته اند. در طی این دوره، برنامه ریزی توسعه شبکه انتقال پس از ظهور بازار برق نسبت به سیستم سنتی تفاوت کرده است و معیار های برنامه ریزی توسعه در سیستم های تجدید ساختار یافته باید متناسب با شرایط رقابتی باشد.

علاوه بر این، شرایط عدم اطمینان ناشی از توسعه تولید و آینده پخش بار، به ناچار شرایط عدم قطعیت را افزایش داده اند. این مسئله یک چالش جدید را پیش روی برنامه ریزان توسعه شبکه انتقال قرار می دهد.

طراحان شبکه باید علاوه بر در نظر گرفتن میزان سرمایه مورد نیاز برای پیاده سازی توسعه شبکه، شرایط بازار را نیز پس از طراحی در نظر بگیرند[3].

در سیستم های یکپارچه عمودی، وضعیت امنیت شبکه و هزینه توسعه در برنامه ریزی های توسعه لحاظ شده اند. در سیستم های تجدید ساختار یافته، محققین فاکتورهای دیگری همچون سود شرکت کنندگان [5] ,[4] ,[1] یا واریانس قیمت های ناحیه ای [7] ,[6] را در برنامه ریزی توسعه شبکه انتقال لحاظ کرده اند و در نهایت برنامه های خود را برای دستیابی به یک سیستم امن Secure (N-1) اصلاح کرده اند[8]. در این مقالات، امنیت سرویس ارائه شده درون تابع هدف توسعه شبکه انتقال لحاظ نشده است.

تحقیقات مختلفی انجام شده است تا هزینه امنیت را بر اساس هزینه وقفه در عملکرد مشتریان محاسبه کنند [11] ,[10],[9]. این مقاله هزینه وقفه در عملکرد بار بر اثر بحران در شبکه را به عنوان هزینه برقراری امنیت در شبکه لحاظ می کند. منظور کردن این هزینه در مطالعات طراحی توسعه شبکه انتقال، شبکه را به سمت یک شرایط امن تر و اقتصادی تر هدایت خواهد کرد.

در این روش، بهبود هزینه برقراری امنیت در تابع هدف توسعه تحت شرایط بازار برق لحاظ شده است. در برخی از روشهای ارائه شده که هزینه برقرارای امنیت را در برنامه ریزی توسعه شبکه انتقال تحت شرایط بازار برق لحاظ کرده اند، کمینه آن محاسبه نشده است. در این مقاله یک متد جدید برای طراحی شبکه انتقال تحت شرایط بازار برق با لحاظ کردن کمینه هزینه برقراری امنیت ارائه خواهد شد.

برای پیاده سازی روش ارائه شده در شبکه های گسترده و واقعی استفاده از الگوریتم ترتیبی پیشنهاد و ارائه گردیده است. این الگوریتم در مسائلی که فضای جواب مسئله گسترده می باشد، با ارائه جوابهای "به اندازه کافی خوب"[5] مسئله را به یک مسئله قابل حل تبدیل می کند.

2- عوامل موثر در برنامه ریزی توسعه شبکه انتقال

تاسیس خط انتقال جدید به عنوان یکی از پر هزینه ترین و طولانی مدت ترین پروژه های سیستم های قدرت محسوب می شود و این مسئله اهمیت یک طراحی بهینه را مشخص می سازد.

به صورت متداول مالک شبکه (GO[6])، که مسئولیت طراحی شبکه انتقال را بر عهده دارد به دنبال سود شرکت کنندگان بازار است و تلاش می کند تا از امکان ایجاد قدرت بازار[7] برای عده ای از تولید کنندگان جلوگیری کند. بنابراین GO باید با انتخاب توسعه بهینه، سود همه شرکت کنندگان بازار یا رفاه عمومی را به عنوان یکی از فاکتورهای موثر، بیشینه کند. افزایش رفاه عمومی به معنی افزایش سود مجموعه بازیگران اعم از تولید کنندگان و مصرف کنندگان تلقی می شود. فاکتور دیگری که در طراحی شبکه انتقال باید لحاظ شود، چه در سیستم های سنتی و چه در سیستم های تجدید ساختار یافته، هزینه ساخت می باشد. هزینه ساخت یک خط انتقال جدید به علت نیاز به نصب تجهیزات گسترده حفاظتی، کنترلی و تاسیسات مکانیکی بسیار قابل توجه است.

علاوه بر دو عامل فوق، میزان بهبود امنیت شبکه نیز در برنامه ریزی توسعه موثر است که به دو فاکتور قبل اضافه می شود.

دو فاکتور اول، که در اکثر برنامه ریزی های توسعه تحت شرایط بازار برق لحاظ شده اند و فاکتور سوم که در برخی مقالات به صورتی وارد شده است، در این بخش تشریح خواهند شد.

2-1- رفاه عمومی

مسئول بازار توان وظیفه دارد که درخواست های فروش و خرید توان را مرتب کند و با بیان قیمت تعادل بازار، پیشنهاد های پذیرفته شده و رد شده در بازار را اعلام کند.

در عمل به علت وجود تراکم و تلفات در شبکه، امکان بهره برداری شبکه تنها با توجه به مکانیزم بازار نمی باشد و باید محدودیت های شبکه در انتقال توان را نیز لحاظ نمود. به این دلیل، بازار برق با قیمت های حاشیه ای ناحیه ای (LMP) تصفیه می شود. این نوع قیمت گذاری، علاوه بر قیمت انرژی، انعکاس دهنده تراکم (محدودیت خطوط انتقال) و تلفات در شبکه می باشند.

به علت وجود قیمت های ناحیه ای سود نهایی بازیگران بازار متفاوت خواهد بود. سود نهایی یک فرو شنده بازار به صورت زیر محاسبه می شود.

$$S_n^s = LMP_n \times P_n^s - p_n^s \times P_n^s \qquad (1)$$

که در آن p_n^s، قیمت پیشنهادی فروشنده n و P_n^s، میزان توان فروخته شده توسط این فروشنده می باشد. LMP_n، قیمت ناحیه ای در محل فروش و S_n^s، سود دریافتی این فروشنده از تفاوت درآمد واقعی حاصل از فروش و میزان مورد انتظارش بدست می آید.

مشابه رابطه (1) را می توان برای خریداران نوشت و در نهایت سود دریافتی کل شرکت کنندگان بازار (تفاوت میزان پیشنهادشان با قیمت تصفیه شده) به صورت زیر تبدیل می شود.

$$\begin{aligned} TAP &= \sum S_n^s + \sum S_n^b \\ &= (\sum_n p_n^b(p_n^b) - LMP_n(p_n^b)) \\ &+ (\sum_n LMP_n(p_n^s) - p_n^s(p_n^s)) \\ &= (\sum_n p_n^b(p_n^b) - p_n^s(p_n^s)) \\ &- (\sum_n LMP_n(p_n^b) - LMP_n(p_n^s)) \\ &= GW - MS \end{aligned} \qquad (2)$$

در این حالت سود دریافتی بازیگران برابر است با رفاه عمومی (GW) منهای اضافه حسابی (MS[8]). این اضافه حساب به عنوان درآمد انتقال یا درآمد تراکم محسوب می شود و رفاه عمومی به عنوان ملاک سود بازیگران بازار محسوب می شود.

مدیریت شبکه از توسعه شبکه انتقال به دنبال حداکثر کردن سود تمامی شرکت کنندگان بازار می باشد. بدین منظور برای کل بازه بهره برداری پیش بینی شده از خط انتقال، باید سود بازیگران بازار را بیشینه کند. در نتیجه تابع رفاه عمومی (S_h) در کل زمان بهره برداری مورد نظر (H)، برای سناریو های مختلف توسعه محاسبه و گزینه ای که بیشترین مقدار را داشته باشد از دید بازار مناسب تر می باشد.

$$Max\, S_h = \sum_{h \in H} \sum_{n=1}^{N} [p_n^b(p_n^b) - p_n^s(p_n^s)] \qquad (3)$$

S.t.

$$g_{i\min} \le g_i \le g_{i\max}$$

$$Qi_{\min} \le Qi \le Qi_{\max}$$

$$\sum_j d_j(t_h) + D_h - \sum_i g_i(t_h) = 0$$

$$Zi_{\min} \le Zi(t_h) \le Zi_{\max}$$

$$f_{\min} \le f \le f_{\max}$$

این بهینه سازی باید به نحوی انجام شود که کلیه قیود شبکه رعایت شود و شبکه کاملا در شرایط پایدار به عملکرد خود ادامه دهد. محدودیت های تولید ژنراتورها (g)، تعادل تولید ($\sum_i g_i(t_h)$) با مجموع مصرف ($\sum_j d_j(t_h)$) و تلفات (D_h) و محدودیت توان انتقالی خطوط انتقال ($Zi(t_h)$) و محدودیت فرکانس شبکه (f) باید در این بهینه سازی لحاظ شوند.

2-2- هزینه ساخت

هزینه ساخت کل عبارتست از مجموع هزینه های انجام شده در np دوره در طول ساخت که با لحاظ کردن سود برگشتی به صورت زیر محاسبه می شود[13].

$$CC = \sum_{p=0}^{np-1} \frac{IC_p}{(1+r)^p} \qquad (4)$$

که در آن:

CC[9]، هزینه ساخت،

IC_p[10]، سرمایه گذاری انجام شده در هر دوره،

r[11]، درصد سود برگشتی سرمایه

و p، یک دوره سرمایه گذاری می باشد.

هزینه تخمینی قبل از انجام توسعه برای هر کاندید توسعه قبل از اجرا محاسبه می شود. این هزینه شامل حق مالکیت زمین و تجهیزات ساخت می شود.

2-3- بهبود امنیت

فاکتور دیگری که علاوه بر دیگر فاکتور ها باید در برنامه ریزی توسعه شبکه انتقال تحت شرایط بازار برق مورد توجه قرار گیرد، عکس العمل شبکه در شرایط بحرانی می باشد.

بروز شرایط بحرانی در شبکه قدرت از یک روند منظم پیروی نمی کند ولی می توان شرایط بحرانی را پیش از وقوع دسته بندی و پاسخ مناسب برای آنها را از قبل آماده کرد. شبکه های قدرت معمولا در حالتی بهره برداری می شوند که (N-1)Secure هستند. این به معنی آن است که شبکه می تواند از عهده یک بحران برآید و شرایط سخت

ناشی از آن را به صورت پایدار سپری کند. در نتیجه در زمان برنامه ریزی باید امنیت را مورد توجه قرار داد و شبکه را به قابل اطمینان ترین حالت هدایت کرد.

ذخیره تولید (برای شبکه های کوچک برابر با بزرگترین ژنراتور) از طریق بازار خدمات جانبی تامین می شود و بازیگرانی که قابلیت تامین این خدمات را دارند در رقابت شرکت می کنند. هزینه اضافی برای افزایش قابلیت اطمینان در بازار های خدمات جانبی از طریق هزینه های اضافی بر قبض های مصرف کنندگان تامین می شود.

شرایط بحرانی در خطوط انتقال غالبا از طریق اعمال خاموشی به بارها، تا حدی که شبکه به حالت پایدار برگردد، رفع می شوند. انواع مختلف بارها، هزینه های مختلف خاموشی دارند. به عنوان مثال هزینه وقفه در تامین یک مصرف کننده صنعتی بسیار بیشتر از یک مصرف کننده خانگی است. در نتیجه برای اعمال خاموشی در شرایط بحرانی نیاز به اعمال یک خاموشی وزن دهی شده بهینه (OWLS[12]) است تا هنگام بروز خطا حداقل هزینه را برای شبکه به همراه داشته باشد.

خروج خط های شبکه انتقال به دو دسته کوتاه مدت (Transient) و بلند مدت تقسیم می شوند. خروج های بلند مدت آن دسته هستند که نیازمند تعمیر قطعات شبکه برای حفظ عملکرد صحیح می باشند [14]. برای خروج های بلند مدت نیاز به محاسبه بازه زمانی خروج (OD[13]) وتعداد دفعات خروج (OR[14]) می باشد.

خروج های کوتاه مدت شامل کلید زنی های reclosing چه به صورت اتوماتیک و چه به صورت غیر اتوماتیک می شوند. برای خروج های کوتاه مدت تنها OR لحاظ می شود چون بازه زمانی آنها بسیار کوتاه است.

محاسبه احتمال خروج بک خط یک موضوع قابلیت اطمینان است که به شرایط کارکرد، شرایط نگهداری و طراحی اجزا مربوط است. شرایط عملکرد شامل فاکتورهایی مانند طول خط، شرایط آب و هوایی، سرعت باد، سطح ولتاژ و مکان جغرافیایی می شود[14].

این بررسی ها نیازمند اطلاعات زیادی از تاریخچه عملکرد می باشند تا بتوانند تخمین درستی از احتمال خرابی اجزا به ما بدهند[14].

تحقیق دیگری نیز که در سیستم باید انجام شود، بررسی و محاسبه خسارت وارد شده به مصرف کنندگان بر اثر خاموشی های اعمال شده می باشد (IC[15]). مشتریان می توانند به سه دسته خانگی، تجاری و صنعتی تقسیم شوند. یک تحقیق دقیق در بین مشتریان همانند آنچه در [15] و [16] انجام شده است می تواند هزینه وقفه یا خاموشی را برای مشتریان بدست آورد. IC، به عنوان اثری که خاموشی بر مشتریان دارد و باعث وقفه عملکرد بخشی یا کل سیستم آنها می شود تعریف می شود. رابطه IC با زمان خاموشی به صورت خطی نمی باشد، ولی برای امکان پذیر نمودن محاسبات می توان یک IC میانگین برای هر ساعت خاموشی (HT[16]/MW) برای هر نوع از مشتریان لحاظ شده است.

برای بدست آوردن هزینه برقراری امنیت (SC[17]) در اثر وقوع یک بحران باید مجموع خسارت های وارده در اثر این بحران محاسبه شود.

$$SC_k = OR \times OD \times \sum_u IC_u \times LD_{uk} \qquad (5)$$

SC_k هزینه برقرار ساختن امنیت برای خط k در یک سال می باشد و برابر است با هزینه تمام خاموشی های لازم در هنگام بروز شرایط بحرانی در خط k. OR و OD، تعداد خروج (در سال) و زمان خروج (ساعت) در یک سال می باشند. LD_{uk}، کاهش بار ضروری برای مصرف کننده u در هنگام بروز بحران k می باشد. برای بدست آوردن بهینه کاهش بار ضروری در هنگام بروز هر بحران در شبکه انتقال، OWLS ها بوسیله بکار گیری یک الگوریتم بهینه سازی محاسبه می شوند. این بهینه سازی بدین منظور محاسبه می شود که حداقل هزینه لازم برای پایدار نگه داشتن شبکه در شرایط بحرانی را بدست آوریم.

3- هزینه بهینه امنیت و تابع نهایی توسعه

3-1- هزینه بهینه بهبود امنیت

کمینه کردن هزینه برقراری امنیت برای هر یک از کاندیداهای توسعه، در هنگام بروز شرایط بحرانی و قرار دادن آن در کنار دیگر فاکتورهای توسعه نوآوری این مقاله می باشد.

در این مقاله از الگوریتم ژنتیک برای محاسبه OWLS استفاده شده است. هر کروموزوم نمایانگر میزان کاهش بار برای کلیه مصرف کنندگان شبکه قدرت می باشد. تابع برازندگی یا همان سیستم ارزش دهی به کروموزوم ها، هزینه تحمیلی به سیستم بر اثر خاموشی می باشد. بدین ترتیب الگوریتم ژنتیک با جستجو در فضای جواب، کمینه کاهش بار برای مصرف کنندگان را به نحوی می یابد که هزینه ناشی از خاموشی برای شبکه حداقل گردد.

در هنگام بروز هر بحران در شبکه، باید ولتاژ، فرکانس، توان ژنراتورها و تراکم خطوط در محدوده مجاز خود باقی بمانند و در هر لحظه تعادل توان تولیدی و مصرفی برقرار باشد. بنابراین با لحاظ کردن محدودیت ها، بهینه خاموشی برای هر بحران در رابطه (6) بدست می آید. در این رابطه k، بیانگر بحران های مختلف و u، نشانگر بار های مصرفی اند.

$$Min\ SC_k = OR \times OD \times \sum_{u=1}^{n} IC_u \times LD_{uk}$$

S.t.

$$\begin{aligned} & V_{\min} \le V_l \le V_{\max} \qquad l = 1...m \\ & g_{i\min} \le g_i \le g_{i\max} \\ & Qi_{\min} \le Qi \le Qi_{\max} \\ & Zi_{\min} \le Zi(t_h) \le Zi_{\max} \\ & f_{\min} \le f \le f_{\max} \\ & \sum_j d_j(t_h) + D_h - \sum_i g_i(t_h) = 0 \end{aligned} \tag{6}$$

هر طرح توسعه شبکه را به یک سطح مشخص از امنیت هدایت می کند. در نتیجه هزینه برقراری امنیت در شبکه در هنگام بروز شرایط بحرانی برای هر طرح توسعه متفاوت است. این تفاوت یک معیار مناسب جهت رتبه بندی کاندیداهای توسعه می باشد. هزینه بهینه بهبود امنیت توسط (7) بدست می آید. برای هر کاندیدای توسعه می توان نوشت:

$$\begin{aligned} SC &= (\sum_{k=1}^{n} (\sum_{u=1}^{m} IC_u \times OWLS_u) \times OR_k \times OD_k) \times y \times ac \\ &= (\sum SC_k) \times y \times ac \end{aligned} \tag{7}$$

هزینه برقراری امنیت برای بحران k جمع هزینه های OWLS است که در OR و OD ضرب شده باشد. برای بدست آوردن هزینه برقراری امنیت برای طرح توسعه i، که قرار است yسال مورد بهره برداری قرار گیرد، جمع همه SC ها در y ضرب می شود. همانطور که بیان شد برای هر نوع مصرف کننده و برای زمان های مختلف وقفه یک IC میانگین (صنعتی، تجاری یا خانگی) تخصیص داده می شود. در عمل IC به فاکتورهای دیگری همچون سیستم پشتیبان (باتری، ژنراتور یا ...)، زمان خروج (زمان پیک بهره برداری یا غیر پیک) و بازه زمانی خروج بستگی دارد. به طور معمول خروج خطوط برای تعمیر در پریودهای پرباری اتفاق نمی افتد، در نتیجه ضریب ac (ضریب تنظیم[18])کمتر از یک را برای اصلاح IC لحاظ می کنیم.

3-2- تابع نهایی برنامه ریزی توسعه شبکه انتقال

همانطور که بخش 2 اشاره شد، سه فاکتور در برنامه ریزی توسعه شبکه انتقال تحت شرایط بازار برق موثر هستند. تابع نهایی (FD[19]) توسعه شبکه انتقال تحت شرایط بازار برق به صورت زیر لحاظ می شود.

$$\begin{aligned} & FD = \Delta S + \Delta SC - CC \\ & \Delta S = S_f - S_0 \\ & \Delta SC = SC_0 - SC_f \end{aligned} \tag{8}$$

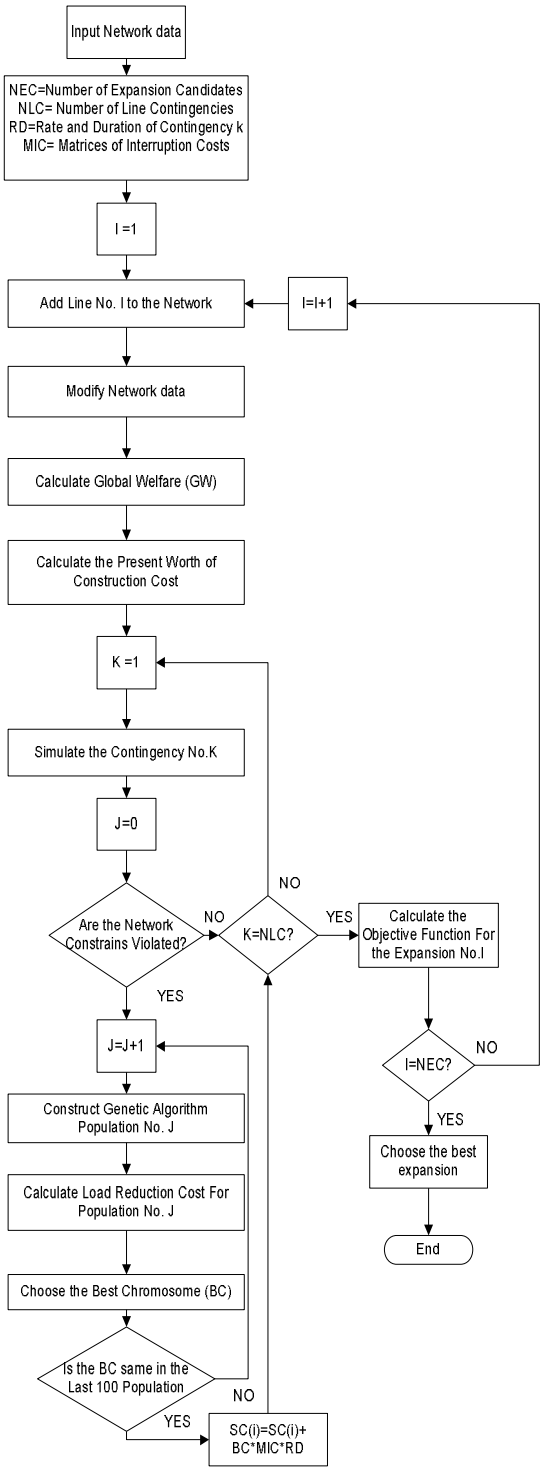
ΔS بهبود رفاه عمومی نسبت به حالتی که هیچ توسعه ای انجام نشود را نشان می دهد. این تابع برای همه کاندیداهای توسعه محاسبه و در تابع نهایی گنجانده می شود. SC_0 هزینه برقراری امنیت برای حالتی است که هیچ برنامه توسعه ای پیاده نشود و SC_f هزینه برقراری امنیت پس از اجرای برنامه توسعه مد نظر می باشد و ΔSC، بهبود یا کاهش هزینه برقراری امنیت در شبکه را نسبت به حالتی که هیچ توسعه ای انجام نشود نشان می دهد. CC نیز همان هزینه ساخت می باشد.

برای بدست آوردن میزان بهینه هزینه امنیت متعاقب آن اجزاء تابع نهایی و در نهایت خود تابع نهایی برای گزینه های توسعه مد نظر از روند نشان داده شده در فلوچارت شکل(1) استفاده می شود.

4- برنامه ریزی توسعه شبکه انتقال برای شبکه های گسترده

کلیه عوامل موثر در برنامه ریزی توسعه شبکه انتقال تحت شرایط بازار برق در بخش قبل تشریح شدند. هنگام برنامه ریزی توسعه برای یک شبکه گسترده کاندیداهای توسعه بسیار زیاد می باشند. به عنوان مثال، اگر قرار باشد که در یک شبکه 24 باسه با 41 کاندیدای توسعه، 4 خط جدید کشیده شود تعداد کاندیداهای توسعه 2825761 خواهد شد. محاسبه تابع هدف برای این تعداد کاندیدا امری محال به نظر می رسد. برای حل این مشکل، در این مقاله الگوریتم بهینه سازی ترتیبی (OO[20]) استفاده شده است.

الگوریتم بهینه سازی ترتیبی اولین بار توسط Ho و دیگران در [17] برای حل مسائل بهینه سازی پیچیده ارائه شد. برنامه ریزی های بهینه سازی سنتی به صورت معمول هدف جستجوی خود را پیدا کردن بهترین نمونه از فضای جواب قرار می دهند. اکثر این برنامه های بهینه سازی این هدف را با کاهش سرعت همگرایی معاوضه می کنند. بر خلاف این الگوریتم ها، الگوریتم بهینه سازی ترتیبی بر پیدا کردن بهترین جواب در فضای جواب پافشاری نمی کند. هدف این الگوریتم پیدا کردن مجموعه ای از جوابهای نسبتا خوب ($G(q)$) است که شامل بهترین جوابهای مجموعه جواب باشد[18]، [19]. این ایده دقت این الگوریتم را کاهش می دهد ولی پیاده سازی آن را امکان پذیر می کند.



شکل (1): فلوچارت بدست آوردن تابع هدف برای سناریو های مختلف توسعه

به جای محاسبه تابع هدف برای کل فضای جواب، الگوریتم بهینه سازی ترتیبی یک سری نمونه را به صورت رندوم از مجموعه فضای جواب (N) انتخاب می کند. هنگامی که تمام نمونه ها به صورت رندوم انتخاب شده باشند، احتمال اینکه حداقل یکی از نمونه ها در 5% بهینه فضای جواب بیفتد طبق زیر است:

$$P = 1- (1 – 5\%) \text{^}N$$

اگر N=1000 باشد. احتمال اینکه هیچ یک از نمونه ها در 5% بهترین جوابهای فضای جواب نیفتند برابر است با

$$0.95^{\text{^}1000} = 5.29*10^{\text{^}-23} =0$$

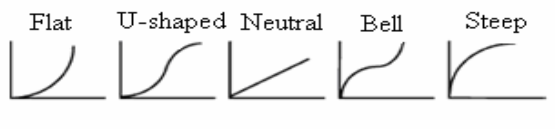
که یک عدد بسیار کوچک است. احتمال اینکه حداقل 10 جواب در 5% بهینه فضای جواب قرار بگیرند نیز تقریباً 100% است. این احتمال برابر است با [2.7978e-012]-1.

مراحل استفاده از این الگوریتم به صورت زیر است:

1. انتخاب تصادفی N نمونه از فضای جواب به صورت رندوم (در این مقاله N، 1000 لحاظ شده است).
2. تشکیل مدل خام تابع هدف و محاسبه تابع هدف برای N نمونه.
3. منظم کردن نمونه ها بر اساس مدل خام از کم به زیاد و تشکیل نمودار کارایی ترتیبی (OPC^{21}).
4. تشخیص الگوی افزایشی نمودار بر اساس شکل (2).
5. محاسبه تابع هدف دقیق برای مجموعه انتخاب شده(SS^{22}).

مجموعه انتخاب شده بر اساس الگوی افزایشی نمودار OPC و سایز g^{23}، k^{24} ،p^{25} و پهنای باند خطا تعیین می شود.

با استفاده از شبیه سازی های فراوان انجام شده در مقالات مرجع، فورمولی برای ارتباط دادن سایز مجموعه انتخاب شده به روند منحنی OPC، سایز g، k، p و پهنای باند خطا[26] استخراج شده است. سایز مجموعه انتخاب شده برای p = 95% و پهنای باند خطای 0.5 و بر اساس g در جدول (1) نشان داده شده است.



شکل (2): کلاس های مختلف منحنی OPC

مهمترین گام در به کارگیری الگوریتم ترتیبی تشکیل تابع هدف خام می باشد. این تابع هدف باید یک برآورد سریع از فضای جواب بدهد تا بر اساس آن منحنی OPC تشکیل شود.

تابع هدف خام یک برآورد اولیه از مجموعه فضای جواب می دهد تا بتوان برای فضای جواب منحنی OPC را تشکیل داد. بر اساس رفتار منحنی OPC و فاکتور های مربوط به دقت و احتمال، مجموعه کاندیداهای انتخاب شده (SS) تشکیل می شود. وجود المان پهنای باند خطا باعث لحاظ نمودن اثر دقت تابع خام در تشکیل مجموعه انتخاب شده می شود. با محاسبه پهنای باند خطا پس از تشکیل تابع هدف خام می توان خروجی منحنی OPC را تنظیم کرد. این تنظیم در تعداد اعضای مجموعه انتخاب شده اثر می گذارد و آن را برای محاسبه تابع هدف دقیق کالیبره می کند.

جدول (1): تعیین اندازه مجموعه انتخاب شده بر پایه روند شکل OPC

g=50	Ordered Performance Curve (OPC) shape				
	Flat	U-	Neutral	Bell	Steep
k=1	37	25	22	12	11
k=2	63	41	35	15	13
k=3	88	57	48	21	14
k=4	113	73	61	29	16
k=5	136	89	71	39	19
g=10	Ordered Performance Curve (OPC) shape				
	Flat	U-	Neutral	Bell	Steep
k=1	219	153	125	45	31

تابع هدف نهایی توسعه شبکه انتقال تحت شرایط بازار برق از 3 فاکتور رفاه عمومی، هزینه ساخت و بهبود هزینه برقراری امنیت تشکیل شده است. محاسبه هزینه ساخت، زمان بر نیست، در نتیجه این فاکتور در تابع هدف خام و دقیق مشابه می باشد. برای افزایش سرعت محاسبات باید برای دو فاکتور رفاه عمومی و بهبود هزینه برقراری امنیت مدل های سریع تری ارائه شود. در نتیجه تابع هدف خام نهایی برنامه ریزی توسعه شبکه انتقال به صورت رابطه (9) می شود.

$$FD' = \Delta S' + \Delta SC' - CC \qquad (9)$$

در این رابطه FD' تابع هدف خام است و $\Delta S'$ و $\Delta SC'$ برآورد های خام از بهبود رفاه عمومی و بهبود هزینه برقراری امنیت هستند. نحوه محاسبه و تشکیل مدل های خام در این بخش تشریح می شوند.

4-1- مدل خام برای رفاه عمومی

رفاه عمومی در محاسبات دقیق شرایط مختلف بار در بازار را لحاظ می کند. این بدان معناست که رفاه عمومی برای درصد های متفاوتی از بار ماکزیمم پیش بینی شده محاسبه می شود و میانگین آن نمایانگر رفاه عمومی بازار خواهد بود. برای سرعت بخشیدن به محاسبات در تابع هدف خام، رفاه عمومی برای میانگین درصد بارهای متفاوت محاسبه خواهد شد. با این تدبیر سرعت محاسبه این فاکتور به طرز قابل ملاحظه ای افزایش خواهد یافت.

4-2- مدل خام برای بهبود هزینه برقراری امنیت

همان طور که در بخش قبل اشاره شد، بهبود هزینه برقراری امنیت به عنوان تغییر در هزینه از دست رفتن بار بعد از انجام توسعه نسبت به قبل محسوب می شود. محاسبه بهبود هزینه برقراری امنیت یک عمل زمان بر است که پیاده سازی آن را در حالتی که فضای جواب گسترده ای در اختیار داریم ناممکن است.

جهت سرعت بخشیدن به محاسبات بهبود هزینه امنیت یک سری ساده سازی ها باید انجام شود. هدف این است که به جای محاسبه بهبود هزینه برقراری امنیت برای کل بحران های شبکه، این هزینه را برای سه نماینده از مجموعه بحران ها محاسبه کنیم. حال این سوال مطرح می شود که این سه نماینده چگونه باید انتخاب شوند؟ برای این منظور در این مقاله از مفهوم حساسیت استفاده شده است. حساسیت خط i به خط j از رابطه (10) بدست می آید.

$$Sens(L_{i-j}) = \frac{|Z_i - Z_i'|}{|Z_j|} \qquad (10)$$

$Sens(L_{i-j})$ حساسیت خط i به خط j می باشد، Z_i بار خط i در حالت نرمال، Z_i' بار این خط در خالت خروج خط j است. Z_j نیز بار خط j است. حال برای دسته بندی خطوط شبکه بر اساس حساسیت، مجموع حساسیت خطوط شبکه به خط j را طبق رابطه (11) تعریف می کنیم.

$$Sens(j) = \sum_{i=1}^{N} Sens(L_{i-j}) \qquad (11)$$

$Sens(j)$ برابر است با حساسیت تمام خطوط شبکه به خروج خط j . خروج بعضی از خطوط در شبکه اثر بیشتری روی پخش بار شبکه خواهد گذاشت ($Sens(j)$ بزرگتر) و خروج برخی اثر کمتر. در نتیجه برای هر سناریوی توسعه، برنامه ای اجرا می شود تا حساسیت خطوط شبکه را محاسبه کند.

بر اساس خروجی این برنامه خطوط شبکه به سه دسته تقسیم می شوند (حساسیت بالا، متوسط و پایین). یک نماینده از هر گروه برای محاسبه هزینه برقراری امنیت انتخاب می شود و هزینه مجموع بر این اساس برآورد می شود. با استفاده از این روش دقت محاسبه این فاکتور کاهش می یابد ولی در عوض سرعت محاسبه آن شدیدا افزایش می یابد. به عنوان مثال برای یک شبکه 24 باسه با 34 خط سرعت محاسبه این فاکتور بیش از 11 برابر افزایش می یابد.

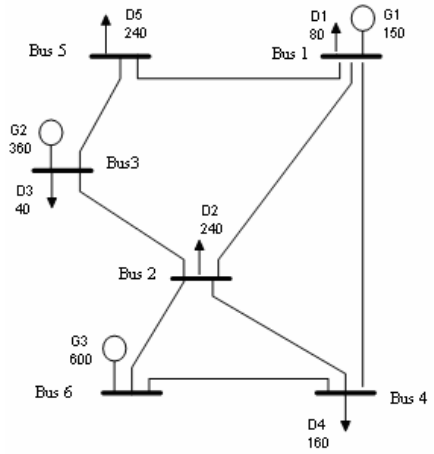
5- نتایج شبیه سازی

5-1- سیستم تست 6 باسه گارور

سیستم تست اصلاح شده 6 باسه گارور، برای بررسی عملکرد تابع هدف برنامه ریزی توسعه شبکه انتقال مورد استفاده قرار گرفته است. اصلاحات انجام شده بر روی این سیستم به منظور نمایش اثر SC برای توسعه انجام شده است.اطلاعات پیش بینی شده از ژنراتورهای سیستم، خطوط و بارها در جداول (2) و (3) ارائه شده اند.

ساختار بازار شبکه، از 3 تولید کننده و 5 مصرف کننده تشکیل شده است. 2 مصرف کننده صنعتی هستند (D2 و D4) که وقفه در تامین بار آنها هزینه بیشتری را به سیستم تحمیل می کند. بار آنها از طریق قراردادهای بلند مدت تامین می شود و مانند دیگر شرکت کنندگان در بازار روزانه برای تامین بار خود شرکت نمی کنند. متوسط پیشنهاد های قیمت تولید کنندگان و مشتریان در جدول (2) آورده

شده است. پیشنهاد های قیمت بر اساس هزار تومان (HT) بـرای هـر مگاوات ساعت ارائه شده است.



شکل (2): شماتیک سیستم تست گارور اصلاح شده

جدول (3) اطلاعات خطوط سیستم را نمایش می دهد. دو ستون اول باس های مبدا و مقصد را نشان می دهـد. سـتون سـوم و چهـارم پارامتر های الکتریکی خطـوط را مـشخص مـی کننـد. سـتون پـنجم ظرفیت خطوط و ستون ششم هزینه ساخت آنها را بر اسـاس میلیـارد تومان (میلیون میلیون تومان MMT) نشان می دهد.

جدول (2): اطلاعات تولید کنندگان و خریداران بازار

Generator			Load			
	offer	Offer price [HT/MWh]		bid	Bid price [HT/MWh]	IC [HT/MWh]
G1	150	10	D1	80	30,28,26, 20	280
-	-	-	D2	240	-	4800
G2	360	15,19,20	D3	40	28,26,24,22	280
-	-	-	D4	160	-	4800
-	-	-	D5	240	34,30,26,24,18	280
G3	600	8,12,15, 17,19,21	-	-	-	280

ستون هفتم وضعیت خط (در حال بهره برداری یا ساخته نشده) را نمایش می دهد. مقدار صفر نمایانگر امکان تاسیس خط می باشد.

اطلاعات قابلیت اطمینان برای سیستم گـارور ارائـه نـشده انـد و مقادیر نشان داده شده در ستون های هفتم و هشتم جـدول (3) کـه شامل تعداد خروج در سال و زمان خروج (ساعت) در یـک سـال مـی باشند، بر اساس اطلاعات [20] برای سیـستم 24 باسـه تـست IEEE فرض شده اند. شکل (4)، نمودار میانگین مصرف پیش بینی شده برای بازه 25 سال عملکرد شبکه را نشان می دهد. ستون عمودی درصد از پیک مصرف و ستون افقی ساعات شبانه روز را نشان می دهد.

هزینه وقفه 4800(HT/MW) برای مصرف کننده های صنعتی و 280(HT/MW) برای مصرف کننده هـای خـانگی بـرای هـر سـاعت خاموشی لحاظ شده است. این اعداد بر اساس اطلاعـات [9] اسـتخراج شده اند[27].

جدول (3): اطلاعات خطوط شبکه

f	t	R (p.u)	X (p.u.)	limit	CC (MMT)	already built	OR (1/yr)	OD (h)
1	2	0.1	0.4	100	40	1	0.2	15
1	3	0.09	0.38	100	38	0	0.2	15
1	4	0.15	0.60	80	60	1	0.2	15
1	5	0.05	0.20	100	20	1	0.2	15
1	6	0.17	0.68	070	68	0	0.2	15
2	3	0.05	0.20	100	20	1	0.2	15
2	4	0.1	0.40	100	40	1	0.2	15
2	5	0.08	0.31	100	31	0	0.2	15
2	6	0.08	0.30	200	30	1	0.2	15
2	6	0.08	0.30	200	30	0	0.2	15
3	4	0.15	0.59	82	59	0	0.2	15
3	5	0.05	0.20	150	20	1	0.2	15
3	5	0.05	0.20	150	20	0	0.2	15
3	6	0.12	0.48	100	48	0	0.2	15
4	5	0.16	0.63	075	63	0	0.2	15
4	6	0.08	0.30	200	30	1	0.2	15
4	6	0.08	0.30	200	30	0	0.2	15
5	6	0.15	0.61	78	61	0	0.2	15

کاندیداهای توسعه آنهایی هستند که مقدارشان در ستون هفـتم جدول (2) صفر می باشد ونتـایج مطالعـه در جـدول (4) آورده شـده است. میزان افزایش رفاه عمومی ناشی از هر برنامه توسـعه در سـتون چهارم و میزان کاهش هزینه برقراری امنیت در ستون پنجم نشان داده شده است. ستون ششم هزینه ساخت را نشان می دهد و ستون هفتم مقدار تابع هدف را به ازای هر برنامه توسعه مشخص می کند.

هزینه برقراری امنیت در حالتی که هیچ برنامـه توسـعه ای اجـرا نشود 28.4 میلیارد تومان است و برای هر یک از برنامه های توسعه با شبیه سازی خروج خطوط و با استفاده از الگوریتم ژنتیک و معادله (6) هزینه برقراری امنیت محاسبه می شود. در این معادله تعداد سال بهره برداری 25 و ضریب اصلاحی ac، 50% لحاظ شده است.

تابع هدف میزان به صرفه بـودن یـا بـه صـرفه نبـودن هریـک از کاندیداهای توسعه را نشان می دهـد. در بـین سـناریو هـای مختلـف

توسعه اجرای توسعه شماره 4 (بین باسهای 2 و 6) بیشتر از بقیه کاندیداها تابع هدفمان را ارضا می کند.

برای بررسی تاثیر لحاظ کردن فاکتور امنیت در تابع هدف توسعه شبکه انتقال تحت شرایط بازار برق، تابع هدف، بدون این فاکتور در جدول زیر محاسبه شده است.

جدول(4): نتایج تابع هدف برای کاندیداهای توسعه

candidate	f	t	ΔGW (MMT)	ΔSC (MMT)	CC (MMT)	FD
1	1	3	2.1	0.383	38	-35.517
2	1	6	33.3	6.863	68	-27.837
3	2	5	3.1	9.739	31	-18.161
4	2	6	77.5	17.647	30	65.147
5	3	4	2.8	13.283	59	-42.917
6	3	5	18.2	7.312	20	5.512
7	3	6	39.4	-0.197	48	-8.797
8	4	5	2.5	11.758	63	-48.742
9	4	6	66.3	23.026	30	59.326
10	5	6	69.3	2.376	61	10.676

در این حالت نیز بهترین کاندیدای توسعه تاسیس خط بین باسهای 2 و6 می باشد ولی ارزش توسعه نسبت به حالت قبل کاهش یافته است. یعنی گنجانیدن فاکتور امنیت در تابع هدف و بهینه کردن آن نقش کاندیداهای موفق توسعه را روشن تر و واضح تر می نمایاند. آنچه که نقش روش جدید و اعمال آن بر توسعه شبکه را نمایان تر می سازد توجه به برنامه توسعه بین خط های 3 و 5 در دو حالت منظور نمودن و بهینه کردن هزینه امنیت و حالت لحاظ نکردن آن است.

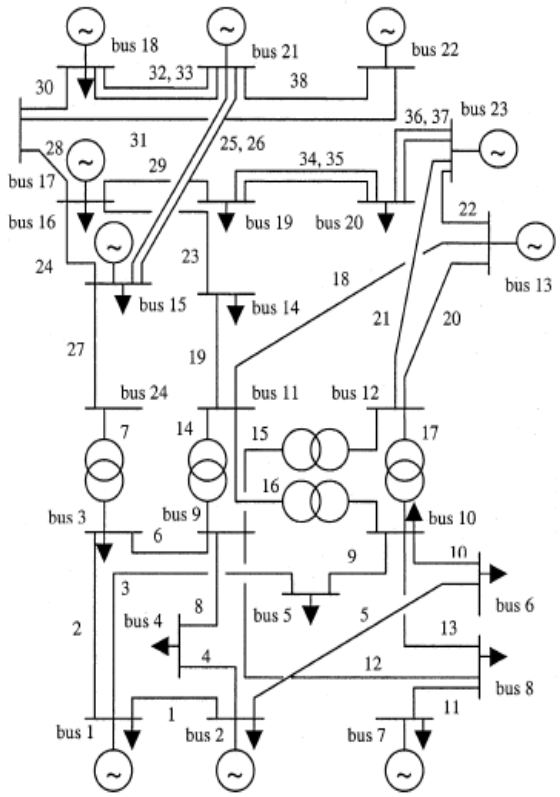
روش جدید به وضوح توسعه خط 5-3 را به صرفه می داند، در صورتی که منظور نکردن این فاکتور بسیار مهم این توسعه را مجاز نمی داند. یعنی توسعه ای که عملا در بازار برق به صرفه است به جهت منظور نشدن فاکتور فوق الذکر غیر صحیح اعلان می شود. لحاظ کردن این فاکتور در برنامه توسعه باعث محاسبه ارزش واقعی توسعه شبکه انتقال می شود و ما را به سمت یک برنامه کارآمد و به صرفه هدایت می کند.

جدول(5): نتایج تابع هدف بدون لحاظ کردن فاکتور امنیت

candidate	f	t	ΔGW (MMT)	CC (MMT)	Obj
1	1	3	2.1	38	-35.9
2	1	6	33.3	68	-34.7
3	2	5	3.1	31	-27.9
4	2	6	77.5	30	47.5
5	3	4	2.8	59	-56.2
6	3	5	18.2	20	-1.8
7	3	6	39.4	48	-8.6
8	4	5	2.5	63	-60.5
9	4	6	66.3	30	36.3
10	5	6	69.3	61	8.3

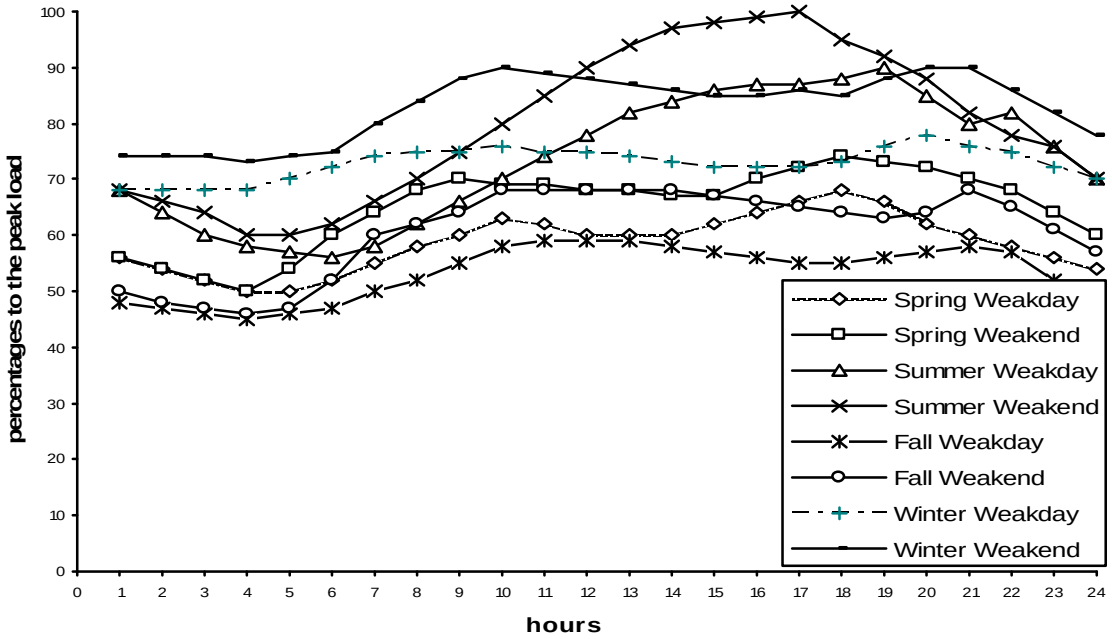
5-2- سیستم تست 24 باسه IEEE

سیستم تست 24 باسه قابلیت اطمینان (IEEE 24-bus reliability test system) برای پیاده سازی شبیه سازی های این قسمت استفاده شده است. توان تولیدی و مصرفی این سیستم تا سه برابر میزان کنونی رشد خواهد کرد و قرار است این سیستم برای غلبه بر این شرایط طراحی شود. دیاگرام تک خطی این سیستم در شکل (5) نشان داده شده است.



IEEE

شکل (5): دیاگرام تک خطی شبکه 24 باسه قابلیت اطمینان



شکل (4): نمودار میانگین تقاضای روزانه نسبت به ماکزیمم بار، برای سالهای بهره برداری، نمودار بار نسبت به تغییر فصل و روزهای تعطیل و غیر تعطیل متفاوت لحاظ شده است

گزینه های توسعه بدین صورت هستند که قرار است کاندیداهای توسعه از بین 34 مسیر موجود و 7 مسیر جدید و در مجموع 41 حق راه انتخاب شوند. اطلاعات خطوط (قدیم و جدید) در جدول (6) نمایش داده شده اند.

ساختار بازار این شبکه از 10 تولید کننده و 17 بار یا مصرف کننده تشکیل شده است. فرض بر این است که 6 عدد از بار ها بار های صنعتی هستند و بار مصرفی خود را از طریق قرارداد های بلند مدت تامین می کنند. وقفه در عملکرد این بارها منجر به تحمیل هزینه شدید به شبکه خواهد شد. میانگین قیمت های پیشنهادی از طرف تولید کنندگان و مصرف کنندگان بازار بر اساس جدول (7) می باشد. این جدول به دو قسمت اطلاعات تولید کنندگان و مصرف کنندگان تقسیم می شود. اطلاعات تولید کنندگان شامل حداکثر توان تولیدی و قیمت های پیشنهادی آنها می باشد. اطلاعات مصرف کنندگان شامل حداکثر توان درخواستی، قیمت های پیشنهادی و هزینه وقفه در عملکرد می شود. آن دسته از مصرف کنندگان که در بازار شرکت نمی کنند تامین بار خود را به صورت کامل از طریق قرارداد های دو جانبه انتظار دارند.

جدول(6): اطلاعات خطوط شبکه 24 باسه IEEE

From	To	R (p.u.)	X (p.u.)	Limit (MW)	CC (*10MT)	OR (1/yr)	OD (h)
1	2	0.002	0.013	175	3	0.24	16
1	3	0.054	0.211	175	55	0.51	10
1	5	0.021	0.084	175	22	0.33	10
2	4	0.032	0.126	175	33	0.39	10
2	6	0.049	0.192	175	50	0.48	10
3	9	0.030	0.119	175	31	0.38	10
3	24	0.002	0.083	400	50	0.02	768
4	9	0.026	0.103	175	27	0.36	10
5	10	0.022	0.088	175	23	0.34	10
6	10	0.013	0.060	175	16	0.33	35
7	8	0.015	0.061	175	16	0.30	10
8	9	0.042	0.165	175	43	0.44	10
8	10	0.042	0.165	175	43	0.44	10
9	11	0.002	0.083	400	50	0.02	768
9	12	0.002	0.083	400	50	0.02	768
10	11	0.002	0.083	400	50	0.02	768
10	12	0.002	0.083	400	50	0.02	768
11	13	0.006	0.048	500	66	0.40	11
11	14	0.005	0.041	500	58	0.39	11
12	13	0.006	0.048	500	66	0.40	11
12	23	0.012	0.096	500	134	0.52	11
13	23	0.011	0.086	500	120	0.49	11
14	16	0.005	0.058	500	54	0.38	11
15	16	0.002	0.017	500	24	0.33	11
15	21	0.006	0.049	500	68	0.41	11
15	24	0.006	0.051	500	72	0.41	11
16	17	0.003	0.025	500	36	0.35	11
16	19	0.003	0.023	500	32	0.34	11
17	18	0.001	0.014	500	20	0.32	11
17	22	0.013	0.105	500	146	0.54	11
18	21	0.003	0.025	500	36	0.35	11
19	20	0.005	0.039	500	55	0.38	11
20	23	0.002	0.021	500	30	0.34	11
21	22	0.008	0.067	500	94	0.45	11
1	8	0.034	0.134	175	35	-	-
2	8	0.032	0.126	175	33	-	-
6	7	0.049	0.192	175	50	-	-
13	14	0.005	0.044	500	62	-	-
14	23	0.008	0.062	500	86	-	-
16	23	0.010	0.082	500	114	-	-
19	23	0.007	0.060	500	84	-	-

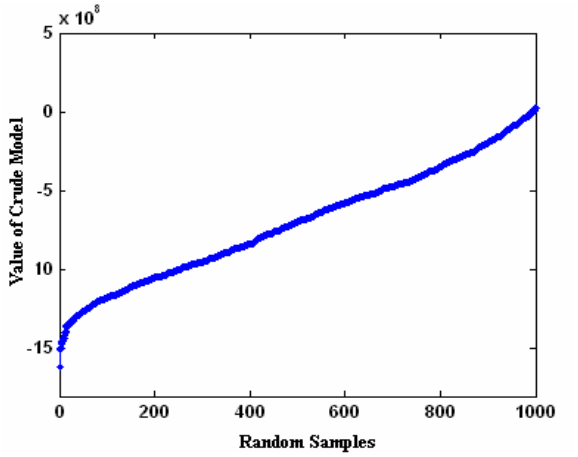
جدول(7): اطلاعات تولید کنندگان و خریداران بازار در شبکه 24 باسه IEEE

	Generator			Load			
		MWh offer	Offer price [HT/MWh]		MWh bid	Bid price [HT/MWh]	IC [HT/MW]
1	G1	576	25,26,27,28, 29,30	D1	324	70,57,56,55, 54	280
2	-	-	-	D2	291	70,29	280
3	G3	576	25,27,29,31, 33,35	D3	540	-	4800
4	-	-	-	D4	222	70,9,8	280
5	-	-	-	D5	213	70,31,30	280
6	-	-	-	D6	408	-	4800
7	G7	900	27,40,43,46, 50,53	D7	375	70,28,27,26	280
8	-	-	-	D8	513	-	4800
9	-	-	-	D9	525	-	4800
10	-	-	-	D10	585	-	4800
11	-	-	-	-	-	-	-
12	-	-	-	-	-	-	-
13	G13	1773	39,45,51,57, 63,69	D13	795	-	4800
14	-	-		D14	582	70,44,43	280
15	G15	645	21,22,23,25, 26,27	D15	951	70,18,16,14, 12,10	280
16	G16	465	21,23,25,27, 29,30	D16	300	70,62,61,60	280
17	-	-	-	-	-	-	-
18	G18	1200	14,19,24,29, 34,39	D18	999	70,24,22,19, 17,14	280
19	-	-	-	D19	543	70,31,30,29	280
20	-	-	-	D20	384	70,18,17,16	280
21	G21	1200	13,17,21,25, 29,32	-	-	-	-
22	G22	900	24,25,26,27	-	-	-	-
23	G23	1980	22,25,28,32, 35,38	-	-	-	-

فرض بر این است که مالک شبکه باید برای تاسیس 4 خط جدید در شبکه تصمیم بگیرد. در نتیجه تعداد سناریو های توسعه 2825761 خواهد بود. محاسبه دقیق تابع هدف برای این حالت امری ناممکن به نظر می رسد، در نتیجه از الگوریتم بهینه سازی ترتیبی استفاده شده است. طبق این الگوریتم 1000 گزینه توسعه که دارای قابلیت پیاده سازی می باشند به صورت رندوم انتخاب می شوند. تابع هدف خام ارائه شده در رابطه (9) برای این مجموعه محاسبه شده و با مرتب کردن نتایج خروجی به صورت تصاعدی از کم به زیاد، منحنی OPC مطابق با شکل (5) تشکیل شده است.

با توجه به روند منحنی OPC در شکل (5) که ناقوس-شکل است، کلاس مسئله بهینه سازی مشخص می شود.

بر اساس اطلاعات ارائه شده در جدول (1)، در حالت منحنی ناقوس-شکل، برای تلاقی با 10 جواب بهینه فضای جواب باید 45 جواب بهینه منحنی OPC برای محاسبه دقیق تابع هدف انتخاب شوند.



شکل (5): منحنی OPC تشکیل شده بر اساس تابع هدف خام

جدول(8): نتایج شبیه سازی تابع هدف خام و دقیق برای مجموعه انتخاب شده

Planning Scheme	$\Delta S'$ *10^8 HT	$\Delta SC'$ *10^9 HT	FD' *10^9 HT	ΔS *10^9 HT	ΔSC *10^8 HT	FD *10^9 HT
281	5.886	0.4309	1.016	4.225	0.429	4.266
127	5.261	0.3806	0.904	3.593	0.302	3.620
581	6.039	0.2957	0.897	4.125	0.546	4.177
444	5.445	0.3225	0.865	3.679	0.251	3.702
51	4.354	0.4291	0.861	1.986	0.601	2.043
276	5.041	0.3460	0.847	2.765	0.336	2.796
618	5.103	0.3375	0.845	5.859	0.282	5.886
802	6.077	0.2250	0.830	2.128	0.613	2.187
749	5.208	0.2935	0.812	3.093	0.228	3.114
180	3.793	0.4366	0.812	2.684	0.220	2.702
103	5.776	0.2126	0.788	1.933	0.485	1.980
909	1.073	0.6578	0.763	2.036	0.431	2.077
278	3.973	0.3591	0.753	1.612	0.190	1.628
938	1.439	0.6115	0.753	1.128	0.570	1.183
947	1.514	0.6019	0.751	0.175	0.349	0.208
908	1.070	0.6379	0.744	1.819	0.440	1.862
820	4.548	0.2888	0.740	2.470	0.285	2.495
861	0.672	0.6747	0.740	2.478	0.122	2.488
600	2.876	0.4538	0.739	1.969	0.311	1.998
159	4.731	0.2550	0.726	2.626	0.303	2.655
580	6.992	0.0279	0.725	4.357	0.494	4.404
943	1.486	0.5764	0.722	0.569	0.177	0.584
914	1.154	0.6061	0.719	1.235	0.248	1.258
893	0.916	0.6202	0.709	0.891	0.290	0.918
937	1.402	0.5703	0.708	1.454	0.292	1.481
907	1.067	0.6040	0.708	1.596	0.25	1.619
924	1.232	0.5781	0.699	2.565	0.429	2.605
887	0.879	0.6123	0.699	0.488	0.302	0.517
951	1.584	0.5398	0.696	1.916	0.546	1.969
903	1.032	0.5922	0.693	0.578	0.251	0.601
104	5.453	0.1504	0.692	3.500	0.601	3.557
940	1.476	0.5437	0.689	1.476	0.336	1.507
865	0.698	0.6190	0.686	0.974	0.282	1.001
873	0.777	0.6106	0.686	1.559	0.613	1.619
932	1.324	0.5540	0.684	3.135	0.342	3.168
77	5.699	0.1123	0.680	4.638	0.228	4.659
915	1.162	0.5650	0.679	2.801	0.220	2.821
935	1.384	0.5392	0.676	2.454	0.147	2.467
552	1.505	0.5244	0.672	2.949	0.485	2.995
911	1.076	0.5644	0.670	1.330	0.431	1.372
925	1.238	0.5477	0.669	1.301	0.550	1.354
900	1.017	0.5693	0.668	1.374	0.190	1.391

81	5.689	0.0997	0.667	3.544	0.570	3.600
844	0.536	0.6125	0.664	0.793	0.349	0.826
933	1.360	0.5284	0.663	1.903	0.440	1.946

جدول (8) نتایج محاسبه تابع هدف خام و دقیق و المان های آن برای 45 عضو مجموعه انتخاب شده را نشان می دهد. ستون اول این جدول شماره گزینه توسعه، ستون دوم میزان خام تابع هدف برای رفاه عمومی، ستون سوم میزان تابع هدف خام برای بهبود هزینه برقراری امنیت، و ستون چهارم تابع هدف خام محاسبه شده بر اساس رابطه (9) را نشان می دهد. ستون پنجم و ششم نتایج تابع هدف دقیق برای رفاه عمومی و بهبود هزینه برقراری امنیت و ستون هفتم تابع هدف دقیق را نشان می دهد.

بهترین گزینه های توسعه در جدول (8) با پیش زمینه تاریک نمایش داده شده اند. نتیجه تابع هدف دقیق برای این گزینه ها نسبت به دیگر گزینه ها بالاتر است. کاندیداهای توسعه برای بهترین نتایج در جدول (9) نمایش داده شده اند. ستون اول رتبه گزینه انتخاب شده، ستون دوم شماره کاندیدای توسعه، ستون سوم برنامه های توسعه و ستون چهارم هزینه مجموع ساخت هر برنامه را نشان می دهد.

جدول(9): نتایج نهایی برنامه ریزی توسعه برای شبکه 24 باسه IEEE

Rank	Planning Scheme	Planning	Construction Cost $* 10^{\wedge 9}$ T
1	618	2-6, 9-11, 14-16, 3-24	2.04
2	77	14-16, 10-12, 3-24, 6-10	1.7
3	580	16-17, 9-12, 14-16, 1-8	1.75
4	281	16-23, 14-16, 1-3, 8-9	2.66
5	581	16-17, 14-16, 13-23, 16-17	2.46

بهترین گزینه توسعه در جدول (9) برنامه توسعه شماره 618 می باشد که نشان دهنده احداث خط بین باسهای 6-2، 11-9، 16-14 و 24-3 است. با بررسی نتایج خروجی جدول (8) نکات زیر استخراج می شود:

1. تفاوت خروجی تابع هدف دقیق با تابع هدف خام ناشی از تفاوت در نحوه محاسبه رفاه عمومی و بهبود هزینه برقراری امنیت است. در تابع هدف دقیق، محاسبه این فاکتور ها با دقت بیشتری انجام شده است.

2. انحراف از معیار نرمالیزه شده تابع نهایی دقیق برابر با 0,21 می باشد که 2 برابر آن به عنوان پهنای باند خطا لحاظ شده است. این پهنای باند از مقدار لحاظ شده در جدول (1) کمتر است، لذا انتخاب مجموعه انتخاب شده بر اساس آن جدول صحیح می باشد.

3. برنامه ریزی توسعه شبکه انتقال با لحاظ کردن این تابع هدف جدید است و امکان بررسی صحت نتایج بدست آمده به صورت دقیق نیست. ولی با توجه به نتایج توسعه خروجی در مقاله [3]، که تست های خود را بر روی همین شبکه انجام داده است، بین بهترین گزینه های توسعه جدول (9) و نتایج این مقاله بیش از 60% اشتراک وجود دارد. باید توجه کرد تابع هدف و مفروضات شبیه سازی متفاوت هستند.

الگوریتم بهینه سازی ترتیبی با ارائه یک دستور العمل یک روش منحصر به فرد جهت حل مسائل بهینه سازی با مجموعه فضای جواب گسترده ارائه می کند. با استفاده از این الگوریتم لزوما به بهترین گزینه فضای جواب نخواهیم رسید، ولی با احتمال نزدیک به 100% یکی از بهترین گزینه های موجود در فضای جواب را خواهیم یافت. باید توجه کرد که این الگوریتم، برنامه ریزی توسعه شبکه انتقال را در شرایطی که محاسبه تابع هدف تقریباً غیر ممکن است، ممکن می سازد.

6- نتیجه گیری

یک استراتژی جدید برای طراحی توسعه خطوط انتقال در این مقاله مورد بحث وبررسی قرار گرفت که در این متد علاوه بر فاکتورهای دیگر موثر در طراحی توسعه تحت شرایط بازار برق، کمینه هزینه برقراری امنیت نیز لحاظ شده است. این هزینه بر اساس کمینه کردن هزینه قطع بار ناشی از وقوع شرایط بحرانی محاسبه می شود.

این هزینه برای طرح های مختلف توسعه متفاوت است، در نتیجه با لحاظ کردن آن در هنگام طراحی امکان هدایت طراحی به سمت یک شبکه پایدارتر و اقتصادی تر فراهم می شود.

برنامه ریزی توسعه شبکه انتقال برای شبکه های گسترده، با استفاده از روش ذکر شده نیازمند استفاده از الگوریتم ترتیبی است. با استفاده از این الگوریتم با احتمال نزدیک به 100% به یکی از بهترین جواب های موجود در فضای جواب دست پیدا خواهیم کرد. نتایج شبیه سازی روش ارائه شده برای دو سیستم تست گارور و 24 باسه IEEE ارائه شده است.

مراجع

[1] Z. Xu, Z. Y. Dong., K.P. Wong, 'Transmission Planning in a Deregulated Environment', IEE Proceeding Gener. Transmission & Distribution, Vol.153, No.3, May 2006, 326-34.

[2] L. L. Garver, 'Transmission Network Estimation Using Linear Programming', IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-89, No. 7, September/October, 1688-97.

[3] R. Fang, D. J. Hill, 'A New Strategy for Transmission Expansion in Competitive Electricity Markets', IEEE Transaction on Power Systems, Vol.18, No.1, February 2003, 374-80.

[4] P. Ruiz, J. Contreras, 'An Effective Transmission Network Expansion Cost Allocation Based on Game Theory', IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 22, No.1, February 2007,136-44.

[5] G. B. Shrestha, P. A. Fonseka, 'Congestion-Driven Transmission Expansion in Competitive Power Markets', IEEE Transaction on Power Systems, Vol.19, No.3, August 2004, 1658-65.

[6] M. O. Buygi, G. Bazler, H. M. Shanechi, M. Shahidehpour, "Market Based Transmission Expansion Planning", IEEE Transaction on Power Systems, Vol.19,No.4, November 2004, 2060-67.

[7] M. O. Buygi, H. M. Shanechi, G. Balzer, M. Shahidehpour, 'Network Planning in Unbundled Power Systems', IEEE Transaction on Power Systems, Vol.21,No.3, August 2006, 1379-87.

[8] J. Silva, M.J. Rider, R. Romero, A.V. Garcia, C.A. Murari, 'Transmission Network Expansion Planning with Security

Constraints', IEE Proceeding Gener. Transmission & Distribution, Vol.152, No.6, November 2005, 828-36.
[9] O. Moya, 'Model for Security of Service Costing in Electric Transmission Systems', IEE Proc-Gener. Transm. Distrih., Vol. 144, No. 6, November 1997, 521-24.
[10] E.G. Neudorf et al., 'Cost Benefit Analysis of Power System Reliability: Two Utility Case Studies', IEEE Transaction Power System, Vol.10, No.3, Aug. 1995, 1667-1675.
[11] O. Moya, 'Marginal Cost of Transmission System Adequacy for Spot Pricing', Electric Power Systems Research 61,(2002),89–92.
[12] L. Chen, H. Suzuki, T. Wachi, Y. Shimuram, 'Components of Nodal Prices for Electric Power Systems', IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 17, No.1, February 2002,41-49.
[13] A. Silvestre, D. Barga, J. T. Saraiva, 'A Multiyear Dynamic Approach for Transmission Expansion Planning and Long-Term Marginal Costs Computation', IEEE Transaction on Power System, Vol.20,No.3, August 2005,1631-39.
[14] F. Xiao, J. D. McCalley, Y. Ou, J. Adams, S. Myers, 'Contingency Probability Estimation using Weather and Geographical Data for On-line Security Assessment', 2006, 9th international conf. on probabilistic methods applied to Power System, KTH, Sweden-June 11-15.
[15] R. K. Subramaniam, R. Billinton, G. Wacker, 'Understanding Industrial Losses Resulting from Electric Service Interruption', IEEE Transaction on Industry Application, Vol.29, No.1, January 1993, 238-44.
[16] R. K. Subramaniam, R. Billinton, G. Wacker, 'Understanding Commercial Losses Resulting from Electric Service Interruption', IEEE Transaction on Industry Application, Vol.29, No.1, January 1993, 233-37.
[17] Ho, R. S. Sreenivas, and P. Vakili, "Ordinal optimization in DEDS," *J. Discrete Event Dynamic Syst.*, vol. 3, pp. 61-68, 1992.
[18] L. H. Lee, T. W. Lau, and Y. C. Ho, "Explanation of Goal Softening in Ordinal Optimization," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 44, no. 1, pp. 94-99, Jan. 1999.
[19] A. Y. Lin, Y. C. Ho, and C. H. Lin, "An Ordinal Optimization Theory-Based Algorithm for Solving the Optimal Power Flow Problem with Discrete Control Variables," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 19, no. 1, pp. 276-86, Feb. 2004.
[20] "Reliability Test System Task Force, IEEE reliability test system', IEEE Transaction on Power Apparatus and System, 1979, pp. 2047-54.

زیرنویس‌ها

[1] Locational Marginal Pricing
[2] Grid Owner
[3] Garver 6-us Test System
[4] Independent System Operator
[5] Good enough solutions
[6] Grid Owner
[7] Market Power
[8] Merchandising Surplus
[9] Construction Cost
[10] Investment Cost
[11] Revenue
[12] Optimum Weighted Load Shedding
[13] Outage Duration
[14] Outage Rate
[15] Interruption Cost
[16] هزار تومان (HT)
[17] Security enhancement Cost
[18] Adjustment coefficient
[19] Final Development
[20] Ordinal Optimization
[21] Ordinal Performance Curve
[22] Selected Subset
[23] مجموعه بهترین جوابها
[24] تعداد تلاقی مجموعه انتخاب شده (SS) با مجموعه بهترین جوابها (k)
[25] احتمال تلاقی با مجموعه بهترین های فضای جواب (p)
[26] Error band
[27] هر دلار آمریکا معادل ۱۰۰۰تومان معادل شده است.