

## کنترل زمان حقیقی ولتاژ و توان راکتیو در شبکه‌های توزیع متصل به تولیدپراکنده با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری و تئوری فازی

عادل ابراهیمی<sup>۱\*</sup>، کارشناسی ارشد، محمد احمدیان<sup>۲</sup>، استادیار، مجتبی شیوایی<sup>۳</sup>، کارشناسی ارشد، مهدی قبادی<sup>۴</sup>، کارشناسی ارشد

<sup>۱\*</sup> دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور)- تهران- ایران

adel.ebrahimi@yahoo.com

<sup>۲</sup> دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور)- تهران- ایران

ahmadian@pwut.ac.ir

<sup>۳</sup> دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور)- تهران- ایران

mshivaie@stud.pwut.ac.ir

<sup>۴</sup> دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور)- تهران- ایران

mghobadi@yahoo.com

دریافت مقاله: ۹۰/۱/۲۶

پذیرش مقاله: ۹۰/۷/۸

**چکیده:** با توسعه زیرساخت‌های مخابراتی، تبادل سریع داده‌ها بین اجزای شبکه با یکدیگر و با یک مرکز کنترل در شبکه‌های توزیع امکان‌پذیر شده است. همچنین کمینه‌سازی تلفات انرژی و انحراف ولتاژ باس‌ها، از مهم‌ترین اهداف بهره‌برداری در شبکه‌های توزیع به شمار می‌روند. بنابراین، ایده کنترل زمان حقیقی تجهیزات شبکه توزیع برای بهره‌برداری بهینه از آن‌ها تعمیم یافته است. از طرفی، توسعه روزافزون کاربرد منابع تولید پراکنده مانند پیل‌های سوختی که با اینورتر به شبکه متصل می‌شوند و در اختیار بودن ادوات کنترل ولتاژ و توان راکتیو مانند رگولاتورهای ولتاژ پله‌ای، جبران‌کننده‌های استاتیک، خازن‌های شنت و نیز ترانسفورماتورهای کنترل نسبت بار با قابلیت کنترل شونددگی از مرکز، زمینه را برای استقرار این ایده فراهم کرده است. لذا در این مقاله با رویکردی جدید، کنترل زمان حقیقی ولتاژ و توان راکتیو در شبکه‌های توزیع با هماهنگی تجهیزات مذکور، برای دستیابی به پروفیل مناسب ولتاژ، کمینه‌سازی تلفات و هزینه، مورد ارزیابی قرار گرفته است. همچنین برای حل مسئله از الگوریتم جدیدی با سرعت همگرایی بالا تحت عنوان «الگوریتم رقابت استعماری» استفاده شده است. در نهایت، الگوریتم پیشنهادی بر روی یک شبکه توزیع واقعی اعمال شده و نتایج آن ارائه گردیده است.

**واژه‌های کلیدی:** الگوریتم رقابت استعماری، شبکه توزیع، کاهش تلفات، کنترل زمان حقیقی ولتاژ، منابع تولید پراکنده.

## ۱. مقدمه

هماهنگی منابع تولید پراکنده با استفاده از الگوریتم ژنتیک در [۲] بیان شده است که در آن، خروجی راکتیو منابع پراکنده و همچنین بار سیستم مطابق با منحنی از پیش تعیین شده‌ای فرض شده است. کنترل زمان حقیقی شبکه توزیع با استفاده از منطق فازی در [۱۱] پیاده‌سازی شده است. همچنین در [۱۲-۱۴] روش‌های کنترل زمان حقیقی خازن‌های توزیع شرح داده شده است. لذا در این مقاله با رویکردی جدید، کنترل زمان حقیقی ولتاژ و توان راکتیو در شبکه‌های توزیع، با در نظر گرفتن منابع تولید پراکنده مبتنی بر اینورتر (پیل سوختی) و تمامی ادوات کنترل ولتاژ نظیر رگولاتور ولتاژ پله‌ای، ترانسفورماتور کنترل نسبت بار، جبران کننده‌های استاتیک و خازن‌های شنت مورد ارزیابی قرار گرفته است. همچنین برای تعیین وضعیت سیستم، هر بار تخمین حالت اجرا شده و سپس در صورت نیاز، عملیات بهینه‌سازی با الگوریتم رقابت استعماری<sup>۱</sup>، با هدف حداقل کردن انحراف ولتاژ شین‌ها از مقدار مرجع، تلفات و هزینه تولید توان راکتیو انجام می‌گیرد. در این فرآیند، خروجی راکتیو منابع پراکنده، جبران‌کننده‌های استاتیک و وضعیت ادوات کنترل ولتاژ به‌طور هم‌زمان تعیین می‌گردد. الگوریتم بهینه‌سازی مورد استفاده، دارای سرعت همگرایی بالا و مناسب برای مطالعات زمان حقیقی است. مطالعات بر روی قسمتی از شبکه واقعی توزیع شهر تهران انجام گرفته و صحت نتایج با مقایسه پروفیل ولتاژ شین‌ها در حالت‌های مختلف بررسی و اثبات شده است.

## ۲. الگوریتم کنترل زمان حقیقی ولتاژ و توان راکتیو

روش پیشنهادی برای کنترل زمان حقیقی ولتاژ بر مبنای مشارکت هم‌زمان منابع پراکنده و ادوات کنترل ولتاژ و با فرض وجود یک سیستم مخابراتی با قابلیت اطمینان بالا در شبکه قابل اجرا می‌باشد. شکل (۱)، فلوچارت کنترل زمان حقیقی ولتاژ شبکه توزیع را نشان می‌دهد. پس از دریافت اطلاعات توسط وسایل اندازه‌گیری نصب شده در شبکه، عملیات تخمین حالت در مرکز کنترل صورت می‌پذیرد تا وضعیت سیستم برای بهره‌بردار روشن گردد. در صورت وجود انحراف در ولتاژ باس‌ها و یا تغییرات عمده بار، برنامه بهینه‌سازی اجرا می‌گردد و خروجی راکتیو منابع پراکنده، جبران‌کننده‌های استاتیک، وضعیت تپ خازن‌های شنت، رگولاتورهای ولتاژ و تپ ترانسفورماتور اصلی تعیین می‌گردد. پس از احراز صحت نتایج با استفاده از برنامه پخش بار، نتایج به اجزای سیستم اعمال می‌شود. همچنین تخمین حالت یکی از عملیات کلیدی در مرکز کنترل شبکه توزیع است. تخمین به

امروزه استفاده از منابع تولید پراکنده به دلیل کاهش منابع سوخت فسیلی و مشکلات گرمایی رو به افزایش است. توان خروجی منابع تولید پراکنده به‌ویژه منابع انرژی تجدیدپذیر، تحت تأثیر شرایط جوی دچار نوسان می‌گردد. بنابراین، اگر از روش‌های کنترل معمولی استفاده گردد، تغییرات ولتاژ در هر باس دچار مشکل و در نهایت موجب صدمه به تجهیزات و وسایل مشترکین خواهد شد. بدین ترتیب، مسئله کنترل ولتاژ شین‌ها امری مهم در شبکه‌های توزیع مبتنی بر تولید پراکنده است و این امر تنها با کنترل مرکزی شبکه توزیع امکان‌پذیر می‌باشد [۱]. کنترل ولتاژ و توان راکتیو فیدرهای توزیع، بطور معمول با استفاده از تنظیم تپ ترانسفورماتور پست اصلی (ترانسفورماتور کنترل نسبت بار<sup>۱</sup>)، رگولاتور ولتاژ پله‌ای<sup>۲</sup> و خازن‌های شنت<sup>۳</sup> منصوب در طول فیدر صورت می‌گیرد. نحوه مدل‌سازی این عناصر از [۲] گرفته شده است. در شبکه‌های توزیع با تولید پراکنده، ضرورت مشارکت این منابع در کنترل ولتاژ امری قطعی است. برخی منابع تولید پراکنده نظیر پیل سوختی توسط اینورتر به شبکه متصل می‌گردند. این منابع، قادر به تولید و جذب توان راکتیو با سرعت تغییرات بالا هستند و این امر امکان مشارکت مؤثر این منابع را در کنترل ولتاژ و توان راکتیو فراهم می‌آورد [۳]. در سال‌های اخیر، مطالعات متنوعی در زمینه کنترل ولتاژ در شبکه‌های توزیع انجام شده است. در [۴] کنترل مرکزی ولتاژ و توان راکتیو برای شبکه‌های توزیع، مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین هماهنگی بین کنترل‌کننده‌های محلی و مرکزی در شبکه‌های توزیع، برای کنترل ولتاژ در [۵] مورد مطالعه قرار گرفته است. سایر روش‌های پیشنهادی، شامل کنترل هماهنگ ترانسفورماتور کنترل نسبت بار و رگولاتور ولتاژ پله‌ای و خازن‌های شنت در [۶-۸] ارزیابی شده است. جبران‌کننده‌های استاتیک<sup>۴</sup> نیز، قادر به تولید یا جذب توان راکتیو با سرعت تغییرات بالا هستند که در این مقاله، به‌صورت منابع توان راکتیو مدل شده‌اند. کنترل ولتاژ با استفاده از ترانسفورماتور زیر بار در حضور منابع تولید پراکنده در [۹] اجرا شده است. در [۱۰] کنترل توان راکتیو و ولتاژ در فیدر حلقه بسته با ژنراتور سنکرون به عنوان منبع تولید پراکنده تشریح شده است. کنترل ولتاژ با

1. Load Ratio Control Transformer (LRT)
2. Step Voltage Regulator (SVR)
3. Shunt Capacitors (SC)
4. StaticVarCompensator (SVC)

### ۱.۲. تابع هدف مسئله

هدف این مقاله، کمینه‌سازی انحراف ولتاژ شین‌ها، تلفات شبکه و هزینه به همراه تعیین وضعیت ادوات کنترل ولتاژ و منابع پراکنده می‌باشد. بنابراین، تابع هدف به صورت معادله (۱) تعریف شده‌است.

$$\text{Min} : K_1 \cdot \sum_{i=1}^n |V_i^{ref} - V_i| + K_2 \cdot \text{Loss} + K_3 \cdot \text{Cost} \quad (1)$$

ضرایب وزنی  $K_1$ ،  $K_2$  و  $K_3$  به ترتیب برابر با  $0/6$ ،  $0/1$  و  $0/3$  در نظر گرفته شده است. این ضرایب با توجه به دیدگاه بهره‌بردار و شرایط موجود شبکه انتخاب می‌گردد. لذا با توجه به اهمیت داشتن پروفیل ولتاژ نسبت به دیگر معیارها، ضرایب وزنی به صورت فوق در نظر گرفته شده است. قیود مسئله نیز، مطابق با رابطه‌های (۲) و (۳) می‌باشند.

$$V_i^{Min} < V_i < V_i^{Max} \quad (2)$$

$$t_{min} < t < t_{max} \quad (3)$$

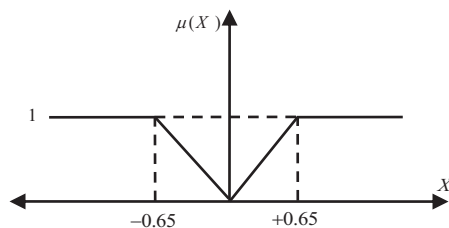
$$Q_{sh}^{Min} < Q_{sh} < Q_{sh}^{Max} \quad (4)$$

$$Q_g^{Min} < Q_g < Q_g^{Max} \quad (5)$$

$$DS_{Max} < 5 \quad (6)$$

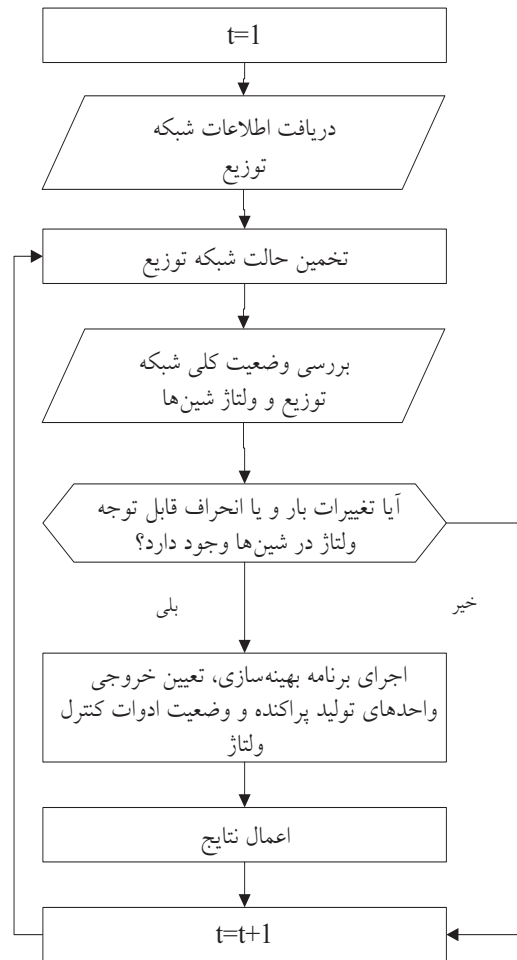
رابطه (۲) بیانگر قرارگیری ولتاژ باس‌ها در محدوده مجاز و رابطه (۳) نشان‌دهنده قرارگیری تپ‌ها در محدوده تعیین شده است. رابطه (۴) نیز، بیانگر محدودیت تزریق یا جذب توان راکتیو توسط جبران‌گراست. همچنین محدودیت منابع تولید پراکنده در جذب یا تزریق توان راکتیو در رابطه (۵) بیان گردیده است. از طرفی، با توجه به اینکه در پست‌های ۶۳ کیلوولت، کلیدزنی در زیر بار انجام می‌گیرد، لذا تعداد دفعات کلیدزنی باعث فرسایش تجهیزات گران‌قیمت پست خواهد شد. به همین سبب، محدودیت تغییرات تپ نیز، به صورت رابطه (۶) در نظر گرفته شده است. همچنین برای ارزیابی شایستگی هر یک از معیارها، از توابع متغیر فازی استفاده گردیده است. ویژگی اصلی این توابع، این است که هر عدد در مجموعه اعداد حقیقی را با عددی در بازه  $[0,1]$  می‌نگارد. از این رو برای بهینه‌سازی مسئله، توابع متغیر فازی برای هر یک از معیارها به صورت ذیل تعریف شده است.

**الف) انحراف ولتاژ:** تابع فازی مورد استفاده برای انحراف ولتاژ شین‌ها در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل (۲): تابع عضویت متناظر با انحراف ولتاژ

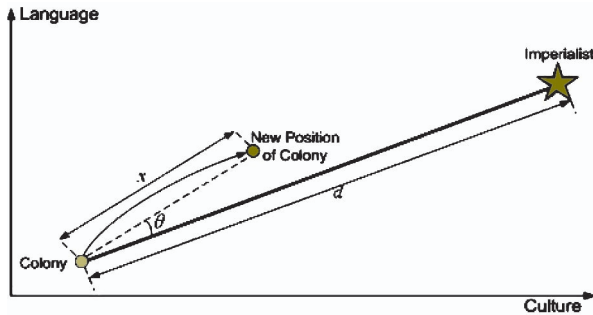
هنگام بارها و خروجی منابع پراکنده، یک امر ضروری در شبکه‌های توزیع تجدید ساختار یافته است. در این مقاله، فرض بر آن است که تخمین حالت سیستم توزیع، با استفاده از روش پیشنهادی [۱۵] در مرکز کنترل در بازه‌های زمانی یک ساعته انجام گرفته است. مقادیر تخمینی بار به صورت درصدی از بار پیک در جدول (۱) نشان داده شده است.



شکل (۱): فلوچارت الگوریتم پیشنهادی کنترل زمان حقیقی

جدول (۱): مقادیر تخمین بار

ساعت	پله	ساعت	پله
۱	%۶۷	۱۳	%۹۵
۲	%۶۳	۱۴	%۹۵
۳	%۶۰	۱۵	%۹۳
۴	%۵۹	۱۶	%۹۴
۵	%۵۹	۱۷	%۹۹
۶	%۶۰	۱۸	%۱۰۰
۷	%۷۴	۱۹	%۱۰۰
۸	%۸۶	۲۰	%۹۶
۹	%۹۵	۲۱	%۹۱
۱۰	%۹۶	۲۲	%۸۶
۱۱	%۹۶	۲۳	%۷۴
۱۲	%۹۵	۲۴	%۶۳



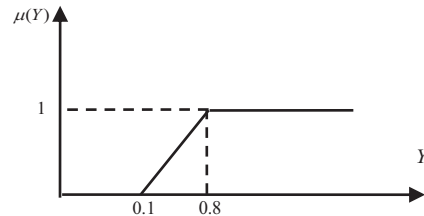
شکل (۵): حرکت مستعمرات به سمت امپریالیست

در این شکل، فاصله میان استعمارگر و مستعمره با  $d$  نشان داده شده است.  $x$  و  $\theta$  نیز اعدادی تصادفی با توزیع یکنواخت به صورت رابطه (۷) می‌باشند.

$$x \approx U(0, \beta \times d), \theta \approx U(-\gamma, \gamma) \quad (7)$$

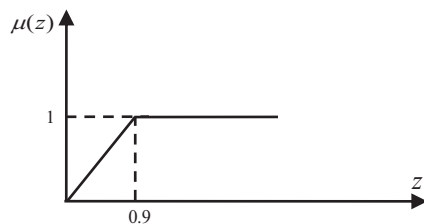
وجود ضریب  $\beta > 1$  باعث می‌شود تا کشور مستعمره در حین حرکت به سمت کشور استعمارگر، از جهت‌های مختلف به آن نزدیک شود. در این رابطه،  $\gamma$  پارامتری دلخواه است که افزایش آن باعث افزایش جستجوی اطراف امپریالیست می‌شود و کاهش آن نیز سبب می‌گردد تا مستعمرات تا حد ممکن، نزدیک به بردار اصل مستعمره به استعمارگر حرکت کنند. در اکثر پیاده‌سازی‌ها، انتخاب  $\gamma$  و  $\beta$  به ترتیب  $2\pi/4$  و انتخاب مناسبی بوده است. قدرت کل هر امپراتوری، به هر دو بخش تشکیل‌دهنده آن یعنی کشور امپریالیست (به عنوان هسته مرکزی) و مستعمرات آن، بستگی دارد. در حالت ریاضی، این وابستگی با تعریف قدرت امپراتوری به صورت مجموع قدرت کشور امپریالیست، به اضافه درصدی از میانگین قدرت مستعمرات آن، مدل شده است. با شکل‌گیری امپراتوری‌های اولیه، رقابت امپریالیستی میان آن‌ها شروع می‌شود. هر امپراتوری که نتواند در رقابت استعماری، موفق عمل کند و بر قدرت خود بیفزاید (و یا حداقل از کاهش نفوذش جلوگیری کند)، از صحنه رقابت استعماری، حذف خواهد شد. بنابراین، بقای یک امپراتوری، وابسته به قدرت آن در جذب مستعمرات امپراتوری‌های رقیب، و به سطره در آوردن آن‌ها خواهد بود. در نتیجه، در جریان رقابت‌های امپریالیستی، به تدریج بر قدرت امپراتوری‌های بزرگ‌تر افزوده و امپراتوری‌های ضعیف‌تر، حذف خواهند شد. امپراتوری‌ها برای افزایش قدرت خود، مجبور خواهند شد تا مستعمرات خود را نیز پیشرفت دهند. با گذشت زمان، مستعمرات، از لحاظ قدرت به امپراتوری‌ها نزدیک‌تر خواهند شد و شاهد یک نوع همگرایی خواهیم بود. حد نهایی رقابت استعماری، زمانی است که یک امپراتوری واحد با مستعمراتی که از لحاظ موقعیت، به خود کشور امپریالیست خیلی نزدیک هستند، در دنیا داشته باشیم. شکل (۶) فلوجارت الگوریتم پیشنهادی را نشان می‌دهد [۱۶].

**ب) تلفات:** برای کمینه‌سازی تلفات، مقدار تلفات که از پخش بار به دست آمده، به توان کل تولیدی تقسیم شده و سپس ضریب به دست آمده حداقل گردیده است. تلفات تا ده درصد قابل قبول می‌باشد و از ده درصد بالاتر با شبیهی مطابق با شکل (۳)، افزایش می‌یابد که سبب افزایش تابع هدف می‌شود.



شکل (۳): تابع عضویت متناظر با تلفات

**پ) هزینه:** پس از هر پخش بار هزینه توان راکتیو تولید شده محاسبه می‌شود و طبق شکل (۴) مقدار تابع فازی آن تعیین می‌گردد، به طوری که شایستگی بیشتر مستلزم هزینه توان راکتیو کمتر می‌باشد.



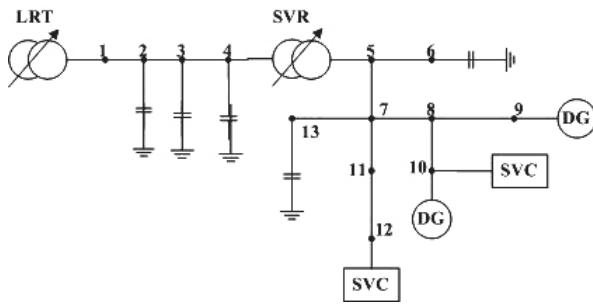
شکل (۴): تابع عضویت متناظر با هزینه

### ۳. الگوریتم بهینه‌سازی رقابت استعماری

الگوریتم رقابت استعماری یک الگوریتم بهینه‌سازی جدید الهام گرفته از تکامل اجتماعی انسان است. این الگوریتم با تعدادی جمعیت اولیه تصادفی که هر کدام از آن‌ها یک «کشور» نامیده می‌شوند، شروع می‌گردد. کشورها به دو دسته مستعمره<sup>۱</sup> و استعمارگر<sup>۲</sup> (امپریالیست) تقسیم می‌شوند. در این الگوریتم، سیاست جذب و رقابت استعماری، هسته اصلی این الگوریتم را تشکیل می‌دهند. تعدادی از بهترین عناصر جمعیت (معادل نخه‌ها در الگوریتم ژنتیک) به عنوان امپریالیست انتخاب شده و باقی‌مانده جمعیت نیز به عنوان مستعمره، در نظر گرفته می‌شوند. استعمارگرها بسته به قدرتشان که با تابع هزینه نسبت عکس دارند، این مستعمرات را با یک روند خاص به سمت خود جلب می‌کنند. شکل (۵) حرکت مستعمرات را به سمت امپریالیست نشان می‌دهد. مطابق این شکل، کشور امپریالیست، کشور مستعمره را در راستای محورهای فرهنگ و زبان به سمت خود جذب می‌کند.

1. Colony
2. Imperialist

## ۴. شبیه‌سازی و مطالعه موردی



شکل (۷): سیستم مورد مطالعه

در این شبکه، خازن‌ها به صورت پله‌های 50KVAR مدل شده‌اند. منابع تولید پراکنده و جبران‌کننده‌های استاتیک می‌توانند مقادیر پیوسته اختیار کنند. منابع تولید پراکنده از نوع پیل سوختی است و در شین ۹ با ظرفیت 2MW و در شین ۱۰ با ظرفیت 1.8MW قرار دارند. رگولاتور نیز دارای تپ  $\pm 0.005P.U$  است و بین شین‌های ۴ و ۵ قرار گرفته است. ترانسفورماتور پست با امپدانس  $0.0027+j0.00328 P.U$  به شین ۱ متصل است. همچنین مقادیر قیود (۲) تا (۶) در جدول (۲) آورده شده است. پارامترهای الگوریتم رقابت استعماری نیز، طبق جدول (۳) در نظر گرفته شده است.

جدول (۲): قیود مربوط به رابطه‌های (۴) تا (۷)

$V_i^{Min}$	$V_i^{Max}$	$t_{min}$	$t_{max}$	$Q_{SVC}^{Min}$
۰/۹۵	۱/۰۵	۰/۹	۱/۱	-۱۰۰
$Q_{SVC}^{Max}$	$Q_g^{Min}$	$Q_g^{Max}$	$Q_C^{min}$	$Q_C^{max}$
۴۰۰	-۱۰۰	۷۰۰	۰	۵۰۰

جدول (۳): پارامترهای الگوریتم رقابت استعماری [۱۶]

مقدار	پارامتر
۲۰۰	تعداد کشورها
۲۰	تعداد امپریالیست‌ها
۱۸۰	تعداد مستعمره
۲۰۰	تعداد تکرار
۰/۲	درصد انقلاب مستعمرات

## ۲.۴. نتایج شبیه‌سازی

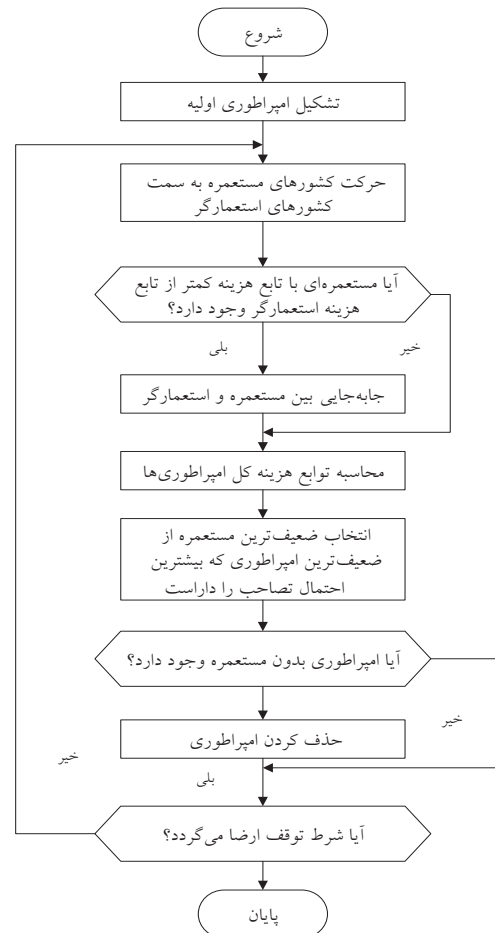
به منظور پیاده‌سازی عملیات کنترل ولتاژ زمان واقعی، یک بازه زمانی ۲۴ ساعته در نظر گرفته شده است. جدول (۱) نتایج تخمین بار را نشان داده است. فرض بر این است که سرعت تغییرات بار به گونه‌ای است که می‌توان تغییرات ساعتی برای آن منظور کرد. همچنین زمان اجرای برنامه ۴/۵۳۶ ثانیه به ازای هر پله است. برای مشاهده کارایی

پیاده‌سازی الگوریتم پیشنهادی، با استفاده از نرم‌افزار MATLAB7.6 انجام و بر روی شبکه توزیع واقعی شهر تهران پیاده‌سازی شده است. در این مقاله، برای اجرای عملیات به صورت زمان واقعی، مقادیر بار تخمین زده شده در بازه‌های زمانی یک ساعته در فایل اکسل ذخیره می‌گردد و در هر زمان اطلاعات مربوط به همان زمان فراخوانی می‌شود.

## ۴.۱. سیستم مورد مطالعه

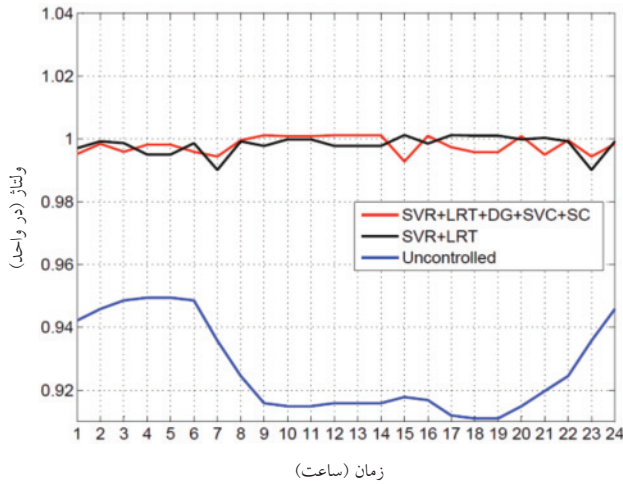
برای مشاهده بهتر نتایج، از یک سیستم توزیع واقعی استفاده شده است که بخشی از شبکه توزیع شهر تهران به نام «فیدر خدابنده» منشعب از یک پست 63.20KV و با توان ترانس 30MVA با ۱۳ باس 20KV است.

میزان کل بار اکتیو و راکتیو فیدر به ترتیب، 10.53MW، 5.99MVAR است. مشخصات بارها و امپدانس خطوط در [۱۷] آمده است. دیاگرام تک‌خطی این شبکه همراه با منابع تولید پراکنده ادوات کنترل ولتاژ در شکل (۷) نشان داده شده است.

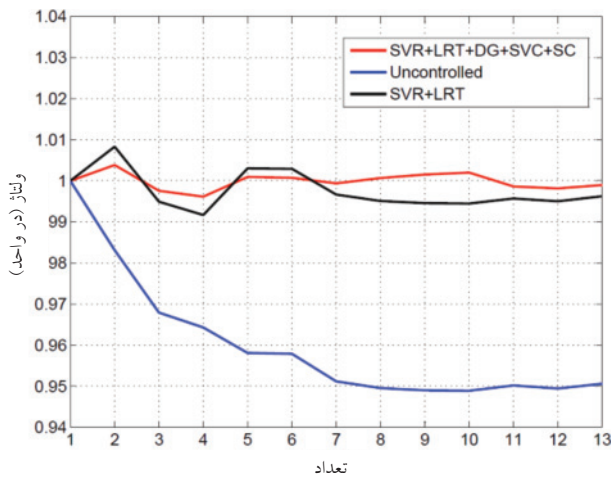


شکل (۶): فلوچارت الگوریتم رقابت استعماری

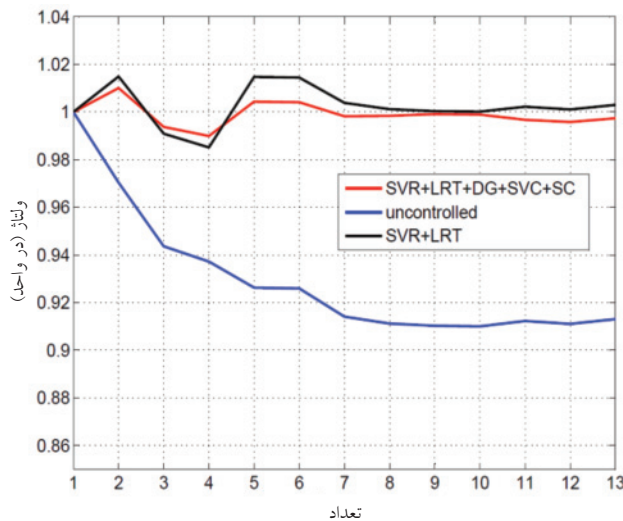




شکل (۱۰): تغییرات ولتاژ باس ۱۲ در طول زمان با اعمال روش‌های مختلف کنترل ولتاژ

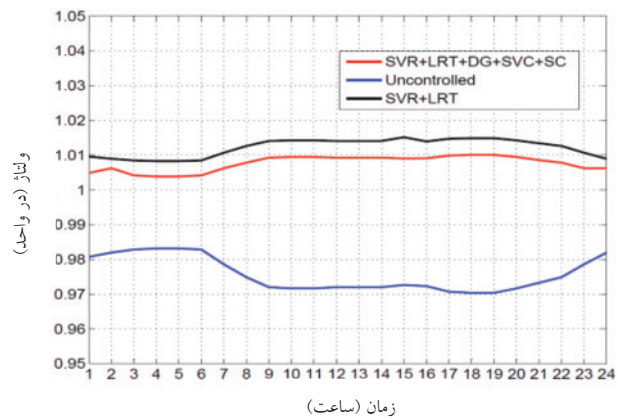


شکل (۱۱): پروفیل ولتاژ باس‌ها در بازه زمانی با کم‌ترین مقدار بار با اعمال روش‌های مختلف کنترل ولتاژ

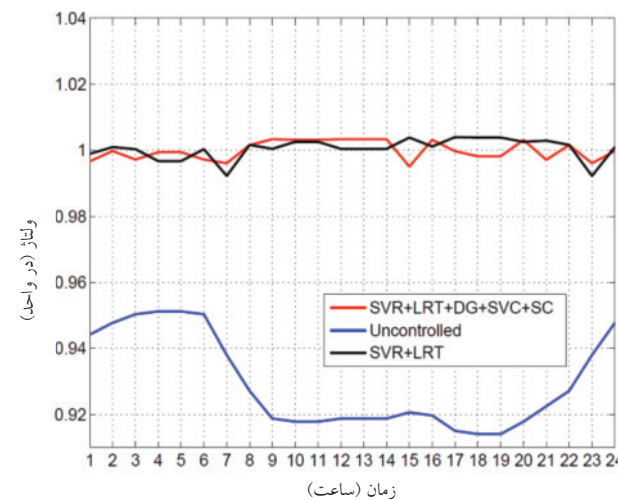


شکل (۱۲): پروفیل ولتاژ باس‌ها در بازه زمانی با پیک بار با اعمال روش‌های مختلف کنترل ولتاژ

الگوریتم کنترل ولتاژ اعمالی، سه سناریو در نظر گرفته شده است. در سناریوی اول، همه اجزا (DG+SVC+SC+LRT) تحت کنترل‌اند. در سناریوی دوم، SVR و LRT تحت کنترل مرکز است (LRT+SVR) و در سناریوی سوم، هیچ اعمال کنترلی صورت نگرفته است (Uncontrolled). البته فرض بر این است که در هر سه حالت، منابع پراکنده توان اکتیو نامی را به شبکه تزریق می‌کنند. شکل‌های (۸) تا (۱۰) تغییرات ولتاژ باس ۲ به عنوان یک باس از ابتدای فیدر، باس ۷ به عنوان پربارترین باس و باس ۱۲ از انتهای فیدر را نشان داده است. همچنین شکل‌های (۱۱)، (۱۲) و (۱۳) به ترتیب پروفیل ولتاژ باس‌ها را در بازه‌های زمانی با کم‌ترین مقدار، ۷۴٪ پیک بار و پیک بار نشان داده شده است. تلفات سیستم در طول زمان در سه سناریوی مختلف در شکل (۱۴) با هم مقایسه گردیده است. همچنین منحنی همگرایی الگوریتم‌های رقابت استعماری و ژنتیک برای بار پیک در شکل (۱۵) نشان داده شده است.



شکل (۸): تغییرات ولتاژ باس ۲ در طول زمان با اعمال روش‌های مختلف کنترل ولتاژ



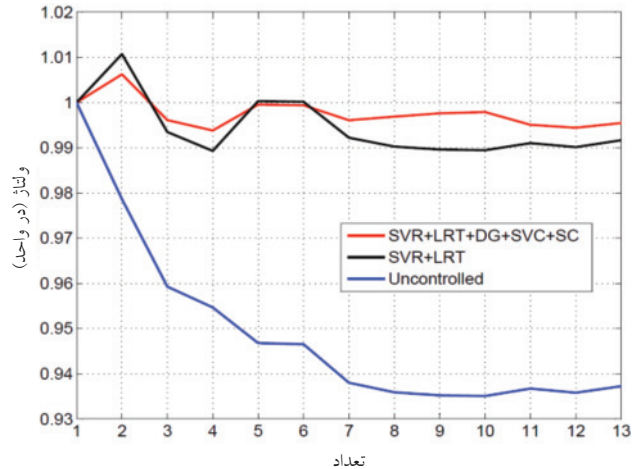
شکل (۹): تغییرات ولتاژ باس ۷ در طول زمان با اعمال روش‌های مختلف کنترل ولتاژ

### ۳.۴. بررسی نتایج شبیه‌سازی

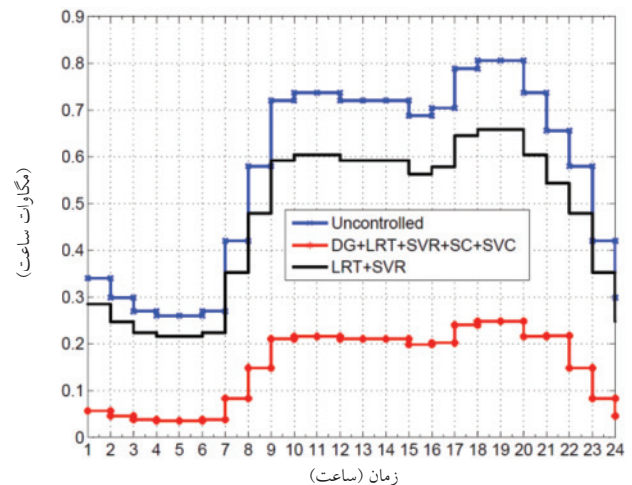
دقت در شکل‌ها و جداول بخش (۴-۲)، برتری روش کنترل زمان حقیقی پیشنهادی را نشان می‌دهد. تغییرات ولتاژ پربارترین باس (شکل ۹)، در حالت کنترل همه‌جانبه، یک پروفیل مسطح در طول زمان دارد و به مقدار مرجع بسیار نزدیک است. در سناریوی دوم، نتیجه قابل قبول است، اما میزان انحراف ولتاژ بیش از سناریوی اول است؛ البته این انحراف ولتاژ در باس‌های ابتدای فیدر قابل اغماض نیست (شکل ۸ را ببینید). حالت عدم اعمال کنترل، تفاوت بسیار زیادی با سایر سناریوها دارد که قابل پیش‌بینی بود و این مطلب، خود دلیلی بر صحت نتایج به دست آمده می‌باشد. پروفیل ولتاژ باس‌ها در سطوح مختلف بار، در باس‌های میانی و انتهایی فیدر، مسطح و به مقدار مرجع نزدیک است، اما در باس‌های ابتدایی، به دلیل عمل LRT انحراف ولتاژی مشاهده می‌شود که به دلیل خاصیت تغییر پله‌ای ولتاژ است. بررسی میزان تلفات نیز نشان از اختلاف بسیار زیاد اعمال کنترل همه‌جانبه با دو حالت دیگر در کاهش تلفات دارد که این امر به دلیل تزریق توان راکتیو در محل بار در روش کنترل همه‌جانبه است. جدول (۴) تغییرات تپ ترانس پست را در حالتی که DGها قابل کنترل و غیر قابل کنترل هستند، نشان می‌دهد. با توجه به نتایج، تغییرات تپ در حالتی که DGها کنترل می‌شوند، کمتر از حالتی است که DGها قابل کنترل نیستند که در عمل نیز با توجه به محدودیت‌های کلیدزنی چنین می‌باشد. برای نشان دادن کارایی الگوریتم پیشنهادی و صحت نتایج به دست آمده، مدل پیشنهادی برای سه سطح بار با در نظر گرفتن تمامی ادوات کنترلی توسط الگوریتم ژنتیک نیز، پیاده‌سازی شده و نتایج در جدول (۵) مقایسه گردیده است. از این رو، برای الگوریتم ژنتیک، ۲۰۰ نسل با جمعیت ۱۰۰۰ عضو در نظر گرفته شده است. پارامترهای دیگر الگوریتم ژنتیک از قبیل احتمال تزویج و جهش به ترتیب ۰/۹ و ۰/۰۰۵ در نظر گرفته شده است.

جدول (۴): تغییرات تپ LRT

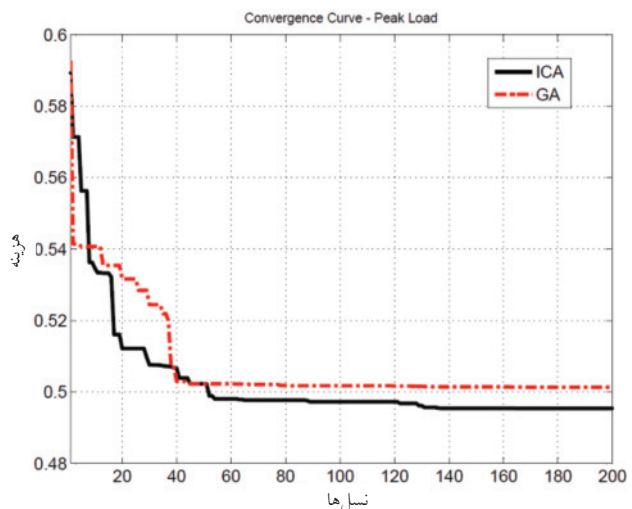
زمان (ساعت)	DG		زمان (ساعت)	DG	
	بدون قابلیت کنترل	با قابلیت کنترل		بدون قابلیت کنترل	با قابلیت کنترل
۱	۰	۰	۱۳	۶	۰
۲	۰	۰	۱۴	۶	۰
۳	۰	۰	۱۵	۰	۰
۴	۰	۰	۱۶	۰	۰
۵	۰	۰	۱۷	۸	۱
۶	۳	۰	۱۸	۸	۱
۷	۵	۰	۱۹	۸	۱
۸	۶	۰	۲۰	۸	۱
۹	۶	۰	۲۱	۵	۰
۱۰	۶	۰	۲۲	۵	۰
۱۱	۶	۰	۲۳	۰	۰
۱۲	۰	۰	۲۴	۰	۰



شکل (۱۳): پروفیل ولتاژ باس‌ها در بازه زمانی با ۷۴٪ پیک بار با اعمال روش‌های مختلف کنترل ولتاژ



شکل (۱۴): تغییرات تلفات در طول زمان با اعمال روش‌های مختلف کنترل ولتاژ



شکل (۱۵): منحنی همگرایی الگوریتم‌های رقابت استعماری و ژنتیک برای بار پیک

جدول (۵): مقایسه نتایج به دست آمده

الگوریتم ژنتیک	الگوریتم رقابت استعماری	الگوریتم پیشنهادی
تلفات	تلفات	
۰/۲۵۲	۰/۲۴۸	بار پیک
۰/۰۸۳	۰/۰۸۳	۷۴ درصد پیک
۰/۰۵۶۹	۰/۰۵۴	۶۷ درصد پیک

## ۵. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله، الگوریتمی برای کنترل زمان حقیقی ولتاژ شبکه توزیع، با مشارکت منابع تولید پراکنده مبتنی بر اینورتر (پیل سوختی) و ادوات کنترل ولتاژ سیستم، نظیر رگولاتور ولتاژ پله‌ای، ترانسفورماتور کنترل نسبت بار، جبران‌کننده‌های استاتیک و خازن‌های شنت معرفی گردید. در این الگوریتم پس از هر بار دریافت اطلاعات، با انجام عملیات تخمین حالت وضعیت شبکه قابل رؤیت، و سپس برنامه بهینه‌سازی با روش جدید الگوریتم رقابت استعماری اجرا گردید. با انجام عملیات بهینه‌سازی که با هدف کمینه کردن انحراف ولتاژ، میزان تلفات و هزینه تولید توان راکتیو صورت پذیرفت و با مقایسه پروفیل ولتاژ شین‌ها و میزان تلفات شبکه در حالت مشارکت DGها با حالت کنترل محدود و یا عدم کنترل، می‌توان صحت و کارایی روش کنترل پیشنهادی را تأیید کرد.

## فهرست علائم و اختصارات

هزینه تولید توان راکتیو	$Cost$
فاصله میان استعمارگر و مستعمره	$d$
حداکثر کلیدزنی روزانه	$DS_{Max}$
ضرایب وزنی متناظر با ولتاژ	$K_1$
ضرایب وزنی متناظر با تلفات شبکه	$K_2$
ضرایب وزنی متناظر با هزینه تولید توان راکتیو	$K_3$
تلفات شبکه	$Loss$
تعداد کل شین‌های شبکه	$n$
توان راکتیو جذب شده یا تزریق شده توسط منابع تولید پراکنده	$Q_g$
حداقل توان راکتیو جذب شده یا تزریق شده توسط منابع تولید پراکنده	$Q_g^{Min}$
حداکثر توان راکتیو جذب شده یا تزریق شده توسط منابع تولید پراکنده	$Q_g^{Max}$
توان راکتیو تزریق شده یا جذب شده توسط جبران‌گرها	$Q_{sh}$
حداقل توان راکتیو تزریق شده یا جذب شده توسط جبران‌گرها	$Q_{sh}^{Min}$
حداکثر توان راکتیو تزریق شده یا جذب شده توسط جبران‌گرها	$Q_{sh}^{Max}$

جبران‌گرها	$t$
مقدار تپ‌ها	$t_{min}$
حداقل مقدار تپ‌ها	$t_{max}$
حداکثر مقدار تپ‌ها	$U$
تابع توزیع یکنواخت	$V_i$
مقدار ولتاژ باس $i$ ام	$V_i^{Min}$
حداقل مقدار ولتاژ باس $i$ ام	$V_i^{Max}$
حداکثر مقدار ولتاژ باس $i$ ام	$V_i^{ref}$
مقدار مرجع ولتاژ باس $i$ ام	$x$
عدد تصادفی با توزیع یکنواخت	$\beta$
متغیری ثابت در الگوریتم رقابت استعماری	$\gamma$
متغیری ثابت در الگوریتم رقابت استعماری	$\theta$
عدد تصادفی با توزیع یکنواخت	

## مراجع

- [1] M.Oshiro, K.Tanak, A.Uehara, T.Senjyu, Y.Miyazato, A.Yona, Y.Funabashi, "Optimal Voltage Control in distribution system with Coordination of distribution installations", *International Journal of Electrical Power and Energy System (Elsevier)*, Vol. 32, pp. 1125-1134, Jun 2010.
- [2] Tomonobu Senjyu, Yoshitaka Miyazato, "Optimal Distribution Voltage Control and Coordination with Distributed Generation", *IEEE Transactionson Power Delivery*, Vol. 23, No. 2, Apr 2008.
- [3] M.H.J.Bollen, A.Sannino, "Voltage Control with Inverter-Based Distributed Generation", *IEEE Transactionson Power Delivery*, Vol. 20, No. 1, Jan 2005.
- [4] I.Roytelman, B.K.Weec & R.L.Lugtu "Volt/Var Control algorithm for modern Distribution management system", *IEEE Transactionson Power Delivery*, Vol. 10, No. 3, Agu 1995.
- [5] I.Roytelman, V.Ganesan "Coordinated Local and Centralized Control in Distribution management system", *IEEE Transactionson Power Delivery*, Vol. 15, No. 2, Apr 2000.
- [6] R. H. Liang and Y. S.Wang, "Fuzzy-based reactive power and voltage control in a distribution system", *IEEE Transactionson Power Delivery*, Vol. 18, No.2, pp. 610-618, Apr. 2003.
- [7] Y. Deng, X. Ren, C. Zhao, and D. Zhao, "A heuristic and algorithm iccombined approach for reactive power optimization with time-varyingload demand in distribution systems", *IEEE Transactionson Power Systems*, Vol. 17, No. 4, pp. 1068-1072, Oct. 2002.
- [8] Z. Gu and D. T. Rizy, "Neural networks for combined



- control of capacitor banks and voltage regulators in distribution systems*", *IEEE Transactionson Power Delivery*, Vol. 11, No. 4, pp. 1921–1928, Oct. 1996.
- [9] Ferry A. Viawan, Ambra Sannino, Jaap Daalder, " *Voltage control with on-load tap changers in medium voltage feeders in presence of distributed generation*", *International Journal of Electrical Power System Research (Elsevier)*, pp. 1-9, 2006.
- [10] Ferry A. Viawan, and Daniel Karlsson, " *Voltage and Reactive Power Control in Systems with Synchronous Machine-Based Distributed Generation*", *IEEE Transactionson Power Delivery*, Vol. 23, No. 2, Apr 2008.
- [11] Akbar Rahideh, M. Gitizadeh, " *Fuzzy logic in real time voltage/reactive power control in FARS regional electric network*", *International Journal of Electric Power Systems Research (Elsevier)*, Vol. 76, pp. 996-1002, 2006.
- [12] N. I. Santoso and O. T. Tan, " *Neural-net based real-time control of capacitors installed on distribution systems*", *IEEE Transactionson Power Delivery*, Vol. 5, No. 1, pp. 266–273, Jan 1990.
- [13] J. C.Wang, H. D. Chiang, K. N. Miu, and G. Darling, " *Capacitor placement andreal time control in large-scale unbalanced distribution systems:Loss reduction formula, problem formulation, solution methodology and mathematical justification*", *IEEE Transactionson Power Delivery*, Vol. 12, No. 2, pp. 953–958, Apr. 1997.
- [14] J. C.Wang, H. D. Chiang, K. N. Miu, and G. Darling, " *Capacitor placement and real time control in large-scale unbalanced distribution systems: Numerical studies*", *IEEE Transactionson Power Delivery*, Vol. 12, No. 2, pp.959–964, Apr 1997.
- [15] Shigenori Naka, Takamu Genji, Toshiki Yura, and Yoshikazu Fukuyama, " *A Hybrid Particle Swarm Optimization for Distribution State Estimation*", *IEEE Transactionson Power Delivery*, Vol. 18, No. 1, pp.60–68, Feb 2003.
- [16] Esmail Atashpaz Gargari & Caro Lucas" *Designing an optimal PID controller using Colonial Competitive Algorithm*" *First Iranian Joint Congeress on Intelligent and Fuzzy Systems*, September 2007, Mashhad-Iran.
- [17] Alinejad-Beromi, Y.Sedighzadeh, M. Bayat, M.R. Khodayar, M.E. " *Using genetic alghoritm for distributed generation allocation to reduce losses and improve voltage profile*", *Universities Power Engineering Conference 2007 (UPEC 2007)*, 42<sup>nd</sup> International, pp.954- 959.