

# بهبود دقت الگوریتم تخمین حالت در سیستم‌های قدرت بر مبنای مکان‌یابی PMUها و استفاده از روابط زاویه ولتاژ

علیرضا صدیقی انارکی، میلاد سیاف و محمدرضا تابان

خواهد بود که مدیران ارشد، دیدگاه روشنی از روند تقاضای انرژی داشته باشند. لذا لازمه کنترل یک سیستم قدرت، ارزیابی متغیرهای حالت (دامنه و زاویه ولتاژ باس‌ها) یک شبکه می‌باشد. اما با توجه به محدودیت‌های اقتصادی و گستردگی شبکه‌های قدرت، اندازه‌گیری هم‌زمان تمام متغیرهای الکتریکی تقریباً غیر ممکن است. بنابراین به منظور دستیابی به تمام متغیرهای الکتریکی، با اندازه‌گیری تعدادی از آنها، سایر پارامترها را با استفاده از روش تخمین حالت محاسبه می‌کنند. تخمین حالت بهترین تخمین از بردارهای حالت سیستم با اطلاعات اندازه‌گیری شده را در کمترین زمان ممکن فراهم می‌آورد. از زمان ارائه الگوریتم‌های تخمین حالت، روش‌های متنوعی برای به دست آوردن بردار متغیرهای حالت پیشنهاد شده است. برای تخمین حالت یک شبکه لازم است اندازه‌گیری‌هایی نظیر اندازه‌گیری توان اکتیو و راکتیو تزریقی به باس و توان انتقالی بین خطوط و دامنه ولتاژ باس‌ها صورت گیرد. امروزه با استفاده از دستگاه‌های اندازه‌گیری فازور<sup>۱</sup> (PMU) تخمین حالت با دقت بیشتری صورت می‌پذیرد. این دستگاه‌ها با کمک سیستم GPS با یکدیگر سنکرون می‌شوند تا بتوان مقادیر اندازه‌گیری شده را به طور هم‌زمان در اختیار داشت. PMUها همچنین می‌توانند جریان انتقالی بین باس‌ها و زاویه ولتاژ باس‌ها را استخراج کنند و امکان اضافه‌شدن روابط آنها را به ماتریس اندازه‌گیری  $H$  فراهم نمایند تا دقت تخمین حالت متغیرهای شبکه بهبود یابد.

در ارتباط با بهبود دقت تخمین حالت، طرح‌ها و پژوهش‌هایی از قبیل ترکیب فیلتر کالمن<sup>۲</sup> و روش حداقل مربعات<sup>۳</sup> (LS) خطا در سیستم‌های قدرت [۱]، به کارگیری معیارهای مختلف آماری برای انجام تخمین بار و روش‌های مختلف برای کاهش خطا و نیز بهینه‌کردن تعداد دستگاه‌های اندازه‌گیر، ارائه شده است [۲] و [۳].

در [۴] با توجه به اطلاعات گذشته بار و اندازه‌گیری زمان واقعی در برخی از نقاط محدود شبکه، امکان تخمین مناسبی از بار شبکه فراهم گردیده و جهت کاهش خطا از روش هوش مصنوعی استفاده شده است. در تعدادی از تحقیقات صورت‌گرفته از معیار آماری  $WLS$ <sup>۴</sup> جهت تخمین بار شبکه کمک گرفته شده است [۵] تا [۸]. از دیگر اقدامات انجام‌شده جهت استفاده بهینه از ظرفیت منصوب در شبکه توزیع، نظارت و مانیتورینگ شبکه می‌باشد که مهم‌ترین ابزار برای تشکیل سیستم  $DMS$ <sup>۵</sup> در شبکه‌های توزیع است. در این راستا نیاز به تخمین بار در مدیریت بهره‌برداری در حد زیادی احساس می‌شود [۹] و [۱۰]. استفاده از PMUها یا به عبارتی بهره‌گیری از تکنولوژی جدید، در حوزه تخمین بار،

چکیده: جهت بهره‌برداری مطلوب‌تر از سیستم‌های قدرت، مانیتورینگ متغیرهای حالت شبکه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است زیرا این متغیرها در بهبود بهره‌برداری اقتصادی، ارتقای قابلیت اطمینان شبکه و بهبود توانایی تحلیل وضعیت سیستم نقش مؤثری ایفا می‌کنند. به همین منظور الگوریتم‌های تخمین حالت با هدف تخمین دقیق متغیرهای حالت با اندازه‌گیری‌های محدود به کار گرفته شده‌اند. از آنجا که دستگاه‌های اندازه‌گیری امروزی نظیر PMUها، علاوه بر اندازه‌گیری کمیت‌های الکتریکی قادر به اندازه‌گیری زاویه ولتاژ باس‌ها می‌باشند، در این مقاله روشی نوین ارائه شده تا بتوان تخمین دقیق‌تری از کلیه متغیرهای شبکه به دست آورد. الگوریتم ارائه‌شده ضمن تعیین تعداد دستگاه‌های اندازه‌گیری (PMU)، مکان مناسب آنها را به گونه‌ای مشخص می‌کند تا با استفاده از اطلاعات آنها بتوان دقیق‌ترین تخمین را برای دستیابی به متغیرهای حالت و کمیت‌های الکتریکی ارائه نمود. افزایش دقت محاسبات به واسطه استفاده از روابط مشتق معادلات زاویه ولتاژ باس‌ها هم‌زمان با روابط تخمین حالت می‌باشد. نهایتاً محاسبات تخمین حالت توسط روش کمترین مربعات وزن داده‌شده (WLS) انجام شده است.

محاسبات انجام‌شده روی شبکه IEEE ۱۴ bus و با استفاده از نرم‌افزارهای MATLAB و MATPOWER صورت پذیرفته است. نتایج نشان می‌دهند که روش ارائه‌شده جهت افزایش دقت تخمین متغیرهای حالت و کاهش تعداد PMUها و مکان‌یابی مناسب PMUها موفق بوده است.

کلیدواژه: الگوریتم تخمین حالت، تخمین بار، زاویه ولتاژ، واحد اندازه‌گیری فازور، مکان‌یابی PMU.

## ۱- مقدمه

مدیریت صحیح سیستم‌های قدرت نیازمند دسترسی به اطلاعات کامل سیستم از جمله اندازه‌گیری دقیق میزان بار است. از مزایای دسترسی به اطلاعات دقیق سیستم می‌توان به بهبود بهره‌برداری اقتصادی، ارتقای قابلیت اطمینان شبکه‌های قدرت، کنترل بهینه آن، بهبود توانایی تحلیل وضعیت سیستم پس از وقوع خطا و حفاظت پیشرفته بر اساس کمیات اندازه‌گیری شده اشاره نمود. با توسعه سیستم‌های قدرت، مانیتورینگ و کنترل سیستم برای عملکرد صحیح شبکه‌های قدرت از اهمیت بیشتری برخوردار می‌شوند. مدیریت صحیح انرژی الکتریکی زمانی امکان‌پذیر

این مقاله در تاریخ ۱۱ آذر ماه ۱۳۹۴ دریافت و در تاریخ ۶ آبان ماه ۱۳۹۶ بازنگری شد. این تحقیق توسط شرکت توزیع نیروی برق یزد بر اساس قرارداد شماره ۶۰۳/۴۹۹/۶۲/ق مورخ ۹۱/۱۱/۲۳ پشتیبانی شده است.

علیرضا صدیقی انارکی، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه یزد، یزد، (email: sedighi@yazd.ac.ir)

میلاد سیاف، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه یزد، یزد، (email: milad\_sa12646@yahoo.com)

محمدرضا تابان، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، (email: mrtaban@cc.iut.ac.ir)

1. Phasor Measurement Unit
2. Kalman Filter
3. Least Square
4. Weighted Least Square
5. Distribution Management System

است و در حقیقت مینیمم کردن خطای بین مقدار اندازه‌گیری شده و مقدار واقعی کمیت می‌باشد. با فرض در اختیار داشتن مجموعه‌ای از اندازه‌گیری‌ها می‌توان رابطه‌ای بر اساس مقدار اندازه‌گیری شده و مقدار واقعی پارامترهای مورد نظر به دست آورد که به صورت (۱) بیان می‌شود

$$Z = h(x) + e \quad (1)$$

که در آن  $Z$  بردار مقادیر اندازه‌گیری شده می‌باشد و می‌تواند واقعی یا مجازی (حدس‌های اولیه) باشد،  $x$  بردار متغیرهای حالت سیستم،  $h$  برداری از توابع غیر خطی که مقادیر اندازه‌گیری شده را به متغیرهای حالت مرتبط می‌سازد و  $e$  مدل خطای موجود در هر دستگاه اندازه‌گیری است که معمولاً دارای توزیع نرمال و میانگین صفر می‌باشد [۱] و [۲].

بردار متغیرهای حالت به صورت (۲) می‌باشد

$$x = (|V_1|, |V_2|, \dots, |V_N|, \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N) \quad (2)$$

هدف در این روش کاهش مجموع مربعات خطاها بین مقادیر اندازه‌گیری شده و واقعی می‌باشد که با توجه به وزن دهی ( $w$ ) به خطای هر یک از دستگاه‌ها صورت می‌پذیرد. بنابراین تابع هدف بهینه‌سازی در روش WLS به صورت (۳) می‌باشد

$$\min J(x) = \sum_{i=1}^m w_i (z_i - h_i(x))^2 = \quad (3)$$

$$[z - h(x)]^T w [z - h(x)] = [z - h(x)]^T [R]^{-1} [z - h(x)]$$

که در آن  $R$  ماتریس قطری کوواریانس خطاهای اندازه‌گیری بوده و عناصر آن مقدار واریانس خطاهای اندازه‌گیری مربوط می‌باشند. با مشتق‌گیری از (۳) و سپس با بسط تیلور آن و به کمک روش تکرار می‌توان متغیرهای حالت را با استفاده از (۴) تخمین زد [۲]

$$\Delta X^{est} = [[H]^T [R]^{-1} [H]]^{-1} [H]^T [R]^{-1} [Z - h(x)] \quad (4)$$

که در آن ماتریس  $H$  با (۵) بیان می‌شود

$$H = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{inj}}{\partial \theta} & \frac{\partial P_{inj}}{\partial V} \\ \frac{\partial P_{flow}}{\partial \theta} & \frac{\partial P_{flow}}{\partial V} \\ \frac{\partial Q_{inj}}{\partial \theta} & \frac{\partial Q_{inj}}{\partial V} \\ \frac{\partial Q_{flow}}{\partial \theta} & \frac{\partial Q_{flow}}{\partial V} \\ \frac{\partial I_{mag}}{\partial \theta} & \frac{\partial I_{mag}}{\partial V} \\ \frac{\partial V_{mag}}{\partial \theta} & \frac{\partial V_{mag}}{\partial V} \end{bmatrix} \quad (5)$$

و در آن ماتریس‌های  $P$ ،  $Q$ ،  $I$  و  $V$  به ترتیب نشان‌دهنده توان اکتیو، توان راکتیو، جریان و ولتاژ بوده و  $inj$  نشانگر ورودی به باس،  $flow$  مشخص‌کننده توان انتقالی بین دو باس و  $mag$  بیان‌کننده دامنه است.

### ۳- الگوریتم ارائه‌شده

در روش ارائه‌شده می‌خواهیم با جابجایی و تعیین حداقل تعداد تجهیزات اندازه‌گیری جدید (PMU) و استفاده از اطلاعات اندازه‌گیری شده توسط آنها، ضمن بهبود دقت روش تخمین حالت به بهترین پاسخ برای کمیت‌ها برسیم. لذا الگوریتم در دو بخش بیان می‌شود:

منجر به افزایش دقت و سرعت بالا در برآورد اطلاعات شده است [۱۱] و [۱۲].

روش‌های متنوعی برای جابجایی تجهیزات اندازه‌گیری ارائه شده‌اند. در برخی از این روش‌ها تلاش برای کاهش تعداد وسایل اندازه‌گیری موجود با رعایت رؤیت‌پذیری سیستم انجام شده است. در برخی دیگر بدون توجه به وسایل اندازه‌گیری موجود و با توجه به توپولوژی سیستم، جابجایی جدیدی از ابتدا انجام گرفته است [۱۳]. در [۱۴] با ارائه روش افزایشی که بر اساس واریانس محاسبه‌شده ولتاژ باس‌ها کار می‌کند، برای جابجایی لوازم اندازه‌گیری به منظور رؤیت‌پذیری سیستم، اقدام شده است. در [۱۵] استفاده از تجزیه چالسکی<sup>۱</sup> برای جابجایی بهینه و بدون تکرار لوازم اندازه‌گیری پیشنهاد شده است. در [۱۶] ابتدا تعدادی لوازم اندازه‌گیری جابجایی می‌شوند به طوری که رؤیت‌پذیری شبکه تأمین شده باشد. سپس با کم کردن و تغییر مکان لوازم، سعی در کاهش هزینه کل سیستم شده است. در [۱۷] ابتدا شبکه به شبکه‌های کوچک‌تر تقسیم می‌شود و سپس در هر بخش به طور جداگانه جابجایی لوازم اندازه‌گیری صورت می‌پذیرد. استفاده از مرکزیت بردار ویژه و مرکزیت مرتبه مستخرج از ماتریس تالاقی<sup>۲</sup> گره با شاخه در [۱۸] معرفی گردیده است. در [۱۹] روش حذف متوالی<sup>۳</sup> ارائه شده که تعداد حالت‌ها در این روش به شدت کاهش پیدا می‌کند. یکی دیگر از روش‌هایی که برای جابجایی لوازم اندازه‌گیری به کار می‌رود، الگوریتم ژنتیک باینری است که در آن تابع هدف، همان هزینه تهیه و نصب لوازم اندازه‌گیری می‌باشد [۲۰] تا [۲۲].

در این مقاله روشی نوین برای بهینه‌سازی تخمین متغیرهای حالت ارائه شده است. این روش مبتنی بر توانایی PMUها در تعیین زاویه ولتاژ باس‌ها به طور هم‌زمان می‌باشد. در این روش چنانچه در دو باس مجاور دستگاه PMU نصب شده باشد اختلاف زاویه ولتاژ دو باس در دست خواهد بود، لذا می‌توان مشتق معادلات زاویه ولتاژ باس را به ماتریس اندازه‌گیری  $H$  اضافه نمود و در نهایت دقت محاسبات تخمین حالت را افزایش داد.

در ادامه و در بخش دوم تئوری تخمین حالت ارائه می‌شود. بخش سوم به چگونگی راهکار افزایش دقت تخمین می‌پردازد. شبیه‌سازی شبکه و نتایج حاصل از آن در بخش چهارم آمده و نهایتاً در بخش پنجم نتیجه‌گیری ارائه شده است.

### ۲- تئوری تخمین حالت

تخمین حالت، عمل تخصیص مقدار به یک متغیر حالت نامعلوم سیستم بر اساس اندازه‌گیری محدود تعدادی از کمیت‌ها در سیستم می‌باشد. برای انجام تخمین پارامترهای شبکه از معیارهای مقایسه‌ای مختلفی می‌توان استفاده کرد. در سیستم‌های قدرت متغیرهای حالت یک شبکه  $(\theta, V)$  بوده و روش‌های ارائه‌شده تئوری تخمین بر مبنای اندازه‌گیری تعدادی از کمیت‌های الکتریکی نظیر  $V$ ،  $I$  و  $P$  می‌باشد. معیار مقایسه‌ای معمول این است که مجموع مربعات اختلاف بین مقادیر تخمینی و اندازه‌گیری شده حداقل شود. حداقل مربعات وزن‌دار (WLS) یکی از معمول‌ترین روش‌های تخمین حالت است. الگوریتم تخمین حالت غالباً به منظور اصلاح خطای دستگاه‌های اندازه‌گیری به هنگام در شبکه‌ها به کار می‌رود. مسئله تخمین حالت در واقع مینیمم کردن یک تابع هدف غیر خطی با در نظر گرفتن مجموعه‌ای از قیود نامساوی غیر خطی

1. Cholesky Factorization
2. Sequential Elimination Procedure

(۳) با داشتن این جمعیت، ماتریس  $H$  و متناسب با آن ماتریس  $R$  تشکیل می‌شود و نهایتاً تابع هدف اصلی برای هر کروموزوم در هر نسل با استفاده از الگوریتم تکرار که در بخش بعد ارائه گردیده محاسبه می‌شود.

(۴) بر اساس معیارهای الگوریتم ژنتیک، کروموزوم‌های بهینه جدا شده و به نسل بعد منتقل می‌گردد.

(۵) در گام بعدی نسل جدید به روز رسانی می‌شود و عملگرها اعمال خواهد شد و نسل بعدی در الگوریتم تولید می‌گردد.

(۶) در صورت نیاز در الگوریتم نهایی به مرحله ۳ باز می‌گردد.

### ۳-۲ اصلاح ماتریس اندازه‌گیری $H$

بر اساس اطلاعات به دست آمده از دستگاه‌های PMU، مؤلفه مثبت ولتاژ و جریان‌ها در لحظه زمانی اندازه‌گیری به طور دقیق در مقیاس میکروثانه محاسبه شده و بدین وسیله زاویه فاز آنها استخراج می‌گردد. چنانچه دو دستگاه PMU در دو باس مجاور جایابی شوند<sup>۱</sup> می‌توان از رابطه  $I_{ij}$ ،  $\theta_{ij}$  را با استفاده از (۹) و (۱۰) استخراج کرد

$$\cos \theta_{ij} = \frac{V_i^x + V_j^x - I_{ij}^x \times (R_{ij}^x + X_{ij}^x)}{2 \times V_i \times V_j} \quad (9)$$

$$\theta_{ij} = \arccos \frac{V_i^x + V_j^x - I_{ij}^x \times (R_{ij}^x + X_{ij}^x)}{2 \times V_i \times V_j} \quad (10)$$

که در آنها  $R_{ij}$  و  $x_{ij}$  مقادیر امپدانس متصل بین دو باس  $i$  و  $j$  می‌باشند. لذا می‌توان اختلاف فاز دو باس متصل به هم را به دست آورد و با توجه به (۱۰) می‌توان با مشتق‌گیری از آن، درایه‌هایی به درایه‌های ماتریس  $H$  اضافه کرد. به عبارت دیگر می‌توان ابعاد ماتریس اندازه‌گیری  $H$  را افزایش داد که در این حالت بردارهای  $\partial \theta_{ij} / \partial V$  و  $\partial \theta_{ij} / \partial \theta$  به ماتریس اضافه شده و ماتریس  $H$  به فرم (۱۱) در خواهد آمد

$$H = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{inj}}{\partial \theta} & \frac{\partial P_{inj}}{\partial V} \\ \frac{\partial P_{flow}}{\partial \theta} & \frac{\partial P_{flow}}{\partial V} \\ \frac{\partial Q_{inj}}{\partial \theta} & \frac{\partial Q_{inj}}{\partial V} \\ \frac{\partial Q_{flow}}{\partial \theta} & \frac{\partial Q_{flow}}{\partial V} \\ \frac{\partial I_{mag}}{\partial \theta} & \frac{\partial I_{mag}}{\partial V} \\ \frac{\partial V_{mag}}{\partial \theta} & \frac{\partial V_{mag}}{\partial V} \\ \frac{\partial \theta_{ij}}{\partial \theta} & \frac{\partial \theta_{ij}}{\partial V} \end{bmatrix} \quad (11)$$

در این مرحله با فرض مشخص بودن تعداد اندازه‌گیرها و مکان آنها اقدام به تخمین حالت می‌گردد. این بخش تحت عنوان الگوریتم روش تکرار ارائه گردیده است.

حل الگوریتم روش تکرار برای حل تخمین حالت با معیار WLS

۱. از آنجا که اضافه شدن رابطه اختلاف فاز دو باس به ماتریس  $H$  باعث بهبود پاسخ‌ها و افزایش دقت تخمین می‌گردد، نرم‌افزار ارائه شده به طور خودکار اقدام به تعیین محل دستگاه‌های اندازه‌گیر در طرفین خطوط خواهد نمود.

- تعیین تعداد تجهیزات و مکان مناسب استقرار آنها
- ارائه بهسازی انجام شده در روش تخمین حالت

### ۳-۱ مکان‌یابی دستگاه‌های اندازه‌گیری

در روش‌های تخمین حالت مکان‌یابی دستگاه‌های اندازه‌گیری با دو هدف صورت می‌پذیرد: یکی تعیین کمترین تعداد دستگاه اندازه‌گیری و انتخاب مکان مناسب آنها با در نظر گرفتن شروط رؤیت‌پذیری شبکه و دیگری کاهش خطا و یا به عبارتی به حداقل رساندن خطای تخمین. بنابراین تابع هدف به گونه‌ای تعیین می‌گردد تا دو هدف فوق را برآورده نماید.

در روش ارائه شده به منظور جایابی بهینه دستگاه‌ها از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. به این منظور در گام اول با در دست داشتن اطلاعات و مشخصات شبکه، پخش بار انجام شده و اطلاعات به دست آمده از پخش بار به عنوان مرجع برای محاسبه تابع هدف مورد استفاده قرار گرفته است. در الگوریتم ژنتیک هر کروموزوم دارای طولی به اندازه تعداد مکان‌هایی است که در آنجا امکان اندازه‌گیری وجود دارد. متغیر الگوریتم ژنتیک مبتنی بر متغیر باینری است. در این فرایند بهینه‌سازی، متغیر باینری وجود یا عدم وجود اندازه‌گیرها در مکان مورد نظر را با عدد یک یا صفر نشان می‌دهد. تعداد یک‌های کروموزوم تعداد دستگاه‌های مورد استفاده را نشان می‌دهد که یکی از اهداف به حداقل رساندن آنها می‌باشد. لذا متغیر  $N_z$  به آن اختصاص داده شده و به عنوان بخشی از تابع هدف تلاش در به حداقل رساندن آن صورت پذیرفته است. بنابراین تابع هدف تعداد دستگاه‌ها که در حین آن، مکان دستگاه‌ها نیز مشخص می‌شود بر اساس (۶) ارائه می‌گردد

$$N_z = \text{تابع هدف تعداد دستگاه‌ها} \quad (6)$$

در هر یک از تکرارهای الگوریتم هنگامی که مکان دستگاه مشخص شد، مجموعه‌ای از مقادیر اندازه‌گیرها محاسبه می‌شوند و طبق (۷) با توجه به مطالعات پیرامون موضوع تخمین حالت، خطای تخمین آن محاسبه می‌شود که هدف دیگر کاهش این خطا می‌باشد. لذا خطای تخمین طبق (۷) محاسبه می‌شود

$$\text{trace}(H^T R^{-1} H) = \text{تابع هدف خطای تخمین} \quad (7)$$

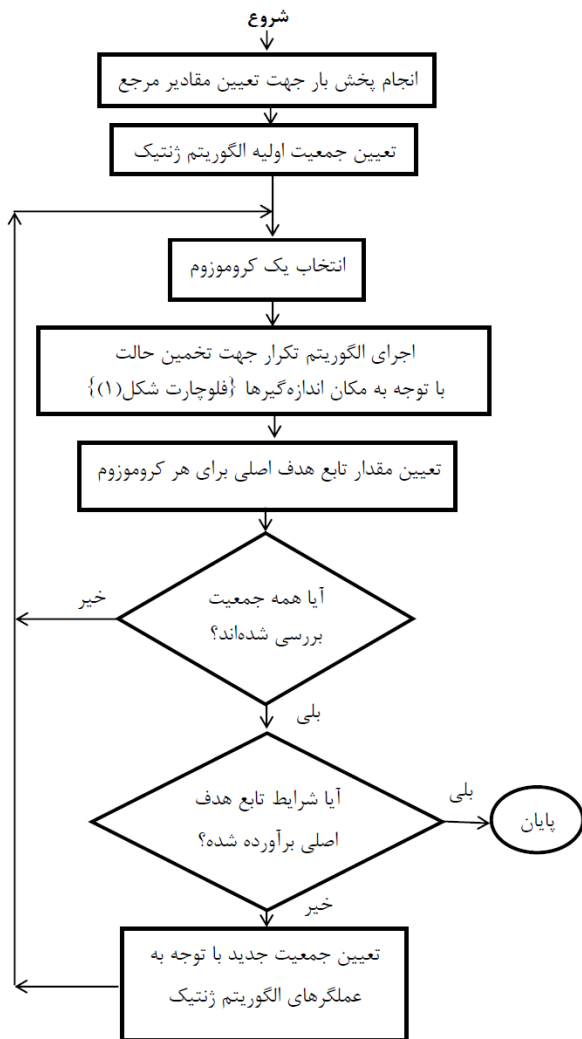
که در آن  $\text{trace}$  تابعی است که مجموع عناصر روی قطر ماتریس (که مربعات خطای وزن دار هستند) را محاسبه می‌نماید. از آنجا که بازه تغییرات این دو بخش از تابع هدف در یک محدوده نمی‌باشد اقدام به وزن دهی به این دو تابع گردیده و تابع هدف اصلی این بخش به صورت (۸) ارائه شده است

$$\min(w_1 \times \text{trace}(H^T R^{-1} H) + w_2 \times N_z) = \text{تابع هدف} \quad (8)$$

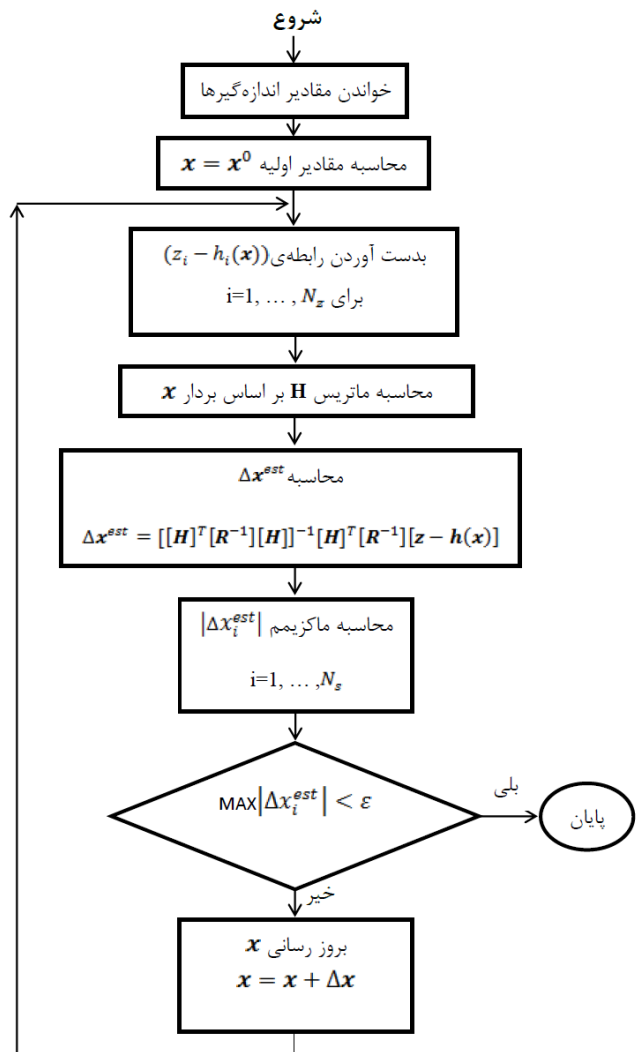
که در آن  $w_1$  و  $w_2$  با تغییر مداوم در طول اجرای الگوریتم به صورت سعی و خطا به ترتیب برابر ۱ و  $1/c \times 10^7$  به دست آمده‌اند که در آن  $c$  طول کروموزوم می‌باشد.

با توجه به مطالب ارائه شده مراحل اصلی الگوریتم مکان‌یابی به شرح ذیل می‌باشد:

- ۱) در ابتدای شروع الگوریتم جایابی، پخش باری جهت دریافت مقادیر مرجع دامنه و فاز ولتاژ انجام می‌گیرد.
- ۲) سپس جمعیت اولیه‌ای برای الگوریتم ژنتیک تولید می‌شود که به عبارتی این جمعیت اولیه ترکیب‌هایی تصادفی از محل نصب اندازه‌گیرها می‌باشند.



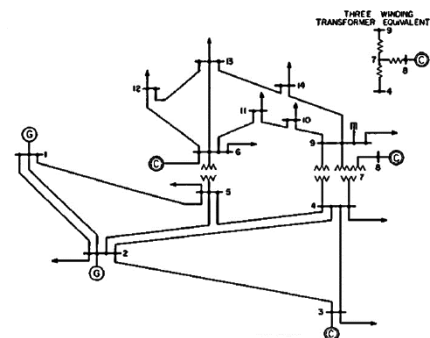
شکل ۲: روندنمای نهایی مکان‌یابی PMUها و تخمین حالت پارامترها.



شکل ۱: روندنمای الگوریتم تکرار.

۷) اگر شرط برآورده نشد، مقدار  $x^{k+1} = x^k + \Delta x^k$  و  $k = k + 1$  به روز رسانی می‌شوند. سپس به مرحله ۳ خواهد رفت و این روند تا جایی ادامه پیدا خواهد کرد تا شرط مرحله ۶ برآورده شود. برای نشان‌دادن الگوریتم نهایی تخمین حالت می‌توان به شکل ۲ اشاره نمود. مراحل این الگوریتم همان مراحل الگوریتم مکان‌یابی است با این تفاوت که مرحله ۶ به صورت زیر بیان می‌شود:

۶) اگر معیار تابع هدف اصلی برآورده گردید بهترین مکان دستگاه‌ها مشخص شده و برنامه به اتمام می‌رسد، در غیر این صورت به مرحله ۳ خواهد رفت و این روند تا جایی ادامه خواهد داشت تا تابع هدف اصلی برآورده شود.



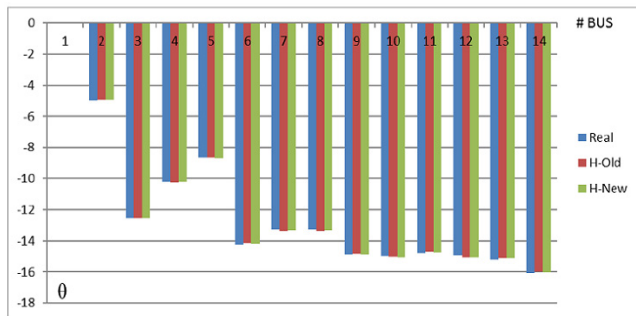
شکل ۳: شبکه چهارده‌باسه IEEE.

**۴- شبیه‌سازی و نتایج**

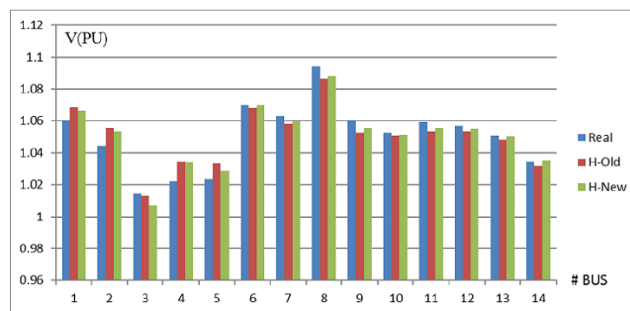
صحت‌سنجی نرم‌افزار ارائه‌شده با تعدادی از شبکه‌های تست IEEE و یک شبکه واقعی در شرکت توزیع نیروی برق یزد در [۲۳] انجام شده است. در ادامه به طور نمونه پیاده‌سازی الگوریتم ارائه‌شده برای شبکه IEEE ۱۴ Bus که در شکل ۳ نشان داده شده ارائه گردیده است. اطلاعات مربوط به شبکه در [۲۳] و [۲۴] قابل دسترسی است. جهت دستیابی به مقادیر دامنه و فاز ولتاژ باس‌ها برای نقطه شروع (با در نظر گرفتن باس ۱ به عنوان باس مبنا) این شبکه در نرم‌افزار MATPOWER شبیه‌سازی شده است. نتایج پخش بار در جدول ۱ ارائه شده است.

مطابق با شکل ۱ به صورت مراحل زیر است:

- ۱) با شروع الگوریتم مقادیر دستگاه‌های اندازه‌گیری (که در الگوریتم مکان‌یابی مشخص شده‌اند) خوانده می‌شوند.
- ۲) با انجام پخش بار، بردار  $X^k$  به عنوان نقطه شروع مقداردهی اولیه می‌شود.
- ۳) رابطه  $z_i - h_i(x^k)$  محاسبه می‌گردد.
- ۴) ماتریس  $H(x^k)$  از (۱۱) محاسبه می‌شود.
- ۵) با استفاده از (۴)،  $\Delta x^k$  محاسبه می‌شود و سپس  $\max |\Delta x_i^{est}|$  یا به عبارتی ماکسیمم مقادیر متغیرهای تخمین‌زده جدا می‌گردد.
- ۶) شرط  $\max |\Delta x_i^{est}| < \epsilon$  ارزیابی می‌شود.



شکل ۵: تفاوت زاویه فاز باس‌ها در شبکه ۱۴ باسه به دو روش شبیه‌سازی.



شکل ۴: تفاوت دامنه ولتاژ در شبکه ۱۴ باسه به دو روش شبیه‌سازی.

جدول ۲: تعداد و مکان متغیرهای اندازه‌گیری شبکه ۱۴ باسه با PMU.

Measurement, i	Type	Measurement, i	Type
۱	$P_{1-}$	۱۷	$Q_{T-0}$
۲	$P_{1-2}$	۱۸	$Q_{T-7}$
۳	$P_{T-2}$	۱۹	$Q_{T-9}$
۴	$P_{T-4}$	۲۰	$Q_{T-0}$
۵	$P_{T-0}$	۲۱	$Q_{T-12}$
۶	$P_{T-7}$	۲۲	$Q_{T-4}$
۷	$P_{T-1}$	۲۳	$I_{T-0}$
۸	$P_{T-0}$	۲۴	$I_{T-7}$
۹	$P_{T-12}$	۲۵	$I_{T-1}$
۱۰	$P_{T-2}$	۲۶	$I_{T-2}$
۱۱	$Q_{T-}$	۲۷	$I_{T-1}$
۱۲	$Q_{T-}$	۲۸	$I_{T-2}$
۱۳	$Q_{T-}$	۲۹	$V_{T-}$
۱۴	$Q_{T-2}$	۳۰	$V_{T-}$
۱۵	$Q_{T-2}$	۳۱	$\theta_{T-1}$
۱۶	$Q_{T-4}$	۳۲	$\theta_{T-4}$

روش جدید با به کارگیری معادلات اختلاف فاز در ماتریس  $H$  در افزایش دقت تخمین حالت یک شبکه قدرت بسیار موفق بوده است. نتایج اجرای الگوریتم پیشنهادی برای شبکه واقعی ارائه شده در [۲۳]، مشابه نتایج ارائه شده، افزایش دقت مقادیر تخمین زده شده را نشان می‌دهند.

### ۵- نتیجه‌گیری

ارزیابی متغیرهای حالت یک شبکه لازمه کنترل یک سیستم قدرت می‌باشد و در مراکز کنترلی این ارزیابی با استفاده از تخمین حالت صورت می‌پذیرد. تخمین حالت، بهترین تخمین را از بردارهای حالت سیستم (دامنه و زاویه فاز ولتاژ باس‌ها) با توجه به اطلاعات اندازه‌گیری شده در کمترین زمان ممکن فراهم می‌آورد. در این مقاله روشی نوینی ارائه گردیده تا به کمک آن بتوان تخمینی دقیق‌تر از کلیه متغیرهای حالت شبکه قدرت را به دست آورد. در روش ارائه شده پس از تعیین تعداد و مکان وسایل اندازه‌گیری به منظور رؤیت‌پذیری شبکه از روش ابداعی اضافه کردن مشتق اختلاف زاویه ولتاژ باس‌ها به ماتریس  $H$  استفاده شده است. تخمین حالت توسط روش WLS انجام شده و برای لحاظ نمودن مقادیر شروع و همچنین مقادیر اندازه‌گرفته توسط دستگاه‌های اندازه‌گیری در تخمین حالت از نرم‌افزار MATPOWER استفاده شد است. نتایج شبیه‌سازی شده بر روی این شبکه استاندارد نشان می‌دهد روش ارائه شده برای افزایش دقت تخمین حالت موفق بوده و موجب

جدول ۱: مقادیر نقاط شروع شبکه ۱۴ باسه.

$i$	$V_i$ (pu)	$\theta_i$ (Deg)	$i$	$V_i$ (pu)	$\theta_i$ (Deg)
۱	۱٫۰۶۰	۰٫۰۰۰	۸	۱٫۰۹۰	-۱۳٫۳۶۰
۲	۱٫۰۴۵	-۴٫۹۸۳	۹	۱٫۰۵۶	-۱۴٫۹۳۹
۳	۱٫۰۱۰	-۱۲٫۷۲۵	۱۰	۱٫۰۵۱	-۱۵٫۹۳۹
۴	۱٫۰۱۸	-۱۰٫۳۱۳	۱۱	۱٫۰۵۷	-۱۴٫۷۹۱
۵	۱٫۰۲۰	-۸٫۷۷۴	۱۲	۱٫۰۵۵	-۱۵٫۰۷۶
۶	۱٫۰۷۰	-۱۴٫۲۲۱	۱۳	۱٫۰۵۰	-۱۵٫۱۵۶
۷	۱٫۰۶۲	-۱۳٫۳۶۰	۱۴	۱٫۰۳۶	-۱۶٫۰۳۶

در این شبکه، مکان و پارامترهای مورد نیاز اندازه‌گیری و مقادیر حالت با استفاده از الگوریتم نهایی مشخص می‌شود. نمونه‌ای از خروجی این الگوریتم با فرض حضور PMU در جدول ۲ ارائه شده است. مطابق اطلاعات جدول ۲ و این که باید دستگاه‌های اندازه‌گیری جریان در باس‌های ۴، ۵، ۷ و ۹ قرار گیرد، این الگوریتم مشخص می‌کند که دستگاه‌های اندازه‌گیر فازوری PMU در باس‌های ۴، ۵، ۷ و ۹ قرار می‌گیرند. هم‌زمان با تعیین تعداد و مکان اندازه‌گیرها به کمک الگوریتم نهایی متغیرهای حالت نیز محاسبه می‌شوند. برای این امر یک بار محاسبات با استفاده از ماتریس  $H$  که در (۵) آمده، انجام شده و یک بار محاسبات با استفاده از ماتریس  $H$  که در (۱۱) آمده انجام گردیده است. شایان ذکر است چون دو دستگاه PMU در دو طرف خط قرار گرفته‌اند می‌توان از (۱۱) استفاده کرد. نتایج حاصل از اجرای الگوریتم در دو حالت و نتایج واقعی [۲۴] در جدول ۳ درج شده‌اند. با مقایسه نتایج حاصل از این دو روش تخمین با مقادیر واقعی متغیرهای حالت، می‌توان به عملکرد مناسب روش جدید (رابطه (۱۳)) در بهبود دقت تخمین بار در شبکه‌های قدرت اشاره کرد. همان گونه که در جدول ۴ نشان داده شده متوسط میانگین مربعات خطای اندازه ولتاژها و زاویه آنها به ترتیب در روش معمول ۰٫۵۸٪ و ۵٫۹۲٪ و در روش ارائه شده توسط این مقاله ۰٫۴۵٪ و ۴٫۵۸٪ می‌باشند و این امر گویای بهبود دقت نتایج در روش ارائه شده می‌باشد. برای مشخص‌تر شدن عملکرد این دو روش می‌توان به دو نمودار شکل‌های ۴ و ۵ نیز اشاره کرد. در شکل‌های ۴ و ۵ مقادیر ولتاژها و زاویه آنها برای هر سه حالت جدول ۳ ارائه شده‌اند که در آنها رنگ آبی نشان‌دهنده مقادیر واقعی دامنه ولتاژ و زاویه فاز در هر باس، رنگ قرمز نشان‌دهنده نتایج استفاده از روش قبل یا به عبارتی ماتریس  $H$  (۵)، و رنگ سبز نشان‌دهنده نتایج استفاده از روش جدید یا به عبارتی ماتریس  $H$  جدید (۱۱) می‌باشد. به عنوان مثال اگر به باس شماره ۵ توجه شود، مشخص است که در روش ابتکاری چه میزان مقدار تخمین زده شده، نسبت به مقدار تخمینی روش گذشته به مقدار واقعی نزدیک‌تر است. با مقایسه نتایج مقادیر تخمین زده شده دامنه ولتاژ و فاز باس‌ها با مقادیر واقعی آنها و توجه به دو نمودار اشاره شده می‌توان به این نتیجه رسید که

جدول ۳: مقادیر تخمین زده شده به روش WLS مقادیر واقعی شبکه ۱۴ باسه.

$i$	مقادیر واقعی		مقادیر تخمین زده با استفاده از $H$ قدیم		مقادیر تخمین زده با استفاده از $H$ جدید	
	$V_i$ (pu)	$\theta_i$ (Deg)	$V_i$ (pu)	$\theta_i$ (Deg)	$V_i$ (pu)	$\theta_i$ (Deg)
۱	۱٫۰۶۰۰	۰٫۰۰۰۰	۱٫۰۶۸۴	۰٫۰۰۰۰	۱٫۰۶۶۴	۰٫۰۰۰۰
۲	۱٫۰۴۴۳	-۴٫۹۶۴۵	۱٫۰۵۵۷	-۴٫۹۲۲۳	۱٫۰۵۲۷	-۴٫۹۵۱۰
۳	۱٫۰۱۴۲	-۱۲٫۵۵۲۵	۱٫۰۱۳۰	-۱۲٫۵۱۱۷	۱٫۰۰۷۰	-۱۲٫۵۳۷۸
۴	۱٫۰۲۲۲	-۱۰٫۱۹۵۰	۱٫۰۲۴۴	-۱۰٫۲۵۷۲	۱٫۰۳۴۳	-۱۰٫۲۳۶۱
۵	۱٫۰۲۳۵	-۸٫۶۳۸۴	۱٫۰۳۳۱	-۸٫۶۵۵۴	۱٫۰۲۸۹	-۸٫۶۷۶۰
۶	۱٫۰۷۰۲	-۱۴٫۲۱۴۷	۱٫۰۶۸۱	-۱۴٫۱۶۵۹	۱٫۰۶۹۹	-۱۴٫۱۹۰۷
۷	۱٫۰۶۲۹	-۱۳٫۲۶۴۲	۱٫۰۵۸۲	-۱۳٫۲۵۷۶	۱٫۰۵۹۸	-۱۳٫۲۳۵۶
۸	۱٫۰۹۳۹	-۱۳٫۲۸۷۴	۱٫۰۸۶۷	-۱۳٫۳۵۷۶	۱٫۰۸۸۳	-۱۳٫۳۲۶۵
۹	۱٫۰۶۰۷	-۱۴٫۸۸۳۹	۱٫۰۵۲۷	-۱۴٫۸۶۳۴	۱٫۰۵۵۴	-۱۴٫۹۰۹۹
۱۰	۱٫۰۵۲۹	-۱۴٫۹۷۲۸	۱٫۰۵۰۵	-۱۵٫۰۰۰۳	۱٫۰۵۱۱	-۱۵٫۰۶۸۵
۱۱	۱٫۰۵۹۲	-۱۴٫۷۹۷۸	۱٫۰۵۳۴	-۱۴٫۷۳۴۷	۱٫۰۵۵۷	-۱۴٫۷۶۰۹
۱۲	۱٫۰۵۶۹	-۱۴٫۹۱۵۹	۱٫۰۵۳۷	-۱۵٫۰۷۶۴	۱٫۰۵۵۱	-۱۵٫۰۴۶۲
۱۳	۱٫۰۵۰۶	-۱۵٫۱۸۷۱	۱٫۰۴۸۰	-۱۵٫۰۹۴۶	۱٫۰۵۰۳	-۱۵٫۱۲۶۳
۱۴	۱٫۰۳۴۶	-۱۶٫۰۶۴۳	۱٫۰۳۱۶	-۱۵٫۹۷۴۷	۱٫۰۳۵۳	-۱۶٫۰۰۵۷۴

- [7] A. Jain and N. R. Shivakumar, "Phasor measurements in dynamic state estimation of power systems," in *Proc. IEEE Region 10 Conf., TENCON'08*, 6 pp., Hyderabad, India, 19-21 Nov. 2008.
- [8] M. Hajian, A. M. Ranjbar, T. Amaree, and M. Mozafari, "Optimal placement of PMUs to maintain network observability using a modified BPSO algorithm," *International J. of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 33, no. 1, pp. 28-34, Jan. 2011.
- [9] M. Risso, A. J. Rubiales, and P. Andres Lotito, "Hybrid method for power system state estimation," *Generation, Transmission & Distribution, IET*, vol. 9, no. 7, pp. 636-643, Jul. 2015.
- [10] M. Hurtgen and J. C. Maun, "Optimal PMU placement using iterated local search," *International J. of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 32, no. 8, pp. 857-860, Oct. 2010.

[۱۱] ع. یاقوتی، م. پارسامقدم و م. محمودیان، "تخمین بار پست‌های شبکه توزیع با جایابی تجهیزات اندازه‌گیری محدود"، مجموعه مقالات نوزدهمین کنفرانس

بین‌المللی برق، ۱۱ صص، تهران، ۱۳۸۳.

- [12] J. Qi, K. Sun, and W. Kang, "Optimal PMU placement for power system dynamic state estimation by using empirical observability gramian," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 30, no. 4, pp. 2041-2054, Jun. 2015.
- [13] L. Ramesh, S. P. Choudhury, S. Chowdhury, and P. A. Crossley, "Electrical power system state estimation meter placement a comparative survey report," *Electric Power Components and Systems*, vol. 36, no. 10, pp. 1115-1129, Sep. 2008.
- [14] M. K. Celik and W. -H. E. Liu, "An incremental measurement placement algorithm for state estimation," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 10, no. 3, pp. 1698-1703, Aug. 1995.
- [15] G. Bei and A. Abur, "An improved measurement placement algorithm for network observability," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 16, no. 4, pp. 819-824, Nov. 2001.
- [16] G. M. Huang, L. Jiansheng, and A. Abur, "A heuristic approach for power system measurement placement design," in *Proc. of the 2003 Int. Symp. on Circuits and Systems, ISCAS'03*, vol. 3, pp. 407-410, Bangkok, Thailand, 25-28 May 2003.
- [17] C. Rakpenthai, S. Premrudeepreechacharn, S. Uatrongjit, and N. R. Watson, "Measurement placement for power system state estimation by decomposition technique," in *Proc. 11th Int. Conf. on Harmonics and Quality of Power*, pp. 414-418, Lake Placid, NY, USA, 12-15 Sept. 2004.
- [18] H. Zhao, Y. Li, Z. Mi, and L. Yu, "Sensitivity constrained PMU placement for complete observability of power systems," in *Proc. Transmission and Distribution Conf. and Exhibition: Asia and Pacific, IEEE/PES'05*, 5 pp., Dalian, China, 18-18 Aug. 2005.
- [19] C. Madtharad, S. Premrudeepreechacharn, N. R. Watson, and S. U. Ratchai, "An optimal measurement placement method for power system harmonic state estimation," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 20, no. 2, pp. 1514-1521, Apr. 2005.
- [20] A. Kumar, B. Das, and J. Sharma, "Genetic algorithm-based meter placement for static estimation of harmonic sources," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 20, no. 2, pp. 1088-1096, Apr. 2005.

جدول ۴: میانگین مقادیر خطای تخمین متغیرهای حالت به روش WLS در شبکه ۱۴ باس.

	میانگین خطای تخمین زده		میانگین خطای تخمین زده	
	نسبت به مقدار واقعی با استفاده از (۱۳)	نسبت به مقدار واقعی با استفاده از (۵)	$\Delta V$	$\Delta \theta$
ERROR	۰٫۰۰۴۵	۰٫۰۰۵۸	۰٫۰۵۹۲	۰٫۰۴۵۸

کاهش خطای مقدار تخمین زده متغیرهای حالت با مقدار واقعی آن شده است.

## ۶- قدردانی و تشکر

نویسندگان مقاله از همکاری جناب آقای مهندس محمدرضا صحتی مدیر عامل محترم شرکت توزیع برق یزد، سرکار خانم مهندس فریده بهداد دبیر محترم کمیته تحقیقات و جناب آقای مهندس محمدمهدی میرجلیلی رئیس دفتر برنامه‌ریزی شرکت توزیع برق یزد به واسطه حمایت و همکاری بی‌دریغ ایشان تقدیر و تشکر می‌نمایند.

## مراجع

- [1] R. A. Zadeh, A. Ghosh, and G. Ledwich, "Combination of kalman filter and least-error square techniques in power system," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 25, no. 4, pp. 2868-2880, Oct. 2010.
- [2] A. J. Wood and B. F. Wollenberg, *Power Generation, Operation and Control*, 2nd Ed, New York, Wiley, pp. 453-513, 1996.
- [3] A. Abur and A. G. Exposito, *Power System State Estimation: Theory and Implementation*, New York, Marcel Dekker, 2004.
- [4] R. F. Nuqui, State Estimation and Voltage Security Monitoring Using Synchronized Phasor Measurement, Ph.D Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2001.
- [5] P. Supriya and T. N. P. Nambiar, "Harmonic state estimation for a simple power system model using independent component analysis," in *Proc. IEEE 9th Int. Conf. on Intelligent Systems and Control, ISCO'15*, 4 pp., Coimbatore, India, 9-10 Jan. 2015.
- [6] T. Okon and K. Wilkosz, "WLS state estimation in polar and rectangular coordinate systems for power system with UPFC: significance of types of measurements," in *Proc. of the Int. Symp. Modern Electric Power Systems, MEPS'10*, 6 pp., Wroclaw, Poland, 20-22 Sept. 2010.

**میلاذ سیاف** تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد مهندسی برق به ترتیب در سال‌های ۱۳۸۸ و ۱۳۹۱ از دانشگاه یزد به پایان رسانده است. از سال ۱۳۹۲ الی ۱۳۹۵ نامبرده به عنوان کارشناس در کارخانجات ذوب آهن مشغول بوده و پس از آن تا کنون در شرکت فنی مهندسی کنترل ولت مشغول به فعالیت می‌باشد. زمینه‌های علمی مورد علاقه ایشان شامل موضوعاتی مانند حفاظت سیستم‌های توزیع با کمک تخمین حالت شبکه‌ها، مباحث پیرامون کیفیت توان و تخمین آن‌ها در سیستم‌های قدرت و نصب و راه‌اندازی سیستم‌های قدرت می‌باشد.

**محمدرضا تابان** تحصیلات خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق - الکترونیک در سال ۱۳۶۹ از دانشگاه صنعتی اصفهان و در مقاطع کارشناسی ارشد و دکتری مهندسی برق - مخابرات به ترتیب در سال‌های ۱۳۷۲ و ۱۳۷۷ از دانشگاه‌های تربیت مدرس و صنعتی اصفهان به پایان رسانده است و هم‌اکنون استاد دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه صنعتی اصفهان می‌باشد. نامبرده قبل از پیوستنش به دانشگاه صنعتی اصفهان در سال‌های ۱۳۷۷ الی ۱۳۸۶ استادیار و در سال‌های ۱۳۸۶ الی ۱۳۹۳ دانشیار دانشگاه یزد بوده است. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: پردازش آماری سیگنال، تخمین و آشکارسازی، سیستم‌های رادار، سیستم‌های مخابرات بی‌سیم.

[21] A. El-Zonkoly, "Optimal meter placement using genetic algorithm to maintain network observability," *Expert Systems with Applications*, vol. 31, no. 1, pp. 193-198, Jul. 2006.

[۲۲] ا. مشمول، جایابی بهینه دستگاه‌های اندازه‌گیری هارمونیک جهت تخمین حالت هارمونیک سیستم‌های قدرت، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، بخش برق، ۱۳۸۳

[۲۳] م. سیاف، تخمین بار در یک فیدر توزیع نمونه ۲۰ کیلوولت، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه یزد، دانشکده مهندسی برق، ۱۳۹۱.

[24] V. Gomathi, C. Venkateshkumar, and V. Ramachandran, "Power systems state estimation with interline power flow controller," *International J. on Electrical & Power Engineering*, vol. 1, no. 2, pp. 56-69, Jul. 2010.

**علیرضا صدیقی انارکی** تحصیلات خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق در سال ۱۳۶۹ از دانشگاه صنعتی اصفهان و در مقاطع کارشناسی ارشد و دکتری مهندسی برق به ترتیب در سال‌های ۱۳۷۳ و ۱۳۸۳ از دانشگاه تربیت مدرس به پایان رسانده است و هم‌اکنون استادیار دانشکده مهندسی برق دانشگاه یزد می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: پردازش سیگنال‌های الکتریکی در سیستم‌های قدرت، سیستم‌های توزیع انرژی الکتریکی و بهره برداری از سیستم‌های قدرت می‌باشد.