

# جایابی بهینه واحدهای اندازه‌گیری فازور با در نظر گرفتن عمق رویت‌ناپذیری

محسن تقی‌آبادی<sup>۱</sup> فاطمه جهانبانی اردکانی<sup>۲</sup>

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه یزد- یزد- ایران

[mohsen.t124@gmail.com](mailto:mohsen.t124@gmail.com)

۲- استادیار- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه یزد- یزد- ایران

[jahanbani@yazd.ac.ir](mailto:jahanbani@yazd.ac.ir)

**چکیده:** واحدهای اندازه‌گیری فازور (PMU) نقش مهمی در بهره‌برداری مطمئن از سیستم‌های قدرت ایفا می‌کنند. به دلیل هزینه بالای PMU ها و نیز فراهم نبودن زیرساخت‌های ارتباطی مناسب جهت انتقال اطلاعات اندازه‌گیری شده، مسئله جایابی بهینه PMU ها برای رویت‌پذیری ناقص مطرح شد. در این مقاله، به منظور جایابی بهینه PMU با در نظر گرفتن تعداد محدود آنها، روش جدیدی ارائه گردید تا بتوان به بالاترین درجه از دقت در تخمین حالت رسید. روش پیشنهادی همزمان با حداکثر کردن تعداد شین‌های رویت‌پذیر، درجه عمق رویت‌ناپذیری در شبکه را نیز حداقل می‌نماید. بدین منظور، ابتدا فرمول‌بندی جامعی جهت مدل کردن مسئله جایابی بهینه PMU برای رسیدن به حداقل عمق پیشنهاد شد و برای مطالعه تأثیر در نظر گرفتن عمق مشاهده ناپذیری، سه سناریو مختلف طراحی شد. همچنین به منظور شبیه‌سازی، از سیستم‌های تست ۱۴، ۲۴، ۳۰، ۳۹ و ۵۷ شینه IEEE استفاده شد. نتایج به دست آمده نشان دهنده عملکرد مناسب فرمول‌بندی پیشنهادی است به عنوان نمونه در یک سیستم تست ۳۹ شینه با حداکثر رویت‌پذیری ۲۷ که دارای بیشترین درجه عمق ۷ می‌باشد، می‌توان با استفاده از روش پیشنهادی و تغییر مکان نصب PMU ها، به حداکثر رویت‌پذیری ۲۶ و بیشترین درجه عمق ۴ رسید.

**واژه‌های کلیدی:** جایابی بهینه، رویت‌پذیری ناقص، عمق رویت‌ناپذیری، واحدهای اندازه‌گیری فازور

**نوع مقاله:** پژوهشی

DOI: 10.52547/jiaeee.18.2.1

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۹/۲/۱۹

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۹/۷/۲۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۹/۴

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر فاطمه جهانبانی اردکانی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - یزد - بلوار دانشگاه - دانشگاه یزد - ساختمان فنی و مهندسی ۱- دانشکده‌ی مهندسی برق

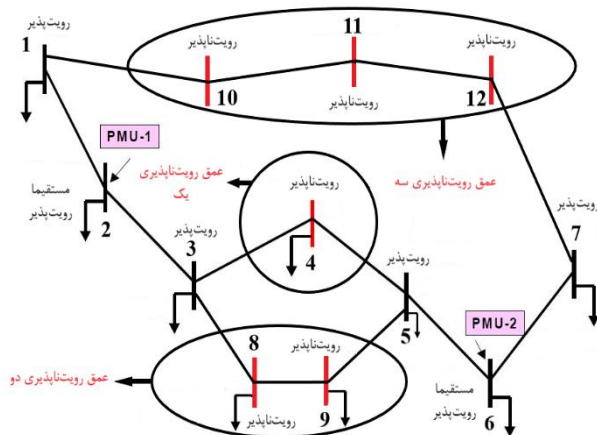
## ۱- مقدمه

استفاده از واحدهای اندازه‌گیری فازور<sup>۱</sup> در سیستم‌های قدرت به منظور هوشمندسازی آن و یا اهدافی چون تخمین حالت و پارامتر و حفاظت مورد استفاده واقع شده است [۱ و ۲]. در سال‌های اخیر مسئله جایابی بهینه PMU مورد توجه مهندسين و بهره‌برداران سیستم‌های قدرت قرار گرفته است. تاکنون روش‌ها و الگوریتم‌های متعددی جهت حل این مسئله توسط محققین فعال در این عرصه ارائه شده که هرکدام به نوبه‌ی خود، دارای مزایا و معایب می‌باشند [۳]–[۵]. بسیاری از روش‌ها و الگوریتم‌های ارائه شده در حل مساله جایابی بهینه واحدهای اندازه‌گیری فازور به منظور رویت‌پذیری کامل شبکه قدرت بوده است [۶]–[۸]. نتایج به دست آمده از مطالعات نشان می‌دهد که هرگاه حدود ۳۳٪ درصد از کل شین‌های موجود در سیستم قدرت به PMU مجهز شوند، رویت‌پذیری کامل شبکه به دست خواهد آمد [۹ و ۱۰]. این تعداد برای رویت‌پذیری کامل شبکه‌های با ابعاد بزرگ، قابل توجه می‌باشد و هزینه‌های هنگفتی را به بهره‌برداران شبکه تحمیل خواهد کرد [۱۱ و ۱۲]. از طرفی اگر در صورت عدم وجود زیرساخت‌های ارتباطی مناسب در شبکه، امکان نصب PMU در سراسر شبکه وجود نداشته باشد، رسیدن به هدف رویت‌پذیری کامل شبکه میسر نخواهد بود. بنابراین هزینه‌های ایجاد بستر مناسب ارتباطی جهت انتقال اطلاعات اندازه‌گیری شده توسط PMU به مجموع هزینه‌ها افزوده خواهد شد. در این شرایط، ممکن است عملاً طیف گسترده‌ای از بهره‌برداران شبکه‌های قدرت از صرف هزینه زیاد و به دنبال آن بهره‌مندی از مزایای PMU منصرف گردند [۱۳].

در شرایطی که رسیدن به رویت‌پذیری کامل شبکه فراهم نیست، رویت‌پذیری ناقص<sup>۲</sup> سیستم قدرت مطرح می‌شود. رویت ناپذیری ناقص هنگامی رخ می‌دهد که تعداد PMUهای قابل نصب در سیستم قدرت جهت تشخیص تمامی فازورهای ولتاژ شین‌های شبکه محدود باشد به گونه‌ای که نتوان به رویت پذیری کامل رسید. در این شرایط با وجود شین‌های رویت‌ناپذیر، مفهوم عمق رویت‌ناپذیری<sup>۳</sup> تعریف می‌گردد. عمق رویت‌ناپذیری برای تشخیص وضعیت شین‌های رویت‌ناپذیر در شبکه استفاده می‌شود که با توجه به اهمیت موضوع در مقاله جاری، شکل ۱ برای درک بهتر این مفهوم در نظر گرفته شده است.

در شکل ۱، دو عدد PMU بر روی شین‌های شماره ۲ و ۶ نصب شده‌اند که مستقیماً فازورهای ولتاژ این دو شین را اندازه‌گیری می‌کنند. فازور ولتاژ شین شماره ۱ به واسطه معلوم بودن ولتاژ شین ۲ و جریان خط بین شین‌های ۱ و ۲ قابل محاسبه است. ولتاژ شین‌های ۳، ۵ و ۷ نیز همانند شین ۱ قابل محاسبه می‌باشد. اما ولتاژ شین ۴ قابل اندازه‌گیری و محاسبه نیست. از این شین با عنوان عمق رویت‌ناپذیری با درجه یک نام برده می‌شود؛ زیرا یک شین رویت‌ناپذیر توسط دو (یا چند) شین رویت‌پذیر احاطه شده است [۱۴]. همچنین ولتاژ شین‌های شماره ۸ و ۹ نیز مجهول است و این دو شین دارای عمق رویت‌ناپذیری

با درجه دو هستند. دلیل این امر، اتصال دو شین رویت‌ناپذیر به هم و احاطه شدن آنها توسط شین‌های رویت‌پذیر می‌باشد [۱۴]. به همین ترتیب شین‌های شماره ۱۰، ۱۱ و ۱۲ که جزو شین‌های رویت‌ناپذیر در این شبکه محسوب می‌شوند، عمق رویت‌ناپذیری با درجه سه دارند.



شکل (۱): مفهوم عمق رویت‌ناپذیری در یک سیستم نمونه

مرجع [۱۳] روشی جهت حل مسئله جایابی بهینه PMUها برای رویت‌پذیری ناقص شبکه بر مبنای گراف سیستم قدرت ارائه نموده است. در این مقاله با استفاده از الگوریتم جستجوی درختی، تعداد و مکان PMUها یک بار برای رویت‌پذیری کامل شبکه و سپس برای داشتن عمق رویت‌ناپذیری با درجه یک، درجه دو و درجه سه تعیین نموده و به مقایسه نتایج حاصله پرداخته است. یک روش نوین جهت حل مسئله جایابی بهینه PMUها با هدف رویت‌پذیری ناقص شبکه با در نظر گرفتن تاثیر و عدم تاثیر شین‌های تزریق صفر توسط گوا ارائه شده است [۱۵]. در این مقاله تعداد PMU لازم جهت رسیدن به رویت‌پذیری کامل و نیز برای داشتن عمق رویت‌ناپذیری با درجه یک و درجه دو برای شبکه‌های تست ۱۴، ۳۰ و ۵۷ شینه IEEE مورد بررسی قرار گرفته است. در مرجع [۱۶] یک فرمول‌بندی جدید برای تابع هدف و قیود مربوط به آن در مسئله جایابی بهینه با هدف رویت‌پذیری ناقص ارائه شده که به واسطه آن می‌توان حداقل تعداد PMU مورد نیاز و همچنین مکان نصب آن‌ها را جهت رسیدن به هر درجه از عمق رویت‌ناپذیری مشخص به دست آورد. در مرجع [۱۰] نیز فرمولی برای محاسبه تقریبی تعداد PMU مورد نیاز در مسئله جایابی بهینه با درجه عمق رویت‌ناپذیری مشخص معرفی شده و با درجه عمق‌های رویت‌ناپذیری یک، دو و سه، مسئله را مورد بررسی قرار داده است.

با بررسی مطالعات صورت گرفته می‌توان دریافت که مسئله جایابی بهینه PMU با هدف رسیدن به عمق با درجه مشخصی از رویت‌ناپذیری، تاکنون مدل‌سازی و مورد توجه محققین قرار گرفته است. به عبارت دیگر، در این مطالعات تلاش شده است تا با تعیین تعداد محدودی از PMU و جایابی بهینه آنها، به عمق رویت‌ناپذیری با درجه مطلوب برسند. مشخص است که هر چه عمق بالاتری برای مسئله در نظر گرفته شود، تعداد PMU کمتری مورد استفاده قرار خواهد گرفت. از طرف دیگر، هر چه سیستم قدرت مورد نظر ابعاد بزرگتری داشته

$$A_{ij} = \begin{cases} 1; & \text{if Bus}_i = \text{Bus}_j \\ 1; & \text{if Bus}_i \text{ is adjacent with Bus}_j \\ 0; & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

$$I_{ij} = \begin{cases} 1; & \text{if } i=j \\ 0; & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

در این روابط  $i$  و  $j$  شماره فیدرها و  $N$  تعداد کل شین‌ها در شبکه مورد نظر است.  $U$  یک متغیر باینری بوده که در صورت رویت‌پذیر بودن شین  $i$  مقدار آن برابر با یک و در غیر این صورت صفر خواهد بود.  $W$  ماتریس وزنی هر شین بوده که بر حسب اهمیت هر شین تغییر می‌کند. همچنین  $A_{ij}$  ماتریس اتصالات شبکه و  $I_{ij}$  ماتریس همبستگی با ابعادی برابر با ماتریس اتصالات شبکه می‌باشد. رابطه (۲) مشخص می‌نماید که با نصب PMU بر روی هر کدام از شین‌های موجود در سیستم، کدام یک از شین‌های شبکه به رویت‌پذیری دست خواهند یافت. رابطه (۳) محدودیت تعداد PMU در دسترس را با  $M$  تعیین می‌نماید.

## ۲-۲- سناریو ۲: با هدف حداقل درجه‌های عمق

### رویت‌ناپذیری

در اختیار داشتن اطلاعات کافی در مورد عمق رویت‌ناپذیری شین‌ها در شبکه، باعث آگاهی از چگونگی توزیع PMUها در سطح شبکه و اطلاع از فاصله شین‌های رویت‌ناپذیر از شین‌های رویت‌پذیر مجاور خواهد شد [۱۷]. با این اطلاعات می‌توان ولتاژ شین‌های رویت‌ناپذیر را به واسطه ولتاژهای معلوم در شبکه تخمین زد [۱۷]. مقدار این تقریب بستگی به تعداد و درجه عمق‌های رویت‌ناپذیری در شبکه مجهز به PMU خواهد داشت. مطمئناً، هرچه عمق‌های رویت‌ناپذیری موجود در یک شبکه از درجه پایین‌تری برخوردار باشند، تخمین دقیق‌تری از ولتاژ شین‌های رویت‌ناپذیر حاصل خواهد شد و به دنبال آن عمل تخمین حالت با خطای کمتری انجام خواهد گرفت. در نتیجه می‌توان با جایابی بهینه و مدیریت تعداد و درجه عمق‌های رویت‌ناپذیری در سیستم، با وجود تعداد PMU کمتر، با تقریب مناسبی فازورهای ولتاژ تمامی شین‌های شبکه را در اختیار داشت.

بنابراین در حل مسئله جایابی بهینه PMU با هدف رویت‌پذیری ناقص شبکه، حداقل نمودن درجه عمق رویت‌ناپذیری شین‌های رویت‌ناپذیر اهمیت خواهد داشت. مطالعات دیگران در این زمینه منجر به فرمول‌بندی جهت رسیدن به یک عمق مشخص شده است ولی وجود یک فرمول جامع برای حداقل کردن عمق با درجه‌های مختلف در طول محاسبات ضروری به نظر می‌رسد. در این صورت، می‌توان با کاهش هر چه بیشتر درجه عمق‌های رویت‌ناپذیری، خطای موجود در تخمین مقدار ولتاژ شین‌های رویت‌ناپذیر را کاهش داد که خود باعث نزدیکی هرچه بیشتر شبکه تخمین زده شده به یک شبکه رویت‌پذیر کامل خواهد شد.

باشد، اختلاف تعداد PMUهای مورد نیاز برای رسیدن به درجه‌های عمق مختلف رویت‌ناپذیری، افزایش خواهد یافت. در نتیجه، اختلاف هزینه زیادی در تعیین عمق رویت‌ناپذیری دلخواه به وجود خواهد آمد که خود می‌تواند بر انتخاب عمق رویت‌ناپذیری مطلوب توسط بهره‌برداران تأثیر گذار باشد. لازم به ذکر است با افزایش درجه عمق رویت‌ناپذیری برای شبکه، تعداد شین‌های رویت‌ناپذیر در شبکه نیز افزایش می‌یابد که خود موجب افزایش فاصله شین‌های رویت‌ناپذیر از شین‌های رویت‌پذیر شده و پیامد آن افزایش خطا در تخمین ولتاژ شین‌های رویت‌ناپذیر خواهد بود.

در این مقاله، مدل جدیدی به منظور جایابی بهینه PMUها در شرایط رویت‌پذیری ناقص پیشنهاد شده است تا بتوان با در اختیار داشتن تعداد دلخواه از PMU، به هدف حداقل نمودن درجات عمق-های رویت‌ناپذیری شین‌های رویت‌ناپذیر در سیستم مدنظر دست یافت. علاوه بر این، در این شرایط هدف حداکثر نمودن تعداد شین‌های رویت‌پذیر نیز لحاظ شده است. در این صورت، علاوه بر در اختیار داشتن شبکه‌ای با حداقل عمق رویت‌ناپذیری ممکن، تعداد شین‌های رویت‌پذیر در شبکه نیز حداکثر شده است.

در ادامه، در بخش دوم به فرمول‌بندی مسئله مورد نظر پرداخته شده است. در بخش سوم نتایج حاصل از پیاده‌سازی روش پیشنهادی بر روی سیستم‌های تست مختلف ارائه گردیده است. در نهایت، بخش چهارم به نتیجه‌گیری مقاله اختصاص داده شده است.

## ۲- فرمول‌بندی مسئله

### ۱-۲- سناریو ۱: با هدف حداکثر رویت‌پذیری

در حالت کلی، هدف اصلی در شبکه با وجود تعداد محدود PMU، دستیابی به حداکثر رویت‌پذیری در شین‌های موجود در شبکه به منظور رسیدن به تخمین حالت با کمترین خطا است. در نتیجه، یک مسئله بهینه‌سازی به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$\text{Max} \sum_{j \in N} W_j \times U_j \quad (1)$$

مشروط بر اینکه:

$$f_i \succ g_i, \forall i \in N \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^N X_j = M, M \in N \quad (3)$$

که در آن:

$$f_i = \sum_{j \in N} A_{ij} X_j \quad (4)$$

$$g_i = \sum_{j \in N} I_{ij} U_j \quad (5)$$

$$X_j = \begin{cases} 1; & \text{if PMU is installed on bus } j \\ 0; & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

$$U_j = \begin{cases} 1; & \text{if bus } j \text{ is observable} \\ 0; & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

به عمق‌های با درجات بالاتر اختصاص داده شده است تا وجود عمق با درجه‌های بالا در نتایج به‌دست‌آمده را عنصری نامطلوب تلقی نماید. در این صورت، الگوریتم حل بهینه‌سازی تلاش می‌کند تا با کاهش تعداد عمق با درجه‌های بالا و تبدیل آن‌ها به تعدادی عمق با درجات پایین‌تر، به نتایج مطلوب‌تری دست یابد. ضرایب  $a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$  در این مقاله به ترتیب برابر با ۱، ۲، ۳، ...،  $n$  در نظر گرفته شده است.

## ۳-۲- سناریو ۳: با اهداف حداکثر رویت‌پذیری و

### حداقل عمق‌های رویت‌ناپذیری

با در نظر گرفتن ویژگی‌ها و قابلیت‌های هر دو هدف تعریف شده در بخش‌های قبل، مدل جدیدی ارائه شده است. با بهینه کردن تابع هدف در مدل پیشنهادی در واقع می‌توان به صورت همزمان هم تعداد شین‌های رویت‌پذیر در شبکه را به حداکثر مقدار ممکن رساند و هم درجات بالای عمق‌های رویت‌ناپذیری را به حداقل مقدار ممکن کاهش داد. در نهایت تابع هدف به صورت زیر پیشنهاد شده است:

$$\text{Min} \left( \frac{\sum_{k=1}^{N_D} (a_k \cdot n_k \cdot d_k)}{\sum_{j \in N} W_j U_j} \right) \quad (13)$$

مشروط بر اینکه:

$$f_i \succ g_i, \forall i \in N \quad (14)$$

$$\sum_{j=1}^N X_j = M, M \in \mathbb{N} \quad (15)$$

## ۳- نتایج و شبیه‌سازی

به منظور شبیه‌سازی عددی دو مدل پیشنهادی و مقایسه نتایج، از سیستم‌های تست ۱۴، ۲۴، ۳۰، ۳۹ و ۵۷ شینه IEEE استفاده شده است. سپس نتایج با استفاده از سه سناریو بیان شده در بخش سوم به دست آمده است. لازم به ذکر است تعداد PMU در هر شین حدود ۵۰ درصد تعداد PMU‌هایی که جهت رویت‌پذیری کامل آن شبکه نیاز هست، مطابق جدول ۱، در نظر گرفته شده است.

جدول (۱): تعداد PMU برای رویت‌پذیری کامل و ناقص شبکه‌های استاندارد IEEE

شبکه	۱۴	۲۴	۳۰	۳۹	۵۷
رویت‌پذیری کامل [۱۸]–[۲۱]	۳	۶	۷	۹	۱۴
ناقص	۲	۳	۴	۵	۷

به منظور حل مسئله بهینه‌سازی از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. چرا که الگوریتم ژنتیک در مسائلی با کمیت‌های گسسته نتایج مطلوبی را نتیجه می‌دهد و پیاده‌سازی آن نیز به معادلات و روش‌های پیچیده نیاز ندارد. علاوه بر این در مسائل با فضای جستجوی نسبتاً بزرگ، جواب‌های مناسبی را ارائه می‌کند [۲۲].

بدین منظور، در این مقاله، ماتریس جدیدی با نماد  $C_{ij}$  معرفی شده است. برای تشکیل ماتریس  $C_{ij}$  لازم است تا بعد از نصب PMU‌ها در شبکه در صورت وجود شین‌های رویت‌ناپذیر در سیستم، سطر و ستون مربوط به این شین‌ها در ماتریس اتصالات شبکه حفظ و سطر و ستون مربوط به شین‌های رویت‌پذیر از ماتریس اتصالات حذف گردد. در نهایت، هر کدام از درایه‌های ماتریس  $C_{ij}$  به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$C_{ij} = \begin{cases} 1; \text{if Unobservable Bus}_i = \text{Unobservable Bus}_j \\ 1; \text{if Unobservable Bus}_i \text{ is adjacent with Unobservable Bus}_j \\ 0; \text{Otherwise} \end{cases}$$

لازم به ذکر است تعداد سطر و ستون ماتریس  $C_{ij}$  برابر با تعداد شین‌های رویت‌ناپذیر می‌باشد. این ماتریس نشان‌دهنده نحوه ارتباط تمام شین‌های رویت‌ناپذیر موجود در شبکه خواهد بود. طبق قواعد مبحث گراف، توان  $n$  ماتریس اتصالات هر گراف یا دیاگرام نشان‌دهنده تعداد مسیرهای ارتباطی به طول  $n$  مابین گره‌های آن گراف می‌باشد [۱۶]. بنابراین توان‌های بالاتر ماتریس  $C$ ، قابلیت مشخص نمودن ارتباط بین شین‌های رویت‌ناپذیر در درجات بالا را دارا خواهد بود. در نتیجه، مجموع هر سطر از این ماتریس درجه عمق رویت‌ناپذیری و متعاقباً با شمارش درجه عمق‌های رویت‌ناپذیری مشابه در ماتریس، تعداد عمق رویت‌ناپذیری در درجه مشخص به دست می‌آید. در نتیجه با این روش می‌توان در هر الگوی نصب PMU‌ها در شبکه، تعداد و درجه عمق رویت‌ناپذیری را به دست آورد. در نهایت می‌توان مسئله جایابی PMU‌ها را با هدف کمینه کردن درجه عمق‌های رویت‌ناپذیر به صورت زیر تعریف نمود:

$$\text{Min} \sum_{k=1}^{N_D} (a_k \cdot n_k \cdot d_k) \quad (10)$$

مشروط بر اینکه:

$$\sum_{j=1}^N X_j = M, M \in \mathbb{N} \quad (11)$$

که در آن:

$$a_k \in \mathbb{N}, a_1 \prec a_2 \prec a_3 \prec \dots \prec a_n \quad (12)$$

در روابط بالا،  $N_D$  تعداد کل درجه‌های عمق رویت‌ناپذیری مورد بررسی،  $n_k$  تعداد عمق رویت‌ناپذیری با درجه  $k$  و  $d_k$  درجه عمق رویت‌ناپذیری می‌باشد.

رابطه (۱۰) به منظور حداقل نمودن درجات بالای عمق‌های رویت‌ناپذیری در شبکه تعریف شده است. برای این تابع ضرایب  $a_k$  بزرگتر

جدول (۳): تعداد و عمق رویت‌ناپذیری شین‌ها با هدف رویت‌پذیری حداکثری شین‌ها

شبکه تست	عمق ۱	عمق ۲	عمق ۳	عمق ۴	عمق ۵	عمق ۶	عمق ۷
شین ۱۴ IEEE	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰
شین ۲۴ IEEE	۲	۱	۱	۰	۰	۰	۰
شین ۳۰ IEEE	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۰
شین ۳۹ IEEE	۵	۰	۰	۰	۰	۰	۱
شین ۵۷ IEEE	۵	۱	۱	۰	۰	۱	۰

مشاهده می‌شود که با استفاده از حدود ۵۰ درصد از کل PMUهای موردنیاز جهت رویت‌پذیری کامل شبکه، به‌طور میانگین ۷۵٪ درصد از کل شین‌های موجود در هر سیستم رویت‌پذیر شده‌اند. اما باید به این نکته توجه کرد که با توجه به جدول ۳، نوع عمق‌های موجود در هر شبکه عموماً عمق‌ها با درجه‌های بالا هستند. در نتیجه، باعث کاهش دقت و افزایش خطای مسئله تخمین ولتاژ شین‌های رویت‌ناپذیر خواهد شد. بنابراین باید به دنبال روشی بود که عمق‌های رویت‌ناپذیری بالای موجود در هر شبکه را حداقل نماید و حتی‌الامکان عمق‌های پایین را جایگزین عمق‌های بالا کند.

برای به دست آوردن پاسخ مسئله بهینه‌سازی، هر طرح ممکن از مکان‌های کاندیدا جهت نصب PMUها در سطح شبکه به عنوان یک پاسخ ممکن و در قالب کروموزوم در نظر گرفته می‌شود. تعداد ژن‌های هر کروموزوم برابر با تعداد شین‌های موجود در شبکه مدنظر می‌باشد که هر ژن می‌تواند مقدار صفر و یا یک را به خود اختصاص دهد. اگر مقدار یک ژن برابر با یک باشد، بیانگر این است که بر روی شین متناظر با آن ژن، یک PMU نصب شده است و اگر ژنی مقدار صفر را اختیار کند به معنای عدم وجود PMU بر روی آن شین خواهد بود. لازم به ذکر است در صورتی که پاسخی نتواند قیود مربوط به تابع هدف را رعایت نماید از مجموعه پاسخ‌ها کنار گذاشته می‌شود.

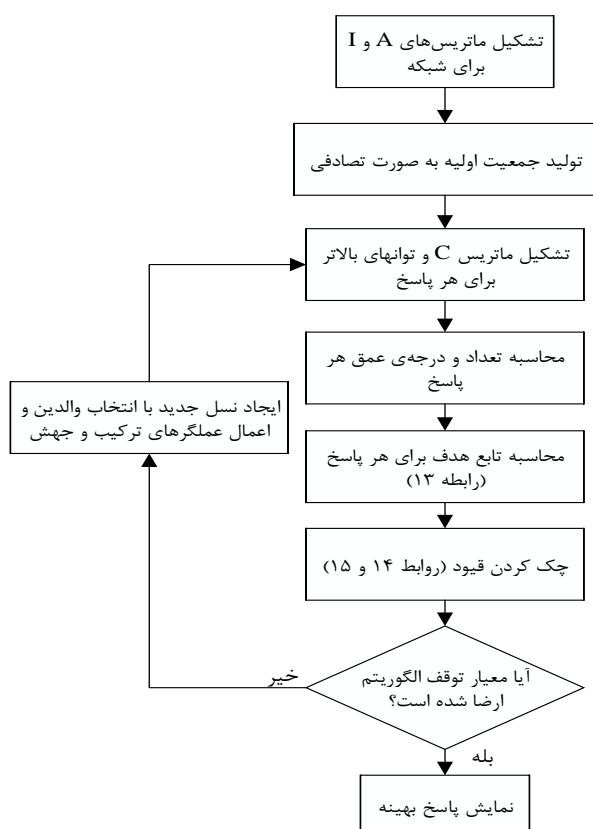
علاوه بر این در پیاده سازی الگوریتم ژنتیک برای حل مسئله بهینه‌سازی، جمعیت اولیه به صورت تصادفی و برابر با ۲۰۰ فرض شده است. در تشکیل نسل‌های بعد نیز از عملگر ترکیب با احتمال ۸۰ درصد و عملگر جهش با احتمال ۱۵ درصد استفاده شده است. همچنین ۵ درصد از کروموزوم‌ها متناسب با بهترین نتایج موجود در هر جمعیت به روش نخبه‌گزینی به صورت مستقیم به نسل بعد منتقل می‌شوند. معیار توقف الگوریتم رسیدن به حداقل تغییر در میزان اختلاف مابین دو جواب متوالی تعریف شده است که مقدار تغییر نیز برابر با  $10^{-4}$  فرض شده است. در ادامه شکل ۲ روند کلی کار انجام شده در این مقاله مربوط به سناریوی سوم را نشان می‌دهد.

### ۳-۱- حداکثر رویت‌پذیری شین‌ها

با استفاده از روابط (۱) تا (۹) مکان بهینه برای نصب PMUها جهت رویت‌پذیری حداکثری شین‌ها و نیز تعداد شین‌های رویت‌ناپذیر محاسبه و در جدول ۲ آورده شده است. علاوه بر این در جدول ۳ نیز درجه و تعداد عمق‌های رویت‌ناپذیری برای هر شبکه قابل‌مشاهده است.

جدول (۲): مکان نصب بهینه PMU و تعداد شین‌های رویت‌ناپذیر شبکه با هدف رویت‌پذیری حداکثری شین‌ها

شبکه تست	مکان نصب PMU	تعداد شین‌های رویت‌ناپذیر
شین ۱۴ IEEE	۹، ۶	۳
شین ۲۴ IEEE	۱۶، ۱۰، ۴	۷
شین ۳۰ IEEE	۲۷، ۱۲، ۱۰، ۷	۶
شین ۳۹ IEEE	۲۶، ۲۲، ۱۰، ۸، ۳	۱۲
شین ۵۷ IEEE	۵۶، ۳۸، ۲۶، ۱۹، ۱۵، ۹، ۶	۱۶



شکل (۲): روند کلی پیاده سازی روش پیشنهادی

### ۳-۲- حداقل عمق رویت‌ناپذیری شین‌ها

حال با در نظر گرفتن تعداد PMU برابر با سناریو قبل، در شرایط رویت پذیری ناقص، مسئله جایابی بهینه با هدف حداقل نمودن عمق‌های رویت‌ناپذیری در تمامی شین‌های شبکه حل می‌شود. جدول ۴ مکان بهینه نصب PMU ها در شین‌های شبکه و نیز تعداد شین‌های رویت‌ناپذیر را در این سناریو نشان می‌دهد. همچنین در جدول ۵ نوع و تعداد عمق‌های رویت‌ناپذیر شبکه آورده شده است.

جدول (۴): مکان نصب بهینه PMU و تعداد شین‌های رویت‌ناپذیر شبکه با هدف حداقل نمودن عمق رویت‌ناپذیری

شبکه تست	مکان نصب PMU	تعداد شین‌های رویت-ناپذیر
۱۴ شینه IEEE	۹، ۵	۴
۲۴ شینه IEEE	۱۶، ۱۲، ۲	۹
۳۰ شینه IEEE	۲۹، ۱۵، ۱۰، ۶	۷
۳۹ شینه IEEE	۲۶، ۲۳، ۱۵، ۶، ۳	۱۵
۵۷ شینه IEEE	۳۸، ۳۵، ۳۰، ۱۹، ۱۵، ۱۳، ۶	۱۹

جدول (۵): تعداد و عمق رویت‌ناپذیری شین‌ها با هدف حداقل نمودن عمق رویت‌ناپذیری

شبکه تست	عمق ۱	عمق ۲	عمق ۳	عمق ۴	عمق ۵	عمق ۶
۱۴ شینه IEEE	۲	۱	۰	۰	۰	۰
۲۴ شینه IEEE	۲	۲	۱	۰	۰	۰
۳۰ شینه IEEE	۵	۱	۰	۰	۰	۰
۳۹ شینه IEEE	۵	۴	۱	۰	۰	۰
۵۷ شینه IEEE	۵	۰	۳	۱	۰	۰

با مقایسه جدول‌های ۳ و ۵، می‌توان دریافت که در روش حداقل عمق رویت‌ناپذیری، تعداد عمق‌ها با درجه پایین افزایش یافته و جایگزین عمق‌های رویت‌ناپذیر با درجه بالا شده است که مورد انتظار نیز بود. به‌عنوان مثال در شبکه ۳۹ شینه، در روش حداکثر رویت‌پذیری پنج عدد عمق یک و یک عدد عمق هفت وجود داشت که تخمین ولتاژ هفت شین رویت‌ناپذیر متصل به هم کار دشواری است و دقت تخمین را به شدت کاهش خواهد داد؛ اما در روش حداقل عمق رویت‌ناپذیری در شبکه ۳۹ شینه، پنج عدد عمق یک، چهار عدد عمق دو و یک عدد عمق یک وجود دارد که باعث تسهیل عمل تخمین ولتاژ شین‌های رویت‌ناپذیر و افزایش دقت نتایج حاصله خواهد شد.

از طرف دیگر با مقایسه نتایج جدول‌های ۲ و ۴ مشاهده می‌شود که با وجود برابر بودن تعداد PMU های مورد استفاده در هر دو روش، در روش حداقل نمودن عمق، میزان رویت‌پذیری شین‌های موجود در شبکه به‌طور میانگین ۶۸٪ کل شین‌ها می‌باشد. این در حالی است که در روش حداکثر رویت‌پذیری این مقدار ۷۵٪ از کل شین‌ها را شامل می‌شود. در نتیجه با افزایش تعداد شین‌های رویت‌ناپذیر، تعداد شین-

های تخمین زده شده افزایش یافته که خود باعث افزایش خطا در تخمین حالت شبکه خواهد شد.

با در نظر گرفتن موارد مطرح شده، استفاده از هر کدام از روش‌های بیان شده به‌تنهایی نمی‌تواند تمام خواسته‌های بهره‌بردار را فراهم سازد. در روش حداکثر رویت‌پذیری، تعداد کمتری شین رویت‌ناپذیر وجود داشت؛ اما وجود عمق‌های رویت‌ناپذیری بالا باعث کاهش دقت مسئله می‌شد و در روش حداقل عمق نیز شاهد عمق‌های پایین‌تری بودیم؛ ولی تعداد شین‌های رویت‌ناپذیر در این روش نسبت به روش قبل افزایش یافته بود.

### ۳-۳- حداکثر رویت‌پذیری شین‌ها و حداقل نمودن عمق‌های رویت‌ناپذیری شین‌های شبکه

این روش به منظور ایجاد تعادل میان دو هدف رویت‌پذیری حداکثری شین‌های موجود در هر شبکه و حداقل نمودن عمق‌های رویت‌ناپذیری به‌صورت هم‌زمان پیشنهاد شده است. مکان نصب PMU ها و تعداد شین‌های رویت‌ناپذیری برای شبکه‌های تست، به دست آمده از شبیه‌سازی، در جدول ۶ آورده شده است. همچنین تعداد هر عمق رویت‌ناپذیری به تفکیک درجه عمق در جدول ۷ لیست شده است.

جدول (۶): مکان نصب بهینه PMU و تعداد شین‌های رویت‌ناپذیر شبکه با اهداف رویت‌پذیری حداکثری شین‌ها و حداقل نمودن عمق رویت‌ناپذیری

شبکه تست	مکان نصب PMU	تعداد شین‌های رویت-ناپذیر
۱۴ شینه IEEE	۶، ۴	۳
۲۴ شینه IEEE	۱۶، ۹، ۵	۷
۳۰ شینه IEEE	۲۷، ۱۵، ۱۰، ۶	۶
۳۹ شینه IEEE	۲۹، ۱۶، ۱۳، ۶، ۳	۱۳
۵۷ شینه IEEE	۳۸، ۳۵، ۲۴، ۱۸، ۱۵، ۹، ۸	۱۷

جدول (۷): تعداد و عمق رویت‌ناپذیری شین‌ها با اهداف رویت‌پذیری حداکثری شین‌ها و حداقل نمودن عمق رویت‌ناپذیری

شبکه تست	عمق ۱	عمق ۲	عمق ۳	عمق ۴	عمق ۵	عمق ۶
۱۴ شینه IEEE	۳	۰	۰	۰	۰	۰
۲۴ شینه IEEE	۲	۱	۱	۰	۰	۰
۳۰ شینه IEEE	۴	۱	۰	۰	۰	۰
۳۹ شینه IEEE	۲	۲	۱	۱	۰	۰
۵۷ شینه IEEE	۷	۲	۲	۰	۰	۰

با بررسی نتایج به دست آمده در این روش مشاهده می‌شود که به‌طور متوسط حدود ۷۳٪ درصد از کل شین‌های موجود در هر شبکه رویت‌پذیر شده‌اند (جدول ۶). همچنین، همانگونه که در جدول ۷ آورده شده است اکثر شین‌های رویت‌ناپذیر را عمق‌های یک و دو



مسئله جایابی برای رسیدن به بهترین تخمین حالت در سیستم قدرت، از هر دو مفهوم رویت پذیری و عمق رویت ناپذیری برای حداقل کردن خطای موجود در تخمین حالت استفاده می‌کند که نتایج به دست آمده کارایی روش پیشنهادی را به خوبی نشان می‌دهد.

## منابع و مراجع

- [1] B. Zaker, M. Karrari, M. Mirsalim, G. B. Gharehpetian, N. Moaddabi, "Pmu-Based Matching Pursuit Method for Black-Box Modeling of Synchronous Generator," Journal of Iranian Association of electrical and electronics engineering, vol. 3, no. 12, pp. 33-40, 1394.
- [2] ترکاشوند امین، قاسمی حسن، امینی فر فرخ، "تخمین پارامترهای مدل کلاسیک ژنراتور با استفاده از داده‌های PMU"، مجله مهندسی برق و الکترونیک ایران، جلد ۱۴، شماره ۱، صفحات ۷۳-۸۲، ۱۳۹۶.
- [3] S. S. Noreen, V. Roy, and S. B. Bayne, "Phasor measurement unit integration: A review on optimal PMU placement methods in power system," 5th IEEE Reg. 10 Humanit. Technol. Conf. 2017, R10-HTC 2017, vol. 2018-Janua, pp. 328-332, 2018.
- [4] N. M. Manousakis, G. N. Korres, and P. S. Georgilakis, "Optimal placement of phasor measurement units: A literature review," 16th International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems, pp. 1-6, 2011.
- [5] K. K. More and H. T. Jadhav, "A literature review on optimal placement of phasor measurement units," Proc. 2013 Int. Conf. Power, Energy Control. ICPEC 2013, pp. 220-224, 2013.
- [6] K. G. Khajeh, E. Bashar, A. M. Rad, and G. B. Gharehpetian, "Integrated Model Considering Effects of Zero Injection Buses and Conventional Measurements on Optimal PMU Placement," IEEE Trans. Smart Grid, vol. 8, no. 2, pp. 1006-1013, 2017.
- [7] J. Aghaei, A. Baharvandi, A. Rabiee, and M. A. Akbari, "Probabilistic PMU Placement in Electric Power Networks: An MILP-Based Multiobjective Model," IEEE Trans. Ind. Informatics, vol. 11, no. 2, pp. 332-341, 2015.
- [8] C. Lu, Z. Wang, M. Ma, R. Shen, and Y. Yu, "An Optimal PMU Placement with Reliable Zero Injection Observation," IEEE Access, vol. 6, pp. 54417-54426, 2018.
- [9] B. Gou and R. G. Kavasseri, "Unified PMU placement for observability and bad data detection in state estimation," IEEE Trans. Power Syst., vol. 29, no. 6, pp. 2573-2580, 2014.
- [10] R. F. Nuqui and A. G. Phadke, "Phasor measurement unit placement based on incomplete observability," Proc. IEEE Power Eng. Soc. Transm. Distrib. Conf., vol. 2, pp. 888-893, 2002.
- [11] J. S. Bhonsle and A. S. Junghare, "Staged Placement of PMUs in a Power Grid," 2019 5th Int. Conf. Adv. Comput. Commun. Syst. ICACCS 2019, pp. 563-566, 2019.
- [12] T. K. Maji and P. Acharjee, "A priority-based multistage PMU installation approach for direct observability of all network buses," IEEE Syst. J., vol. 13, no. 1, pp. 885-893, 2019.
- [13] D. Dua, S. Dambhare, R. K. Gajbhiye, and S. A. Soman, "Optimal multistage scheduling of PMU

تشکیل داده‌اند و در هیچ‌کدام از شبکه‌های مورد آزمایش عمق بیشتر از چهار مشاهده نمی‌شود. جدول ۸ درصد میانگین رویت‌پذیری شین‌ها در شبکه‌های تست و نیز بالاترین درجه عمق رویت‌ناپذیری در بین تمامی شبکه‌های تست را برای هر سه سناریوی شبیه‌سازی شده نشان می‌دهد.

جدول (۸): مقایسه میانگین رویت‌پذیری و درجه عمق سه سناریو

نوع روش	میانگین رویت‌پذیری شین‌ها (%)	بالاترین درجه عمق رویت‌ناپذیری
سناریو اول	۷۵	۷
سناریو دوم	۶۸	۴
سناریو سوم	۷۳	۴

با مقایسه نتایج به دست آمده از روش پیشنهادی در سناریو سوم با دو سناریو دیگر مشاهده می‌شود که با وجود تعداد یکسان PMU، روش پیشنهادی در سناریو سوم توانسته است تعادل مطلوبی میان دو روش دیگر ایجاد نموده و به‌صورت هم‌زمان قادر به برآورده نمودن دو هدف حداکثر رویت‌پذیری و حداقل عمق رویت‌ناپذیری می‌باشد؛ در نتیجه بهره‌بردار قادر خواهد بود با تعداد مشخصی از PMU‌ها به سطح قابل قبولی از رویت‌پذیری شبکه و حداقل عمق دست یابد. به عبارت دیگر در این حالت بهره‌بردار به کمترین مقدار خطا در تخمین حالت دست پیدا می‌کند.

## ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله روشی برای جایابی بهینه واحدهای اندازه‌گیری فازور با هدف دستیابی به بیشترین رویت‌پذیری و کمترین عمق رویت‌ناپذیری با داشتن تعداد محدود PMU پیشنهاد شد. برای رسیدن به این منظور، ابتدا فرمول‌بندی مناسب و جامعی با هدف رسیدن به کمترین درجه عمق در مسئله جایابی بهینه PMU ارائه شد. سپس مسئله جایابی در سه سناریوی مختلف با هدف حداکثر نمودن تعداد شین‌های رویت‌پذیر در سیستم، حداقل نمودن عمق رویت‌ناپذیری و نیز با هدف حداکثر نمودن تعداد شین‌های رویت‌پذیر و حداقل نمودن عمق رویت‌ناپذیری به صورت هم‌زمان، برای سیستم‌های تست ۱۴، ۲۴، ۳۰، ۳۹ و ۵۷ شینه IEEE شبیه‌سازی شد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که با هدف حداکثر نمودن رویت‌پذیری در شبکه می‌توان ۷۵٪ از شین‌ها را رویت‌پذیر نمود. در این حالت بیشترین درجه عمق به دست آمده در سیستم ۳۹ و ۵۷ شینه و با درجه عمق ۷ بود. در حالی که در سناریو با هدف حداقل نمودن عمق رویت‌ناپذیری، ۶۸٪ شین‌ها رویت‌پذیر و حداکثر عمق در این سناریو برابر با درجه ۴ بدست آمد. با لحاظ کردن هر دو تابع هدف در مسئله بهینه‌سازی، حداکثر رویت‌پذیری برابر با ۷۳٪ و بیشترین عمق با درجه ۴ حاصل شد. روش پیشنهادی در این مقاله علاوه بر نشان دادن اهمیت بحث عمق رویت‌ناپذیری در

- placement: An ILP approach,” IEEE Trans. Power Deliv., vol. 23, no. 4, pp. 1812–1820, 2008.
- [14] R. F. Nuqui and A. G. Phadke, “Phasor measurement unit placement techniques for complete and incomplete observability,” IEEE Trans. Power Deliv., vol. 20, no. 4, pp. 2381–2388, 2005.
- [15] B. Gou, “Generalized integer linear programming formulation for optimal PMU placement,” IEEE Trans. Power Syst., vol. 23, no. 3, pp. 1099–1104, 2008.
- [16] J. De La Ree, V. Centeno, J. S. Thorp, and A. G. Phadke, “Synchronized Phasor Measurement Applications in Power Systems,” IEEE Trans. Smart Grid, vol. 1, no. 1, pp. 20–27, 2010.
- [17] R. F. Nuqui, “State Estimation and Voltage Security Monitoring Using Synchronized Phasor Measurements,” Ph.D. Diss. Dept. Elect. Comput. Eng., Virginia Polytech. Inst. State Univ., Blacksburg, VA, pp. 1–206, 2001.
- [18] G. N. Korres, P. S. Georgilakis, N. C. Koutsoukis, and N. M. Manousakis, “Numerical observability method for optimal phasor measurement units placement using recursive Tabu search method,” IET Gener. Transm. Distrib., vol. 7, no. 4, pp. 347–356, 2013.
- [19] Z. H. Rather, Z. Chen, P. Thogersen, P. Lund, and B. Kirby, “Realistic Approach for Phasor Measurement Unit Placement: Consideration of Practical Hidden Costs,” IEEE Trans. Power Deliv., vol. 30, no. 1, pp. 3–15, Feb. 2015.
- [20] K. Gharani Khajeh, E. Bashar, A. Mahboub Rad, and G. B. Gharehpetian, “Integrated Model Considering Effects of Zero Injection Buses and Conventional Measurements on Optimal PMU Placement,” IEEE Trans. Smart Grid, vol. 8, no. 2, pp. 1–1, 2015.
- [21] F. Aminifar, A. Khodaei, M. Fotuhi-Firuzabad, and M. Shahidehpour, “Contingency-constrained PMU placement in power networks,” IEEE Trans. Power Syst., vol. 25, no. 1, pp. 516–523, Feb. 2010.
- [22] J. McCall, “Genetic algorithms for modelling and optimisation,” J. Comput. Appl. Math., vol. 184, no. 1, pp. 205–222, Dec. 2005.

<sup>1</sup> Phasor Measurement Unit (PMU)

<sup>2</sup> Incomplete observability

<sup>3</sup> Depth of Unobservability

