

## مکان‌یابی چندهدفه واحدهای اندازه‌گیری فازور با در نظر گرفتن ارزش واقعی نایقینی‌ها

### در سیستم قدرت مبتنی بر اتوماتای یادگیر سلولی

سید مهدی مظهري<sup>۱</sup> و حمید لسانی<sup>۲</sup>

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه تهران- تهران- ایران

mazhari@ut.ac.ir

۲- استاد، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه تهران- تهران- ایران

lesani@ut.ac.ir

**چکیده:** واحدهای اندازه‌گیری فازور، از جمله ادواتی است که در تخمین حالت سیستم قدرت نقش اساسی داشته، به بهره‌بردار شبکه کمک می‌کند تا تصمیمات لازم احتمالی را برای حفظ عملکرد سیستم اتخاذ نماید. در این مقاله، مسأله مکان‌یابی چندهدفه واحدهای اندازه‌گیری فازور با اهدافی، همچون مشاهده‌پذیری کامل سیستم قدرت، افزایش تعداد دفعات مشاهده‌پذیری شین‌ها و ارزش قابلیت اطمینان بررسی شده است. برای این منظور، مسأله مکان‌یابی واحدهای اندازه‌گیری فازور در قالبی جدید فرمول‌بندی و با ارائه نگرشی نوین بر ارزش قابلیت اطمینان، تابع هدف جدیدی تعریف شده است. سپس، مسأله مکان‌یابی چندهدفه واحدهای فازوری در قالب یک مسأله بهینه‌سازی، با استفاده از اتوماتای یادگیر سلولی باز، بررسی و مراحل تطابق آن با مسأله حاضر تشریح شده است. در پایان، با حل مسأله مکان‌یابی واحدهای فازوری برای چندین شبکه نمونه و نیز شبکه سراسری  $۲۳۰\text{kV}$  و  $۴۰۰\text{kV}$  انتقال ایران، توسط راهکار پیشنهادی و مقایسه نتایج با پاسخ‌های سایر روش‌ها، کارایی راهکار پیشنهادی بررسی و نشان داده شده است.

**واژه‌های کلیدی:** اتوماتای یادگیر سلولی، قابلیت اطمینان سیستم قدرت، مشاهده‌پذیری سیستم قدرت، مکان‌یابی بهینه، واحد اندازه‌گیری فازور

#### ۱- مقدمه

ابزارهای جدید تخمین حالت روی آورده‌اند. یکی از این ابزارها، واحد اندازه‌گیری فازور<sup>۱</sup> ( $PMU$ ) است. واحد فازوری، یک دستگاه اندازه‌گیری است که فازور ولتاژ شین و جریان خطوط متصل به آن شین را اندازه‌گیری می‌نماید [۱]. با توجه به اینکه معین بودن فازور ولتاژ و جریان در تمام شین‌ها و خطوط، شرط لازم و کافی برای رؤیت‌پذیری کامل شبکه است، لذا نصب تعداد کافی واحد فازوری، تخمین حالت کامل شبکه را تضمین می‌نماید. با توجه به لزوم همزمانی اندازه‌گیری‌ها در شبکه، واحدهای فازوری از یک سیگنال سنکرون‌کننده، که غالباً توسط سیستم موقعیت‌یاب جهانی<sup>۲</sup> ( $GPS$ ) ارسال می‌شود، استفاده می‌کنند. با توجه به هزینه بالای واحدهای فازوری،

با توجه به گسترش روزافزون مصرف انرژی الکتریکی، طراحی مناسب شبکه آینده و اصلاح سیستم فعلی از اهمیت در خور توجهی برخوردار گردیده است. فراهم آوردن شرایطی برای تحلیل، سریع و بی‌نقص شبکه و جلوگیری از ناپایداری‌های احتمالی از جمله مواردی است که در طراحی شبکه مد نظر قرار می‌گیرد. با توجه به ضعف روش‌های سنتی در تخمین حالت سیستم قدرت، طراحان شبکه به

۱ تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۰/۰۹/۰۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۱/۷/۴

نام نویسنده مسئول: سید مهدی مظهري

نشانی نویسنده مسئول: ایران - تهران - خیابان کارگر شمالی - پردیس

دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران - دانشکده برق و کامپیوتر

در مقابل، برخی دیگر از مطالعات انجام شده مکان‌یابی واحدهای فازوری را با در نظر گرفتن پارامترهایی، نظیر عدم قطعیت<sup>۳</sup> در خطوط و واحدهای فازوری [۸]، [۱۰]، [۱۲] و [۱۵] و یا بهینه‌سازی چندهدفه<sup>۴</sup> [۱۶-۱۷]، بررسی کرده‌اند، در حالی که در [۱۵] مکان‌یابی واحدهای فازوری با در نظر گرفتن اثر خروج خطوط فرمول‌بندی شده، مرجع [۸] اثر خروج یک یا چند واحد فازوری را بررسی نموده است. از طرف دیگر، مراجع [۱۰] و [۱۲] اثر خروج همزمان خطوط و واحد فازوری را مد نظر قرار داده‌اند. علاوه بر این، [۱۲] با ارائه تعریف جدیدی از مشاهده‌پذیری<sup>۵</sup>، اثر مکان‌یابی واحدهای فازوری را در شرایط مشاهده‌پذیری غیرکامل شبکه بررسی نموده است. با این همه، در هیچ یک از مطالعات انجام شده ارزش ریالی قابلیت اطمینان شبکه در مکان‌یابی واحدهای فازوری بررسی نشده است. از طرفی، دست‌یابی به پاسخ بهینه به نحوی که همزمان تعداد واحدهای فازوری موردنیاز کمینه‌شده و تعداد دفعات مشاهده‌پذیری شین‌ها بیشینه گردد، با مشکلاتی همراه بوده است. در حالی که [۱۷] برای حل مشکل از دو مرحله بهینه‌سازی استفاده نموده، [۱۶] با استفاده از بهینه‌سازی دوهدفه سعی در حل مشکل کرده است.

در این مقاله مسأله مکان‌یابی چندهدفه واحدهای فازوری در قالبی جدید بررسی شده است. برای این منظور با ارائه تعریف جدیدی از ارزش قابلیت اطمینان در مسأله مکان‌یابی واحدهای فازوری، تابع هدف واحدی در جهت بهینه‌سازی همزمان پارامترهای مورد نظر تعریف می‌گردد. از طرفی، با استفاده از رویکرد گراف‌محور، جمله جدیدی به تابع هدف افزوده شده، به گونه‌ای که امکان بهینه‌سازی همزمان تعداد واحدهای فازوری و تعداد دفعات مشاهده‌پذیری مهیا شده است. در پایان، با حل مسأله مکان‌یابی واحدهای فازوری برای چندین شبکه نمونه و نیز شبکه سراسری ۲۳۰<sup>kV</sup> و ۴۰۰<sup>kV</sup> انتقال ایران، کارایی راهکار پیشنهادی در قالب چندین سناریو، بررسی و نشان داده شده است.

تعیین مکان و تعداد بهینه این واحدها به منظور مشاهده‌پذیری کامل شبکه، از جمله مواردی است که باید مد نظر طراحان سیستم قدرت قرار گیرد [۲].

طراحی بهینه یک مجموعه مستلزم تعریف مکانیزم‌هایی و به گونه‌ای است که اهداف مورد نظر با کمترین هزینه حاصل شده و قیود موجود نیز رعایت گردند. با توجه به اهمیت مسأله مکان‌یابی واحدهای اندازه‌گیری فازور، تا کنون پژوهش‌های مختلفی در این زمینه انجام شده است [۱۹-۳]. از آنجایی که هر گونه تلاشی در جهت کاهش هزینه‌های توسعه، صرفه‌جویی در هزینه‌های سیستم را به دنبال خواهد داشت، لذا دسته‌ای از این پژوهش‌ها با ارائه روش‌های جدید و یا اعمال الگوریتم‌های بهینه‌سازی تکاملی به مسأله سعی در بهبود پاسخ‌ها داشته‌اند. استفاده از الگوریتم ژنتیک [۴-۳]، الگوریتم مهاجرت پرندگان [۶-۵]، الگوریتم برنامه‌ریزی اعداد صحیح [۱۰-۷] و استفاده از روش‌های ابتکاری [۱۲-۱۱]، نمونه‌های تحقیقات انجام شده در این زمینه هستند.

روش‌های بهینه‌سازی تکاملی، روش‌های مبتنی بر جمعیت بوده که در آنها به نحو شایسته‌ای از عملگرهای انتخاب و تغییر تصادفی استفاده می‌شود. اگر چه این روش‌ها، در اغلب موارد، از کیفیت پاسخ‌های مناسبی برخوردارند، با این حال، دو اشکال عمده دارند: یکی سرعت بسیار پایین همگرایی و دیگری عدم رسیدن به جواب واحد در چندین بار اجرای الگوریتم یا به عبارت دیگر، توقف در یکی از کمینه‌های محلی. در حقیقت، هنگامی که ارتباط متغیرهای بهینه‌سازی پیچیده شده، تعداد آنها زیاد می‌گردد، احتمال محبوس ماندن الگوریتم در کمینه‌های محلی افزایش می‌یابد.

با توجه به جاذبه روش‌های بهینه‌سازی تکاملی، تحقیقات متعددی برای حل این مشکلات انجام شده است. برای مثال، مراجع [۴] و [۱۲] از ترکیب روش‌های بهینه‌سازی تکاملی و ایده‌های ابتکاری برای حل مسأله استفاده نموده‌اند. دسته‌ای دیگر نیز، با ارائه راهکارهای ابتکاری سعی در کوچک‌سازی شبکه دارند [۱۴-۱۳].

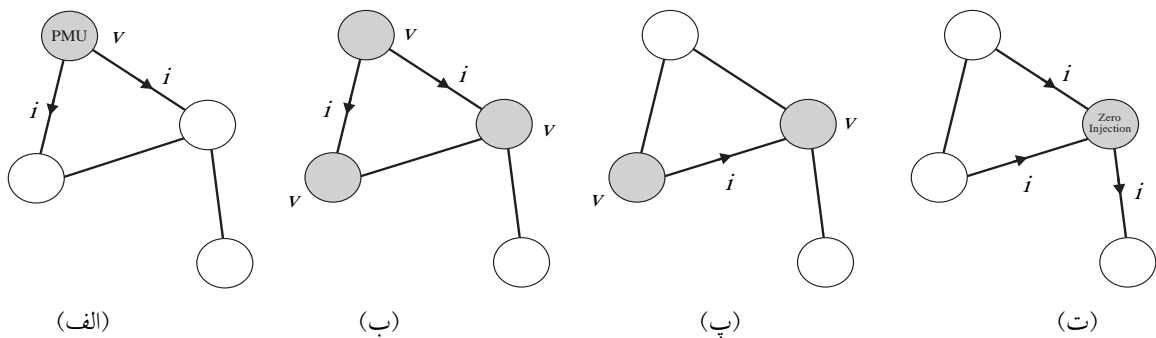
مشاهده‌پذیری یک گراف یک‌پارچه، مبتنی بر مجموعه قوانین الکتریکی و شرایط توزیع توان، مطابق چهار قانون زیر صورت می‌پذیرد:

قانون اول) فازور ولتاژ و جریان تمام یال‌های متصل به گره‌ای که واحد فازوری در آن قرار گرفته، مشخص است (شکل ۱-الف).

قانون دوم) اگر فازور ولتاژ یک گره و جریان یکی از یال‌های متصل به آن مشخص باشد، فازور ولتاژ گره دیگر متصل به آن یال نیز معین می‌گردد (شکل ۱-ب).

قانون سوم) در صورتی که ولتاژ هر دو گره متصل به یک یال مشخص باشند، جریان آن نیز معین می‌گردد (شکل ۱-پ).

قانون چهارم) اگر جریان تمام یال‌های متصل به گره‌ای با جریان تزریقی صفر بجز یکی از آنها مشخص باشد، جریان یال باقیمانده نیز معین می‌گردد (شکل ۱-ت).



شکل (۱): قوانین توپولوژیکی مشاهده‌پذیری

میان مجموعه‌ای از شین‌های نامزد تعیین می‌گردد. از طرف دیگر، با توجه به اینکه تغییر ساختار کنترلی شبکه و استفاده از فناوری روزآمد تا حدی زمانبر و مستلزم هزینه فراوان است، لذا معمولاً شرکت‌های برق منطقه‌ای نصب واحدهای فازوری را به تدریج انجام می‌دهند [۹]. در چنین شرایطی، طراحان به منظور مشاهده‌پذیر شدن شبکه از واحدهای اندازه‌گیری سنتی موجود در شبکه نیز استفاده می‌نمایند. بر این اساس، مسأله مکان‌یابی واحدهای فازوری در حضور

## ۲- تعریف مسأله مکان‌یابی واحدهای فازوری و مفهوم مشاهده‌پذیری سیستم قدرت

### ۲-۱ مشاهده‌پذیری سیستم قدرت

مشاهده‌پذیری، ساختاری کنترلی به معنای معین بودن مجموعه متغیرهای اساسی به نحوی است که تخمین حالت شبکه، بدون کمترین کاستی انجام گیرد. در چنین شرایطی، بازسازی رفتار سیستم و تخمین متغیرهای حالت شبکه بر اثر مشاهدات خارجی (همچون وقوع پیشامدهای مهم در سیستم قدرت)، امکان‌پذیر است. در حالت کلی بررسی مشاهده‌پذیری یک مجموعه مستلزم تشکیل ماتریس هانکل و استفاده از آزمون‌های رؤیت‌پذیری است [۱۸]. با توجه به اینکه محاسبات لازم برای بررسی رؤیت‌پذیری شبکه‌های بزرگ مقیاس به حافظه و زمان زیادی نیاز دارد، لذا معمولاً مشاهده‌پذیری سیستم‌های قدرت با استفاده از روش توپولوژیک انجام می‌گیرد [۱۹]. در این روش بررسی

### ۲-۲ تعریف مسأله مکان‌یابی واحدهای فازوری

هدف از مکان‌یابی مرسوم واحدهای اندازه‌گیری فازور، تعیین متغیرهای تصمیم‌گیری، شامل تعداد و مکان واحدهای اندازه‌گیری فازوری به گونه‌ای است که شبکه مشاهده‌پذیر کامل و کمترین هزینه به سیستم تحمیل گردد. با توجه به اینکه از لحاظ فنی امکان احداث واحد فازوری در تمام شین‌ها وجود ندارد، لذا مکان مناسب واحدهای فازوری از

$$k_{redun} = \frac{\left( k_g \times n_{measur} + \sum_{i \in \Omega_i^{bus}} (n_{\Omega_i^{bus}} - f_i) \right)}{\left( k_g \times n_{measur} + \sum_{i \in \Omega_i^{bus}} (n_{\Omega_i^{bus}} - f_i) + \varepsilon \right)} \quad (5)$$

در رابطه (۴)، جمله اول معرف هزینه مورد نیاز برای نصب واحدهای فازوری انتخاب شده بوده، جمله دوم، بیشینه شدن تعداد دفعات مشاهده پذیری شین‌ها را تضمین می‌نماید. در این عبارت،  $k_{redun}$  نمایانگر میزان مشاهده پذیری شین‌ها بوده و در اغلب مواقع عددی کوچکتر از یک است.  $k_{redun}$  مطابق رابطه (۵) فرمول‌بندی شده و هر چه کوچکتر باشد. مجموع تعداد دفعات مشاهده پذیری شین‌ها بیشتر خواهد بود. حداکثر تعداد دفعات مشاهده پذیری شین‌ها، در شرایط عدم حضور واحدهای غیرسنکرون، زمانی حاصل می‌شود که همه شین‌ها دارای واحد فازوری باشند؛ در چنین شرایطی تعداد دفعات مشاهده پذیری هر شین به اندازه یک واحد از مجموع شین‌های متصل به آن بیشتر است. این یک واحد معرف مشاهده پذیری شین مربوطه بر اثر واحد اندازه‌گیری فازور در همان شین است. بر این اساس، در رابطه (۵)،  $\sum_{i \in \Omega_i^{bus}} n_{\Omega_i^{bus}}$  نمایانگر حداکثر تعداد دفعات مشاهده پذیری شین‌هاست.

بر اثر حضور اندازه‌گیرهای غیرسنکرون و نیز شین‌های تزریق صفر، تعداد دفعات مشاهده پذیری نسبت به قبل، حداکثر به اندازه  $n_{measur}$  افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه راهکار تعریف شده‌ای برای محاسبه تعداد دفعات مشاهده پذیری شین‌ها در حضور اندازه‌گیرهای غیرسنکرون وجود ندارد، لذا مقدار ذکر شده در عدد  $k_g$  ضرب شده تا رابطه استخراج شده تحت هر شرایطی صادق باشد. در این مطالعه  $k_g = 1$  فرض شده و از طرفی مخرج رابطه (۵) با یک عدد خیلی کوچک ( $\varepsilon$ ) جمع شده است تا از  $k_{redun} < 1$  اطمینان حاصل شود. با توجه به اینکه  $k_{redun}$  عدد کوچکی است، به منظور اثربخشی بهتر این عبارت در همگرایی الگوریتم به پاسخ بهینه، در  $\min(\Omega_{cost}^{PMU})$  ضرب شده است. از طرفی، کمترین هزینه برای نصب واحد فازوری در نظر گرفته شده تا ارزش کل جمله دوم نسبت به

اندازه‌گیرهای غیرسنکرون (همچون اندازه‌گیر توان انتقالی، اندازه‌گیر توان تزریقی و اندازه‌گیر ولتاژ) انجام می‌گیرد.

در مکان‌یابی چندهدفه واحدهای فازوری، مسأله به گونه‌ای بررسی می‌گردد که علاوه بر کمینه‌سازی تعداد واحدهای مورد نیاز، اهداف جانبی، از جمله: بیشترین تعداد دفعات مشاهده پذیری و نیز عملکرد مناسب در شرایط خروج خط و یا خروج واحد فازوری، برای هر یک از شین‌های شبکه حاصل آید.

الف) تابع هدف به منظور کمینه‌سازی تعداد واحدهای فازوری:

تابع هدف مرسوم در مسأله مکان‌یابی واحدهای فازوری به صورت رابطه زیر است:

$$\min F_1 = \sum_{i \in \Omega_{bus}^{PMU}} C_i \quad (1)$$

$$S.t. \quad f_i \geq n_i^{observ}, \quad \forall i \in \Omega_{total}^{bus} \quad (2)$$

$$\sum_{i \in \Omega_{bus}^{PMU}} C_i \leq C_{max} \quad (3)$$

مطابق این رابطه، کمترین تعداد از واحد فازوری که قیود شبکه را رعایت کنند، پاسخ بهینه مسأله خواهند بود. قیود اساسی مسأله مکان‌یابی واحدهای فازوری در روابط (۲) و (۳) فرمول‌بندی شده‌اند. مطابق این روابط به ترتیب مشاهده‌پذیری شبکه (با تعداد دفعات مشاهده‌پذیری) و نیز محدودیت هزینه توسعه به مسأله اعمال می‌گردد.

ب) تابع چندهدفه به منظور کمینه‌سازی تعداد واحدهای فازوری و بیشینه‌سازی تعداد دفعات مشاهده‌پذیری:

چنانچه بیشینه بودن تعداد دفعات مشاهده‌پذیری نیز به عنوان یک هدف جانبی انتخاب گردد، لازم است تا تابع هدف به نحو شایسته‌ای اصلاح شود. در این مقاله تابع برازندگی مرکب از این دو هدف مطابق رابطه زیر فرمول‌بندی شده است:

$$\min F_2 = \sum_{i \in \Omega_{bus}^{PMU}} C_i + k_{redun} \times \min(\Omega_{cost}^{PMU}) \quad (4)$$

$$k_{reli}^{PMU} = \frac{\sum_{i \in \Omega_{bus}^{PMU}} \left( n_{PMU,i}^{outage} \times \tau_{PMU,i}^{clear} \times k_{reli,i}^{worth} \right) \times C_i \times \bigcup_{j \in \Omega_{outage,i}^{PMU}, k \in \Omega_j^{line}} \xi_{line,k}^{fault}}{8760 \times \sum_{i \in \Omega_{bus}^{line}} \xi_{line,i}^{fault}} \quad (6)$$

$$k_{reli}^{line} = \frac{\sum_{i \in \Omega_{bus}^{line}} \left( n_{line,i}^{outage} \times \tau_{line,i}^{clear} \right) \times \bigcup_{j \in \Omega_{outage,i}^{line}, k \in \Omega_j^{line}} \xi_{line,k}^{fault} \times k_{reli,j}^{worth} \times C_j}{8760 \times \sum_{i \in \Omega_{bus}^{line}} \xi_{line,i}^{fault}} \quad (7)$$

مطابق این روابط مجموعه اغتشاشاتی که بر اثر خروج موقت خطوط (یا از دست رفتن موقت واحدهای فازوری) رصد نمی‌شوند، محاسبه‌شده، با اعمال هزینه واحد فازوری، بر تعداد کل اغتشاشات تقسیم می‌گردند. برای این منظور، میانگین دفعات خروج خطوط (یا واحدهای فازوری) در مدت زمان تعمیر آنها ضرب‌شده و میانگین مدت‌زمان خروج آنها محاسبه شده است. سپس تعداد اغتشاشات احتمالی که در فاصله زمانی خروج خطوط (یا واحدهای فازوری) اتفاق می‌افتند، بر تعداد کل اغتشاشات در یک سال تقسیم شده است.

(د) تابع چندهدفه به منظور کمینه‌سازی تعداد واحدهای فازوری و بیشینه‌سازی تعداد دفعات مشاهده‌پذیری با در نظر گرفتن ارزش نایقینی‌ها:

رابطه (۸) تابع هدف مسئله مکان‌یابی چندهدفه واحدهای فازوری با در نظر گرفتن ارزش نایقینی‌ها را نشان می‌دهد:

$$\min F_3 = \sum_{i \in \Omega_{bus}^{PMU}} C_i + k_{redun} \times \min(\Omega_{cost}^{PMU}) + (k_{reli}^{PMU} + k_{reli}^{line}) + k_{const} \times \gamma \quad (8)$$

$$k_{const} = n_{bus} - \sum_{i \in \Omega_{total}^{bus}} \psi_i \quad (9)$$

جملات اول و دوم تابع هدف فوق کاملاً مشابه رابطه (۴) هستند؛ جمله سوم نیز نشان‌دهنده اثر قابلیت اطمینان بر مکان‌یابی واحدهای فازوری است. در این عبارت،  $k_{reli}^{PMU}$  معرف ارزش نایقینی در واحدهای فازوری و  $k_{reli}^{line}$  نشان‌دهنده ارزش نایقینی در خطوط شبکه است. با توجه

ارزش ریالی یک واحد فازوری، کمتر گردد. با این فرض، امکان حبس شدن پاسخ در کمینه محلی ناشی از افزایش تعداد واحدهای فازوری در بهینه‌سازی دو جمله اول بسیار محدود شده است.

(ج) ارزش نایقینی‌ها در مسئله مکان‌یابی واحدهای فازوری:

مسئله مکان‌یابی واحدهای فازوری در شرایط نایقینی عمدتاً با توجه به قید قابلیت اطمینان  $N - 1$  انجام گرفته است؛ بدین معنا که آرایش پیشنهادی برای واحدهای فازوری باید قید مشاهده‌پذیری کامل شبکه را در شرایط از دست رفتن هر یک از خطوط و یا هر یک از واحدهای فازوری، رعایت نماید. بدیهی است که اعمال چنین قیدی به مسئله سبب زیاد شدن تعداد واحدهای فازوری و افزایش هزینه‌ها می‌گردد. در این مقاله، مکان‌یابی واحدهای فازوری در شرایط نایقینی با توجه به ارزش آنها انجام می‌گیرد.

با توجه به اینکه هدف از مکان‌یابی واحدهای فازوری مشاهده‌پذیری کامل شبکه است، بهره‌بردار شبکه انتظار دارد تا تمامی اغتشاشات شبکه را با نصب تعداد کافی واحد فازوری، رصد نماید. از طرفی، می‌توان این‌گونه فرض نمود که یک واحد فازوری معین، عامل اصلی مشاهده مجموعه اغتشاشات انجام‌شده بر خطوطی است که این واحد فازوری سبب مشاهده‌پذیری آن شده است. این خطوط یا مستقیماً به شین واحد فازوری متصل‌اند و یا به شین‌هایی وصل‌اند که توسط واحد فازوری مورد مطالعه، مشاهده‌پذیر شده‌اند. بر این اساس، می‌توان تعریف جدیدی از قابلیت اطمینان را برای مسئله مکان‌یابی واحدهای فازوری ارائه نمود و آن این‌گونه است: ارزش ریالی یک واحد فازوری صرف مشاهده مجموعه‌ای از اغتشاشات می‌شود. اگر اثر نایقینی خطوط و واحدهای فازوری به حدی باشد که دسته‌ی زیادی از اغتشاشات رصد نگردند، از نظر اقتصادی به صرفه است که واحدهای فازوری جدیدی، علاوه بر واحدهای قبلی، به شبکه اضافه شوند. روابط (۶) و (۷) این ارزش اقتصادی را بر اثر نایقینی در واحد فازوری و خطوط شبکه محاسبه می‌نمایند:

$$\psi_i = \begin{cases} 1 & , f_i \geq 1 \\ 0 & , f_i = 0 \end{cases}, \quad \forall i \in \Omega_{total}^{bus} \quad (12)$$

در صورت قرارگیری یک اندازه‌گیر توان انتقالی در خط انتقال، توان گذرکرده از خط محاسبه می‌شود. لذا، در صورت داشتن ولتاژ هر یک از شین‌ها جریان گذرنده از خط محاسبه‌شده و ولتاژ شین دیگر طبق قانون سوم مشاهده‌پذیری توپولوژیک شبکه، تعیین می‌گردد. با توجه به این موارد، مشاهده می‌شود که بر اثر قرارگیری اندازه‌گیر توان انتقالی در یک خط، مشاهده‌پذیری یکی از شین‌ها مشاهده‌پذیری شین دیگر را تضمین می‌نماید. این مورد در جمله اول رابطه (۱۱) مدلل شده است. از طرف دیگر، در صورت قرارگیری اندازه‌گیر ولتاژ در یک شین، فازور ولتاژ آن شین محاسبه می‌گردد. بر این اساس، جمله دوم این رابطه مشاهده‌پذیری بر اثر قرارگیری اندازه‌گیر ولتاژ در یک شین را نشان می‌دهد.

اندازه‌گیر توان تزریقی به یک شین، یکی از انواع اندازه‌گیرهای غیرسنکرون مرسوم در سیستم‌های قدرت است. بر اثر حضور چنین اندازه‌گیری در یک شین، مشاهده‌پذیری یکی از شین‌های متصل به این واحد اندازه‌گیر، در شرایطی که سایر شین‌های متصل به آن مشاهده‌پذیر باشند، تضمین خواهد شد. این شرایط به وسیله آخرین جمله رابطه (۱۱) مدلل‌سازی شده است. در این جمله، علامت [.] نشان‌دهنده جزء صحیح بوده، شرایط باینری شدن عبارت را مهیا می‌نماید.

### ۳- اتوماتای یادگیر سلولی

#### ۳-۴ اتوماتای یادگیر

شاخه‌ای از نظریه کنترل تطبیقی به اتوماتای یادگیر<sup>۶</sup> اختصاص دارد. اتوماتای یادگیر ماشینی است که می‌تواند تعدادی متناهی عمل را انجام دهد. هر عمل انتخاب شده توسط یک محیط احتمالی ارزیابی و نتیجه ارزیابی در قالب سیگنالی مثبت یا منفی به اتوماتا داده می‌شود. این پاسخ در انتخاب عمل بعدی اتوماتا تأثیرگذار است. هدف نهایی این است که اتوماتا یاد بگیرد که از بین اعمال

به اینکه ارزش نایقینی‌ها متناسب با قیمت واحد فازوری و بر مبنای واحد پول محاسبه شده‌اند، لذا بهینه‌سازی همزمان سه جمله اول تابع هدف، پاسخ‌های منطقی را به دست می‌دهد.

جمله چهارم رابطه (۸) اثر قیود مشاهده‌پذیری شبکه را نشان می‌دهد. مطابق تعریف مسئله مکان‌یابی واحدهای فازوری، شرط مناسب بودن یک آرایش از واحدهای اندازه‌گیر، مشاهده‌پذیری کامل شبکه است. با توجه به اینکه در این مقاله مسئله مکان‌یابی واحدهای فازوری در قالبی جدید بررسی شده است، لذا به منظور بهبود فرآیند بهینه‌سازی، قیود مسئله به صورت یک ضریب جریمه در تابع هدف آورده شده‌اند. رابطه (۹) تعداد قیود رعایت‌نشده در شبکه را نشان می‌دهد ( $k_{const}$ )؛ با ضرب این جمله در یک عدد بسیار بزرگ، رعایت‌شدن قیود در ضمن فرآیند بهینه‌سازی تضمین می‌گردد.

## ۲-۳ قیود مشاهده‌پذیری مسئله مکان‌یابی واحدهای فازوری و اثر اندازه‌گیرهای غیرسنکرون

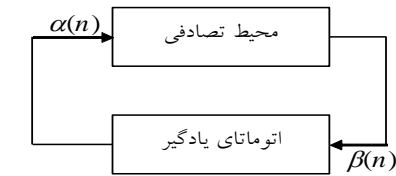
در مسئله مکان‌یابی واحدهای فازوری، هر یک از شین‌ها باید به تعداد از پیش تعیین‌شده مشاهده‌پذیر گردد. در حالی که این قید مطابق رابطه (۲) به مسئله اعمال شده است، تعداد دفعات مشاهده‌پذیری هر شین با توجه به رابطه (۱۰) محاسبه می‌گردد. در این رابطه جمله اول نشان‌دهنده تعداد دفعات مشاهده‌پذیر شدن شین  $i$  به واسطه حضور واحد فازوری در شین‌های مجاور و جمله دوم نشان‌دهنده تعداد دفعات مشاهده‌پذیری شین  $i$  به واسطه حضور اندازه‌گیرهای غیرسنکرون و یا شین تزریق صفر است. بر این اساس، اثر حضور اندازه‌گیرهای غیرسنکرون مطابق رابطه (۱۱) مدلل می‌شود:

$$f_i = \sum_{j \in \Omega_i^{bus}} (\beta_j + z_i^{non} \times \eta_{ij}), \quad \forall i \in \Omega_{total}^{bus} \quad (10)$$

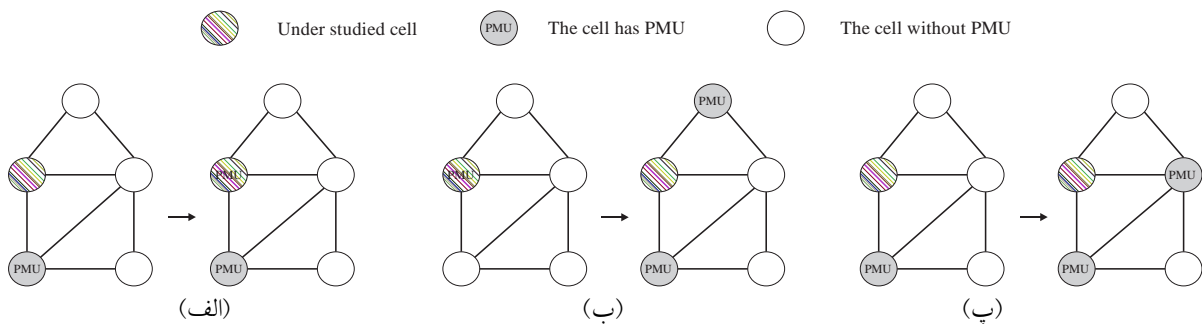
$$\eta_{ij} = \psi_j \times z_{ij}^{flow} + z_i^{volt} + z_j^{inj} \times \left[ \sum_{k \neq i \in \Omega_j^{bus}} \psi_k / (n_{\Omega_j^{bus}} - 1) \right], \quad \forall i, j \in \Omega_{total}^{bus} \quad (11)$$

محیط را می‌توان توسط سه‌تایی  $E \equiv \{\alpha, \beta, C\}$  نشان داد که در آن  $\alpha \equiv \{\alpha_1, \dots, \alpha_r\}$  مجموعه ورودی‌ها،  $\beta \equiv \{\beta_1, \dots, \beta_m\}$  مجموعه خروجی‌ها و  $C \equiv \{c_1, \dots, c_r\}$  مجموعه احتمال‌های جریمه است. اتوماتای یادگیر با ساختار ثابت با ماتریس احتمالات تغییر حالت ثابت<sup>۷</sup> مشخص می‌شود. نظریه زنجیره‌های مارکوف ابزار اصلی تجزیه و تحلیل این کلاس از اتوماتاست و در اغلب موارد، رفتار مقتضی با انتخاب احتمال تغییر حالت اتوماتا در پاسخ به خروجی محیط به دست می‌آید. رفتار کلی سیستم توسط ماتریس تغییر حالت زنجیره مارکوف تعیین می‌شود. با توجه به این که در این مقاله از اتوماتای ساختار متغیر استفاده شده است، در ادامه توضیحاتی در رابطه با این دسته از اتوماتاها داده می‌شود.

خود بهترین عمل را انتخاب کند. بهترین عمل، عملی است که احتمال دریافت پاداش از محیط را به حداکثر برساند. کارکرد اتوماتای یادگیر در تعامل با محیط در شکل (۲) نشان داده شده است [۲۲-۲۰]. تا کنون مسائل مختلفی از گراف، در حوزه ریاضیات [۲۳] و مسائلی چون مکان‌یابی سوئیچ‌های ATM [۲۴]، بهره‌برداری بهینه سیستم قدرت [۲۵] در حوزه علوم مهندسی با این روش حل و کارایی آن نشان داده شده است.



شکل (۲): ارتباط بین محیط و اتوماتای یادگیر



شکل (۳): قوانین محلی اتوماتای سلولی برای مسئله مکان‌یابی واحدهای فازوری

احتمال‌ها افزایش می‌یابند. در هر حال، تغییرات به گونه‌ای صورت می‌گیرد تا حاصل جمع  $p_i(n)$  همواره ثابت و مساوی یک باقی بماند. روابط زیر نمونه‌ای از الگوریتم‌های یادگیری خطی در اتوماتاهای یادگیر است [۲۲]:

الف) پاسخ مطلوب برای عمل  $i$ :

$$p_i(n+1) = \begin{cases} p_i(n) + k_{reward}(1-p_i(n)) & , j=i \\ (1-k_{reward})p_j(n) & , \forall j \neq i \end{cases} \quad (13)$$

ب) پاسخ نامطلوب برای عمل  $i$ :

$$p_i(n+1) = \begin{cases} (1-k_{penalty}) \cdot p_i(n) & , j=i \\ (k_{penalty}/n_{\Omega_\alpha} - 1) + (1-k_{penalty}) \cdot p_j(n) & , \forall j \neq i \end{cases} \quad (14)$$

اتوماتای یادگیر با ساختار متغیر<sup>۸</sup> این اتوماتا توسط چهارتایی  $\{\alpha, \beta, \mathbf{P}, T\}$  نشان داده می‌شود که در آن  $\Omega_\alpha \equiv \{\alpha_1, \dots, \alpha_r\}$  مجموعه عمل‌های اتوماتا،  $\Omega_\beta \equiv \{\beta_1, \dots, \beta_m\}$  مجموعه ورودی‌های اتوماتا و بردار احتمال انتخاب هر یک از اعمال  $\mathbf{P} \equiv \{p_1, \dots, p_n\}$  و  $p(n+1) = T[\alpha(n), \beta(n), p(n)]$  و الگوریتم یادگیری می‌باشد. در این نوع از اتوماتاها، اگر عمل  $\alpha_i$  در مرحله  $n$  انتخاب شود و

این عمل پاسخ مطلوب از محیط دریافت نماید، احتمال  $p_i(n)$  افزایش یافته و سایر احتمال‌ها کاهش می‌یابند. برای پاسخ نامطلوب احتمال  $p_i(n)$  کاهش یافته و سایر

عملکرد اتوماتای یادگیر سلولی بدین نحو است که: در هر لحظه، اتوماتای یادگیر هر سلول، عملی را از میان اعمال خود بر می‌گزیند. عمل انتخاب‌شده با توجه به اعمال انتخاب‌شده توسط سلول‌های همسایه و قانون حاکم بر اتوماتای سلولی، پاداش یا جریمه می‌شود. با توجه به این پاداش (یا جریمه) اتوماتای یادگیر تابع احتمال خود را بروز می‌کند. پس از این، مجدداً هر اتوماتا عملی را از میان اعمال خود، با توجه به بردار احتمال اعمال اتوماتا، انتخاب می‌نماید. با این تفاسیر، احتمال انتخاب عمل‌های مناسب در تکرارهای بعدی بیشتر می‌گردد. فرآیند انتخاب عمل، دادن پاداش و یا جریمه، تا زمانی که سیستم به حالت پایدار رسیده، یا یک معیار از پیش تعیین‌شده برقرار گردد، ادامه می‌یابد. در اتوماتای یادگیر سلولی باز، علاوه بر محیط محلی یک محیط سراسری نیز در نظر گرفته شده است. بر این اساس، دریافت پاداش یا جریمه توسط یک سلول، علاوه بر اعمال انتخابی توسط همسایگانش به پاسخ محیط سراسری نیز بستگی دارد [۲۹].

#### ۴- روش حل مسأله

به منظور حل مسأله مکان‌یابی واحدهای فازوری با استفاده از اتوماتای یادگیر سلولی، هر یک از شین‌های شبکه به عنوان یک سلول فرض می‌گردد. هر سول به یک اتوماتای یادگیر با دو عمل قابل اجرا، شامل انتخاب و یا عدم‌انتخاب واحد فازوری برای سلول مورد نظر، مجهز است. هر سلول مثل  $i$  دارای مجموعه‌ای از سلول‌های همسایه، مطابق  $\Omega_i^{bus}$  است. قانون سراسری اتوماتای یادگیر برابر تابع هدف رابطه (۸) فرض شده و قانون محلی که نشان‌دهنده بهبود موضعی حرکت سلول‌های همسایه است، با اجرای تابع هدف بر روی مجموعه شین‌های  $\Omega_i^{bus}$  و مجموعه خطوط زیر انجام می‌گیرد:

$$\Omega_{local,i}^{line} = \bigcup_{j,k \in \Omega_i^{bus}} (\Omega_j^{line} \cap \Omega_k^{line}), \quad \forall i \in \Omega_{total}^{bus} \quad (15)$$

با توجه به مقادیر  $k_{reward}$  و  $k_{penalty}$  سه حالت مختلف را می‌توان در نظر گرفت. اگر  $k_{reward} = k_{penalty}$  آنگاه، الگوریتم را  $L_{R-P}$  نامیده و اگر  $k_{reward} \gg k_{penalty}$  الگوریتم  $L_{R-EP}$  نامیده می‌شود. در نهایت، زمانی که  $k_{penalty}$  مساوی صفر باشد، الگوریتم  $L_{R-I}$  نام‌گذاری می‌شود.

#### ۳-۴ اتوماتای سلولی

اتوماتای سلولی<sup>۱</sup>، سیستم‌های دینامیکی گسسته‌ای هستند که رفتارشان بر اساس ارتباط محلی استوار است [۲۶]. در اتوماتای سلولی، فضا به صورت یک شبکه تعریف‌شده و به هر خانه آن یک سلول گفته می‌شود. زمان به صورت گسسته پیش‌رفته، قوانین موجود به صورت سرتاسری اجرا می‌شوند. اتوماتای سلولی وضعیت جدید خود را با توجه به همسایه‌های مجاور و این قوانین سرتاسری، به دست می‌آورد. قوانین اتوماتای سلولی، نحوه تأثیرپذیری یک سلول از سلول‌های همسایه‌اش را نشان می‌دهد. یک سلول همسایه سلول دیگر گفته می‌شود، هرگاه بتواند آن را در یک مرحله و بر اساس قانون حاکم تحت تأثیر قرار دهد [۲۷].

#### ۳-۴ اتوماتای یادگیر سلولی ۱۰

ترکیب اتوماتای سلولی و اتوماتای یادگیر، ساختار جدیدی را به دست می‌دهد. طبق تعریف، اتوماتای یادگیر سلولی  $d$  بعدی یک چندتایی مرکب از  $\{Z^d, \varphi, A, N, F\}$  است؛ به طوری که [۲۸]:

$Z^d$  یک شبکه از  $d$  تایی‌های مرتب از اعداد صحیح؛

$\varphi$  یک مجموعه متناهی از حالت‌ها؛

$A$  مجموعه‌ای از اتوماتاهای یادگیر که هر یک از

آنها به یک سلول از اتوماتای یادگیر اختصاص دارند؛

$N$  یک مجموعه متناهی از  $Z^d$  که به آن بردار

همسایگی گفته می‌شود؛

$F$  قانون محلی اتوماتای یادگیر سلولی است.



در صورتی که قانون محلی بهبود یافته باشد، آن‌گاه عمل انتخابی پاداش گرفته و در غیر این صورت، جریمه می‌شود (مطابق شکل ۳-۳).

توجه به این نکته حائز اهمیت است که قوانین محلی اتوماتای یادگیر سلولی بسیار متنوع بوده، بعضاً با توجه به مسأله متفاوتند. هدف این است که راهکاری مناسب برای ارائه جزا و یا پاداش به یک عمل خاص در یک تکرار الگوریتم، یافت شود. بر این اساس، راهکارهای ذکر شده محدود به موارد فوق نبوده و می‌توان موارد مختلفی را پیشنهاد و آزمایش نمود، در مراجع [۳۱-۳۰] دسته‌ای از این قوانین ذکر شده و کاربردهای آنها در حل مسائل مختلف بررسی شده‌اند.

## ۵ - مطالعات عددی و نتایج

### ۵ ۴ - معرفی

به منظور استفاده از روش پیشنهادی برنامه‌های مربوطه در محیط نرم‌افزار *Matlab 7* نوشته شد. کاربر با ارائه وضعیت شبکه مورد مطالعه، مکان‌های نامزد برای احداث واحدهای فازوری (و یا ارائه فایل *GIS* شبکه) و نیز وارد نمودن سایر اطلاعات فنی و اقتصادی، پاسخ مسأله مکان‌یابی واحدهای فازوری را مشاهده می‌نماید. در این قسمت، مسأله مکان‌یابی چندهدفه واحدهای اندازه‌گیری فازور برای شبکه‌های ۱۴، ۳۰، ۳۹ و ۵۷ باس *IEEE* و نیز شبکه سراسری  $230\text{ kV}$  و  $400\text{ kV}$  انتقال ایران بررسی و با پاسخ سایر روش‌ها مقایسه شده است. از طرفی، با ارائه سناریوهای متناسب، کیفیت رویکرد پیشنهادی در زمینه ارزش ریالی قابلیت اطمینان بررسی شده و نتیجه‌گیری لازم، انجام گرفته است. رایانه استفاده شده در شبیه‌سازی‌ها دارای اطلاعات فنی شامل، سی‌پی‌یو *Centrino 1.8GH* و  $1\text{ GB}$  رم است.

بر این اساس، در هر تکرار، اتوماتای یادگیر هر یک از سلول‌ها عملی را با توجه به تابع احتمال خود انتخاب می‌نماید. سپس در یک فرآیند شبه‌تکراری، میزان رعایت قیود مشاهده‌پذیری برای ساختار پیشنهادی، بررسی شده و تابع هدف رابطه (۸) محاسبه می‌گردد. در صورتی که مجموعه اعمال انتخاب‌شده، تابع هدف را بهبود دهند، کلیه اعمال انتخاب‌شده یک پاداش اولیه دریافت کرده و در غیر این صورت، کلیه اعمال انتخاب‌شده یک جریمه اولیه دریافت می‌کنند. سپس تابع قانون محلی اتوماتای یادگیر، مطابق روابط (۸) و (۱۵)، برای هر یک از سلول‌ها اجرا شده، پاداش یا جریمه ثانویه‌ای به هر سلول تعلق می‌گیرد. با اجرای چندین باره الگوریتم، احتمال انتخاب اعمال مناسب توسط سلول‌ها، بیشتر شده، همگرایی به پاسخ بهینه حاصل می‌آید. نحوه دادن پاداش و یا جریمه ثانویه که بر اساس قانون محلی اتوماتای سلولی انجام می‌شود، مطابق شرایط زیر اجرا می‌گردد:

- اگر عمل جدید سلول با عمل قبلی آن متفاوت باشد:
  - اگر عمل سلول با اعمال قبلی برخی از همسایگانش متفاوت باشد و عمل حداقل یکی از این همسایه‌ها با عمل قبلی‌اش یکسان باشد، در صورتی که قانون محلی بهبود یافته باشد، آن‌گاه عمل انتخابی پاداش گرفته و در غیر این صورت، جریمه می‌شود (مطابق شکل ۳-الف).
  - اگر عمل سلول با اعمال قبلی تمام همسایگانش یکسان باشد، آنگاه اگر تعداد همسایگانی که عمل خود را تغییر داده‌اند، بیشتر از تعداد همسایگانی باشد که عمل خود را تغییر نداده‌اند، در صورتی که قانون محلی بهبود یافته باشد، آن‌گاه عمل انتخابی پاداش گرفته و در غیر این صورت، جریمه می‌شود (مطابق شکل ۳-ب).

- اگر عمل جدید سلول مشابه عمل قبلی‌اش باشد:
  - اگر عمل سلول با عمل بعضی از همسایگانش برابر باشد و هیچ‌کدام از آنها عمل خود را تغییر نداده باشند،

## ۵-۴ مکان‌یابی واحدهای فازوری در شبکه‌های

### نمونه

#### سناریوی اول

در این سناریو مسأله مکان‌یابی واحدهای اندازه‌گیری فازور برای شبکه‌های مختلف و با فرض شین‌های تزریقی بررسی شده است. تابع هدف مسأله مطابق رابطه (۴) فرض شده و جدول‌های (۱) و (۲) نتایج حاصل از این آزمون را نشان می‌دهند. مطابق این نتایج راهکار پیشنهادی توانسته است بهترین پاسخ ممکن تا کنون را از نظرگاه کمینه‌سازی تعداد واحدها محاسبه نماید. از طرف دیگر، همان‌طور که

مشاهده می‌شود، پاسخ پیشنهادی برای شبکه ۳۰ و ۳۹ باس *IEEE*، از نظرگاه تعداد دفعات مشاهده‌پذیری شین‌ها، نسبت به مطالعات گذشته به ترتیب به‌اندازه ۲۰٪ و ۵٪ بهبود یافته است. بر این اساس، تابع هدف پیشنهادی از کیفیت مناسبی برخوردار بوده و اتوماتای یادگیر سلولی نیز قادر به یافتن پاسخ‌های مناسب است. شایان ذکر است که زمان محاسبات برای شبکه‌های مورد مطالعه به ترتیب، ۰/۶۱، ۹/۱۹، ۱۳/۴۵ و ۳۷/۰۹ ثانیه است.

جدول (۱): پاسخ راهکار پیشنهادی برای مسأله مکان‌یابی دوهدفه واحدهای فازوری چند شبکه نمونه

آزمون	شبکه مورد مطالعه	محل نصب واحدهای فازوری	تعداد واحدهای مورد نیاز
۱	IEEE - 14 Bus	۹، ۶، ۲	۳
۲	IEEE - 30 Bus	۲۷، ۱۸، ۱۵، ۱۲، ۱۰، ۴، ۲	۷
۳	IEEE - 39 Bus	۲۹، ۲۵، ۲۳، ۲۰، ۱۶، ۱۰، ۸، ۳	۸
۴	IEEE - 57 Bus	۵۶، ۵۴، ۵۱، ۳۸، ۳۲، ۲۹، ۲۵، ۲۰، ۱۳، ۴، ۱	۱۱

جدول (۲): مقایسه پاسخ‌های راهکار پیشنهادی جدول (۱) و نتایج حاصل از مطالعات گذشته

آزمون	شبکه مورد مطالعه	تعداد واحدهای انتخاب شده					میانگین دفعات مشاهده‌پذیری شین‌ها				
		برنامه‌ریزی عدد صحیح [۱۴]	الگوریتم ژنتیک [۳]	الگوریتم ژنتیک ایمنی [۴]	تبرید [۱۲]	راهکار پیشنهادی	برنامه‌ریزی عدد صحیح [۱۴]	الگوریتم ژنتیک [۳]	الگوریتم ژنتیک ایمنی [۴]	تبرید فلزات [۱۲]	راهکار پیشنهادی
۱	IEEE - 14 Bus	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۱/۱۴۳
۲	IEEE - 30 Bus	-	۷	۷	-	۷	-	۷	-	۷	۱/۴۶۷
۳	IEEE - 39 Bus	-	-	-	-	۸	-	۸	-	۸	۱/۱۰۳
۴	IEEE - 57 Bus	۱۲	۱۲	۱۲	-	۱۱	-	۱۱	-	۱۱	۱/۱۰۵

جدول (۳): پاسخ مسأله مکان‌یابی واحدهای فازوری شبکه ۵۷ شینه IEEE در حضور اندازه‌گیرهای غیر سنکرون

آزمون	محل اندازه‌گیرهای توان تزریقی	محل اندازه‌گیرهای توان انتقالی	محل اندازه‌گیرهای ولتاژ	محل نصب واحدهای فازوری	تعداد PMU
۱	-	-	-	۵۱، ۳۸، ۳۲، ۲۹، ۲۵، ۲۰، ۱۳، ۴، ۱ ۵۶، ۵۴	۱۱
۲	۴۹، ۳۱، ۱۹، ۱	-	-	۵۶، ۵۳، ۵۰، ۳۲، ۲۷، ۲۲، ۱۵، ۱۲، ۹، ۶	۱۰
۳	۴۹، ۳۱، ۱۹، ۱	(۲۳-۲۴)، (۲۴-۲۶)، (۲۶-۲۹)، (۲۸-۲۹)، (۲۸-۵۰)، (۲۸)	-	۵۶، ۵۳، ۵۰، ۳۲، ۲۷، ۲۲، ۱۵، ۱۲، ۹، ۶	۹
۴	۴۹، ۳۱، ۱۹، ۱	(۲۳-۲۴)، (۲۴-۲۶)، (۲۶-۲۹)، (۲۸-۲۹)، (۲۸-۵۰)، (۲۸)	۴۷، ۴۵، ۲۰، ۸	۵۶، ۵۳، ۳۸، ۳۲، ۱۵، ۱۲، ۱۰، ۹، ۶	۹

جدول (۴): پاسخ مسأله مکان‌یابی واحدهای فازوری شبکه ۵۷ شینه IEEE با توجه به نایقینی در خطوط و واحدهای فازوری

تعداد PMU	محل واحدهای فازوری	شرایط آزمون	آزمون
۱۱	۵۶، ۵۴، ۵۱، ۳۸، ۳۲، ۲۹، ۲۵، ۲۰، ۱۳، ۴، ۱	بدون توجه به قابلیت اطمینان	۱
۱۹	۵۶، ۵۵، ۵۳، ۵۱، ۴۹، ۴۴، ۴۱، ۳۳، ۳۲، ۳۰، ۲۹، ۲۷، ۲۱، ۱۹، ۱۴، ۱۲، ۶، ۲، ۱	با فرض خروج خطوط [۱۰]	۲
۲۶	۴۴، ۴۱، ۳۹، ۳۸، ۳۳، ۳۲، ۳۰، ۲۹، ۲۷، ۲۵، ۲۴، ۲۰، ۱۹، ۱۴، ۱۲، ۹، ۶، ۴، ۲، ۱ ۵۶، ۵۴، ۵۳، ۵۱، ۵۰، ۴۶	با فرض خروج واحد فازوری [۱۰]	۳
۲۶	۴۴، ۴۱، ۳۸، ۳۶، ۳۳، ۳۲، ۳۰، ۲۹، ۲۷، ۲۵، ۲۴، ۲۰، ۱۹، ۱۴، ۱۲، ۹، ۶، ۴، ۲، ۱ ۵۶، ۵۴، ۵۳، ۵۱، ۵۰، ۴۶	با فرض خروج همزمان خطوط و واحد فازوری [۱۰]	۴
۱۲	۵۶، ۵۴، ۵۰، ۴۰، ۳۸، ۳۲، ۲۹، ۲۷، ۱۳، ۱۲، ۶، ۳	با فرض خروج خطوط مطابق رویکرد پیشنهادی $k_{reli}^{PMU} = 0, k_{reli}^{worth} = 1$	۵
۱۳	۵۶، ۵۴، ۵۰، ۴۱، ۳۸، ۳۲، ۲۹، ۲۴، ۱۴، ۱۲، ۶، ۱	با فرض خروج واحدهای فازوری مطابق رویکرد پیشنهادی $k_{reli}^{line} = 0, k_{reli}^{worth} = 1$	۶
۱۴	۵۳، ۴۱، ۳۸، ۳۲، ۳۱، ۲۷، ۱۹، ۱۷، ۱۵، ۱۳، ۱۰، ۹، ۸، ۳	با توجه به رویکرد پیشنهادی و $k_{reli}^{worth} = 1$	۷
۱۸	۵۶، ۵۳، ۴۹، ۴۱، ۳۸، ۳۲، ۳۱، ۲۹، ۲۳، ۱۸، ۱۶، ۱۵، ۱۳، ۱۰، ۹، ۷، ۲، ۱	با توجه به رویکرد پیشنهادی و $k_{reli}^{worth} = 2$	۸

جدول (۵): پاسخ مسأله مکان‌یابی واحدهای فازوری شبکه واقعی ۲۳۰ kV و ۴۰۰ kV انتقال ایران

تعداد PMU	محل نصب واحدهای فازوری	شرایط آزمون	آزمون
۷۱	۹۷، ۹۵، ۹۳، ۸۸، ۷۸، ۷۲، ۶۲، ۶۱، ۶۰، ۵۷، ۵۶، ۴۵، ۴۳، ۳۹، ۳۶، ۲۸، ۲۳، ۱۹، ۱۸، ۱۶، ۹، ۶، ۴، ۱۵۳، ۱۴۷، ۱۴۳، ۱۳۸، ۱۳۴، ۱۳۳، ۱۲۹، ۱۲۶، ۱۱۷، ۱۱۵، ۱۱۱، ۱۰۸، ۱۰۶، ۱۰۲، ۱۰۱، ۹۹، ۹۸، ۲۰۱، ۱۹۸، ۱۹۷، ۱۹۵، ۱۹۲، ۱۸۸، ۱۸۷، ۱۸۵، ۱۸۳، ۱۷۹، ۱۷۷، ۱۶۹، ۱۶۴، ۱۶۳، ۱۶۰، ۱۵۶، ۱۵۴، ۲۴۰، ۲۳۳، ۲۳۲، ۲۲۸، ۲۲۵، ۲۲۲، ۲۱۷، ۲۱۲، ۲۱۱، ۲۱۰، ۲۰۷، ۲۰۶، ۲۰۳، ۲۰۲	بدون توجه به قابلیت اطمینان	۱
۹۶	۵۲، ۴۷، ۴۶، ۴۲، ۳۸، ۳۵، ۳۴، ۳۳، ۳۲، ۳۱، ۲۹، ۲۷، ۲۶، ۲۲، ۲۱، ۲۰، ۱۶، ۱۴، ۱۳، ۱۱، ۸، ۶، ۴، ۵۹، ۵۶، ۵۴، ۱۱۱، ۱۱۰، ۱۰۸، ۱۰۶، ۹۹، ۹۶، ۹۳، ۹۱، ۸۹، ۸۶، ۸۴، ۷۸، ۷۶، ۷۵، ۷۱، ۶۸، ۶۳، ۶۱، ۵۹، ۱۱۴، ۱۱۶، ۱۱۹، ۱۲۳، ۱۳۴، ۱۳۳، ۱۳۷، ۱۳۸، ۱۴۰، ۱۴۳، ۱۴۷، ۱۵۲، ۱۵۴، ۱۵۷، ۱۵۸، ۱۶۰، ۱۶۲، ۱۶۴، ۱۶۷، ۱۶۴، ۱۶۷، ۱۷۰، ۱۷۵، ۱۷۷، ۱۷۸، ۱۸۱، ۱۸۲، ۱۸۳، ۱۸۶، ۱۸۸، ۱۸۹، ۱۹۰، ۱۹۲، ۱۹۴، ۱۹۷، ۱۹۸، ۲۴۰، ۲۳۹، ۲۳۷، ۲۳۱، ۲۲۶، ۲۲۵، ۲۲۲، ۲۲۱، ۲۲۰، ۲۱۹، ۲۱۷، ۲۱۳، ۲۱۲، ۲۱۰، ۲۰۷، ۲۰۶، ۲۰۵	با توجه مکان‌یابی چندهدفه پیشنهادی	۲

## سناریوی دوم

کمترین اثر را بر پاسخ‌ها داشته است. انتظار رایج از آنجا ناشی می‌شد که بر اثر قرارگیری اندازه‌گیر ولتاژ در یک شین، ولتاژ آن شین اندازه‌گیری و شین مذکور مشاهده‌پذیر می‌گردد. لذا به نظر می‌رسد که تعداد واحدهای فازوری موردنیاز نیز کاهش یابد. با این همه، از آنجایی که اندازه‌گیر ولتاژ قادر به محاسبه جریان خطوط نیست و با توجه به حضور اندازه‌گیرهای توان انتقالی و توان تزریقی، که ماهیت آنها مبتنی بر جریان خطوط است، اثر اندازه‌گیر ولتاژ در این آزمون کمتر از حد انتظار نتیجه گرفته شده است.

در این سناریو مسأله مکان‌یابی واحدهای فازوری در حضور اندازه‌گیرهای غیرسنکرون بررسی می‌شود. بر این مبنای، شبکه ۵۷ باس IEEE انتخاب و اثر حضور این اندازه‌گیرهای غیرسنکرون در قالب سه آزمون متفاوت بررسی شده است. نتایج حاصل از این سناریو در جدول (۳) قرار گرفته است. همان‌طور که انتظار می‌رفت، بر اثر حضور این اندازه‌گیرها، تعداد واحدهای فازوری موردنیاز کاهش می‌یابد. از طرفی، بر خلاف انتظار، اندازه‌گیر ولتاژ

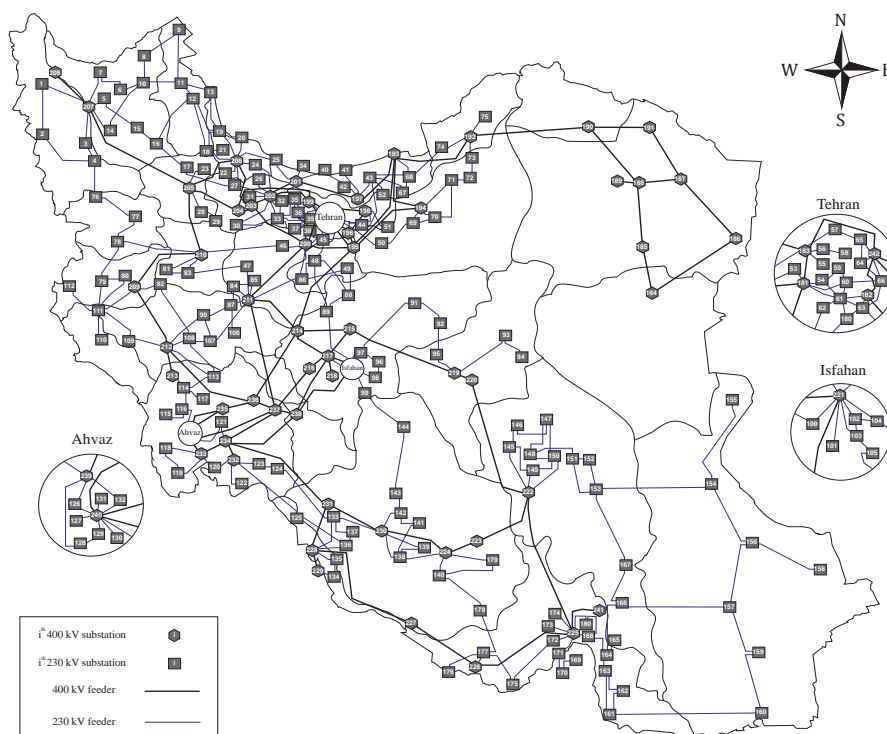
## سناریوی سوم

در این سناریو اثر نایقینی در خطوط و واحدهای فازوری موجود در شبکه انتقال بر پاسخ مسأله مکان‌یابی واحدهای فازوری بررسی می‌گردد. برای این منظور، شبکه ۵۷ باس *IEEE* انتخاب شده و اثر نایقینی در خطوط، نایقینی در واحدهای فازوری و نقش همزمان این دو عامل با استفاده از نتایج مرجع [۱۰] و نیز نتایج حاصل از رویکرد پیشنهادی، بررسی و مقایسه می‌گردد. نرخ خروج خطوط برابر  $0.1 (f / km / year)$  و نرخ خروج واحدهای فازوری ۲۰ بار در سال فرض شده است. از طرفی، مدت زمان رفع عیب از خطوط، یک ساعت و دوره بازگشت واحد فازوری معیوب، پنج ساعت در نظر گرفته شده است. در این مطالعه، نرخ اغتشاشات موثر واقع شده بر هر کیلومتر از خط انتقال برابر پنج حادثه در هر ساعت است. علاوه بر این، هزینه مورد نیاز برای هر واحد فازوری ۵۰۰۰ دلار و عمر مفید دستگاه ۱۰ سال فرض شده است. نتایج حاصل از این سناریو مطابق جدول (۴) هستند.

همان طور که مشاهده می‌شود، مطابق نتایج [۱۰]

نایقینی در واحدهای فازوری تاثیر بیشتری در نتایج داشته، به گونه‌ای که در اثر بر نظر گرفتن همزمان هر دو عامل، تعداد واحدهای فازوری تغییری نداشته است. از طرفی، این دو عامل سبب رشد ۲۳۶ درصدی در تعداد واحدهای فازوری شده‌اند.

سطرهای پنج تا هشت جدول (۴) پاسخ‌های راهکار پیشنهادی را نشان می‌دهند. مطابق نتایج سطر پنجم، چنانچه مسأله مکان‌یابی واحدهای فازوری با توجه به ارزش نایقینی‌ها در شرایط خروج خطوط بررسی شود، به ۱۲ واحد فازوری نیاز خواهد بود که نسبت به مقدار متناظر در سطر دوم به اندازه ۳۷٪ کمتر است. چنانچه مسأله با فرض خروج واحدهای فازوری بررسی شود، تعداد واحدهای فازوری مورد نیاز ۱۳ است که نسبت به وضعیت خروج خطوط به اندازه ۸٪ بیشتر است. در حقیقت، رویکرد پیشنهادی با ارزش‌گذاری ریالی نایقینی‌ها پاسخ‌های متفاوتی را نسبت به مرجع [۱۰] نتیجه گرفته است.



شکل (۴): شبکه سراسری ۲۳۰ kV و ۴۰۰ kV انتقال ایران (در سال ۱۳۸۵)

نتایج حاصل از اجرای برنامه بر روی شبکه مذکور مطابق جدول (۵) است. مطابق این نتایج شبکه انتقال ایران در حالت عادی نیازمند ۷۱ واحد فازوری بوده، با اعمال اثر نایقینی در خطوط و واحدهای فازوری به ۹۶ دستگاه اندازه‌گیری فازور احتیاج دارد. با توجه به اینکه تعیین ارزش واقعی نایقینی‌ها مستلزم اطلاع دقیق از ارزش اغتشاشات شبکه داشته و از آنجایی که این اغتشاشات بدون نصب این واحدهای اندازه‌گیر قابل ثبت نیست؛ لذا، پیشنهاد این است که ابتدا مسأله واحدهای فازوری با استفاده از رویکرد پیشنهادی (که رویکرد تقریباً به صرفه‌تری نسبت به رویکرد تک‌اتفاقی است) و با فرض حد پایین نرخ اغتشاشات حل شده و واحدهای فازوری در مکان‌های موردنظر نصب گردند. سپس، پس از سپری شدن یک مدت معین، مثل یک دوره یکساله، مسأله مکان‌یابی واحدهای فازوری با استفاده از ارزش واقعی نایقینی‌ها، مطابق رابطه (۸) و با اعمال یک مقدار واقعی برای  $k_{reli,i}^{worth}$  هر یک از خطوط (مطابق ارزش اغتشاشات ثبت‌شده) انجام گیرد.

## ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله مسأله مکان‌یابی چندهدفه واحدهای اندازه‌گیری فازور در حضور اندازه‌گیرهای غیرسنکرون بررسی شد. برای این منظور، تعریف جدیدی از ارزش قابلیت اطمینان برای مسأله تعریف و فرمول‌بندی شد. از طرفی، با ارائه یک تابع هدف جدید، مسأله مکان‌یابی چندهدفه به منظور کمینه‌سازی تعداد واحدهای فازوری، بیشینه‌سازی تعداد دفعات مشاهده‌پذیری شین‌ها و نیز ارزش قابلیت اطمینان فرمول‌بندی شد. سپس مکان‌یابی واحدهای فازوری در قالب یک مسأله بهینه‌سازی با استفاده از اتوماتای یادگیر سلولی حل شد. علاوه بر این، راهکارهای جدیدی برای محاسبه جزا و پاداش در قانون محلی اتوماتا ارائه شد. در پایان، با حل مسأله مکان‌یابی واحدهای فازوری برای چندین شبکه نمونه و شبکه سراسری ۲۳۰kV و ۴۰۰kV انتقال ایران و مقایسه نتایج با پاسخ‌های سایر روش‌ها، کیفیت راهکار پیشنهادی بررسی گردید. مطابق این نتایج، رویکرد پیشنهادی قیود فنی و اقتضات مهندسی را

مطابق نتایج ارائه‌شده در سطرهای هفتم و هشتم جدول (۴)، با فرض اینکه ارزش واحد فازوری برابر تعداد اغتشاشاتی باشد که این واحد در طول عمر مفید خود ( $n_{life}$ ) سبب شناسایی آنها شده، تعداد واحدهای فازوری نسبت به گذشته، سه واحد افزایش یافته است. از طرفی، در صورتی که ارزش اغتشاشات دو برابر آزمون پیشین فرض گردد، به ۱۸ واحد فازوری برای مشاهده‌پذیری شبکه نیاز خواهد بود که از تعداد ذکر شده در [۱۰] به مراتب کمتر است.

توجه به این نکته حائز اهمیت است که بر خلاف مطالعات پیشین که در آنها آرایش پیشنهادی برای واحدهای فازوری موظف به رعایت قید مشاهده‌پذیری کامل شبکه در شرایط نایقینی است، در این مطالعه مشاهده‌پذیری شبکه در شرایط نایقینی به ارزش نایقینی‌ها وابسته است. مطابق نتایج ارائه‌شده، اگر چه نایقینی در خطوط شبکه و واحدهای فازوری عامل مهمی است، ولی اعمال اثر این موارد با رویکرد تک‌اتفاقی، اقتصادی نبوده، پاسخ‌های اغراق‌آمیزی را به دست می‌دهد. از طرف دیگر، رویکرد ذکر شده قادر است تا ضمن رعایت اقتضات مهندسی، تا حدی این مشکلات را پوشش دهد.

## ۵-۳ مکان‌یابی واحدهای فازوری شبکه سراسری ۲۳۰kV و ۴۰۰kV انتقال ایران

در این بخش مسأله مکان‌یابی واحدهای فازوری برای شبکه واقعی ۲۳۰kV و ۴۰۰kV انتقال ایران بررسی شده است. شبکه ذکر شده دارای ۲۴۲ باس و ۴۳۱ خط در ۳۶۴ کریدور است.

شکل (۴) آرایش شبکه مورد نظر را نشان‌دهنده و مجموعه کامل اطلاعات فنی آن، از طریق معاونت برنامه‌ریزی دفتر برنامه‌ریزی شبکه، شرکت سهامی مدیریت تولید، انتقال و توزیع نیروی برق ایران (توانیر)، قابل تهیه است.

- Trans. Power Syst., Vol. 24, No. 2, pp. 806-813, 2009.
- [9] D. Dua, S. Dambhare, R.K. Gajbhiye, S.A. Soman, "optimal multistage scheduling of PMU placement: An ILP approach," IEEE Trans. Power Deli., Vol. 23, No. 4, pp. 1812-1820, 2008.
- [10] F. Aminifar, A. Khodaei, M. Fotuhi-Firuzabad, M. Shahidehpour, "Contingency-Constrained PMU placement in power networks," IEEE Trans. Power Syst., Vol. 25, No. 1, pp. 516-523, 2010.
- [11] J. Peng, Y. Sun, and H. F. Wang, "Optimal PMU placement for full network observability using Tabu search algorithm," International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 28, pp. 223-231, 2006.
- [12] C. Rakpenthai, S. Premrudeepreechacharn, S. Uatrongjit, N.R. Watson, "An optimal PMU placement method against measurement loss and branch outage," IEEE Trans. Power Deli., Vol. 22, No. 1, pp. 101-107, 2007.
- [13] M. Zhou, V. A. Centeno, A. G. Phadke, Y. Hu, D. Novosel and H. A. R. Volskis, "A preprocessing method for effective PMU placement studies," IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2008.
- [14] B. Xu and A. Abur, "Observability analysis and measurement placement for system with PMUs," IEEE Power Engineering Society General Meeting, Vol. 2, pp. 943-946, 2004.
- [15] S. Chakrabarti, E. Kyriakides, "Optimal placement of phasor measurement units for power system observability," IEEE Trans. Power Syst., Vol. 23, No. 3, pp. 1433-1440, 2008.
- [16] B. Milosevic, M. Begovic, "Nondominated sorting genetic algorithm for optimal phasor measurement placement," IEEE Trans. Power Syst., Vol.18, No. 1, pp. 69-75, 2003.
- [17] J.B.A. London, S.A.R. Piereti, R.A.S. Benedito, N.G. Bretas, "Redundancy and observability analysis of conventional and PMU measurements," IEEE Trans. Power Syst., Vol. 24, No. 3, pp. 1629-1630, 2009.
- [18] R. Sodhi, S. C. Srivastava and S. N. Singh, "Optimal PMU placement method for complete topological and numerical observability of power system," *Electric Power Systems Research* 80, pp. 1154-1159, 2010.
- [19] A. Abur and A. G. Exposito, "Power system state estimation: theory and رعایت نموده، قابل اجرا برای شبکه‌های واقعی و بزرگ مقیاس است.
- ### سپاسگزاری
- نویسندگان مقاله مراتب تشکر و قدردانی خود را از معاونت برنامه‌ریزی دفتر برنامه‌ریزی شبکه شرکت توانیر، به جهت در اختیار قرار دادن مجموعه فایل‌های GIS شبکه سراسری ۲۳۰kV و ۴۰۰kV انتقال ایران در سال ۱۳۸۵، و نیز معاونت راهبری شبکه شرکت مدیریت شبکه برق ایران، به جهت در اختیار قرار دادن مجموعه اطلاعات مرتبط با خطاهای بهره‌برداری شبکه انتقال ایران در سال‌های ۱۳۸۸-۱۳۸۹، اعلام می‌نمایند.
- ### مراجع:
- [1] R.O. Burnett, M.M. Butts, P.S. Sterlina, "Power system applications for phasor measurement units," *IEEE Computer Applications in Power*, Vol. 7, No. 1, pp. 8-13, 1994.
- [2] R.E. Wilson, "PMUs [phasor measurement unit]," *IEEE Potentials*, Vol. 13, No. 2, pp. 26-28, 1994.
- [3] F.J. Marin, F. Garcia-Lagos, G. Joya, F. Sandoval, "Genetic algorithms for optimal placement of phasor measurement units in electrical networks," *Electronics Letters*, Vol. 39, No. 19, pp. 1403-1405, 2003.
- [4] F. Aminifar, C. Lucas, A. Khodaei, M. Fotuhi-Firuzabad, "Optimal placement of phasor measurement units using immunity genetic algorithm," *IEEE Trans. Power Deli.*, Vol. 24, No. 3, pp. 1014-1020, 2009.
- [5] Y. Gao, Z. Hu, X. He and D. Lio, "Optimal placement of PMUs in power systems based on improved PSO algorithm," *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 2008.
- [6] S. Chakrabarti, G. K. Venayagamoorthy and E. Kyriakides, "PMU placement for power system observability using binary particle swarm optimization," *Power Engineering Conference AUPEC*, 2008.
- [7] B. Gou, "generalized integer linear programming formulation for optimal PMU placement," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 23, no. 3, pp. 1099-1104, 2008.
- [8] N.H. Abbasy, H.M. Ismail, "A unified approach for the optimal PMU location for power system state estimation," *IEEE*

applications,” *Technical Report*, Amirkabir University of Technology, Computer Engineering Department, March. 2000.

زیر نویس‌ها:

- 1- Phasor measurement unit
- 2- Global positioning system
- 3- Uncertainties
- 4- Multi-objective optimization
- 5- Observability
- 6- Learning automata
- 7- Fixed state transition probabilities
- 8- Variable structure learning automata
- 9- Cellular automata
- 10- Cellular learning automata

علائم و نشانه‌ها:

مجموعه‌ها:

مجموعه شین‌های شبکه؛	$\Omega_{total}^{bus}$
مجموعه خطوط موجود در شبکه؛	$\Omega_{total}^{line}$
مجموعه شین‌های پیشنهادی برای نصب واحد فازوری؛	$\Omega_{bus}^{PMU}$
مجموعه هزینه نصب واحدهای فازوری؛	$\Omega_{cost}^{PMU}$
مجموعه خطوط مشترک در همسایگان سلول $i$ ؛	$\Omega_{local,i}^{line}$
مجموعه شین‌هایی که بر اثر خروج خط $i$ ، مشاهده‌ناپذیر می‌شوند؛	$\Omega_{outage,i}^{line}$
مجموعه شین‌هایی که بر اثر خروج واحد فازوری شین $i$ ، مشاهده‌ناپذیر می‌شوند؛	$\Omega_{outage,i}^{PMU}$
مجموعه شین‌های متصل به شین $i$ ؛	$\Omega_i^{bus}$
مجموعه خطوط متصل به شین $i$ ؛	$\Omega_i^{line}$
مجموعه اعمال قابل اجرا در اتوماتای یادگیر $i$ ام؛	$\Omega_{\alpha,i}$
مجموعه ورودی‌های اتوماتای یادگیر $i$ ام؛	$\Omega_{\beta,i}$

implementation,” New York, Marcel Dekker, 2004.

- [20] K. S. Narendra, and K. S. Thathachar, “Learning automata: An introduction,” New York, Printice- Hall, 1989.
- [21] E. A. Billard, and S. Lakshmivarahan, “Learning in multi-level games with incomplete information-part I,” *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Part B: Cybernetics, Vol. 19, pp. 329-339, 1999.
- [22] G. I. Papadimitriou and A. S. Pomportsis, “Learning automata-based TDMA protocols for broadcast vommunication systems with bursty traffic,” *IEEE Communication Letters*, pp. 107-109, 2000.
- [23] C. Unsal, P. Kachroo, and J. S. Bay, “Multiple stochastic learning automata for vehicle path control in an automated highway system,” *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Part A,, Vol. 29, pp. 120-128, 1999.
- [24] M. S. Obaidat, G. I. Papadimitriou, A. S. Pomportsis, and H. S. Laskaridis, “Learning automata-based bus arbitration for shared-medium ATM switches,” *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Part B, Vol. 32, pp. 815-820, 2002.
- [25] B.H. Lee, K.Y. Lee, “Application of S-model learning automata for multi-objective optimal operation of power systems,” *IEE Generation, Transmission and Distribution*, Vol. 152, No. 2, pp. 295-300. 2005.
- [26] E. Fredkin, “Digital machine: A informational process based on reversible cellular automata,” *Physica*, Vol. 45, pp. 245–270, 1990.
- [27] M. Mitchell, “Computation in cellular automata: A selected review,” *Technical report*, Santa Fe Institute, Santa Fe, NM, USA, 1996.
- [28] M. R. Meybodi, H. Beigy, “A mathematical framework for cellular learning automata,” *Journal of Advances in Complex Systems*, Vol. 7, No. 3, pp. 295–320, 2004.
- [29] J. A. Torkestani, M. R. Meybodi, “A cellular learning automata-based algorithm for solving the vertex coloring problem,” *Expert Systems with Applications*, Vol. 38, pp. 9237-9247, 2011.
- [30] M. R. Meybodi, “Experiments with Cellular Learning Automata,” *Technical Report*, Amirkabir University of Technology, Computer Engineering Department, Aug. 2000.
- [31] M. R. Meybodi, H. Beigy, M. Taherkhani, “Cellular Learning Automata and its

متغیرها:	ثابت‌ها:	تابع‌ها:
متغیر تصمیم‌گیری نشان‌دهنده نصب واحد فازوری در شین $i$ ، $\beta_i = 1$ در صورتی که واحد فازوری در شین $i$ نصب شود، در غیر این صورت $\beta_i = 0$ ؛	مجموع هزینه‌های متحمل‌شده برای نصب واحد فازوری در شین $i$ (بر حسب واحد پول)؛ کل بودجه موجود برای خرید و نصب واحدهای فازوری (بر حسب واحد پول)؛ حداقل تعداد دفعات مشاهده‌پذیری شین $i$ ؛ میانگین دفعات خروج واحد فازوری شین $i$ (بر حسب تعداد در سال)؛ میانگین دفعات خروج خط $i$ (بر حسب تعداد در سال)؛ تعداد کل ادوات اندازه‌گیر غیرسنکرون و شین‌های تزریق صفر؛ تعداد شین‌های متصل به شین $i$ ؛ تعداد کل اعمال قابل اجرا در اتوماتای یادگیر $i$ ؛ عمر مفید واحد فازوری (بر حسب سال)؛ تعداد کل شین‌های شبکه؛ میانگین تعداد وقایع (اغتشاشات) اتفاق‌افتاده در خط $i$ (بر حسب تعداد در سال)؛ میانگین مدت زمان رفع خطا از واحد فازوری شین $i$ (بر حسب ساعت)؛ میانگین مدت زمان رفع خطا از خط $i$ (بر حسب ساعت)؛ پارامتر پاداش در الگوریتم یادگیری؛ پارامتر جریمه در الگوریتم یادگیری؛ ضریب جریمه ناشی از دفعات مشاهده‌پذیری شین‌ها در آرایش واحدهای فازوری؛ ضریب ارزش ریالی اغتشاشات نسبت به ارزش ریالی یک واحد فازوری؛ یک عدد خیلی بزرگ؛ یک عدد خیلی کوچک؛	$C_i$ $C_{max}$ $n_i^{observ}$ $n_{PMU,i}^{outage}$ $n_{line,i}^{outage}$ $n_{measur}$ $n_{\Omega_i^{bus}}$ $n_{\Omega_{a,i}}$ $n_{life}$ $n_{bus}$ $\xi_{line,i}^{fault}$ $\tau_{PMU,i}^{clear}$ $\tau_{line,i}^{clear}$ $k_{reward}$ $k_{penalty}$ $k_{redun}$ $k_{worth_{reli,i}}$ $\gamma$ $\epsilon$
متغیر تصمیم‌گیری نشان‌دهنده رعایت شدن یا عدم رعایت قید مشاهده‌پذیری در شین $i$ ، $\psi_i = 1$ در صورتی که شین $i$ مشاهده‌پذیر گردد، در غیر این صورت $\psi_i = 0$ ؛	تعداد اندازه‌گیر تزریقی (یا شین تزریق صفر) در شین $i$ ؛ در صورتی که واحد اندازه‌گیر تزریقی در شین $i$ باشد، در غیر این صورت $z_i^{inj} = 0$ ؛	$z_i^{inj}$
متغیر تصمیم‌گیری نشان‌دهنده حضور یا عدم حضور واحد اندازه‌گیر توان انتقالی میان شین‌های $i$ و $j$ ، $z_{ij}^{flow} = 1$ در صورتی که واحد اندازه‌گیر بین این دو شین موجود باشد، در غیر این صورت $z_{ij}^{flow} = 0$ ؛	تعداد کل اتوماتای یادگیر $i$ ؛ تعداد کل اعمال قابل اجرا در اتوماتای یادگیر $i$ ؛ عمر مفید واحد فازوری (بر حسب سال)؛ تعداد کل شین‌های شبکه؛ میانگین تعداد وقایع (اغتشاشات) اتفاق‌افتاده در خط $i$ (بر حسب تعداد در سال)؛ میانگین مدت زمان رفع خطا از واحد فازوری شین $i$ (بر حسب ساعت)؛ میانگین مدت زمان رفع خطا از خط $i$ (بر حسب ساعت)؛ پارامتر پاداش در الگوریتم یادگیری؛ پارامتر جریمه در الگوریتم یادگیری؛ ضریب جریمه ناشی از دفعات مشاهده‌پذیری شین‌ها در آرایش واحدهای فازوری؛ ضریب ارزش ریالی اغتشاشات نسبت به ارزش ریالی یک واحد فازوری؛ یک عدد خیلی بزرگ؛ یک عدد خیلی کوچک؛	$z_{ij}^{flow}$
متغیر تصمیم‌گیری نشان‌دهنده اتصال شین $i$ به یکی از شین‌های دارای اندازه‌گیر غیرسنکرون، $z_i^{volt} = 1$ در صورتی که واحد اندازه‌گیر ولتاژ در شین $i$ موجود باشد، در غیر این صورت $z_i^{volt} = 0$ ؛	تعداد اندازه‌گیر ولتاژ در شین $i$ ؛ در صورتی که واحد اندازه‌گیر ولتاژ در شین $i$ موجود باشد، در غیر این صورت $z_i^{volt} = 0$ ؛	$z_i^{volt}$
متغیر تصمیم‌گیری نشان‌دهنده مشاهده‌پذیری یا عدم مشاهده‌پذیری شین $i$ توسط واحد اندازه‌گیر غیرسنکرون موجود در شین $j$ (یا میان شین‌های $i$ و $j$ )، اگر شین $i$ توسط این واحد مشاهده‌پذیر گردد، در غیر این صورت $\eta_{ij} = 0$ ؛	تعداد اتوماتای یادگیر $i$ ؛ تعداد کل اعمال قابل اجرا در اتوماتای یادگیر $i$ ؛ عمر مفید واحد فازوری (بر حسب سال)؛ تعداد کل شین‌های شبکه؛ میانگین تعداد وقایع (اغتشاشات) اتفاق‌افتاده در خط $i$ (بر حسب تعداد در سال)؛ میانگین مدت زمان رفع خطا از واحد فازوری شین $i$ (بر حسب ساعت)؛ میانگین مدت زمان رفع خطا از خط $i$ (بر حسب ساعت)؛ پارامتر پاداش در الگوریتم یادگیری؛ پارامتر جریمه در الگوریتم یادگیری؛ ضریب جریمه ناشی از دفعات مشاهده‌پذیری شین‌ها در آرایش واحدهای فازوری؛ ضریب ارزش ریالی اغتشاشات نسبت به ارزش ریالی یک واحد فازوری؛ یک عدد خیلی بزرگ؛ یک عدد خیلی کوچک؛	$\eta_{ij}$
بردار احتمال اعمال اتوماتای یادگیر $i$ ؛	تابع مشاهده‌پذیری شین $i$ ؛ احتمال انتخاب عمل $i$ در تکرار $n$ اتوماتای یادگیر؛ ضریب جریمه ناشی از نایقینی در واحدهای فازوری؛ ضریب جریمه ناشی از نایقینی در خطوط شبکه؛ ضریب جریمه ناشی از عدم رعایت قیود مشاهده‌پذیری شبکه؛	$f_i$ $p_i(n)$ $k_{reli}^{PMU}$ $k_{reli}^{line}$ $k_{const}$