

مکان‌یابی دستگاه‌های اندازه‌گیری به صورت چند هدفه با استفاده از تخمین حالت در شبکه‌های توزیع

علیرضا حسن‌نژاد مرزونی^۱ علیرضا ذکریازاده^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه علم و فناوری مازندران- بهشهر- ایران

alireza.hassannejad@mazust.ac.ir

۲- استادیار- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه علم و فناوری مازندران- بهشهر- ایران

zakaria@mazust.ac.ir

چکیده: جایابی دستگاه‌های اندازه‌گیری یکی از نیازمندی‌های سیستم‌های توزیع و یکی از کاربردهای مهم تخمین حالت سیستم می‌باشد. در این مقاله مسئله جایابی دستگاه‌های اندازه‌گیری توان اکتیو و راکتیو با روش چند هدفه مدل‌سازی و بهینه‌سازی شده است. اهداف این مسئله شامل یافتن مصالحه بین استفاده از کمترین تعداد دستگاه اندازه‌گیری، افزایش دقت در خروجی تخمین حالت برای اندازه و زوایای ولتاژ شینه‌ها، بهبود کیفیت تخمین حالت و کاهش هزینه نهایی شبکه است. این هزینه‌ها با در نظر گرفتن مقدار تلفات خط، ظرفیت توان عبوری خط، تعداد خطوط متصل به خط موردنظر و تعداد تغییر جهت شارش توان خط می‌باشد. بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم MOEA/D بر روی سیستم توزیع شعاعی ۳۳ شینه IEEE و برای مقایسه و تحلیل بیشتر، بر روی شبکه توزیع آزمایشی ۱۲۳ شینه IEEE نیز انجام شده است. مسئله تخمین حالت نیز با استفاده از الگوریتم تجمع ذرات بهینه‌سازی شده است. با کمک شبیه‌سازی مونت کارلو و ایجاد شرایط مختلف برای شبکه، نتایج به دست آمده مقاوم بودن این روش را تضمین نمود.

کلمات کلیدی: جایابی دستگاه‌های اندازه‌گیری، شبکه توزیع شعاعی، تخمین حالت در سیستم‌های توزیع، بهینه‌سازی چند هدفه، کیفیت جایابی، شبیه‌سازی مونت کارلو.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۷/۰۵/۰۸

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۷/۰۶/۱۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۷/۰۹

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر علیرضا ذکریازاده

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - مازندران - بهشهر - جاده دریا - دانشگاه علم و فناوری مازندران - دانشکده‌ی مهندسی برق و کامپیوتر

المان‌های مداری مدل شده‌اند. همچنین دستگاه اندازه‌گیری ولتاژ به‌عنوان ادمیتانس موازی و دستگاه اندازه‌گیری جریان و یا توان خطوط به‌صورت ادمیتانس شاخه‌ها در نظر گرفته شده‌اند. در [۹]، جایابی دستگاه‌های اندازه‌گیری با استفاده از تخمین حالت و با در نظر گرفتن حملات سایبری بر روی دستگاه‌های اندازه‌گیری و تغییر یافتن داده‌ها ارائه شده است. در [۱۰]، رویکرد و فرمولاسیونی جدید به صورت بهینه‌سازی چندهدفه باهدف یافتن مصالحه بین تعداد استفاده از دستگاه‌های اندازه‌گیری هوشمند و واحدهای اندازه‌گیری فازوری برای شبکه‌های توزیع فعال ارائه شده است. همچنین روشی جدید برای تخمین حالت در شبکه‌های توزیع برای یافتن مکان بهینه این دو نوع دستگاه‌های اندازه‌گیری در نظر گرفته شده است. در [۱۱]، الگوریتم چندهدفه جدید باهدف استفاده از تعداد اندکی از واحدهای اندازه‌گیری فازوری و کاهش عدم قطعیت تخمین اندازه ولتاژ شینه‌ها و کنترل ولتاژهای ثانویه شینه‌ها ارائه شده است. در مرجع [۱۲]، یک فرمولاسیون بهینه‌سازی برای مسئله جایابی واحدهای اندازه‌گیری فازوری در شبکه توزیع ارائه شده است. این روش اضافه شدن دستگاه‌های اندازه‌گیری و رؤیت‌پذیری شبکه را در دو شرایط معمولی و اضطراری شبکه در نظر گرفته است. در مرجع [۱۳]، شاخصی برای وزن‌دهی به واریانس خطا و کاهش آن و بهبود این شاخص با در نظر گرفتن کاهش حساسیت خطای مقادیر تخمینی باهدف کاهش تعداد دستگاه‌های اندازه‌گیری ارائه شده است. در مرجع [۱۴]، تأثیر دستگاه‌های اندازه‌گیری بر تخمین حالت بر پایه جریان شاخه‌ها در سیستم‌های توزیع با روشی تصادفی مورد بررسی قرار گرفته است. در روش مذکور، از بارهای سیستم، به‌عنوان شبه اندازه‌گیری‌ها با واریانس زیاد استفاده شده است. در مرجع [۱۵]، با استفاده از داده‌های دستگاه‌های اندازه‌گیری و شبه اندازه‌گیری‌ها، روشی برای تخمین حالت سه فاز در سیستم‌های توزیع بر پایه اندازه و زاویه جریان شاخه‌ها، ارائه شده است. تأثیر مکان دستگاه‌های اندازه‌گیری و شبه اندازه‌گیری‌ها بر روی این روش از تخمین حالت نیز مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. همچنین، نتایج نیز با روش تخمین حالت بر پایه اندازه و ولتاژ شین‌ها مقایسه شده است که این روش سرعت محاسبات در تخمین حالت را افزایش می‌دهد. مرجع [۱۶] رویکردی جدید در مکان‌یابی دستگاه‌های اندازه‌گیری ولتاژ و توان عبوری در شبکه برای بهبود کیفیت مقادیر تخمینی اندازه و زاویه ولتاژ شین‌ها ارائه داده است. در این روش، با استفاده از چندین سناریو، مقادیری احتمالی برای داده‌های سیستم در نظر گرفته و تخمین حالت را برای تمامی این سناریوها انجام می‌دهد. همچنین، کواریانس خطای اندازه و زاویه ولتاژ شین‌ها برای به دست آوردن شکل بیضوی آن‌ها محاسبه شده و مساحت آن به دست آورده می‌شود؛ در شینی که بیشترین مساحت را دارد، دستگاه‌های اندازه‌گیری قرار داده شده و این راه حل به‌صورتی در پی انجام می‌شود. این تکرار تا زمانی ادامه می‌یابد که در ۹۵ درصد سناریوها، خطای ولتاژ و زاویه آن‌ها کمتر از یک

امروزه نظارت دقیق بر سیستم‌های توزیع، نیازمند دقت بالایی در برآورد پارامترهای سیستم توزیع است. کسب دقت بالا برای هدف نظارت در سیستم‌های توزیع می‌تواند از طریق دستگاه‌های اندازه‌گیری حاصل شود. دستگاه‌های اندازه‌گیری در حالت عادی دارای خطاهای در مقادیر اندازه‌گیری می‌باشند که به خطاهای اندازه‌گیری معروف هستند. برای حل مشکل خطا در مقادیر اندازه‌گیری شده، می‌توان از تخمین حالت استفاده کرد. تخمین حالت می‌تواند از داده‌های اندازه‌گیری و با استفاده از توپولوژی سیستم، برآورد دقیقی از اطلاعات سیستم را حاصل کند. یک المان کلیدی در کنترل سیستم‌های توزیع، تخمین حالت است که می‌تواند اطلاعات شبکه برای نیازهای گوناگون را فراهم نماید. یکی از مهم‌ترین نیازهای شبکه، تشخیص داده‌های نادرست دستگاه‌های اندازه‌گیری و پردازش داده‌ها برای تصحیح خطا می‌باشد [۱]. تخمین حالت در سیستم‌های توزیع نیازمند اطلاعات کافی برای تخمین پارامترهای سیستم است. در این صورت باید از دستگاه‌های اندازه‌گیری در مکان دقیق و تعداد کافی استفاده نمود. تاکنون، مکان‌یابی دستگاه‌های اندازه‌گیری یک امر بسیار مهم برای بهبود رؤیت‌پذیری سیستم در مقابل اتفاقات گوناگون شبکه بوده که تخمین حالت یک جنبه اثبات‌شده برای رسیدن به این هدف بوده است. در مرجع [۲] از الگوریتم تخمین حالت جداسازی شده^۱ برای تخصیص دستگاه اندازه‌گیری و تشخیص رؤیت‌پذیری سیستم با روشی بر پایه تکرار استفاده شده است. همچنین از دستگاه‌های اندازه‌گیری و شبه اندازه‌گیری‌ها، با کمک روش تخمین حالت خطی‌سازی شده^۲ برای تشخیص حالت جزیره‌ای سیستم استفاده شده است. ایده اصلی این روش، بر این اساس است که دستگاه‌های اندازه‌گیری (اندازه‌گیری‌های واقعی و شبه اندازه‌گیری‌ها) تا حصول شرایط رؤیت‌پذیری، به شبکه اضافه می‌شوند. در مرجع [۳] برخلاف مرجع [۲]، روشی غیرتکراری برای بهبود روش قبلی و با تعریفی جدید ارائه شده است. در روش مرجع [۳]، چندین دستگاه اندازه‌گیری به‌طور هم‌زمان در چندین مکان مختلف سیستم تخصیص داده می‌شوند. تحقیقات دیگری نیز در سطح سیستم‌های قدرت با اهداف مختلف انجام شده است. کاهش واریانس خطا در مقادیر تخمین زده‌شده‌ی اندازه و زاویه ولتاژ شین‌ها در مراجع [۴] - [۶] بررسی شده است. در [۷]، کاربرد تخمین حالت در جایابی دستگاه‌های اندازه‌گیری با استفاده از تجزیه و تحلیل خطا و پیکره‌بندی مجدد شبکه در حضور منابع تولید پراکنده و در نظر گرفتن حد بالا برای تعداد دستگاه‌های اندازه‌گیری با استفاده از روشی آماری و تحلیلی انجام شده است. رویکرد دیگری در جایابی دستگاه اندازه‌گیری شین‌ها و خطوط در [۸] ارائه شده است که خطای تخمین حالت را به‌عنوان یک مدل مداری در نظر گرفته است. به‌طوری‌که این خطا به‌صورت مقاومت زمین شده و دستگاه‌های اندازه‌گیری به عنوان

۲- تخمین حالت در شبکه‌های توزیع

معمولاً تخمین حالت در شبکه‌های توزیع، با روش حداقل مربعات خطا^۲ مدل‌سازی می‌شود [۴] - [۶]. در مرجع [۲۰]، روشی برای تخمین حالت بر پایه الگوریتم بهبود یافته بهینه‌سازی ازدحام ذرات^۳ (PSO) جهت افزایش کارایی، دقت و سرعت همگرایی نسبت به الگوریتم PSO اصلی ارائه شده است. در این مقاله به دلیل پیچیدگی مسئله اصلی به جهت چندهدفه بودن آن، از روش ساده‌تر تخمین حالت با استفاده از PSO برای تخمین متغیرهای حالت سیستم استفاده شده است [۲۱]. روابط تابع هدف برای بهینه‌سازی متغیرهای سیستم، به صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود:

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

که در رابطه (۱)، x متغیرهای حالت سیستم، w_i ضرایب وزنی برای داده اندازه‌گیری شده i ام، z_i مقادیر اندازه‌گیری شده و h_i معادلات حالت سیستم برای متغیر i ام است. در این روابط متغیرهای حالت، اندازه و زاویه جریان خطوط بوده و داده‌های اندازه‌گیری مورد استفاده برای ورودی تخمین حالت نیز از دستگاه‌های اندازه‌گیری توان عبوری گرفته می‌شود. همچنین، از بارها برای مدل‌سازی شبه‌اندازه‌گیری‌ها استفاده شده است. شبه‌اندازه‌گیری‌ها، نوعی داده هستند که از مقادیر گذشته بار شبکه با لحاظ درصدی از عدم قطعیت مدل می‌شوند. در صورت کمبود دستگاه‌های اندازه‌گیری از شبه‌اندازه‌گیری‌ها برای افزایش رؤیت‌پذیری شبکه استفاده می‌شود. در این مورد، برای داده‌های اندازه‌گیری واقعی، ۱ و ۳ درصد خطا و همچنین برای شبه‌اندازه‌گیری‌ها ۳۰ و ۵۰ درصد خطا در نظر گرفته شده است [۱۶].

درصد ثابتی شود. مرجع [۱۷] برای بهبود راه حل پیشین، الگوریتم بهینه‌سازی ترتیبی را برای حل مسئله جایابی دستگاه‌های اندازه‌گیری ارائه می‌دهد که سریع‌تر و دارای دقتی بیشتر است. این روش با نگرشی مانند مرجع [۳] به صورت هم‌زمان چندین دستگاه اندازه‌گیری را در مکان‌های مختلف سیستم جایابی می‌کند. روش مرجع [۱۷] ممکن است بهترین جواب بهینه نباشد، چراکه تابع هدف را به صورت تخمینی، بهینه می‌کند. در مرجع [۱۸]، مسئله جایابی دستگاه‌های اندازه‌گیری توان عبوری به صورت چندهدفه بهینه‌سازی شده است. اهداف آن شامل کاهش هزینه در تعداد دستگاه‌های اندازه‌گیری و کاهش خطای نسبی در اندازه و زاویه ولتاژ شین‌های می‌باشد. دیده می‌شود که در مقالات پیشین، کیفیت خطای تخمین حالت به عنوان هدف در نظر گرفته نشده است. در این مقاله، هدف پیشینه کردن کیفیت خطای تخمین حالت به عنوان هدفی متضاد با اهداف دیگر در مدل‌سازی جایابی دستگاه‌های اندازه‌گیری که در تحقیقات پیشین مورد بررسی قرار نگرفته، در نظر گرفته شده است. این هدف در صورتی برآورده می‌شود که تعداد دستگاه‌های اندازه‌گیری در سیستم افزایش داده شود. در جدول (۱)، رویکرد پیشنهادی توابع هدف مقالات پیشین و این مقاله مورد مقایسه قرار گرفته است.

در این مقاله، کاهش هزینه در تعداد دستگاه‌های اندازه‌گیری با در نظر گرفتن تلفات و ظرفیت توان عبوری خطوط، تعداد خطوط متصل به آن و همچنین از نظر تغییرات جهت شارش توان در نظر گرفته شده است. علاوه بر آن، هدف کاهش خطای نسبی اندازه و زاویه ولتاژ شین‌ها و کیفیت متغیرهای حالت سیستم نیز به عنوان هدفی که باید حداکثر شود، بهینه‌سازی می‌شود. ساختار مقاله پیش رو شامل: تخمین حالت در شبکه‌های توزیع (۲)، تعریف مسئله (۳)، قدرتمندی در جایابی دستگاه اندازه‌گیری (۴) و نتایج شبیه‌سازی (۵) می‌باشد.

جدول (۱): مقایسه اهداف مطالعاتی مقالات اخیر در رویکرد جایابی دستگاه‌های اندازه‌گیری

رویکرد حل مسئله	هدف				سال انتشار	شماره مرجع
	هزینه جایابی	افزایش دقت در مقادیر تخمینی	قابلیت اطمینان	کاهش تعداد دستگاه‌های اندازه‌گیری		
پیشنهاد الگوریتمی مقاوم و سریع با هدف جایابی دستگاه‌های اندازه‌گیری	✓	✓		✓	۲۰۱۸	[۷]
مدل‌سازی دستگاه‌های اندازه‌گیری با استفاده از المان‌های مداری	✓	✓		✓	۲۰۱۶	[۸]
ایجاد رویکردی نوین با هدف امنیت در داده‌های اندازه‌گیری		✓	✓		۲۰۱۷	[۹]
پیشنهاد الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه	✓	✓		✓	۲۰۱۸	[۱۰]
پیشنهاد الگوریتم چند هدفه بصورت روشی احتمالی		✓	✓		۲۰۱۷	[۱۱]
الگوریتم ژنتیک	✓		✓	✓	۲۰۱۶	[۱۲]
پیشنهاد رویکردی احتمالی بر اساس خطای مقادیر حالت تخمینی		✓			۲۰۰۹	[۱۶]
پیشنهاد الگوریتم بهینه‌سازی جدید و روش حلی با سرعت بسیار بالا		✓			۲۰۱۱	[۱۷]
پیشنهاد الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه جدید بر اساس الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات	✓	✓		✓	۲۰۱۷	[۱۸]
حل مسئله جایابی با استفاده از الگوریتم و رویکردی جدید				✓	۲۰۰۷	[۲۶]
پیشنهاد رویکردی نوین برای حل مسئله جایابی بصورت مدلی چند هدفه و بهینه‌سازی آن با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه	✓	✓	✓	✓	این مقاله	

۳- تعریف مسئله

فناوری‌های جدید شامل منابع تولید پراکنده و منابع ذخیره انرژی می‌شوند. در نتیجه با داشتن مقادیر دقیق‌تری از تلفات شبکه می‌توان تحلیل دقیق‌تری در مورد جایابی فناوری‌های جدید را دارا بود و ریسک جایابی آن‌ها کاهش داد.

۳-۱-۳- تغییر جهت شارش توان

موضوع جهت تغییرات شارش توان زمانی مهم می‌شود که می‌خواهیم از ادوات حفاظتی در یک شبکه استفاده کنیم. فرض کنید هنگامی که خطی با تغییرات کوچک بار، جهت شارش توان آن به خاطر تغییر جهت جریان، تغییر کند، ممکن است ادوات حفاظتی آن تغییر را درست اندازه‌گیری نکرده و به‌عنوان خطا در شبکه تلقی نموده و دستور تریپ را ارسال نماید. از سوی دیگر تعداد دفعات تغییر جهت شارش توان می‌تواند به معنی موقعیت استراتژیک خط نیز باشد. به‌طوری‌که این خط دارای اهمیت زیاد در ارسال و دریافت توان است و یا به‌عبارت‌دیگر، تعداد ارجاع به این خط برای انتقال توان، زیاد می‌باشد و باعث می‌شود خط مورد انحصار برای انتقال توان قرار گیرد. به بیان دیگر، خطی که دارای تعداد بالای تغییرات جهت شارش توان است، از اهمیت بالاتری در جایابی دستگاه اندازه‌گیری برخوردار می‌شود.

۳-۱-۴- تعداد خطوط متصل به یک خط

در شبکه‌های توزیع که معمولاً دارای ساختاری شعاعی و درختی می‌باشند، خطوطی که دارای انشعاب بیشتری هستند معمولاً ظرفیت بالاتری در عبور توان دارا می‌باشند. این خطوط معمولاً خطوط اصلی سیستم بوده و تغییرات شارش توان نیز در آن‌ها زیاد می‌باشد. در نتیجه، اگر مقدار دقیق از اطلاعات توان عبوری این خطوط در دسترس باشد، می‌توان دید نسبتاً بهتری از شبکه داشت زیرا توان عبوری این خطوط، حاصل عبور توان از خطوط دیگر به این خط می‌باشند. پس خطوطی که دارای انشعاب بیشتری در ابتدا و انتهای آن‌ها است، دارای اهمیت بالاتری در انتخاب مکان دستگاه‌های اندازه‌گیری هستند. شاخص‌هایی همچون ظرفیت توان عبوری خطوط، میزان تلفات عبوری خطوط، تغییر جهت شارش توان عبوری از خطوط و تعداد انشعاب‌های متصل به خطوط انتقال می‌تواند تأثیرات بسیار چشم‌گیری در جایابی دستگاه‌های اندازه‌گیری داشته باشد. در این مقاله، تأثیر این شاخص‌ها به صورت هزینه جایابی دستگاه‌های اندازه‌گیری در نظر گرفته شده‌اند. به‌طوری‌که اگر شاخصی دارای اهمیت بیشتری باشد، دارای هزینه جایابی کمتری بوده، در نتیجه شانس آن برای انتخاب شدن به‌عنوان مکان دستگاه اندازه‌گیری، بیشتر می‌شود. هرکدام از مقادیر این شاخص‌ها بین مقدار صفر و یک نرمالیزه شده‌اند.

اهداف اصلی در این مقاله، جایابی دستگاه اندازه‌گیری توان عبوری خطوط با در نظر گرفتن رؤیت‌پذیری سیستم، تضمین کمینه‌سازی هزینه دستگاه‌های اندازه‌گیری، افزایش دقت در تخمین و کیفیت متغیرهای حالت سیستم می‌باشد. از این‌رو، چهار تابع هدف مورد استفاده در این مسئله به‌صورت زیر خلاصه می‌شوند: ۱- کاهش مجموع هزینه جایابی دستگاه اندازه‌گیری، ۲- کاهش خطای نسبی اندازه ولتاژ شین‌ها، ۳- کاهش خطای نسبی زاویه ولتاژ شین‌ها، ۴- افزایش کیفیت جایابی دستگاه‌های اندازه‌گیری.

۳-۱-۱- هزینه تخصیص دستگاه اندازه‌گیری

کاهش هزینه یک امر بسیار مهم برای مسئله جایابی دستگاه‌های اندازه‌گیری می‌باشد. از این‌رو در این مطالعات، یکی از اهداف بهینه‌سازی، کاهش هزینه تخصیص دستگاه‌های اندازه‌گیری می‌باشد. از این‌رو یک قسمت از توابع هدف در این بهینه‌سازی به کمینه کردن مجموع هزینه نهایی استفاده از دستگاه اندازه‌گیری توان عبوری، اطلاق گرفته می‌شود.

$$Z1 = \min \sum_{j=1}^{n_l} C_{pf,j} P_{pf,j} \quad (2)$$

در رابطه (۲)، n_l تعداد خطوط شبکه، $C_{pf,j}$ هزینه تخصیص دستگاه اندازه‌گیری در خط j ام و $P_{pf,j}$ متغیر باینری است که اگر دستگاه اندازه‌گیری در خط j ام قرار گیرد، مقدار آن یک شده و در غیر این صورت صفر می‌باشد. در این مقاله هزینه‌های جایابی دستگاه اندازه‌گیری تنها شامل هزینه خود دستگاه نیست، بلکه شاخص‌هایی برای محاسبه هزینه در نظر گرفته شده‌اند که به شرح زیر می‌باشد.

۳-۱-۱- ظرفیت توان عبوری خطوط

توان عبوری از خطوط شامل توان اکتیو و راکتیو می‌باشد. این موضوع زمانی مهم می‌شود که وقتی دستگاه اندازه‌گیری برای یک خط با ظرفیت توان ظاهری عبوری بالا انتخاب می‌شود، باید از تجهیزاتی مانند ترانسفورماتور جریان و ولتاژ بالا با ظرفیت بالا استفاده کرد. همین امر باعث افزایش هزینه در انتخاب دستگاه اندازه‌گیری شده و در نهایت موجب افزایش هزینه نهایی شبکه می‌شود.

۳-۱-۲- تلفات خط

کاهش تلفات توان در خطوط انتقال هدف بسیاری از محققان و مهندسان در طی سال‌های اخیر بوده است. چراکه کاهش تلفات شبکه موجب پایداری هرچه بیشتر شبکه و در نتیجه جلوگیری از فروپاشی ولتاژ شبکه می‌باشد. اخیراً با فعال شدن شبکه‌های توزیع و استفاده از فناوری‌های جدید توانسته‌اند تلفات شبکه را کاهش دهد. اکثریت این

۲-۳- خطای نسبی اندازه و زاویه ولتاژ شین

خطای نسبی اندازه و زاویه ولتاژ شین‌ها از روابط (۳) و (۴) به دست می‌آید [۱۶]:

$$ERR_V = \frac{100}{n} \sum_{k=1}^{n_b} \left| \frac{V_k^t - V_k^{es}}{V_k^t} \right| \quad (3)$$

$$ERR_\delta = \frac{100}{n} \sum_{k=1}^{n_b} \left| \frac{\delta_k^t - \delta_k^{es}}{\delta_k^t} \right| \quad (4)$$

در روابط (۳) و (۴)، V_k^t و δ_k^t به ترتیب مقادیر واقعی اندازه و زاویه ولتاژ شین k ام، V_k^{es} و δ_k^{es} به ترتیب مقادیر تخمینی اندازه و زاویه ولتاژ شین k ام می‌باشند. خطای نسبی برای اندازه و زاویه ولتاژ شین‌ها، برای ۱۰۰ سناریو ایجادشده توسط شبیه‌سازی مونت کارلو، برای شبکه محاسبه می‌شود. این سناریوها با اعمال خطاهای مختلف به مقادیر اندازه‌گیری انجام‌شده و مقادیر خطای نسبی باید در ۹۵ درصد سناریوها، کمتر از مقداری از قبل تعیین‌شده باشند. کاهش این دو خطای نسبی از اهداف بهینه‌سازی این مسئله هستند. رسیدن به این هدف باعث افزایش دقت در مقادیر تخمینی می‌شوند. توابع هدف برای این قسمت به صورت روابط (۵) و (۶) تعریف می‌شوند:

$$Z2 = \min ERR_V \quad (5)$$

$$Z3 = \min ERR_\delta \quad (6)$$

توابع هدف $Z2$ و $Z3$ باهدف افزایش رؤیت‌پذیری ارائه شده‌اند. به طوری که با افزایش دستگاه‌های اندازه‌گیری، تعداد شبه اندازه‌گیری‌ها کاهش و در نتیجه خطای نسبی اندازه و زاویه ولتاژ که همان کیفیت مقادیر تخمینی می‌باشند کاهش می‌یابد. این یعنی افزایش رؤیت‌پذیری شبکه که از اهداف این رویکرد پیشنهادی برای حل مسئله جایابی دستگاه‌های اندازه‌گیری می‌باشد.

۳-۳- کیفیت تخصیص دستگاه‌های اندازه‌گیری

کیفیت تخصیص دستگاه‌های اندازه‌گیری توسط رابطه (۷) تعریف می‌شود [۱۶]:

$$Z4 = Q = \frac{1}{P_x} \quad (7)$$

در رابطه (۷)، P_x ماتریس کوواریانس خطای مقادیر حالت شبکه می‌باشند که توسط تخمین حالت و رابطه (۸) به دست می‌آید:

$$P_x = (H^T(x) R_Z^{-1} H(x))^{-1} \quad (8)$$

در رابطه (۸)، R_Z ماتریس کوواریانس خطاهای اندازه‌گیری و H که ماتریس ژاکوبین است، به صورت (۹) تعریف می‌شود:

$$H(x) = \frac{\partial h(x)}{\partial x} \quad (9)$$

در رابطه (۹)، $h(x)$ تابع غیرخطی برای داده اندازه‌گیری موردنظر است که در رابطه (۱) تعریف و مورد استفاده قرار گرفته است. لازمی کیفیت در مقادیر تخمینی، افزایش تعداد دستگاه‌های اندازه‌گیری می‌باشد. از این رو، این تابع هدف باید بیشینه شود که رسیدن به این هدف، در تضاد تابع هدف $Z1$ می‌باشد. در واقع بهینه‌سازی این مسئله، ایجاد یک نوع تعادل بین هزینه و کیفیت در هدف تخصیص دستگاه‌های اندازه‌گیری می‌باشد.

۴-۳- روش انتخاب بهترین پارتو

هدف از انتخاب بهترین پارتو در میان پارتوهای خروجی، انعطاف در حق انتخاب بر اساس نیازهای بهره‌بردار در هدف جایابی دستگاه‌های اندازه‌گیری می‌باشد. این حق انتخاب به این معنی است که بهره‌بردار بتواند تصمیم مصمم‌تری در انتخاب مکان‌های مشخص‌شده توسط الگوریتم را داشته باشد. چراکه خروجی الگوریتم‌های چندهدفه تعدادی پارتو بوده (به جبهه پارتو هم مرسوم است) و بالاخره یک کدام از این جواب‌ها باید مطلوب بهره‌بردار شود. به همین جهت، روشی برای انتخاب بهترین پارتو ارائه شده است. در این روش، ابتدا بهترین مقادیر هر کدام از توابع هدف جستجو می‌شود. در اینجا بهترین جواب برای هزینه جایابی و درصد خطا در اندازه و زاویه ولتاژ، مقادیر حداقل آن‌ها و بهترین جواب برای مقادیر کیفیت تخمین حالت، مقدار حداکثر آن می‌باشد. در ادامه، فاصله مقادیر به دست آمده در هر پارتو نسبت به مقدار ایده‌آل یا بهترین آن‌ها به دست آورده و طبق رابطه (۱۰) مجموع آن‌ها محاسبه می‌شود.

$$D = \sum_{i=1}^u \left| \frac{Z_u^{ideal} - Z_u}{Z_u} \right| \quad (10)$$

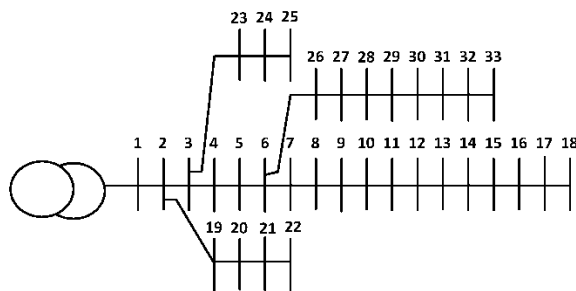
در رابطه (۱۰)، عبارات Z و Z^{ideal} مطابق روابط (۱۱) و (۱۲)، مقادیر ایده‌آل و واقعی جبهه پارتو و u تعداد توابع هدف می‌باشند.

$$Z = [Z1, Z2, Z3, Z4] \quad (11)$$

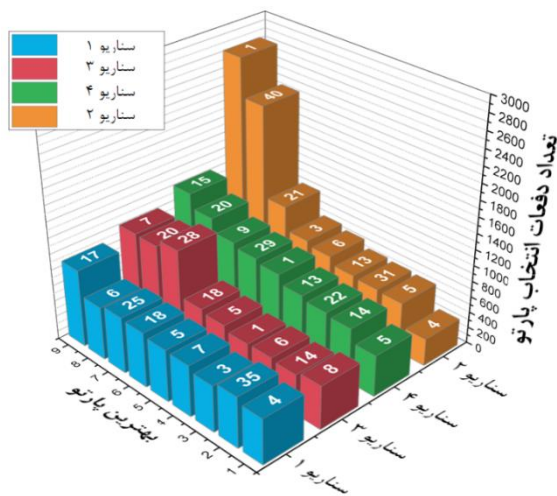
$$Z^{ideal} = [\min(Z1), \min(Z2), \min(Z3), \max(Z4)] \quad (12)$$

در ادامه، بعد از به دست آمدن مقادیر D در رابطه (۱۰)، آن‌ها به صورت صعودی مرتب می‌شوند. سپس از فرمول بولتزمن^۵ برای تخصیص مقادیر احتمال به هر کدام از D ‌های محاسبه‌شده، استفاده شده و متناسب با این مسئله، به صورت رابطه (۱۳) تغییر داده می‌شود [۲۲]. در واقع برای هر کدام از مقادیر مرتب‌شده، انتخاب به صورت تصادفی و با توجه به مقادیر احتمال نسبت داده شده، جهت‌دار می‌شوند. در رابطه (۱۳)، n تعداد پارتوهای جبهه پارتو و پارامتر β به عنوان فشار انتخاب^۶ بیان می‌شود. به این ترتیب که اگر فشار انتخاب به صفر میل داده شود، احتمال تمامی حالت‌ها برابر شده و انتخاب به صورت کاملاً تصادفی صورت می‌گیرد و اگر β به سمت بی‌نهایت میل داده شود، در این صورت احتمال بهترین جواب ممکن به عدد یک

وابسته می‌باشد و این مقدار هم نرمالیزه می‌شود. عمل نرمالیزه شدن این مقادیر با این هدف است که مقیاس تمامی این ضرایب یکی شوند. نتایج شبیه‌سازی برای ۹ نمونه از بهترین پارتوها در میان ۵۰ پارتو و برای سناریوهای مختلف خطا در مقادیر اندازه‌گیری در جدول (۳) آورده شده. نتایج روش‌های انتخاب بهینه‌ترین خروجی به ازای مقدار بینهایت برای عبارت فشار انتخاب در رابطه (۱۳)، در سناریوهای مختلف به شرح جدول (۴) می‌باشد. مقادیر و اطلاعات دقیق تعداد دفعات انتخاب به ازای β های مختلف در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل (۱): نمودار تک خطی سیستم توزیع ۳۳ شینه



شکل (۲): تعداد دفعات انتخاب به ازای β های مختلف

جدول (۲): مقادیر شماره خطوط شبکه ۳۳ شینه					
شماره خط	شین گیرنده	شین فرستنده	شماره خط	شین گیرنده	شین فرستنده
۱۷	۱۸	۱۷	۱	۲	۱
۲	۱۹	۱۸	۲	۳	۲
۱۹	۲۰	۱۹	۳	۴	۳
۲۰	۲۱	۲۰	۴	۵	۴
۲۱	۲۲	۲۱	۵	۶	۵
۳	۲۳	۲۲	۶	۷	۶
۲۲	۲۴	۲۳	۷	۸	۷
۲۴	۲۵	۲۴	۸	۹	۸

و احتمال بقیه موارد به صفر میل می‌کند. در واقع انتخاب از حالت تصادفی هدف‌دار خارج شده و به یک جواب قطعی تبدیل می‌شود.

$$P = \frac{e^{-\beta \times D}}{\sum_{i=1}^n \frac{\max D_i}{e^{-\beta \times D_i}}} \quad (13)$$

نهایتاً برای یافتن بهترین خروجی، این آزمایش را توسط چرخه‌ی رولت^۷ [۲۳] به تعداد مشخصی انجام داده و بهترین خروجی در میان پارتوهای هر الگوریتم انتخاب می‌شود. این انتخاب برحسب تعداد موفق بودن هر آزمایش برای هر یک از D ها انجام می‌شود.

۴- قدرتمندی در جایابی دستگاه اندازه‌گیری

مسئله چندهدفه جایابی دستگاه‌های اندازه‌گیری برای به دست آوردن بهترین پارتو، توسط الگوریتم MODE/D بهینه‌سازی و فرمول‌بندی شده است. بهترین کاربرد این روش می‌تواند در یافتن مصالحه بین کمترین خطا در اندازه و زوایای ولتاژ شینه‌ها، استفاده از کمترین تعداد دستگاه‌های اندازه‌گیری به منظور کاهش هزینه نهایی شبکه، افزایش دقت و کیفیت در تخمین حالت شبکه استفاده شود. این افزایش دقت و کاهش هزینه‌های شبکه شامل یافتن مکانی است که از نظر تلفات و ظرفیت توان عبوری دارای بیشترین مقدار، از نظر خطوط متصل به آن دارای بیشترین تعداد و هم از نظر جهت شارش توان بیشترین تغییرات باشد. در این بهینه‌سازی از ۵۰ و ۳۰ درصد خطا در داده‌های شبه اندازه‌گیری استفاده شده و در واقع در این مسئله تمامی داده‌های اندازه‌گیری توان تزریقی شین‌ها، همان شبه‌اندازه‌گیری‌هایی باشند. داده‌های واقعی هم از طریق اضافه کردن ۳ و ۱ درصد خطا به داده‌های پخش بار به دست آمده است. در این مسئله از پخش بار پسر-پیشرو در به دست آوردن مقادیر و پارامترهای شبکه توزیع استفاده شده است [۱۵].

۵- نتایج شبیه‌سازی

در این مقاله برای ارزیابی روش جدید ارائه‌شده در مکان‌یابی دستگاه‌های اندازه‌گیری، از سیستم توزیع ۳۳-شینه استاندارد IEEE مطابق شکل (۱) استفاده شده [۱۹] و مقادیر شماره خطوط نیز در جدول (۲) مطابق این شبکه نیز قابل مشاهده می‌باشد. مقادیر ضرایب هزینه شامل ظرفیت توان عبوری خطوط، تلفات خط، تغییر جهت شارش توان و تعداد خطوط متصل به یک خط می‌باشند. محاسبه ظرفیت توان عبوری خطوط، تلفات خط و تغییر جهت شارش توان به این صورت است که ۱۰۰۰ سناریو با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو برای بار شبکه با ۲۰ درصد انحراف ایجاد شده و میانگین ظرفیت توان عبوری خطوط و تلفات خط را به عنوان ضرایب هزینه نرمالیزه شده و تعداد جهت‌های شارش توان نیز محاسبه و نرمالیزه می‌شود. تعداد خطوط متصل به شبکه هم دارای مقداری معلوم و به توپولوژی شبکه

۹	۱۰	۹	۲۵	۲۶	۶
۱۰	۱۱	۱۰	۲۶	۲۷	۲۶
۱۱	۱۲	۱۱	۲۷	۲۸	۲۷
۱۲	۱۳	۱۲	۲۸	۲۹	۲۸
۱۳	۱۴	۱۳	۲۹	۳۰	۲۹
۱۴	۱۵	۱۴	۳۰	۳۱	۳۰
۱۵	۱۶	۱۵	۳۱	۳۲	۳۱
۱۶	۱۷	۱۶	۳۲	۳۳	۳۲

در این شکل می توان مقادیر تعداد دفعات انتخاب بهترین پارتو را در سناریوهای مختلف مشاهده نمود. مقادیر β در سناریوهای شماره ۱ تا ۴ به ترتیب برابر ۱، ۳، ۱ و ۸ می باشد. تعداد آزمایش های انجام شده توسط چرخه رولت، ۱۰۰۰۰ می باشد.

۵-۱- تحلیل نتایج مکان های انتخاب شده

با توجه به جدول (۳) در سناریو ۱ مشاهده می شود که خطوط شماره ۲، ۲۱، ۲۹ و ۳۲ از اهمیت بسیار بالایی در جایابی دستگاه اندازه گیری برخوردار هستند. خط شماره ۲ که شینه های ۲ و ۳ را به هم متصل می کند، از اهمیت بالایی برخوردار است چراکه شینه شماره ۳ بیشتر از نصف سیستم را تغذیه می کند. خط ۲۱ که نقاط ۲۱ و ۲۲ و خط ۳۲ که نقاط ۳۲ و ۳۳ سیستم را به هم متصل می کنند، دارای بیشترین تعداد تغییر جهت شارش توان می باشند، از این رو دارای اهمیت بسیار بالایی است. خط شماره ۲۹ که شینه های ۲۹ و ۳۰ سیستم را به هم متصل می کند دارای دو ویژگی مهم است که این ویژگی ها شامل ظرفیت نسبتاً بالا در عبور توان اکتیو و راکتیو و تلفات زیاد توان اکتیو می باشد. در شکل (۳) نمودار هزینه جایابی بر حسب تعداد دستگاه های اندازه گیری برای تمامی سناریوها رسم شده است. از نمودار الف در شکل (۳)، واضح است که هزینه جایابی با

تعداد دستگاه های اندازه گیری رابطه ی صعودی دارد. این شکل با نمودار خطی و نمودار درجه ۴ تقریب زده شده است که این تقریب می تواند صحت بر رابطه و رفتار صعودی آن ها را قرار دهد. از طرفی دیگر، در نمودار ب واقع در شکل (۳)، مقادیر نرم داده های اصلی از مقادیر تخمینی را نشان می دهد. واضح است، نمودار درجه ۴ که نرم نسبتاً کمتری نسبت به نمودار خطی دارد، تقریب دقیق تری را برای رابطه بین هزینه جایابی و تعداد دستگاه های اندازه گیری و تحلیل رفتار آن ها به دست آورده است.

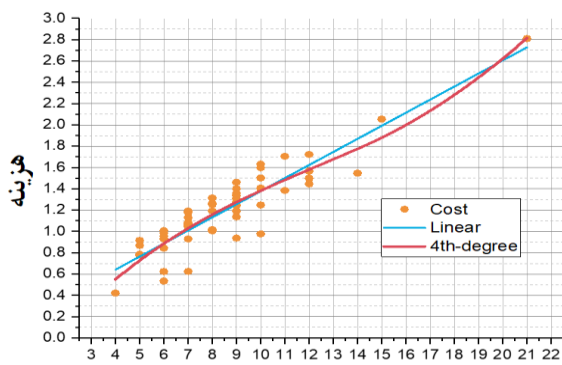
۵-۲- تحلیل نتایج کیفیت جایابی

با کمی دقت در جدول (۳) می توان دید که پارتوهای شماره ۱۷ و ۵ در سناریو شماره ۱، دارای مقادیری برابر در مکان دستگاه اندازه گیری و هزینه جایابی هستند ولی در درصد خطای اندازه و زاویه ولتاژ، پارتو شماره ۱۷ بهتر خود را نشان داده است. برتری کیفیت مقادیر تخمینی در مقادیر کیفیت آن ها در جدول (۳) نیز قابل مشاهده است. به طوری که در سناریو ۳ در جدول (۳)، کیفیت جایابی مقادیر تخمینی اندازه و زاویه ولتاژ نسبت به سناریوهای دیگر بهتر بوده و مقادیر کیفیت آن ها نیز دارای اندازه بیشتری است. از سوی دیگر کیفیت تخمین حالت به تعداد دستگاه های اندازه گیری نیز وابسته است که اثبات این ادعا را می توان در شکل (۴) مشاهده نمود. در نمودار الف شکل (۴)، تخمینی از رابطه صعودی بین کیفیت تخمین حالت بر حسب تعداد دستگاه های اندازه گیری برای سناریو ۱، رسم شده است. مشاهده می شود که در این سناریو کیفیت تخمین حالت، با افزایش تعداد دستگاه های اندازه گیری، افزایش چشم گیری داشته است.

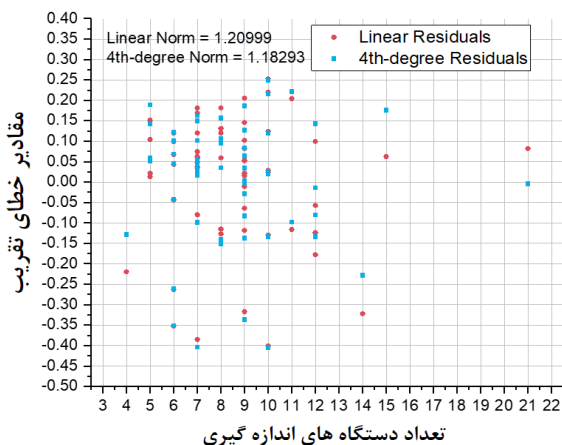
جدول (۳): نتایج شبیه سازی برای ۹ نمونه از بهترین پارتوها

مقادیر تابع هدف	مکان های دستگاه اندازه گیری (شماره خط)	شماره پارتو	درصد خطای داده های واقعی	درصد خطای شبه اندازه گیری ها	شماره سناریو	درصد	درصد	هزینه
						خطا در زاویه ولتاژ	خطا در اندازه ولتاژ	جایابی
۶۱۹۳۶۳۱	۲,۱۸,۲۱,۲۹,۳۲	۱۷	۳	۵۰	۱	۰,۱۸	۰,۰۶۲	۰,۷۸۶
۶۲۵۱۶۳۴	۲,۸,۹,۱۷,۱۹,۲۱,۲۳,۲۴,۲۹,۳۲	۶				۰,۱۷۲	۰,۰۶۶	۱,۰۲۴۹
۶۱۵۸۷۰۳	۲,۳,۵,۱۰,۱۲,۱۸,۲۱,۲۴,۲۵,۲۹,۳۲	۲۵				۰,۱۶۷	۰,۰۵۹	۱,۰۷۰۵
۶۱۹۷۳۴۰	۱۶,۱۷,۱۸,۲۱,۲۹,۳۲	۱۸				۰,۰۶۴	۰,۰۷۳	۰,۵۳۵
۶۱۴۷۵۷۸	۲,۱۸,۲۱,۲۹,۳۲	۵				۰,۰۶۴	۰,۰۶۴	۰,۷۸۶
۶۲۰۵۴۹۷	۲,۱۲,۲۱,۲۹,۳۲	۳				۰,۰۷۲	۰,۰۷۲	۰,۷۷۸
۶۱۶۸۹۳۵	۲,۴,۱۸,۲۱,۲۹,۳۲	۷				۰,۰۸۰۹	۰,۰۵۷	۰,۹۸۶
۶۲۰۶۵۲۱	۲,۴,۶,۱۳,۲۱,۲۹,۳۰,۳۲	۳۵				۰,۰۴۲۸	۰,۰۵۲	۱,۰۱۹۲
۶۱۷۰۱۰۷	۲,۳,۱۲,۱۷,۲۱,۲۹,۳۲	۴				۰,۰۶۴۶	۰,۰۵۸	۱,۰۰۸۴
۵۵۰۲۰۰۶	۶,۹,۱۱,۲۱,۲۲,۲۸	۱	۱	۵۰	۲	۱,۰۷۳۳	۰,۰۰۶	۰,۶۲۴
۵۵۲۸۲۶۹	۱۱,۲۱,۲۲,۲۸	۴۰				۰,۰۵۷	۰,۰۶۵	۰,۴۲۲
۵۵۴۰۷۱۷	۶,۹,۱۱,۲۱,۲۲,۲۸	۲۱				۰,۰۳۵۹	۰,۰۶۱	۰,۶۲۴
۵۵۲۳۴۴۶	۳,۴,۵,۱۵,۱۶,۱۹,۲۱,۳۰,۳۱	۳				۰,۰۷۴۷	۰,۰۵۷	۱,۰۲۷۷

۵۵۴۶۲۶۹	۳۰۵۳۱	۰۰۰۶۵	۰۰۹۳۸	۶۸,۱۴,۱۹,۲۱,۲۳,۲۵,۲۶,۲۸	۶			
۵۵۲۱۲۳۴	۲۰۷۶۵	۰۰۰۰۶	۱۰۵	۳,۴,۵,۱۰,۱۲,۱۴,۱۵,۱۶,۱۹,۲۱,۳۰,۳۱	۱۳			
۵۵۲۱۰۷۶	۲۰۳۳۹	۰۰۰۷۱	۱۰۵۶۶	۳,۴,۵,۱۰,۱۲,۱۵,۱۶,۱۹,۲۱,۲۸,۳۰,۳۱	۳۱			
۵۵۴۳۱۷۸	۴۰۰۸۱	۰۰۰۶۶	۰۰۹۷۸	۶۸,۹,۱۳,۱۴,۲۱,۲۲,۲۶,۲۸,۳۲	۵			
۵۵۳۱۷۰۴	۵۰۸۹۹	۰۰۰۶۹	۱۰۵۴۷	۱,۴,۷,۸,۱۱,۱۲,۱۶,۱۷,۲۰,۲۱,۲۴,۲۷,۲۹,۳۱	۴			
۶۱۲۶۳۴۹	۰	۰۰۰۵۲	۱۰۴۶۱	۲,۳,۵,۱۲,۱۴,۱۶,۲۰,۲۱,۲۲	۲۸			
۶۱۸۹۹۰۸	۰	۰۰۰۵۹	۰۰۹۱۶	۳,۴,۵,۲۱,۳۲	۷			
۶۲۲۶۹۳۱	۰	۰۰۰۴۲	۱۰۷۲۳	۳,۴,۵,۶,۱۶,۲۱,۲۳,۲۵,۲۸,۲۹,۳۱,۳۲	۲۰			
۶۱۷۶۹۷۳	۰۰۰۸۵	۰۰۰۰۴	۱۰۰۰۷	۲,۳,۲۰,۲۱,۲۵,۳۲	۱۸			
۶۱۹۲۴۹۴	۰۰۱۹۸	۰۰۰۰۵	۰۰۹۳۱	۳,۵,۲۰,۲۱,۲۳,۳۲	۵	۳	۳۰	۳
۶۲۳۷۴۴۳	۰۰۱۱۱	۰۰۰۵۲	۱۰۱۳	۳,۴,۵,۲۰,۲۱,۲۳,۳۲	۸			
۶۲۲۷۶۱۱	۰۰۱۲۵	۰۰۰۴۶	۱۰۱۷۹	۳,۴,۵,۲۱,۲۲,۲۳,۳۲	۶			
۶۲۰۳۶۷۷	۰۰۸۹۶	۰۰۰۴۸	۰۰۹۳	۳,۴,۱۹,۲۱,۲۳,۲۹,۳۱	۱			
۶۲۲۵۶۳۹	۱۰۰۲۳	۰۰۰۵۷	۱۰۰۰۶	۳,۴,۸,۲۰,۲۱,۲۲,۲۵,۳۲	۲۵			
۵۲۷۰۹۸۹	۰۰۴۹۴	۰۰۰۵۱	۱۰۰۵۹	۲,۴,۷,۹,۱۳,۲۱,۲۶	۱۵			
۵۳۲۰۵۳۸	۱۰۵۷	۰۰۰۵۵	۰۰۸۶۹	۲,۴,۷,۱۵,۲۱	۲۰			
۵۳۱۷۴۵۵	۰۰۵۵۳	۰۰۰۰۵	۱۰۱۹۱	۱,۲,۴,۷,۱۵,۲۱,۳۰	۹			
۵۲۸۲۱۳۴	۱۰۳۷۳	۰۰۰۴۷	۰۰۹۵۵	۲,۴,۷,۱۳,۱۶,۲۱	۲۹			
۵۲۵۳۶۴۷	۰۰۳۱۵	۰۰۰۵۶	۱۰۶۳۱	۱,۲,۳,۴,۷,۹,۱۴,۱۷,۲۱,۲۷	۱	۱	۳۰	۴
۵۳۲۴۵۶۵	۰۰۰۴	۰۰۰۵۷	۱۰۲۷۶	۲,۳,۷,۱۳,۱۶,۲۰,۲۱,۲۴,۲۵	۱۳			
۵۳۴۶۰۷۴	۲۰۰۲۳	۰۰۰۵۴	۰۰۸۴۴	۲,۷,۹,۱۳,۲۱,۲۴	۲۲			
۵۳۰۷۱۹۸	۰۰۶۶۶	۰۰۰۵۳	۱۰۰۱۸	۲,۷,۸,۱۳,۲۰,۲۱,۳۰,۳۲	۱۴			
۵۳۳۳۵۶۳	۱۰۱۰۳	۰۰۰۵۲	۱۰۰۷۲	۲,۳,۷,۱۳,۲۰,۲۱,۲۴	۵			



الف - نمودار هزینه جابجایی و تعداد دستگاه های اندازه گیری



ب - نمودار نرم داده های اصلی از مقادیر تخمینی

درحالی که کیفیت تخمین حالت علاوه بر تعداد دستگاه های اندازه گیری، به دقت تخمین اندازه و زاویه ولتاژ نیز وابسته است. در نمودار ب می توان نتیجه گرفت که در وهله اول، نمودار درجه ۳ دارای نرم کمتر، در نتیجه تخمینی با دقت بالاتر و نشان دهنده بهتری از رفتار نمودار، نسبت به تخمین درجه ۴، درجه ۲ و خطی داشته است. این واقعیت که تخمین درجه ۳ با درجه ۴ تقریباً برابری در نرم و شکل دارند را نمی شود نادیده گرفت.

جدول (۴): مقادیر بهترین پارتو به ازای $\beta = \infty$ در

سناریوهای مختلف

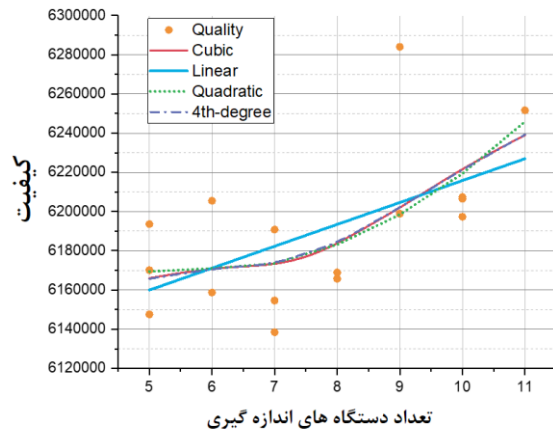
تعداد پارتوهای جبهه پارتو	شماره بهترین پارتو	درصد خطای در داده های واقعی	درصد خطا در داده های شبه اندازه گیری	شماره سناریو
۵۰	۱۷	۳	۵۰	۱
۵۰	۱	۱	۵۰	۲
۵۰	۲۸	۳	۳۰	۳
۵۰	۱۵	۱	۳۰	۴

شکل (۳): تغییرات رفتار هزینه جایابی نسبت به تعداد

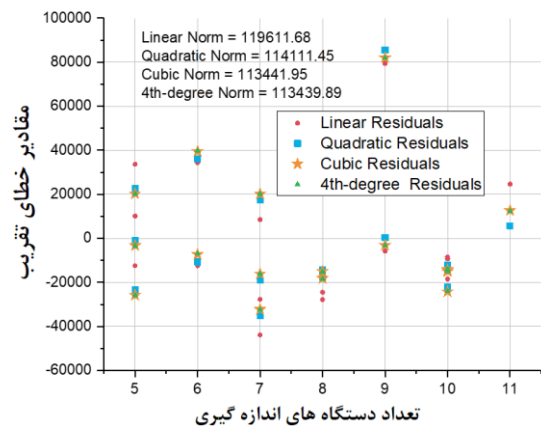
دستگاه‌های اندازه‌گیری

۳-۵- تحلیل نتایج اندازه و زاویه ولتاژ

همان‌طور که در قسمت تخمین حالت بیان شد، تخمین حالت با استفاده از الگوریتم PSO بهینه‌سازی شده و نتایج قابل قبولی برای تخمین حالت‌های شبکه ارائه داده است. ارزیابی کلی از این تخمین‌گر با تعداد ۱۰ تکرار و ۵۰ نسل را در جدول (۵) می‌توان دید.



الف- نمودار کیفیت جایابی و تعداد دستگاه‌های اندازه‌گیری



ب- نمودار نرم داده‌های اصلی از مقادیر تخمینی

شکل (۴): تغییرات رفتار کیفیت جایابی نسبت به تعداد

جدول (۵): ارزیابی تخمین حالت

شماره سناریو	درصد خطا در داده‌های شبه اندازه‌گیری	درصد خطای در داده‌های واقعی	حداکثر درصد خطا در اندازه ولتاژ	حداقل درصد خطا در اندازه ولتاژ	حداکثر درصد خطا در زاویه ولتاژ	حداقل درصد خطا در زاویه ولتاژ
۱	۵۰	۳	۰،۰۷۳	۰،۰۵۲	۵،۶۰۴	۰،۱۶۷
۲	۵۰	۱	۰،۰۷۱	۰،۰۵۷	۶،۵۷	۱،۷۳۳
۳	۳۰	۳	۰،۰۵۹	۰،۰۴	۱۰،۲۳	۰
۴	۳۰	۱	۰،۰۶۱	۰،۰۴۷	۵،۸۶۳	۰،۳۰۶

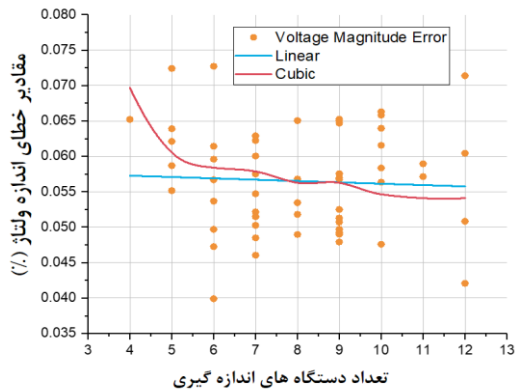
دستگاه‌های اندازه‌گیری

مشاهده می‌شود هنگامی که درصد خطا در داده‌های شبه اندازه‌گیری ۳۰٪ است، مقادیر حداقل و حداکثر اندازه و زاویه ولتاژ نسبت به خطای ۵۰٪، بسیار چشمگیر بوده و دید ارزشمندی از این روش در تخمین حالت می‌دهد. با توجه به جدول (۵)، مشاهده می‌شود که در سناریو ۳، تخمین زاویه ولتاژ حتی به صفر درصد هم رسیده و همین‌طور حداکثر مقدار آن که تقریباً ۱٪ است، از تمامی سناریوها کمتر است. برای ارزیابی و بررسی دقیق‌تر از تخمین حالت، مقادیر تخمینی و واقعی اندازه و زاویه ولتاژ برای بهترین پارتوهای تمامی سناریوها در شکل (۵)، نشان داده شده است. در شکل (۵) مشاهده می‌شود که تخمین‌گر حالت توانسته است تخمین دقیق و قابل توجهی از سیستم با حداقل مقدار دستگاه‌های اندازه‌گیری، داشته باشد. در نمودار الف و پ شکل (۶) مشاهده می‌شود که خطای اندازه و زاویه ولتاژ با افزایش دستگاه‌های اندازه‌گیری، سیر نزولی دارد. ولی استفاده تعداد زیادی از دستگاه‌های اندازه‌گیری، جنبه اقتصادی خوبی ندارد که این موضوع در بخش‌های قبلی نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

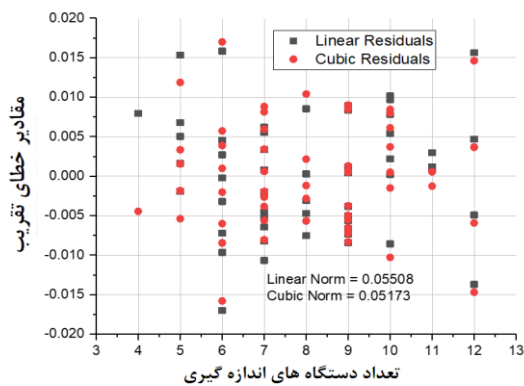
مقدار خطا در اندازه و زاویه ولتاژ و تعداد دستگاه اندازه‌گیری بسته به تشخیص بهره‌بردار شبکه می‌تواند تعیین شود. این مصالحه در روش بیان شده، کار آسان‌تری است، به خاطر این که تخمین‌گر حالت استفاده شده، بسیار مقاوم بوده و تخمین دقیقی حتی در تعداد کمی از دستگاه‌های اندازه‌گیری ارائه می‌دهد که برای اثبات این موضوع می‌توان به شکل (۶) مراجعه نمود. تقریب نمودار خطای اندازه ولتاژ برحسب تعداد دستگاه‌های اندازه‌گیری، با چندجمله‌ای درجه ۳ و خطی در شکل (۶) نشان داده شده است. می‌توان مشاهده نمود که نمودار درجه ۳ نرم‌تری را نسبت به نمودار خطی داشته اما به دلیل نزدیکی بیش‌ازحد این دو مقدار، می‌توان رفتار نمودار را با هر دو تقریب دنبال کرد. اما در نمودار خطای زاویه ولتاژ برحسب تعداد دستگاه‌های اندازه‌گیری، نمودار درجه ۴، تقریب نسبتاً بهتر و چشم‌گیرتری از رفتار این نمودار نشان می‌دهد.

۴-۵- ناحیه اطمینان

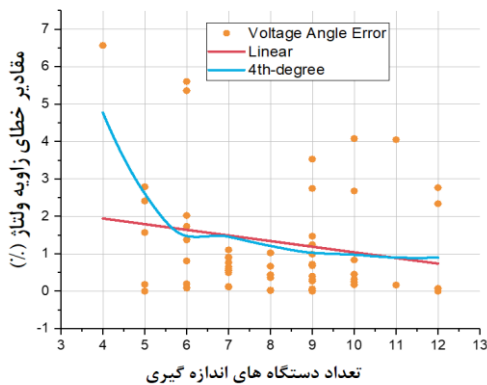
یک ناحیه اطمینان، یک بازه اطمینان n -بعدی تعمیم یافته می‌باشد. بازه اطمینان برای تخمین یک پارامتر بکار می‌رود به طوری که پارامتر مورد نظر، با حداقل سطح احتمال معینی عضو آن بازه است. ناحیه اطمینان، مجموعه‌ای از نقاط در فضای n -بعدی است که معمولاً به صورت بیضوی، حول یک نقطه می‌چرخد که این نقطه همان جواب تخمینی یک مسئله می‌باشد.



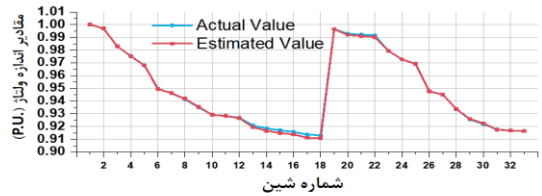
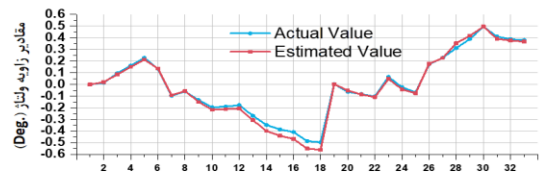
الف - نمودار کاهش خطای اندازه ولتاژ نسبت به افزایش تعداد دستگاه‌های اندازه‌گیری



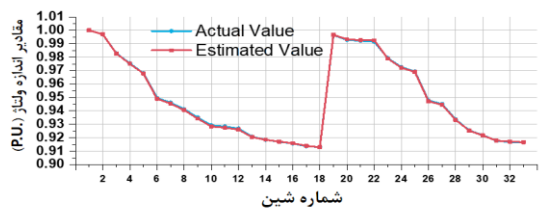
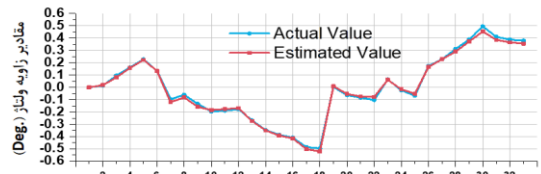
ب - نمودار نرم داده‌های اصلی از مقادیر تخمینی اندازه ولتاژ



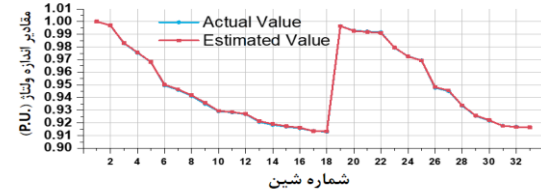
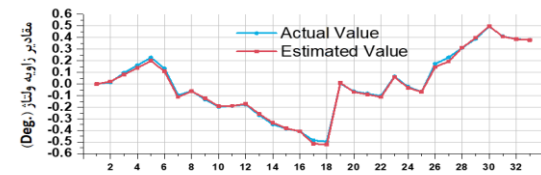
پ - نمودار کاهش خطای زاویه ولتاژ نسبت به افزایش تعداد دستگاه‌های اندازه‌گیری



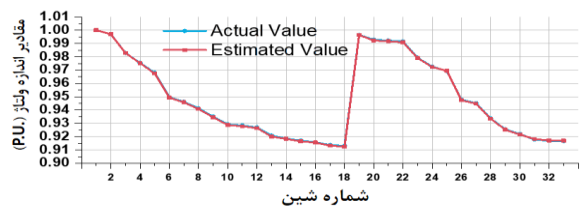
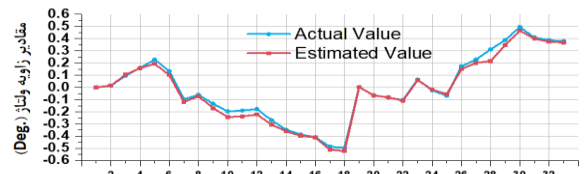
الف - مقادیر واقعی و تخمینی از اندازه و زاویه ولتاژ در سناریو ۱



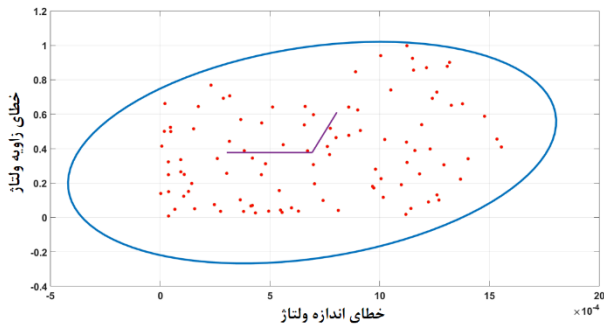
ب - مقادیر واقعی و تخمینی از اندازه و زاویه ولتاژ در سناریو ۲



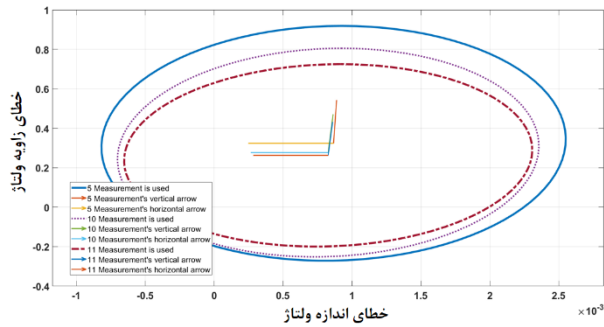
پ - مقادیر واقعی و تخمینی از اندازه و زاویه ولتاژ در سناریو ۳



ت - مقادیر واقعی و تخمینی از اندازه و زاویه ولتاژ در سناریو ۴
شکل (۵): مقادیر تخمینی و واقعی ولتاژ برای بهترین پارتو



شکل (۷): ناحیه اطمینان برای خطای اندازه و زاویه ولتاژ

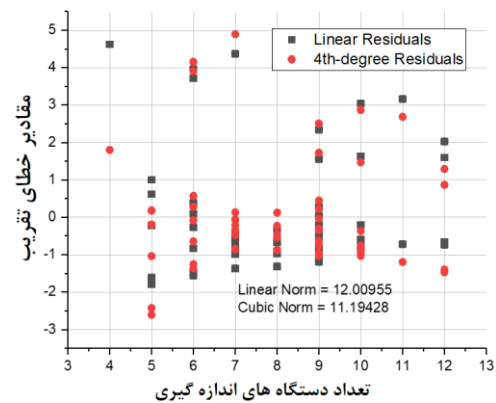


شکل (۸): تأثیر تغییرات تعداد دستگاه‌های اندازه‌گیری بر مساحت ناحیه اطمینان

در واقع مرز این ناحیه تنگ‌تر می‌شود که این خود نشان‌دهنده این است که با اضافه کردن دستگاه‌های اندازه‌گیری، خطاهای نسبی اندازه و زاویه ولتاژ کم شده و همبستگی بین آن‌ها نیز کم می‌شود که این مفهوم صحه‌ای بر شکل شماره ۵ قرار می‌دهد. با نگاهی دیگر به شکل (۸)، می‌توان دریافت، که تعداد دستگاه‌های اندازه‌گیری وقتی از ۵ به ۱۰ عدد افزایش می‌یابد، بر روی مساحت ناحیه تأثیر بیشتری نسبت به زمانی که تعداد آن‌ها از ۱۰ به ۱۱ تغییر می‌یابد، دارد.

۵-۵- نتایج شبکه ۱۲۳ شینه

در این قسمت، با هدف مقایسه و ارزیابی بیشتر و دقیق‌تر روش پیشنهادی، سناریو ۴ برای شبکه توزیع آزمایشی ۱۲۳ شینه IEEE [۲۷] پیاده‌سازی شده است. نتایج شبیه‌سازی برای ۵ نمونه از بهترین پارتوها در جدول (۷) و همین‌طور نمایی کلی از شبکه در شکل (۹) و مقادیر شماره خطوط مربوط به شینه‌های موردنظر در جدول (۶) قابل مشاهده می‌باشند. مقدار پارامتر فشار انتخاب در رابطه (۱۳) برای تخصیص مقادیر احتمال به پارتوها و انتخاب آن‌ها با اولویت همین مقادیر، ۵ بوده و تعداد آزمایش‌های انجام‌شده توسط چرخه رولت، ۱۰۰۰۰ می‌باشد. با توجه به جدول (۷)، مشاهده می‌شود که خط‌سوی ۶،۹،۱۵،۱۹،۲۸،۴۰،۴۱،۵۷،۵۸،۶۹،۷۱،۷۴،۸۶،۸۷،۹۲،۱۰۷،۱۱۰،۱۱۳، ۱۱۴ و ۱۲۳ در تمامی این ۵ پارتو مشترک بوده است. به عنوان مثال، خطوط ۱۱۳، ۱۱۰، ۱۱۰، ۸۷ و ۷۱ دارای تلفات زیاد، ۱۱۴، ۸۶ دارای



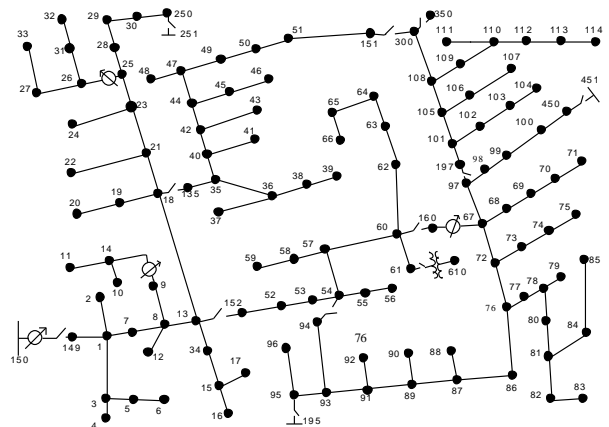
ت - نمودار نرم داده‌های اصلی از مقادیر تخمینی زاویه ولتاژ

شکل (۹): نمودار خطای اندازه و زاویه ولتاژ نسبت به

تعداد دستگاه‌های اندازه‌گیری

زمانی از تعریف بازه اطمینان استفاده می‌شود که مسئله تک‌بعدی باشد که در این صورت بازه اطمینان در حالت خیلی ساده، به صورت موازی با خط اصلی مقایسه می‌شود. اما وقتی مفهوم مسئله از یک بعد خارج می‌شود، دیگر نمی‌توان یک بازه اطمینان تعریف کرد بلکه باید یک ناحیه اطمینان تعریف نمود. معمولاً این ناحیه اطمینان را به شکل بیضی رسم می‌کنند. این ناحیه بیضی از همبستگی بین ابعاد مسئله ایجاد می‌شود به طوری که اگر همبستگی بین داده‌ها در ابعاد گوناگون وجود نداشته باشد، مساحت ناحیه صفر می‌شود و هرچه همبستگی بیشتر شود، به طبع مساحت ناحیه اطمینان بیشتر می‌شود [۲۴]. و [۲۵]. همان‌طور که در بخش قبل گفته شد، خطای نسبی اندازه و زاویه ولتاژ برای ۱۰۰ سناریو ایجاد شده‌ی احتمالی، محاسبه می‌شود. اگر در ۹۵ سناریو، خطای نسبی اندازه و زاویه ولتاژ از یک مقدار ثابتی کمتر بودند، آن تخمین‌گر و جایابی مورد قبول واقع می‌شود. این مفهوم یعنی اگر احتمال ایجاد خطا در اندازه و زاویه ولتاژ به ۹۵ درصد کاهش پیدا کند، به جواب بهینه خواهیم رسید. در واقع یک باندی با مقدار ۹۵ درصد به عنوان باند اطمینان تعریف شده است ولی چون در اینجا مسئله‌ی خطای نسبی دارای دو بعد، یکی اندازه و دیگری زاویه ولتاژ است، از مفهوم ناحیه اطمینان استفاده می‌شود. از این مفهوم می‌توان از دو جهت به مسئله نگاه کرد. اول اینکه تعداد خطاهای نسبی محاسبه‌شده توسط سناریوهای احتمالی، باید کمتر از ۹۵ درصد باشد. برای نمونه خطای اندازه و زاویه نسبی ولتاژ شینه ۲۰ در سناریو ۴ در شکل (۷) رسم شده است. در این شکل مشاهده می‌شود که تمامی داده‌ها در ناحیه اطمینان قرار دارند. اینکه تمامی داده‌ها در این ناحیه قرار دارند، نشان‌دهنده قدرتمندی در حل مسئله جایابی دستگاه‌های اندازه‌گیری ارائه‌شده در این مقاله می‌باشد. از سوی دیگر، نمونه‌های دیگر از ناحیه اطمینان برای سناریو شماره ۱ شینه ۲۸ در شکل (۸) نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، هرچه تعداد دستگاه‌های اندازه‌گیری بیشتر می‌شود، مساحت این ناحیه کمتر می‌شود.

ظرفیت بالا است پس نیاز به مقادیر دقیق داده‌های این خطوط با هدف کاربردهای گوناگون بسیار ضروری می‌باشد.



شکل (۹): نمودار تک خطی شبکه ۱۲۳ شینه

جدول (۶): مقادیر شماره خطوط شبکه ۱۲۳ شینه

شماره خط	شین گیرنده	شین فرستنده	شماره خط	شین گیرنده	شین فرستنده
۹۸	۱۰۰	۹۹	۳۶	۴۰	۳۵
۹۹	۴۵۰	۱۰۰	۳۷	۳۷	۳۶
۱۰۰	۱۰۲	۱۰۱	۳۸	۳۸	۳۶
۱۰۱	۱۰۵	۱۰۱	۳۹	۳۹	۳۸
۱۰۲	۱۰۳	۱۰۲	۴۰	۴۱	۴۰
۱۰۳	۱۰۴	۱۰۳	۴۱	۴۲	۴۰
۱۰۴	۱۰۶	۱۰۵	۴۲	۴۳	۴۲
۱۰۵	۱۰۸	۱۰۵	۴۳	۴۴	۴۲
۱۰۶	۱۰۷	۱۰۶	۴۴	۴۵	۴۴
۱۰۷	۱۰۹	۱۰۸	۴۵	۴۷	۴۴
۱۰۸	۳۰۰	۱۰۸	۴۶	۴۶	۴۵
۱۰۹	۱۱۰	۱۰۹	۴۷	۴۸	۴۷
۱۱۰	۱۱۱	۱۱۰	۴۸	۴۹	۴۷
۱۱۱	۱۱۲	۱۱۰	۴۹	۵۰	۴۹
۱۱۲	۱۱۳	۱۱۲	۵۰	۵۱	۵۰
۱۱۳	۱۱۴	۱۱۳	۵۱	۱۵۱	۵۱
۱۱۴	۳۵	۱۳۵	۵۲	۵۳	۵۲
۱۱۵	۱	۱۴۹	۵۳	۵۴	۵۳
۱۱۶	۵۲	۱۵۲	۵۴	۵۵	۵۴
۱۱۷	۶۷	۱۶۰	۵۵	۵۷	۵۴
۱۱۸	۱۰۱	۱۹۷	۵۶	۵۶	۵۵
۱۱۹	۱۵۲	۱۳	۵۷	۵۸	۵۷
۱۲۰	۱۳۵	۱۸	۵۸	۶۰	۵۷
۱۲۱	۱۶۰	۶۰	۵۹	۵۹	۵۸
۱۲۲	۶۱۰	۶۱	۶۰	۶۱	۶۰
۱۲۳	۱۹۷	۹۷	۶۱	۶۲	۶۰
۱۲۴	۱۴۹	۱۵۰	۶۲	۶۳	۶۲
۱۲۵	۱۰۰۵	۶۱۰			

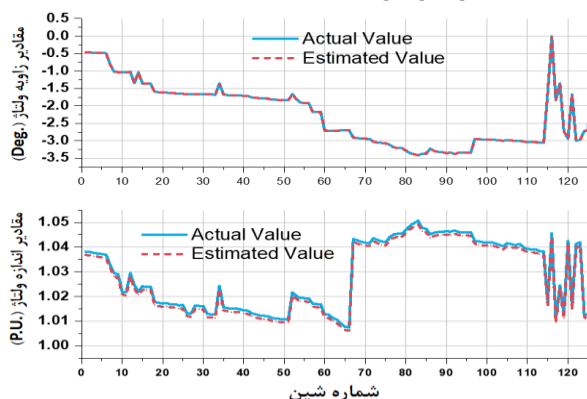
شماره خط	شین گیرنده	شین فرستنده	شماره خط	شین گیرنده	شین فرستنده
۶۳	۶۴	۶۳	۱	۲	۱
۶۴	۶۵	۶۴	۲	۳	۱
۶۵	۶۶	۶۵	۳	۷	۱
۶۶	۶۸	۶۷	۴	۴	۳
۶۷	۷۲	۶۷	۵	۵	۳
۶۸	۹۷	۶۷	۶	۶	۵
۶۹	۶۹	۶۸	۷	۸	۷
۷۰	۷۰	۶۹	۸	۱۲	۸
۷۱	۷۱	۷۰	۹	۹	۸
۷۲	۷۳	۷۲	۱۰	۱۳	۸
۷۳	۷۶	۷۲	۱۱	۱۴	۹
۷۴	۷۴	۷۳	۱۲	۳۴	۱۳
۷۵	۷۵	۷۴	۱۳	۱۸	۱۳
۷۶	۷۷	۷۶	۱۴	۱۱	۱۴
۷۷	۸۶	۷۶	۱۵	۱۰	۱۴
۷۸	۷۸	۷۷	۱۶	۱۶	۱۵
۷۹	۷۹	۷۸	۱۷	۱۷	۱۵
۸۰	۸۰	۷۸	۱۸	۱۹	۱۸
۸۱	۸۱	۸۰	۱۹	۲۱	۱۸
۸۲	۸۲	۸۱	۲۰	۲۰	۱۹
۸۳	۸۴	۸۱	۲۱	۲۲	۲۱
۸۴	۸۳	۸۲	۲۲	۲۳	۲۱
۸۵	۸۵	۸۴	۲۳	۲۴	۲۳
۸۶	۸۷	۸۶	۲۴	۲۵	۲۳
۸۷	۸۸	۸۷	۲۵	۲۶	۲۵
۸۸	۸۹	۸۷	۲۶	۲۸	۲۵
۸۹	۹۰	۸۹	۲۷	۲۷	۲۶
۹۰	۹۱	۸۹	۲۸	۳۱	۲۶
۹۱	۹۲	۹۱	۲۹	۳۳	۲۷
۹۲	۹۳	۹۱	۳۰	۲۹	۲۸
۹۳	۹۴	۹۳	۳۱	۳۰	۲۹
۹۴	۹۵	۹۳	۳۲	۲۵۰	۳۰
۹۵	۹۶	۹۵	۳۳	۳۲	۳۱
۹۶	۹۸	۹۷	۳۴	۱۵	۳۴
۹۷	۹۹	۹۸	۳۵	۳۶	۳۵

مقادیر اندازه و زاویه ولتاژ مربوط به سناریو ۴ در شکل (۱۰) قابل مشاهده می‌باشد. همان‌طور که از شکل (۹) قابل برداشت است، مقادیر اندازه و زاویه ولتاژ شینه‌ها به خوبی تخمین زده شده‌اند که دقت تخمین زاویه ولتاژ شینه‌ها نیز در جدول فلان نیز قابل مشاهده است که صفر به دست آمده است. این خود نشان‌دهنده دقت در تخمین گر حالت است. از سوی دیگر، تعداد دستگاه‌های اندازه‌گیری نیز بسیار است که همین امر باعث همچنین دقتی در مقادیر تخمینی شده است.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله با استفاده از روش تخمین حالت، راه‌حلی برای مسئله جایابی دستگاه‌های اندازه‌گیری توان عبوری خط ارائه شده است. مدل‌سازی این مسئله با ایجاد ۴ سناریو برای خط‌های داده‌های به‌دست‌آمده از دستگاه‌های اندازه‌گیری و داده‌های شبه اندازه‌گیری، به‌صورت چند هدفه و با استفاده از الگوریتم MOEA/D بهینه‌سازی شده است. نتیجه روش ارائه شده برای انتخاب بهترین پارتوی خروجی،

می تواند تصمیم در انتخاب بر اساس نیازهای بهره بردار در هدف جایابی دستگاه های اندازه گیری را منعطف نماید.



شکل (۱۰): مقادیر تخمینی و واقعی اندازه و زاویه ولتاژ برای بهترین پارتو در سناریو ۴

نتایج بهینه سازی نشان می دهد که عواملی همچون مقدار تلفات خط، ظرفیت توان عبوری خط، تعداد خطوط متصل به خط مورد نظر و تعداد تغییر جهت شارش توان خط می توانند تأثیرات چشم گیری در رابطه ی بین هزینه های جایابی دستگاه های اندازه گیری و تعداد دستگاه های اندازه گیری داشته باشد. این در حالی است که رفتار آن ها را می توان برخلاف انتظار، که خطی فرض می شد، به صورت چند جمله ایی مدل نمود. نتایج به دست آمده از کیفیت جایابی و تخمین

حالت می تواند تأثیر تعداد دستگاه های اندازه گیری در کیفیت خروجی تخمین حالت و رفتار صعودی بین آن ها را تضمین نماید. نتایج خروجی تخمین حالت با استفاده از الگوریتم PSO نشان دهنده مقاوم بودن تخمین حالت در تخمین اندازه و زاویه ولتاژ بوده است. نتایج به قدری دقیق بوده اند که این روش می تواند در تمام سناریوها، خطای کمتر از ۰/۱ درصد برای اندازه و خطای کمتر از ۶ درصد برای زاویه در شرایط حداکثری خطا را تضمین نماید. هم چنین می توان تأثیر تعداد دستگاه های اندازه گیری در اندازه و زاویه ولتاژ شینه ها و رفتار نزولی بین آن ها را در نتایج مشاهده نمود. مقاوم بودن راه ارائه شده در این مقاله به منظور حل مسئله جایابی دستگاه های اندازه گیری، توسط شبیه سازی مونت کارلو ارزیابی شده است. تضمین این موضوع را می توان در نتایج همبستگی بین خطای اندازه و زاویه ولتاژ در نتایج ناحیه اطمینان مشاهده نمود. می توان تمامی داده های خطا را که در ناحیه اطمینان بوده به عنوان تخمین دقیق از حالت شبکه، تلقی نمود. همچنین نتایج نشان داده است که با افزایش دستگاه های اندازه گیری، مرز این ناحیه تنگ تر شده یا به عبارتی مساحت این ناحیه کاهش یافته است. این خود نتیجه دقت در خروجی تخمین حالت است که با افزایش تعداد دستگاه های اندازه گیری، خطای اندازه و زاویه ولتاژ کاهش یافته و در نتیجه مساحت ناحیه اطمینان کاهش می یابد.

جدول (۷): نتایج شبیه سازی برای ۵ نمونه از بهترین پارتوها

شماره پارتو	مکان های دستگاه اندازه گیری (شماره خط)	تعداد دستگاه های اندازه گیری	مقادیر تابع هدف		
			هزینه جایابی	درصد خطا در اندازه ولتاژ	درصد خطا در زاویه ولتاژ
۱۳	۱,۲,۵,۶,۸,۹,۱۲,۱۵,۱۶,۱۷,۱۸,۱۹,۲۴,۲۶,۲۷,۲۸,۲۹,۳۰,۳۱,۳۲,۳۳,۳۴,۳۶,۳۷,۳۹,۴۰,۴۱,۴۳,۴۴,۴۷,۵۲,۵۳,۵۷,۵۸,۶۲,۶۵,۶۸,۶۹,۷۱,۷۴,۷۵,۷۷,۷۹,۸۲,۸۶,۸۷,۸۸,۸۹,۹۰,۹۲,۹۴,۹۶,۹۷,۹۹,۱۰۳,۱۰۵,۱۰۷,۱۱۰,۱۱۱,۱۱۲,۱۱۳,۱۱۴,۱۱۹,۱۲۰,۱۲۱,۱۲۲,۱۲۳	۶۷	۰.۰۱۲۹۵۳۶	۰	۱۵۸۹۸۴۸
۹	۱,۶,۸,۹,۱۱,۱۵,۱۶,۱۸,۱۹,۲۰,۲۱,۲۲,۲۸,۳۵,۳۶,۳۷,۳۹,۴۰,۴۱,۴۴,۴۵,۵۰,۵۳,۵۴,۵۷,۵۸,۶۴,۶۶,۶۸,۶۹,۷۰,۷۱,۷۲,۷۴,۷۵,۷۷,۸۲,۸۳,۸۶,۸۷,۸۸,۹۱,۹۲,۹۳,۹۵,۹۸,۱۰۰,۱۰۱,۱۰۷,۱۱۰,۱۱۳,۱۱۴,۱۲۱,۱۲۲,۱۲۳,۱۲۵	۵۶	۰.۰۱۲۹۳۲۲	۰	۱۲۶۱۹۲۶
۱۰	۱,۲,۵,۶,۸,۹,۱۲,۱۴,۱۵,۱۶,۱۷,۱۸,۱۹,۲۴,۲۶,۲۷,۲۸,۲۹,۳۰,۳۱,۳۲,۳۳,۳۴,۳۶,۳۷,۳۹,۴۰,۴۱,۴۳,۴۴,۴۷,۴۸,۵۳,۵۷,۵۸,۶۲,۶۵,۶۶,۶۸,۶۹,۷۱,۷۴,۷۵,۷۷,۷۹,۸۰,۸۴,۸۶,۸۷,۸۸,۸۹,۹۰,۹۲,۹۴,۹۶,۹۷,۹۹,۱۰۳,۱۰۵,۱۰۷,۱۱۰,۱۱۱,۱۱۲,۱۱۳,۱۱۴,۱۱۹,۱۲۰,۱۲۱,۱۲۲,۱۲۵	۷۰	۰.۰۱۲۸۲۹۴	۰	۱۶۵۸۶۸۲
۱	۵,۶,۹,۱۴,۱۵,۱۹,۲۰,۲۱,۲۵,۲۷,۲۸,۲۹,۳۰,۳۴,۴۰,۴۱,۴۲,۴۵,۴۷,۴۹,۵۰,۵۱,۵۴,۵۵,۵۷,۵۸,۶۹,۷۰,۷۱,۷۴,۸۱,۸۲,۸۴,۸۵,۸۶,۸۷,۹۱,۹۲,۹۴,۹۷,۹۸,۹۹,۱۰۱,۱۰۴,۱۰۷,۱۰۸,۱۰۹,۱۱۰,۱۱۲,۱۱۳,۱۱۴,۱۲۳	۵۲	۰.۰۷۸۲	۰	۱۰۸۳۰۵۰
۱۷	۱,۴,۵,۶,۸,۹,۱۲,۱۴,۱۵,۱۶,۱۷,۱۸,۱۹,۲۳,۲۴,۲۶,۲۷,۲۸,۳۰,۳۱,۳۲,۳۳,۳۴,۳۶,۳۷,۳۹,۴۰,۴۱,۴۳,۴۴,۴۷,۴۸,۵۲,۵۳,۵۷,۵۸,۶۲,۶۴,۶۵,۶۶,۶۸,۶۹,۷۱,۷۴,۷۵,۷۷,۷۹,۸۰,۸۲,۸۳,۸۴,۸۶,۸۷,۸۸,۸۹,۹۰,۹۲,۹۴,۹۶,۹۷,۹۹,۱۰۳,۱۰۵,۱۰۷,۱۱۰	۷۳	۰.۰۱۲۹۲۱	۰	۱۷۱۵۵۴۴

- [14] L. Ke, "State estimation for power distribution system and measurement impacts," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 11, pp. 911-916, 1996.
- [15] W. Haibin and N. N. Schulz, "A revised branch current-based distribution system state estimation algorithm and meter placement impact," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 19, pp. 207-213, 2004.
- [16] R. Singh, B. C. Pal, and R. B. Vinter, "Measurement Placement in Distribution System State Estimation," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 24, pp. 668-675, 2009.
- [17] R. Singh, B. C. Pal, R. A. Jabr, and R. B. Vinter, "Meter Placement for Distribution System State Estimation: An Ordinal Optimization Approach," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 26, pp. 2328-2335, 2011.
- [18] S. Prasad and D. M. V. Kumar, "Optimal Allocation of Measurement Devices for Distribution State Estimation Using Multiobjective Hybrid PSO-Krill Herd Algorithm," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 66, pp. 2022-2035, 2017.
- [19] M. E. Baran and F. F. Wu, "Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 4, pp. 1401-1407, 1989.
- [20] A. Arefi, M. Haghifam, and S. A. Fathi, "Distribution State Estimation Based on Particle Swarm and Doubly Loop Mutant Optimization (DLM-PSO)," *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers*, vol. 9, pp. 41-52, 2012.
- [21] S. Naka, T. Genji, T. Yura, and Y. Fukuyama, "A hybrid particle swarm optimization for distribution state estimation," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 18, pp. 60-68, 2003.
- [22] E. Aarts and J. Korst, *Simulated annealing and Boltzmann machines*. United States: New York, NY; John Wiley and Sons Inc., 1988.
- [23] J. H. Holland, *Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control and Artificial Intelligence*: MIT Press, 1992.
- [24] N. R. Draper and H. Smith, *Applied Regression Analysis*, 2nd ed. USA: John Wiley and Sons Ltd, 1981.
- [25] W. H. Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, and B. P. Flannery, *Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing*, 2nd ed. Cambridge UK: Cambridge University Press 1992.
- [26] M. Hurtgen, P. Praks, P. Zajac, and J.-C. Maun, "Measurement placement algorithm for power system state estimation using PageRank-Case Studies," in *Risk, Quality and Reliability Conference*, 2007.
- [27] IEEE Distribution System Analysis Subcommittee, Aug. 23, 2018, IEEE Radial Test Feeders. [Online]. Available: <http://sites.ieee.org/pes-testfeeders/resources/>
- [1] M. Moallem, A. Farokhpayam, H. Shirvani, M. Keyvanfard, and B. Mirzaeian, "An Effective Method for Fundamental and Harmonic State Estimation of Radial Power Network," *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers*, vol. 7, pp. 35-52, 2010.
- [2] A. Monticelli and F. F. Wu, "Network Observability: Identification of Observable Islands and Measurement Placement," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-104, pp. 1035-1041, 1985.
- [3] G. Bei and A. Abur, "An improved measurement placement algorithm for network observability," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 16, pp. 819-824, 2001.
- [4] F. C. Schwepe and J. Wildes, "Power System Static-State Estimation, Part I: Exact Model," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-89, pp. 120-125, 1970.
- [5] F. C. Schwepe and D. B. Rom, "Power System Static-State Estimation, Part II: Approximate Model," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-89, pp. 125-130, 1970.
- [6] F. C. Schwepe, "Power System Static-State Estimation, Part III: Implementation," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-89, pp. 130-135, 1970.
- [7] H. Wang, W. Zhang and Y. Liu, "A Robust Measurement Placement Method for Active Distribution System State Estimation Considering Network Reconfiguration," in *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, no. 3, pp. 2108-2117, May 2018.
- [8] X. Chen *et al.*, "Optimal Meter Placement for Distribution Network State Estimation: A Circuit Representation Based MILP Approach," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 31, no. 6, pp. 4357-4370, Nov. 2016.
- [9] Q. Yang, L. Jiang, W. Hao, B. Zhou, P. Yang and Z. Lv, "PMU Placement in Electric Transmission Networks for Reliable State Estimation Against False Data Injection Attacks," in *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 4, no. 6, pp. 1978-1986, Dec. 2017.
- [10] S. Prasad and D. M. V. Kumar, "Trade-offs in PMU and IED Deployment for Active Distribution State Estimation Using Multi-objective Evolutionary Algorithm," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 67, no. 6, pp. 1298-1307, June 2018.
- [11] C. Zhang, Y. Jia, Z. Xu, L. L. Lai and K. P. Wong, "Optimal PMU placement considering state estimation uncertainty and voltage controllability," in *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 11, no. 18, pp. 4465-4475, 2017.
- [12] H. H. Müller and C. A. Castro, "Genetic algorithm-based phasor measurement unit placement method considering observability and security criteria," in *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 10, no. 1, pp. 270-280, 2016.
- [13] S. Aam, L. Holten, and Q. Gjerde, "Design of The Measurement System For State Estimation In The Norwegian High-Voltage Transmission Network," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-102, pp. 3769-3777, 1983.

زیر نویس ها

¹Decoupled State Estimation Algorithm

²Linearized State Estimation

³Weighted Least Square

⁴Particle Swarm Optimization

⁵Boltzmann

⁶Selection Pressure

⁷Roulette Wheel