مجله کنترل
جلد ۷، شماره ۱، بهار ۱۳۹۲، صفحه ۴۲-۳۳

مشاهده‌پذیری شبکهٔ انتقال از طریق مکان‌یابی هم‌زمان واحدهای اندازه‌گیری فازور و اندازه‌گیرهای سنتی با مدل‌سازی احتمالاتی نایقینی‌ها مبتنی بر الگوریتم ژنتیک چندهدفه

سید مهدی مظهری[۱]، علیرضا فریدونیان[۲]، حمید لسانی[۳]

[۱] دانشجوی دکتری مهندسی برق، گروه قدرت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، mazhari@aut.ac.ir

[۲] استادیار، دانشکدهٔ مهندسی برق، گروه قدرت، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، fereidunian@eetd.kntu.ac.ir

[۲] استاد، دانشکدهٔ مهندسی برق، گروه قدرت، دانشگاه تهران، lesani@ut.ac.ir

(تاریخ دریافت مقاله ۱۳۹۱/۱۱/۵، تاریخ پذیرش مقاله ۱۳۹۲/۲/۱۹)

چکیده: در این مقاله، مسالهٔ مکان‌یابی واحدهای اندازه‌گیری فازور با هدف مشاهده‌پذیری کامل شبکهٔ انتقال با استفاده از یک رویکرد دو هدفهٔ جدید مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. برای این منظور، مجموعهٔ نایقینی‌های تحمیل‌شده به سیستم انتقال، واحدهای فازوری و اندازه‌گیرهای غیرسنکرون به صورت احتمالاتی مدل‌سازی‌شده و در قالب یک تابع هدف فنی برای مسألهٔ مکان‌یابی واحدهای فازوری پیشنهاد شده است. مدل‌سازی احتمالاتی پیشنهادی، مبتنی بر شبیه‌سازی مونت‌کارلو، این امکان را فراهم می‌آورد تا شبکهٔ انتقال از نظرگاه مشاهده‌پذیری سطوح متفاوتی از قابلیت اطمینان را تجربه نموده و خود را به شرایط تک‌اتفاقی محدود نکند. به منظور اجرای روش موردنظر، الگوریتم ژنتیک دوهدفه به نحو شایسته‌ای به مسأله اعمال شده است. با اجرای برنامه‌های توسعه داده شده برای شبکه‌های آزمون *IEEE*، کارایی راهکار پیشنهادی در قالب چندین سناریو ارزیابی و نتایج بدست آمده، گزارش شده‌اند.

کلمات کلیدی: شبیه‌سازی مونت‌کارلو؛ مکان‌یابی بهینه؛ مشاهده‌پذیری سیستم قدرت؛ واحد اندازه‌گیری فازور؛ نایقینی.

Transmission Network Observability by Joint Optimal Placement of PMUs and Conventional Measurements via Probabilistic Modeling of Uncertainties through Multi-Objective Genetic Algorithm

Seyed Mahdi Mazhari, Alireza Fereidunian, Hamid Lesani

Abstract: This paper presents a new approach for phasor measurement units (PMUs) placement within transmission networks considering risk of observability. To such aim, probabilistic effects of uncertainties imposed to the transmission networks are modeled via Monte-Carlo simulations. Then, risk of observability is introduced as a new objective function and applied to the PMU placement problem. The proposed objective function accompanied by the prevalent cost function leads the transmission network to face with different reliability and observability levels based on its operation point of view. Detailed numerical results and comparisons presented in the paper show that the proposed approach could noticeably improve the quality of problem solutions and can be used as an effective tool for PMU placement within real-life networks.

Keywords: Phasor measurement unit (PMU); Power system observability, Uncertainties; Monte-Carlo simulation; Optimal Placement.

نویسنده عهده دار مکاتبات: علیرضا فریدونیان

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1392.7.1.4.3]

۱- علائم و نشانه‌های

مجموعه‌ها:

Ω^b, Ω^l مجموعهٔ خطوط شبکه/ شین‌ها؛

Ω_p^b مجموعهٔ شین‌های دارای واحد فازوری؛

Ω_p^{co} مجموعهٔ هزینه‌های لازم برای نصب واحد فازوری در $\Omega_{\mathrm{p}}^{\mathrm{b}}$؛

$\Omega_{l,i}^{ne}$ مجموعهٔ خطوط متصل به شین i؛

$\Omega_{b,i}^{ne}$ مجموعهٔ شامل شین i و شین‌های متصل به آن؛

$\Omega_i^M, \Omega_i^L, \Omega_i^P$ مجموعهٔ واحدهای فازوری/ خطوط/ اندازه‌گیرهای غیرسنکرونی که در اثر خروج آن‌ها، خط i مشاهده‌ناپذیر می‌شوند؛

ثابت‌ها:

C_i^p کل هزینهٔ نصب واحد فازوری در شین i؛

$\overline{C}$ حداکثر هزینهٔ توسعهٔ واحدهای فازوری؛

$n_{b,i}^r$ حداقل دفعات مشاهده‌پذیری شین i؛

$\lambda_i^L, \lambda_i^P, \lambda_i^M,$ نرخ خطا در واحد فازوری/خط/اندازه‌گیر غیرسنکرون i (fr/year)؛

n_b تعداد کل شین‌های شبکه؛

$\tau_i^M, \tau_i^L, \tau_i^P$ میانگین مدت‌زمان تعمیر واحد فازوری /خط/اندازه‌گیر غیرسنکرون i؛

κ_i ضریب جریمهٔ ارزش مشاهده‌پذیری خط i؛

γ, ε یک عدد خیلی بزرگ/کوچک؛

تابع‌ها:

Fit_2, Fit_1 تابع هدف اقتصادی/ریسک مشاهده‌پذیری مسألهٔ مکان‌یابی واحدهای فازوری؛

f_i^{ob} تابع مشاهده‌پذیری شین i؛

η_{ij}^{ob} تابع مشاهده‌پذیری شین i در اثر ادوات اندازه‌گیرغیرسنکرون؛

h_b^{re} تابع جریمهٔ تعداد دفعات مشاهده‌پذیری شین‌ها؛

h_b^{un} تابع جریمهٔ مشاهده‌ناپذیری شین‌ها؛

$\zeta_i^M, \zeta_i^L, \zeta_i^P$ احتمال مشاهده‌ناپذیری شین i در اثر خطا در واحد فازوری/خط/اندازه‌گیر غیرسنکرون؛

ω تابع احتمال مشاهده‌ناپذیری شبکه؛

متغیرها:

β_i متغیر تصمیم‌گیری نشان‌دهندهٔ قرارگیری واحد فازوری در شین i (۱)، در غیر اینصورت (۰)؛

ψ_i متغیر تصمیم‌گیری نشان‌دهندهٔ مشاهده‌پذیری شین i (۱)، در غیر اینصورت (۰)؛

z_i^{vol}, z_i^{inj} متغیر تصمیم‌گیری نشان‌دهندهٔ حضور واحد تزریقی/اندازه‌گیر ولتاژ در شین i (۱)، در غیر اینصورت (۰)؛

z_{ij}^{flo} متغیر تصمیم‌گیری نشان‌دهندهٔ حضور اندازه‌گیر جریان در خط $i-j$ (۱)، در غیر اینصورت (۰)؛

μ_i متغیر تصمیم‌گیری نشان‌دهندهٔ مشاهده‌پذیر شدن یکی از شین‌ها در اثر واحد تزریقی شین i (۱)، در غیر اینصورت (۰)؛

۲- مقدمه

با توجه به اهمیت روزافزون انرژی الکتریکی، حفظ امنیت و پایداری شبکه برق‌رسانی یکی از مهمترین مسائل در بهره‌برداری سیستم‌های قدرت می‌باشد. به همین دلیل، بهره‌برداران شبکه باید اطمینان حاصل کنند که در هر لحظه متغیرهای شبکه در محدوده مجاز خود قرار داشته و در صورت وقوع پیشامدهای مهم نیز سیستم همچنان عملکرد عادی خود را حفظ می‌کند. برای این منظور معمولاً از ابزارهای خبره‌ای همچون سیستم مدیریت انرژی استفاده می‌کنند. تخمین‌گر حالت یکی از اساسی‌ترین بخش‌های چنین سیستم‌هایی است؛ تخمین‌گرهای حالت، متغیرهای حالت سیستم قدرت را که شامل فازور ولتاژ شین‌ها می‌شود، در هر لحظه از زمان دریافت نموده و با حل مجموعه‌ای از معادلات غیرخطی حالت سیستم را مشخص می‌کنند [۱].

با توجه به ضعف روش‌های سنتی در تخمین حالت سیستم قدرت، طراحان شبکه به ابزارهای جدیدِ تخمین حالت روی آورده‌اند. یکی از این ابزارها، واحد اندازه‌گیری فازور می‌باشد. واحد فازوری، یک دستگاه اندازه‌گیری است که در شین‌های شبکهٔ انتقال نصب‌شده و فازور ولتاژِ شین و جریانِ خطوط متصل به آن را اندازه‌گیری می‌نماید. شکل (۱)، قرارگیری یک واحد اندازه‌گیری فازور در یک پست فوق‌توزیع را نشان می‌دهد [۲]. با توجه به اینکه معین بودن فازور ولتاژ و جریان در تمام شین‌ها و خطوط، شرط لازم و کافی برای مشاهده‌پذیری کامل شبکه است، لذا نصب تعداد کافی واحد فازوری، تخمین حالتِ کاملِ شبکه را تضمین می‌نماید.

با توجه به اینکه محاسبات لازم جهت بررسی مشاهده‌پذیری شبکه‌های بزرگ‌مقیاس به حافظه و زمان زیادی نیاز دارد، لذا معمولاً مشاهده‌پذیری سیستم‌های قدرت با استفاده از روش توپولوژیکی انجام می‌گیرد [۲]. در این روش بررسی مشاهده‌پذیری یک گراف یک‌پارچه، مبتنی بر مجموعه قوانین الکتریکی و شرایط توزیع توان، صورت می‌پذیرد. مطابق این قوانین، چنانچه 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. علاوه بر این، در صورتی که ولتاژ هر دو گره متصل به یک یال مشخص باشند، جریان آن نیز معین می‌گردد. در نهایت، چنانچه جریان تمام یال‌های متصل به یک شین تزریقی صفر، بجز

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1392.7.1.4.3]

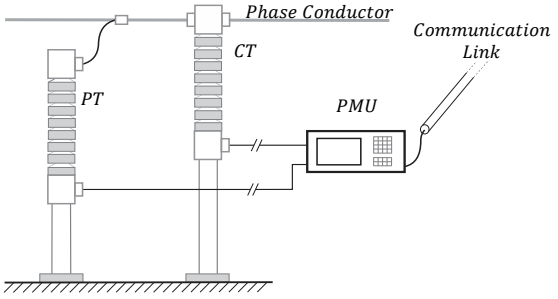
یکی از آن‌ها، مشخص باشد، جریان یال باقیمانده نیز معین می‌گردد [۱۰-۳].

با توجه به قوانین مشاهده‌پذیری فوق، طبیعی است که قرارگیری واحد فازوری در کلیهٔ شین‌های شبکه ضرروری نیست. علاوه بر این، با توجه به قیمت بالای واحدهای فازوری و در نظر داشتن این نکته که امکان قرارگیری واحد فازوری در برخی از پست‌های شبکه به دلیل محدودیت‌های مخابراتی موجود نیست، مسألهٔ مکان‌یابی واحدهای فازوری در قالب یک مسألهٔ بهینه‌سازیی مقید مطرح می‌گردد [۴]. هدف از این مسأله تعیین مکان و تعداد بهینهٔ واحدهای فازوری به‌نحوی است که شبکه با کمترین هزینه مشاهده‌پذیر گردد.

با توجه به اهمیت موضوع، تاکنون مطالعات زیادی بر روی این مسأله انجام شده است [۲۲-۲]. در [۳] مکان‌یابی بهینهٔ واحدهای فازوری با استفاده از الگوریتم تبرید تدریجی فلزات حل شده است. مرجع [۴] کاربرد الگوریتم ژنتیک ایمنی و مرجع [۵] کارایی الگوریتم مهاجرت پرندگان برای حل مسأله را بررسی کرده‌اند. لازم به ذکر است که [۵] یک قانون مشاهده‌پذیری جدید نیز برای آرایش واحدهای فازوری ارائه داده است؛ با این وجود، قانون موردنظر ممکن است در برخی از شبکه‌ها رویت‌پذیری را با مشکل مواجه کند [۱۱-۱۰]. در مراجع [۱۳-۶] مکان‌یابی واحدهای فازوری با استفاده از برنامه‌ریزی عدد صحیح بررسی شده است. در [۹] فرمول‌بندی جدیدی مبتنی برنامه‌ریزی عدد صحیح برای مسأله پیشنهاد شده به نحوی که شبکه در صورت خروج یکی از خطوط یا واحدهای فازوری کماکان مشاهده‌پذیر باقی می‌ماند. مرجع [۱۰] این فرمول‌بندی را در حضور واحدهای اندازه‌گیری غیرسنکرون تعمیم داده است. در [۱۱] علاوه بر موارد فوق، افزونگی مشاهده‌پذیری نیز مد نظر قرار گرفته است.

در کنار موارد فوق، مرجع [۱۲] مکان‌یابی واحدهای فازوری را با توجه به ارزش مشاهده‌پذیری در شرایط نایقینی با استفاده از یک الگوریتم تکاملی مورد بررسی قرار داده است. در [۱۳] مسأله مکان‌یابی چندمرحله‌ای با یک قالب احتمالاتی فرمول‌بندی نموده است؛ در سال‌های میانی دورهٔ برنامه‌ریزی مسأله با هدف بیشینه‌سازی میانگین احتمال مشاهده‌پذیری شین‌ها حل شده است.

علاوه بر موارد فوق، جنبه‌های متفاوتی از واحدهای فازوری در سایر مطالعات مدنظر قرار گرفته‌اند. به عنوان نمونه، در [۱۴] با بررسی سخت‌افزار و جایگاه واحد فازوری در سیستم کنترل متمرکز، مدل‌سازی قابلیت اطمینان دو-وضعیتی مبتنی بر مجموعه‌های فازی برای واحدهای اندازه‌گیری فازور ارائه شده است. مرجع [۱۵] با معرفی عمقِ مشاهده‌ناپذیری راهکار جدیدی برای مکان‌یابی تدریجی واحدهای فازوری پیشنهاد داده است. در [۱۶] مکان‌یابی واحدهای فازوری با هدف شناسایی ناحیهٔ خطادیده در سطح شبکه انجام گرفته است. در [۲۱] مشاهده‌پذیری شبکه‌های AC و DC از طریق واحدهای فازوری بررسی شده است.



شکل ۱: نصب واحد فازوری در شین شبکهٔ قدرت [۲]

در این میان، برخی از پژوهش‌ها مسألهٔ مکان‌یابی واحدهای فازوری را با دو هدف متمایز بررسی نموده‌اند [۲۰-۱۷]. در حالی که [۱۷] از الگوریتم ژنتیک چندهدفه استفاده کرده است، مرجع [۱۸] مسأله را با هدف کمینه‌سازی تعداد واحدهای فازوری و بیشینه‌سازی تعداد دفعات مشاهده‌پذیری با استفاده از الگوریتم جغرافیای حیاتی بررسی نموده است. در [۲۰-۱۹] الگوریتم چندهدفهٔ دیفرانسیلی به منظور بیشینه‌سازی تعداد دفعات مشاهده‌پذیری در شرایط خروج خطوط و واحدهای فازوری استفاده شده است.

همانطور که مشاهده می‌شود، الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه تاکنون فقط به منظور دستیابی به بیشینه‌سازی مشاهده‌پذیری در شرایط بهره‌برداری عادی یا همراه با خروج خطوط و واحد فازوری مورد استفاده قرار گرفته است. این در حالی است که مجموعهٔ این موارد در پژوهش‌های اخیر در قالب یک مسألهٔ بهینه‌سازی یک‌هدفه نیز قابل دستیابی هستند [۱۲-۱۰]،[۲۲].

در این مقاله مسألهٔ مکان‌یابی واحدهای فازوری با هدف کمینه‌سازی هزینه‌ها و کمینه‌سازی ریسک مشاهده‌پذیری در شرایط نایقینی مورد ارزیابی قرار گرفته است. مجموعهٔ نایقینی‌های تحمیلی به مسأله فرمول‌بندی‌شده و تابع ریسک با استفاده از شبیه‌سازی مونت‌کارلو محاسبه شده است. مسألهٔ بهینه‌سازی دوهدفه با استفاده از الگوریتم *NSGA-II* حل شده و نتایج شبیه‌سازی برای چندین شبکهٔ مختلف ارائه شده است.

۲- فرمول‌بندی مسأله

۲-۱ تابع هدف مرسوم

در این مقاله، تابع هدف مرسوم مسألهٔ مکان‌یابی واحدهای فازوری مطابق رابطهٔ زیر در نظر گرفته می‌شود [۱۲]:

$$Min\ Fit_1 = \sum_{i\in\Omega_p^b} C_i^p + h_b^{re} \times \min\left(\Omega_p^{co}\right) + h_b^{un} \times \gamma \qquad (۱)$$

$$h_b^{re} = \frac{f_{max}^{ob} - \sum_{i\in\Omega_p^b} f_i^{ob}}{f_{max}^{ob} + \varepsilon} \qquad (۲)$$

$$f_{max}^{ob} = \sum_{i\in\Omega^b} f_i^{ob}, \quad s.t.:\ \beta_i = 1,\ \forall\, i \in \Omega^b \qquad (۳)$$

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1392.7.1.4.3]

$$h_b^{un} = n_b - \sum_{i \in \Omega^b} \psi_i \qquad (۴)$$

$$f_i^{ob} = z_i^{vol} + \sum_{j \in \Omega_{b,i}^{ne}} (\beta_j + \eta_{ij}^{ob}), \qquad \forall\, i \in \Omega^b \qquad (۵)$$

$$\eta_{ij}^{ob} = \psi_j \,.\, z_{ij}^{flo} + z_j^{inj} \,.\, \mu_j \,.\, \left| \frac{\sum_{(k \neq i,\, k \in \Omega_{b,j}^{ne})} \psi_k}{|\Omega_{b,j}^{ne}| - 1} \right| \qquad (۶)$$

$$\psi_i = \begin{cases} 1 & , \quad f_i^{ob} \geq 1 \\ 0 & , \quad f_i^{ob} = 0 \end{cases}, \qquad \forall\, i \in \Omega^b \qquad (۷)$$

رابطهٔ (۱) تابع هدف مرسوم مسأله را نشان می‌دهد که در آن جملهٔ اول معرف هزینه‌های لازم برای قرارگیری واحدهای فازوریِ انتخاب‌شده در سطح شبکه است.

جملهٔ دوم رابطهٔ (۱)، بهینه‌شدن تعداد دفعات مشاهده‌پذیری شین‌ها را برای یک آرایش انتخاب‌شده تضمین می‌نماید. در این جمله، h_b^{re} معرف ضریب جریمه مشاهده‌پذیری شین‌ها بوده و هر چه تعداد دفعات مشاهده‌پذیری شین‌ها بیشتر باشد، مقدار این ضریب جریمه کمتر می‌شود [۱۲]. مطابق نظریهٔ گراف، بیشینهٔ دفعات مشاهده‌پذیری شین‌ها با قرارگیری واحد فازوری در کلیهٔ شین‌های شبکه، مطابق رابطهٔ (۳)، صورت می‌گیرد. لذا، کمینه‌سازی ضریب جریمه‌ای همچون $f_{max}^{ob} - \sum_{i \in \Omega_p^b} f_i^{ob}$، بیشینه‌شدن تعداد دفعات مشاهده‌پذیری را تضمین می‌نماید.

علاوه بر این، مطابق رابطهٔ (۲) ضریب جریمهٔ h_b^{re} با استفاده از بیشینهٔ تعداد دفعات مشاهده‌پذیری نرمال‌شده و با اضافه‌شدن عدد کوچک ε به مخرج رابطه، اطمینان حاصل‌شده که همواره $h_b^{re} < 1$ است. با این حال، از آن‌جایی که کمینه‌سازی هم‌زمان تعداد واحدهای فازوری و بیشینه‌سازی تعداد دفعات مشاهده‌پذیری نیازمند هم‌جنس بودن دو جملهٔ اول رابطهٔ (۱) است، لذا ضریب جریمهٔ h_b^{re} در هزینهٔ واحد فازوری ضرب شده است. از طرفی، کمترین هزینهٔ ممکن برای واحد فازوری به کار گرفته‌شده تا همواره از کمتر بودن مقدار $h_b^{re} \times \min(\Omega_p^{co})$ نسبت به هزینهٔ یک واحد فازوری اطمینان حاصل شود. با این عمل، امکان محبوس ماندن پاسخ در کمینه‌های محلی ناشی از بهینه‌سازی هم‌زمان دو جملهٔ اول (که اهداف متمایزی را دنبال می‌کنند) به صورت چشمگیری کاهش می‌یابد [۱۲].

آخرین جملهٔ رابطهٔ (۱) همگرایی الگوریتم به پاسخ بهینه را تسهیل می‌نماید. مطابق رابطهٔ (۴)، چنانچه آرایش پیشنهادی برای واحدهای فازوری شبکه را رؤیت‌پذیرِ کامل ننماید، ضریب جریمهٔ h_b^{un} مخالف صفر شده و با ضرب‌شدن آن در عدد بسیار بزرگ γ، برازندگی آرایش پیشنهادی را به شدت تحت تاثیر قرار می‌دهد.

رابطهٔ (۵) تابع مشاهده‌پذیری پیشنهادی را نشان می‌دهد. جملهٔ اول اثر حضور واحد اندازه‌گیر ولتاژ در شین و جملهٔ دوم اثرات واحدهای فازوری مجاورِ این شین را نشان می‌دهد. تعداد دفعات مشاهده‌پذیری در اثر واحدهای اندازه‌گیر غیرسنکرونِ تزریقی در جملهٔ سوم قرار گرفته و مطابق رابطهٔ (۶) مدل‌سازی شده است. چنانچه یک اندازه‌گیر توان انتقالی میان دو شینِ شبکه قرار گیرد، توان گذرکرده از خط محاسبه می‌شود. لذا در صورت داشتن ولتاژ هر یک از شین‌ها، جریان گذرنده از خط محاسبه‌شده و مطابق قانون اهم ولتاژ شین تعیین می‌گردد [۱۰]. به بیان دیگر، در اثر قرارگیری اندازه‌گیر توان انتقالی میان دو شین، مشاهده‌پذیری یکی از شین‌ها، مشاهده‌پذیری شین دیگر را تضمین می‌نماید. این مورد در جملهٔ اول رابطهٔ (۶) مدل شده است.

اندازه‌گیر توان تزریقی به یک شین، از جمله اندازه‌گیرهای غیرسنکرونِ مرسوم در سیستم‌های قدرت است. چنانچه این تجهیز در یک شینِ شبکه نصب شود، مشاهده‌پذیری یکی از شین‌های متصل به این واحد اندازه‌گیر، در شرایطی که سایر شین‌های متصل به آن مشاهده‌پذیر باشند، تضمین خواهد شد [۱۱]. این شرایط به وسیلهٔ آخرین جملهٔ رابطهٔ (۶) مدل‌سازی شده است. در این جمله، علامت [.] نشان‌دهندهٔ جزءصحیح بوده و شرایط باینری شدن عبارت را مهیا می‌نماید. یادآوری این نکته سودمند است که برخی از پست‌های شبکهٔ انتقال نقش کلیدزنی را بر عهده دارند؛ توان تولیدی و یا مصرفی چنین شین‌هایی برابر صفر است. لذا، قانون جریان کیرشهوف در این شین‌ها قابل اجر می‌باشد. این شین‌ها معمولاً با عنوان "شین تزریق صفر" شناخته‌شده و مشابه یک اندازه‌گیر تزریقی عمل می‌نمایند. بر این اساس، با تعریف مناسب متغیر باینری قید مربوطه مطابق جملهٔ دوم رابطهٔ (۶) به مسأله اعمال می‌گردد.

رابطهٔ (۷) نیز معرف یک متغیر تصمیم کمکی است که مشاهده‌پذیر بودن شین‌های شبکه را در هر تکرار از الگوریتم بهینه‌سازی مدل می‌نماید.

۲-۲ تابع ریسک احتمال مشاهده‌پذیری

هدف از نصب واحدهای فازوری ثبت جریان و ولتاژ تمامی اجزاء شبکه در هر لحظه از زمان است. این داده‌های می‌توانند در تخمین حالت، شناسایی خطاها و به عبارت کلی‌تر در بهره‌برداریِ زمان‌واقعی شبکه به‌کار گرفته شوند. لذا، بهره‌بردار شبکه می‌تواند انتظار داشته باشد تا با نصب تعداد کافی واحد فازوری، کلیهٔ اغتشاشات شبکه را در مشاهده نماید. با این همه، به دلیل مجموعه‌ای از نایقینی‌ها همچون خروج خطوط، خطا در واحدهای فازوری، مشکلات مخابراتی، عدم عملکرد صحیح اندازه‌گیرهای غیرسنکرون [۱۰] و در سطحی دیگر به دلیل توسعه شبکه و تغییر آرایش آن [۱۳]، ممکن است مشاهده‌پذیری بخشی از شبکه در کلیهٔ ساعات بهره‌برداری امکان‌پذیر نباشد.

روابط (۸) تا (۱۰) احتمال مشاهده‌پذیری هر یک از خطوط شبکه را در اثر خروج واحدهای فازوری، خطا در خطوط و نیز عدم عملکرد اندازه‌گیرهای غیرسنکرون محاسبه می‌نماید. رابطهٔ (۱۱) تابع احتمال مشاهده‌پذیری شبکه را نمایش می‌دهد. با توجه به اینکه ممکن است بهره‌بردار شبکه، به هر علتی، علاقه‌مند به مشاهده‌پذیری متفاوت برخی از خطوط باشد، ضریب κ_i به این رابطه افزوده شده است. به عنوان نمونه، ممکن است یک خط ترانزیت‌کنندهٔ توان میان دو ناحیه بوده و یا به دلیل

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1392.7.1.4.3]

تراکم از اهمیت بالاتری برخوردار باشد؛ است، لذا لازم است تا قابلیت اطمینان مشاهدهٔ چنین خطی نسبت به سایر خطوط شبکه بیشتر باشد. چنانچه بهره‌بردار تمایل دارد تا تحت هر شرایطی جریان خط i مشاهده شود، کافی است ضریب κ_i را برابر بی‌نهایت قرار دهد.

$$\zeta_i^P = 1 - \bigcup_{j \in \Omega_{l,i}^P} \left(\frac{\lambda_j^P \times \tau_j^P}{8760}\right) \quad (۸)$$

$$\zeta_i^L = 1 - \bigcup_{j \in \Omega_{l,i}^L} \left(\frac{\lambda_j^L \times \tau_j^L}{8760}\right) \quad (۹)$$

$$\zeta_i^M = 1 - \bigcup_{j \in \Omega_{l,i}^M} \left(\frac{\lambda_j^M \times \tau_j^M}{8760}\right) \quad (۱۰)$$

$$\omega = \frac{\sum_{i \in \Omega^l}[\kappa_i \times \cup\,(\zeta_i^P, \zeta_i^L, \zeta_i^M)]}{|\Omega^l|} \quad (۱۱)$$

با توجه به حضور مجموعه‌های متفاوتی از نایقینی‌ها در مسأله، لازم است تا بهره‌بردار شبکه ضمن مدل‌سازی احتمال وقوع نایقینی‌ها، حداقل وضعیت موردانتظار خود را معین نموده و ریسک مشاهده‌پذیری را برای هر حالت تحلیل نماید. برای این منظور به هر یک از نایقینی‌های مسأله یک مقدار کمینه و یک مقدار بیشینه به عنوان احتمال وقوع آن‌ها در طی دورهٔ مطالعه نسبت داده می‌شود. این احتمال‌ها با توجه به مطالعات اطلاعات بهره‌برداری گذشته و سایر ملاحظات اقتصادی و اجتماعی تعیین می‌گردند. چنانچه یک آرایش معین از واحدهای فازوری برای شبکه پیشنهاد شده باشد، تابع ریسک احتمال مشاهده‌پذیری خطوط شبکه در اثر نایقینی‌ها با استفاده از شبیه‌سازی مونت‌کارلو مطابق گام‌ها زیر تعیین می‌شود:

گام ۱) با توجه به کمینه و بیشینهٔ احتمال وقوع نایقینی‌ها، یک تابع احتمال نرمال برای هر اتفاق تعریف می‌گردد؛

گام ۲) با توجه به تابع احتمال قسمت قبل، کلیهٔ وقایع احتمالی شبکه مقداردهی می‌شوند؛

گام ۳) تابع مشاهده‌پذیری رابطهٔ (۱۱) برای شبکه و با توجه به مقادیر بدست آمده در گام ۲ حل می‌گردد؛

گام ۴) چنانچه همگرایی در مقدار مورد انتظار مشاهده‌پذیری (ω) حاصل شده است شبیه‌سازی خاتمه می‌یابد، در غیر اینصورت گام‌های ۲ الی ۳ تکرار می‌گردد.

با استفاده از داده‌های بدست آمده از شبیه‌سازی مونت‌کارلو مقدار متوسط نهایی و واریانس تابع مشاهده‌پذیری یک آرایش پیشنهادی با استفاده از روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$\overline{Fit} = \frac{1}{NS} \cdot \sum_{i=1}^{NS} \omega\,(i) \quad (۱۲)$$

$$Var(Fit) = \frac{1}{NS} \cdot \sum_{i=1}^{NS} \left(\omega(i) - \overline{Fit}\right)^2 \quad (۱۳)$$

که در آن:

NS تعداد تکرارهای انجام‌شده؛

$\omega(i)$ مقدار تابع مشاهده‌پذیری در هر تکرار.

معیار همگرایی مورد استفاده برای شبیه‌سازی مونت‌کارلو مطابق رابطهٔ زیر می‌باشد [۲۳]:

$$\frac{\sqrt{Var(Fit)}}{\sqrt{NS}\,.\,\overline{Fit}} \le \sigma \quad (۱۴)$$

توزیع احتمالی مشاهده‌پذیری برای هر آرایش با استفاده از نتایج شبیه‌سازی مونت‌کارلو قابل محاسبه است؛ برای این منظور کافی است بازهٔ تغییرات مشاهده‌پذیری به چند زیربازهٔ مساوی تقسیم‌شده و احتمال مربوط به هر زیربازه مطابق رابطهٔ زیر محاسبه شود [۲۳]:

$$Prob(i) = \frac{N_i}{NS} \quad (۱۵)$$

که در این رابطه، N_i معرف تعداد تکرارهایی از شبیه‌سازی مونت‌کارلو است که سودآوری محاسبه‌شده در آن‌ها در زیربازهٔ i ام واقع شده است.

با توجه به اینکه به دلیل استفاده از شبیه‌سازی مونت‌کارلو برای هر آرایشِ شبکه مقادیر متفاوت سودآوری نتیجه شده است، لذا هر یک از آرایش‌ها از نظرگاه میزان ریسک سودآوری مطابق رابطهٔ زیر ارزش‌گذاری می‌شود [۲۳]:

$$Fit_2 = Risk(Fit_T) = \frac{1}{NS} \cdot \sum_{\omega < Fit_T} \left(\frac{Fit_T - \omega}{Fit_T}\right) \quad (۱۶)$$

در این رابطه، Fit_T مقدار تابع مشاهده‌پذیری انتخاب‌شده توسط بهره‌بردار شبکه می‌باشد. مطابق این رابطه، نسبت مجموع فاصلهٔ کلیهٔ حالاتی که مشاهده‌پذیری آن کمتر از مقدار مورد انتظار بوده بر مقدار مشاهده‌پذیری انتخاب‌شده به عنوان میزان ریسک طرح پیشنهادی در نظر گرفته می‌شود. بر این اساس، چنانچه کاهش تعداد واحدهای فازوری سبب کاهش سطح مشاهده‌پذیری در شبکه گردد، ریسک مشاهده‌پذیری افزایش می‌یابد. طبعاً بهره‌بردار شبکه تمایل دارد تا ضمن انجام کمترین هزینه برای توسعهٔ واحدهای فازوری ، کمترین سطح ریسک مشاهده‌پذیری را در اختیار داشته باشد. با این وجود، از آن‌جایی که میزان ریسک و هزینهٔ انجام‌شده برای واحدهای فازوری (Fit_2) دو کمیت هم‌جنس نیستند، بهینه‌سازی هم‌زمان این دو هدف نیازمند استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه است.

۲-۳ قیود مسأله

محدودیت‌های حاکم بر مسأله مطابق روابط زیر فرمول‌بندی می‌شوند [۱۲]:

$$f_i^{ob} \ge n_{b,i}^r, \qquad \forall\, i \in \Omega^b \quad (۱۷)$$

$$\sum_{i \in \Omega_p^b} C_i^p \le \overline{C} \quad (۱۸)$$

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1392.7.1.4.3]

روابط (۱۷) و (۱۸) قیود مرسوم در مسألهٔ مکان‌یابی واحدهای فازوری را نشان می‌دهند. رابطهٔ (۱۷) تضمین می‌نماید که هر یک از شین‌های شبکه به تعداد از پیش تعیین‌شده مشاهده‌پذیر شده است. مطابق رابطهٔ (۱۸)، هزینهٔ مکان‌یابی واحدهای فازوری همواره از بودجهٔ پروژه کمتر خواهد بود.

۳- روش حل

۳-۱ الگوریتم چندهدفهٔ توسعه داده‌شده

در سال‌های اخیر الگوریتم‌های مبتنی بر جمعیت همچون الگوریتم ژنتیک در بهینه‌سازی مسائل چندهدفه کاربرد زیادی پیدا کرده‌اند. این الگوریتم‌ها قادرند تا مجموعهٔ جواب‌های کارا را فقط با یک بار اجرای الگوریتم بدست آورند؛ این درحالی است که الگوریتم‌های بهینه‌سازی یک‌هدفه به چند بار اجرای متوالی و جداگانه برای دستیابی به این مجموعه نیازمندند [۲۴].

به منظور بهینه‌سازی دوهدفهٔ مسألهٔ مکان‌یابی بانک‌های خازنی از الگوریتم *NSGA-II* استفاده شده است. توضیحات جامعی در زمینهٔ الگوریتم‌های ژنتیک چندهدفه در مراجع [۲۵-۲۳] ارائه‌شده است. کدگذاری پیشنهادی برای مسأله مطابق رابطهٔ زیر می‌باشد:

$$\vartheta_i = \left[\beta_1, \dots, \beta_i, \dots, \beta_{|\Omega^b|}\right], \qquad \forall\, i \in \Omega^{pop} \tag{۱۹}$$

اهداف مورد نظر مسأله عبارتند از:.

$$Min \quad f_1 = Fit_1 \tag{۲۰}$$

$$Min \quad f_2 = Fit_2 \tag{۲۱}$$

مراحل کلی اجرای الگوریتم به صورت زیر می‌باشد:

گام ۱) مجموعهٔ اطلاعات فنی و اقتصادی ارائه می‌شود؛

گام ۲) مجموعهٔ جمعیت اولیه، شامل جمعیت هوشمند و جمعیت تصادفی تولید می‌گردند؛

گام ۳) مقدار تابع برازندگی اشتراکی محاسبه می‌شود؛ برای محاسبهٔ ریسک لازم است تا شبیه‌سازی مونت‌کارلو مطابق توضیحات بخش (۲-۲) اجرا شود؛

گام ۴) با استفاده از روش چرخ رولت جمعیت باقیمانده انتخاب می‌گردد؛

گام ۵) عملگرهای ادغام و جهش به جمعیت باقیمانده اعمال‌شده و جمعیت جدید تولید می‌گردد؛

گام ۶) با استفاده از روش چرخ رولت از میان جمعیت باقیمانده و تولید شده جمعیت جدید انتخاب می‌شود؛

گام ۷) گام‌های ۶-۳ تا دستیابی به شرط توقف الگوریتم ادامه می‌یابد.

۳-۲ انتخاب پاسخ نهایی

با توجه به اینکه الگوریتم‌های بهینه‌سازی تکاملی چندهدفه دسته‌ای از جواب‌های کارا را پیدا می‌نمایند، طراح شبکه موظف است تا یکی از پاسخ‌ها را به عنوان آرایش نهایی واحدهای فازوری پیشنهاد نماید. هر یک از پاسخ‌های موجود در جبههٔ کارا پاسخ بهینهٔ مسأله بوده و انتخاب پاسخ نهایی به مجموعه‌ای از ملاحظات فنی و اقتصادی وابسته است.

در این مقاله پاسخ نهایی با استفاده از روش *max-min* فازی تعیین می‌گردد [۲۵]. در این روش، ابتدا مقادیر توابع هدف برای هر یک از پاسخ‌های موجود در جبههٔ کارا مطابق رابطهٔ (۲۲) نرمال می‌شود.

$$\mu_{f_i} = \frac{f_i - f_i^{min}}{f_i^{max} - f_i^{min}}, \qquad \forall\, i \in \{1,2\} \tag{۲۲}$$

در این رابطه مقادیر f_i، f_i^{min} و f_i^{max} به ترتیب معرف مقدار واقعی، حداقل و حداکثر تابع هدف i می‌باشد. پس از نرمالیزه نمودن پاسخ‌ها، جواب نهایی با استفاده از روش *max-min* و مطابق رابطهٔ زیر انتخاب می‌گردد:

$$\max\{\min(\mu_{f_1}, \mu_{f_2})\} \tag{۲۳}$$

۴- مطالعات عددی و نتایج

به منظور استفاده از روش پیشنهادی برنامه‌های مربوطه در محیط نرم‌افزار *Matlab* نوشته شد. کاربر با ارائهٔ وضعیت شبکهٔ مورد مطالعه، مکان‌های نامزد برای احداث واحدهای فازوری و نیز وارد نمودن سایر اطلاعات فنی و اقتصادی، پاسخ مسألهٔ مکان‌یابی واحدهای فازوری را مشاهده می‌نماید. به منظور حل مسألهٔ بهینه‌سازیِ یک‌هدفه از الگوریتم ژنتیک و بهینه‌سازی دوهدفه از الگوریتم *NSGA-II* استفاده شده است. نتایج حاصل از اعمال مدل پیشنهادی بر روی شبکه‌های آزمون *IEEE*، در قالب چندین سناریو ارائه شده است. کامپیوتر استفاده شده در شبیه‌سازی‌ها دارای اطلاعات فنی شامل، سی‌پی‌یو $Centrino1.8^{GH}$ و 1^{GB} رم می‌باشد.

۴-۱ سناریوی اول

در این سناریو مسألهٔ مکان‌یابی واحدهای فازوری برای شبکه‌های مختلف با استفاده از الگوریتم ژنتیک حل و با سایر روش‌ها مقایسه شده است. جدول‌های (۱) تا (۳) نتایج حاصل از این روش‌ها را مقایسه کرده است. مطابق جدول (۱)، الگوریتم پیشنهادی بهترین پاسخ شناخته‌شده برای شبکه‌های مرسوم را یافته است. همانطور که مشاهده می‌شود، الگوریتم پیشنهادی از عملکرد مناسبی برخوردار می‌باشد. توجه به این نکته حائز اهمیت است که مرجع [۸] یک قانونِ مشاهده‌پذیری اضافه را مد نظر قرار داده و همین دلیل پاسخ بهتری را یافته است. از آن‌جایی که این قانون در این مقاله مد نظر نبوده است، پاسخ‌های پیشنهادی بهترین پاسخ ممکن تاکنون می‌باشند.

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.20088345.1392.7.1.4.3]

جدول ۱: مقایسهٔ نتایج روش‌های مختلف

شبکهٔ مورد مطالعه	مرجع [۳]	مرجع [۴]	مرجع [۹]	مرجع [۱۶]	مرجع [۱۷]	راهکار پیشنهادی
IEEE 14	۳	۳	۳	۳	۳	۳
IEEE 30	--	۷	--	--	۷	۷
IEEE 39	۸	--	۸	--	--	۸
IEEE 57	--	۱۱	--	۱۲	۱۲	۱۱
IEEE 118	۲۹	۲۹	۲۸*	۲۹	۲۹	۲۹

*بهتر بودن پاسخ به دلیل قوانین مشاهده‌پذیری متفاوت است.

جدول ۲: مکان‌های پیشنهادی برای قرارگیری واحد فازوری

شبکهٔ مورد مطالعه	مکان‌های پیشنهادی
IEEE 14	۲، ۶، ۹
IEEE 30	۲، ۴، ۱۰، ۱۲، ۱۵، ۱۸، ۲۷
IEEE 39	۳، ۸، ۱۰، ۱۶، ۲۰، ۲۳، ۲۵، ۲۹
IEEE 57	۱، ۴، ۱۳، ۲۰، ۲۵، ۲۹، ۳۲، ۳۸، ۵۱، ۵۴، ۵۶
IEEE 118	۲، ۸، ۱۱، ۱۲، ۱۵، ۱۹، ۲۱، ۲۷، ۳۱، ۳۲، ۳۴، ۴۰، ۴۵، ۴۹، ۵۲، ۵۶، ۶۲، ۶۵، ۷۲، ۷۵، ۷۷، ۸۰، ۸۵، ۸۶، ۹۰، ۹۴، ۱۰۱، ۱۰۵، ۱۱۰

جدول ۳: مقایسهٔ نتایج روش‌های مختلف از نظرگاه میانگین تعداد دفعات مشاهده‌پذیری شین‌ها

شبکه مورد مطالعه	مرجع [۳]	مرجع [۴]	مرجع [۹]	مرجع [۱۶]	مرجع [۱۷]	راهکار پیشنهادی
IEEE 14	۱/۱۴۳	۱/۱۴۳	۱/۱۴۳	۱/۱۴۳	۱/۱۴۳	۱/۱۴۳
IEEE 30	--	۱/۱۶۷	۱/۲۳۳	--	--	۱/۴۶۷
IEEE 39	۱/۰۵۱	--	۱/۱۰۳	--	--	۱/۱۰۳
IEEE 57	--	۱/۰۳۵	۱/۱۰۵	۱/۰۸۸	--	۱/۱۰۵
IEEE 118	۱/۲۹۷	۱/۲۸۰	۱/۲۱۲	۱/۳۸۱	--	۱/۳۸۱

جدول (۲) مکان‌های پیشنهادی برای نصب واحدهای فازوری را نشان می‌دهد. میانگین دفعات مشاهده‌پذیری این آرایش‌ها در جدول (۳) گزارش‌شده و با سایر مراجع مقایسه شده است. همانطور که نتایج متناظر با شبکهٔ ۳۰ باس *IEEE* نشان می‌دهند، راهکار پیشنهادی پاسخ بهتری را برای این شبکه نتیجه داده است. مطابق این نتایج، جملهٔ دوم تابع هدف ارائه‌شده در رابطهٔ (۱) دستیابی به بیشنهٔ تعداد دفعات مشاهده‌پذیری را در ضمن کمینه نمودن تعداد واحدهای فازوری، تسهیل نموده است.

۴-۲ سناریوی دوم

در این سناریو مسألهٔ مکان‌یابی واحدهای اندازه‌گیری فازور با استفاده از رویکرد پیشنهادی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. برای این منظور، حداقل و حداکثر نرخ خطا/سرویس‌رسانی در واحد فازوری، خطوط و اندازه‌گیرهای غیرسنکرون به ترتیب (۱۰ تا ۲۵ بار در سال)، (۰/۰۷ تا ۰/۱۳ به ازای هر یک کیلومتر در هر سال) و (۱۲ تا ۲۲ بار در سال) فرض شده‌اند. علاوه بر این، حداقل و حداکثر مدت‌زمان تعمیر/بازگشت واحد فازوری، خطوط و اندازه‌گیرهای غیرسنکرون به ترتیب (۳ تا ۱۰ ساعت)، (۴ تا ۶ ساعت) و (۴ تا ۱۲ ساعت) درنظر گرفته شده است. طول دورهٔ مطالعه ده سال بوده و هزینهٔ احداث هر واحد فازوری معادل ۵۰۰۰ دلار فرض شده است. سطح ریسک پیشنهادی بهره‌بردار معادل ریسک مشاهده‌پذیری در شرایط نایقینی *N-1* خطوط فرض می‌گردد [۱۲].

با اجرای برنامه‌های توسعه‌داده شده، نتایج حاصل در جداول ۴ تا ۶ و شکل‌های ۲ تا ۳ گزارش شده‌اند. همانطور که در جدول (۴) مشاهده می‌شود، تعداد واحدهای فازوری موردنیاز برای شبکه‌های ۱۴، ۳۰، ۳۹، ۵۷ و ۱۱۸ شین *IEEE* به ترتیب برابر ۶، ۱۱، ۱۲، ۱۷ و ۳۹ می‌باشد که این مقادیر نسبت به حالت متناظر با بهینه‌سازی یک‌هدفه (سناریوی اول) به ترتیب حدوداً ۱۰۰٪، ۵۷٪، ۵۰٪، ۵۴٪ و ۳۴٪ رشد داشته است. بر این اساس، دستیابی به سطح ریسک‌پذیری مناسب نیازمند نصب تعداد بیشتری واحد فازوری در سطح شبکه است.

به منظور مقایسهٔ نتایج با پاسخ‌ها حاصل از قید قابلیت اطمینان *N-1*، جدول (۵) ارائه شده است. همانطور که در این جدول مشاهده می‌شود، تعداد واحدهای فازوری موردنیاز روش پیشنهادی برای شبکه‌های ۱۴، ۳۰، ۳۹، ۵۷ و ۱۱۸ شین *IEEE* نسبت به حالت متناظر با قید قابلیت اطمینان تک‌اتفاقی [۹]، به ترتیب حدوداً ۳۳٪، ۵۴٪، ۸۳٪، ۴۷٪ و ۶۷٪ کمتر است. همانطور که مشاهده می‌شود، روش مبتنی بر $N-1$ بسیار بیشتر از ریسک احتمالی مشاهده‌پذیری شبکه واحد فازوری پیشنهاد نموده است؛ بر این اساس، اگر چه استفاده از قید قابلیت $N-1$ نتایج قابل قبولی را از نظرگاه فنی بدست داده و سبب بالا رفتن سطح قابلیت اطمینان شبکه می‌شود، ولی از نظرگاه اقتصادی و همچنین مطالعات ریسک نتایج ناخوشایند می‌باشد.

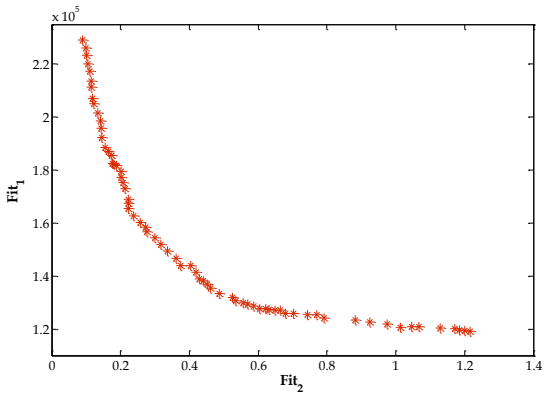
[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1392.7.1.4.3]

جدول ۴: مکان‌های پیشنهادی برای قرارگیری واحد فازوری در سناریوی دوم

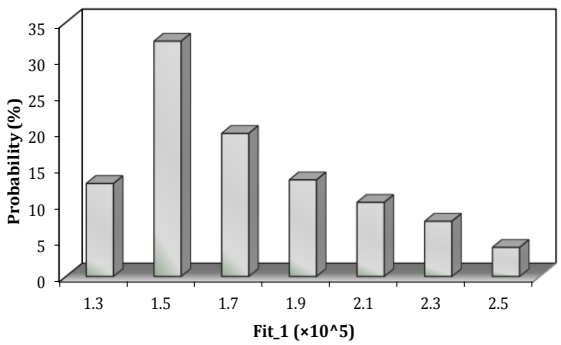
شبکهٔ مورد مطالعه	تعداد واحدهای فازوری	میانگین تعداد دفعات مشاهده‌پذیری شین‌ها	مکان‌های پیشنهادی
IEEE 14	۶	۲/۲۵	۲، ۴، ۵، ۶، ۹، ۱۳
IEEE 30	۱۱	۱/۹۰	۲، ۴، ۶، ۱۰، ۱۲، ۱۵، ۱۸، ۱۹، ۲۲، ۲۷، ۲۸
IEEE 39	۱۲	۱/۲۸	۲، ۷، ۹، ۱۱، ۱۴، ۱۶، ۱۷، ۲۰، ۲۳، ۲۵، ۲۹، ۳۱
IEEE 57	۱۷	۱/۳۳	۱، ۴، ۸، ۹، ۱۵، ۱۸، ۲۴، ۲۵، ۲۷، ۳۱، ۳۲، ۳۵، ۳۸، ۵۱، ۵۳، ۵۶، ۵۷
IEEE 118	۳۹	۱/۷۳	۳، ۵، ۸، ۱۱، ۱۲، ۱۵، ۱۷، ۲۱، ۲۷، ۳۱، ۳۲، ۳۴، ۳۷، ۴۰، ۴۲، ۴۵، ۴۹، ۵۳، ۵۶، ۶۰، ۶۲، ۶۳، ۶۵، ۷۰، ۷۲، ۷۵، ۷۷، ۸۰، ۸۵، ۸۶، ۸۹، ۹۰، ۹۴، ۹۷، ۱۰۰، ۱۰۲، ۱۰۵، ۱۱۰، ۱۱۳

جدول ۵: مقایسه نتایج رویکرد پیشنهادی و مدل‌های یک‌هدفه

شبکهٔ مورد مطالعه	کمترین تعداد واحد فازوری [۱۲]		کمترین تعداد واحد فازوری با قید *N-1* خط و واحد فازوری [۹]		پاسخ انتخابی (دوهدفه)	
	تعداد واحدهای فازوری	میانگین مشاهده‌پذیری	تعداد واحدهای فازوری	میانگین مشاهده‌پذیری	تعداد واحدهای فازوری	میانگین مشاهده‌پذیری
IEEE 14	۳	۱/۱۴۳	۸	۲/۳۶	۶	۲/۲۵
IEEE 30	۷	۱/۴۶۷	۱۷	۲/۰۳	۱۱	۱/۹۰
IEEE 39	۸	۱/۱۰۳	۲۲	۱/۸۷	۱۲	۱/۲۸
IEEE 57	۱۱	۱/۱۰۵	۲۵	۱/۸۱	۱۷	۱/۳۳
IEEE 118	۲۹	۱/۳۸۱	۶۵	۲/۲۴	۳۹	۱/۷۳



شکل ۲: جبههٔ کارای بدست‌آمده برای شبکه ۵۷ شین *IEEE*



شکل ۳: منحنی توزیع احتمالی Fit_1 برای شبکه ۵۷ شین *IEEE*

شکل (۲) جبههٔ کارای الگوریتم توسعه‌داده شده را برای شبکهٔ ۵۷ شین *IEEE* نشان می‌دهد. مکان واحدهای فازوری پیشنهادی و میانگین تعداد دفعات مشاهده‌پذیری شین‌ها در جدول (۴) ارائه شده‌اند. شکل (۳) منحنی توزیع احتمالی تابع هدف اقتصادی (Fit_1) حاصل از شبیه‌سازی مونت‌کارلو را به ازای سطح ریسک انتخابی نشان می‌دهد. اطلاعات آماری استخراج‌شده از این شکل در جدول (۶) گزارش شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، بیشترین فراوانی تابع هدف به ترتیب در $1/5\times10^5$و $1/7\times10^5$ اتفاق می‌افتند. مطابق رابطهٔ (۱۶) ریسک متناظر با این پاسخ برابر ۰/۳۴ می‌باشد.

همانطور که از نتایج بر می‌آید، راهکار پیشنهادی با ارائهٔ یک تعریف منطقی از ریسک مشاهده‌پذیری در مسألهٔ مکان‌یابی واحدهای فازوری، پاسخ‌های قابل قبولی را از نظرگاه‌های فنی و اقتصادی نتیجه داده است.

۴-۳ سناریوی سوم

در این سناریو اثر اندازه‌گیرهای سنتی موجود در سطح شبکهٔ انتقال همچون اندازه‌گیر توان تزریقی، اندازه‌گیر ولتاژ و اندازه‌گیر جریان خط بر مشاهده‌پذیری و مکان‌یابی واحدهای فازوری مبتنی بر رویکرد پیشنهادی، بررسی می‌گردد. برای این منظور، شبکهٔ ۵۷ شین *IEEE* انتخاب‌شده و پنج آزمون مختلف به همراه نتایج حاصل از آن‌ها در جدول (۷) گزارش شده‌اند.

همانطور که در جدول (۷) مشاهده می‌شود، اندازه‌گیرهای توان تزریقی ضمن کاهش تعداد واحدهای فازوری موردنیاز، میانگین دفعات مشاهده‌پذیری شین‌ها را به اندازهٔ ۳٪ نسبت به حالت پایه بهبود داده‌اند. حضور هم‌زمان اندازه‌گیرهای جریان خط و تزریقی حدوداً ۱۰٪ پاسخ‌های حاصل را بهبود می‌دهد. مطابق نتایج این جدول، اندازه‌گیرهای ولتاژ فقط به ارتقاء تعداد دفعات مشاهده‌پذیری کمک نموده‌اند.

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1392.7.1.4.3]

جدول ۶: اندیس‌های آماری مربوط به سودآوری پاسخ انتخابی

مقدار متوسط ($\times 10^5$)	بازهٔ تغییرات ($\times 10^5$)	واریانس ($\times 10^9$)	انحراف معیار ($\times 10^5$)
۱/۷۴	۱/۱۹۸۰	۰/۱۸۲۶	۰/۴۲۷۳

جدول ۷: اثر اندازه‌گیرهای سنتی موجود در شبکه بر پاسخ‌های پیشنهادی

ردیف	اندازه‌گیر توان تزریقی	اندازه‌گیر جریان خط	اندازه‌گیر ولتاژ	دو هدفه	مکان واحدهای فازوری	تعداد واحدهای فازوری	میانگین مشاهده‌پذیری
۱	--	--	--	×	۱، ۴، ۸، ۹، ۱۵، ۱۸، ۲۴، ۲۵، ۲۷، ۳۱، ۳۲، ۳۵، ۳۸، ۵۱، ۵۳، ۵۶، ۵۷	۱۱	۱/۱۰۵
۲	۱، ۱۹، ۳۱، ۴۹	--	--	×	۶، ۹، ۱۲، ۱۵، ۲۲، ۲۷، ۳۲، ۵۰، ۵۳، ۵۶	۱۰	۱/۱۴۰
۳	۱، ۱۹، ۳۱، ۴۹	(۲۳-۲۴)، (۲۴-۲۶)، (۲۸-۲۹)، (۴۹-۵۰)	--	×	۶، ۹، ۱۲، ۱۵، ۲۲، ۳۲، ۵۰، ۵۳، ۵۶	۹	۱/۲۲۳
۴	۱، ۱۹، ۳۱، ۴۹	(۲۳-۲۴)، (۲۴-۲۶)، (۲۸-۲۹)، (۴۹-۵۰)	۸، ۲۰، ۴۵، ۴۸	×	۶، ۹، ۱۰، ۱۲، ۲۲، ۳۲، ۳۸، ۵۳، ۵۶	۹	۱/۳۵۱
۵	۱، ۱۹، ۳۱، ۴۹	(۲۳-۲۴)، (۲۴-۲۶)، (۲۸-۲۹)، (۴۹-۵۰)	۸، ۲۰، ۴۵، ۴۸	√	۱، ۵، ۸، ۹، ۱۵، ۲۷، ۲۹، ۳۲، ۳۸، ۴۰، ۴۳، ۵۱، ۵۴، ۵۶	۱۴	۱/۴۳۷

همانطور که انتظار می‌رفت، در اثر حضور این اندازه‌گیرها، تعداد واحدهای فازوری موردنیاز کاهش می‌یابد. از طرفی بر خلاف انتظار، اندازه‌گیر ولتاژ کمترین اثر را بر پاسخ‌ها داشته است. انتظار رایج از آنجا ناشی می‌شد که در اثر قرارگیری اندازه‌گیر ولتاژ در یک شین، ولتاژ آن شین اندازه‌گیری شده و شین مذکور مشاهده‌پذیر می‌گردد. لذا به نظر می‌رسید که تعداد واحدهای فازوری موردنیاز نیز کاهش یابد. با این همه، از آنجایی که اندازه‌گیر ولتاژ قادر به محاسبهٔ جریان خطوط نمی‌باشد 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.

آخرین ردیف جدول (۷) نتایج حاصل از رویکرد دوهدفهٔ پیشنهادی را در حضور اندازه‌گیرهای غیرسنکرون نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، ۱۴ واحد فازوری برای مشاهده‌پذیری این شبکه لازم است که نسبت به پاسخ ارائه‌شده در جدول (۵) حدوداً ۲۱٪ کاهش یافته است. در حقیقت، اثر اندازه‌گیرهای سنتی در محاسبات ریسک مشاهده‌پذیری، به دلیل ایجاد افزونگی، بیشتر از حالت تک‌هدفه بوده و تعداد واحدهای فازوری را بیشتر کاهش می‌دهد.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله مسألهٔ مکان‌یابی واحدهای اندازه‌گیری فازور با استفاده از یک رویکرد دوهدفه جدید به منظور کمینه‌سازی هم‌زمان هزینه‌ها و ریسک مشاهده‌پذیری خطوط مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور، مجموعهٔ نایقینی‌های تحمیل‌شده به مسأله فرمول‌بندی شده و احتمال مشاهده‌پذیری هر یک از خطوط ارائه شد. سپس، با استفاده از شبیه‌سازی مونت‌کارلو، ریسک احتمال مشاهده‌پذیری هر آرایش از واحدهای فازوری تعیین شد. با اعمال مدل پیشنهادی به چندین شبکهٔ آزمون *IEEE*، کارایی رویکرد پیشنهادی در قالب چندین سناریو بررسی شد. مطابق نتایج ارائه‌شده، راهکار پیشنهادی ملزومات فنی مکان‌یابی واحدهای فازوری را رعایت نموده و قابل پیاده‌سازی در شبکه‌های واقعی می‌باشد.

مراجع

[1] A. G. Phadke, "Synchronized phasor measurements in power systems," *IEEE Computer Applications in Power*, vol. 6, no. 2, pp. 10-15, April 1993.
[2] F. Aminifar, M. Fotuhi-Firuzabad, M. Shahidehpour, A. Khodaei, "Observability enhancement by optimal PMU placement considering random power system outages," *Energy Syst.*, no. 2, pp. 45–65, 2011.
[3] T. L. Baldwin, L.Mili,M. B. Boisen, R. Adapa, "Power system observability with minimal phasor measurement placement," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 8, no. 2, pp. 707–715, May 1993.
[4] F. Aminifar, C.Lucas, A. Khodaei, M. Fotuhi-Firuzabad, "Optimal placement of phasor measurement units using immunity genetic algorithm," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 24, no. 3, pp. 1014–1020, Jul. 2009.
[5] M. Hajian, A. M. Ranjbar, T. Amraee, B. Mozafari, "Optimal placement of PMUs to maintain network observability using a modified BPSO algorithm," *Int. J. Elect. Power Energy Syst.*, vol. 33, no. 1, pp. 28–34, 2011.
[6] 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, Aug. 2008
[7] S. Chakrabarti, E. Kyriakides, D. G. Eliades, "Placement of synchronized measurements for

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1392.7.1.4.3]

[16] K.Lien, C. Liu, "Transmission network fault location observability with minimal PMU placement," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 21, no. 3, Jul. 2006.

[17] B. Milosevic, M. Begovic, "Nondominated sorting genetic algorithm for optimal phasor measurement placement," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 18, no. 1, pp. 69–75, Feb. 2003.\

[18] K. Jamuna, K.S. Swarup, "Multi-objective biogeography based optimization for optimal PMU placement," *Applied Soft Computing*, vol. 12, no. 5, pp. 1503–1510, 2012.

[19] C. Peng, H. Sun, J. Guoa, "Multi-objective optimal PMU placement using a non-dominated sorting differential evolution algorithm," *Int. J. Elect. Power Energy Syst.*, vol. 32, no. 8, pp. 886–892, Oct. 2010.

[20] A. Ketabi, S. M. Nosratabadi, M. R. Sheibani, "Optimal PMU placement with uncertainty using pareto method," *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2012, pp. 1-14, 2012.

[21] F. Aminifar, M. Fotuhi-Firuzabad, A. Safdarian, and M. Shahidehpour, "Observability of Hybrid AC/DC Power Systems with Variable-Cost PMUs," *IEEE Trans. on Power Del.*, vol. 29, no.1 , pp. 345-352, 2014.

[22] F. Aminifar, M. Fotuhi-Firuzabad, and A. Safdarian, "Optimal PMU Placement based on Probabilistic Cost/Benefit Analysis," *IEEE Trans. on Power Syst.*, vol. 28, no. 1, pp. 566-567, 2013.

[23] H. Falaghi, M. Ramezani, C. Singh, M-R. Haghifam, "Probabilistic assessment of TTC in power systems including wind power generation," *IEEE Systems Journal*, vol. 6, no. 1, pp. 181–190, 2012.

[24] A. Konak, D. W. Coit, A.E. Smith, "Multi-objective optimization using genetic algorithms: A tutorial," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 91, pp. 992–1007, 2006.

[25] M-R. Haghifam, H. Falaghi, O.P. Malik, "Risk-based distributed generation placement," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 2, no. 2, pp. 252–260, 2008.

power system observability," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 24, no. 1, pp. 12–19, Jan. 2009

[8] J. B. Gou, "Generalized integer linear programming formulation for optimal PMU placement," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 23, no. 3, pp. 1099–1104, Aug. 2008.

[9] 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.

[10] M. Esmaili, K. Gharani, and H. A. Shayanfar, "Redundant observability PMU placement in the presence of flow measurements considering contingencies," *IEEE Trans. Power Syst.*, pp. 1-9, Early access, 2013.

[11] S. Azizi, G. B. Gharehpetian, A. S. Dobakhshari, "Optimal integration of phasor measurement units in power systems considering conventional measurements," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 4, no. 2, pp. 1113-1121,Jun. 2013.

[12] S.M. Mazhari, H. Monsef, H. Lesani, A. Fereidunian, "A multi-objective PMU placement method considering measurement redundancy and observability value under contingencies," *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 28, no. 3, pp. 2136-2146, 2013.

[13] F. Aminifar, M. Fotuhi-Firuzabad, M. Shahidehpour, A. Khodaei, "Probabilistic multistage PMU placement in electric power systems," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 26, no. 2, pp. 841–849, Jan. 2011.

[14] F. Aminifar, S. Bagheri-Shouraki, M. Fotuhi-Firuzabad, M. Shahidehpour "Reliability modeling of PMUs using fuzzy sets," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 25, no. 4, pp. 2384–2390, Jan. 2010.

[15] R. F. Nuqui and A. G. Phadke, "Phasor measurement unit placement techniques for complete and incomplete observability," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 20, no. 4, pp. 2381–2388, Oct. 2005.

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.20088345.1392.7.1.4.3]