Iranian Electric Industry Journal
Quality & Productivity
P.P 85-96

Vol. 10 / No. 3/ Autumn 2021
ISSN 2322-2344
eISSN 2717-1639

Multi-Level Multi-Microgrid Expansion Planning to Enhance Resilience against Seismic Risks Arising from Earthquake

http://dorl.net/dor/20.1001.1.23222344.1400.10.3.6.5

Reza Artis[1], Mojtaba Shivaie[2,*], Mohsen Assili[3]

[1]*Department of Electrical Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran*
[1]*r.artis1995@yahoo.com*

[2]*Department of Electrical Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran*
[*]*Corresponding author:* [2]*shivaie@shahroodut.ac.ir*

[3]*Department of Electrical Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran*
[3]*assili.m@gmail.com*

Abstract

In today's industrial world, it is indispensable to strengthen the power distribution network infrastructure against unexpected power losses and financial damages caused by earthquakes. This paper presents a new tri-level framework for multi-microgrid expansion planning (MMEP) against seismic risks stemming from the earthquake in which the lower level describes short-term corrective actions as the distribution network operator (DNO)'s reaction after the seismic risks to apply feeder reconfiguration and generation resource redispatch. The intermediate level meticulously models the destructive effects of seismic risks on the power distribution network components, such as substations, feeders, and distributed energy resources (DERs) through a well-defined seismic scenario generation method (SSGM). In the SSGM, with a new point of view, maximum horizontal ground acceleration is modeled using a reduction procedure in terms of effective seismic parameters, including soil type, seismic magnitude, occurrence depth, and surface distance. Additionally, and more importantly, the probability of complete destruction of the power distribution network components is estimated by predetermined fragility curves. Relying on maximum horizontal ground acceleration and probability of complete destruction, multiple seismic scenarios are generated by maximizing the technical-economic damage subject to structural constraints. Then, the worst-case seismic scenario is selected. In the third level, however, the resilient optimal microgrid expansion plans, as the long-term preventive actions after the seismic risks, are identified. The MMEP objectives, modeled through the third level, are the minimization of the investment and operation costs and maximization of participation profits while satisfying long- and short-term constraints over the planning horizon. A potent melody search algorithm (MSA) is widely employed to solve the proposed large-scale mixed-integer linear tri-level framework. The proposed planning framework is implemented on a standard 9-bus 33-kV test system to demonstrate the feasibility and effectiveness of the newly developed framework. The simulation results corroborate the effective performance of the proposed planning framework in improving the resilience of power distribution networks against seismic risks.

Keywords: Fragility curves, long-term preventive actions, melody search algorithm (MSA), multi-microgrid expansion planning (MMEP), short-term corrective actions.

Received: 2021 March 17
Accepted: 2021 June 20

Iranian Electric Industry Journal
Quality & Productivity
ص.ص ۹۶-۸۵

Vol. 10 / No. 3/ Autumn 2021
ISSN 2322-2344
eISSN 2717-1639

برنامه‌ریزی چندسطحی توسعه ریزشبکه‌های چندگانه با هدف بهبود تاب‌آوری در مقابل ریسک‌های لرزه‌ای ناشی از زلزله

نوع مطالعه: پژوهشی

http://dorl.net/dor/20.1001.1.23222344.1400.10.3.6.5

رضا آرطیس[۱]، کارشناسی‌ارشد، مجتبی شیوایی[۲]، استادیار، محسن اصیلی[۳]، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی شاهرود- شاهرود- ایران.
r.artis1995@yahoo.com
۲- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی شاهرود- شاهرود- ایران.
shivaie@shahroodut.ac.ir
۳- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی شاهرود- شاهرود- ایران.
assili.m@gmail.com

چکیده: در این مقاله، یک چارچوب سه‌سطحی جدید برای برنامه‌ریزی توسعه ریزشبکه‌های چندگانه در مقابل ریسک‌های لرزه‌ای ناشی از زمین‌لرزه ارائه می‌شود. در چارچوب سه‌سطحی پیشنهادی، مسئله سطح پایین با بیشینه‌سازی سود مشارکت ریزشبکه‌ها و کمینه‌سازی حذف بار اقدامات اصلاحی کوتاه‌مدت شامل بازآرایی و توزیع بهینه منابع تولیدی را تعیین می‌نماید. در مسئله سطح میانی، ماهیت غیرقابل‌پیش‌بینی وقوع زمین‌لرزه و تأثیرات آن بر روی تجهیزات شبکه توزیع به‌وسیله یک روش جدید تولید سناریو مبتنی بر مدل دقیق کاهندگی و منحنی‌های شکنندگی مدل‌سازی می‌شود. در مسئله سطح بالایی، طرح‌های توسعه ریزشبکه‌ها به‌عنوان اقدامات پیشگیرانه بلندمدت با هدف کمینه‌سازی هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری منابع تولیدی و بیشینه‌سازی سود مشارکت تعیین می‌گردند. به‌منظور حل چارچوب برنامه‌ریزی پیشنهادی که یک مسئله بهینه‌سازی چندسطحی، غیرمحدب، خطی و آمیخته با اعداد صحیح است، از الگوریتم جستجوی ملودی استفاده می‌شود. اثربخشی چارچوب پیشنهادی توسط چندین سناریو بر روی یک شبکه توزیع استاندارد ۹- باس ۳۳ کیلوولت تست شده است. نتایج شبیه‌سازی بیانگر سودمندی چارچوب برنامه‌ریزی سه‌سطحی پیشنهادی است.

واژه‌های کلیدی: اقدامات اصلاحی کوتاه‌مدت، اقدامات پیشگیرانه بلندمدت، الگوریتم جستجوی ملودی، برنامه‌ریزی توسعه ریزشبکه‌های چندگانه، منحنی شکنندگی.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۹/۱۲/۲۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۳/۳۰

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر مجتبی شیوایی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران- شاهرود- دانشگاه صنعتی شاهرود- پردیس مهندسی و فناوری‌های نوین- دانشکده مهندسی برق.

۱- مقدمه

به‌طور سنتی، شبکه‌های توزیع بر مبنای شاخص‌های قابلیت‌اطمینان برنامه‌ریزی و طراحی می‌شوند. لذا، این شبکه‌ها آمادگی لازم جهت مقابله با وقایع با احتمال وقوع بالا و تأثیر پایین را دارا هستند، ولی، کارآیی مناسب به‌منظور کاهش شدت خسارات ناشی از وقایع مخرب و نادر[1] را ندارند (Bajwa et al., 2019). از این رو، در طی سالیان اخیر مطالعات متعددی با هدف طراحی تاب‌آور شبکه‌های توزیع انجام گرفته است. به‌طورکلی، مطالعات صورت‌گرفته در جهت ارتقاء تاب‌آوری شبکه‌های توزیع را می‌توان در دو دسته مطالعات حوزه بهره‌برداری و حوزه برنامه‌ریزی طبقه‌بندی نمود (Bhusal et al., 2020). به‌منظور ارتقاء کوتاه‌مدت سطح تاب‌آوری شبکه های توزیع، نویسندگان در مرجع (Hussain et al., 2018) با بهره‌گیری از سیستم‌های ذخیره ساز انرژی راهکاری ایمن به‌منظور نگهداشت بار های حساس به هنگام تغییر وضعیت ریزشبکه[2] از حالت متصل به شبکه به حالت جزیره‌ای پیشنهاد داده‌اند. در مرجع (Mousavizadeh et al., 2018) جهت مدیریت مؤثر شبکه در شرایط بحرانی و جلوگیری از خاموشی سراسری در ریزشبکه‌ها، علاوه بر توزیع بهینه منابع انرژی پراکنده از قابلیت های کنترل و برنامه‌های پاسخگویی بار بهره گرفته شده است. در مرجع (Ding et al., 2017) به‌منظور ارتقاء تاب‌آوری شبکه پس از رخدادهای طبیعی مخرب، بازآرایی[3] شبکه به همراه تشکیل ریز شبکه در نظر گرفته شده است. بعلاوه، رویکردهای حوزه برنامه‌ریزی به‌منظور ارتقاء بلندمدت سطح تاب‌آوری سعی در مقاوم‌سازی فیزیکی اجزای شبکه توزیع همانند فیدرها دارند (Lin & Bie, 2018; Ghaffarpour et al., 2020) اما در برخی مطالعات علاوه بر تقویت فیزیکی فیدرها، برخی تکنیک‌های مقاوم‌سازی همانند مدیریت پوشش گیاهی و ارتقاء کلاس پایه‌های برق نیز پیشنهاد شده است (Tari et al., 2021). در مرجع (Tari et al., 2021) از مدل‌های شکنندگی هادی‌ها و تیر های برق به‌منظور مدل‌سازی اثر طوفان بر فیدرهای یک شبکه توزیع واقعی استفاده شده است. علاوه بر تکنیک‌های مقاوم‌سازی، تخصیص و جایابی منابع تولید پراکنده[4] در شبکه توزیع نیز سودبخش است، به‌گونه‌ای که برخی مطالعات علاوه بر مقاوم‌سازی فیزیکی خطوط شبکه توزیع، تخصیص و جایابی مناسب این منابع را نیز به‌منظور ارتقاء سطح تاب‌آوری شبکه توزیع مدنظر قرار داده‌اند (Salimi et al., 2020; Najafi et al., 2018; Yuan et al., 2016). در مرجع (Xie et al., 2019)، یک رویکرد تعیین اندازه بهینه سیستم ذخیره‌ساز انرژی در ریز شبکه‌های چندگانه با درنظر گرفتن ملاحظات اقتصادی، قابلیت‌اطمینان و تاب‌آوری پیشنهاد شده است. نویسندگان در مرجع (Nazemi et al., 2019) با توسعه یک مدل تحلیلی و با بهره‌گیری از منحنی‌های شکنندگی[5]، تأثیرات زمین‌لرزه بر تجهیزات شبکه توزیع را شناسایی و مورد ارزیابی قرار می‌دهند. از طرفی در این مطالعه، یک مسئله بهینه سازی برنامه‌ریزی خطی به‌منظور مقاوم‌سازی شبکه توزیع و تعیین ظرفیت و مکان سیستم ذخیره‌ساز انرژی[6]، پیشنهاد شده است. در مرجع (Najafi et al., 2020) نویسندگان با بهره‌گیری از یک چارچوب برنامه‌ریزی تصادفی، عناصر تحت تأثیر زلزله در شبکه‌های توزیع انرژی و آب را شناسایی و راهبردهای کاندید مناسب همانند مقاوم‌سازی خطوط و پست توزیع و تقویت لوله‌های آب با مواد بهتر را پیاده سازی می‌کنند. در مرجع (Shahbazi et al., 2021) با استفاده از یک چارچوب برنامه‌ریزی تصادفی و با بهره‌گیری از راهبرد های منابع تولید پراکنده پشتیبان و مقاوم‌سازی فیدرها، تاب‌آوری شبکه توزیع در برابر حوادث آب و هوایی شدید مانند زلزله و سیل، ارتقاء پیدا کرده است.

بدین ترتیب، این مقاله بر یک چارچوب سه سطحی جدید به‌منظور ارتقاء سطح تاب‌آوری شبکه توزیع مبتنی بر ریزشبکه‌های چندگانه با در نظر گرفتن مخاطرات لرزه‌ای، متمرکز شده است. در رویکرد پیشنهادی، مسئله سطح پایین بیانگر اقدامات کوتاه مدت اصلاحی می‌باشد. این اقدامات در قالب یک مدل مبتنی بر پخش توان بهینه به‌منظور بیشینه‌سازی تابع سود مشارکت ریز شبکه‌ها و کمینه سازی تابع حذف بار با بهره‌گیری از راهبردهایی شامل بازآرایی و توزیع بهینه منابع انرژی پراکنده پیاده‌سازی می‌گردند. در مسئله سطح میانی، با استفاده از یک روش جدید تولید سناریو، ماهیت غیرقابل‌پیش‌بینی زمین‌لرزه و اثرات مخرب آن بر تجهیزات شبکه توزیع شامل پست‌ها، فیدرها و منابع انرژی پراکنده تجزیه و تحلیل می شوند. در روش پیشنهادی به‌منظور مدل‌سازی چگونگی استهلاک انرژی آزادشده ناشی از زمین‌لرزه، از یک رابطه کاهندگی مناسب که مؤثر از پارامتر های لرزه‌ای شامل نوع خاک، بزرگای زمین‌لرزه[7]، عمق وقوع[8] و فاصله سطحی[9] است، استفاده می گردد. سپس، مجموعه‌ای از سناریوهای آسیب مطابق با شاخص محاسباتی حداکثر شتاب افقی زمین[10] و مفهوم منحنی‌های شکنندگی با هدف بیشینه‌سازی خسارت‌های فنی-اقتصادی مقید به محدودیت‌های ساختاری زمین، تولید می‌گردند. در مسئله سطح بالایی، برنامه‌ریزی چندمرحله‌ای توسعه ریز شبکه‌های چندگانه با هدف بهبود بلندمدت تاب‌آوری شبکه توزیع انجام می‌پذیرد. مسئله سطح بالایی به دو لایه محلی و سراسری تقسیم می شود. در لایه محلی، هر یک از ریزشبکه‌ها طرح های توسعه خود را با هدف بیشینه‌سازی سود مشارکت و کمینه‌سازی هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری منابع انرژی پراکنده تعیین می‌کنند. در لایه سراسری نیز طرح‌های توسعه تمامی ریز شبکه‌ها توسط بهره‌بردار شبکه توزیع[11] جمع‌آوری می‌شود و از طریق محدودیت حاشیه رزرو[12] مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. به‌منظور حل چارچوب برنامه‌ریزی پیشنهادی، از الگوریتم جستجوی مدولی استفاده شده است. بطور خلاصه، نوآوری‌های این مقاله در زمینه برنامه‌ریزی ریز شبکه‌های چندگانه با هدف بهبود تاب‌آوری به شرح ذیل قابل بیان است:

(۱). ارائه یک چارچوب سه‌سطحی جدید به‌منظور برنامه‌ریزی ریزشبکه‌های چندگانه با در نظر گرفتن مخاطرات لرزه‌ای.

(۲). مدل‌سازی و تجمیع اقدامات اصلاحی کوتاه مدت شامل بازآرایی و توزیع بهینه منابع انرژی پراکنده و اقدامات

پیشگیرانه بلندمدت شامل طرح‌های توسعه ریز شبکه‌های چندگانه به‌منظور ارتقاء موثر سطح تاب‌آوری.

(۳). مدل‌سازی و ارزیابی سطح آسیب‌پذیری بخش‌های مختلف شبکه توزیع شامل پست‌ها، فیدرها و منابع انرژی پراکنده در برابر مخاطرات لرزه‌ای با بهره‌گیری از یک روش جدید تولید سناریو و با تکیه بر منحنی‌های شکنندگی.

(۴). به‌کارگیری یک مدل مؤثر کاهندگی با استفاده از پارامترهای لرزه‌ای نوع خاک، بزرگای زمین‌لرزه، عمق وقوع و فاصله سطحی.

این مقاله در ۶ بخش سازمان‌دهی شده است. در بخش۲، مدل سازی ریاضی مسئله طراحی تاب‌آور پیشنهادی، در بخش۳، روش حل، در بخش ۴ نتایج شبیه‌سازی و در بخش ۵، صحت سنجی نتایج تبیین شده است. در نهایت، بخش ۶ به نتیجه‌گیری اختصاص یافته است.

۲- مدل‌سازی ریاضی چارچوب برنامه‌ریزی سه‌سطحی

در این مقاله به‌منظور ارتقاء تاب‌آوری شبکه توزیع در برابر مخاطرات لرزه‌ای، یک چارچوب برنامه‌ریزی سه سطحی متشکل از سه مسئله بهینه سازی (۱) مسئله راهبرد های اصلاحی کوتاه مدت در برابر آسیب‌های لرزه‌ای (۲) مسئله شکست‌های فاجعه‌بار ناشی از آسیب‌های لرزه‌ای و (۳) مسئله برنامه‌ریزی توسعه ریز شبکه‌های پیشنهاد شده است. شکل (۱)، یک نمای مفهومی از ارتباط مسائل بهینه سازی را نشان می‌دهد.

۲-۱- مسئله سطح پایین

در مسئله سطح پایین، بهره‌بردار شبکه توزیع اقدامات اصلاحی کوتاه‌مدت خود را در برابر آسیب‌های ناشی از زمین‌لرزه ارائه می‌کند. این اقدامات که شامل بازآرایی فیدرها و توزیع بهینه منابع انرژی پراکنده است، با هدف بیشینه سازی سود مشارکت ریز شبکه‌ها و کمینه‌سازی حذف بار (Shivaie et al., 2020 (1); Shivaie et al., 2020 (2)) از دیدگاه بهره‌بردار شبکه توزیع پیاده‌سازی می‌شود.

$$\text{Max}\left\{\begin{array}{l}\left[\sum_{m=1}^{\Omega_M} P_{t,l,m}^{S,\omega:g(a,h,r)}\pi_m - \sum_{m=1}^{\Omega_M} P_{t,l,m}^{B,\omega:g(a,h,r)}\lambda_m\right]\\ -\sum_{b=1}^{\Omega_B}\sum_{c=1}^{\Omega_C}\chi_{t,l,b,c}^{\omega:g(a,h,r)}\cdot\zeta_{t,l,b,c}^{\omega:g(a,h,r)}\left(\delta_{t,l,b,c}^{\omega:g(a,h,r)}\right)\end{array}\right\} \quad (۱)$$

subject to:

$$\sum_{m=1}^{\Omega_M^b}\left[\begin{array}{l}\sum_{w=1}^{\Omega_W} P_{t,l,m,w}^{wd,\omega:g(a,h,r)} + \sum_{v=1}^{\Omega_V} P_{t,l,m,v}^{pv,\omega:g(a,h,r)}\\ +\sum_{st=1}^{\Omega_{St}} P_{t,l,m,st}^{dch,\omega:g(a,h,r)}\end{array}\right] = P_{t,l,b}^{L} - P_{t,l,b}^{Sub} \quad (۲)$$

$$\sum_{m=1}^{\Omega_M^b}\left[\sum_{st=1}^{\Omega_{St}} P_{t,l,m,st}^{ch,\omega:g(a,h,r)}\right] - \chi_{t,l,b}^{\omega:g(a,h,r)} + f_{t,l,e}^{\omega:g(a,h,r)}$$

$$0 \le f_{t,l,e}^{\omega:g(a,h,r)} \le \overline{f}_e \quad (۳)$$

$$0 \le \chi_{t,l,b,c}^{\omega:g(a,h,r)} \le P_{t,l,b,c}^{L} \quad (۴)$$

$$0 \le P_{t,l,m,v}^{wd,\omega:g(a,h,r)} \le \overline{P}^{wd} \quad (۵)$$

$$0 \le P_{t,l,m,v}^{pv,\omega:g(a,h,r)} \le \overline{P}^{pv} \quad (۶)$$

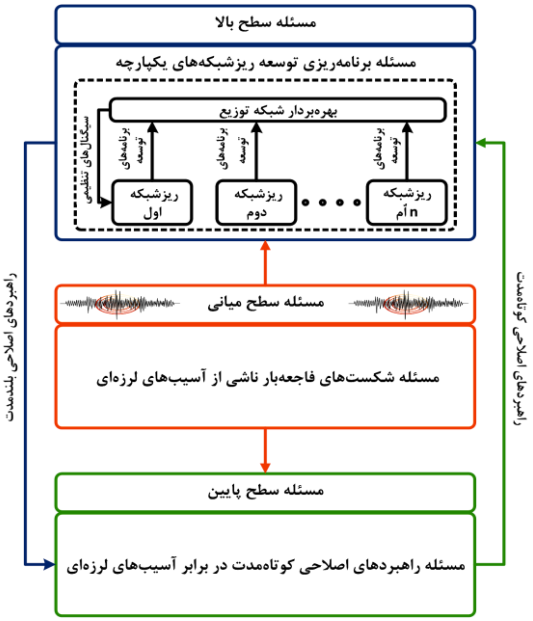
$$0 \le P_{t,l,b}^{Sub,\omega:g(a,h,r)} \le \overline{P}_{t,l,b}^{Sub} \quad (۷)$$

$$0 \le P_{t,l,m,st}^{ch,\omega:g(a,h,r)}, P_{t,l,m,st}^{dch,\omega:g(a,h,r)} \le \overline{P}^{ch-dch} \quad (۸)$$

$$SOC_{t,l,m,st}^{\omega:g(a,h,r)} = SOC_{t,l-1,m,st}^{\omega:g(a,h,r)} - \frac{1}{\overline{P}^{st}}\cdot\left(\begin{array}{l}\frac{1}{\eta^{dch,m}}\cdot P_{t,l,m,st}^{dch,\omega:g(a,h,r)}\\ -P_{t,l,m,st}^{ch,\omega:g(a,h,r)}\cdot\eta^{ch,m}\end{array}\right) \quad (۹)$$

$$\underline{SOC}_{st} \le SOC_{t,l,m,st}^{\omega:g(a,h,r)} \le \overline{SOC}_{st} \quad (۱۰)$$

در رابطه (۱)، جمله اول معرف هزینه بهره‌برداری یک شبکه توزیع با Ω_M ریزشبکه است که شامل درآمد ناشی از فروش توان به شبکه و هزینه خرید از آن است. جمله دوم نیز بیانگر هزینه قطع بار انتظاری در شبکه توزیع است. رابطه (۲) تضمین‌کننده تعادل توان در شبکه توزیع است. محدودیت فلوی فیدرها در رابطه (۳) بیان شده است. رابطه (۴)، بیانگر حداکثر حذف بار مجاز برای هر یک از بخش‌های بار به ازای مقیاس‌های متفاوت حداکثر شتاب زمین‌لرزه است. رابطه (۵) و (۶) محدودیت‌های مربوط به تولید توان واحدهای توربین بادی و فتوولتائیک را نشان می‌دهد. از طرفی، تبادل توان بین شبکه بالادست و شبکه توزیع توسط ترانسفورماتور پست بالادست (پست فوق‌توزیع) محدود می‌شود که این محدودیت در رابطه (۷) بیان شده است. میزان شارژ و دشارژ سیستم ذخیره‌ساز انرژی مطابق با رابطه (۸) مقید به محدوده‌های حداقل و حداکثری است. رابطه (۹) بیانگر حالت شارژ[۱۳] سیستم ذخیره‌ساز می‌باشد که وابسته به SOC ذخیره ساز در زمان قبل و میزان شارژ/دشارژ در زمان فعلی است.



شکل (۱): نمودار مفهومی چارچوب برنامه‌ریزی سه‌سطحی

مطابق با رابطه (۱۰)، مقدار SOC مقید بر محدوده حداقلی و حداکثری است (Bui et al., 2016). محدودیت اصلی در روند بازآرایی شبکه توزیع، حفظ ساختار شعاعی شبکه پس از این اقدام است که در اینجا از روش پیشنهادی (Najafi et al., 2019; Vo Ngoc & Tran Anh, 2020) برای این هدف استفاده شده است.

۲-۲- مسئله سطح میانی

در مسئله سطح میانی، رفتار غیرقابل پیش‌بینی زمین‌لرزه مدل سازی شده است. در این سطح، آسیب‌های ناشی از وقوع زمین‌لرزه با تعریف یک مسئله بیشینه سازی آسیب‌های فنی- اقتصادی برحسب مقیاس‌های مختلف PGA تعیین می شوند (Shivaie et al., 2020 (1); Shivaie et al., 2020 (2)).

$$\text{Max} \left\{ \sum_{b=1}^{\Omega_B} \sum_{c=1}^{\Omega_C} \chi_{t,l,b,c}^{\omega:g(a,h,r)} \cdot \zeta_{t,l,b,c}^{\omega:g(a,h,r)} (\delta_{t,l,b,c}^{\omega:g(a,h,r)}).wf_{t,l,b,c}^{\omega:g(a,h,r)} \right\} \quad (۱۱)$$

subject to:

$$\sum_{s=1}^{\Omega_S} \psi_{t,l,s}^{\omega:g(a,h,r)} \le \bar{\psi}_S^{g(a,h,r)} \quad (۱۲)$$

$$\sum_{e=1}^{\Omega_E} \psi_{t,l,e}^{\omega:g(a,h,r)} \le \bar{\psi}_E^{g(a,h,r)} \quad (۱۳)$$

$$\sum_{de=1}^{\Omega_{De}} \psi_{t,l,de}^{\omega:g(a,h,r)} \le \bar{\psi}_{De}^{g(a,h,r)} \quad (۱۴)$$

رابطه (۱۱) تابع هدف مسئله سطح میانی است که به صورت بیشینه‌سازی هزینه حذف بار ناشی از سناریوهای رخداد تعریف می شود. پارامتر wf در تابع هدف بیانگر مقدار عددی منحنی شکنندگی به ازای یک PGA مشخص است. روابط (۱۲) تا (۱۴)، به ترتیب بیانگر تعداد پست‌ها، فیدرها و منابع انرژی پراکنده‌ای است که می‌توانند تحت سناریوی رخداد ω آسیب ببینند (Shivaie et al., 2020 (1)). به‌منظور مدل‌سازی چگونگی استهلاک انرژی آزاد شده ناشی از زمین‌لرزه و شناسایی رفتار آن، از رابطه کاهندگی ارائه شده در (Bagheria et al., 2011) استفاده شده است.

۲-۳- مسئله سطح بالا

در مسئله سطح بالا، برنامه‌ریزی چندمرحله‌ای توسعه ریزشبکه‌های چندگانه با هدف بهبود تاب‌آوری بیان شده است. در این سطح هر یک از ریزشبکه‌ها اقدامات اصلاحی بلندمدت خود را که شامل جایابی بهینه منابع انرژی پراکنده است، پیشنهاد می‌دهند. مسئله سطح بالا به دو لایه محلی و سراسری تقسیم می‌شود(Shivaie et al., 2020 (1); Shivaie & Ameli, 2016). در لایه محلی، هر یک از ریزشبکه‌ها هزینه سرمایه‌گذاری و هزینه بهره‌برداری منابع انرژی پراکنده و همچنین سود ناشی از خرید/ فروش توان را مقید به محدودیت‌های فنی- اقتصادی بهینه‌سازی می‌کند. در لایه سراسری نیز طرح‌های توسعه ریزشبکه‌ها توسط بهره‌بردار شبکه توزیع جمع‌آوری می‌شوند و از طریق محدودیت‌های حاشیه رزرو مورد ارزیابی قرار می‌گیرند.

$$\text{Max} \ (1+\tau)^{-t}.\left[PR_{t,m} - (1+\tau)^{-t}.ICM_{t,m} \right] \quad (۱۵)$$

where:

$$PR_{t,m} = \sum_{l=1}^{\Omega_L} Dl_l \cdot \left[(C_{t,l,m}^{S} - C_{t,l,m}^{B}) - OCM_{t,l,m} \right] \quad (۱۶)$$

$$OCM_{t,l,m} = C_{t,l,Wd}^{op} \cdot \sum_{w=1}^{\Omega_W} P_{t,l,m,w}^{wd} + C_{t,l,Pv}^{op} \cdot \sum_{v=1}^{\Omega_V} P_{t,l,m,v}^{pv} + C_{t,l,St}^{op} \cdot \sum_{st=1}^{\Omega_{St}} P_{t,l,m,st}^{ch} + P_{t,l,m,st}^{dch} \quad (۱۷)$$

$$ICM_{t,m} = \alpha_{Wd}^{lf}.C_{t,Wd}^{inv} \cdot \sum_{iw=1}^{\Omega_{IW}} P_{t,m,iw}^{icap,m} + P_{t,m,iw}^{res,m} + \alpha_{Pv}^{lf}.C_{t,Pv}^{inv} \cdot \sum_{iv=1}^{\Omega_{IV}} P_{t,m,iv}^{icap,m} + P_{t,m,iv}^{res,m} + \alpha_{St}^{lf}.C_{t,St}^{inv} \cdot \sum_{ist=1}^{\Omega_{ISt}} P_{t,m,ist}^{icap,m} \quad (۱۸)$$

$$\alpha^{lf} = \tau.(1-(1+\tau)^{-\gamma})^{-1} \quad (۱۹)$$

subject to:

$$\sum_{t=1}^{\Omega_T} \sum_{iw=1}^{\Omega_{IW}} P_{t,m,iw}^{icap} + P_{t,m,iw}^{res} \le P_{Wd,m}^{ins} \quad (۲۰)$$

$$\sum_{t=1}^{\Omega_T} \sum_{iv=1}^{\Omega_{IV}} P_{t,m,iv}^{icap} + P_{t,m,iv}^{res} \le P_{Pv,m}^{ins} \quad (۲۱)$$

$$\sum_{t=1}^{\Omega_T} \sum_{ist=1}^{\Omega_{ISt}} P_{t,m,ist}^{icap} \le P_{St,m}^{ins} \quad (۲۲)$$

$$\left(\begin{array}{l} C_{t,Wd}^{inv} \cdot \sum_{iw=1}^{\Omega_{IW}} P_{t,m,iw}^{icap,m} + P_{t,m,iw}^{res,m} + \\ C_{t,Pv}^{inv} \cdot \sum_{iv=1}^{\Omega_{IV}} P_{t,m,iv}^{icap,m} + P_{t,m,iv}^{res,m} + \\ C_{t,St}^{inv} \cdot \sum_{ist=1}^{\Omega_{ISt}} P_{t,m,ist}^{icap,m} \end{array} \right) \le CBM_{t,m} \quad (۲۳)$$

در رابطه (۱۵)، جملات اول و دوم به ترتیب بیانگر ارزش خالص فعلی سود موردانتظار مربوط به منابع موجود و تازه نصب شده متعلق به ریزشبکه‌ی m و ارزش خالص فعلی هزینه سرمایه‌گذاری منابع تازه نصب‌شده متعلق به ریزشبکه‌ی m هستند. رابطه (۱۶) ارزش خالص فعلی سود موردانتظار هر یک از ریز شبکه‌ها را نشان می‌دهد. هزینه بهره‌برداری منابع موجود و تازه نصب‌شده متعلق به هر ریزشبکه نیز در

رابطه (۱۷) بیان شده است (Farzin et al., 2016). ارزش خالص فعلی هزینه سرمایه‌گذاری هر یک از ریزشبکه‌ها مطابق با رابطه (۱۸) است که مطابق با رابطه (۱۹) و براساس طول عمر تجهیزات محاسبه می‌گردد (Shahidehpour et al., 2020). روابط (۲۰) تا (۲۲) به ترتیب بیانگر محدودیت ظرفیت قابل‌نصب واحدهای توربین بادی، فتوولتائیک و واحدهای ذخیره‌ساز در هر یک از ریز شبکه‌ها هستند. رابطه (۲۳) بیانگر محدودیت هزینه سرمایه‌گذاری هر یک از ریزشبکه‌ها است که محدود به بودجه سالانه سرمایه‌گذاری است. پس از تعیین برنامه‌های توسعه ریزشبکه‌های یکپارچه در لایه محلی، بهره‌بردار شبکه توزیع در لایه سراسری طرح‌های توسعه را جمع‌آوری می‌کند و میزان انحراف حاشیه رزرو را در هر دوره از افق برنامه‌ریزی بررسی می‌نماید (Shivaie et al., 2020 (1); Shivaie & Ameli, 2016).

۳- روش حل چارچوب برنامه‌ریزی سه‌سطحی

ساختار مسئله طراحی تاب‌آور ریزشبکه‌های چندگانه پیشنهادی یک مسئله بهینه‌سازی سه‌سطحی، غیرمحدب، خطی و آمیخته با اعداد صحیح است. لذا، حل چنین مسئله بهینه‌سازی نیازمند یک الگوریتم بهینه‌سازی قدرتمند است. الگوریتم‌های بهینه‌سازی گذشته (به‌طور نمونه الگوریتم جستجوی هارمونی[۱۴]، الگوریتم ژنتیک و سایر موارد) با توجه به ساختاری که دارند در برابر مسائل بهینه‌سازی چندسطحی، آمیخته با اعداد صحیح مقیاس-بزرگ کارآیی لازم را ندارند، بنابراین، در این مقاله به‌منظور حل مسئله بهینه‌سازی پیشنهادی، الگوریتم جستجوی ملودی[۱۵] بکار گرفته شده است. MSA یک الگوریتم فرا- ابتکاری جدید است که از پدیده‌های موسیقی الهام گرفته و بر اساس مفاهیم اصلی HSA پایه‌گذاری شده است (Kiani-Moghaddam et al., 2019). شرح مفصل جزئیات معماری MSA و تفاوت‌های آن با ساختار HSA را می‌توان در مرجع (Kiani-Moghaddam et al., 2019) یافت.

با توجه به ماهیت غیرقابل‌پیش‌بینی رفتار زمین‌لرزه و اثرات آن، در این مقاله یک روش جدید تولید سناریو به‌منظور مدل‌سازی عدم‌قطعیت‌های ناشی از رخداد زمین‌لرزه پیشنهاد شده است. در این روش ابتدا مجموعه‌ای از سناریوهای آسیب که شامل تخریب کامل پست‌ها، فیدرها و منابع است، با توجه به مقادیر PGA تولید می‌شود. سپس، با توجه اهداف و محدوده‌های بیان‌شده در مسئله سطح میانی، وزن هر یک از سناریوهای آسیب محاسبه می‌گردد. در ادامه نیز بدترین سناریوی آسیب ممکن با توجه با وزن تمامی سناریوهای تولیدشده انتخاب می‌شود. لازم به ذکر است در روش پیشنهادی به‌منظور محاسبه وزن سناریوهای تولیدی از روابط موجود در مرجع (Shivaie et al., 2020 (1)) بهره گرفته شده است. شکل (۲) روش تولید سناریوی پیشنهادی را نشان می‌دهد. هر یک از سناریوهای تولیدی شامل: (۱) تعداد و مکان تصادفی پست‌های آسیب‌دیده (۲) تعداد و مکان تصادفی فیدرهای آسیب‌دیده (۳) تعداد و مکان تصادفی منابع آسیب‌دیده و (۴) مقدار حذف بار ناشی از آسیب دیدن این تجهیزات است.

در چارچوب چندسطحی پیشنهادی، متغیرهای بهینه تصمیم‌گیری در سطح اول شامل مقادیر شارژ و دشارژ ذخیره‌سازها، حذف بار در هر بخش بار و حالات باز یا بسته بودن کلید فیدرهای شبکه توزیع است. در سطح دوم، مقدار حذف بار در هر بخش بار متغیر تصمیم‌گیری محسوب می‌شود. در سطح سوم نیز متغیرهای تصمیم‌گیری شامل زمان نصب، مکان نصب و ظرفیت نصب منابع است. در مدل پیشنهادی، هر ملودی به سه بخش، همان‌گونه که در شکل (۳) نشان داده است، تقسیم می‌شود. بخش‌های اول، دوم و سوم به ترتیب تعیین‌کننده بهترین متغیر تصمیم‌گیری برای توربین بادی، سلول فتوولتائیک و ذخیره‌ساز است. برای این منظور پس از تهیه کتابخانه‌ای از مکان‌های کاندید، هر یک از هارمونی‌ها مقادیر عدد صحیح را دربر می‌گیرند. این اعداد با توجه به ظرفیت‌های نصب منابع می‌توانند متغیر باشند. به‌عنوان‌مثال، ظرفیت‌های در دسترس به‌منظور نصب توربین‌های بادی، ۱، ۲، ۳ و ۴ مگاوات است. صفر بودن هر هارمونی به‌منزله عدم انتخاب مکان کاندید (باس) جهت نصب توربین بادی است. مقادیر ۱، ۲، ۳ و ۴ در هر بخش نیز بیانگر ظرفیت نصب واحد توربین بادی در مکان موردنظر است. شکل (۴)، فلوچارت پیاده‌سازی مدل چندسطحی پیشنهادی را نشان می‌دهد.

۳-۱- معرفی سیستم مورد مطالعه

مدل طراحی تاب‌آور ریزشبکه‌های چندگانه و روش حل معرفی‌شده، بر روی یک سیستم توزیع ۹- باس ۳۳ کیلوولت اصلاح شده پیاده سازی شده است (شکل (۵) را مشاهده نمایید) (Rastgou et al., 2018; Falaghi et al., 2011). شبکه آزمون دارای یک پست ۴۰ مگاولت‌آمپر، ۹ باس و ۱۳ فیدر است. در شکل (۵)، خطوط خط‌چین بیانگر فیدرهایی است که در حالت عادی خارج از مدار هستند. اطلاعات فیدرهای شبکه آزمون برگرفته از مرجع (Rastgou et al., 2018) است. اطلاعات باس‌های بار و میزان دیمانند مصرفی نیز در مرجع (Falaghi et al., 2011) درج شده است. لازم به ذکر است در این مقاله سه سطح بار در نظر گرفته شده است که اطلاعات این سطوح بار از مرجع (Falaghi et al., 2011) استخراج شده است. علاوه‌براین، هر بار به سه بخش مسکونی، تجاری و صنعتی تقسیم می‌شود که اطلاعات مربوط به تابع خسارت آن ها در جدول (۱) بیان شده است. میزان سهم بار های مسکونی، تجاری و صنعتی در هر باس بار به ترتیب برابر ۶۰٪، ۲۰٪ و ۲۰٪ است (Shivaie et al., 2015). افق برنامه‌ریزی در مدل پیشنهادی ۳ ساله است که به دوره‌های زمانی ۱ ساله تقسیم می‌شود. نرخ بهره در هر سال برابر با ۳٪ است. تمامی باس‌های بار، کاندید نصب منابع انرژی پراکنده هستند. توربین‌های بادی و سلول‌های فتوولتائیک دارای ظرفیت‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ مگاوات به همراه ۱ مگاوات رزرو و ذخیره سازها نیز دارای ظرفیت‌های ۱و ۲ مگاوات‌ساعت می‌باشند. حداکثر ظرفیت قابل‌نصب در هر ریزشبکه برای توربین های بادی و سلول‌های فتوولتائیک ۴

مگاوات به همراه ۱ مگاوات رزرو و برای ذخیره سازها ۲ مگاوات ساعت است. هزینه‌های بهره‌برداری و سرمایه‌گذاری و طول عمر منابع به شرح جدول (۲) است. پارامترهای مرتبط با سیستم ذخیره ساز که از نوع باتری لیتیوم- یونی است نیز در جدول (۳) بیان شده است (Xu et al., 2017). قیمت خرید و فروش توان برای هر ریز شبکه به ترتیب برابر ۰/۱۶ و ۰/۱۲ دلار بر کیلووات‌ساعت (Nikmehr & Ravadanegh, 2015) و میزان بودجه سالانه دردسترس نیز برای هر ریزشبکه ۲/۵ میلیون دلار است. مقادیر مجاز حاشیه رزرو به ترتیب ۱۰٪، ۴۰٪ پیک بار در نظر گرفته شده است (Shivaie et al., 2020 (1)). پارامترهای تنظیمی MSA نیز به شرح جدول (۴) است.

۴- مطالعات عددی و نتایج شبیه‌سازی

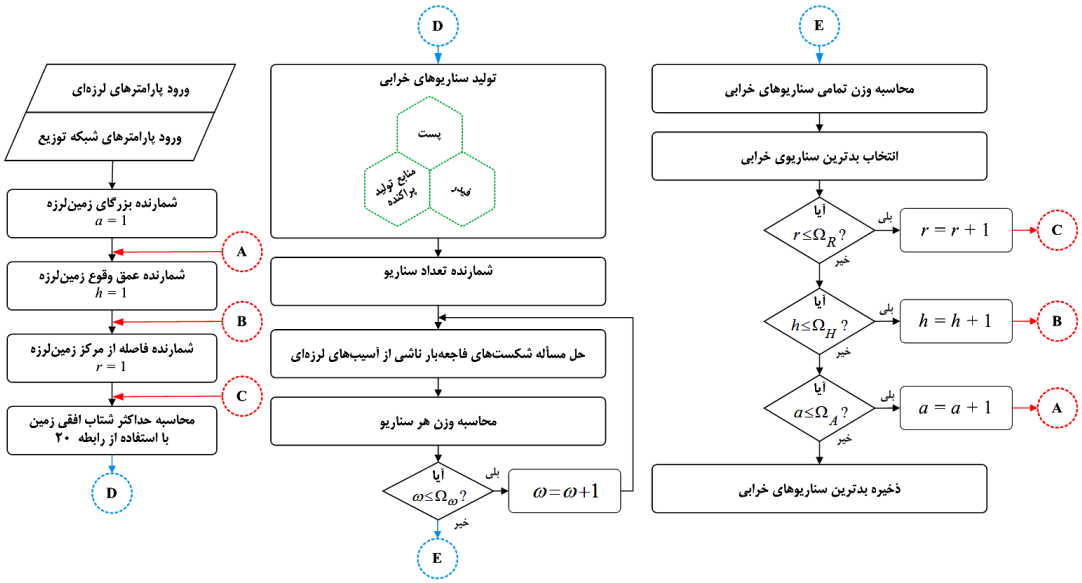
در این بخش نتایج حاصل از پیاده سازی مدل پیشنهادی بر روی سیستم موردمطالعه به تفصیل تبیین می شوند. جدول (۵) نشان‌دهنده‌ی طرح‌های تاب‌آور توسعه ریزشبکه‌ها در افق برنامه‌ریزی است. شکل (۶) نیز ساختار نهایی ریز شبکه‌ها را در پایان افق برنامه‌ریزی نشان می‌دهد. اعداد نشان داده شده در بالای هر یک از واحدها بیانگر ظرفیت واحد نصب‌شده به همراه ظرفیت رزرو است. همان‌طورکه در جدول (۵) نشان داده شده است، ریزشبکه‌ها در سال اول تمایل بالایی به نصب واحدهای فتوولتائیک داشته‌اند. دلیل این امر در وهله اول تأثیر بالای واحدهای فتوولتائیک و توربین بادی بر روی سود مشارکت ریزشبکه‌ها و در وهله دوم، هزینه پایین نصب واحد فتوولتائیک در مقایسه با توربین بادی است. در سال دوم با توجه به اینکه حداکثر میزان قابل‌نصب واحدهای فتوولتائیک نصب شده است، ریزشبکه‌ها تمایل بیشتری جهت نصب منابع توربین بادی به نسبت ذخیره‌سازها دارند که علت این امر تأثیر بالای منابع توربین بادی بر افزایش سود ریزشبکه‌ها است. در سال سوم، با توجه به اینکه منابع متعددی پس از وقوع زمین‌لرزه دچار آسیب شده‌اند، لذا این منابع مجدداً در پایان سال مذکور نصب می شوند. نصب دوباره منابع آسیب‌دیده، محدودیت بودجه و محدودیت میزان قابل‌نصب منابع در سال سوم موجب می‌شوند تا درنهایت ۲ مگاوات توربین بادی و ۴ مگاوات واحد فتوولتائیک فارغ از منابع آسیب‌دیده نصب گردند. جدول (۶)، بیانگر وضعیت هر یک از اجزای شبکه موردمطالعه پس از وقوع زمین‌لرزه در هر سال از افق برنامه‌ریزی می‌باشند. حالت های تخریب نشان داده شده در جدول (۶)، حاصل اجرای مسئله سطح میانی است که بیانگر بدترین سناریوی ممکن آسیب لرزه‌ای است. به‌عنوان نمونه، در سال اول با توجه به وابستگی سیستم موردمطالعه به شبکه بالادست، بدترین حالت ممکن پس از وقوع زمین لرزه تخریب کامل پست فوق‌توزیع است که جدول (۶) مبین این حالت است. در سال‌های دوم و سوم نیز با توجه به رویکرد تولید سناریوی پیشنهادی و ضریب وزنی معرفی‌شده، بدترین سناریوی ممکن در هر سال از افق برنامه‌ریزی در جدول (۶) نشان داده شده است. جزئیات بیشتر از بدترین سناریوهای ممکن در هر سال را می توان در جدول (۷) مشاهده نمود.

جدول (۱): اطلاعات تابع خسارت بخش‌های بار در شبکه مورد مطالعه

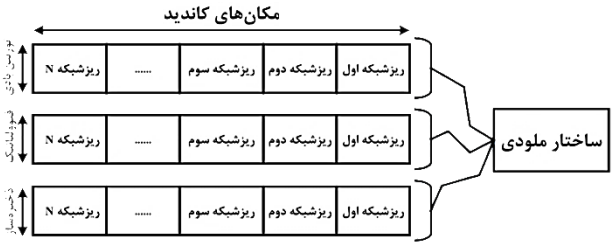
بخش بار	مدت زمان وقفه (دقیقه)				
	۱	۲۰	۶۰	۲۴۰	۴۸۰
	ضریب جریمه (دلار بر کیلووات)				
صنعتی	۱/۶۲۵	۳/۸۶۸	۹/۰۸۵	۲۵/۱۶	۵۵/۸۱
تجاری	۰/۳۸۱	۲/۹۶۹	۸/۵۵۲	۳۱/۳۲	۸۳/۰۱
مسکونی	۰/۰۰۱	۰/۰۹۳	۰/۴۸۲	۴/۹۱۴	۱۵/۶۹

جدول (۲): اطلاعات واحدهای تولید پراکنده در شبکه مورد مطالعه

واحد تولید پراکنده	هزینه بهره‌برداری (دلار بر کیلووات‌ساعت)	هزینه سرمایه‌گذاری (دلار بر کیلووات)	طول عمر (سال)
توربین بادی	۰/۰۵	۵۰۰	۲۰
سلول فتوولتائیک	۰/۰۳۵	۳۰۰	۲۵



شکل (۲): روش تولید سناریوی پیشنهادی



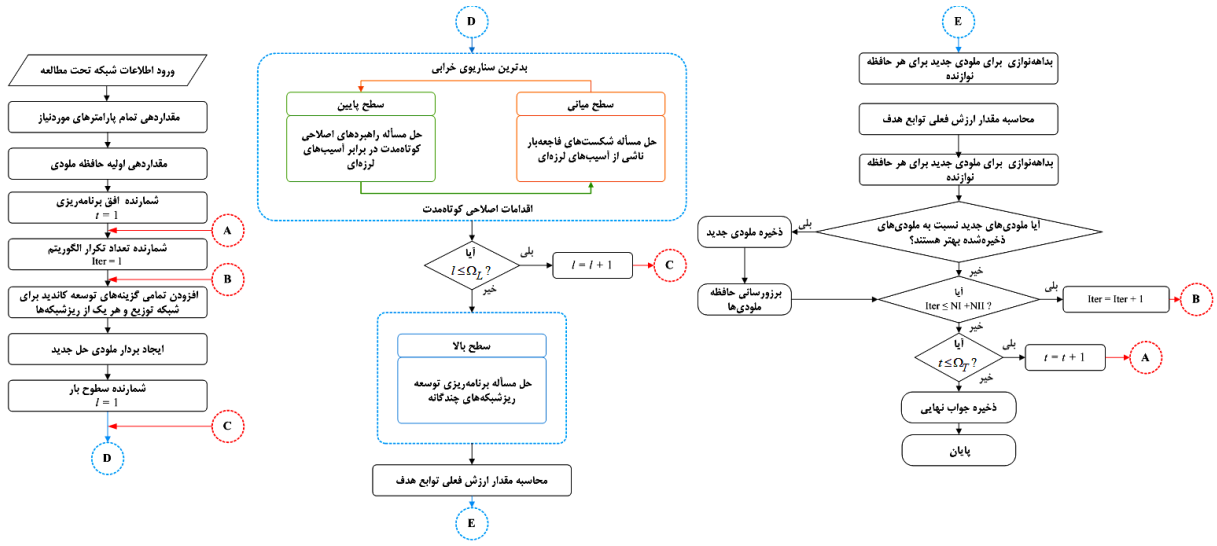
شکل (۳): ساختار بردار حل پیشنهادی

جدول (۳): اطلاعات واحد ذخیره‌ساز انرژی در شبکه مورد مطالعه

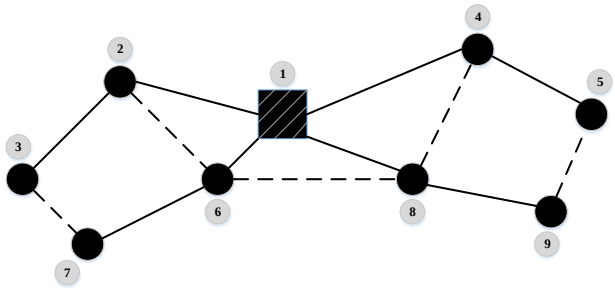
هزینه بهره‌برداری (دلار بر کیلووات‌ساعت)	هزینه سرمایه‌گذاری (دلار بر کیلووات‌ساعت)	حداقل - حداکثر SOC	مقدار اولیه SOC	راندمان شارژ و دشارژ	طول عمر (سال)
۰/۰۴	۴۰۰	۰/۲- ۱	۰/۵	۰/۹۲۲	۱۰

جدول (۴): پارامترهای الگوریتم MSA

پارامتر	PMN	PMS	PMCR	NI	NII
مقدار	۲	۶۰	۰/۹۸	۸۰۰	۶۰۰



شکل (۴): فلوچارت مسئله طراحی تاب‌آور ریزشبکه‌های چندگانه



شکل (۵): شبکه آزمون ۹- باس ۳۳ کیلوولت مورد مطالعه

همان‌طورکه از جدول (۷) مشهود است، رویکرد پیشنهادی در سطح میانی، بدترین حالت ممکن جریمه ناشی از حذف بار یعنی خروج ۴۸۰ دقیقه‌ای بارها را درنظر گرفته است. جدول (۸) هزینه سرمایه‌گذاری ناشی از طرح‌های توسعه پیشنهادی ریزشبکه‌ها را در پایان هر سال از افق برنامه‌ریزی نشان می‌دهد. همان‌طور که از این جدول قابل مشاهده است، در پایان سال اول ریزشبکه‌ها با هدف بیشینه‌سازی سود خود از تمامی بودجه در دسترس به‌منظور نصب منابع انرژی پراکنده استفاده نموده‌اند. در سال‌های دوم و سوم نیز ریزشبکه‌ها با توجه به تخریب منابع و همچنین، محدودیت نصب مربوط به هر یک از منابع انرژی پراکنده، هزینه‌های سرمایه‌گذاری نشان داده شده در جدول (۸) را متحمل می‌شوند. علاوه بر هزینه سرمایه‌گذاری، هزینه بهره‌برداری منابع انرژی پراکنده مربوط به هر یک از ریزشبکه‌ها را می‌توان به ازا هر سطح بار در جدول (۹) مشاهده نمود. همان‌طور که در جدول (۹) نشان داده شده است، هزینه بهره‌برداری تمامی ریزشبکه‌ها در پایان سال دوم بیش از سال اول است که این امر ناشی از افزایش نفوذ منابع انرژی پراکنده در ریزشبکه‌ها است. هزینه‌های بهره‌برداری ریزشبکه‌ها به جزء ریزشبکه ۳، در پایان سال سوم نیز بیشتر یا برابر با سال دوم است. در ریزشبکه ۳ با توجه به نصب واحد ذخیره‌ساز در سال دوم و همچنین، با درنظرگرفتن میزان شارژ/دشارژ متفاوت در پایان سال دوم و سوم، میزان هزینه بهره‌برداری ریزشبکه ۳ در سال دوم بیشتر از سال سوم است. باوجوداینکه افزایش نفوذ منابع انرژی پراکنده هزینه بهره‌برداری بالاتری را بر ریزشبکه‌ها تحمیل می‌کند اما سود حاصل از فروش توان آن‌ها را افزایش می‌دهد. جدول (۱۰) نشان‌دهنده‌ی سود مشارکت ریزشبکه‌ها در طول افق برنامه‌ریزی و در هر سطح بار است. همان‌طور که از جدول (۱۰) قابل مشاهده است، در سال اول، ریزشبکه‌ها درمجموع ۲۵۴۱/۹ هزار دلار صرف خرید توان کرده‌اند که این امر ناشی از کمبود میزان منابع انرژی پراکنده در برابر بار مصرفی شبکه می‌باشد. در سال دوم، میزان منابع انرژی پراکنده نصب‌شده به نسبت سال اول رشد ۶۳٪ داشته است درحالی‌که میزان بار مصرفی با رشد ۳۰٪ همراه بوده است. رشد بالای منابع انرژی پراکنده در برابر بار مصرفی، باعث شده است تا در سال دوم ریزشبکه‌ها درمجموع ۶۳۵۳/۸ هزار دلار از فروش توان سود کسب نمایند. در سال سوم، رشد منابع انرژی پراکنده نسبت به سال دوم برابر با ۱۳٪ و رشد بار نیز برابر با ۲۳٪ است.

جدول (۵): طرح‌های تاب‌آور توسعه ریزشبکه‌ها

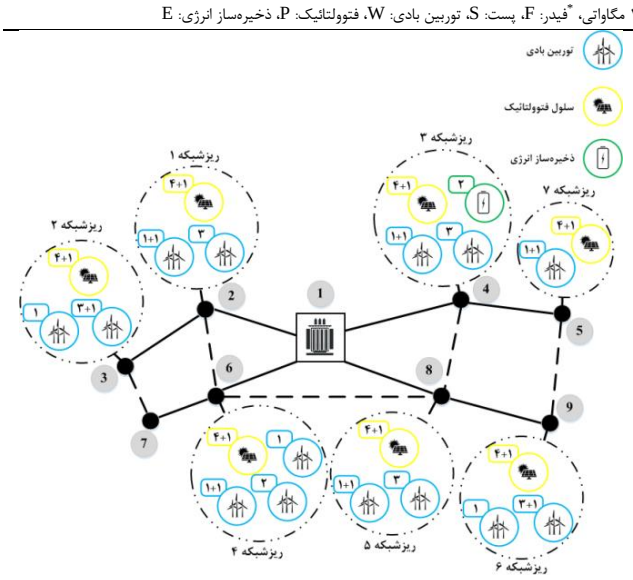
سال	ریزشبکه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
سال اول	توربین بادی	۱+۱	۱+۱	۱+۱	۱+۱	۱+۱	۱+۱	-
	فتوولتائیک	*۱+۴	۱+۴	۱+۴	۱+۴	۱+۴	۱+۴	-
	ذخیره‌ساز انرژی	-	-	-	-	-	-	-
سال دوم	توربین بادی	۳	۳	۳	۲	۳	۳	-
	فتوولتائیک	-	-	-	۱+۴	-	-	-
	ذخیره‌ساز انرژی	-	-	۲	-	-	-	-
سال سوم	توربین بادی	-	۱+۳	-	۱	-	۱+۳	۱+۱
	فتوولتائیک	۱+۴	-	-	-	۱+۴	-	۱+۴
	ذخیره‌ساز انرژی	-	-	۲	-	-	-	-

* یک واحد ۴ مگاواتی به همراه یک واحد رزرو ۱ مگاواتی

جدول (۶): وضعیت اجزای سیستم موردمطالعه پس از وقوع زمین‌لرزه

سال	ریزشبکه ۱	۲	۳	۴	۵	۶	شبکه توزیع
اول	-	-	-	-	-	-	۶[۱]-۷(*F) ۴۰[۲](S)
دوم	-	-	-	۱[۳]+۴(P)	-	-	۶-۷(F) ۴۰(S)
سوم	۱+۴(P)	۱+۳(W)	۲(E)	-	۱+۴(P)	۱+۳(W)	۵-۹(F) ۴۰(S)

۱- فیدر بین باس ۶ و ۷، ۲- پست با ظرفیت ۴۰مگاولت‌آمپر، ۳- یک واحد ۴ مگاواتی به همراه یک واحد رزرو ۱ مگاواتی، *فیدر: F، پست: S، توربین بادی: W، فتوولتائیک: P، ذخیره‌ساز انرژی: E



شکل (۶): ساختار نهایی شبکه موردمطالعه

جدول (۷): بدترین سناریوی آسیب لرزه‌ای در هر سال از افق

سال	بزرگا	عمق (کیلومتر)	فاصله سطحی (کیلومتر)	PGA (g)	حذف بار (مگاوات‌ساعت)	مدت زمان وقفه (دقیقه)	وزن
۱	۵/۵	۹/۳	۷/۷	۰/۲۳	۴۰۶۵۷/۳	۴۸۰	۳۱/۲
۲	۴/۸	۳۹/۸	۵/۷	۰/۰۵	۲۵۳۴۸/۵	۴۸۰	۳۱/۲
۳	۷/۲	۲/۷	۱۳/۴	۰/۵۷	۲۹۹۹۸/۵	۴۸۰	۳۰/۹

جدول (۸): هزینه سرمایه‌گذاری هر یک از ریزشبکه‌ها (میلیون دلار)

	ریزشبکه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
C_E	۱	۲/۵	۲/۵	۲/۵	۲/۵	۲/۵	۲/۵	۰
	۲	۱/۵	۱/۵	۲/۳	۲/۵	۱/۵	۱/۵	۰
	۳	۱/۵	۲	۰/۸	۰/۵	۱/۵	۲	۲/۵

جدول (۹): هزینه بهره‌برداری منابع انرژی پراکنده هر یک از ریزشبکه‌ها (هزار دلار)

سال	ریزشبکه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
۱	پربار	۱۹۹/۵	۱۹۹/۵	۱۹۹/۵	۱۹۹/۵	۱۹۹/۵	۱۹۹/۵	۰
	میان‌بار	۵۷۰	۵۷۰	۵۷۰	۵۷۰	۵۷۰	۵۷۰	۰
	کم‌بار	۱۹۳/۲	۱۹۳/۲	۱۹۳/۲	۱۹۳/۲	۱۹۳/۲	۱۹۳/۲	۰
۲	پربار	۳۵۷	۳۵۷	۳۵۸/۱	۳۰۴/۵	۳۵۷	۳۵۷	۰
	میان‌بار	۱۰۲۰	۱۰۲۰	۱۲۰۱/۱	۸۷۰	۱۰۲۰	۱۰۲۰	۰
	کم‌بار	۳۴۵/۷	۳۴۵/۷	۳۷۶/۱	۲۹۴/۹	۳۴۵/۷	۳۴۵/۷	۰
۳	پربار	۳۵۷	۳۵۷	۳۵۷/۱	۳۵۷	۳۵۷	۳۵۷	۱۹۹/۵
	میان‌بار	۱۰۲۰	۱۰۲۰	۱۱۷۳/۲	۱۰۲۰	۱۰۲۰	۱۰۲۰	۵۷۰
	کم‌بار	۳۴۵/۷	۳۴۵/۷	۳۶۲/۶	۳۴۵/۷	۳۴۵/۷	۳۴۵/۷	۱۹۳/۲

جدول (۱۰): سود مشارکت هر یک از ریزشبکه‌ها (هزار دلار)

سال	ریزشبکه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
۱	پربار	-۴۵۵/۳	-۲۳۴/۶	-۴۵۵/۳	۱/۹	-۲۷۷/۱	-۴۵/۳	۰
	میان‌بار	-۶۲۲/۴	-۱۰۷/۴	-۶۲۲/۴	۳۳۴/۵	-۲۰۶/۵	۲۵۰/۶	۰
	کم‌بار	-۱۶۲/۲	۳	-۱۶۲/۲	۱۳۷/۰۸	-۲۷/۹	۱۰۹/۹	۰
۲	پربار	-۱۴۰/۶	۲۱/۶	-۱۳۶/۳	۲۱۴/۴	۱۱۷/۵	۲۵۸/۸	۰
	میان‌بار	۲۸۱/۸	۵۷۸/۴	۷۸۲/۹	۹۶۲/۴	۸۰۲/۱	۱۱۳۲	۰
	کم‌بار	۱۳۷/۵	۲۳۳/۲	۳۸/۸	۳۵۱/۴	۳۰۵/۴	۴۱۱/۹	۰
۳	پربار	-۲۵۲/۱	-۲۸۵/۶	-۲۵۱/۸	۲۹۰/۳	۵۰/۵	۲۰۲/۵	۳/۲
	میان‌بار	۸۶/۶	۲۸/۱	۵۱۰/۳	۱۲۰۵/۴	۶۴۶	۱۰۰۰/۷	۳۳۷/۵
	کم‌بار	۷۴/۴	۵۵/۵	۱۹/۶	۴۳۵/۶	۲۵۵	۳۶۹/۵	۱۳۸

رشد بالای بار مصرفی در مقایسه با رشد منابع انرژی پراکنده باعث شده است تا در سال سوم میزان سود ریز شبکه‌ها درمجموع به ۴۹۲۰/۱ هزار دلار کاهش پیدا کند. جدول (۱۱) بیانگر اثر اقدامات کوتاه‌مدت و بلندمدت بر روی میزان کاهش حذف بار ناشی از وقوع زمین‌لرزه در هر سال از افق برنامه‌ریزی است. همان‌طور که از این جدول مشهود است، اقدامات بلندمدت مبتنی بر برنامه‌ریزی اثربخش بالاتری نسبت به اقدامات کوتاه مدت مبتنی بر بهره‌برداری دارند به‌گونه‌ای که در سال‌های اول، دوم و سوم از افق برنامه‌ریزی، اتخاذ اقدامات بلندمدت به ترتیب باعث کاهش ۷۷٪، ۸۷٪ و ۷۰٪ حذف بار می‌گردند. در سال اول، با توجه به اینکه منبع تغذیه شبکه فقط پست بالادست است، لذا پس از تخریب پست در هنگام وقوع زمین‌لرزه، اقدامات مبتنی بر بهره‌برداری تأثیر بسزایی بر کاهش حذف بار ندارند. در سال‌های دوم و سوم، وقوع زمین‌لرزه باعث شده است در شبکه به ترتیب ۲۶ و ۳۳ مگاوات توربین بادی و سلول فتوولتائیک باقی بمانند. رشد بارها در هر سال و کمبود منابع تولیدی پس از وقوع زمین‌لرزه جهت تغذیه این بارها موجب شده است اغلب ریز شبکه‌ها حتی پاسخگوی بار خود نیز نباشند، لذا با توجه به اولویتی که ریز شبکه‌ها جهت تأمین بار خود دارند، اتخاذ اقدامات کوتاه‌مدت در سال‌های دوم و سوم اثر بسزایی بر کاهش حذف بار شبکه نداشته است. با وجود اینکه اقدامات کوتاه‌مدت نسبت به اقدامات بلندمدت، اثر بسزایی بر

کاهش کل حذف بار شبکه ناشی از وقوع زمین‌لرزه ندار ند، ا ما ن قش مؤثری در کاهش حذف بارهای حساس (تجاری و صنعتی) در شبکه موردمطالعه ایفا می‌کنند. مطابق با جدول (۱۲)، پس از وقوع زمین‌لرزه در سال دوم، ۴۸٪ بار شبکه حذف می‌شود که این م یزان شامل ۲۳٪ بار مسکونی، ۱۱٪ بار تجاری و ۱۴٪ بار صنعتی ا ست. پس از اتخاذ اقدامات کوتاه‌مدت مبتنی بر بهره‌برداری، همان‌طور که در جدول (۱۲) نشان داده شده است، این میزان حذف بار برابر با ۴۷٪ بار م سکونی، ۰/۴٪ بار تجاری و ۰/۶٪ بار صنعتی می‌شود. در سال سوم ن یز پس از وقوع زمین‌لرزه ۴۶٪ بار شبکه حذف می‌گردد که ا ین م یزان شامل ۱۹٪ بار مسکونی، ۱۴٪ بار ت جاری و ۱۳٪ بار صنعتی ا ست. پس از اتخاذ اقدامات کوتاه‌مدت مبتنی بر بهره‌برداری، همان‌طور که در جدول (۱۲) نشان داده شده است، ا ین م یزان حذف بار برا بر با ۴۳٪ بار مسکونی، ۱٪ بار تجاری و ۲٪ بار صنعتی می‌شود. با تو جه به ن تایج اخذشده، اتخاذ اقدامات کوتاه‌مدت مبتنی بر بهره‌برداری اثر بالایی بر کاهش میزان حذف بارهای حساس دارد.

۵- صحت‌سنجی نتایج

در این بخش، به‌منظور صحت‌سنجی ن تایج، عمل کرد م سئله طرا حی تاب‌آور پیشنهادی با مدل بیان‌شده در مرجع (Xie et al., 2019) مقایسه می‌شود. در این مرجع، یک مدل بهینه‌سازی دوسطحی به‌منظور تعیین بهینه اندازه ذخیره‌سازها و با هدف ارتقاء تاب‌آوری و قابلیت‌اطمینان، بر روی یک شبکه توزیع ۱۰کیلوولت حاوی ۳ ریز شبکه با سطح ول تاژ ۳۸۰ولت پیاده‌سازی شده است. ریزشبکه‌ها به‌طور جداگانه به هر باس شبکه توزیع متصل بوده و دارای DGهای قابل‌توزیع، غیرقا بل‌توزیع و ذخیره‌ساز هستند. در این مرجع، مدل پیشنهادی خطی‌سازی شده و از طریق روش CPLEX حل شده ا ست. جدول (۱۳) ن شان‌دهنده‌ی تفاوت‌ها میان مقادیر محاسبه‌شده مر بوط به توا بع هدف در م سئله طراحی تاب‌آور پیشنهادی و مدل بیان‌شده در مرجع (Xie et al., 2019) است. نتایج ارائه‌شده در جدول (۱۳) ب یانگر ا ین واقع یت ا ست که رویکرد پیشنهادی این مقاله در مقایسه با مدل مرجع (Xie et al., 2019) ضمن فراهم کردن سود خالص بیشتر، شاخص تاب‌آوری پیشنهادی در این مرجع را بیشتر ارتقاء می‌دهد. بعلاوه، از نتایج جدول (۱۳) می‌توان به این موضوع پی برد که پیاده‌سازی مدل پیشنهادی در ب ستر MSA در مقایسه با سایر الگوریتم‌های بهینه‌سازی، نتایج مط لوب تری را به دنبال داشته است.

جدول (۱۱): میزان حذف بار پس از اقدامات کوتاه‌مدت و بلندمدت در هر سال از افق برنامه‌ریزی (مگاوات‌ساعت)

سال	زمین‌لرزه	پس از اقدامات کوتاه‌مدت	پس از اقدامات بلندمدت
۱	۴۰۶۵۷/۳۵	۴۰۶۵۷/۳۵	۹۱۵۷/۳۲
۲	۲۵۳۴۸/۵	۲۵۳۴۸/۵	۳۲۷۳/۱۲
۳	۲۹۹۹۸/۵	۲۹۹۹۸/۵	۸۹۹۷/۳

جدول (۱۲): میزان حذف بارهای حساس و غیرحساس پس از اقدامات کوتاه‌مدت در هر سال از افق برنامه‌ریزی

سال		بارتغذیه‌شده	بار تغذیه‌نشده	مسکونی تغذیه‌نشده	تجاری تغذیه‌نشده	صنعتی تغذیه‌نشده
۲	پس از زلزله	۵۲٪	۴۸٪	۲۳٪	۱۱٪	۱۴٪
	پس از اقدامات	۵۲٪	۴۸٪	۴۷٪	۰/۴٪	۰/۶٪
۳	پس از زلزله	۵۴٪	۴۶٪	۱۹٪	۱۴٪	۱۳٪
	پس از اقدامات	۵۴٪	۴۶٪	۴۳٪	۱٪	۲٪

جدول (۱۳): مقایسه نتایج مدل پیشنهادی با مدل مرجع (Xie et al., 2019)

شاخص‌های مسئله	مدل پیشنهادی				مدل مرجع (Xie et al., 2019)
	MSA	HSA	GA	PSO	
هزینه سرمایه‌گذاری توربین بادی(میلیون دلار)	۰/۸۳	۰/۹۷	۱/۲۸	۱/۱۲	-----
هزینه سرمایه‌گذاری فتوولتائیک(میلیون دلار)	۱/۸۰	۱/۸۳	۲/۲۷	۲/۰۱	-----
هزینه سرمایه‌گذاری سیستم ذخیره‌ساز انرژی(میلیون دلار)	۰/۹۵	۱/۰۶	۱/۲۸	۱/۱۶	۳/۹۶
هزینه بهره‌برداری (میلیون دلار)	۵/۹۶	۶/۰۸	۶/۶۱	۶/۳۹	۵/۳۵
سود خالص (میلیون دلار)	۲/۴۲	۲/۱۵	۱/۳۰	۱/۸۴	۱/۳۳
هزینه انرژی ارسال‌شده از شبکه بالادست (هزار دلار)	۳/۳۶	۴/۸۲	۶/۹۶	۶/۰۱	۸/۹۵
شاخص تاب‌آوری (ساعت)	۰/۰۰۹۴	۰/۰۰۹۹	۰/۰۱۰۷	۰/۰۱۰۱	۰/۰۱۲۰

۶- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک چارچوب سه‌سطحی جدید برای برنامه‌ریزی تو سعه ریزشبکه‌های چندگانه با هدف ارتقاء سطح تاب‌آوری شبکه توز یع در برابر مخاطرات لرزه‌ای ارائه شده است. در مسئله سطح پایین، DNO، اقدامات اصلاحی کوتاه‌مدت شامل بازآرایی و توزیع بهینه منابع تولیدی را با هدف کاهش اثرات زمین‌لرزه اِعمال نمود. در مسئله سطح م یانی، با بهره‌گ یری از روش جد ید تول ید سناریوی و با تو جه به رابط ه کاهندگی معرفی شده، آ سیب‌پذیری تجه یزات شبکه توز یع شامل پست‌ها، فیدرها و منابع انرژی پراکنده مدل‌سازی و بدترین سناریوی آسیب تعیین گردید.

در مسئله سطح بالایی هر یک از بهره‌بردارن ریزشبکه طرح‌های تاب‌آور توسعه بهینه خود را تحت عنوان اقدامات پیشگیرانه بلندمدت پیشنهاد کردند. چارچوب برنامه‌ریزی پیشنهادی به‌طور موفق یت‌آمیزی بر روی شبکه ۹- باس ۳۳ کیلوولت پیاده‌سازی شد. نتایج شبیه‌سازی حاکی از آن است که اِتخاذ اقدامات کوتاه مدت مبت نی بر بهره بردار ی پس از وقوع زمین‌لرزه مخرب توسط DNO باعث شده ا ست حذف بار های حساس صنعتی و تجاری در سال دوم به‌ترتیب با کاهش ۱۰/۶ ٪ و ۱۳/۴ ٪و در سال سوم به‌ترتیب با کاهش ۱۳٪ و ۱۱٪ ه مراه با شد. بعلاوه، چارچوب پیشنهادی کمک شایانی برای طرا حی یک شبکه تاب‌آور در برابر مخاطرات لرزه‌ای با تو جه به م حدودیت‌های بود جه دردسترس کرده است. بر این اساس، طرح‌های توسعه بهینه ریزشبکه-ها در پایان سال‌های اول، دوم و سوم، به ترت یب با عث کاهش ۷۷٪،

٪۸۷ و ٪۷۰ حذف بار شده است. لذا، در مجموع نتایج شبیه سازی مبین آن است که چارچوب پیشنهادی ضمن تعیین بدترین سناریوی آسیب ممکن در سطح میانی، اقدامات بلندمدت و کوتاه‌مدت موثری را به‌منظور کاهش کل حذف بارهای شبکه و حذف بارهای حساس ناشی از وقوع زمین‌لرزه پیشنهاد می‌دهد. در نهایت، می‌توان نتیجه گرفت که چارچوب پیشنهادی برای ارتقاء سطح تاب‌آوری شبکه پس از وقوع زمین‌لرزه سودمندی مطلوبی دارد.

فهرست علائم و اختصارات

شاخص‌ها و مجموعه‌ها

شاخص و مجموعه بزرگای زلزله	a, Ω_A
شاخص و مجموعه‌ی باس‌های بار	b, Ω_B
شاخص و مجموعه‌ی بخش های بار در هر باس بار	c, Ω_C
شاخص و مجموعه منابع انرژی پراکنده	de, Ω_{De}
شاخص و مجموعه فیدرهای شبکه توزیع	e, Ω_E
شاخص و مجموعه‌ی واحدهای ذخیره ساز موجود	est, Ω_{ESt}
شاخص و مجموعه سلول‌های فتوولتائیک موجود	ev, Ω_{EV}
شاخص و مجموعه توربین‌های بادی موجود	ew, Ω_{EW}
شاخص و مجموعه بیشینه شتاب افقی زمین	g, Ω_G
شاخص و مجموعه عمق زلزله	h, Ω_H
شاخص و مجموعه‌ی واحدهای ذخیره ساز نصب‌شده	ist, Ω_{ISt}
شاخص و مجموعه سلول‌های فتوولتائیک نصب‌شده	iv, Ω_{IV}
شاخص و مجموعه توربین های بادی نصب‌شده	iw, Ω_{IW}
شاخص و مجموعه سطوح بار	l, Ω_L
شاخص و مجموعه‌ی ریزشبکه‌ها	m, Ω_M
شاخص و مجموعه فاصله از مرکز زلزله	r, Ω_R
شاخص و مجموعه پست‌ها	s, Ω_S
شاخص و مجموعه‌ی واحدهای ذخیره‌ساز	st, Ω_{St}
شاخص و مجموعه‌ی مراحل افق زمانی برنامه‌ریزی	t, Ω_T
شاخص و مجموعه سلول‌های فتوولتائیک	v, Ω_V
شاخص و مجموعه توربین‌های بادی	w, Ω_W
شاخص و مجموعه سناریوها برای خرابی پست، فیدر و منابع انرژی پراکنده	$(\omega, \omega'), \Omega_\omega$

پارامترها

حداقل و حداکثر بزرگای زلزله	$\underline{a} / \bar{a}$
هزینه سرمایه‌گذاری توربین بادی/فتوولتائیک/ذخیره‌ساز انرژی	$C_{Wd}^{ins} / C_{Pv}^{ins} / C_{St}^{ins}$
هزینه بهره برداری توربین بادی/فتوولتائیک/ذخیره‌ساز انرژی	$C_{Wd}^{op} / C_{Pv}^{op} / C_{St}^{op}$
بودجه سرمایه‌گذاری در برنامه‌ریزی سیستم ریزشبکه‌های چندگانه	CBM
مدت زمان سطوح بار	Dl
ظرفیت شارش فیدر eام شبکه توزیع	$\bar{f}_e$
حداقل و حداکثر عمق وقوع زلزله	$\underline{h} / \bar{h}$
ماکزیمم توان شارژ و دشارژ مجاز	$\bar{P}^{ch-dch}$
کل ظرفیت توربین بادی/فتوولتائیک/ذخیره‌ساز انرژی قابل نصب	$P_{Wd}^{ins} / P_{Pv}^{ins} / P_{St}^{ins}$
کل تقاضای توان بار سالیانه	P^L
توان ماکزیمم تولیدی توربین بادی/ سلول فتوولتائیک	$\bar{P}^{wd} / \bar{P}^{pv}$
ماکزیمم توان مبادلاتی شبکه اصلی با شبکه بالادست	$\bar{P}^{Sub}$
ظرفیت ذخیره‌ساز انرژی	$\bar{P}^{st}$
حداقل و حداکثر فاصله از مرکز زلزله	$\underline{r} / \bar{r}$
حالت شارژ ماکزیمم/مینیمم (٪)	$\overline{SOC} / \underline{SOC}$
راندمان شارژ و دشارژ ذخیره‌ساز انرژی	η^{ch} / η^{dch}
قیمت توان فروخته/خریداری شده به/از شبکه اصلی	π / λ
طول عمر توربین های بادی/ فتوولتائیک/ذخیره‌ساز انرژی (سال)	γ
نرخ بهره	τ
حداکثر تعداد فیدرهایی/پست‌هایی/منابع انرژی پراکنده که می‌توانند تحت سناریوی آسیب، دچار خرابی شوند.	$\bar{\psi}_E / \bar{\psi}_S / \bar{\psi}_{De}$

متغیرها

هزینه توان خریداری شده/فروخته شده از/به شبکه اصلی	C^B / C^S
فلوی فیدر شبکه توزیع	f
هزینه سرمایه‌گذاری/بهره‌برداری در ریزشبکه‌ها	ICM / OCM
ظرفیت قابل بهره برداری توربین بادی/فتوولتائیک/ذخیره‌ساز انرژی نصب‌شده	$P_{iw}^{icap} / P_{iv}^{icap} / P_{ist}^{icap}$
ظرفیت رزرو توربین بادی/ فتوولتائیک	$P_{iw}^{res} / P_{iv}^{res}$
توان خریداری شده/فروخته‌شده از/به شبکه اصلی	P^B / P^S
توان شارژ/دشارژ ذخیره‌ساز	P^{ch} / P^{dch}
توان تولیدی توربین بادی/سلول فتوولتائیک	P^{wd} / P^{pv}

توان تزریقی پست	P^{Sub}
مقدار PGA در منحنی های شکنندگی پست‌ها، فیدرها و منابع انرژی پراکنده	pga
حالت شارژ ذخیره‌ساز انرژی (٪)	SOC
مقدار توان قطع‌شده	χ
هزینه توان قطع‌شده	ζ
مدت زمان خروج، تحت تاثیر هر سناریو آسیب زلزله	δ
تعداد کل فیدرهایی/پست‌هایی/منابع انرژی پراکنده که می‌توانند تحت سناریوی آسیب، دچار خرابی شوند.	ψ_e / ψ_s / ψ_{de}

مراجع

Bajwa, A. A., Mokhlis, H., Mekhilef, S., & Mubin, M. (2019). Enhancing power system resilience leveraging microgrids: A review, *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 11(3), 035503.

Bagheria, A., Ghodrati Amirib, G., Khorasanib, M., & Haghdoust, J. (2011). Determination of attenuation relationships using an optimization problem ,*International Journal of Optimization in Civil Engineering* ,1(4), 597-607.

Bhusal, N., Abdelmalak, M., Kamruzzaman, M., & Benidris, M. (2020). Power system resilience: Current practices, challenges, and future directions, *IEEE Access*, 8, 18064-18086.

Bui, V. H., Hussain, A., & Kim, H. M. (2016). A multiagent-based hierarchical energy management strategy for multi-microgrids considering adjustable power and demand response, *IEEE Transactions on Smart Grid*, 9(2), 1323-1333.

Ding, T., Lin, Y., Bie, Z., & Chen, C. (2017). A resilient microgrid formation strategy for load restoration considering master-slave distributed generators and topology reconfiguration, *Applied Energy*, vol. 199, 205-216.

Falaghi, H., Singh, C., Haghifam, M. R., & Ramezani, M. (2011). DG integrated multistage distribution system expansion planning, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 33(8), 1489-1497.

Farzin, H., Fotuhi-Firuzabad, M., & Moeini-Aghtaie, M. (2016). A stochastic multi-objective framework for optimal scheduling of energy storage systems in microgrids, *IEEE Transactions on Smart Grid*, 8(1), 117-127.

Ghaffarpour, R., Jannati Oskuee, M. R., & Ranjbar, A. M. (2020). Resilience-oriented distribution network optimal planning to improve the continuity of power supply, *International Journal of Ambient Energy*, 41(4), 466-474.

Hussain, A., Bui, V. H., & Kim, H. M. (2018). A proactive and survivability-constrained operation strategy for enhancing resilience of microgrids using energy storage system, *IEEE Access*, 6, 75495-75507.

Kiani-Moghaddam, M., Shivaie, M., & Weinsier, P. D. (2019). Modern *Music-Inspired Optimization Algorithms for Electric Power Systems*: Springer.

Lin, Y., and Bie, Z. (2018). Tri-level optimal hardening plan for a resilient distribution system considering reconfiguration and DG islanding, *Applied Energy*, 210, 1266-1279.

Mousavizadeh, S., Haghifam, M. R., & Shariatkhah, M. H. (2018). A linear two-stage method for resiliency analysis in distribution systems considering renewable energy and demand response resources, *Applied Energy*, 211, 443-460.

Najafi, J., Peiravi, A., & Anvari-Moghaddam, A. (2020). Enhancing Integrated Power and Water Distribution Networks Seismic Resilience Leveraging Microgrids, *Sustainability*, 12(6), 2167.

Najafi, J., Peiravi, A., Anvari-Moghaddam, A., & Guerrero, J. M. (2019). Resilience improvement planning of power-water distribution systems with multiple microgrids against hurricanes using clean strategies, *Journal of Cleaner Production* ,223, 109-126.

Najafi, J., Peiravi, A., & Guerrero, J. M. (2018). Power distribution system improvement planning under hurricanes based on a new resilience index, *Sustainable Cities and Society*, 39, 592-604.

Nazemi, M., Moeini-Aghtaie, M., Fotuhi-Firuzabad, M., & Dehghanian, P. (2019). Energy storage planning for enhanced resilience of power distribution networks against earthquakes, *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 11(2), 795-806.

Nikmehr, N., & Ravadanegh, S. N. (2015). Optimal power dispatch of multi-microgrids at future smart distribution grids, *IEEE Transactions on Smart Grid*, 6(4), 1648-1657.

Rastgou, A., Moshtagh, J., & Bahramara, S. (2018). Improved harmony search algorithm for electrical distribution network expansion planning in the presence of distributed generators, *Energy*,151, 178-202.

Salimi, M., Nasr, M. A., Hosseinian, S. H., Gharehpetian, G. B., & Shahidehpour, M. (2020). Information Gap Decision Theory-Based Active Distribution System Planning for Resilience Enhancement, *IEEE Transactions on Smart Grid*.

Shahbazi, A., Aghaei, J., Pirouzi, S., Niknam, T., Shafie-khah, M., & Catalão, J. P. (2021). Effects of resilience-oriented design on distribution networks operation planning, *Electric Power Systems Research*,191,106902.

Shahidehpour, M., Ding, T., Ming, Q., Huang, C., Wang, Z., & Du, P. (2020). Multi-Period Active Distribution Network Planning Using Multi-Stage Stochastic Programming and Nested Decomposition by SDDIP, *IEEE Transactions on Power Systems*.

Shivaie, M., & Ameli, M. T. (2016). Risk-constrained multi-level framework for coordination of generation and transmission expansion planning in liberalised environments–part I: theory and formulation, *IET Generation, Transmission & Distribution*, 10(13), 3183-3190.

Shivaie, M., Ameli, M. T., Sepasian, M. S., Weinsier, P. D., & Vahidinasab, V. (2015). A multistage framework for reliability-based distribution expansion planning considering distributed generations by a self-adaptive global-based harmony search algorithm, *Reliability Engineering & System Safety*, 139, 68-81.

Shivaie, M., Kiani-Moghaddam, M., and Weinsier, P. D. (2020). A vulnerability-constrained quad-level model for coordination of generation and transmission expansion planning under seismic- and terrorist-induced events, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* ,120,105958, (1).

Shivaie, M., Kiani-Moghaddam, M., and Weinsier, P. D. (2020). Resilience-based tri-level framework for simultaneous transmission and substation expansion planning considering extreme weather-related events, *IET Generation, Transmission & Distribution*, 14(16), 3310-3321, (2).

Tari, A. N., Sepasian, M. S., and Kenari, M. T. (2021). Resilience assessment and improvement of distribution networks against extreme weather events, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*,125, 106414.

Vo Ngoc, D., & Tran Anh, N. (2020). Distribution network reconfiguration for power loss reduction and voltage profile improvement using chaotic stochastic fractal search algorithm, *Complexity*.

Xie, H., Teng, X., Xu, Y., and Wang, Y. (2019). Optimal energy storage sizing for networked microgrids considering reliability and resilience, *IEEE Access* ,7, 86336-86348.

Xu, G., Shang, C., Fan, S., Hu, X., & Cheng, H. (2017). A hierarchical energy scheduling framework of microgrids with hybrid energy storage systems, *IEEE Access*, 6, 2472-2483.

Yuan, W., Wang, J., Qiu, F., Chen, C., Kang, C., & Zeng, B. (2016). "Robust optimization-based resilient distribution network planning against natural disasters, *IEEE Transactions on Smart Grid*, 7(6), 2817-2826.

زیرنویس‌ها

[1] High-impact Rare (HR)

[2] Micro-Grid (MG)

[3] Reconfiguration

[4] Distributed Generation (DG)

[5] Fragility curves

[6] Energy Storage System (ESS)

[7] Magnitude

[8] Focal Depth
[9] Hypocentral Distance
[10] Peak Ground Acceleration (PGA)
[11] Distribution Network Operator (DNO)
[12] Reserve Margin
[13] State Of Charge (SOC)
[14] Harmony Search Algorithm (HSA)
[15] Melody Search Algorithm (MSA)