

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 Artis¹, Mojtaba Shivaie^{2,*}, Mohsen Assili³

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: ²shivaie@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

برنامه ریزی 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 بهینه‌سازی 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 غیرقابل پیش‌بینی 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 بهینه‌سازی 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

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 مقاومت‌سازی خطوط و پست‌توزیع و تقویت لوله‌های آب با مواد بهتر را پیاده‌سازی می‌کنند. در مرجع (Shahbazi et al., 2021) با استفاده از یک چارچوب برنامه‌ریزی تصادفی و با بهره‌گیری از راهبردهای 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 به منظور ارتقاء سطح تاب‌آوری شبکه توزیع مبتنی بر ریزشبه‌های چندگانه با در نظر گرفتن مخاطرات لرزه‌ای، متمرکز شده است. در رویکرد پیشنهادی، مسئله سطح پایین به پیانگ اقدامات کوتاه مدت اصلاحی می‌باشد. این اقدامات در قالب یک مدل مبتنی بر بخش توان بهینه به منظور پیشینه‌سازی تابع سود مشارکت ریزشبه‌ها و کمینه‌سازی 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 غیرقابل پیش‌بینی زمین‌لرزه و اثرات مخرب آن بر تجهیزات شبکه توزیع شامل پست‌ها، فیدرها و منابع انرژی پراکنده تجزیه و تحلیل می‌شوند. در روش پیشنهادی به منظور مدل‌سازی چگونگی استهلاک انرژی آزادشده ناشی از زمین‌لرزه، از یک رابطه کاهندگی مناسب که مؤثر از پارامترهای لرزه‌ای شامل نوع خاک، بزرگای زمین‌لرزه، عمق وقوع و فاصله سطحی^۱ است، استفاده می‌گردد. سپس، مجموعه‌ای از سناریوهای آسیب مطابق با شاخص محاسباتی حداکثر شتاب افقی زمین^{۱۰} و مفهوم منحنی‌های شکنندگی با هدف پیشینه‌سازی خسارت‌های فنی-اقتصادی مقید به محدودیت‌های ساختاری زمین، تولید می‌گردند. در مسئله سطح بالایی، برنامه‌ریزی چندمرحله‌ای توسعه ریزشبه‌های چندگانه با هدف بهبود بلندمدت تاب‌آوری شبکه توزیع انجام می‌پذیرد. مسئله سطح بالایی به دو لایه محلی و سراسری تقسیم می‌شود. در لایه محلی، هر یک از ریزشبه‌ها طرح‌های توسعه خود را با هدف پیشینه‌سازی سود مشارکت و کمینه‌سازی هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری منابع انرژی پراکنده تعیین می‌کنند. در لایه سراسری نیز طرح‌های توسعه تمامی ریزشبه‌ها توسط بهره‌بردار شبکه توزیع^{۱۱} جمع‌آوری می‌شود و از طریق محدودیت‌های حاشیه رزرو^{۱۲} مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. به منظور حل چارچوب برنامه‌ریزی پیشنهادی، از الگوریتم جستجوی مولودی استفاده شده است. بطور خلاصه، نوآوری‌های این مقاله در زمینه برنامه‌ریزی ریزشبه‌های چندگانه با هدف بهبود تاب‌آوری به شرح ذیل قابل بیان است:

(۱). ارائه یک چارچوب سه‌سطحی جدید به منظور برنامه‌ریزی

ریزشبه‌های 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

به‌طور سنتی، شبکه‌های توزیع بر مبنای شاخص‌های قابلیت اطمینان برنامه‌ریزی و طراحی می‌شوند. لذا، این شبکه‌ها آمادگی لازم جهت مقابله با وقایع با احتمال وقوع بالا و تأثیر پایین را دارا هستند، و ملی، کارایی مناسب به‌منظور کاهش شدت خسارات ناشی از وقایع مخرب و نادر^۱ را ندارند (Bajwa et al., 2019). از این رو، در طی سال‌های اخیر مطالعات متعددی با هدف طراحی تاب‌آور شبکه‌های توزیع انجام گرفته است. به‌طور کلی، 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 شبکه‌های توزیع، نویسندگان در مرجع (Hussain et al., 2018) با بهره‌گیری از سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی راهکاری ایمن به‌منظور نگهداشت بارهای حساس به هنگام تغییر وضعیت ریزشبه^۲ 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 ریزشبه‌ها، علاوه بر توزیع بهینه منابع انرژی پراکنده از قابلیت‌های کنترل و برنامه‌های پاسخگویی بار بهره‌گرفته شده است. در مرجع (Ding et al., 2017) به‌منظور ارتقاء تاب‌آوری شبکه پس از رخدادهای طبیعی مخرب، بازآرایی^۳ شبکه به همراه تشکیل ریزشبه 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 تیرهای برق به‌منظور مدل‌سازی اثر طوفان بر فیدرها، یک شبکه توزیع واقعی استفاده شده است. علاوه بر تکنیک‌های مقاوم‌سازی، تخصیص و جایابی منابع تولید پراکنده^۴ 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 ریزشبه‌های چندگانه با در نظر گرفتن ملاحظات اقتصادی، قابلیت اطمینان و تاب‌آوری پیشنهاد شده است. نویسندگان در مرجع (Nazemi et al., 2019) با توسعه یک مدل تحلیلی و با بهره‌گیری از منحنی‌های شکنندگی^۵، تأثیرات زمین‌لرزه بر تجهیزات شبکه توزیع را شناسایی و مورد ارزیابی قرار می‌دهند. از طرفی در این مطالعه، یک مسئله بهینه‌سازی برنامه‌ریزی خطی به‌منظور مقاوم‌سازی شبکه توزیع و تعیین ظرفیت و مکان سیستم ذخیره‌ساز انرژی^۶، پیشنهاد شده است. در مرجع (Najafi et al., 2020)

$$0 \leq P_{t,l,m,v}^{wd,org(a,h,r)} \leq \bar{P}^{wd} \quad (5)$$

$$0 \leq P_{t,l,m,v}^{pv,org(a,h,r)} \leq \bar{P}^{pv} \quad (6)$$

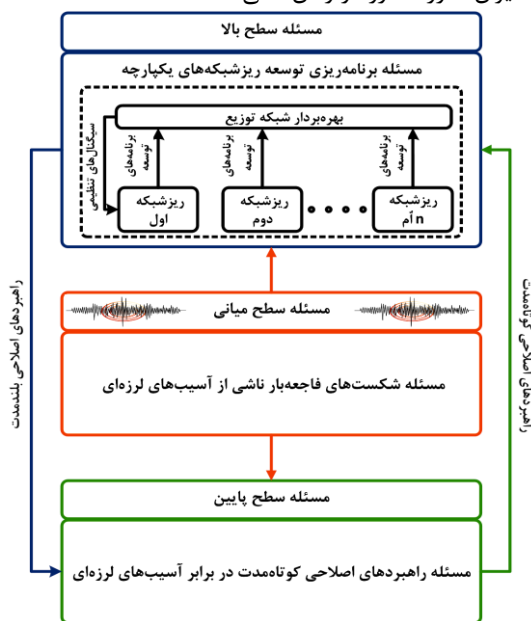
$$0 \leq P_{t,l,b}^{Sub,org(a,h,r)} \leq \bar{P}_{t,l,b}^{Sub} \quad (7)$$

$$0 \leq P_{t,l,m,st}^{ch,org(a,h,r)} \cdot P_{t,l,m,st}^{dch,org(a,h,r)} \leq \bar{P}^{ch-dch} \quad (8)$$

$$SOC_{t,l,m,st}^{org(a,h,r)} = SOC_{t,l-1,m,st}^{org(a,h,r)} - \frac{1}{-st} \cdot \left(\frac{1}{\eta} \cdot P_{t,l,m,st}^{dch,org(a,h,r)} - P_{t,l,m,st}^{ch,org(a,h,r)} \cdot \eta \right) \quad (9)$$

$$SOC_{st} \leq SOC_{t,l,m,st}^{org(a,h,r)} \leq \bar{SOC}_{st} \quad (10)$$

در رابطه (۱)، جمله اول معرف هزینه بهره‌برداری یک شبکه توزیع با Ω_M ریزشکبه است که شامل درآمد ناشی از فروش توان به شبکه و هزینه خرید از آن است. جمله دوم نیز بیانگر هزینه قطع بار انتهایی در شبکه توزیع است. رابطه (۲) تضمین‌کننده تعادل توان در شبکه توزیع است. محدودیت فلوئیدرها 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 و احدهای توربین بادی و فتوولتائیک را نشان می‌دهد. از طرفی، تبادل توان بین شبکه بالادست و شبکه توزیع توسط ترانسفورماتور پست بالادست (پست فوق توزیع) 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 ذخیره‌ساز در زمان قبل و میزان شارژ/دشارژ در زمان فعلی است.



شکل (۱): نمودار مفهومی چارچوب برنامه‌ریزی سه‌سطحی

پیشگیرانه بلندمدت شامل طرح‌های توسعه ریزشکبه‌های چندگانه به منظور 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 کاهش‌دهنده استفاده از پارامترهای لرزه‌ای نوع خاک، بزرگای زمین‌لرزه، عمق وقوع و فاصله سطحی.

این مقاله در ۶ بخش سازمان‌دهی شده است. در بخش ۲، مدل‌سازی ریاضی مسئله طراحی تاب‌آور پی‌شهادی، در بخش ۳، روش حل، در بخش ۴ نتایج شبیه‌سازی و در بخش ۵، صحت‌سنجی نتایج تبیین شده است. در نهایت، بخش ۶ به نتیجه‌گیری اختصاص یافته است.

۲- مدل‌سازی ریاضی چارچوب برنامه‌ریزی سه‌سطحی

در این مقاله به منظور ارتقاء تاب‌آوری شبکه توزیع در برابر مخاطرات لرزه‌ای، یک چارچوب برنامه‌ریزی سه‌سطحی متشکل از سه مسئله بهینه‌سازی (۱) مسئله راهبردهای اصلاحی کوتاه مدت در برابر آسیب‌های لرزه‌ای (۲) مسئله شکست‌های فاجعه‌بار ناشی از آسیب‌های لرزه‌ای و (۳) مسئله برنامه‌ریزی توسعه ریزشکبه‌های پی‌شهاد شده است. شکل (۱)، یک نمای مفهومی از ارتباط مسائل بهینه‌سازی 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 شامل بازآرایی فیدرها و توزیع بهینه منابع انرژی پراکنده است، با هدف پیشینه‌سازی سود مشارکت ریزشکبه‌ها و کمینه‌سازی حذف بار (Shivaie et al., 2020 (1); Shivaie et al., 2020 (2)) از دیدگاه بهره‌بردار شبکه توزیع پیاده‌سازی می‌شود.

$$\text{Max} \left\{ \begin{aligned} & \sum_{m=1}^{\Omega_M} P_{t,l,m}^{S,org(a,h,r)} [\pi_m - \sum_{m=1}^{\Omega_M} P_{t,l,m}^{B,org(a,h,r)} [\lambda_m] \\ & - \sum_{b=1}^{\Omega_b} \sum_{c=1}^{\Omega_c} \chi_{t,l,b,c}^{org(a,h,r)} \cdot \zeta_{t,l,b,c}^{org(a,h,r)} (\delta_{t,l,b,c}^{org(a,h,r)}) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

subject to:

$$\sum_{m=1}^{\Omega_M} \left[\sum_{w=1}^{\Omega_W} P_{t,l,m,w}^{wd,org(a,h,r)} + \sum_{v=1}^{\Omega_V} P_{t,l,m,v}^{pv,org(a,h,r)} \right] = P_{t,l,b}^L - P_{t,l,b}^{Sub} + \sum_{st=1}^{\Omega_{St}} P_{t,l,m,st}^{dch,org(a,h,r)} \quad (2)$$

$$\sum_{m=1}^{\Omega_M} \left[\sum_{st=1}^{\Omega_{St}} P_{t,l,m,st}^{ch,org(a,h,r)} \right] - \chi_{t,l,b}^{org(a,h,r)} + f_{t,l,e}^{org(a,h,r)} \quad (3)$$

$$0 \leq \chi_{t,l,b,c}^{org(a,h,r)} \leq P_{t,l,b,c}^L \quad (4)$$

ریز شبکه‌ها توسط بهره‌بردار شبکه توزیع جمع‌آوری می‌شوند و از طریق محدودیت‌های حاشیه رزرو مورد ارزیابی قرار می‌گیرند.

$$\text{Max } (1 + \tau)^{-t} \cdot [PR_{t,m} - (1 + \tau)^{-t} \cdot ICM_{t,m}] \quad (15)$$

where:

$$PR_{t,m} = \sum_{l=1}^{\Omega_L} D_{l,m} \cdot [(C_{t,l,m}^S - C_{t,l,m}^B) - OCM_{t,l,m}] \quad (16)$$

$$OCM_{t,l,m} = C_{t,l,Wd}^{op} \cdot \sum_{w=1}^{\Omega_w} P_{t,l,m,w}^{wd} + \quad (17)$$

$$C_{t,l,Pv}^{op} \cdot \sum_{v=1}^{\Omega_v} P_{t,l,m,v}^{pv} + C_{t,l,St}^{op} \cdot \sum_{st=1}^{\Omega_{St}} P_{t,l,m,st}^{ch} + P_{t,l,m,st}^{dch}$$

$$ICM_{t,m} = \alpha_{Wd}^{lf} \cdot C_{t,Wd}^{inv} \cdot \sum_{iw=1}^{\Omega_{IW}} P_{t,m,iw}^{icap,m} + P_{t,m,iw}^{res,m} + \quad (18)$$

$$\alpha_{Pv}^{lf} \cdot C_{t,Pv}^{inv} \cdot \sum_{iv=1}^{\Omega_{IV}} P_{t,m,iv}^{icap,m} + P_{t,m,iv}^{res,m} + \alpha_{St}^{lf} \cdot C_{t,St}^{inv} \cdot \sum_{ist=1}^{\Omega_{ISt}} P_{t,m,ist}^{icap,m}$$

$$\alpha_{Wd}^{lf} = \tau \cdot (1 - (1 + \tau)^{-\gamma})^{-1} \quad (19)$$

subject to:

$$\sum_{t=1}^{\Omega_T} \sum_{iw=1}^{\Omega_{IW}} P_{t,m,iw}^{icap} + P_{t,m,iw}^{res} \leq P_{Wd,m}^{ins} \quad (20)$$

$$\sum_{t=1}^{\Omega_T} \sum_{iv=1}^{\Omega_{IV}} P_{t,m,iv}^{icap} + P_{t,m,iv}^{res} \leq P_{Pv,m}^{ins} \quad (21)$$

$$\sum_{t=1}^{\Omega_T} \sum_{ist=1}^{\Omega_{ISt}} P_{t,m,ist}^{icap} \leq P_{St,m}^{ins} \quad (22)$$

$$\left(\begin{array}{l} C_{t,Wd}^{inv} \cdot \sum_{iw=1}^{\Omega_{IW}} P_{t,m,iw}^{icap,m} + P_{t,m,iw}^{res,m} + \\ C_{t,Pv}^{inv} \cdot \sum_{iv=1}^{\Omega_{IV}} P_{t,m,iv}^{icap,m} + P_{t,m,iv}^{res,m} + \\ C_{t,St}^{inv} \cdot \sum_{ist=1}^{\Omega_{ISt}} P_{t,m,ist}^{icap,m} \end{array} \right) \leq CBM_{t,m} \quad (23)$$

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 ریز شبکه‌ی m و ارزش خالص فعلی هزینه سرمایه‌گذاری منابع تازه نصب‌شده متعلق به ریز شبکه‌ی 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 ریز شبکه نیز در

مطابق با رابطه (۱۰)، مقدار SOC مقید بر محدودیت‌های 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 زمین لرزه مدل‌سازی شده است. در این سطح، آسیب‌های ناشی از وقوع زمین لرزه با تعریف یک مسئله بیشینه‌سازی آسیب‌های فنی-اقتصادی بر حسب مقیاس‌های مختلف PGA تعیین می‌شوند (Shivaie et al., 2020 (1); Shivaie et al., 2020 (2)).

$$\text{Max } \left\{ \sum_{b=1}^{\Omega_B} \sum_{c=1}^{\Omega_C} \chi_{t,l,b,c}^{o:g(a,h,r)} \cdot \left(\zeta_{t,l,b,c}^{o:g(a,h,r)} (\delta_{t,l,b,c}^{o:g(a,h,r)}) \cdot wf_{t,l,b,c}^{o:g(a,h,r)} \right) \right\} \quad (11)$$

subject to:

$$\sum_{s=1}^{\Omega_S} \psi_{t,l,s}^{o:g(a,h,r)} \leq \psi_S^{g(a,h,r)} \quad (12)$$

$$\sum_{e=1}^{\Omega_E} \psi_{t,l,e}^{o:g(a,h,r)} \leq \psi_E^{g(a,h,r)} \quad (13)$$

$$\sum_{de=1}^{\Omega_{De}} \psi_{t,l,de}^{o:g(a,h,r)} \leq \psi_{De}^{g(a,h,r)} \quad (14)$$

رابطه (۱۱) تابع هدف مسئله سطح میانی است که به صورت بیشینه‌سازی هزینه حذف بار ناشی از سناریوهای رخداد تعریف می‌شود. 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)). به منظور مدل‌سازی چگونگی استهلاک انرژی آزاد شده ناشی از زمین لرزه 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 ریز شبکه‌های چندگانه با هدف بهبود تاب‌آوری بیان شده است. در این سطح هر یک از ریز شبکه‌ها 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 ریز شبکه‌ها 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

آسیب‌دیده و (۴) مقدار حذف بار ناشی از آسیب دیدن این تجهیزات است.

در چارچوب چندسطحی پیشنهادی، متغیرهای بهینه‌تصمیم‌گیری در سطح اول شامل مقادیر شارژ و دشارژ ذخیره‌سازها، حذف بار در هر بخش بار و حالات باز یا بسته بودن کلید فیدهای 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. به‌عنوان مثال، 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)، فلوجارت پیاده‌سازی مدل چندسطحی پیشنهادی را نشان می‌دهد.

۱-۳- معرفی سیستم مورد مطالعه

مدل طراحی تاب‌آور ریزش‌بکه‌های چندگانه و روش حل معرفی شده، بر روی یک سیستم توزیع ۹-باس ۳۳ کیلوولت اصلاح شده پیاده‌سازی شده است (شکل (۵) را مشاهده نمایید) (Rastgou et al., 2018; Falaghi et al., 2011). شبکه آزمون دارای یک پست ۴۰ مگاوات آمپر، 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 دیماند 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. علاوه بر این، هر بار به سه بخش مسکونی، تجاری و صنعتی تقسیم می‌شود که اطلاعات مربوط به تابع خسارت آن‌ها در جدول (۱) بیان شده است. میزان سهم بارهای 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 ذخیره‌سازها نیز دارای ظرفیت‌های ۱ و ۲ مگاوات ساعت می‌باشند. حداکثر ظرفیت قابل‌نصب در هر ریزش‌بکه برای توربین‌های بادی و سلول‌های فتوولتائیک ۴

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 ریزش‌بکه‌ها 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 مقیاس‌بزرگ کارایی 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 عدم قطعیت‌های 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

مجدداً در پایان سال مذکور نصب می‌شوند. نصب دوباره منابع آسیب‌دیده، محدودیت بودجه و محدودیت میزان قابل‌نصب منابع در سال سوم موجب می‌شوند تا در نهایت ۲ مگاوات توربین بادی و ۴ مگاوات واحد فتولتائیک فارغ از منابع آسیب‌دیده نصب گردند. جدول (۶)، بیانگر وضعیت هر یک از اجزای شبکه مورد مطالعه پس از وقوع زمین‌لرزه در هر سال از افق برنامه‌ریزی می‌باشند. حالت‌های 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 مورد مطالعه به شبکه بالادست، بدترین حالت ممکن پس از وقوع زمین‌لرزه 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 می‌توان 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
صنعتی	۱/۶۲۵	۳/۸۶۸	۹/۰۸۵	۲۵/۱۶
تجاری	۰/۳۸۱	۲/۹۶۹	۸/۵۵۲	۳۱/۳۲
مسکونی	۰/۰۰۱	۰/۰۹۳	۰/۴۸۲	۴/۹۱۴

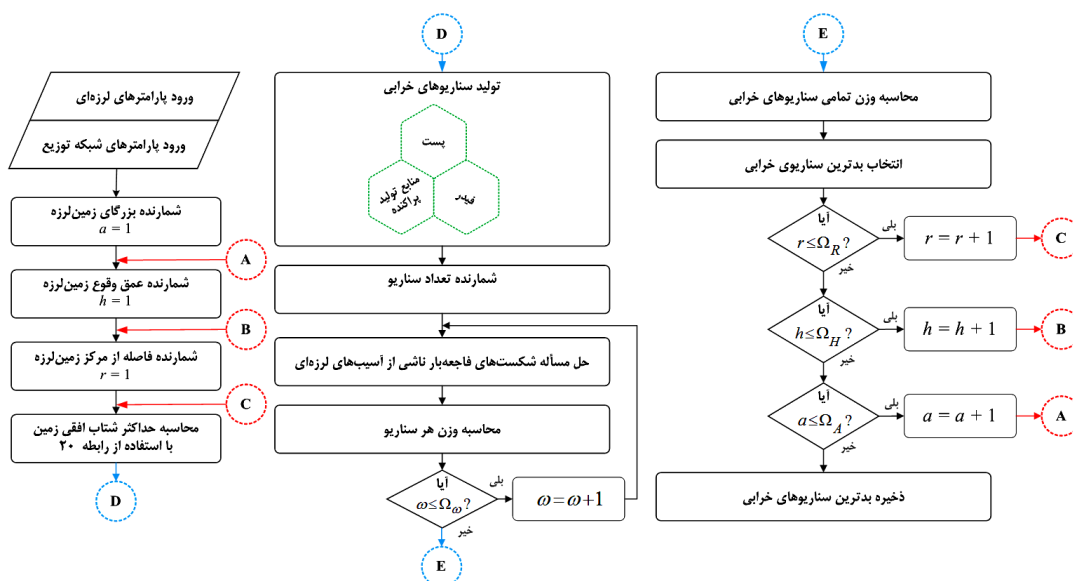
جدول (۲): اطلاعات واحدهای تولید پراکنده در شبکه مورد مطالعه

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

مگاوات به همراه ۱ مگاوات رزرو و برای ذخیره‌سازها ۲ مگاوات ساعت است. هزینه‌های بهره‌برداری و سرمایه‌گذاری و طول عمر منابع به شرح جدول (۲) است. پارامترهای مرتبط با سیستم ذخیره‌ساز 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 ریزشکته به ترتیب برابر ۰/۱۶ و ۰/۱۲ دلار بر کیلووات‌ساعت (Nikmehr & Ravadanegh, 2015) و میزان بودجه سالانه در دسترس نیز برای هر ریزشکته 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 پیاده‌سازی مدل پیشنهادی بر روی سیستم مورد مطالعه به تفصیل تبیین می‌شوند. جدول (۵) نشان‌دهنده طرح‌های تاب‌آور توسعه ریزشکته‌ها در افق برنامه‌ریزی است. شکل (۶) نیز ساختار نهایی ریزشکته‌ها را در پایان افق برنامه‌ریزی نشان می‌دهد. اعداد نشان‌دهنده در بالای هر یک از واحدها بیانگر ظرفیت واحد نصب‌شده به همراه ظرفیت رزرو است. همان‌طور که در جدول (۵) نشان داده شده است، ریزشکته‌ها در سال اول تمایل بالایی به نصب واحدهای فتولتائیک داشته‌اند. دلیل این امر در وهله اول تأثیر بالای واحدهای فتولتائیک و توربین بادی بر سود مشارکت ریزشکته‌ها و در وهله دوم، هزینه پایین نصب واحدها و فتولتائیک در مقایسه با توربین بادی است. در سال دوم با توجه به اینکه حداکثر میزان قابل‌نصب واحدهای فتولتائیک نصب شده است، ریزشکته‌ها تمایل بیشتری جهت نصب منابع توربین بادی به نسبت ذخیره‌سازها دارند که علت این امر تأثیر بالای منابع توربین بادی بر افزایش سود ریزشکته‌ها است. در سال سوم، با توجه به اینکه منابع متعددی پس از وقوع زمین‌لرزه دچار آسیب شده‌اند، لذا این منابع



شکل (۲): روش تولید سناریوی پیشنهادی

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

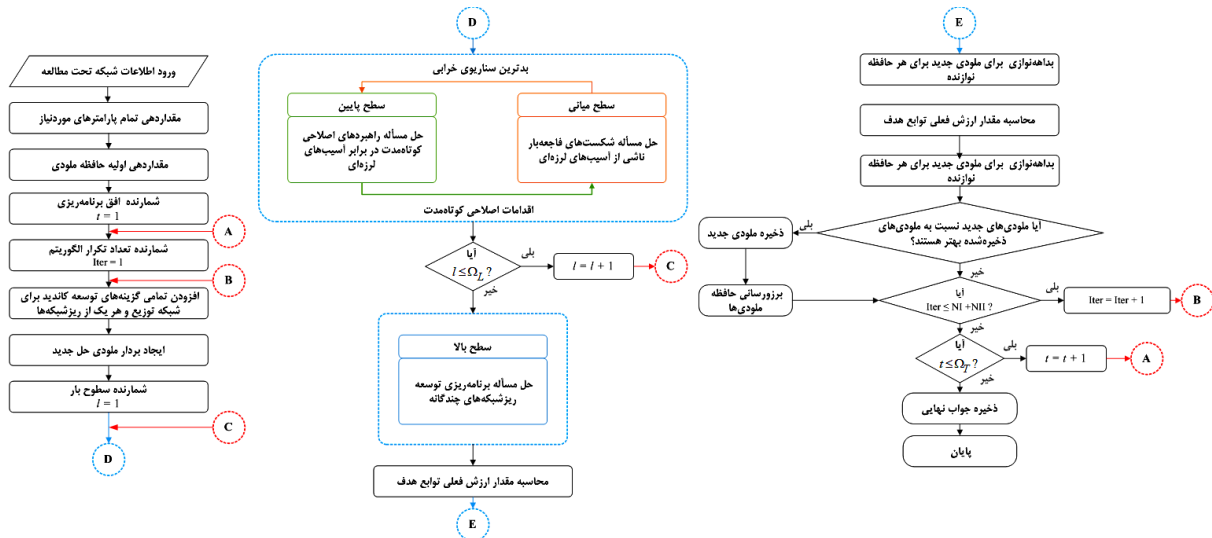
هزینه بهره‌برداری (کیلووات‌ساعت)	هزینه سرمایه‌گذاری (دلار بر کیلووات‌ساعت)	حداکثر SOC - حداقل SOC	مقدار اولیه SOC	راندمان شارژ و دشارژ (سال)	طول عمر (سال)
۰/۰۴	۴۰۰	۱ - ۰/۲	۰/۵	۰/۹۲۲	۱۰

جدول (۴): پارامترهای الگوریتم MSA

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

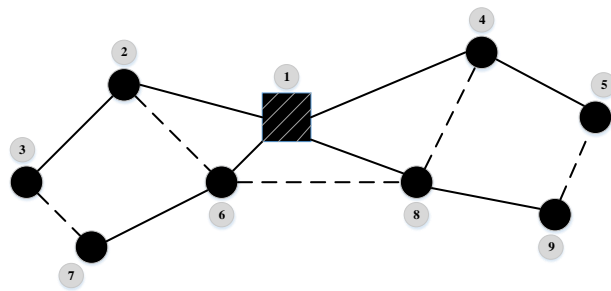


شکل (۳): ساختار بردار حل پیشنهادی



شکل (۴): فلوجارت مسئله طراحی تاب‌آور ریزشیکه‌های چندگانه

نشان داده شده است، هزینه بهره‌برداری تمامی ریزشیکه‌ها در پایان سال دوم بیش از سال اول است که این امر ناشی از افزایش نفوذ منابع انرژی پراکنده در ریزشیکه‌ها است. هزینه‌های بهره‌برداری ریزشیکه‌ها به جزء ریزشیکه ۳، در پایان سال سوم نیز بیشتر یا برابر با سال دوم است. در ریزشیکه ۳ با توجه به نصب واحد ذخیره‌ساز در سال دوم و همچنین، با در نظر گرفتن میزان شارژ/دشارژ متفاوت در پایان سال دوم و سوم، میزان هزینه بهره‌برداری ریزشیکه ۳ در سال دوم بیشتر از سال سوم است. با وجود اینکه افزایش نفوذ منابع انرژی پراکنده هزینه بهره‌برداری بالاتری را بر ریزشیکه‌ها تحمیل می‌کند اما سود حاصل از فروش توان آن‌ها را افزایش می‌دهد. جدول (۱۰) نشان‌دهنده سود مشارکت ریزشیکه‌ها در طول افق برنامه‌ریزی و در هر سطح بار است. همان‌طور که از جدول (۱۰) قابل مشاهده است، در سال اول، ریزشیکه‌ها در مجموع 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 در حالی که 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 ریزشیکه‌ها در مجموع 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.



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

همان‌طور که از جدول (۷) مشهود است، رویکرد پیشنهادی در سطح میانی، بدترین حالت ممکن جریمه ناشی از حذف بار یعنی خروج ۴۸۰ دقیقه‌ای بارها را در نظر گرفته است. جدول (۸) هزینه سرمایه‌گذاری ناشی از طرح‌های توسعه پیشنهادی ریزشیکه‌ها را در پایان هر سال از افق برنامه‌ریزی نشان می‌دهد. همان‌طور که از این جدول قابل مشاهده است، در پایان سال اول ریزشیکه‌ها با هدف بیشینه‌سازی سود خود از تمامی بودجه در دسترس به منظور نصب منابع انرژی پراکنده استفاده نموده‌اند. در سال‌های دوم و سوم نیز ریزشیکه‌ها 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 ریزشیکه‌ها را می‌توان به ازای هر سطح بار در جدول (۹) مشاهده نمود. همان‌طور که در جدول (۹)

جدول (۵): طرح‌های تاب‌آور توسعه ریزشکه‌ها

سال	ریزشکه						
	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
سال اول	۱+۱	۱+۱	۱+۱	۱+۱	۱+۱	۱+۱	۱+۱
سال دوم	۱+۱	۱+۱	۱+۱	۱+۱	۱+۱	۱+۱	۱+۱
سال سوم	۱+۱	۱+۱	۱+۱	۱+۱	۱+۱	۱+۱	۱+۱

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

ریزشکه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
۱	۲/۵	۲/۵	۲/۵	۲/۵	۲/۵	۲/۵	۲/۵
۲	۱/۵	۱/۵	۲/۳	۲/۵	۱/۵	۱/۵	۲/۵
۳	۱/۵	۲	۰/۸	۰/۵	۱/۵	۲	۲/۵

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

ریزشکه‌ها (هزار دلار)

سال	ریزشکه						
	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
۱	۱۹۹/۵	۱۹۹/۵	۱۹۹/۵	۱۹۹/۵	۱۹۹/۵	۱۹۹/۵	۱۹۹/۵
۲	۱۰۲۰	۱۰۲۰	۱۲۰/۱	۸۷۰	۱۰۲۰	۱۰۲۰	۱۰۲۰
۳	۳۴۵/۷	۳۴۵/۷	۳۴۵/۷	۳۴۵/۷	۳۴۵/۷	۳۴۵/۷	۳۴۵/۷

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

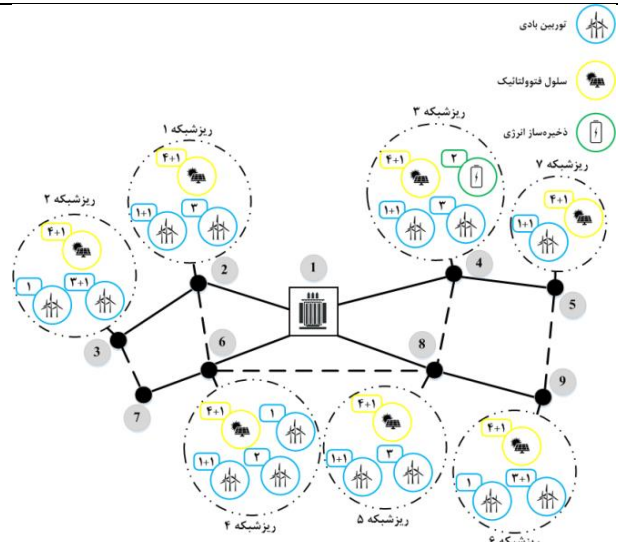
سال	ریزشکه						
	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
۱	-۴۵۵/۳	-۲۳۴/۶	-۴۵۵/۳	۱/۹	-۲۷۷/۱	-۴۵/۳	-۴۵۵/۳
۲	۲۸۱/۸	۲۳۳/۲	۲۸۱/۸	۲۸۱/۸	۲۸۱/۸	۲۸۱/۸	۲۸۱/۸
۳	۸۶/۶	۲۸۱/۸	۲۸۱/۸	۲۸۱/۸	۲۸۱/۸	۲۸۱/۸	۲۸۱/۸

رشد بالای بار مصرفی در مقایسه با رشد منابع انرژی پراکنده باعث شده است تا در سال سوم میزان سود ریزشکه‌ها در مجموع 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 اثربخشی بالاتری نسبت به اقدامات کوتاه‌مدت 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 دارند. در سال‌های دوم و سوم، وقوع زمین‌لرزه باعث شده است در شبکه به ترتیب ۲۶ و ۳۳ مگاوات توربین بادی و سلول فتوولتائیک باقی بماند. رشد بارها در هر سال و کمبود منابع تولیدی پس از وقوع زمین‌لرزه جهت تغذیه این بارها موجب شده است اغلب ریزشکه‌ها حتی پاسخگوی بار خود نیز نباشند، لذا با توجه به اولیوی که ریزشکه‌ها 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

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

سال	ریزشکه						
	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
سال اول	۶۱-۷(F)	-	-	-	-	-	-
سال دوم	۶-۷(F)	-	-	۱۳+۴(P)	-	-	-
سال سوم	۵-۹(F)	۱۰۳(W)	۱۰۴(P)	-	۲(E)	۱+۳(W)	۱۰۴(P)

۱- فیدر بین باس ۶ و ۷، ۲- پست با ظرفیت ۴۰ مگاوات امپر، 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 مورد مطالعه

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

سال	بروز	عمق (کیلومتر)	فاصله سطحی (کیلومتر)	PGA (%)	حذف بار (مگاوات ساعت)	مدت زمان توقف (دقیقه)	زلزل
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 (۱۲): میزان حذف بارهای حساس و غیرحساس پس از اقدامات کوتاه‌مدت در هر سال از افق برنامه‌ریزی

سال	بار تغذیه شده	بار تغذیه نشده	مسکونی تغذیه نشده	تجاری تغذیه نشده	صنعتی تغذیه نشده
۱ پس از زلزله	۵۲٪	۴۸٪	۲۳٪	۱۱٪	۱۴٪
۲ پس از اقدامات	۵۲٪	۴۸٪	۴۷٪	۰/۷۴	۰/۷۶
۳ پس از زلزله	۵۴٪	۴۶٪	۱۹٪	۱۴٪	۱۳٪
۳ 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 ارسال شده 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 توسعه ریزشکه‌های چندگانه با هدف ارتقاء سطح تاب‌آوری شبکه توزیع 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 اعمال نمود. در مسئله سطح میانی، با بهره‌گیری از روش جدید تولید سناریوی و با توجه به رابطه کاهندگی معرفی شده، آسیب‌پذیری تجهیزات شبکه توزیع شامل پست‌ها، فیدرها و منابع انرژی پراکنده مدل‌سازی و بدترین سناریوی آسیب تعیین گردید.

در مسئله سطح بالایی هر یک از بهره‌برداران ریزشکه طرح‌های تاب‌آور توسعه بهینه خود را تحت عنوان اقدامات پیشگیرانه بلندمدت پیشنهاد کردند. چارچوب برنامه‌ریزی پیشنهادی به‌طور موفقیت‌آمیزی بر روی شبکه ۹-باس ۳۳ کیلوولت پیاده‌سازی شد. نتایج شبیه‌سازی حاکی از آن است که اتخاذ اقدامات کوتاه‌مدت مبتنی بر بهره‌برداری پس از وقوع زمین‌لرزه مخرب توسط DNO باعث شده است حذف بارهای حساس صنعتی و تجاری در سال دوم به ترتیب با کاهش ۱۰/۶٪ و ۱۳/۴٪ در سال سوم به ترتیب با کاهش ۱۳٪ و ۱۱٪ همراه باشد. بعلاوه، چارچوب پیشنهادی کمک شایانی برای طراحی شبکه تاب‌آور در برابر مخاطرات لرزه‌ای با توجه به محدودیت‌های بودجه در دسترس کرده است. بر این اساس، طرح‌های توسعه بهینه ریزشکه-ها در پایان سال‌های اول، دوم و سوم، به ترتیب با کاهش ۷۷٪،

کاهش کل حذف بار شبکه ناشی از وقوع زمین‌لرزه نادرند، اما نقش مؤثری در کاهش حذف بارهای حساس (تجاری و صنعتی) در شبکه مورد مطالعه ایفا می‌کنند. مطابق با جدول (۱۲)، پس از وقوع زمین‌لرزه در سال دوم، ۴۸٪ بار شبکه حذف می‌شود که این میزان شامل ۲۳٪ بار مسکونی، ۱۱٪ بار تجاری و ۱۴٪ بار صنعتی است. 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 مسکونی، ۴٪ بار تجاری و ۰/۶٪ بار صنعتی می‌شود. در سال سوم نیز پس از وقوع زمین‌لرزه ۴۶٪ بار شبکه حذف می‌گردد که این میزان شامل ۱۹٪ بار مسکونی، ۱۴٪ بار تجاری و ۱۳٪ بار صنعتی است. پس از اتخاذ اقدامات کوتاه‌مدت مبتنی بر بهره‌برداری، همان‌طور که در جدول (۱۲) نشان داده شده است، این میزان حذف بار برابر با ۴۳٪ بار مسکونی، ۱٪ بار تجاری و ۲٪ بار صنعتی می‌شود. با توجه به نتایج اخذشده، اتخاذ اقدامات کوتاه‌مدت مبتنی بر بهره‌برداری اثر بالایی بر کاهش میزان حذف بارهای حساس دارد.

۵- صحت‌سنجی نتایج

در این بخش، به منظور صحت‌سنجی نتایج، عمل‌کرد مسئله طراحی تاب‌آور پیشنهادی با مدل بیان‌شده در مرجع (Xie et al., 2019) مقایسه می‌شود. در این مرجع، یک مدل بهینه‌سازی دوسطحی به منظور تعیین بهینه اندازه ذخیره‌سازها و با هدف ارتقاء تاب‌آوری و قابلیت اطمینان، بر روی یک شبکه توزیع ۱۰ کیلوولت حاوی ۳ ریزشکه با سطح ولتاژ ۳۸۰ ولت پیاده‌سازی شده است. ریزشکه‌ها به‌طور جداگانه به هر باس شبکه توزیع متصل بوده و دارای DGهای قابل توزیع، غیرقابل توزیع و ذخیره‌ساز هستند. در این مرجع، مدل پیشنهادی خطی‌سازی شده و از طریق روش CPLEX حل شده است. جدول (۱۳) نشان‌دهنده تفاوت‌ها میان مقادیر محاسبه‌شده مربوط به توابع هدف در مسئله طراحی تاب‌آور پیشنهادی و مدل بیان‌شده در مرجع (Xie et al., 2019) است. نتایج ارائه‌شده در جدول (۱۳) بیانگر این واقعیت است 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 دستور MSA در مقایسه با سایر الگوریتم‌های بهینه‌سازی، نتایج مطلوب‌تری را به دنبال داشته است.

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

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

\bar{a} / a	حداقل و حداکثر بزرگای زلزله	۸۷٪ و ۷۰٪ حذف بار شده است. لذا، در مجموع نتایج شبیه‌سازی
$C_{Wd}^{ins} / C_{Pv}^{ins} / C_{St}^{ins}$	هزینه سرمایه‌گذاری توربین بادی/فتوولتائیک/ذخیره‌ساز انرژی	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.
$C_{Wd}^{op} / C_{Pv}^{op} / C_{St}^{op}$	هزینه بهره‌برداری توربین بادی/فتوولتائیک/ذخیره‌ساز انرژی	
CBM	بودجه سرمایه‌گذاری در برنامه‌ریزی سیستم ریزشبکه‌های چندگانه	
DI	مدت زمان سطوح بار	
f_e	ظرفیت شارش فیدر نام شبکه توزیع	
\bar{h} / h	حداقل و حداکثر عمق وقوع زلزله	
$ch-dch$	ماکزیمم توان شارژ و دشارژ مجاز	
P	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	
$\frac{-wd}{P} / \frac{-pv}{P}$	ماکزیمم توان مبادلاتی شبکه اصلی با شبکه بالادست	
$-Sub$	ظرفیت ذخیره‌ساز انرژی	
P		
$-st$		
P		
\bar{r} / r	حداقل و حداکثر فاصله از مرکز زلزله	
SOC / SOC	حالت شارژ ماکزیمم/مینیمم (/)	
η^{ch} / η^{dch}	راندمان شارژ و دشارژ ذخیره‌ساز انرژی	
π / λ	قیمت توان فروخته/خریداری شده به ازای شبکه اصلی	
γ	طول عمر توربین های بادی/فتوولتائیک/ذخیره‌ساز انرژی (سال)	
τ	نرخ بهره	
$\bar{\psi}_E / \bar{\psi}_S / \bar{\psi}_{De}$	حداکثر تعداد فیدرهای/پست‌هایی/منابع انرژی پراکنده که می‌توانند تحت سناریوی آسیب، دچار خرابی شوند.	
متغیرها		
C^B / C^S	هزینه توان خریداری شده/فروخته شده از/به شبکه اصلی	
f	فلوی فیدر شبکه توزیع	
ICM / OCM	هزینه سرمایه‌گذاری/بهره‌برداری در ریزشبکه‌ها	
$P_{iw}^{icap} / P_{iv}^{icap} / P_{ist}^{icap}$	ظرفیت قابل بهره‌برداری توربین بادی/فتوولتائیک/ذخیره‌ساز انرژی نصب شده	
$P_{iw}^{res} / P_{iv}^{res}$	ظرفیت رزرو توربین بادی/فتوولتائیک	
P^B / P^S	توان خریداری شده/فروخته شده از/به شبکه اصلی	
P^{ch} / P^{dch}	توان شارژ/دشارژ ذخیره‌ساز	
P^{wd} / P^{pv}	توان تولیدی توربین بادی/سلول فتوولتائیک	
a, Ω_A	شاخص و مجموعه بزرگای زلزله	
b, Ω_B	شاخص و مجموعه‌ی باس‌های بار	
c, Ω_C	شاخص و مجموعه‌ی بخش‌های بار در هر باس بار	
de, Ω_{De}	شاخص و مجموعه منابع انرژی پراکنده	
e, Ω_E	شاخص و مجموعه فیدرهای شبکه توزیع	
est, Ω_{Est}	شاخص و مجموعه‌ی واحدهای ذخیره‌ساز موجود	
ev, Ω_{EV}	شاخص و مجموعه سلول‌های فتوولتائیک موجود	
ew, Ω_{EW}	شاخص و مجموعه توربین‌های بادی موجود	
g, Ω_G	شاخص و مجموعه بیشینه شتاب افقی زمین	
h, Ω_H	شاخص و مجموعه عمق زلزله	
ist, Ω_{IS}	شاخص و مجموعه‌ی واحدهای ذخیره‌ساز نصب‌شده	
iv, Ω_{IV}	شاخص و مجموعه سلول‌های فتوولتائیک نصب‌شده	
iw, Ω_{IW}	شاخص و مجموعه توربین های بادی نصب‌شده	
l, Ω_L	شاخص و مجموعه سطوح بار	
m, Ω_M	شاخص و مجموعه‌ی ریزشبکه‌ها	
r, Ω_R	شاخص و مجموعه فاصله از مرکز زلزله	
s, Ω_S	شاخص و مجموعه پست‌ها	
st, Ω_{St}	شاخص و مجموعه‌ی واحدهای ذخیره‌ساز	
t, Ω_T	شاخص و مجموعه‌ی مراکز حل افق زمانی برنامه‌ریزی	
v, Ω_V	شاخص و مجموعه سلول‌های فتوولتائیک	
w, Ω_W	شاخص و مجموعه توربین‌های بادی	
$(\omega, \omega'), \Omega_\omega$	شاخص و مجموعه سناریوها برای خرابی پست، فیدر و منابع انرژی پراکنده	
پارامترها		

- 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., Hosseini, 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.

زیر نویس‌ها

- 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

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

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., & Haghdoost, 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.

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)