Iranian Electric Industry Journal
Quality & Productivity
P.P 48-61

Vol. 11/ No. 3/ Fall 2022
ISSN 2322-2344
eISSN 2717-1639

Simultaneous Hardening Planning of Lines and Substations for Resilience Enhancement of Electric Power Distribution System against Dust Storms

Morteza Haghshenas[1], PhD Student, Rahmat-Allah Hooshmand[2], Professor, Mehdi Gholipour[3], Associate Professor

1- Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran.
Email: Haghshenas@eng.ui.ac.ir
2- Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran.
Email: Hooshmand_R@eng.ui.ac.ir
3- Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran.
Email: E.Gholipour@eng.ui.ac.ir

Abstract:

Resilience characteristics in power systems refer to the system's ability to withstand against severe disturbances with a low probability of occurrence. As extreme dust storms in the south and southwest in recent years have caused heavy damage to the IRAN's electricity industry, in this paper, a bi-level planning model is proposed to simultaneous hardening of distribution lines and substations against this phenomenon. In the first and second levels of the proposed model, the investment costs of distribution system hardening and total expected operating costs are minimized subject to financial and operational constraints, respectively. The planning results in different case studies have shown that the simultaneous hardening planning of substations and distribution lines can, in addition to reducing operating costs in the emergency conditions, play a significant role in reducing investment costs. The proposed model is implemented on a large-scale power distribution system in Khuzestan province, and the simulation results confirm the efficiency of the proposed scheme at different budget levels.

Keywords: Extreme dust storms, Dust, Insulators flashover, Resilience, Mixed integer linear programming.

Submit date: 2021/10/12
Accepted date: 2022/06/20

Corresponding author: Dr. Rahmat-Allah Hshmand
Corresponding author address: Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.3.2.8]

Iranian Electric Industry Journal
Quality & Productivity
ص.ص ۶۱-۴۸

Vol. 11 / No. 3/ Fall 2022
ISSN 2322-2344
EISSN 2717-1639

برنامه‌ریزی تقویت همزمان خطوط و پست‌ها با هدف افزایش تاب‌آوری سیستم توزیع انرژی الکتریکی در مقابل طوفان‌های گرد و غبار

نوع مطالعه: پژوهشی

مرتضی حق‌شناس[۱]، دانشجوی دکتری، رحمت‌الله هوشمند[۲]، استاد، مهدی قلی‌پور[۳]، دانشیار

۱- دانشکده فنی و مهندسی- گروه مهندسی برق- دانشگاه اصفهان- اصفهان- ایران.
Haghshenas@eng.ui.ac.ir
۲- دانشکده فنی و مهندسی- گروه مهندسی برق- دانشگاه اصفهان- اصفهان- ایران.
Hooshmand_R@eng.ui.ac.ir
۳- دانشکده فنی و مهندسی- گروه مهندسی برق- دانشگاه اصفهان- اصفهان- ایران.
E.Gholipour@eng.ui.ac.ir

چکیده: ویژگی تاب‌آوری در سیستم‌های قدرت به قابلیت‌های سیستم در مقابله با اغتشاشات شدید با احتمال رخداد کم اشاره دارد. از آنجا که در چند سال اخیر ریزگردها و طوفان‌های گرد و غبار شدید در مناطق جنوب و جنوب غرب خسارت‌های سنگینی را به صنعت برق کشور تحمیل کرده است، در این مقاله یک مدل برنامه‌ریزی دوسطحی برای تقویت همزمان خطوط و پست‌های توزیع در مقابل این پدیده پیشنهاد شده است. در سطوح اول و دوم مدل پیشنهادی به ترتیب هزینه‌های سرمایه‌گذاری برای تقویت سیستم توزیع و هزینه‌های بهره‌برداری مورد انتظار از آن در شرایط وقوع طوفان گرد و غبار در چارچوب محدودیت‌های مالی و عملیاتی سیستم حداقل می‌گردند. نتایج برنامه‌ریزی در موارد مطالعاتی مختلف نشان داده است که برنامه‌ریزی تقویت همزمان پست‌ها و خطوط توزیع می‌تواند علاوه بر کاهش هزینه‌های بهره‌برداری در شرایط حادثه، نقش قابل ملاحظه‌ای در کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری برای افزایش تاب‌آوری سیستم توزیع در مقابل طوفان‌های گرد و غبار داشته باشد. نتایج شبیه‌سازی و مطالعات عددی بر روی یک شبکه توزیع فشار متوسط با ابعاد بزرگ واقع در استان خوزستان، کارایی روش پیشنهادی را در سطوح مختلف بودجه تایید کرده است.

واژه های کلیدی: طوفان‌های گرد و غبار شدید، ریزگرد، شکست عایقی، تاب‌آوری، برنامه‌ریزی خطی آمیخته با عدد صحیح.

تاریخ ارسال مقاله : ۱۴۰۰/۰۷/۲۰

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۴۰۱/۰۳/۱۱

نام نویسنده‌ی مسئول : دکتر رحمت‌الله هوشمند

نشانی نویسنده‌ی مسئول : ایران – اصفهان – خیابان هزار جریب – دانشگاه اصفهان – دانشکده‌ی فنی و مهندسی.

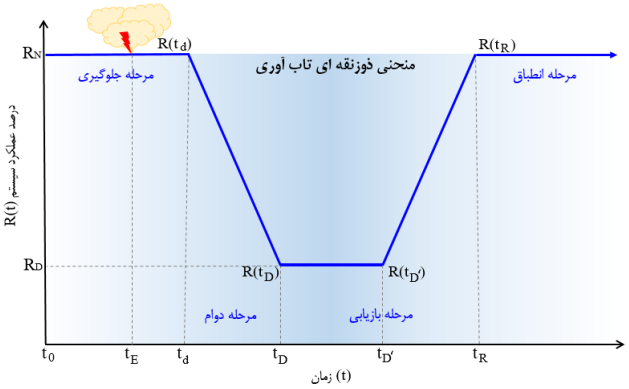
[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.3.2.8]

۱- مقدمه

سیستم‌های توزیع انرژی الکتریکی به عنوان یکی از زیرساخت‌های حیاتی الزاماً به گونه‌ای طراحی می‌شوند که معیارهای کلیدی قابلیت اطمینان از جمله امنیت[۱] و کفایت[۲] را دارا باشند (NERC 2021). این در حالی است که در سال‌های اخیر افزایش نرخ وقوع و شدت حوادث طبیعی با احتمال کم و اثر زیاد عملکرد این سیستم‌ها را تحت تأثیر قرار داده است (Gritzalis et al. 2019). بین سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۲، ۶۷۹ خاموشی گسترده برق با منشأ حوادث طبیعی در ایالات متحده گزارش شده است (Gholami et al. 2018). در سال ۲۰۱۷ وقوع ۱۶ حادثه آب و هوایی شدید در ایالات متحده بالاترین رکورد سالانه بوده که در مجموع بیش از ۳۰۰ میلیارد دلار خسارت به همراه داشته است (Chen et al. 2021). در ایران، طوفان شدیدی که در سال ۱۳۹۴ در شهر تهران رخ داد باعث آسیب به ۶۵ سکشن ۲۰ کیلوولت شده و با خسارتی بالغ بر ۱۶ میلیون دلار، بیش از ۵۰ هزار مشترک تهرانی را دچار قطعی برق کرده است. سیل‌های جاری شده در ابتدای سال ۱۳۹۸ با آسیب جدی به شبکه‌های توزیع برق، علاوه بر تعدادی از شهرهای بزرگ، ۲۳۵۲ روستا را در شمال و غرب کشور تا چند روز دچار قطعی برق کرده است. در بهمن‌ماه سال ۱۳۹۵ خارج شدن تعداد زیادی از پست‌ها و خطوط شبکه استان خوزستان از مدار، به علت طوفان گرد و غبار شدید و رطوبت بالای هوا، بیش از ۹۰ درصد مشترکان در ۱۱ شهر این استان را بی برق کرده و به دنبال آن از کار افتادن سایر زیرساخت‌های شهری زندگی روزمره مردم را تا چند روز از حالت عادی خارج کرده است (Khajeheian et al. 2018). این در حالی است که با افزایش تاب‌آوری[۳] سیستم‌های توزیع در مقابل حوادث شدید، می‌توان میزان آسیب‌پذیری آنها را کاهش داد و به طور قابل ملاحظه‌ای از خسارت‌های مالی و پیامدهای اجتماعی ناشی از قطعی گسترده برق جلوگیری نمود. در حالت کلی، ویژگی تاب‌آوری در سیستم‌های توزیع میزان استقامت[۴]، آسیب‌پذیری[۵] و برگشت‌پذیری[۶] سیستم را در برابر یک حادثه شدید نشان می‌دهد (Aminifar et al. 2018). برای ارزیابی میزان تاب‌آوری سیستم‌های توزیع ابتدا باید شاخص‌های کمی برای توصیف این ویژگی تعریف و محاسبه گردد. این شاخص می‌تواند بار تأمین شده سیستم، ارزش بارهای باقی‌مانده در شبکه و یا تعداد تجهیزات سالم و برقدار سیستم پس از حادثه شدید باشد (Jufri et al. 2019). در این راستا، مفهوم ذوزنقه تاب‌آوری مطابق شکل (۱) با هدف ارزیابی و تحلیل تاب‌آوری سیستم‌های قدرت در (Panteli et al. 2017) توسعه داده شده است.

در شکل (۱)، t_0 زمانی است که بهره‌بردار سیستم در راه بودن یک حادثه شدید را پیش‌بینی کرده و اقدامات پیشگیرانه را با هدف کاهش آسیب‌پذیری سیستم توزیع در مقابل آن حادثه آغاز می‌کند. پارامتر t_E زمان وقوع حادثه است و بازه زمانی t_0 تا t_E بسته به نوع حادثه، می‌تواند از چند ثانیه تا چند ساعت متغیر باشد. t_d زمانی است که اولین خرابی پس از وقوع حادثه در سیستم گزارش می‌شود. در ادبیات تاب‌آوری، بازه زمانی t_0 تا t_d تحت عنوان مرحله جلوگیری[۷] شناخته می‌شود (Aminifar et al. 2018). بازه زمانی t_E تا t_d بیانگر زمانی است که سیستم در مقابل اغتشاش ایجاد شده استقامت خواهد کرد. با افزایش شدت اغتشاش، کاهش تدریجی شاخص عملکرد سیستم از زمان t_d آغاز شده و تا زمان استقرار وضعیت در شرایط جدید (t_D) ادامه خواهد داشت. مرحله بازیابی سیستم پس از استقرار شرایط در وضعیت پس از حادثه آغاز می‌شود و تا زمان رسیدن عملکرد سیستم به حالت اولیه (t_R) ادامه خواهد داشت. بسته به نوع حادثه و محدودیت منابع، ممکن است فرآیند بازیابی با یک تأخیر زمانی (در $t_{D'}$) آغاز گردد. در نهایت، پس از بازیابی کامل سیستم نتایجی حاصل می‌شود که در مرحله انطباق[۸] از آنها در تخصیص بهینه منابع و توسعه فناوری‌های جدید برای افزایش استقامت، توانمندی و سرعت بازیابی سیستم قبل از وقوع حوادث مشابه در آینده استفاده می‌گردد.



شکل (۱): مفهوم ذوزنقه تاب‌آوری بر اساس تغییرات شاخص عملکرد سیستم توزیع در شرایط وقوع حوادث شدید.

در حالت کلی، اقداماتی که در راستای بهبود تاب‌آوری سیستم‌های توزیع انرژی انجام می‌گیرد به دو حوزه برنامه‌ریزی و بهره‌برداری قابل تفکیک است. اقدامات حوزه بهره‌برداری معمولاً شامل اقدامات پیشگیرانه (Arab et al. 2015; Amirioun et al. 2018) و اقدامات مربوط به بازیابی سیستم پس از حوادث شدید (Gao et al. 2017; Arif et al. 2018) است. این در حالی است که اقدامات حوزه برنامه‌ریزی عمدتاً بر مدیریت سرمایه‌ها و نحوه توزیع آن‌ها در سیستم تمرکز دارند (Wu et al. 2016; Lin et al. 2018; Yamangil et al. 2015; Ma et al. 2018; Ma et al. 2019). در این راستا، تکنیک‌های مدل‌سازی و حل مسائل برنامه‌ریزی بهبود تاب‌آوری به دو دسته برنامه‌ریزی مقاوم و برنامه‌ریزی تصادفی تفکیک می‌شوند. در رویکرد برنامه‌ریزی مقاوم، اقدامات صورت گرفته برای مقابله با بدترین شرایط ناشی از وقوع حادثه انجام خواهد گرفت (Wu et al. 2016; Lin et al. 2018). در روش‌های مبتنی بر برنامه‌ریزی تصادفی، حادثه و عواقب ناشی از آن به صورت پدیده‌های احتمالی مدل می‌گردد و کلیه تصمیم‌گیری‌ها بر پایه سناریوهای احتمالاتی و توابع توزیع احتمال استوار است. در این راستا، در (Yamangil et al. 2015) یک مدل برنامه‌ریزی خطی آمیخته با عدد صحیح[۹] (MILP) برای افزایش تاب‌

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.3.2.8]

آوری سیستم توزیع ارائه شده که در آن اثر خرابی تجهیزات تقویت شده نیز لحاظ شده است. در (Ma et al. 2018) یک مدل تصادفی دو سطحی برای تقویت خطوط توزیع ارائه شده که در سطوح اول و دوم آن به ترتیب هزینه‌های سرمایه‌گذاری و هزینه‌های مورد انتظار در بهره‌برداری از سیستم توزیع در مقابل تندباد حداقل می‌گردد. در این مدل بسیاری از ایرادات (Yamangil et al. 2015) از جمله عدم قطعیت در خرابی خطوط برطرف شده است. در (Ma et al. 2019) برنامه‌ریزی تقویت خطوط توزیع به صورت یک مسأله سه سطحی با اهداف حداقل هزینه‌های سرمایه‌گذاری، حداکثر میزان آسیب‌پذیری خطوط در مقابل طوفان و حداقل هزینه حذف بار مدل‌سازی و حل شده است. این در حالی است که در (Ma et al. 2018; Ma et al. 2019) احتمال خرابی خطوط تقویت شده معادل درصدی از احتمال خرابی خطوط تقویت نشده در نظر گرفته شده است. در حالی که در (Haghshenas et al. 2022) نشان داده شده است که در حوادث با شدت مختلف، احتمال خرابی تجهیزات تقویت شده ضریب ثابتی از احتمال خرابی تجهیزات تقویت نشده نیست و این فرض می‌تواند نتایجی دور از واقعیت به همراه داشته باشد.

در روش‌های مرور شده، برای برنامه‌ریزی افزایش تاب‌آوری سیستم‌های توزیع در مقابل حوادث شدید تنها تقویت خطوط شبکه مورد توجه محققین قرار گرفته است. این در حالی است که در سیستم‌های توزیع به علت ساختار شعاعی شبکه، معمولاً فاصله بین خطوط و پست‌های توزیع کوتاه است. لذا با توجه به ذات حوادث شدید با احتمال کم و اثر زیاد که معمولاً عملکرد مجموعه‌ای از سیستم‌ها را در یک محدوده وسیع تحت تأثیر قرار می‌دهند، ایجاد آسیب‌های همزمان در خطوط و پست‌های توزیع در شرایطی که تنها خطوط شبکه در مقابل حوادث شدید تقویت شده‌اند دور از ذهن نیست.

طوفان‌های گرد و غبار شدید، از جمله حوادث طبیعی هستند که به علت تغییر اقلیم در سال‌های اخیر نرخ وقوع آنها به طور قابل ملاحظه‌ای در منطقه غرب آسیا و خاور میانه افزایش یافته است (Rashki et al. 2021). علاوه بر اثرات اقتصادی و اجتماعی ناشی از این پدیده، تا کنون چندین گزارش از اثرات مخرب این پدیده بر عملکرد سیستم‌های قدرت در مصر، عربستان سعودی، عراق و ایران منتشر شده است (Hamza et al. 2002; Ghureshi et al. 1994; Meibodi et al. 2015). در ۲۳ بهمن‌ماه ۱۳۹۵ یک طوفان گرد و غبار با سرعت بیش از ۶۰ کیلومتر بر ساعت مرکز استان خوزستان و تعدادی از شهرهای اطراف آن را در نوردید. در این طوفان، رسیدن غلظت ذرات ریزگرد به بیش از ۶۶ برابر حد مجاز و البته رطوبت بیش از ۹۸٪ در آن منطقه، علاوه بر لغو کلیه پروازها و منع تردد در مسیرهای بین شهری، منجر به قطعی گسترده برق و در پی آن از کار افتادن سایر زیرساخت‌های وابسته به برق از جمله شبکه‌های آبرسانی و سیستم‌های مخابراتی شده است. در این حادثه‌ی نادر، خروج پنج نیروگاه بزرگ استان از مدار تولید، خاموشی تعدادی از پست‌های اصلی شبکه توزیع و آسیب دیدن ۴۲۸۴ کیلومتر از خطوط شبکه باعث از دست رفتن بیش از ۱۶٫۸ گیگاوات ساعت از بار شبکه در ۱۱ شهر این استان شده و پس از بسیج نیروها و تجهیزات از تمام نقاط کشور، بازیابی سیستم به شرایط اولیه در برخی مناطق تا چند روز طول کشیده است (Khajeheian et al. 2018). این در حالی است که با توجه به احتمال تکرار این حادثه در نواحی جنوب و جنوب غرب کشور، تا کنون هیچ تلاشی در زمینه مدل‌سازی این حادثه و ارائه راهکارهای عملیاتی برای افزایش تاب‌آوری سیستم‌های توزیع در مقابل طوفان‌های گرد و غبار انجام نشده است.

در این مقاله یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی سناریو محور مبتنی بر راهکارهای عملی برای افزایش تاب‌آوری سیستم‌های توزیع در مقابل طوفان‌های گرد و غبار پیشنهاد شده است که در آن تقویت خطوط و پست‌های توزیع بصورت همزمان انجام می‌گیرد. از آنجا که کانون آسیب‌پذیری سیستم توزیع در مقابل ریزگردها، مقره‌ها و تجهیزات عایقی در خطوط توزیع و پست‌های روباز با عایق هوا[10] (AIS) هستند، اقدامات پیشنهادی برای افزایش تاب‌آوری در مقابل این پدیده هم شامل راهکارهای تقویت سیستم توزیع با هدف کاهش احتمال وقوع تخلیه الکتریکی در مقره‌ها و تجهیزات عایقی سیستم توزیع است و هم شامل اقداماتی است که می‌تواند در شرایط عملیاتی از افت شدید شاخص عملکرد سیستم و بروز خسارت‌های سنگین جلوگیری کند.

۲- اثر طوفان‌های گرد و غبار شدید بر عملکرد سیستم توزیع انرژی الکتریکی

طبق تعریف سازمان جهانی هواشناسی، یک طوفان گرد و غبار شدید حجم عظیمی از بادرفت‌ها در اثر جریان‌های متلاطم جوی است که در آن قطر ذرات ریزگرد معلق در هوا بین ۰/۰۵ تا ۰/۱ میلی‌متر می‌باشد. در این شرایط میزان دید افقی به کمتر از هزار متر محدود شده و ذرات گرد و غبار که بصورت عمودی ترکیب شده و در حرکت‌اند ممکن است تا ارتفاع چند کیلومتر بالا بروند و در بعد افقی مسافت‌های تا چند صد کیلومتر را طی کنند (UNEP 2016). فرونشست ذرات ریزگرد بر روی سطح مقره‌های خطوط و تجهیزات عایقی پست‌های AIS در مسیر حرکت توده‌های گرد و غبار به عنوان اولین شرط لازم برای وقوع خاموشی، می‌تواند خاصیت عایقی مقره‌ها را کاهش داده و موجبات تخلیه الکتریکی در این تجهیزات را فراهم نماید. اهمیت این موضوع زمانی در سیستم‌های قدرت قوت می‌گیرد که توده‌های ریزگرد خود را به مناطقی برسانند که در آن رطوبت هوا به شدت زیاد است. در این شرایط لایه حاصل از ترکیب ذرات گرد و غبار و قطرات شبنم حاصل از رطوبت زیاد بر روی سطح مقره‌ها، شرایط برقراری مسیر جرقه و ایجاد یک کانال قوس الکتریکی بر روی سطح خارجی مقره را فراهم می‌کند.

با توجه به توزیع غیریکنواخت انتشار ذرات گرد و غبار در جریان‌های متلاطم جوی، مدل‌سازی دقیق فرونشست ذرات گرد و غبار بر

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.3.2.8]

روی مقره‌های سیستم قدرت یک چالش مهم در ارزیابی اثر این پدیده بر روی عملکرد تجهیزات عایقی سیستم توزیع است. از اینرو، به منظور پایش وضعیت مقره‌ها در سیستم‌های قدرت معمولاً از روش‌هایی مانند اندازه‌گیری جریان نشتی و چگالی رسوب نمک معادل[11] (ESDD) استفاده می‌گردد. ESDD معیاری برای تعیین شدت آلودگی سطح مقره‌ها در سیستم قدرت است که می‌توان به کمک آن میزان رسانایی سطحی یک مقره را در شرایط محیطی مختلف محاسبه نمود. در (Shariati et al. 2005)، مقادیر ESDD در ۳۰ ایستگاه نصب شده برای سنجش آلودگی مقره‌ها در استان خوزستان اندازه‌گیری شده و این منطقه از نظر شدت آلودگی مقره‌ها پهنه‌بندی شده است.

در (Shariatinasab et al. 2020) یک روش احتمالاتی برای مدل‌سازی شرایط محیطی و محاسبه احتمال تخلیه الکتریکی در مقره‌ها بر اساس شدت آلودگی سطح مقره و میزان رطوبت هوا توسعه یافته است. در این روش که مبتنی بر شبیه‌سازی مقره به روش اجزاء محدود است، برای شبیه‌سازی آلودگی مقره‌ها در اثر طوفان گرد و غبار، یک لایه خارجی با ضخامت ۲ میلی‌متر بطور یکنواخت روی سطح مقره‌ها ایجاد شده است. این لایه خارجی در سطوح مختلف رطوبت هوا و آلودگی دارای مشخصات متفاوتی است، بطوریکه می‌توان با تغییر ضریب رسانایی مربوط به آن اثر شرایط محیطی مختلف را در توزیع ولتاژ روی سطح مقره شبیه‌سازی نمود. در این فرآیند برای محاسبه توزیع میدان روی سطح مقره در یک شرایط مشخص، از معادلات ماکسول به صورت الکترواستاتیکی استفاده می‌شود که جزئیات آن در (Shariatinasab et al. 2020; Arshad et al. 2017) در دسترس است. در این معادلات شرایط مرزی شامل پتانسیل معلوم الکترود فاز و پتانسیل صفر برای الکترود زمین مقره است. در حالت کلی وقوع تخلیه الکتریکی در مقره در اثر زیاد شدن شدت آلودگی (ESDD) و رطوبت هوا زمانی رخ می‌دهد که جرقه از مجاورت الکترود فاز شروع شود و پیشروی آن تا الکترود زمین ادامه داشته باشد. از اینرو، تئوری مورد استفاده در این روش برای محاسبه احتمال تخلیه الکتریکی در مقره‌ها مبتنی بر مقایسه گرادیان ولتاژ بین دو نقطه دلخواه روی سطح مقره با استقامت الکتریکی معادل هوا بین همان دو نقطه در مقادیر مختلف ESDD و رطوبت هوا می‌باشد. بر این اساس، برای محاسبه احتمال تخلیه الکتریکی در یک مقره، ابتدا نحوه توزیع ولتاژ روی سطح خارجی آن در شرایط محیطی مختلف شبیه‌سازی شده و سپس اختلاف ولتاژ بین هر نقطه مانند x روی سطح مقره با تمامی نقاط اطراف آن که شرایط وقوع جرقه بین آنها وجود دارد محاسبه می‌گردد. در نهایت، تمامی نقاطی که نسبت به نقطه x دارای گرادیان ولتاژ بیشتر از استقامت الکتریکی هوا هستند، به عنوان نقاط احتمالی برای پیشروی بعدی جرقه درنظر گرفته می‌شوند و فرآیند فوق برای آنها تکرار می‌گردد. با تکرار این فرآیند برای کلیه نقاط، در صورتی که مسیر پیشروی جرقه در امتداد طول مقره از الکترود فاز تا الکترود زمین ادامه پیدا کند، تخلیه الکتریکی کامل[12] رخ خواهد داد. این در حالی است که با توجه به ماهیت تصادفی جرقه و پارامترهای محیطی اطراف آن، در برخی از نقاط مسیر پیشروی جرقه بین دو الکترود فاز و زمین کامل نشده و اتصال کوتاهی رخ نمی‌دهد. بنابراین احتمال وقوع تخلیه الکتریکی (P) برای یک مقره در سطوح آلودگی ESDD و رطوبت h توسط رابطه (۱) تعیین می‌گردد. نحوه شبیه‌سازی اثر آلودگی ناشی از طوفان گرد و غبار و رطوبت هوا بر احتمال تخلیه الکتریکی مقره‌ها به همراه الگوریتم تعیین وضعیت آسیب خطوط در (Haghshenas et al. 2022) ارائه شده است.

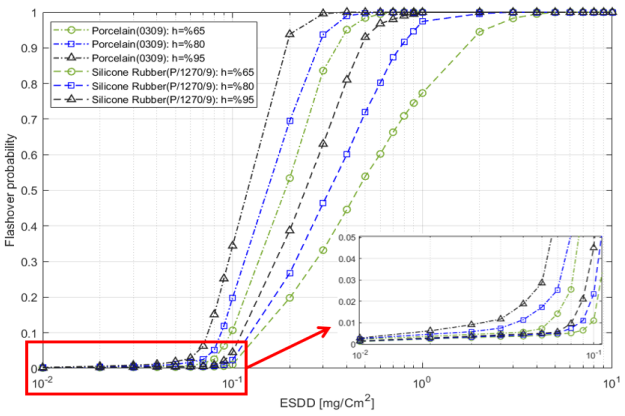
$$P\big|_{esdd,h} = \frac{N_{arc}}{N_{total}} \qquad (۱)$$

که در آن N_{arc} تعداد دفعات شبیه‌سازی منتهی شده به تخلیه الکتریکی کامل و N_{total} تعداد کل شبیه‌سازی‌های انجام شده است.

در این مقاله، دو نمونه مقره سرامیکی و سیلیکونی با مشخصات ارائه شده در جدول (۱) به عنوان مبنای مطالعات آسیب‌پذیری خطوط توزیع انتخاب شده و با حفظ کلیت مسأله فرض شده است که مشخصه آسیب‌پذیری سایر تجهیزات عایقی در خطوط و پست‌های AIS در مقابل شرایط محیطی، مشابه مقره‌های خطوط توزیع است. نتایج شبیه‌سازی و محاسبه احتمال تخلیه الکتریکی برای مقره‌های سرامیکی و سیلیکونی بر حسب میزان ESDD در سطوح مختلف رطوبت هوا در شکل (۲) نشان داده شده است.

جدول (۱): مشخصات مقره‌ها در سیستم مورد مطالعه.

جنس مقره	سرامیکی مدل 0309 (Iran-Insulator 2021)	سیلیکونی مدل P/1270/9 (BSA 2021)
شرکت سازنده:	شرکت مقره‌سازی ایران	شرکت بسپار سازه الوند
نوع مقره:	اتکایی با پین گالوانیزه	اتکایی‌با فیتینگ آلومنیوم
تعداد چترک:	۳ چترک با نمایه متناوب	۹ چترک با نمایه متناوب
فاصله خزشی:	۸۶۴ میلیمتر	۱۲۷۰ میلیمتر
ولتاژ نامی:	۳۶ کیلوولت	۳۶ کیلوولت
طول مقره:	۳۸۸ میلیمتر	۴۹۰ میلیمتر
استاندارد:	IEC61952	IEC61952



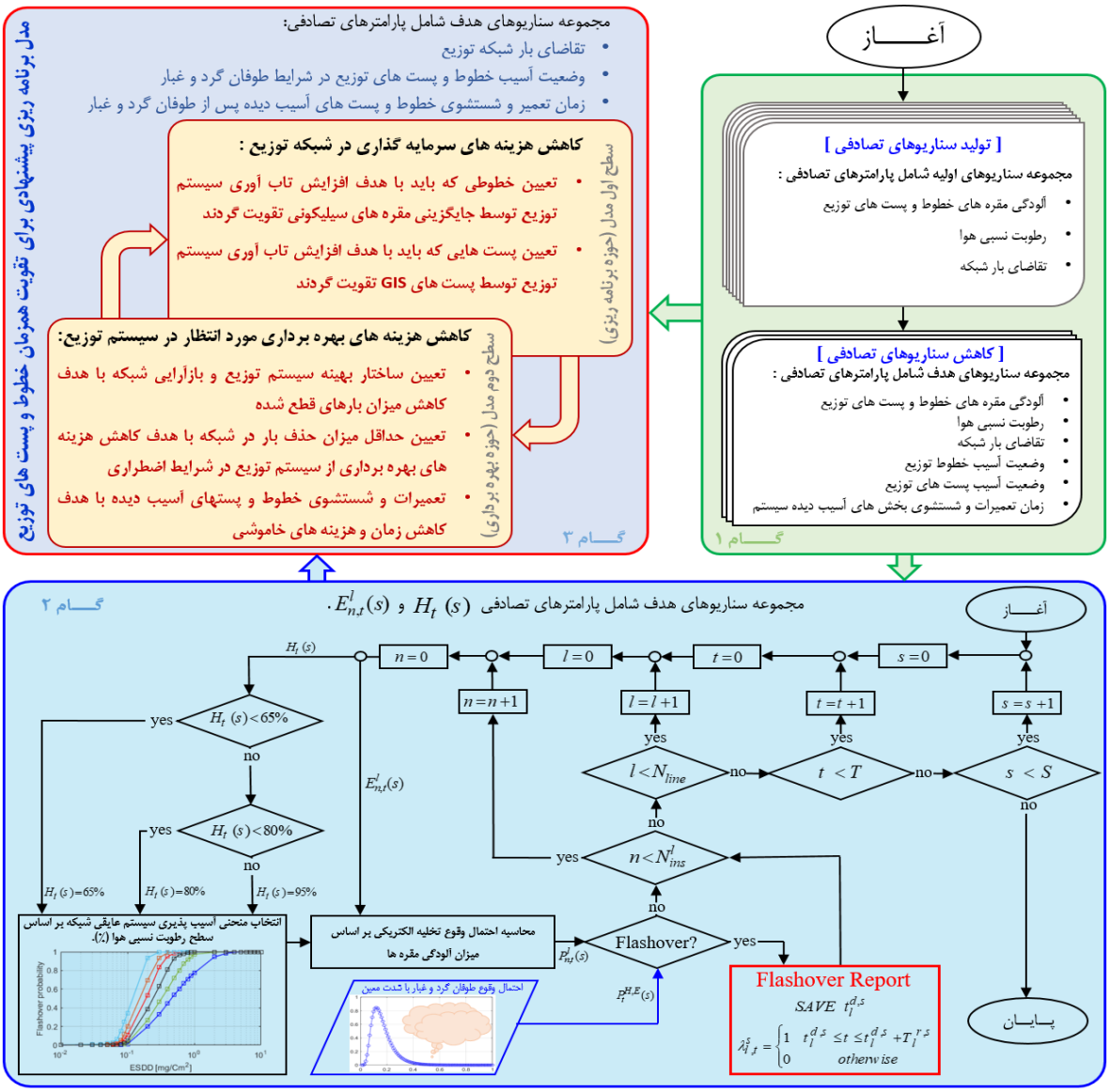
شکل (۲): احتمال تخلیه الکتریکی در مقره‌های سرامیکی و سیلیکونی در سطوح مختلف رطوبت و ESDD.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.3.2.8]

۳- مدل برنامه‌ریزی پیشنهادی برای تقویت همزمان پست‌ها و خطوط توزیع انرژی

در این مقاله یک مدل برنامه‌ریزی دوسطحی در چارچوب روش برنامه‌ریزی تصادفی برای تقویت همزمان خطوط و پست‌های توزیع با هدف افزایش تاب‌آوری سیستم توزیع در مقابل طوفان‌های گرد و غبار شدید پیشنهاد شده است. در روش پیشنهادی که روند پیاده‌سازی آن در شکل (۳) ارائه شده است، پس از شبیه‌سازی اثر آلودگی ناشی از طوفان‌های گرد و غبار بر روی احتمال تخلیه الکتریکی در تجهیزات عایقی سیستم توزیع، در گام اول سناریوهای تصادفی با هدف پوشش تمام حالت‌های ممکن و کاهش عدم قطعیت در نتایج برنامه‌ریزی تولید شده و تعداد آنها به منظور کاهش حجم محاسبات کاهش می‌یابد. در روش پیشنهادی، فرآیند تولید و کاهش سناریو در دو مرحله انجام شده است. در مرحله اول برای هر یک از متغیرهای تصادفی بار، رطوبت هوا و آلودگی مقره‌ها ۱۰۰۰ سناریو مستقل تولید شده و سپس تعداد آنها توسط الگوریتم کاهش سناریو بازگشتی (Xu et al. 2017) به ۱۰ سناریو کاهش داده شده است. سپس، به منظور پوشش تمام حالت‌های ممکن، این سناریوها ترکیب شده و ۱۰۰۰ بردار سناریوی حاصل مجدداً توسط الگوریتم بازگشتی به ۱۰ بردار سناریو کاهش می‌یابند. بطوریکه هر بردار سناریو شامل مولفه‌های تغییرات بار، تغییرات رطوبت و تغییرات آلودگی مقره‌ها خواهد بود. بدیهی است که در این روش، احتمال وقوع هر بردار سناریو، معادل حاصل ضرب احتمال وقوع مولفه‌های تشکیل دهنده آن خواهد بود.

در گام دوم، میزان آسیب‌پذیری تجهیزات عایقی سیستم در هر سناریو هدف و وضعیت شکست عایقی مقره‌ها در خطوط شبکه و پست‌های توزیع تعیین خواهد شد. در این راستا، برای محاسبه احتمال تخلیه الکتریکی در مقره‌ها در هر سناریو، ابتدا میزان رطوبت هوا در هر ساعت اندازه‌گیری شده و با توجه به مقدار آن، منحنی احتمال تخلیه الکتریکی مقره در آن سطح رطوبت انتخاب می‌گردد.



شکل (۳): چارچوب کلی روش پیشنهادی و الگوریتم تعیین وضعیت آسیب خطوط در شرایط طوفان گرد و غبار.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.3.2.8]

پس از تعیین منحنی تخلیه الکتریکی بر اساس سطح رطوبت، برای هر مقره با توجه به میزان ESDD آن، احتمال تخلیه الکتریکی محاسبه می‌گردد و مقدار این احتمال با احتمال وقوع طوفان گرد و غبار در شکل (۲) مقایسه می‌شود. در صورت بزرگتر بودن احتمال تخلیه الکتریکی از احتمال وقوع طوفان گرد و غبار با همان شدت ESDD، برای مقره تخلیه‌الکتریکی گزارش می‌گردد و در غیر اینصورت فرض بر این است که در آن ساعت مقره آسیب ندیده و محاسبات برای ساعت‌های بعدی تکرار می‌گردد. این فرآیند یک بار بطور مستقل برای شبکه با مقره‌های سرامیکی و یک بار برای شبکه با مقره‌های سیلیکونی اجرا می‌شود و نتایج آسیب خطوط برای آنها ذخیره می‌گردد. بطور مشابه، فرآیند فوق برای تعیین وضعیت آسیب پست‌های توزیع اجرا می‌گردد. بدیهی است که هر چه تعداد مقره‌ها در یک خط یا پست توزیع بیشتر باشد، احتمال آسیب آن بخش در طوفان گرد و غبار نیز بیشتر است. این نتایج به عنوان مبنای برنامه‌ریزی بهبود تاب‌آوری سیستم توزیع در گام سوم مورد استفاده قرار خواهند گرفت.

در گام سوم برنامه‌ریزی بهبود تاب‌آوری سیستم توزیع با توجه به محدودیت‌های مالی و عملیاتی سیستم اجرا می‌گردد. در مدل پیشنهادی برای برنامه‌ریزی بهبود تاب‌آوری سیستم توزیع، سطح اول برنامه با هدف کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری و سطح دوم با هدف کاهش هزینه‌های مورد انتظار در بهره‌برداری از سیستم توزیع در شرایط وقوع طوفان گرد و غبار طراحی شده است. از اینرو نحوه تعامل بین سطوح اول و دوم برنامه به گونه‌ای پیاده‌سازی شده است که تصمیمات اتخاذ شده در هر سطح وابسته به نتایج و محدودیت‌های سطح مقابل می‌باشد. در مدل پیشنهادی، اقدامات پیشگیرانه مربوط به تقویت سیستم توزیع قبل از وقوع حادثه شامل جایگزینی مقره‌های سرامیکی با مقره‌های سیلیکونی در خطوط منتخب شبکه و جایگزینی پست‌های روباز AIS با پست سرپوشیده با عایق گاز[۱۳] (GIS) می‌باشد. در حوزه بهره‌برداری اقدامات شامل بازآرایی بهینه شبکه توزیع با هدف کاهش هزینه‌های حذف بار و تعمیرات خطوط و پست‌های آسیب دیده در اثر طوفان گرد و غبار است. از اینرو در مدل پیشنهادی علاوه بر هزینه‌های حذف بار، هزینه‌های تعمیرات و شستشوی مقره‌ها در خطوط و پست‌های آسیب دیده به عنوان بخشی از هزینه‌های بازیابی سیستم توزیع پس از حادثه در نظر گرفته شده است.

۴- مدل‌سازی سیستم توزیع و فرمول‌بندی مسأله

در این بخش پس از بیان فرضیات مسأله، مدل پیشنهادی برای برنامه‌ریزی تقویت سیستم توزیع در قالب یک مدل دو سطحی ارائه شده است. در مدل‌سازی مسأله فرض شده است که:

۱- فیدرهای توزیع در نقاط اتصال به شبکه بالادست توسط پست‌های AIS تغذیه می‌شوند و در ایزولاسیون پست‌ها و خطوط توزیع از مقره‌های سرامیکی استفاده شده است.

۲- سیستم توزیع دارای ساختار شعاعی است و در برخی نقاط مجهز به کلیدهای جداکننده می‌باشد.

۳- پست‌های AIS و خطوط شبکه پس از وقوع اولین تخلیه الکتریکی در مقره‌ها از مدار خارج شده و تا پایان فرآیند تعمیرات و شستشوی کل مقره‌های سکشن آسیب دیده وارد مدار نمی‌شوند.

۴- تغییرات بار شبکه در تمام نقاط از یک الگوی همگن پیروی می‌کند و نقاط بار شبکه دارای ضرایب اهمیت متفاوت هستند.

۵- در سرمایه‌گذاری برای افزایش تاب‌آوری سیستم توزیع محدودیت بودجه وجود دارد.

۶- مشخصه آسیب‌پذیری سایر تجهیزات عایقی در پست‌ها و نقاط بار شبکه مشابه مقره‌های خطوط توزیع در نظر گرفته شده است.

۷- احتمال آسیب‌پذیری پست‌های GIS در هرسناریو معادل ۱۰٪ مقدار متناظر در پست‌های AIS در نظر گرفته شده است. در حالی که، وضعیت آسیب خطوط توزیع قبل و بعد از تقویت شدن بصورت مستقل محاسبه شده است.

در مدل پیشنهادی برای تقویت سیستم توزیع در مقابل طوفان‌های گرد و غبار، تابع هدف کلی مسأله در رابطه (۲) ارائه شده است. در این رابطه OF_1 بیانگر هزینه‌های سرمایه‌گذاری وابسته به متغیرهای تصمیم سطح اول برنامه‌ریزی و OF_2 مدل‌کننده مجموع هزینه‌های بهره‌برداری مورد انتظار در شرایط وقوع طوفان گرد و غبار است، که تابعی از متغیرهای تصمیم سطوح اول و دوم مسأله می‌باشد.

$$OF = min \quad \{OF_1 + OF_2\} \tag{۲}$$

۴-۱- مدل‌سازی سطح اول (حوزه برنامه‌ریزی)

۴-۱-۱- تابع هدف سطح اول

در سطح اول مدل پیشنهادی هدف کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری برای افزایش تاب‌آوری سیستم توزیع در مقابل طوفان‌های گرد و غبار شدید است. از اینرو، در رابطه (۳) جملات اول و دوم به ترتیب مجموع هزینه‌های سرمایه‌گذاری برای تقویت پست‌ها و خطوط توزیع را مدل می‌کنند.

$$OF_1 = C_1^{inv}(x^{sub}) + C_2^{inv}(x^{ins}) \tag{۳}$$

که در آن:

$$C_1^{inv}(x^{sub}) = \sum_{i \in \Omega^{PCC}} c_i^{sub} . \alpha_i^{sub} . x_i^{sub} (1 - \beta_i^{sub}) \tag{۴}$$

$$0 \le \beta_i^{sub} \le 1, \quad 0 \le \alpha_i^{sub} \le 1$$

$$C_2^{inv}(x^{ins}) = \sum_{(i,j) \in \Omega^{B}} c_{ij}^{ins} . n_{ij}^{ins} . x_{ij}^{ins} (1 - \beta_{ij}^{ins}) \tag{۵}$$

$$0 \le \beta_{ij}^{ins} \le 1$$

$C_1^{inv}(x^{sub})$: مجموع هزینه‌های تقویت پست‌های توزیع

$C_2^{inv}(x^{ins})$: مجموع هزینه‌های تقویت خطوط توزیع

x_i^{sub}: متغیر باینری تعیین‌کننده نصب پست GIS در باس i

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.3.2.8]

x_{ij}^{ins}: متغیر باینری تعیین‌کننده نصب مقره‌های سیلیکونی در خط ij

c_i^{sub}: هزینه سالانه نصب یک پست GIS در باس i

c_{ij}^{ins}: هزینه سالانه نصب یک مقره سیلیکونی در خط ij

n_{ij}^{ins}: تعداد مقره‌ها در خط ij

Ω^B : مجموعه خطوط شبکه

Ω^{PCC} : مجموعه باس‌های پست

در رابطه (۴)، پارامتر α_i^{sub} بیان‌کننده سهم هر فیدر متصل به پست i از هزینه تقویت آن پست است که با توجه به نسبت تقاضای بار آن فیدر به مجموع تقاضای بار فیدرهای تغذیه شونده از آن پست محاسبه می‌گردد. از آنجاکه در عمل، مقره‌ها و تجهیزات عایقی در خطوط و پست‌های منتخب برای تقویت شدن سالم است و می‌توان از آنها در سایر مناطق با شرایط محیطی بهتر استفاده نمود، در روابط (۴) و (۵) درصدی از هزینه‌های سرمایه‌گذاری برای تقویت پست‌ها و خطوط توزیع به ترتیب توسط β_i^{sub} و β_{ij}^{ins} بازیافت می‌گردد.

۲-۱-۴- قیود و محدودیت‌های سطح اول

قیود و محدودیت‌ها در سطح اول مدل پیشنهادی، عمدتاً مربوط به منابع مالی سیستم توزیع است. طبق رابطه (۶)، مجموع هزینه‌های سرمایه‌گذاری برای تقویت خطوط و پست‌های توزیع نباید از میزان بودجه اختصاص یافته برای این کار B_R^{inv} تجاوز نماید.

$$C_1^{inv}(x^{sub})+C_2^{inv}(x^{ins}) \le B_R^{inv} \qquad (۶)$$

۲-۴- مدل‌سازی سطح دوم (حوزه بهره‌برداری)

۲-۱-۴- تابع هدف سطح دوم

در سطح دوم مدل پیشنهادی، هزینه‌های مورد انتظار بهره‌برداری از سیستم توزیع در هر سناریو توسط تابع هدف رابطه (۷) حداقل می‌گردد. این هزینه‌ها در عمل شامل جریمه حذف بار و هزینه‌های تعمیر و شستشوی تجهیزات عایقی پست‌ها و خطوط آسیب دیده است که نحوه مدل‌سازی آنها به ترتیب در روابط (۶) تا (۸) بیان شده است.

$$OF_2 = N_d \cdot \sum_{s\in\Omega^S} p_d(s) \times \left\{ \begin{array}{c} \sum_{i\in\Omega^L} C_i^{Lsh,s} + \sum_{i\in\Omega^{PCC}} C_i^{r_{sub},s} \\ + \sum_{(i,j)\in\Omega^B} C_{ij}^{r_{net},s} \end{array} \right\} \qquad (۷)$$

که در آن:

$$C_i^{Lsh,s} = c_0^{Lsh} \sum_{t\in\Omega^T} \phi_i^L \cdot \gamma_{i,t}^{L,s} \cdot P_{i,t}^{L,s} \cdot \Delta t \quad ,\forall i \in \Omega^L \qquad (۸)$$

$$C_i^{r_{sub},s} = m_i^{sub,s} \cdot c_i^{ins} + c_0^w \cdot \sum_{t\in\Omega^T} \lambda_{i,t}^{sub,s} \quad ,\forall i \in \Omega^{PCC} \qquad (۹)$$

$$C_{ij}^{r_{net},s} = m_{ij}^{net,s} \cdot \zeta_{ij}^{ins} + c_0^w \cdot \sum_{t\in\Omega^T} \lambda_{ij,t}^{net,s} \quad ,\forall (i,j) \in \Omega^B \qquad (۱۰)$$

$$\zeta_{ij}^{ins} = c_{ij}^{ins} \cdot (x_{ij}^{ins} + (1-x_{ij}^{ins})\beta_{ij}^{ins}) \quad ,\forall (i,j) \in \Omega^B \qquad (۱۱)$$

$$\lambda_{ij,t}^{net,s} = (1-x_{ij}^{ins})\lambda_{ij,t}^{PI,s} + x_{ij}^{ins}\lambda_{ij,t}^{SRI,s} \quad \forall (i,j) \in \Omega^B, \forall t \in \Omega^T \qquad (۱۲)$$

$$\lambda_{i,t}^{sub,s} = (1-x_i^{sub})\lambda_{i,t}^{AIS,s} + x_i^{sub}\lambda_{i,t}^{GIS,s} \quad ,\forall i \in \Omega^{PCC}, \forall t \in \Omega^T \qquad (۱۳)$$

N_d: متوسط تعداد روزهای گرد و غباری در سال

$P_d(s)$: احتمال رخداد سناریو s

$C_i^{Lsh,s}$: مجموع هزینه‌های حذف بار در باس i ($)

$C_i^{r_{sub},s}$: مجموع هزینه‌های تعمیرات و شستشوی پست i ($)

$C_{ij}^{r_{net},s}$: مجموع هزینه‌های تعمیرات و شستشوی خط ij ($)

c_0^{Lsh}: جریمه پایه برای حذف بار در شبکه ($/KWh)

c_0^w: هزینه پایه برای تعمیر و شستشوی خطوط و پست‌ها ($/h)

ϕ_i^L: ضریب اهمیت بار در باس i

$\gamma_{i,t}^{L,s}$: میزان حذف بار باس i در ساعت t

$P_{i,t}^{L,s}$: توان اکتیو بار در باس i در ساعت t (KW)

Δt: طول بازه زمانی برای بروزرسانی وضعیت سیستم (h)

$m_i^{sub,s}$: تعداد مقره‌ها و تجهیزات عایقی آسیب‌دیده در پست i

$m_{ij}^{net,s}$: تعداد مقره‌های آسیب‌دیده در خط ij

ζ_{ij}^{ins}: هزینه واقعی جایگزینی یک مقره آسیب‌دیده در خط ij

$\lambda_{i,t}^{sub,s}$: متغیر باینری تعیین‌کننده وضعیت آسیب پست i در ساعت t

$\lambda_{ij,t}^{net,s}$: متغیر باینری تعیین‌کننده وضعیت آسیب خط ij در ساعت t

$\lambda_{ij,t}^{PI,s}$: پارامتر باینری نشان‌دهنده آسیب خط ij قبل از تقویت

$\lambda_{ij,t}^{SRI,s}$: پارامتر باینری نشان‌دهنده آسیب خط ij بعد از تقویت

$\lambda_{i,t}^{AIS,s}$: پارامتر باینری نشان‌دهنده آسیب پست i قبل از تقویت

$\lambda_{i,t}^{GIS,s}$: پارامتر باینری نشان‌دهنده آسیب پست i بعد از تقویت

Ω^S : مجموعه سناریوهای هدف

Ω^L: مجموعه باس‌های بار در شبکه توزیع

Ω^T: مجموعه بازه‌های زمانی برای ارزیابی عملکرد سیستم توزیع

در رابطه (۸) هزینه حذف بار در هر باس شبکه تابعی از درصد بار حذف شده و ضریب اهمیت بار در آن باس است. در روابط (۹) و (۱۰) هزینه تعمیرات به دو بخش تقسیم شده است. بخش اول هزینه جایگزینی تجهیزات آسیب دیده در اثر طوفان گرد و غبار و بخش دوم هزینه شستشوی مقره‌ها در پست‌ها و خطوط توزیع را مدل می‌کنند. در این روابط تعداد تجهیزات عایقی آسیب دیده در هر سناریو طوفان گرد و غبار توسط الگوریتم ارائه شده برای گام ۲ در شکل (۳) تعیین خواهد شد. در رابطه (۱۱)، هزینه جایگزینی یک مقره در خط آسیب دیده ij بر اساس نتیجه تقویت آن خط تعیین می‌شود. در روابط (۱۲)

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.3.2.8]

و (۱۳) وضعیت آسیب خطوط و پست‌ها در هر سناریو با توجه به وضعیت تقویت آنها در سطح اول مسأله، تعیین می‌گردد. در رابطه (۱۲)، $\lambda_{ij,t}^{PI,s}$ و $\lambda_{ij,t}^{SRI,s}$ پارامترهای باینری هستند که در هر ساعت از هر سناریو طبق روابط (۱۴) و (۱۵) وضعیت وقوع تخلیه الکتریکی را در خطوط با مقره‌های سرامیکی و سیلیکونی تعیین می‌کنند.

$$\lambda_{ij,t}^{PI,s}=\begin{cases}1 & t_{ij}^{d_{PI},s}\le t\le t_{ij}^{d_{PI},s}+T_{ij}^{r_{net},s}\ ,\\ & \forall(i,j)\in\Omega^{B},\forall t\in\Omega^{T}\\ 0 & otherwise\end{cases} \quad (۱۴)$$

$$\lambda_{ij,t}^{SRI,s}=\begin{cases}1 & t_{ij}^{d_{SRI},s}\le t\le t_{ij}^{d_{SRI},s}+T_{ij}^{r_{net},s}\ ,\\ & \forall(i,j)\in\Omega^{B},\forall t\in\Omega^{T}\\ 0 & otherwise\end{cases} \quad (۱۵)$$

که در آن $t_{ij}^{d_{PI},s}$ و $t_{ij}^{d_{SRI},s}$ به ترتیب زمان گزارش اولین خرابی در مقره‌های خط ij قبل و بعد از تقویت شدن با مقره‌های سیلیکونی است. از این زمان خط ij به اندازه $T_{ij}^{r_{net},s}$ ساعت برای انجام تعمیرات و شستشوی مقره‌ها خارج از سرویس است. این زمان که یکی از متغیرهای تصادفی مدل پیشنهادی است، در هر سناریو توسط یک ضریب تصادفی تولید شده با توجه به طول خط ij و تعداد مقره‌های آن تعیین می‌گردد. بطور مشابه، وضعیت آسیب پست‌های توزیع نیز بر اساس همین تئوری تعیین خواهد شد.

۲-۲-۴- قیود و محدودیت‌های سطح دوم

قیود و محدودیت‌ها در سطح دوم مدل پیشنهادی، عمدتاً مربوط به الزامات بهره‌برداری از سیستم توزیع می‌باشد. از اینرو، هر گونه اقدام اصلاحی که در عمل به منظور کاهش اثرات حادثه بر عملکرد سیستم توزیع انجام می‌گیرد بایستی در چارچوب محدودیت‌های زیر باشد.

۱- محدودیت‌های تعادل توان در باس‌های شبکه

بر اساس روابط (۱۶) و (۱۷)، باید مجموع توان‌های تزریقی و دریافتی در هر باس شبکه در هر ساعت از هر سناریو برابر باشند. در این روابط، $P_{i,t}^{sub,s}$ و $Q_{i,t}^{sub,s}$ مولفه‌های توان خروجی پست i، و $P_{ij,t}^{s}$ و $Q_{ij,t}^{s}$ توان‌های خروجی از باس i شبکه و $P_{ji,t}^{s}$ و $Q_{ji,t}^{s}$ توان‌های ورودی به باس i از سمت باس j در هر ساعت از هر سناریو هستند.

$$\sum_{\{j|(i,j)\in\Omega^{B}\}}P_{ij,t}^{s}-\sum_{\{j|(i,j)\in\Omega^{B}\}}P_{ji,t}^{s}=P_{i,t}^{sub,s}-(1-\gamma_{i,t}^{s})P_{i,t}^{L,s}\quad\forall i\in\Omega^{N},\forall t\in\Omega^{T} \quad (۱۶)$$

$$\sum_{\{j|(i,j)\in\Omega^{B}\}}Q_{ij,t}^{s}-\sum_{\{j|(i,j)\in\Omega^{B}\}}Q_{ji,t}^{s}=Q_{i,t}^{sub,s}-(1-\gamma_{i,t}^{s})Q_{i,t}^{L,s}\quad\forall i\in\Omega^{N},\forall t\in\Omega^{T} \quad (۱۷)$$

۲- محدودیت کلیدزنی در بازآرایی شبکه

بر اساس رابطه (۱۸)، کلیدزنی تنها در خطوطی مجاز است که مجهز به کلید باشند. از طرفی، طبق رابطه (۱۹) وقتی خط ij آسیب ببیند، عملاً از مدار خارج می‌شود و باز یا بسته بودن کلید آن خط، تأثیری در انتقال توان توسط آن ندارد. در این روابط، مجموعه Ω^{SW} خطوط دارای کلید را از سایر خطوط متمایز می‌کند و x_{ij}^{sw} پارامتر باینری است که یک بودن آن به منزله وجود کلید بر روی خط ij است. متغیر باینری $\pi_{ij,t}^{sw,s}$ یکی از متغیرهای تصمیم در سطح دوم مسأله است که وضعیت باز (۱) یا بسته (۰) بودن کلید روی خط ij را در هر ساعت از سناریو s تعیین می‌کند.

$$\pi_{ij,t}^{sw,s}\le x_{ij}^{sw}\qquad\forall(i,j)\in\Omega^{SW},\forall t\in\Omega^{T} \quad (۱۸)$$

$$\pi_{ij,t}^{sw,s}+\lambda_{ij,t}^{net,s}\le 1\qquad\forall(i,j)\in\Omega^{SW},\forall t\in\Omega^{T} \quad (۱۹)$$

۳- محدودیت توان انتقالی از خطوط شبکه

طبق روابط (۱۹) تا (۲۱) اگر خط ij دارای کلید و وضعیت کلید آن بسته باشد، خط سالم است و توان انتقالی از آن باید توسط حداکثر ظرفیت مجاز محدود گردد. از طرفی طبق روابط (۲۲) و (۲۳)، انتقال توان در خطوط فاقد کلید تابعی از وضعیت آسیب خط است. فعال سازی این روابط بر اساس روش Big_M (Soroudi et al. 2017) انجام می‌گردد، که در آن M یک عدد مثبت بزرگ است.

$$-\pi_{ij,t}^{sw,s}.P_{ij}^{\max}-(1-x_{ij}^{sw})M\le P_{ij,t}^{s}\le\pi_{ij,t}^{sw,s}.P_{ij}^{\max}+(1-x_{ij}^{sw})M,\quad\forall(i,j)\in\Omega^{SW},\ \forall t\in\Omega^{T} \quad (۲۰)$$

$$-\pi_{ij,t}^{sw,s}.Q_{ij}^{\max}-(1-x_{ij}^{sw})M\le Q_{ij,t}^{s}\le\pi_{ij,t}^{sw,s}.Q_{ij}^{\max}+(1-x_{ij}^{sw})M,\quad\forall(i,j)\in\Omega^{SW},\ \forall t\in\Omega^{T} \quad (۲۱)$$

$$-(1-\lambda_{ij,t}^{net,s})P_{ij}^{\max}-x_{ij}^{sw}M\le P_{ij,t}^{s}\le(1-\lambda_{ij,t}^{net,s})P_{ij}^{\max}+x_{ij}^{sw}M,\forall(i,j)\in\Omega^{B},\ \forall t\in\Omega^{T} \quad (۲۲)$$

$$-(1-\lambda_{ij,t}^{net,s})Q_{ij}^{\max}-x_{ij}^{sw}M\le Q_{ij,t}^{s}\le(1-\lambda_{ij,t}^{net,s})Q_{ij}^{\max}+x_{ij}^{sw}M,\forall(i,j)\in\Omega^{B},\ \forall t\in\Omega^{T} \quad (۲۳)$$

۴- محدودیت ولتاژ باس‌های شبکه در شرایط اضطراری

بر اساس رابطه (۲۵)، درصورتی که خط بین دو باس i و j دارای کلید باشد، ولتاژ این دو باس تا زمانیکه کلید بسته باشد به اندازه افت ولتاژ خط ij با هم اختلاف خواهند داشت و پس از باز شدن کلید از هم مستقل می‌شوند. بطور مشابه در رابطه (۲۶)، آسیب دیدن یک خط فاقد کلید در شرایط حادثه منجر به عدم وابستگی ولتاژهای طرفین آن خط به هم می‌گردد. در این روابط R_{ij} و X_{ij} مقاومت و راکتانس خط ij و V_0 اندازه ولتاژ مرجع سیستم همگی بر حسب پریونیت هستند.

$$V_i^{\min}\le v_{i,t}^{s}\le V_i^{\max},\quad\forall i\in\Omega^{N},\forall t\in\Omega^{T} \quad (۲۴)$$

$$v_{i,t}^{s}-\frac{R_{ij}.P_{ij,t}^{s}+X_{ij}.Q_{ij,t}^{s}}{V_0}-(1-\pi_{ij,t}^{sw,s}+1-x_{ij}^{sw})\times M\le v_{j,t}^{s}\le v_{i,t}^{s}-\frac{R_{ij}.P_{ij,t}^{s}+X_{ij}.Q_{ij,t}^{s}}{V_0}+(1-\pi_{ij,t}^{sw,s}+1-x_{ij}^{sw})M\ ,\forall(i,j)\in\Omega^{SW},\forall t\in\Omega^{T} \quad (۲۵)$$

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.3.2.8]

$$v^{s}_{i,t} - \frac{R_{ij}.P^{s}_{ij,t} + X_{ij}.Q^{s}_{ij,t}}{V_0} - (\lambda^{net,s}_{ij,t} + x^{sw}_{ij}) \times M \le v^{s}_{j,t} \le v^{s}_{i,t} - \frac{R_{ij}.P^{s}_{ij,t} + X_{ij}.Q^{s}_{ij,t}}{V_0} + (\lambda^{net,s}_{ij,t} + x^{sw}_{ij})x^{sw}_{ij}.M, \quad \forall (i,j) \in \Omega^{B}, \forall t \in \Omega^{T} \qquad (۲۶)$$

۵- محدودیت ساختار شعاعی شبکه در شرایط اضطراری

در بازآرایی شبکه توزیع در شرایط بهره‌برداری اضطراری بایستی ساختار شعاعی شبکه در برنامه‌ریزی برای فرآیند باز و بست کلیدها حفظ گردد. در این مقاله از قواعد مربوط به تئوری درخت فراگیر[۱۴] در پیاده‌سازی این محدودیت بدون وابستگی به جهت انتقال توان در خطوط توزیع در شرایط بازآرایی استفاده شده است (Li et al. 2014). بر این اساس، روابط (۲۷) و (۲۸) ارتباط بین متغیرهای درخت فراگیر و وضعیت اتصال خط ij را در شبکه توزیع تعیین می‌کنند. طبق رابطه (۲۷) اگر خط ij دارای کلید باشد و کلید آن بسته باشد، به شرطی در درخت فراگیر قرار می‌گیرد که یکی از متغیرهای باینری $\rho^{s}_{mn,t}$ یا $\rho^{s}_{nm,t}$ یک و دیگری صفر باشد. بطور مشابه، طبق رابطه (۲۸)، اگر خط ij فاقد کلید و سالم باشد تنها در صورتی در درخت فراگیر قرار می‌گیرد که یکی از دو متغیر مذکور یک و دیگری صفر باشد. رابطه (۲۹) بیان می‌کند که باس اتصال دهنده سیستم به شبکه بالادست هیچ والدی در درخت فراگیر ندارد و رابطه (۳۰) از ایجاد حلقه در فرآیند بازآرایی شبکه جلوگیری می‌کند.

$$\rho^{s}_{mn,t} + \rho^{s}_{nm,t} - (1-x^{sw}_{ij})M \le \pi^{sw,s}_{ij,t} \le \rho^{s}_{mn,t} + \rho^{s}_{nm,t} + (1-x^{sw}_{ij})M \quad \forall (i,j) \in \Omega^{SW}, \forall t \in \Omega^{T} \qquad (۲۷)$$

$$\rho^{s}_{mn,t} + \rho^{s}_{nm,t} - x^{sw}_{ij} M \le 1 - \lambda^{net,s}_{ij,t} \le \rho^{s}_{mn,t} + \rho^{s}_{nm,t} + x^{sw}_{ij} M \quad \forall (i,j) \in \Omega^{B}, \ \forall t \in \Omega^{T} \qquad (۲۸)$$

$$\rho^{s}_{mn,t} = 0 \quad \forall (m,n) \in \Omega^{PCC}, \forall t \in \Omega^{T} \qquad (۲۹)$$

$$\sum_{n \in N} \rho^{s}_{mn,t} \le 1 \quad \forall m \in \Omega^{N}, \forall t \in \Omega^{T} \qquad (۳۰)$$

۶- محدودیت حذف بار در شرایط اضطراری

در این مقاله برای نمایش بهتر اثر اقدامات پیشنهادی در افزایش تاب‌آوری سیستم توزیع، در رابطه (۳۱) فرض شده است که سیستم توزیع زیرساخت‌های لازم را برای حذف پیوسته بار دارد.

$$0 \le \gamma^{L,s}_{i,t} \le 1 \quad \forall i \in \Omega^{L}, \ \forall t \in \Omega^{T} \qquad (۳۱)$$

۷- محدودیت توان خروجی پست‌های توزیع

طبق روابط (۳۲) و (۳۳)، توان‌های دریافتی از پست توزیع در هر ساعت از هر سناریو نباید از مقادیر مجاز تجاوز نماید. این مقادیر برای هر فیدر توزیع می‌تواند سهم اختصاص یافته به آن فیدر از کل ظرفیت پست توزیع باشد.

$$0 \le P^{sub,s}_{i,t} \le P^{\max}_{i} \quad \forall i \in \Omega^{PCC}, \forall t \in \Omega^{T} \qquad (۳۲)$$

$$0 \le Q^{sub,s}_{i,t} \le Q^{\max}_{i} \quad \forall i \in \Omega^{PCC}, \forall t \in \Omega^{T} \qquad (۳۳)$$

در مدل بهینه‌سازی پیشنهادی، روابط (۱۷-۱۶) و (۲۶-۲۵) معادلات خطی شده پخش بار در شبکه توزیع هستند که پیش از این بطور گسترده در برنامه‌ریزی و بهره‌برداری از شبکه‌های توزیع مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Haghshenas et al. 2022). در این مقاله، درصد بار تأمین شده، به عنوان شاخص عملکرد سیستم توزیع R(t) در شرایط وقوع طوفان گرد و غبار در نظر گرفته شده و نحوه محاسبه آن در رابطه (۳۴) ارائه شده است. این شاخص می‌تواند در ارزیابی اثر اقدامات پیشنهادی برای بهبود تاب‌آوری بسیار ارزشمند باشد.

$$R(t) = \sum_{s \in \Omega^{S}} \left[p_d(s). \frac{\sum_{i \in \Omega^{N}} (1-\gamma^{L,s}_{i,t}).P^{L,s}_{i,t}}{\sum_{i \in \Omega^{N}} P^{L,s}_{i,t}} \right], \forall t \in \Omega^{T} \qquad (۳۴)$$

۳-۴- روش حل مسأله

در این مقاله، فرآیند تولید و کاهش سناریوهای تصادفی بطور مستقل در نرم‌افزار MATLAB پیاده‌سازی شده و پس از تعیین سناریوهای هدف، از آنها به عنوان مبنای برنامه‌ریزی تقویت همزمان خطوط و پست‌های توزیع در نرم‌افزار GAMS استفاده شده است. در این راستا، پس از تعیین وضعیت آسیب خطوط و پست‌های توزیع در هر سناریو، می‌توان فرم فشرده مدل برنامه‌ریزی پیشنهادی در سطح اول را بصورت زیر بیان نمود:

$$\min_{x} \left\{ z_1^{\bullet} x + \psi(x) : Ax \le b \right\} \qquad (۳۵)$$

که در آن z_1 ضرایب هزینه سرمایه‌گذاری برای اقدامات پیشنهادی برای تقویت سیستم توزیع در مقابل طوفان گرد و غبار، x بردار متغیرهای تصمیم در سطح اول مسأله و $\psi(x) = \sum_s [p_d(s).\delta(x,s)]$ هزینه‌های مورد انتظار در سطح دوم مسأله است که وابسته به بردار متغیرهای تصمیم در این سطح است. در فرم برداری رابطه (۳۰)، محدودیت مسأله شامل تعداد مقره‌های سیلیکونی و پست‌های GIS است که می‌توانند با هدف تقویت سیستم توزیع در شبکه جایگزین گردند. در سطح دوم مسأله، مقدار تابع $\delta(x,s)$ در هر سناریو مطابق فرم فشرده ارائه شده در رابطه (۳۶) قابل بیان است. در این رابطه، تابع هدف، فرم فشرده رابطه (۷) است که در آن y بردار متغیرهای تصمیم در سطح دوم مسأله می‌باشد.

$$\min \left\{ z_2^{\bullet} y : W.y \le E(s) - F(s).x \right\} \qquad (۳۶)$$

پارامترهای z_1، A، b، z_2، W، E و F اطلاعات ورودی مدل برنامه ریزی تقویت همزمان خطوط و پست‌های توزیع هستند. مدل فشرده ارائه شده در روابط (۳۵) و (۳۶) یک مدل برنامه‌ریزی خطی آمیخته با عدد صحیح است که با استفاده از حل کننده‌های در دسترس، در نرم‌افزار GAMS قابل حل می‌باشد.

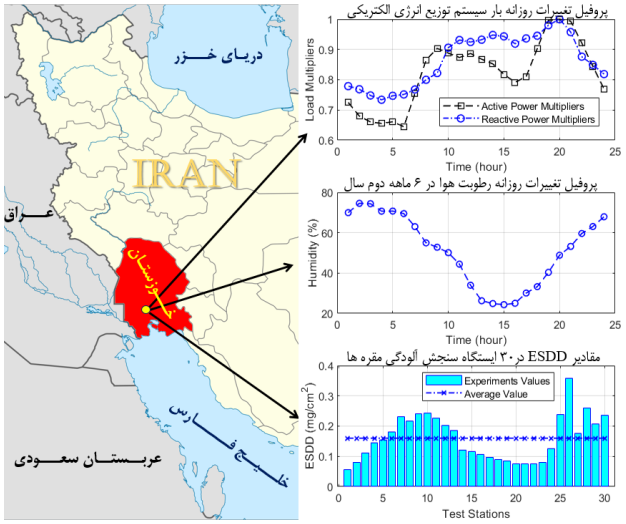
[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.3.2.8]

۵- نتایج شبیه‌سازی و مطالعات عددی

۵-۱- سناریوهای تصادفی

در این بخش نتایج شبیه‌سازی و مطالعات عددی حاصل از پیاده سازی مدل پیشنهادی بر روی یک شبکه توزیع واقعی در جنوب استان خوزستان در چند مورد مطالعاتی مختلف ارائه شده است. در فرآیند تولید و کاهش سناریوهای تصادفی، سناریوهای بار شبکه بر اساس مقادیر توان‌های پایه در هر باس، ضرایب تغییر بار شبکه در هر ساعت مطابق شکل (۴) (Alemohammad et al. 2015) و یک ضریب تصادفی ایجاد شده توسط تابع توزیع نرمال با مقدار متوسط ۱ و انحراف معیار ۰/۱ تولید شده است. زمان تعمیر پست‌ها و خطوط آسیب‌دیده در هر سناریو یکی دیگر از متغیرهای تصادفی است که بر اساس تعداد مقره‌های موجود هر بخش و ضرایب تصادفی تولید شده توسط تابع توزیع ویبول با پارامترهای $k=10$ و $y=4$ تعیین می‌گردد.



شکل (۴): پروفیل بار روزانه، منحنی تغییرات رطوبت نسبی هوا و مقادیر ESDD در ۳۰ ایستگاه استان خوزستان.

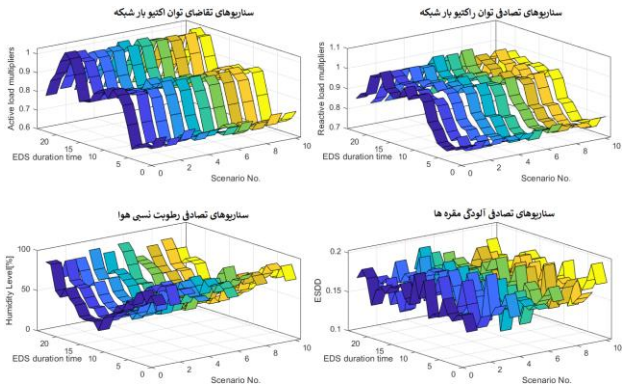
جدول (۲): هزینه‌های سرمایه‌گذاری برای تقویت سیستم توزیع (Haghshenas et al. 2022).

عنوان	هزینه کل ($)	طول عمر (yr)	هزینه سالانه ($)
مقره سیلیکونی خط	۲۱۳	۲۰	۱۵
مقره سیلیکونی پست	۲۳۵	۲۰	۱۶
پست GIS 30MVA	۱٫۵۲۰٫۰۰۰	۵۰	۶۴٫۷۹۵

میزان آلودگی مقره‌ها در هر سناریو تصادفی در دو مرحله انجام شده است. در مرحله اول ضرایب تصادفی آلودگی مبنا با توجه به مقدار متوسط $0.1601 mg/cm^2$ و انحراف معیار 0.0748 مربوط به داده‌های حاصل از اندازه‌گیری ESDD در (Shariati et al. 2015) محاسبه شده و در مرحله دوم از ضرایب تصادفی تولید شده توسط تابع توزیع نرمال با مقدار متوسط ۱ و انحراف معیار ۰/۱ برای شبیه‌سازی ماهیت تصادفی نشست ذرات گرد و غبار بر روی مقره‌های پست‌ها و خطوط توزیع استفاده شده است. در شبیه‌سازی ماهیت تصادفی رطوبت هوا در هر یک از سناریوها، ضرایب تصادفی تولید شده توسط تابع توزیع ویبول با پارامترهای $k=10$ و $y=1.128$ برای هر ساعت از دوره زمانی مورد مطالعه در مقادیر متناظر از پروفیل تغییرات روزانه رطوبت هوای استان خوزستان در نیمه دوم سال ضرب شده است (Ahvaz Weather 2021). در فرآیند برنامه‌ریزی، هزینه‌های سرمایه‌گذاری سالانه برای تقویت سیستم توزیع بر اساس طول عمر تجهیزات و نرخ تورم ۳٫۵ درصد (Statista 2022) در جدول (۲)، و سایر پارامترهای شبیه‌سازی سیستم توزیع در جدول (۳) لیست شده است. نتایج سناریوهای تصادفی گرد و غبار، رطوبت هوا و بار شبکه در شرایط وقوع طوفان در شکل (۵) ارائه شده است.

جدول (۳): پارامترهای شبیه‌سازی سیستم توزیع.

پارامترهای شبیه‌سازی	مقدار
ضریب سهم فیدرهای توزیع از تقویت پست توزیع	۱
ضریب بازیافت هزینه جایگزینی مقره سیلیکونی	۰٫۲
ضریب بازیافت هزینه جایگزینی پست GIS	۰٫۳
متوسط روزهای گرد و غباری در سال	۳
دامنه مجاز برای ولتاژ باس‌های شبکه	۰±۱٫۰۵ پریونیت
هزینه پایه هر کیلووات ساعت حذف بار در شبکه	۱ دلار
هزینه پایه تعمیرات و شستشوی خطوط و پست‌ها	۲۰۰ دلار
Δt	۱ ساعت



شکل (۵): سناریوهای تصادفی تغییرات بار و شرایط محیطی.

۵-۲- نتایج برنامه‌ریزی تقویت سیستم توزیع

در این بخش مدل پیشنهادی بر روی یک شبکه توزیع واقعی با ابعاد نسبتاً بزرگ در یک ناحیه پر بار در استان خوزستان پیاده‌سازی شده و نتایج برنامه‌ریزی تقویت سیستم توزیع در مقابل طوفان‌های گرد و غبار شدید در چهار مورد مطالعاتی مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته است. این سیستم شامل دو فیدر شعاعی A و B به ترتیب با پیک بار ۱۲/۳ و ۱۶/۸ مگاولت‌آمپر است که به طور مستقل از طریق دو پست AIS-132/33kV با ظرفیت اسمی ۳۰ مگاولت‌آمپر تغذیه می‌شوند. فیدرهای A و B در مجموع دارای ۳۳۵ باس، ۳۳۳ خط توزیع، ۱۳ خط ارتباطی مجهز به کلید جداکننده و ۱۷٫۰۳۶ مقره در پست‌ها و خطوط توزیع هستند و می‌توانند در شرایط اضطراری از

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-01]

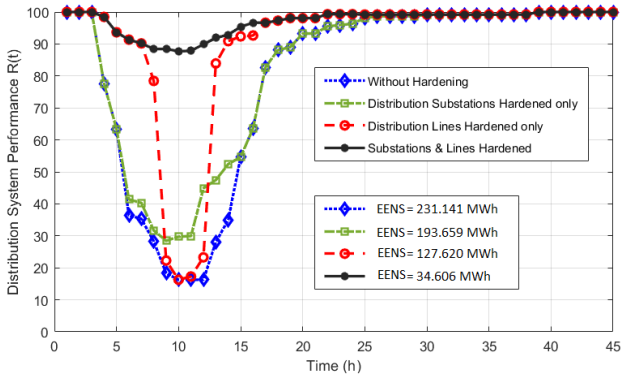
[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.3.2.8]

طریق چهار خط ارتباطی[15] با هم تبادل انرژی داشته باشند. در این سیستم از ضرایب اهمیت ۱، ۳ و ۵ برای ایجاد تمایز بین بارهای شبکه استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی موارد مطالعاتی ۱ تا ۴ در جدول (۴) و شکل (۶) ارائه شده است.

نتایج شبیه‌سازی مورد مطالعاتی۱ که در آن هیچ اقدامی برای افزایش تاب‌آوری سیستم توزیع انجام نشده، در شکل (۶) نشان داده است که وقوع طوفان‌های گرد و غبار و رسیدن توده‌های ریزگرد به محل استقرار فیدرهای A و B که یک منطقه با درصد رطوبت نسبتاً زیاد است، می‌تواند با تحت تأثیر قرار دادن عملکرد پست‌ها و خطوط توزیع منجر به افت شدید شاخص عملکرد سیستم تا پایان زمان تعمیرات گردد. در این شرایط، هزینه‌های بهره‌برداری مورد انتظار و مقدار انرژی تامین نشده مورد انتظار[16] (EENS) به ترتیب ۱٫۸۱۹٫۲۱۴ دلار و ۲۳۱٫۱۴۱ کیلو وات ساعت محاسبه شده است که باتوجه به پیک بار این سیستم مقادیر قابل توجهی هستند.

در مورد مطالعاتی۲، که تقویت پست‌های AIS تنها راهکار برای افزایش تاب‌آوری سیستم توزیع در مقابل شرایط محیطی منطقه است، نتایج برنامه‌ریزی در جدول (۴) نشان داده است که تقویت همزمان پست‌های A و B در سیستم توزیع با یک هزینه سرمایه‌گذاری نسبتاً زیاد، تنها ۱۶٪ از مقدار EENS و ۲۳۱/۵۸۴ دلار از مجموع هزینه‌های بهره‌برداری مورد انتظار را کاهش داده است. این واقعیت از مقایسه نمودارهای تاب‌آوری موارد مطالعاتی ۱ و ۲ نیز در شکل (۶) به وضوح مشخص است. در واقع علت این موضوع آن است که چون در شرایط طوفان گرد و غبار تعدادی از خطوط و پست‌های توزیع بطور همزمان دچار آسیب شده است، تقویت پست‌های AIS در شرایطی که خطوط خروجی آنها در معرض آسیب باشند نمی‌تواند به تنهایی از افت شدید شاخص عملکرد سیستم جلوگیری کند.

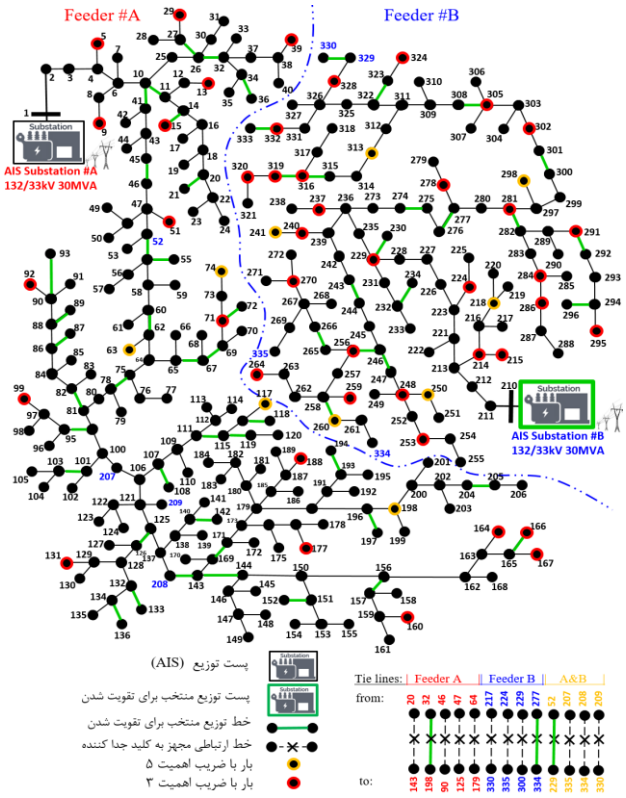
در مورد مطالعاتی۳، که تقویت خطوط شبکه تنها راهکار افزایش تاب‌آوری سیستم توزیع در مقابل شرایط محیطی منطقه است، نتایج برنامه‌ریزی در جدول (۴) نشان داده است که با جایگزینی ۲٫۰۲۴ مقره سیلیکونی در ۳۹ خط از فیدر A و ۱٫۱۱۶ مقره سیلیکونی در ۲۳ خط از فیدر B می‌توان هزینه‌های بهره‌برداری مورد انتظار را به ۸۶۹٫۲۶۸ دلار کاهش داد. در این شرایط، مقایسه درصد کاهش مقادیر EENS و هزینه‌های بهره‌برداری مورد انتظار نسبت به مورد مطالعاتی۱ نشان می‌دهد که تقویت خطوط توزیع در مقابل طوفان‌های گرد و غبار نقش بسزایی در کاهش هزینه‌های تعمییرات و شستشوی مقره‌های سیستم توزیع داشته است. از طرفی، نتایج محاسبه شاخص سود به سرمایه در موارد مطالعاتی۲ و ۳ نشان داده است که تقویت مستقل خطوط توزیع با یک هزینه سرمایه‌گذاری کمتر، سود بیشتری نسبت به تقویت مستقل پست‌های توزیع به همراه خواهد داشت. این در حالی است که آسیب‌دیدن پست‌های توزیع می‌تواند منجر به از دست رفتن مقادیر زیادی از بار شبکه هرچند برای یک زمان کوتاه شود.



شکل (۶): نمودار تاب‌آوری سیستم توزیع در موارد مطالعاتی ۱ تا ۴.

جدول (۴): نتایج برنامه‌ریزی تقویت سیستم توزیع.

عنوان	موارد مطالعاتی		
	۲	۳	۴
هزینه‌های سرمایه‌گذاری سالانه ($)	۹۰٫۷۲۰	۳۷٫۶۸۰	۸۱٫۰۰۰
هزینه‌های بهره‌برداری مورد انتظار ($)	۱٫۵۸۷٫۶۳۰	۸۶۹٫۲۶۸	۳۴۸٫۱۹۸
انرژی تأمین نشده مورد انتظار (KWh)	۱۹۳٫۶۵۹	۱۲۷٫۶۲۰	۳۴٫۶۰۶
تعداد مقره سیلیکونی نصب شده در شبکه	۰	۳٫۱۴۰	۲٫۹۷۰
تعداد خطوط تقویت شده با مقره سیلیکونی	۰	۶۲	۶۱
تعداد پست‌های تقویت شده با GIS	۲	۰	۱
شاخص سود به سرمایه‌گذاری سالانه	٪ ۷٫۷۴	٪ ۵۰٫۱۴	٪ ۷۶٫۴۱



شکل (۷): نتایج برنامه‌ریزی تقویت همزمان خطوط و پست‌های توزیع.

در مورد مطالعاتی ۴ تقویت همزمان خطوط و پست‌های توزیع با هدف افزایش تاب‌آوری سیستم توزیع مد نظر قرار گرفته است. نتایج

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.3.2.8]

برنامه‌ریزی برای این مورد مطالعاتی در جدول (۴) نشان داده است که با تقویت همزمان خطوط و پست‌ها در سیستم توزیع، علاوه بر کاهش مجموع هزینه‌های بهره‌برداری، هزینه‌های سرمایه‌گذاری برای تقویت سیستم توزیع نیز بطور قابل ملاحظه‌ای کاهش خواهد یافت. در این مورد مطالعاتی با جایگزینی ۲٫۹۷۰ مقره سیلیکونی در ۶۱ خط توزیع، نیاز به تقویت پست A در سیستم مرتفع شده و بخشی از بارهای قطع شده در فیدر A از طریق فیدر B تأمین شده است. لذا کاهش ۱۹۶٫۵۳۵ کیلو وات ساعت از EENS و ۱٫۴۷۱٫۰۱۶ دلار از هزینه‌های بهره‌برداری مورد انتظار در مقایسه با مورد مطالعاتی۱، نشان داده است که تقویت همزمان خطوط و پست‌های توزیع می‌تواند علاوه بر کاهش هزینه‌های بهره‌برداری از سیستم بیشترین شاخص سود به سرمایه را در مقایسه با تقویت مستقل این بخش‌ها به همراه داشته باشد. لذا نتایج این بخش کارایی مدل پیشنهادی را برای تقویت همزمان خطوط و پست‌های توزیع در سیستم‌های بزرگ تأیید می‌کند. نتایج برنامه-ریزی برای افزایش تاب‌آوری سیستم مورد مطالعه در مقابل شرایط محیطی منطقه در شکل (۷) نشان داده شده است.

۳-۵- تحلیل حساسیت نتایج برنامه‌ریزی به تغییرات بودجه سیستم توزیع

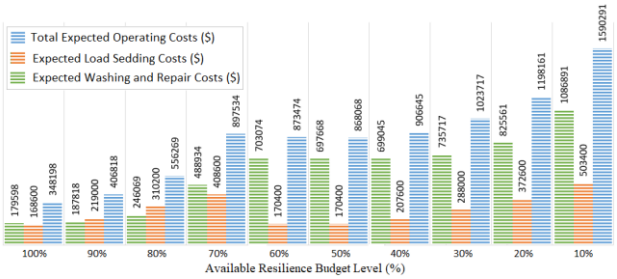
در حالت کلی، انتظار می‌رود که با افزایش محدودیت منابع مالی، بودجه در دسترس به اقداماتی اختصاص یابد که در شرایط عملیاتی بیشترین تغییر را در شاخص تاب‌آوری سیستم توزیع به همراه داشته باشند. در این بخش، اثر کاهش بودجه تاب‌آوری بر نتایج برنامه‌ریزی تقویت همزمان خطوط و پست‌های توزیع ارائه شده است. تحلیل این نتایج در تعیین اولویت‌ها و مدیریت بهینه بودجه در دسترس بسیار ارزشمند است. در این راستا، بودجه در دسترس در هر مورد مطالعاتی به درصدی از هزینه‌های سرمایه‌گذاری در شرایط بدون محدودیت بودجه (مقدار پایه در آن مورد مطالعاتی) کاهش داده شده و اثر کاهش بودجه در دسترس بر نتایج برنامه‌ریزی تقویت سیستم توزیع در جدول (۵) ارائه شده است. نتایج برنامه‌ریزی تقویت همزمان خطوط و پست-های توزیع در سطوح مختلف بودجه نشان داده است که اثر یک کاهش محدود در بودجه تقویت سیستم ابتدا با کاهش تعداد خطوط تقویت شده جبران شده است. با کاهش بیشتر بودجه به مقادیر کمتر از ۷۰٪ مقدار پایه، دیگر تقویت هیچ پستی در سیستم توزیع به صرفه نیست و سهم تقویت پست B از بودجه این مورد مطالعاتی، به تقویت خطوط توزیع اختصاص می‌یابد. تا جایی که با کاهش بودجه در دسترس به ۱۰٪ مقدار پایه، تنها ۱۹۲ مقره سیلیکونی در خطوط (۱۰،۱۱)، (۵۲،۴۴)، (۵۲،۲۲۹)، (۲۰۸،۱۴۳) و (۳۲۹،۳۳۰) جایگزین خواهد شد. در حقیقت، این خطوط، خطوط کوتاهی هستند که هزینه تقویت آنها از خسارت ناشی از خرابی احتمالی آنها در شرایط وقوع طوفان گرد و غبار کمتر است.

جدول (۵): اثر کاهش بودجه بر نتایج برنامه‌ریزی تقویت سیستم.

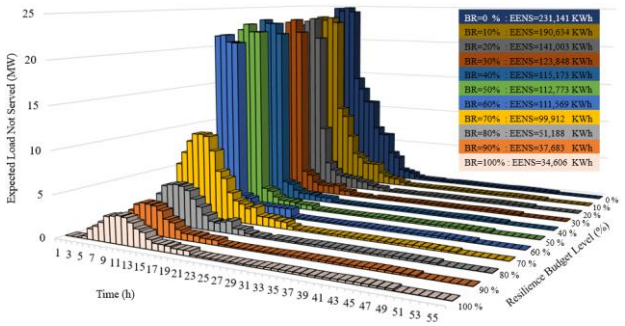
بودجه موجود	م. م. ۲	م. م. ۳		م. م. ۴		
	ت. پست	ت. خط	ت. مقره	ت. پست	ت. خط	ت. مقره
٪ ۱۰۰	۲	۶۲	۳٫۱۴۰	۱	۶۱	۲٫۹۷۰
% ۹۰	۱	۵۸	۲٫۶۶۱	۱	۵۲	۲٫۲۴۱
% ۸۰	۱	۵۴	۲٫۳۶۷	۱	۳۸	۱٫۵۱۲
% ۷۰	۱	۴۸	۲٫۰۷۹	۱	۲۳	۷۸۶
% ۶۰	۱	۴۲	۱٫۷۸۲	۰	۶۱	۲٫۹۷۰
% ۵۰	۱	۳۷	۱٫۴۷۶	۰	۶۱	۲٫۹۷۰
% ۴۰	۰	۳۲	۱٫۱۸۲	۰	۵۵	۲٫۳۷۰
% ۳۰	۰	۲۶	۸۹۱	۰	۴۱	۱٫۶۵۰
% ۲۰	۰	۱۹	۵۹۴	۰	۲۷	۹۲۴
% ۱۰	۰	۱۰	۲۹۴	۰	۵	۱۹۲

ت: تعداد م. م. : مورد مطالعاتی مقره: مقره سیلیکونی پست: پست GIS

شکل‌های (۸) و (۹) به ترتیب روند تغییرات هزینه‌های بهره‌برداری و میزان بار تأمین نشده مورد انتظار در شرایط طوفان گرد و غبار را با توجه به نتایج برنامه‌ریزی تقویت همزمان خطوط و پست‌های توزیع در سطوح مختلف بودجه نشان می‌دهند. همانطور که مشاهده می‌شود، با افزایش محدودیت‌های مالی در تقویت سیستم توزیع، کلیه هزینه‌های مورد انتظار در شرایط طوفان گرد و غبار دارای روند افزایشی هستند. این در حالی است که افزایش تعداد خطوط تقویت شده در شبکه، کاهش هزینه‌های تعمیرات و شستشوی مقره‌ها را به همراه داشته است. نتایج این بخش کارایی روش پیشنهادی را برای برنامه‌ریزی تقویت سیستم‌های توزیع در مقادیر بودجه محدود تأیید می‌کند.



شکل (۸): هزینه‌های بهره‌برداری مورد انتظار در سطوح مختلف بودجه.



شکل (۹): تغییرات انرژی و بار تأمین نشده مورد انتظار در سطوح مختلف بودجه.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.3.2.8]

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی برای تقویت همزمان خطوط و پست‌های توزیع در مقابل طوفان‌های گرد و غبار شدید در مناطق با اقلیم آب و هوایی مرطوب ارائه شد. در این مدل، اقدامات مورد نظر برای تقویت سیستم توزیع شامل جایگزینی مقره‌های سیلیکونی بجای مقره‌های سرامیکی با هدف تقویت خطوط توزیع و جایگزینی پست‌های GIS بجای پست‌های AIS با هدف تقویت نقاط تغذیه فیدرهای توزیع می‌باشد. در حوزه بهره‌برداری از سیستم توزیع در شرایط وقوع طوفان‌های گرد و غبار شدید، علاوه بر جریمه حذف بار، هزینه‌های تعمیرات و شستشوی خطوط و پست‌های آسیب دیده به عنوان بخشی از هزینه‌های بازیابی سیستم به شرایط اولیه در نظر گرفته شده است. نتایج عددی در موارد مطالعاتی مختلف نشان داده است که در برنامه‌ریزی تقویت همزمان پست‌ها و خطوط توزیع در مقابل طوفان‌های گرد و غبار شدید، با بکارگیری کلیه ظرفیت‌های سیستم توزیع می‌توان علاوه بر کاهش هزینه‌های بهره‌برداری مورد انتظار در شرایط وقوع طوفان، هزینه‌های سرمایه‌گذاری برای افزایش تاب‌آوری سیستم توزیع را نیز بطور قابل ملاحظه‌ای کاهش داد.

مراجع

Ahvaz Weather (2021). Available online: https://www.worldweatheronline.com/ahvazweatheraverages/khzestan/ir.asx

Alemohammad, S. H., Mashhour, E., Saniei, M. (2015) "A market-based method for reconfiguration of distribution network, Electric Power System Research, 125(1), 15-22.

Aminifar, F., Farhoumandi, M. (2018). Concepts and Fundamentals of Resilience Assessment in Electric Power Grids, Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers, 15(3), 83-91.

Amirioun, M. H., Aminifar, F., Lesani, H. (2018). Resilience-oriented proactive management of microgrids against windstorms, IEEE Transaction on Power Systems, 33(4), 4275-4284.

Arab, A., Khodaei, A., Khator, S. K., Ding, K., Emesih, V. A., Han, Z. (2015). Stochastic pre-hurricane restoration planning for electric power systems infrastructure, IEEE Transaction on Smart Grids, 6(2), 1046-1054.

Arif, A., Wang, Z., Wang, J., Chen, C. (2018). Power distribution system outage management with co-optimization of repairs, reconfiguration, and DG dispatch, IEEE Transaction on Smart Grid, 9(5), 4109-4118.

Arshad, Nekahi, A., McMeekin, S.G., Farzaneh, M. (2017). Effect of pollution severity and dry band location on the flashover characteristics of silicone-rubber surfaces, Electrical Engineering, 99(1), 1053-1063.

BSA, (2021). Available online: http://www.baspar-sazeh.com/index.php/en/

Chen, X., Su, W., Kavousi-Fard, A., Skowronska, A. G., Mourelatos, Z. P., Hu, Z. (2021). Resilient microgrid system design for disaster impact mitigation, Sustainable and Resilient Infrastructure, 6(1-2), 56-72.

Gao, H., Chen, Y., Mei, S., Huang, S., Xu, Y. (2017). Resilience-oriented prehurricane resource allocation in distribution systems considering electric buses, Proceedings of the IEEE, 105(7), 1214-1233.

Gholami, A., Shekari, T., Amirioun, M. H., Aminifar, F., Amini, M. H., Sargolzaei, A. (2018). Toward a consensus on the definition and taxonomy of power system resilience, IEEE Access, 6(1), 32035–32053.

Gritzalis D., Theocharidou M., Stergiopoulos G. (2019). Critical infrastructure security and resilience, 1st Edition, Switzerland, Springer.

Haghshenas, M., Hooshmand, R-A., Gholipour, M. (2022). Power Distribution System Resilience Enhancement Planning against Extreme Dust Storms via Pre- and Post-Event Actions Considering Uncertainties, Sustainable Cities and Society, 78(1), 1-19.

Hamza, A. S. H. A., Abdelgawad, N. M. K., Arafa, B. A. (2002). Effect of desert environmental conditions on the flashover voltage of insulators, Energy Conversion and Management, 43(17), 2437-2442.

Iran-Insulator, (2021). Available online: https://iraninsulator.com/en/36-kv-pin-insulator-code0309/

Jufri, F. H., Widiputra, V., Jung, J. (2019). State-of-the-art review on power grid resilience to extreme weather events, Applied Energy, 239(1), 1049-1065.

Khajeheian, D., Pasandideh, A., Ghanbary, S. (2018). Media and Crisis: Media Representation of Massive Power Outage Crisis in Khuzestan Province (Feb. 2017), Disaster Prevention and Management Knowledge, 8(3), 1-21.

Li, J., Ma, X., Liu, C., Schneider, K. P. (2014). Distribution System Restoration with Microgrids Using Spanning Tree Search, IEEE Transaction on Power Systems, 29(1), 3021-3029.

Lin, Y., Bie, Z. (2018). Tri-level optimal hardening plan for a resilient distribution system considering reconfiguration and DG islanding, Applied Energy, 210(1), 1266-1279.

Ma, S., Li, S., Wang, Z., Qiu, F. (2019). Resilience-Oriented Design of Distribution Systems, IEEE Transactions on Power Systems, 34(4), 2880-2891.

Ma, S., Su, L., Wang, Z., Qiu, F., Guo, G. (2018). Resilience enhancement of distribution grids against extreme weather events, IEEE Transaction on Power Systems, 33(5), 4842-4853.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.3.2.8]

زیرنویس‌ها

[1] Security
[2] Adequacy
[3] Resilience
[4] robustness
[5] vulnerability
[6] recoverability
[7] Prevention stage
[8] Adaptation stage
[9] Mixed Integer Linear Programing (MILP)
[10] Air Insulated Substation (AIS)
[11] Equivalent Salt Deposition Density (ESDD)
[12] Complete flashover
[13] Gas Insulated Substation (GIS)
[14] Spanning tree
[15] Tie-line
[16] Expected Energy Not Served (EENS)

Meibodi, A.E., Ghahreman, A., Taklif, A., Morshedi, A. (Jul. 2015). Economic Modeling of the Regional Polices to Combat Dust Phenomenon by Using Game Theory, Int. Conference on Applied Economics, Kazan, Russia.

NERC (2021). Reliability standards for the bulk electric systems of North America, North American Electric Reliability Corporation.

Panteli, M., Trakas, D. N., Mancarella, P., Hatziargyriou, N. D. (2017). Power systems resilience assessment: Hardening and smart operational enhancement strategies, Proceedings of the IEEE, 105(7), 1202-1213.

Qureshi, M. I., Al-Arainy, A. A., Malik, N. H. (1994). Influence of sand/dust contamination on the breakdown of asymmetrical air gaps under switching impulses, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1(2), 305-314.

Rashki, A., Middleton, N. J., Goudie, A. S. (2021). Dust storms in Iran-Distribution, causes, frequencies and impacts, Aeolian Research, 48(1), 1-17.

Shariati, M. R., Moradian, A. R., Rezaei, M., Vaseai, S. J. A. (Aug. 2005). Providing the Pollution Map in South West Provinces of Iran Based on DDG Method, IEEE/PES Transmission and Distribution Conference: Asia and Pacific, Dalian, China.

Shariatinasab, R., Saghafi, S., Khorashadizadeh, M., Ghayedi, M (2020). Probabilistic assessment of insulator failure under contaminated conditions, IET Science, Measurement & Technology, 14(5), 557-563.

Soroudi, A. (2017). Power System Optimization Modeling in GAMS, 1st Edition, Switzerland, Springer.

Statista (2022). Global inflation rate from 2016 to 2026. Available online: https://www.statista.com/statistics/256598/global-inflation-rate-compared-to-previous year/

UNEP (2016). Global Assessment of Sand and Dust Storms, United Nations Environment Programme, Nairobi.

Wu, X., Conejo, A. J. (2016). An efficient tri-level optimization model for electric grid defense planning, IEEE Transaction on Power Systems, 32(4), 2984-2994.

Xu, Y., Dong, Z. Y., Zhang, R., Hill, D. J. (2017). Multi-Timescale Coordinated Voltage/Var Control of High Renewable-Penetrated Distribution Systems, IEEE Transaction Power Systems, 32(6), 1498-4408.

Yamangil, E., Bent, R., Backhaus, S. (Jan. 2015). Resilient upgrade of electrical distribution grids, 29th Conference on Artificial Intelligence, Texas, USA.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.3.2.8]