

برنامه‌ریزی تصادفی بهبود تاب‌آوری سیستم‌های توزیع انرژی الکتریکی در مقابل طوفان‌های گرد و غبار شدید

مرتضی حق‌شناس، رحمت‌الله هوشمند و مهدی قلی‌پور

SW : مجموعه خطوط مجهز شده به کلید با اندیس i, j

Ta : مجموعه بازه‌های زمانی بهره‌برداری اضطراری با اندیس t

Tb : مجموعه بازه‌های زمانی بهره‌برداری پیشگیرانه با اندیس t

متغیرها

$C_1^I(x^{ins})$: مجموع سرمایه‌گذاری سالانه برای تعویض مقره‌ها

$C_2^I(x^{sw})$: مجموع سرمایه‌گذاری سالانه برای نصب کلید اتوماتیک

$C_3^I(x^{dg})$: مجموع سرمایه‌گذاری سالانه برای ژنراتور اضطراری

$C^O(S)$: مجموع هزینه‌های بهره‌برداری مورد انتظار در سناریو S

$C_{ij}^{R,s}$: هزینه تعمیرات و شستشوی خط ij در سناریو S

$P_{ij,t}^{s,p} / Q_{ij,t}^{s,p}$: توان اکتیو/راکتیو انتقالی از باس i به j در ساعت t

t از بازه بهره‌برداری پیشگیرانه در سناریو S (پریونیت)

$P_{i,t}^{g,s,p} / Q_{i,t}^{g,s,p}$: توان اکتیو/راکتیو تولیدی ژنراتور i در ساعت t

t از بازه بهره‌برداری پیشگیرانه در سناریو S (پریونیت)

$V_{i,t}^{s,p}$: دامنه ولتاژ باس i در ساعت t از بازه بهره‌برداری پیشگیرانه

در سناریو S (پریونیت)

$P_{i,t}^{pcc,s} / Q_{i,t}^{pcc,s}$: توان اکتیو/راکتیو دریافتی از پست i در ساعت t

از سناریو S (پریونیت)

$P_{ij,t}^{s,e} / Q_{ij,t}^{s,e}$: توان اکتیو/راکتیو انتقالی از باس i به j در ساعت t

t از بازه بهره‌برداری اضطراری در سناریو S (پریونیت)

$P_{i,t}^{g,s,e} / Q_{i,t}^{g,s,e}$: توان اکتیو/راکتیو تولیدی ژنراتور i در ساعت t

t از بازه بهره‌برداری اضطراری در سناریو S (پریونیت)

$V_{i,t}^{s,e}$: دامنه ولتاژ باس i در ساعت t از بازه بهره‌برداری اضطراری

در سناریو S (پریونیت)

$G_{ij}^{ins,s}$: هزینه تعویض یک مقره آسیب‌دیده در خط ij در سناریو S

متغیرهای باینری

x_{ij}^{ins} : متغیر باینری تعیین‌کننده تقویت خط ij با مقره سیلیکونی

x_{ij}^{sw} : متغیر باینری تعیین‌کننده نصب کلید اتوماتیک جدید در

خط ij

x_{ij}^{sw} : متغیر باینری تعیین‌کننده وجود کلید (از قبل یا جدید) در

خط ij

x_i^{dg} : متغیر باینری تعیین‌کننده نصب ژنراتور جدید در باس i

x_i^{dg} : متغیر باینری تعیین‌کننده وجود ژنراتور (از قبل یا جدید) در

باس i

$\pi_{ij,t}^{sw,s,p}$: متغیر باینری تعیین‌کننده باز (۰) یا بسته (۱) بودن کلید

خط ij در ساعت t از بازه بهره‌برداری پیشگیرانه در سناریو S

$P_{mn,t}^{s,p} / P_{nm,t}^{s,p}$: متغیر تعیین‌کننده وجود (۱) یا عدم وجود (۰) خط

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 خسارت‌های سنگینی را به صنعت برق کشور تحمیل کرده است، در این مقاله یک مدل برنامه‌ریزی دوسطحی برای بهبود تاب‌آوری سیستم‌های توزیع انرژی در مقابل این پدیده پیشنهاد شده است. در سطح اول مدل پیشنهادی، هزینه‌های سرمایه‌گذاری برای بهبود تاب‌آوری سیستم توزیع در مقابل طوفان‌های گرد و غبار و در سطح دوم آن، هزینه‌های مورد انتظار بهره‌برداری از سیستم توزیع در چارچوب محدودیت‌های مالی و عملیاتی سیستم حداقل می‌گردند. با توجه به کاهش استقامت عایقی تجهیزات شبکه توزیع در شرایط طوفان گرد و غبار، اقدامات پیشنهادی در حوزه برنامه‌ریزی شامل تقویت خطوط توزیع با مقره‌های سیلیکونی، تعیین محل کلیدهای جداکننده در شبکه توزیع و بکارگیری ژنراتورهای اضطراری می‌باشد. در مدل پیشنهادی، اقدامات حوزه بهره‌برداری به دو دسته اقدامات پیشگیرانه و اصلاحی تفکیک شده و تعامل بین سطوح برنامه‌ریزی به گونه‌ای پیاده‌سازی شده است که نتایج هر سطح به متغیرهای تصمیم و محدودیت‌های سطح مقابل وابسته است. نتایج شبیه‌سازی و مطالعات عددی بر روی شبکه ۳۳ باس IEEE و یک فیدر فشار متوسط شعاعی با ۲۰۹ گره واقع در استان خوزستان کارایی روش پیشنهادی را در مقادیر مختلف بودجه تایید کرده است.

کلیدواژه: تاب‌آوری سیستم توزیع انرژی، خاموشی گسترده، شکست عایقی، طوفان گرد و غبار، بازآرایی شبکه، ژنراتورهای اضطراری.

فهرست علائم و نشانه‌ها

مجموعه‌ها و اندیس‌ها

S : مجموعه سناریوهای هدف با اندیس S

N : مجموعه کل باس‌های شبکه با اندیس i

G : مجموعه باس‌های مجهز شده به ژنراتور با اندیس i

L : مجموعه باس‌های بار با اندیس i

PCC : مجموعه باس‌های پست با اندیس i

B : مجموعه کل خطوط شبکه با اندیس S

این مقاله در تاریخ ۳۱ خرداد ماه ۱۴۰۰ دریافت و در تاریخ ۱۱ شهریور ماه ۱۴۰۰ بازنگری شد.

مرتضی حق‌شناس، گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران، (email: haghshenas@eng.ui.ac.ir).

رحمت‌الله هوشمند (نویسنده مسئول)، گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران، (email: hooshmand_r@eng.ui.ac.ir).

مهدی قلی‌پور، گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران، (email: e.gholipour@eng.ui.ac.ir).

زیاد یاد می‌شود می‌تواند اثرات مخربی بر عملکرد زیرساخت‌های اساسی یک کشور به ویژه سیستم‌های انتقال و توزیع انرژی داشته باشند [۱]. این حوادث که معمولاً به ندرت اتفاق می‌افتند یا تا کنون هرگز تجربه نشده‌اند، محدوده جغرافیایی وسیعی را در بر گرفته و تجهیزات متعددی را به صورت هم‌زمان تحت تأثیر قرار می‌دهند، به طوری که فرایند بازیابی سیستم به شرایط اولیه بسیار پیچیده و طولانی می‌گردد.

از جمله حوادث طبیعی اثرگذار بر شبکه‌های زیرساختی که تا کنون در جهان رخ داده است می‌توان به تندباد سندی^۱ در سال ۲۰۱۲ اشاره نمود که در آن آسیب‌دیدن بیش از ۱۰۰۰ تیرک و ۹۰۰ ترانسفرماتور توزیع منجر به خاموشی بیش از ۸ میلیون مشترک برق در واشنگتن و ۱۵ ایالت دیگر آمریکا شد [۲]. در کشور ایران، سیل‌های جاری‌شده در ابتدای سال ۱۳۹۸ با آسیب جدی به شبکه‌های توزیع برق، علاوه بر تعدادی از شهرهای بزرگ، ۲۳۵۲ روستا را در استان‌های شمالی و غربی کشور برای چند روز با قطعی برق مواجه کرد. در بهمن‌ماه سال ۱۳۹۵، خارج‌شدن تعداد زیادی از پست‌ها و خطوط شبکه در استان خوزستان به علت طوفان گرد و غبار شدید و رطوبت بالای هوا، بیش از ۹۰٪ مشترکان در ۱۱ شهر این استان را بی‌برق کرد [۳] و [۴]. این در حالی است که در طراحی و بهره‌برداری از این سیستم‌ها، کلیه معیارهای قابلیت اطمینان از جمله کفایت و امنیت در نظر گرفته شده است. از این رو افزایش نرخ وقوع این خاموشی‌ها در سال‌های اخیر نشان می‌دهد که علاوه بر حوادث با احتمال مشخص، باید رفتار سیستم قدرت به عنوان حیاتی‌ترین زیرساخت کشور در شرایط وقوع حوادث با احتمال کم نیز مورد ارزیابی قرار گیرد و تمهیدات لازم جهت رفع کاستی‌ها اندیشیده شود. این رفتار که از آن تحت عنوان تاب‌آوری یاد می‌شود، میزان استقامت، آسیب‌پذیری و برگشت‌پذیری یک سیستم را در برابر حوادث شدید نشان می‌دهد و باید به عنوان یک ضرورت در طراحی و بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت مورد توجه قرار گیرد [۴] و [۵].

در حالت کلی، اقداماتی که در راستای بهبود تاب‌آوری سیستم‌های توزیع انرژی انجام می‌گیرد، به دو حوزه برنامه‌ریزی و بهره‌برداری قابل تفکیک است [۶]. اقدامات حوزه بهره‌برداری، معمولاً شامل اقدامات پیشگیرانه [۷] و اقدامات مربوط به بازیابی سیستم پس از حوادث شدید است [۸]. این در حالی است که اقدامات برنامه‌ریزی عمدتاً بر مدیریت سرمایه‌ها و نحوه توزیع آن تمرکز دارند [۹] تا [۲۲]. در این راستا، تکنیک‌های مدل‌سازی و حل مسایل برنامه‌ریزی بهبود تاب‌آوری به دو دسته برنامه‌ریزی مقاوم و برنامه‌ریزی تصادفی تفکیک می‌شوند. در رویکرد برنامه‌ریزی مقاوم، اقدامات صورت‌گرفته برای مقابله با بدترین شرایط ناشی از وقوع حادثه انجام خواهد گرفت [۹] تا [۱۳]. از این رو، این رویکرد می‌تواند منجر به هزینه‌های سرمایه‌گذاری نسبتاً زیاد و در برخی موارد غیر ضروری گردد. در [۹]، یک مدل برنامه‌ریزی مقاوم مبتنی بر مفاهیم روش مدافع-مهاجم-مدافع برای بهبود تاب‌آوری شبکه توزیع ارائه شده است. در این مدل، برنامه‌ریز سیستم در سطح اول اقدام به تقویت خطوط توزیع کرده است، در سطح دوم خطوطی که در حادثه آسیب دیده‌اند مشخص شده و در سطح سوم، بهره‌بردار سیستم، برخی اقدامات اصلاحی را با هدف کاهش هزینه‌های حذف بار در شبکه اجرا می‌کند. در [۱۰] به برنامه‌ریزی تقویت شبکه توزیع با هدف افزایش تاب‌آوری در مقابل آسیب تعدادی از خطوط پرداخته شده است. در این مسأله، در سطح اول خطوطی که باید تقویت شوند مشخص شده و در سطح دوم

mn در درخت فراگیر در ساعت t بازه بهره‌برداری پیشگیرانه در سناریو s
 $\pi_{ij,t}^{sw,s,e}$: متغیر باینری تعیین‌کننده باز (۰) یا بسته (۱) بودن کلید خط ij در ساعت t از بازه بهره‌برداری اضطراری در سناریو s
 $\rho_{mn,t}^{s,e} / \rho_{mn,t}^{s,e}$: متغیر تعیین‌کننده وجود (۱) یا عدم وجود (۰) خط mn در درخت فراگیر در ساعت t بازه بهره‌برداری اضطراری در سناریو s
 $\delta_{i,t}^{dg,s,e}$: متغیر باینری تعیین‌کننده روشن (۱) یا خاموش (۰) بودن ژنراتور i در ساعت t از بازه بهره‌برداری اضطراری در سناریو s

پارامترها

c_{ij}^{ins} : هزینه سالانه نصب یک مقره سلیکونی در خط ij
 c_{ij}^{sw} : هزینه سالانه نصب یک کلید اتوماتیک در خط ij
 c_i^{dg} : هزینه سالانه نصب یک ژنراتور اضطراری در باس i
 n_{ij}^{ins} : تعداد کل مقره‌های خط ij
 $m_{ij}^{ins,s}$: تعداد مقره‌های آسیب‌دیده خط ij در سناریو s
 $\beta_{ij}^{dg} / \beta_{ij}^{sw} / \beta_{ij}^{ins}$: ضریب بازیافت هزینه نصب یک مقره سلیکونی / یک کلید اتوماتیک / یک ژنراتور اضطراری در شبکه
 D_d : تعداد روزهای گرد و غباری در سال
 $P(s)$: احتمال رخداد سناریو s از مجموعه سناریوهای هدف
 ϕ_i : ضریب اهمیت بار در باس i شبکه
 $c_{ij}^{w,s}$: هزینه یک ساعت شستشوی مقره‌های خط ij در سناریو s
 Δt : بازه زمانی که وضعیت سیستم یک بار در آن محاسبه می‌شود.
 $Q_{i,t}^{L,s} / P_{i,t}^{L,s}$: توان اکتیو/راکتیو بار باس i در ساعت t از سناریو s
 $Q_{ij}^{max} / P_{ij}^{max}$: حداکثر توان اکتیو/راکتیو انتقالی توسط خط ij
 $Q_i^{g,max} / P_i^{g,max}$: حداکثر توان اکتیو/راکتیو تولیدی ژنراتور i
 Q^{max} / P^{max} : حداکثر توان اکتیو/راکتیو دریافتی از پست i شبکه
 V_i^{min} / V_i^{max} : حداکثر/حداقل دامنه ولتاژ مجاز در باس i شبکه
 P_i^{RD} / P_i^{RU} : نرخ افزایش/کاهش توان خروجی ژنراتور i
 X_{ij} / R_{ij} : مقاومت/راکتانس خط ij بر حسب پریونیت
 V : اندازه ولتاژ مرجع سیستم بر حسب پریونیت
 $x_{ij}^{dg,s} / x_{ij}^{sw,s}$: پارامتر باینری بیان‌کننده وجود (۱) یا عدم وجود (۰) ژنراتور در باس i کلید اتوماتیک در خط ij قبل از برنامه‌ریزی
 $\lambda_{ij,t}^{CL,s} / \lambda_{ij,t}^{PI,s}$: پارامتر باینری نشان‌دهنده آسیب (۱) یا عدم آسیب (۰) خط ij با مقره‌های سرامیکی / سلیکونی در ساعت t از سناریو s
 $\lambda_{ij,t}^s$: پارامتر باینری نشان‌دهنده وضعیت آسیب (۱) یا عدم آسیب (۰) خط ij در ساعت t سناریو s
 $t_{ij}^{f,CL}(s) / t_{ij}^{f,PI}(s)$: زمان وقوع اولین تخلیه الکتریکی در خط ij با مقره‌های سرامیکی / سلیکونی در سناریو s
 $T_{ij}^R(s)$: زمان مورد نیاز برای تعمیر خط ij در سناریو s

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، تغییرات ایجادشده در شرایط اقلیمی منجر به افزایش شدت و نرخ وقوع حوادث طبیعی گردیده است. تابستان‌های بسیار گرم و طولانی، زمستان‌های سرد همراه با یخبندان‌های شدید، سیل‌های ویرانگر، پدیده فاجعه‌بار ریزگردها و طوفان‌های گرد و غبار شدید از جمله رخدادهای طبیعی هستند که امروزه وقوع آنها در اقصی نقاط جهان دور از ذهن نیست. این وقایع که از آنها تحت عنوان حوادث با احتمال کم و اثر

سه سطحی با اهداف حداقل هزینه سرمایه‌گذاری برای تقویت شبکه، حداکثر میزان آسیب شبکه در مقابل طوفان و حداقل هزینه حذف بار در مرحله بهره‌برداری مدل‌سازی و حل شده است. در [۱۴]، [۲۱] و [۲۲] احتمال خرابی خطوط تقویت‌شده معادل درصد ثابتی از احتمال خرابی خطوط تقویت‌نشده در نظر گرفته شده است، در حالی که این فرض می‌تواند نتایجی دور از واقعیت را به همراه داشته باشد.

با توجه به قرارگرفتن ایران در همسایگی کانون‌های بزرگ گرد و غبار جهان و تحمیل خسارت‌های سنگین ناشی از پدیده ریزگردها در سال‌های گذشته، در این مقاله یک مدل جامع مبتنی بر راهکارهای عملیاتی برای برنامه‌ریزی بهبود تاب‌آوری سیستم توزیع در مقابل این پدیده پیشنهاد شده است. مهم‌ترین نوآوری‌های مدل پیشنهادی عبارتند از: (۱) شبیه‌سازی اثر گرد و غبار و رطوبت بر احتمال خرابی خطوط توزیع انرژی، (۲) برنامه‌ریزی تقویت خطوط توزیع بر اساس نتایج احتمال خرابی خطوط قبل و بعد از تقویت‌شدن با هدف کاهش عدم قطعیت در نتایج برنامه‌ریزی، (۳) ایجاد هماهنگی بین اقدامات قبل و بعد از طوفان گرد و غبار، (۴) ایجاد هماهنگی بین اقدامات پیشگیرانه و اصلاحی در حوزه بهره‌برداری از سیستم توزیع در شرایط اضطراری، (۵) مدل‌سازی هزینه‌های بازیافت تجهیزات در فرایند برنامه‌ریزی برای تقویت سیستم توزیع، (۶) برنامه‌ریزی بهبود تاب‌آوری و تعیین اقدامات کارآمد متناسب با سطوح مختلف بودجه. در بخش ۲، نحوه تأثیر طوفان‌های گرد و غبار بر عملکرد سیستم‌های توزیع بیان شده و در بخش‌های ۳ و ۴، معرفی روش پیشنهادی و مدل‌سازی ریاضی آن آمده است. در بخش ۵، نتایج شبیه‌سازی مورد بحث قرار گرفته و نهایتاً نتیجه‌گیری مقاله در بخش ۶ ارائه شده است.

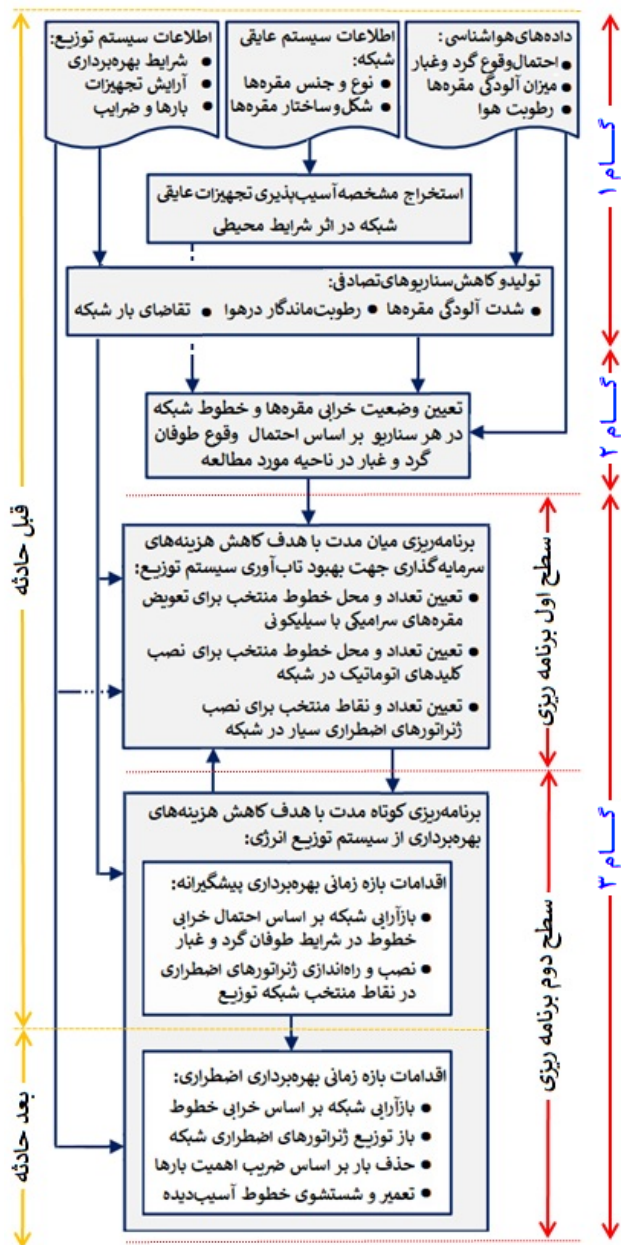
۲- ریزگردها و طوفان‌های گرد و غبار شدید

در این مقاله منظور از طوفان‌های گرد و غبار شدید، حجم عظیمی از بادرفتها در اثر جریان‌های متلاطم جوی است که در آنها قطر ذرات گرد و غبار معلق در هوا بین ۰/۰۵ تا ۰/۸ میلی‌متر بوده و قادر است میزان دید افقی را به کمتر از ۱۰۰۰ متر محدود نماید [۲۳]. فرونشست ذرات گرد و غبار بر روی سطح مفره‌ها و تجهیزات عایقی سیستم توزیع به عنوان اولین شرط لازم برای وقوع خاموشی می‌تواند خاصیت عایقی مفره‌ها را به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش داده و موجبات تخلیه الکتریکی در این تجهیزات را فراهم نماید. این پدیده زمانی در سیستم‌های قدرت قوت می‌گیرد که علاوه بر گرد و غبار ساکن بر روی سطح مفره‌ها، رطوبت ماندگار در هوا به حدی برسد که اصطلاحاً پدیده شبنم بر روی تجهیزات عایقی ایجاد گردد. در این شرایط لایه حاصل از ترکیب ریزگردها و قطرات شبنم بر روی سطح مفره‌ها شرایط را برای ایجاد جرقه و یک کانال قوس الکتریکی بر روی سطح خارجی مفره فراهم می‌کند. این در حالی است که احتمال شکست عایقی در اثر وجود پدیده ریزگرد در شرایط محیطی گرم و خشک و همچنین احتمال شکست عایقی در شرایط محیطی با رطوبت بالا و فاقد آلودگی بسیار ناچیز است. از این رو می‌توان ادعا کرد که فاجعه، زمانی رخ خواهد داد که طوفان‌های گرد و غبار خود را به مناطقی برسانند که در آنجا رطوبت ماندگار در هوا زیاد است.

از جمله روش‌های متداول برای پایش و اندازه‌گیری میزان آلودگی مفره‌ها می‌توان به روش اندازه‌گیری چگالی رسوب نمک معادل آلودگی (ESDD) اشاره نمود که جزئیات آن در [۲۴] ارائه شده است. در [۲۵] مناطق مختلف ایران از نظر سطوح آلودگی مفره‌های سیستم قدرت

هزینه‌های حذف بار با توجه به نتایج سطح اول حداقل می‌گردد. در [۱۱] از قابلیت بازآرایی شبکه برای ارتقای تاب‌آوری سیستم توزیع استفاده شده است. در این مدل که به صورت سه‌سطحی پیاده‌سازی گردیده است، اقدامات در سطح اول تنها شامل تقویت خطوط شبکه می‌شود. در سطح دوم، وضعیت آسیب خطوط شبکه تعیین می‌شود و سطح سوم به اقدامات بهره‌برداری اختصاص یافته است. در [۱۲] یک روش برنامه‌ریزی مقاوم مشابه [۹] ارائه شده است؛ با این تفاوت که علاوه بر تقویت شبکه، از ژنراتورهای اضطراری نیز برای کاهش هزینه‌های حذف بار استفاده شده و اقدامات حوزه بهره‌برداری شامل بازآرایی شبکه نمی‌شود. در [۱۳]، اقدامات حوزه بهره‌برداری به دو دسته اقدامات پیشگیرانه و اصلاحی تقسیم گردیده و نشان داده شده که ایجاد هماهنگی بین این اقدامات می‌تواند در نتایج برنامه‌ریزی سیستم توزیع نقش داشته باشد.

در روش‌های مبتنی بر برنامه‌ریزی تصادفی، حادثه و عواقب ناشی از آن به صورت پدیده‌های احتمالی مدل شده و کلیه تصمیم‌گیری‌ها بر پایه سناریوهای احتمالاتی و توابع توزیع احتمال استوار است [۱۴] تا [۲۲]. چارچوب برنامه‌ریزی تصادفی مبتنی بر سناریو، یک بستر مناسب برای مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها در فرایند برنامه‌ریزی است و با در نظر گرفتن احتمال رخداد حوادث می‌تواند از هزینه‌های سرمایه‌گذاری غیر ضروری در سیستم جلوگیری کند. در [۱۴] یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی مبتنی بر سناریو برای بهبود تاب‌آوری سیستم‌های توزیع ارائه شده که در آن، اثر خرابی تجهیزات تقویت‌شده لحاظ گردیده است، ولی ارتباط بین تصمیمات تقویت خطوط شبکه و سایر متغیرهای مسأله نامشخص است. در [۱۵] یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی جهت ارتقای تاب‌آوری سیستم توزیع ارائه گردیده و نشان داده شده که با تعیین مکان بهینه تجهیزات پشتیبان در سیستم توزیع می‌توان به طور قابل ملاحظه‌ای هزینه‌های حذف بار را کاهش داد. در [۱۶]، یک مدل برنامه‌ریزی دوسطحی برای تعیین مکان ژنراتورهای اضطراری و کلیدهای جداکننده پیشنهاد گردیده و نشان داده شد که این تجهیزات تأثیر بسزایی در کاهش میزان حذف بار و هزینه‌های بهره‌برداری اضطراری دارند. این در حالی است که در [۱۵] و [۱۶] از تقویت خطوط توزیع در مقابل حوادث شدید، چشم‌پوشی شده است. در [۱۷]، یک چارچوب برنامه‌ریزی تصادفی برای بهبود تاب‌آوری سیستم توزیع ارائه شده که در آن هدف، کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری و هزینه‌های مربوط به خاموشی در شرایط پس از طوفان است. در [۱۸]، یک مدل برنامه‌ریزی سه‌سطحی ارائه شده که در سطح اول هزینه‌های سرمایه‌گذاری برای تاب‌آوری سیستم، در سطح دوم کلیدزنی‌ها برای بازآرایی شبکه و در سطح سوم هزینه‌های حذف بار در سیستم توزیع حداقل می‌گردد. در [۱۸] هیچ محدودیتی در سرمایه‌گذاری برای تاب‌آوری سیستم توزیع در نظر گرفته نشده است. در [۱۹]، یک مدل تصادفی برای ارتقای تاب‌آوری سیستم توزیع در مقابل طوفان ارائه شده که در آن، وضعیت آسیب تجهیزات از مقایسه احتمال خرابی آنها با یک عدد تصادفی یکنواخت تعیین می‌گردد. در [۲۰]، یک مدل تصادفی دوسطحی برای بازیابی سیستم توزیع پس از حوادث شدید ارائه گردیده که در آن عدم قطعیت در زمان تعمیرات خطوط نیز لحاظ شده است. در [۲۱] یک مدل تصادفی دوسطحی ارائه شده که در سطوح اول و دوم آن به ترتیب هزینه‌های سرمایه‌گذاری و هزینه‌های مورد انتظار بهره‌برداری از سیستم توزیع در مقابل تنبداد حداقل می‌گردد. در این مدل با ایجاد تعامل بین نتایج تقویت شبکه با اقدامات اصلاحی در حوزه بهره‌برداری، بسیاری از ایرادات [۱۴] از جمله عدم قطعیت در خرابی خطوط برطرف شده است. در [۲۲] برنامه‌ریزی بهبود تاب‌آوری شبکه توزیع به صورت یک مسأله

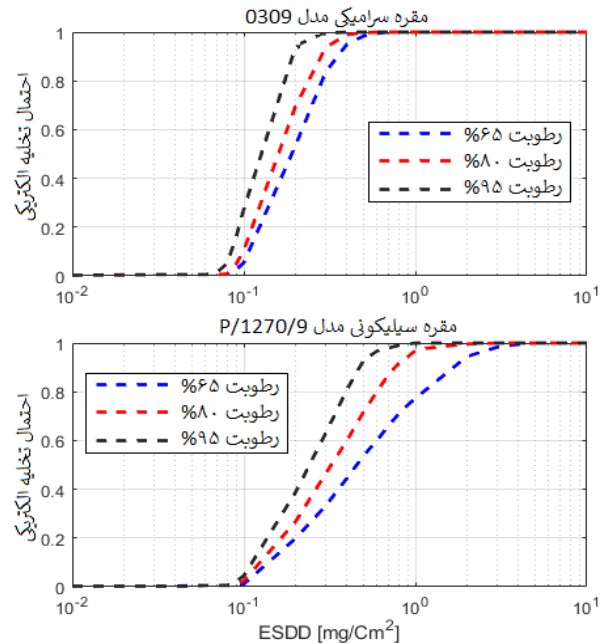


شکل ۳: روند نامی کلی روش پیشنهادی برای برنامه‌ریزی بهبود تاب‌آوری.

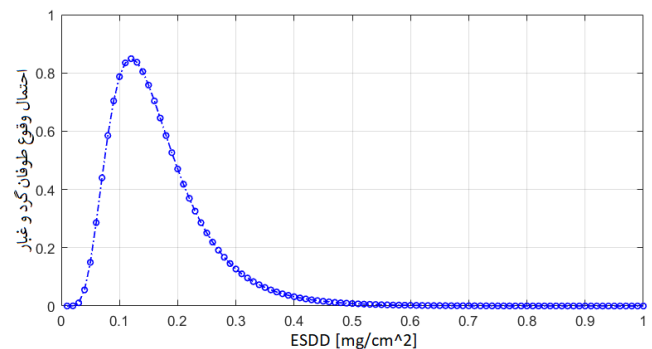
در این مقاله دو مقره سرامیکی و سیلیکونی با مشخصات جدول ۱ به عنوان مبنای مطالعات در نظر گرفته شده و با حفظ کلیت مسأله، فرض گردیده است که مشخصه آسیب‌پذیری کاتوت فیوزها و بوشینگ ترانسفرماتورهای توزیع در مقابل عوامل محیطی مشابه مقره‌های خطوط توزیع است. شکل‌های ۱ و ۲ به ترتیب نتایج احتمال تخلیه الکتریکی بر حسب شدت ESDD در مقره‌های سرامیکی و سیلیکونی و تابع چگالی احتمال طوفان گرد و غبار را بر اساس میزان ESDD در ایستگاه‌های جنوب غرب ایران در سطوح رطوبت مختلف نشان می‌دهند.

۳- مدل برنامه‌ریزی پیشنهادی برای بهبود تاب‌آوری سیستم توزیع انرژی

در این مقاله یک مدل برنامه‌ریزی دوسطحی مبتنی بر سناریو در چارچوب روش برنامه‌ریزی تصادفی برای بهبود تاب‌آوری شبکه‌های توزیع در مقابل طوفان‌های گرد و غبار ارائه شده است. همان طور که در شکل ۳ آمده است، در گام اول روش پیشنهادی، احتمال تخلیه الکتریکی در مقره‌های سرامیکی و سیلیکونی در سطوح رطوبت و آلودگی مختلف بر



شکل ۱: احتمال تخلیه الکتریکی در مقره‌های سرامیکی و سیلیکونی در سطوح رطوبت و آلودگی مختلف [۲۷].



شکل ۲: احتمال وقوع طوفان گرد و غبار در ناحیه مورد مطالعه.

جدول ۱: مشخصات مقره‌های سرامیکی [۲۸] و سیلیکونی [۲۹].

| سیلیکون رابر (مدل P/۱۲۷۰/۹) | سرامیک (مدل ۰۳۰۹) | جنس مقره (مدل) |
|--------------------------------|-------------------------|----------------------|
| شرکت بسیار سازه لوند | شرکت مقره‌سازی ایران | شرکت سازنده |
| اتکایی با فیتینگ آلومینیوم | اتکایی با پین گالوانیزه | نوع مقره |
| ۹ چترک با نمایه متناوب | ۳ چترک با نمایه متناوب | تعداد چترک |
| ۱۲۷۰ میلی‌متر | ۸۶۴ میلی‌متر | فاصله خزشی |
| ۳۶ کیلوولت | ۳۶ کیلوولت | ولتاژ نامی |
| ۴۹۰ میلی‌متر | ۳۸۸ میلی‌متر | طول مقره |
| IEC۶۱۹۵۲ | IEC۶۱۹۵۲ | استاندارد پوشش‌دهنده |

پهنه‌بندی شده و نتایج استخراج مقادیر ESDD در ۴۵ ایستگاه سنجش آلودگی مقره‌ها در جنوب و جنوب غرب ایران در [۲۶] منتشر شده است. در کار قبلی ما [۲۷]، یک روش احتمالاتی برای محاسبه احتمال تخلیه الکتریکی در مقره‌ها بر اساس شدت آلودگی سطح مقره توسعه یافته است. در این روش که مبتنی بر شبیه‌سازی اجزای محدود می‌باشد، احتمال تشکیل مسیر جرقه از الکتروود فاز تا الکتروود زمین در نقاط مختلف تعیین شده و نهایتاً احتمال وقوع تخلیه الکتریکی در مقره برای سطوح مشخصی از آلودگی و رطوبت هوا 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 [۲۷] ارائه شده است.

مدل پیشنهادی در شکل ۳ نشان داده است، کارایی هر یک از تصمیمات اتخاذ شده در سطح اول برنامه‌ریزی، در سطح دوم برنامه‌ریزی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و در صورتی که سرمایه‌گذاری‌ها در عمل توجیه اقتصادی نداشته باشند، از اجرای آنها جلوگیری می‌گردد. از طرفی، تصمیمات اتخاذ شده برای هر یک از اقدامات پیشگیرانه و اضطراری در سطح دوم برنامه‌ریزی تابعی از تصمیمات اتخاذ شده در سطح اول خواهند بود. با توجه به این که وقوع طوفان گرد و غبار از چند ساعت قبل قابل پیش‌بینی است، در مدل پیشنهادی، اقدامات حوزه بهره‌برداری به دو دسته اقدامات پیشگیرانه قبل از رخداد طوفان ($t \in Tb$) و اقدامات اضطراری در حین و بعد از آن ($t \in Ta$) تقسیم شده است. اقدامات پیشگیرانه شامل بازآرایی شبکه و تنظیم ژنراتورها و اقدامات اضطراری شامل بازآرایی شبکه، بازتوزیع ژنراتورها، حذف بار و تعمیر خطوط آسیب‌دیده با هدف کاهش هزینه‌های خاموشی می‌باشد.

۴- مدل‌سازی ریاضی و روش حل مسأله

در این بخش پس از بیان فرضیات مسأله، مدل پیشنهادی در قالب یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی آمیخته با عدد صحیح ارائه شده است. از این رو در مدل‌سازی مسأله فرض شده که (۱) سیستم توزیع می‌تواند از قبل در برخی نقاط دارای کلیدهای جداکننده و منابع تولید پراکنده باشد [۲۲]، (۲) در ایزولاسیون خطوط شبکه از مقره‌های سرامیکی استفاده شده است، (۳) مشخصه آسیب‌پذیری بوشینگ ترانسفرماتورها و کاتوت فیوزها در نقاط بار مشابه مقره‌های خطوط در نظر گرفته شده است، (۴) در سرمایه‌گذاری برای بهبود تاب‌آوری شبکه محدودیت بودجه وجود دارد [۱۷] تا [۱۹] و [۲۷]، (۵) ژنراتورهای اضطراری که در این مدل با هدف افزایش تاب‌آوری در نقاط بحرانی نصب می‌شوند متعلق به بهره‌بردار سیستم بوده و از هزینه بهره‌برداری آنها در مقابل هزینه‌های حذف بار چشم‌پوشی شده است [۱۵] تا [۱۹] و [۲۱]، (۶) در بهره‌برداری از ژنراتورهای اضطراری، محدودیت‌های عملیاتی همچون نرخ افزایش و کاهش توان وجود دارد و به کارگیری آنها پس از بازیابی کامل شبکه غیر اقتصادی است [۱۳]، (۷) تغییرات بار شبکه در تمام نقاط از یک الگوی همگن پیروی می‌کند و برای نقاط بار، ضرایب اهمیت متفاوت در نظر گرفته شده است [۲۲]، (۸) متغیرهای تصادفی مسأله شامل تغییرات بار، رطوبت ماندگار در هوا، میزان ESDD برای هر یک از مقره‌های شبکه و زمان تعمیر خطوط آسیب‌دیده است و (۹) خطوط شبکه پس از وقوع اولین تخلیه الکتریکی در مقره‌ها از مدار خارج شده و تا پایان فرایند تعویض مقره آسیب‌دیده و شستشوی کل مقره‌های خط وارد مدار نمی‌شوند.

۴-۱- توابع هدف در سطوح اول و دوم برنامه‌ریزی

۴-۱-۱- تابع هدف سطح اول (حوزه برنامه‌ریزی)

همان‌طور که قبلاً بیان شد در سطح اول مدل پیشنهادی، هدف کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری برای بهبود تاب‌آوری سیستم توزیع در مقابل طوفان‌های گرد و غبار شدید است. از این رو در (۱) جملات اول تا سوم بیانگر هزینه‌های سرمایه‌گذاری وابسته به متغیرهای تصمیم سطح اول برنامه‌ریزی هستند. از آنجا که مقره‌های سرامیکی که در خطوط منتخب با نوع سلیکونی جایگزین می‌شوند سالم و در سایر مناطق با احتمال خرابی کمتر قابل استفاده‌اند، درصدی از هزینه‌های سرمایه‌گذاری در این بخش بازیافت می‌گردد. این ضرایب برای سرمایه‌گذاری نصب کلیدهای اتوماتیک و ژنراتورهای اضطراری نیز چون می‌توانند در سایر روزهای سال در شرایط نرمال شبکه مورد بهره‌برداری قرار بگیرند از

اساس [۲۷] استخراج می‌گردد. در این گام، سناریوهای تصادفی به عنوان مبنای برنامه‌ریزی برای بهبود تاب‌آوری تولید شده و تعداد آنها به منظور کاهش حجم محاسبات کاهش می‌یابد. فرایند 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 ۱۰۰۰۰ سناریو مستقل تولید شده و سپس تعداد آنها توسط الگوریتم کاهش سناریو بازگشتی [۳۰] به ۲۰ سناریو کاهش داده شده است. سپس به منظور پوشش تمام حالت‌های ممکن، این سناریوها ترکیب شده و ۸۰۰۰ بردار سناریوی حاصل مجدداً توسط الگوریتم بازگشتی به ۲۰ بردار سناریو کاهش می‌یابند. به طوری که هر بردار سناریو شامل مؤلفه‌های 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 مؤلفه‌های تشکیل‌دهنده آن خواهد بود.

در گام دوم، میزان آسیب‌پذیری تجهیزات عایقی سیستم در هر سناریو هدف و وضعیت شکست عایقی در مقره‌ها و خطوط شبکه 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 (اگر رطوبت هوا کمتر از ۶۵٪ باشد، مقدار آن معادل ۶۵٪، در غیر این صورت اگر رطوبت هوا بیشتر از ۶۵٪ و کمتر از ۸۵٪ باشد، مقدار آن معادل ۸۵٪ و در غیر این صورت اگر رطوبت هوا بیشتر از ۸۵٪ باشد، مقدار آن ۹۵٪ در نظر گرفته می‌شود). 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 تخلیه الکتریکی گزارش می‌گردد و در غیر این صورت فرض بر این است که در آن ساعت مقره آسیب ندیده و محاسبات برای ساعت‌های بعدی تکرار می‌گردد. این فرایند یک بار به طور مستقل برای شبکه با مقره‌های سرامیکی و یک بار برای شبکه با مقره‌های سلیکونی اجرا می‌شود و نتایج آسیب خطوط برای آنها ذخیره می‌گردد. این نتایج به عنوان مبنای برنامه‌ریزی بهبود تاب‌آوری سیستم توزیع در گام سوم مورد استفاده قرار خواهند گرفت. بدیهی است که هرچه تعداد مقره‌ها در یک خط بیشتر باشد، احتمال آسیب آن خط در طوفان گرد و غبار نیز بیشتر است.

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 این رو نحوه تعامل بین سطوح اول و دوم برنامه به گونه‌ای پیاده‌سازی گردیده که تصمیمات اتخاذ شده در هر سطح وابسته به نتایج و محدودیت‌های سطح مقابل می‌باشد. در این مدل جایگزینی مقره‌های سرامیکی با نوع سلیکونی با هدف کاهش احتمال شکست عایقی در سیستم، نصب کلیدهای اتوماتیک با هدف افزایش قابلیت مانور در بازآرایی شبکه و به کارگیری ژنراتورهای اضطراری با هدف کاهش هزینه‌های حذف بار به عنوان ۳ راهکار عملی برای افزایش تاب‌آوری شبکه‌های توزیع در مقابل طوفان‌های گرد و غبار در نواحی با اقلیم آب و هوایی مرطوب پیشنهاد شده است. همان‌طور که روند نمای

۴-۲-۲ محدودیت‌های سطح دوم (حوزه بهره‌برداری)

از آنجا که در مدل پیشنهادی، حوزه بهره‌برداری به دو بازه زمانی بهره‌برداری پیشگیرانه و بهره‌برداری اضطراری (اصلاحی) تقسیم شده است، محدودیت‌های این سطح با بالانویس‌های p و e از یکدیگر تفکیک و به صورت مستقل پیاده‌سازی شده است.

(۱) محدودیت‌های سیستم در بازه بهره‌برداری پیشگیرانه

(۱-۱) محدودیت تعادل توان در باس‌های شبکه

طبق (۱۲) و (۱۳)، مجموع توان‌های ورودی و خروجی در هر باس شبکه باید در هر ساعت از هر سناریو مورد مطالعه برابر باشد

$$\sum_{\{j|(i,j) \in B\}} P_{ij,t}^{s,p} - \sum_{\{j|(i,j) \in B\}} P_{ji,t}^{s,p} = P_{i,t}^{g,s,p} - P_{i,t}^{L,s,p} \quad \forall i \in N, t \in Tb \quad (12)$$

$$\sum_{\{j|(i,j) \in B\}} Q_{ij,t}^{s,p} - \sum_{\{j|(i,j) \in B\}} Q_{ji,t}^{s,p} = Q_{i,t}^{g,s,p} - Q_{i,t}^{L,s,p} \quad \forall i \in N, t \in Tb \quad (13)$$

(۲-۱) محدودیت کلیدزنی و بازآرایی در شبکه

در فرایند بازآرایی شبکه در بازه بهره‌برداری پیشگیرانه، قطع و وصل خطوط تنها محدود به خطوطی است که در آنها کلید نصب شده باشد [۲۲]. از طرفی انتقال توان در این خطوط منوط به بسته‌بودن کلید است

$$\pi_{ij,t}^{s,s,p} \leq x_{ij}^{sw} \quad \forall (i,j) \in SW, t \in Tb \quad (14)$$

(۳-۱) محدودیت توان انتقالی از خطوط شبکه

در صورتی که خط ij دارای کلید باشد، توان‌های انتقالی از آن بر اساس حد حرارتی خطوط و وضعیت کلیدها توسط (۱۵) و (۱۶) محدود می‌گردد. در غیر این صورت، حداکثر توان انتقالی خطوط شبکه در (۱۷) و (۱۸) تنها تابعی از حد حرارتی آنها خواهد بود

$$-\pi_{ij}^{sw,s,p} \cdot P_{ij}^{\max} - (1 - x_{ij}^{sw})M \leq P_{ij,t}^{s,p} \leq \pi_{ij}^{sw,s,p} \cdot P_{ij}^{\max} + (1 - x_{ij}^{sw})M \quad \forall (i,j) \in SW, t \in Tb \quad (15)$$

$$-\pi_{ij}^{sw,s,p} \cdot Q_{ij}^{\max} - (1 - x_{ij}^{sw})M \leq Q_{ij,t}^{s,p} \leq \pi_{ij}^{sw,s,p} \cdot Q_{ij}^{\max} + (1 - x_{ij}^{sw})M \quad \forall (i,j) \in SW, t \in Tb \quad (16)$$

$$-P_{ij}^{\max} - x_{ij}^{sw}M \leq P_{ij,t}^{s,p} \leq P_{ij}^{\max} + x_{ij}^{sw}M \quad \forall (i,j) \in B, t \in Tb \quad (17)$$

$$-Q_{ij}^{\max} - x_{ij}^{sw}M \leq Q_{ij,t}^{s,p} \leq Q_{ij}^{\max} + x_{ij}^{sw}M \quad \forall (i,j) \in B, t \in Tb \quad (18)$$

(۴-۱) محدودیت توان خروجی ژنراتورهای اضطراری

در بازه بهره‌برداری پیشگیرانه، ژنراتورهای اضطراری در نقاط منتخب شبکه نصب شده و توان خروجی آنها در هر ساعت بر اساس محدودیت‌های حداکثر توان خروجی و نرخ‌های افزایش و کاهش توان خروجی ژنراتورها کنترل می‌گردد [۱۳]

$$\cdot \leq P_{i,t}^{g,s,p} \leq x_i^{dg} \cdot P_i^{g,\max} \quad \forall (i) \in G, t \in Tb \quad (19)$$

$$\cdot \leq Q_{i,t}^{g,s,p} \leq x_i^{dg} \cdot Q_i^{g,\max} \quad \forall (i) \in G, t \in Tb \quad (20)$$

$$P_i^{RD} \leq P_{i,t}^{g,s,p} - P_{i,t-\Delta}^{g,s,p} \leq P_i^{RU} \quad \forall (i) \in G, t \in Tb \quad (21)$$

تخصیص کل هزینه‌های سرمایه‌گذاری به یک حادثه با احتمال وقوع کم (طوفان گرد و غبار) جلوگیری می‌کند. ترم چهارم در (۱) بیانگر هزینه‌های مورد انتظار بهره‌برداری از شبکه توزیع در شرایط وقوع طوفان گرد و غبار است

$$\min \{ C_v^I(x^{ins}) + C_v^I(x^{sw}) + C_v^I(x^{dg}) + D_d \sum_{s \in S} p(s) \times C^O(s) \} \quad (1)$$

که در آن

$$C_v^I(x^{ins}) = \sum_{(i,j) \in B} c_{ij}^{ins} \times n_{ij}^{ins} \times (1 - \beta_{ij}^{ins}) \times x_{ij}^{ins} \quad (2)$$

$$C_v^I(x^{sw}) = \sum_{(i,j) \in SW} c_{ij}^{sw} \times (1 - \beta_{ij}^{sw}) \times x_{ij}^{sw} \quad (3)$$

$$C_v^I(x^{dg}) = \sum_{(i) \in G} c_i^{dg} \times (1 - \beta_i^{dg}) \times x_i^{dg} \leq \beta_{ij}^{ins}, \beta_{ij}^{sw}, \beta_i^{dg} \leq 1 \quad (4)$$

۴-۱-۲ تابع هدف سطح دوم (حوزه بهره‌برداری)

در سطح دوم مدل پیشنهادی، هدف کاهش هزینه‌های مورد انتظار در بهره‌برداری از سیستم توزیع در شرایط طوفان گرد و غبار (شامل هزینه‌های حذف بار، هزینه تعویض مقره‌های آسیب‌دیده و هزینه شستشوی مقره‌ها در خطوط شبکه) است

$$C^O(s) = \min \left\{ \sum_{t \in Ta} \sum_{i \in L} \phi_i \cdot c_i^L \cdot \gamma_{i,t}^s \cdot P_{i,t}^{L,s} \cdot \Delta t + \sum_{(i,j) \in B} c_{ij}^{R,s} \right\} \quad (5)$$

که در آن

$$c_{ij}^{R,s} = m_{ij}^{ins,s} \cdot \zeta_{ij}^{ins,s} + c_{ij}^{sw,s} \cdot \sum_{t \in Ta} \lambda_{ij,t}^s \quad (6)$$

$$\forall (i,j) \in B, t \in Ta$$

$$\zeta_{ij}^{ins,s} = c_{ij}^{ins} \cdot (x_{ij}^{ins} + (1 - x_{ij}^{ins}) \beta_{ij}^{ins}) \quad (7)$$

$$\forall (i,j) \in B, t \in Ta$$

$$\lambda_{ij,t}^s = (1 - x_{ij}^{ins}) \lambda_{ij,t}^{PI,s} + x_{ij}^{ins} \lambda_{ij,t}^{CI,s} \quad (8)$$

$$\forall (i,j) \in B, t \in Ta$$

۴-۲-۲ قیود و محدودیت‌های سطوح برنامه‌ریزی

۴-۲-۱ محدودیت‌های سطح اول (حوزه برنامه‌ریزی)

در مدل پیشنهادی، مجموع هزینه‌های سرمایه‌گذاری در سیستم توزیع توسط (۹) به منابع مالی در دسترس محدود شده است. در محدودیت‌های (۱۰) و (۱۱) با به کارگیری پارامترهای باینری x_{ij}^{sw} و x_i^{dg} از نصب کلید و ژنراتورهای اضطراری در نقاطی که از قبل به این تجهیزات مجهز هستند، جلوگیری شده و متغیرهای x_{ij}^{sw} و x_i^{dg} وضعیت نصب کلیدها و ژنراتورهای جدید را در شبکه تعیین می‌کنند

$$C_v^I(x^{ins}) + C_v^I(x^{sw}) + C_v^I(x^{dg}) \leq Budget \quad (9)$$

$$x_{ij}^{sw} + x_{ij}^{sw} = x_{ij}^{sw} \quad \forall (i,j) \in SW \quad (10)$$

$$x_{ij}^{sw} \leq 1$$

$$x_i^{dg} + x_i^{dg} = x_i^{dg} \quad \forall (i) \in G \quad (11)$$

$$x_i^{dg} \leq 1$$

۵-۱) محدودیت ولتاژ در باس‌های شبکه

در بازه بهره‌برداری پیشگیرانه، دامنه ولتاژ باس‌ها که تابعی از وضعیت کلیدها و توان‌های عبوری از خطوط شبکه است توسط (۲۴) محدود می‌شود. در این بازه زمانی در صورتی که خط ij دارای کلید باشد، (۲۲) و در غیر این صورت (۲۳) برای محاسبه ولتاژ باس j فعال خواهد شد [۸]

$$V_{i,t}^{s,p} - \frac{R_{ij} \cdot P_{ij,t}^{s,p} + X_{ij} \cdot Q_{ij,t}^{s,p}}{V_i} - (1 - \pi_{ij,t}^{sw,s,p} + 1 - x_{ij}^{sw}) \times M \leq V_{j,t}^{s,p} \leq V_{i,t}^{s,p} - \frac{R_{ij} \cdot P_{ij,t}^{s,p} + X_{ij} \cdot Q_{ij,t}^{s,p}}{V_i} \quad (22)$$

$$+ (1 - \pi_{ij,t}^{sw,s,p} + 1 - x_{ij}^{sw}) M \quad \forall (i,j) \in SW, t \in Tb$$

$$V_{i,t}^{s,p} - \frac{R_{ij} \cdot P_{ij,t}^{s,p} + X_{ij} \cdot Q_{ij,t}^{s,p}}{V_i} - x_{ij}^{sw} \cdot M \leq V_{j,t}^{s,p} \quad (23)$$

$$\leq V_{i,t}^{s,p} - \frac{R_{ij} \cdot P_{ij,t}^{s,p} + X_{ij} \cdot Q_{ij,t}^{s,p}}{V_i} + x_{ij}^{sw} \cdot M \quad \forall (i,j) \in B, t \in Tb$$

$$V_i^{\min} \leq V_{i,t}^{s,p} \leq V_i^{\max} \quad \forall i \in N, t \in Tb \quad (24)$$

۶-۱) محدودیت ساختار شعاعی در بازآرایی شبکه

شبکه‌های توزیع انرژی الکتریکی عمدتاً به صورت شعاعی مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند و در شرایط بهره‌برداری پیشگیرانه، هنگامی که سیستم بازآرایی می‌شود باید ساختار شعاعی آن تحت هر شرایطی حفظ گردد. در این مقاله از قواعد درخت فراگیر برای بیان محدودیت شعاعی ماندن شبکه توزیع بدون وابستگی به جهت انتقال توان در شرایط بازآرایی استفاده شده است [۳۱]

$$\rho_{mn,t}^{s,p} + \rho_{nm,t}^{s,p} - x_{ij}^{sw} M \leq 1 \leq \rho_{mn,t}^{s,p} + \rho_{nm,t}^{s,p} + x_{ij}^{sw} M \quad \forall (i,j) \in B, t \in Tb \quad (25)$$

$$\rho_{mn,t}^{s,p} + \rho_{nm,t}^{s,p} - (1 - x_{ij}^{sw}) M \leq \pi_{ij,t}^{sw,s,p} \leq \rho_{mn,t}^{s,p} + \rho_{nm,t}^{s,p} + (1 - x_{ij}^{sw}) M \quad \forall (i,j) \in SW, t \in Tb \quad (26)$$

$$\rho_{mn,t}^{s,p} = 0 \quad \forall (m,n) \in PCC, t \in Tb \quad (27)$$

$$\sum_{n \in N} \rho_{mn,t}^{s,p} \leq 1 \quad \forall m \in N, t \in Tb \quad (28)$$

در این روابط، $\rho_{mn,t}^{s,p}$ و $\rho_{nm,t}^{s,p}$ متغیرهای باینری هستند و مجموعه PCC شامل باس‌هایی است که شبکه توزیع توسط آنها از شبکه بالادست تغذیه می‌گردد. بازه بهره‌برداری پیشگیرانه در هر سناریو تا زمان گزارش اولین خرابی ناشی از طوفان گرد و غبار در خطوط با مقده‌های سرامیکی ($t_{ij}^{f,PI}(s)$) یا سیلیکونی ($t_{ij}^{f,CI}(s)$) ادامه خواهد داشت و سپس بازه بهره‌برداری اضطراری و در پی آن اقدامات اصلاحی آغاز می‌گردد. در اینجا، زمان تعمیر هر خط ($T_{ij}^R(s)$) تابعی از طول، تعداد تیرک‌ها و تعداد مقده‌های نصب‌شده در آن خط است. این زمان که زمان لازم برای تعویض مقده‌های آسیب‌دیده در خط ij و شستشوی سایر مقده‌های این خط است، یکی از متغیرهای تصادفی در مدل پیشنهادی است که توسط تابع توزیع ویبول مدل‌سازی می‌گردد [۷]. بر این اساس در بازه بهره‌برداری اضطراری می‌توان وضعیت خرابی خطوط با مقده‌های سرامیکی و سیلیکونی را با توجه به زمان آسیب اولین مقده در آنها و همچنین زمان مورد نیاز برای تعمیر و شستشوی آنها توسط (۲۹) و (۳۰)

تعیین نمود. پس از تعیین وضعیت آسیب خطوط در هر سناریو، بایستی محدودیت‌های بهره‌برداری از شبکه با در نظر گرفتن خرابی خطوط توزیع رعایت گردد

$$\lambda_{ij,t}^{PI,s} = \begin{cases} 1 & t_{ij}^{f,PI}(s) \leq t \leq t_{ij}^{f,PI}(s) + T_{ij}^R(s), t \in Ta \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (29)$$

$$\lambda_{ij,t}^{CI,s} = \begin{cases} 1 & t_{ij}^{f,CI}(s) \leq t \leq t_{ij}^{f,CI}(s) + T_{ij}^R(s), t \in Ta \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (30)$$

۲) محدودیت‌های سیستم در بازه بهره‌برداری اضطراری

۱-۲) محدودیت تعادل توان در باس‌های شبکه

$$\sum_{\{j|(i,j) \in B\}} P_{ij,t}^{s,e} - \sum_{\{j|(i,j) \in B\}} P_{ji,t}^{s,e} = P_{i,t}^{g,s,e} - (1 - \gamma_{i,t}^s) P_{i,t}^{L,s,e} \quad \forall i \in N, t \in Ta \quad (31)$$

$$\sum_{\{j|(i,j) \in B\}} Q_{ij,t}^{s,e} - \sum_{\{j|(i,j) \in B\}} Q_{ji,t}^{s,e} = Q_{i,t}^{g,s,e} - (1 - \gamma_{i,t}^s) Q_{i,t}^{L,s,e} \quad \forall i \in N, t \in Ta \quad (32)$$

۲-۲) محدودیت کلیدزنی و بازآرایی در شبکه

در این بازه زمانی، انتقال توان در خطوط شبکه تابع وضعیت آسیب خطوط و کلید روی آنها می‌باشد

$$\pi_{ij,t}^{sw,s,e} \leq x_{ij}^{sw} \quad \forall (i,j) \in SW, t \in Ta \quad (33)$$

$$\pi_{ij,t}^{sw,s,e} + \lambda_{ij,t}^s \leq 1 \quad \forall (i,j) \in SW, t \in Ta \quad (34)$$

۳-۲) محدودیت توان انتقالی از خطوط شبکه

در این بازه زمانی در صورتی که خط ij دارای کلید باشد، محدودیت‌های توان انتقالی خطوط مشابه (۱۵) و (۱۶) و در غیر این صورت مطابق (۳۵) و (۳۶) تابع حداکثر ظرفیت تجهیزات و وضعیت آسیب خطوط است

$$-(1 - \lambda_{ij,t}^s) P_{ij,t}^{\max} - x_{ij}^{sw} M \leq P_{ij,t}^{s,e} \leq (1 - \lambda_{ij,t}^s) P_{ij,t}^{\max} + x_{ij}^{sw} M \quad \forall (i,j) \in B, t \in Ta \quad (35)$$

$$-(1 - \lambda_{ij,t}^s) Q_{ij,t}^{\max} - x_{ij}^{sw} M \leq Q_{ij,t}^{s,e} \leq (1 - \lambda_{ij,t}^s) Q_{ij,t}^{\max} + x_{ij}^{sw} M \quad \forall (i,j) \in B, t \in Ta \quad (36)$$

۴-۲) محدودیت توان خروجی ژنراتورهای اضطراری

از آنجا که بهره‌برداری از ژنراتورهای اضطراری در شرایط عادی غیر اقتصادی فرض شده است، توان خروجی این ژنراتورها پس از بازیابی کامل شبکه توسط متغیر باینری $\delta_{i,t}^{dg,s,e}$ صفر خواهد شد [۱۳]

$$0 \leq P_{i,t}^{g,s,e} \leq x_i^{dg} \cdot \delta_{i,t}^{dg,s,e} \cdot P_i^{g,\max} \quad \forall (i) \in G, t \in Ta \quad (37)$$

$$0 \leq Q_{i,t}^{g,s,e} \leq x_i^{dg} \cdot \delta_{i,t}^{dg,s,e} \cdot Q_i^{g,\max} \quad \forall (i) \in G, t \in Ta \quad (38)$$

$$P_i^{RD} \leq P_{i,t}^{g,s,e} - P_{i,t-\tau}^{g,s,e} \leq P_i^{RU} \quad \forall (i) \in G, t \in Ta \quad (39)$$

۵-۲) محدودیت ولتاژ در باس‌های شبکه

در بازه بهره‌برداری اضطراری، دامنه ولتاژ باس‌ها تابعی از وضعیت کلیدها، وضعیت خرابی خطوط و توان‌های عبوری از آنها می‌باشد. در این بازه زمانی، با صرف نظر از این که اگر خط ij در اثر طوفان گرد و غبار آسیب ببیند از (۴۰) برای محاسبه ولتاژ باس j استفاده خواهد شد و سایر روابط مشابه بازه بهره‌برداری پیشگیرانه است

۵- نتایج شبیه‌سازی و مطالعات عددی

در این بخش نتایج شبیه‌سازی و مطالعات عددی حاصل از پیاده‌سازی مدل پیشنهادی روی شبکه ۳۳ باسه استاندارد IEEE و یک فیدر شعاعی نمونه واقع در استان خوزستان ارائه شده است. در این راستا، از تابع توزیع نرمال با مقدار متوسط نتایج اندازه‌گیری ESDD مربوط به ایستگاه‌های سنجش آلودگی مقرردها در استان خوزستان ($1/16 \times 10^3 \text{ mg/cm}^3$) [۲۶] با انحراف معیار $0/10248$ برای تولید سناریوهای آلودگی مینا در منطقه مورد مطالعه استفاده شده است. به منظور متمایز کردن رفتار مقرردهای شبکه در هر سناریو، از ضرایب تصادفی تولیدشده توسط تابع توزیع نرمال با مقدار متوسط ۱ و انحراف معیار $0/1$ برای هر مقررده استفاده گردیده است. در تولید سناریوهای رطوبت هوا از اطلاعات و منحنی متوسط تغییرات ساعتی هوای استان خوزستان در شش‌ماه دوم سال و تابع توزیع ویبول با پارامترهای $k = 10$ و $\gamma = 1/128$ استفاده شده است [۳۲]. سناریوهای تصادفی بار شبکه بر اساس مقادیر پیک و منحنی تغییرات بار روزانه فیدر ۲۰۹ باسه خوزستان در شش‌ماه دوم سال [۲۷] و ضرایب تصادفی ایجادشده توسط تابع توزیع نرمال تولید گردیده است [۵]. در تولید زمان تصادفی تعمیر خطوط آسیب‌دیده، تعداد مقرردهای هر خط با فرض فاصله ۴۵ متر بین پایه‌ها و ۳ مقررده روی هر پایه میانی و ۹ مقررده روی هر پایه در نقاط بار تعیین شده [۲۷] است. در این راستا زمان تعمیر هر یک از خطوط در هر سناریو هدف معادل حاصل ضرب (۱) تعداد پایه‌های آن خط در (۲) متوسط زمان لازم برای شستشوی مقرردهای هر پایه در (۳) یک عدد تصادفی حاصل از تابع توزیع ویبول [۷] با پارامترهای $k = 5$ و $\gamma = 3$ می‌باشد.

در ناحیه مورد مطالعه احتمال وقوع سه روز طوفان گرد و غبار در سال وجود خواهد داشت. از این رو در فرایند تولید سناریو فرض شده که هر طوفان گرد و غبار به طور متوسط تا ۲۴ ساعت مداومت داشته و اقدامات پیشگیرانه از ۶ ساعت قبل طوفان قابل اجرا می‌باشد. در تعیین وضعیت آسیب‌پذیری مقرردها در هر ساعت از سناریوهای هدف، ابتدا میزان رطوبت هوا در آن ساعت اندازه‌گیری شده و با توجه به شدت آلودگی هر یک از مقرردها در همان ساعت، احتمال تخلیه الکتریکی و وضعیت آسیب مقررده بر اساس منحنی آسیب‌پذیری مقررده و احتمال رخداد آن میزان آلودگی در ناحیه مورد مطالعه تعیین می‌گردد. در شبیه‌سازی موارد مطالعاتی، طول عمر هر ژنراتور اضطراری ۳۰ سال، کلیدهای اتوماتیک ۱۰ سال و مقرردهای سلیکونی ۲۰ سال در نظر گرفته شده است. بر این اساس، هزینه‌های سرمایه‌گذاری با چشم‌پوشی از میزان تورم سالیانه در جدول ۲ و نتایج سناریوهای تصادفی گرد و غبار، رطوبت هوا و بار شبکه در شکل ۴ ارائه شده است. در این نتایج، تغییرات مقدار متوسط شدت آلودگی ناشی از طوفان گرد و غبار در مقابل تغییرات قابل توجه رطوبت هوا نشان می‌دهد که احتمال وقوع تخلیه الکتریکی در تجهیزات عایقی شبکه در ساعات اولیه بامداد در مقایسه با سایر ساعات روز بیشتر خواهد بود.

۵-۱ نتایج شبیه‌سازی شبکه ۳۳ باسه استاندارد IEEE

در این بخش نتایج حاصل از پیاده‌سازی مدل پیشنهادی بر روی شبکه استاندارد ۳۳ باسه با ۳۷ خط و مجموع ۲۴۴۵ مقررده در خطوط توزیع و نقاط بار، در چند مورد مطالعاتی مختلف ارائه شده است. نتایج شبیه‌سازی حالت پایه در شرایطی که هیچ اقدامی برای بهبود تاب‌آوری انجام نشده است نشان می‌دهد که وقوع طوفان گرد و غبار در شرایط سناریوهای مورد مطالعه می‌تواند سالانه خسارتی بالغ بر ۹۴۹۶۰۲ دلار به شبکه تحمیل نماید. به منظور ارزیابی عملکرد اقدامات پیشنهادی برای بهبود تاب‌آوری

جدول ۲: پارامترهای شبیه‌سازی در مدل برنامه‌ریزی پیشنهادی.

| پارامترهای شبیه‌سازی | مقدار |
|--|--------------------------|
| هزینه سالانه نصب یک مقررده سلیکونی در شبکه | ۱۵ دلار [۲۹] |
| هزینه سالانه نصب یک کلید اتوماتیک در شبکه | ۱۵۰۰ دلار [۲۲] |
| هزینه سالانه نصب یک ژنراتور اضطراری | ۱۲۵۰۰ دلار [۲۲] |
| ضریب بازیافت هزینه مقرردهای سلیکونی | ۰/۲ [۲۷] |
| ضریب بازیافت هزینه کلیدهای اتوماتیک | ۰/۸ |
| ضریب بازیافت هزینه ژنراتورهای اضطراری | ۰/۵ |
| دامنه مجاز برای ولتاژ باس‌های شبکه | $1 \pm 1/05$ پریونیت [۸] |
| حداکثر توان اکتیو خروجی ژنراتورها | ۲۵۰ کیلووات |
| حداکثر توان راکتیو خروجی ژنراتورها | ۱۵۰ کیلووار |
| جریمه حذف هر کیلووات بار در یک ساعت | ۲/۵ دلار [۳۳] |
| هزینه تعمیر و شستشوی مقرردها در خطوط شبکه | ۲۰۰ دلار [۲۷] |

$$v_{i,t}^{s,e} - \frac{R_{ij} \cdot P_{ij,t}^{s,e} + X_{ij} \cdot Q_{ij,t}^{s,e}}{V_i} - (\lambda_{ij,t}^s + x_{ij}^{sw}) \cdot M \leq v_{j,t}^{s,e} \leq v_{i,t}^{s,e} - \frac{R_{ij} \cdot P_{ij,t}^{s,e} + X_{ij} \cdot Q_{ij,t}^{s,e}}{V_i} + (\lambda_{ij,t}^s + x_{ij}^{sw}) \cdot M \quad (40)$$

$$\forall (i, j) \in B, t \in Ta$$

۲-۶ محدودیت ساختار شعاعی در بازآرایی شبکه

پس از وقوع حادثه، علاوه بر خطوط دارای کلید، خطوط آسیب‌دیده نیز ارتباط بین نقاط را در درخت فراگیر تحت تأثیر قرار می‌دهند. از این رو در این بازه زمانی با صرف نظر از این که در خطوط فاقد کلید از (۴۱) برای تعیین متغیرهای درخت فراگیر استفاده خواهد شد، محدودیت‌های بازآرایی شبکه مشابه بازه بهره‌برداری پیشگیرانه است [۳۱]

$$\rho_{mn,t}^{s,e} + \rho_{nm,t}^{s,e} - x_{ij}^{sw} M \leq 1 - \lambda_{ij,t}^s \leq \rho_{mn,t}^{s,e} + \rho_{nm,t}^{s,e} + x_{ij}^{sw} M \quad (41)$$

$$\forall (i, j) \in B, t \in Ta$$

۲-۷ محدودیت حذف بار در شبکه

$$0 \leq \gamma_{i,t}^s \leq 1 \quad \forall i \in L, t \in Ta \quad (42)$$

۲-۸ محدودیت تبادل توان با شبکه بالادست

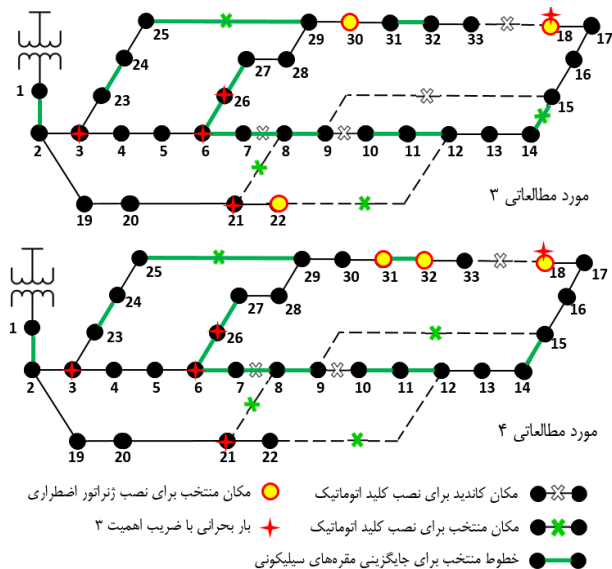
در مدل پیشنهادی محدودبودن ظرفیت ژنراتورهای اضطراری در مقابل تقاضای بارهای شبکه، تبادل توان را تنها از شبکه بالادست به شبکه توزیع امکان‌پذیر می‌کند. لذا در تمام حالت‌ها P^{\max} و Q^{\max} حداکثر توان‌های قابل دریافت از شبکه بالادست در نقطه اتصال می‌باشند

$$0 \leq P_{i,t}^{pcc,s} \leq P^{\max} \quad \forall i \in PCC \quad (43)$$

$$0 \leq Q_{i,t}^{pcc,s} \leq Q^{\max} \quad \forall i \in PCC \quad (44)$$

۴-۳ روش حل مسأله

در این مقاله فرایند تولید و کاهش کلیه سناریوهای تصادفی به طور مستقل در نرم‌افزار Matlab پیاده‌سازی و از نتایج آن در مدل پیشنهادی برای برنامه‌ریزی بهبود تاب‌آوری سیستم‌های توزیع در مقابل طوفان‌های گرد و غبار شدید استفاده شده است. مدل برنامه‌ریزی پیشنهادی در این مقاله یک مدل خطی آمیخته با عدد صحیح (MILP) است که در نرم‌افزار گمز توسط حل‌کننده CPLEX قابل حل می‌باشد.

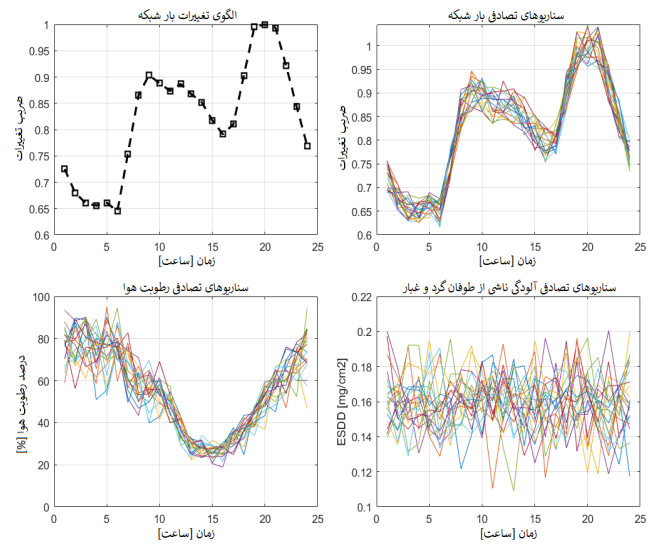


شکل ۵: نتایج اقدامات سرمایه‌گذاری در موارد مطالعاتی ۳ و ۴ شبکه ۳۳ باسه.

شبکه، هزینه‌های حذف بار را به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش داده است. در این مورد مطالعاتی با نصب ۳ ژنراتور اضطراری، ۵ کلید اتوماتیک و ۵۵۰ مقره سیلیکونی در ۱۲ خط شبکه، مجموع هزینه‌های مورد انتظار برای بهره‌برداری از سیستم توزیع در طوفان گرد و غبار به ۱۱۸/۶۸۴ دلار کاهش یافته است. در مورد مطالعاتی ۴، اجرای اقدامات پیشگیرانه به اقدامات حوزه بهره‌برداری اضافه شده است. در این مورد مطالعاتی، ژنراتورهای اضطراری با هدف تغذیه بارهای بحرانی سیستم و بهبود فرایند بازآرایی شبکه، ۶ ساعت قبل وقوع حادثه در نقاط منتخب شبکه نصب و راه‌اندازی شده‌اند. نتایج سرمایه‌گذاری برای این مورد مطالعاتی نشان داده است که در نظر گرفتن اقدامات پیشگیرانه در تعیین الگوی تقویت سیستم توزیع نقش داشته و نصب ۳ ژنراتور اضطراری، ۵ کلید اتوماتیک و ۵۵۰ مقره سیلیکونی در ۱۲ خط شبکه با هزینه سرمایه‌گذاری برابر و الگویی متفاوت با مورد مطالعاتی قبل منجر به کاهش بیشتر هزینه‌های حذف بار در مقایسه با مورد مطالعاتی ۳ شده است. از طرفی نتایج سود حاصل از اقدامات اجرایی در موارد مطالعاتی نشان می‌دهد که با افزایش تنوع اقدامات و ایجاد هماهنگی بین آنها، سود حاصل از برنامه‌ریزی افزایش خواهد یافت. در این راستا بیشترین سود در شرایطی حاصل شده است که در مورد مطالعاتی چهارم بین اقدامات پیشگیرانه و اصلاحی در بهره‌برداری از سیستم توزیع هماهنگی ایجاد شده است. این در حالی است که کاهش شاخص سود به سرمایه در موارد مطالعاتی ۳ و ۴ ناشی از بالابودن هزینه نصب ژنراتورهای اضطراری در مقایسه با سایر اقدامات است. تحلیل نتایج سود و سرمایه برای این شبکه در جدول ۳ نشان می‌دهد که زمان بازگشت سرمایه در موارد مطالعاتی ۱ و ۲ در سال اول و در موارد مطالعاتی ۳ و ۴ در سال دوم است. نتایج برنامه‌ریزی برای بهبود تاب‌آوری شبکه ۳۳ باسه در موارد مطالعاتی ۳ و ۴ در شکل ۵ ارائه شده است.

۲-۵ نتایج شبیه‌سازی فیدر ۲۰۹ باسه در استان خوزستان

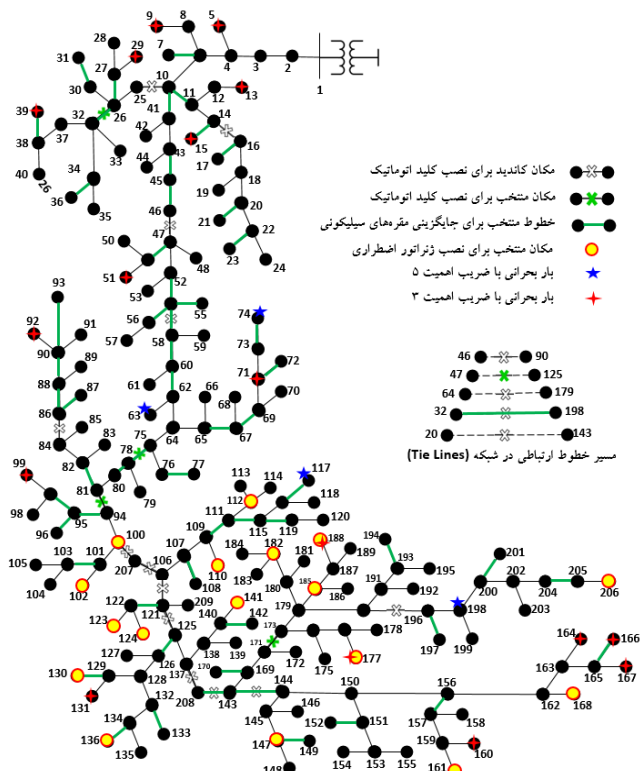
در این بخش، یک فیدر ۳۳ کیلوولت از شبکه توزیع نیروی برق استان خوزستان به عنوان سیستم تست عملی انتخاب و کارایی مدل پیشنهادی بر روی آن ارزیابی شده است. این فیدر دارای ۲۰۹ گره، ۲۰۸ شاخه اصلی، ۹۸ ترانسفرماتور توزیع در نقاط بار، ۵ خط ارتباطی بین نقاط داخلی



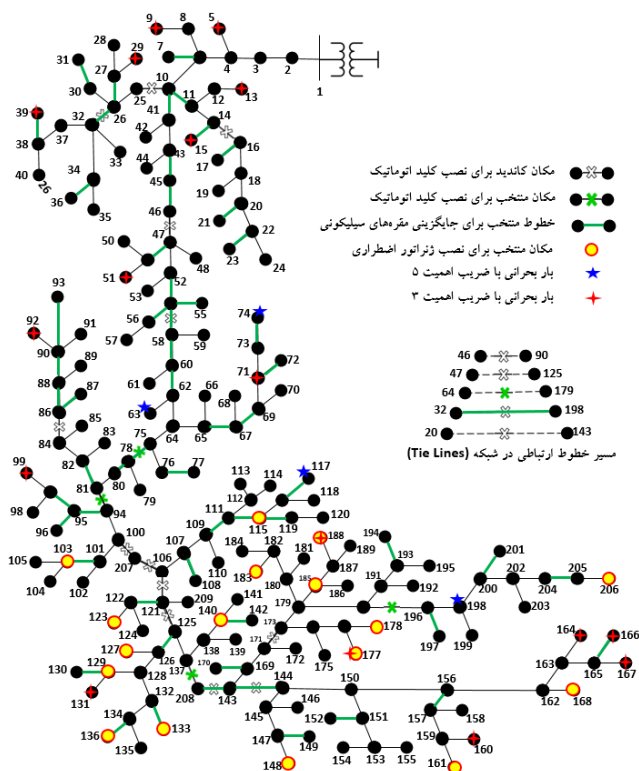
شکل ۴: الگوی تغییرات بار شبکه [۲۷]، سناریوهای تصادفی بار، رطوبت هوا و میزان آلودگی مقره‌ها در یک بازه ۲۴ ساعته.

سیستم توزیع در مقابل طوفان‌های گرد و غبار در مورد مطالعاتی شماره ۱، جایگزینی مقره‌های سرامیکی با مقره‌های سیلیکونی به عنوان تنها اقدام ممکن برای بهبود تاب‌آوری سیستم توزیع در نظر گرفته شده است. از آنجا که در مدل پیشنهادی، محدودیتی برای جایگزینی مقره‌های سیلیکونی اعمال نشده است، خطوطی برای تعویض مقره‌ها انتخاب می‌شوند که در اکثر سناریوها دچار آسیب شده و مجموع هزینه‌های تعویض مقره‌ها در مقایسه با میزان کاهش هزینه‌های حذف بار در اثر تقویت آن خطوط کمتر باشد. همان طور که نتایج عددی حاصل از برنامه‌ریزی برای مورد مطالعاتی اول در جدول ۳ نشان می‌دهند، با تعویض ۶۵۲ مقره سرامیکی در ۱۲ خط منتخب این شبکه می‌توان هزینه‌های بهره‌برداری مورد انتظار در طوفان گرد و غبار را به کمتر از ۵۰٪ کاهش داد. در این مورد مطالعاتی، تقویت خطوط شبکه با جایگزینی مقره‌های سیلیکونی عمدتاً کاهش هزینه‌های حذف بار را به همراه داشته است، در حالی که به طور غیر مستقیم در کاهش هزینه‌های تعمیرات و شستشوی مقره‌ها در خطوط آسیب‌دیده نیز نقش داشته است. در این مورد مطالعاتی خطوط منتخب برای تعویض مقره‌ها، خطوط شماره ۱، ۶، ۷، ۸، ۱۱، ۱۲، ۱۴، ۲۳، ۲۵، ۲۶، ۲۹ و ۳۱ می‌باشند.

در مورد مطالعاتی ۲، با نصب کلیدهای اتوماتیک امکان بازآرایی شبکه به اقدامات قبلی اضافه شده است. نتایج این مورد مطالعاتی در جدول ۳ نشان می‌دهد که کلیدهای اتوماتیک می‌توانند با ایجاد مسیرهای جایگزین برای تغذیه بار، به طور قابل ملاحظه‌ای هزینه‌های حذف بار در شبکه توزیع را کاهش دهند. این در حالی است که نصب این تجهیزات تأثیر چندانی در کاهش زمان تعمیرات و شستشوی خطوط شبکه نداشته است. در این مورد مطالعاتی ایجاد قابلیت بازآرایی شبکه با نصب ۵ کلید اتوماتیک در خطوط ۱۴، ۳۳، ۳۵، ۳۶ و ۳۷ در کنار تعویض ۷۰۴ مقره سرامیکی در خطوط ۱، ۶، ۷، ۸، ۱۰، ۱۱، ۱۴، ۱۶، ۲۳، ۲۵، ۲۶، ۲۹، ۳۱ و ۳۷ مجموع هزینه‌های بهره‌برداری مورد انتظار در طوفان گرد و غبار را به ۲۲۲/۲۸۶ دلار کاهش داده است. در مورد مطالعاتی ۳، ژنراتورهای اضطراری با هدف تغذیه بارهای بحرانی در نقاط جدا شده از سیستم توزیع به اقدامات قبلی اضافه گردیده است. در این مورد مطالعاتی تنها اقدامات اصلاحی در بازه بهره‌برداری اضطراری مد نظر بوده و هیچ اقدامی در بازه بهره‌برداری پیشگیرانه اجرا نخواهد شد. نتایج برنامه‌ریزی برای این مورد مطالعاتی نشان می‌دهد که نصب ژنراتورهای اضطراری در نقاط منتخب



شکل ۷: نتایج برنامه‌ریزی بهبود تاب‌آوری فیدر توزیع ۲۰۹ پاسبه استان خوزستان در مورد مطالعاتی ۴.



شکل ۸: نتایج برنامه‌ریزی بهبود تاب‌آوری فیدر توزیع ۲۰۹ پاسبه استان خوزستان در مورد مطالعاتی ۳.

جدول ۳: نتایج برنامه‌ریزی بهبود تاب‌آوری سیستم‌های توزیع مورد مطالعه در مقابل طوفان گرد و غبار شدید.

| مورد مطالعاتی | اقدامات اجرایی در سیستم توزیع | | | هزینه‌های سرمایه‌گذاری سالانه (\$) | | | هزینه‌های بهره‌برداری سالانه (\$) | | | نسبت سود به سرمایه | |
|------------------------|-------------------------------|------------------|--------------------|------------------------------------|------------------|--------------------|-----------------------------------|---------------|-----------------|--------------------|---------|
| | مقره‌های سیلیکونی | کلیدهای اتوماتیک | ژنراتورهای اضطراری | مقره‌های سیلیکونی | کلیدهای اتوماتیک | ژنراتورهای اضطراری | مجموع | هزینه حذف بار | تعمیرات و شستشو | | مجموع |
| شبکه پایه | - | - | - | - | - | - | - | ۷۶۶۶۰۲ | ۱۸۳۰۰۰ | ۹۴۹۶۰۲ | - |
| ۱ شبکه پاسبه استاندارد | ۶۵۲ مقره | - | - | ۷۸۲۴ | - | - | ۷۸۲۴ | ۳۳۰۰۲۰ | ۹۱۸۰۰ | ۴۲۱۸۲۰ | ۵۱۹۹۵۸ |
| ۲ | ۷۰۴ مقره | ۵ کلید | - | ۸۴۴۸ | ۱۵۰۰ | - | ۹۹۴۸ | ۱۳۰۴۸۶ | ۹۱۸۰۰ | ۲۲۲۲۸۶ | ۷۱۷۳۶۸ |
| ۳ | ۵۵۰ مقره | ۵ کلید | ۳ ژنراتور | ۶۶۰۰ | ۱۵۰۰ | ۱۸۷۵۰ | ۲۶۸۵۰ | ۲۶۸۸۴ | ۹۱۸۰۰ | ۱۱۸۶۸۴ | ۸۰۴۰۶۸ |
| ۴ | ۵۵۰ مقره | ۵ کلید | ۳ ژنراتور | ۶۶۰۰ | ۱۵۰۰ | ۱۸۷۵۰ | ۲۶۸۵۰ | ۲۶۰۱۲ | ۹۱۸۰۰ | ۱۱۷۸۱۲ | ۸۰۴۹۴۰ |
| شبکه پایه | - | - | - | - | - | - | - | ۳۶۱۰۸۰۰ | ۵۱۸۴۰۰ | ۴۱۲۹۲۰۰ | - |
| ۱ شبکه ۲۰۹ پاسبه | ۲۹۱۵ مقره | - | - | ۳۴۹۸۰ | - | - | ۳۴۹۸۰ | ۱۴۴۰۲۱۰ | ۱۰۶۲۰۰ | ۱۵۴۶۴۱۰ | ۲۵۴۷۸۱۰ |
| ۲ | ۳۱۷۰ مقره | ۵ کلید | - | ۳۸۰۴۰ | ۱۵۰۰ | - | ۳۹۵۴۰ | ۳۹۹۰۷۸ | ۱۱۴۰۰۰ | ۵۱۳۰۷۸ | ۳۵۷۶۵۸۲ |
| ۳ | ۳۱۱۹ مقره | ۵ کلید | ۱۷ ژنراتور | ۳۷۴۲۸ | ۱۵۰۰ | ۱۰۶۲۵۰ | ۱۴۵۱۷۸ | ۱۳۱۰۳ | ۱۱۴۰۰۰ | ۱۲۷۱۰۳ | ۳۸۵۶۹۱۹ |
| ۴ | ۳۱۱۹ مقره | ۵ کلید | ۱۷ ژنراتور | ۳۷۴۲۸ | ۱۵۰۰ | ۱۰۶۲۵۰ | ۱۴۵۱۷۸ | ۱۱۸۰۰ | ۱۱۴۰۰۰ | ۱۲۵۸۰۰ | ۳۸۵۸۲۲۲ |

در مورد مطالعاتی اول جایگزینی ۲۹۱۵ مقره سیلیکونی در ۶۱ خط در فصل تابستان ۱۵/۵۴ مگاوات‌آمپر است و به همراه دو فیدر دیگر در نقطه اتصال به شبکه بالادست توسط یک ترانسفرماتور ۳۰ مگاوات‌آمپری تغذیه می‌گردد. در این فیدر، ۱۷ بار بحرانی با ضریب اهمیت ۳ و ۴ بار بحرانی با ضریب اهمیت ۵ در نظر گرفته شده و سایر نقاط بار دارای ضریب اهمیت ۱ هستند. در فرایند برنامه‌ریزی، سایر باس‌های سیستم به غیر از نقطه اتصال به بالادست، کاندیدای نصب ژنراتور اضطراری بوده و نقاط کاندیدا برای نصب کلیدهای اتوماتیک در دیگرام تک‌خطی شکل‌های ۶ و ۷ مشخص شده است.

نتایج شبیه‌سازی حالت پایه این فیدر در جدول ۳ نشان می‌دهد که وقوع طوفان گرد و غبار در شرایط سناریوهای مورد مطالعه می‌تواند سالانه خسارتی بالغ بر ۴/۱۲۹/۲۰۰ دلار به شبکه تحمیل نماید. از این رو

نتایج شبیه‌سازی حالت پایه این فیدر در جدول ۳ نشان می‌دهد که وقوع طوفان گرد و غبار در شرایط سناریوهای مورد مطالعه می‌تواند سالانه خسارتی بالغ بر ۴/۱۲۹/۲۰۰ دلار به شبکه تحمیل نماید. از این رو

نتایج شبیه‌سازی حالت پایه این فیدر در جدول ۳ نشان می‌دهد که وقوع طوفان گرد و غبار در شرایط سناریوهای مورد مطالعه می‌تواند سالانه خسارتی بالغ بر ۴/۱۲۹/۲۰۰ دلار به شبکه تحمیل نماید. از این رو

جدول ۴: حساسیت نتایج برنامه‌ریزی بهبود تاب‌آوری سیستم‌های توزیع به محدودیت منابع مالی.

| مورد مطالعاتی | نتایج برنامه‌ریزی | میزان بودجه در دسترس برای بهبود تاب‌آوری شبکه ۳۳ باسه | | | | | میزان بودجه در دسترس برای بهبود تاب‌آوری شبکه ۲۰۹ باسه | | | | |
|---------------|--------------------------|---|-----|-----|-----|-----|--|------|------|------|------|
| | | %۱۰۰ | %۸۰ | %۶۰ | %۴۰ | %۲۰ | %۱۰۰ | %۸۰ | %۶۰ | %۴۰ | %۲۰ |
| ۱ | تعداد مقره‌های سیلیکونی | ۶۵۲ | ۵۱۶ | ۳۹۰ | ۲۴۹ | ۱۰۱ | ۲۹۱۵ | ۲۳۱۸ | ۱۷۴۸ | ۱۱۶۴ | ۵۸۲ |
| ۲ | تعداد مقره‌های سیلیکونی | ۷۰۴ | ۵۳۲ | ۳۷۱ | ۲۰۳ | ۲۴ | ۳۱۷۰ | ۲۵۰۷ | ۱۸۲۹ | ۱۱۷۳ | - |
| | تعداد کلیدهای اتوماتیک | ۵ | ۵ | ۵ | ۵ | ۵ | ۵ | ۵ | ۵ | ۵ | ۵ |
| ۳ و ۴ | تعداد مقره‌های سیلیکونی | ۵۵۰ | ۶۰۱ | ۶۰۱ | ۷۰۴ | ۳۱۴ | ۳۱۱۹ | ۲۶۸۴ | ۲۸۴۰ | ۲۶۱۲ | ۲۲۵۸ |
| | تعداد کلیدهای اتوماتیک | ۵ | ۵ | ۵ | ۵ | ۵ | ۵ | ۵ | ۵ | ۵ | ۶ |
| | تعداد ژنراتورهای اضطراری | ۳ | ۲ | ۱ | ۰ | ۰ | ۱۷ | ۱۳ | ۸ | ۴ | ۰ |

در مورد مطالعاتی دوم، نتایج برنامه‌ریزی برای سیستم‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد که با افزایش محدودیت‌های مالی، تعداد کلیدها در شبکه ثابت و اثر محدودیت‌های مالی با کاهش تعداد مقره‌های سیلیکونی جبران شده است. این واقعیت که تا حد زیادی با محدودیت‌های بهره‌برداری شعاعی از شبکه توزیع در ارتباط است، اهمیت قابلیت بازآرایی را در مطالعات تاب‌آوری شبکه‌های توزیع نشان می‌دهد. در این مورد نیز مانند مورد مطالعاتی ۱، کاهش تعداد مقره‌های سیلیکونی، افزایش هزینه‌های حذف بار را به همراه داشته است. همان طور که نتایج شبیه‌سازی شبکه ۲۰۹ باسه در شکل ۸ نشان می‌دهد، افزایش هزینه‌های حذف بار در دو مورد مطالعاتی ۱ و ۲ در حالی بوده است که در مورد مطالعاتی دوم به علت تلاش در حفظ قابلیت بازآرایی شبکه در شرایط محدودیت بودجه و جبران آن با کاهش تعداد مقره‌های سیلیکونی، نرخ افزایش هزینه‌های حذف بار در مقایسه با حالت قبل تقریباً دو برابر بوده است. در این مورد مطالعاتی، با محدود کردن بودجه شبکه ۲۰۹ باسه به ۲۰٪ حالت پایه، تعداد مقره‌های سیلیکونی از ۳۱۷۰ مقره در ۶۱ خط، به ۵۳۴ مقره در ۱۸ خط کاهش یافته است. در این مورد مطالعاتی، تقویت تعداد خطوط بیشتر با مجموع مقره‌های سیلیکونی کمتر در مقایسه با مورد مطالعاتی ۱ نشان می‌دهد که تعامل بین بازآرایی شبکه و تقویت خطوط آن در شرایط محدودیت بودجه به گونه‌ای بوده که خطوط با طول و هزینه کمتر برای جایگزینی مقره‌های سیلیکونی انتخاب شده است.

نتایج برنامه‌ریزی موارد مطالعاتی ۳ و ۴ که ژنراتورهای اضطراری به سیستم اضافه شده است نشان می‌دهد که با افزایش محدودیت‌های مالی، اولین اولویت برای کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری، کاهش تعداد ژنراتورهای اضطراری خواهد بود. این واقعیت که پیش از این نیز با تحلیل نتایج سود و سرمایه در بخش ۵-۲ قابل پیش‌بینی بود، ناشی از هزینه بالای ژنراتورهای اضطراری در مقایسه با سایر اقدامات می‌باشد. با توجه به نتایج برنامه‌ریزی برای این موارد مطالعاتی در جدول ۴، زمانی که میزان بودجه شبکه ۲۰۹ باسه کمتر از ۳۰٪ حالت پایه باشد، به کارگیری ژنراتورهای اضطراری در کنار قابلیت‌های بازآرایی و تقویت خطوط آسیب‌پذیر توجیه اقتصادی به همراه نخواهد داشت. از این رو با کاهش بیش از ۵۰٪ در منابع مالی سیستم، نرخ افزایش هزینه‌های حذف بار ناشی از حذف ژنراتورهای اضطراری به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش خواهد یافت. از آنجا که در این مورد مطالعاتی اثر محدودیت‌های مالی عمدتاً با کاهش تعداد ژنراتورها جبران شده است، با کاهش بودجه شبکه ۲۰۹ باسه به ۲۰٪ حالت پایه، تعداد خطوط منتخب برای جایگزینی مقره‌های سیلیکونی در مورد مطالعاتی ۴، از ۶۰ خط با مجموع ۳۱۱۹ مقره به ۵۲ خط با مجموع ۲۲۵۸ مقره کاهش یافته است.

هزینه‌های بهره‌برداری از سیستم توزیع در شرایط طوفان گرد و غبار به شبکه اضافه شده‌اند، با نصب ۱۷ ژنراتور در نقاط منتخب شبکه، مجموع هزینه‌های بهره‌برداری نسبت به حالت پایه بیشترین میزان کاهش را به همراه داشته است. در این موارد، پایین بودن شاخص سود به سرمایه ناشی از بالا بودن هزینه ژنراتورهای اضطراری در مقایسه با هزینه سایر اقدامات است. همان طور که در نتایج برنامه‌ریزی موارد مطالعاتی ۳ و ۴ در شکل‌های ۶ و ۷ مشاهده می‌شود، اجرای اقدامات پیشگیرانه از جمله راه‌اندازی و توزیع توان ژنراتورهای اضطراری قبل از وقوع طوفان گرد و غبار، منجر به تغییر الگوی تقویت سیستم و توزیع منابع سرمایه با هدف ایجاد هماهنگی بین اقدامات پیشگیرانه و اصلاحی در چارچوب محدودیت‌های بهره‌برداری از سیستم شده است. نکته قابل ذکر آن که توزیع سرمایه در برنامه‌ریزی دو مورد مطالعاتی ۳ و ۴ به گونه‌ای بوده است که عمدتاً ژنراتورهای اضطراری به نقاط انتهایی فیدر و مقره‌های سیلیکونی به خطوط آسیب‌دیده در خطوط ابتدایی فیدر اختصاص داده شده است. تحلیل نتایج سود و سرمایه برای این فیدر در جدول ۳ نشان می‌دهد که زمان بازگشت سرمایه در موارد مطالعاتی ۱ و ۲ در سال اول و در موارد مطالعاتی ۳ و ۴ در سال دوم است.

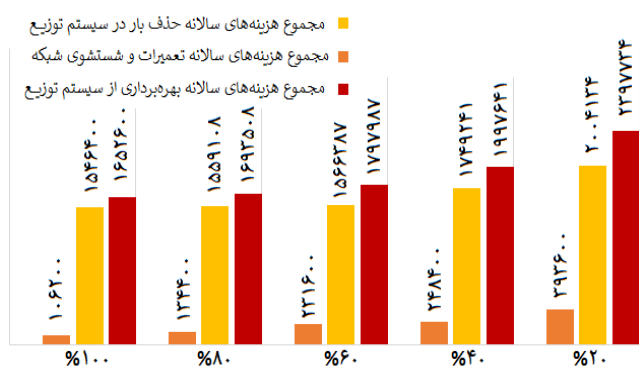
۳-۵ تحلیل حساسیت برنامه‌ریزی به محدودیت بودجه

در حالت کلی، انتظار می‌رود که با افزایش محدودیت در منابع مالی، بودجه در دسترس به اقداماتی اختصاص یابد که در شرایط عملیاتی بیشترین سود را برای سیستم توزیع به همراه داشته باشند. در این بخش، اثر کاهش بودجه بر اقداماتی که برای بهبود تاب‌آوری سیستم توزیع اجرا خواهند شد مورد ارزیابی قرار گرفته است. این نتایج برای شبکه ۳۳ باسه استاندارد و شبکه توزیع ۲۰۹ باسه خوزستان در جدول ۴ نشان می‌دهد که در مورد مطالعاتی اول، محدود کردن بودجه تعویض مقره‌ها، افزایش هزینه‌های بهره‌برداری (که عمدتاً شامل هزینه‌های حذف بار است) را به همراه خواهد داشت. از این رو با افزایش محدودیت‌های مالی در شبکه ۲۰۹ باسه خوزستان، تعداد مقره‌های سیلیکونی از ۲۹۱۵ مقره در ۶۱ خط در شرایط پایه، به ۵۸۲ مقره در ۱۴ خط در شرایطی که میزان بودجه در دسترس ۲۰٪ حالت پایه باشد، کاهش یافته است. با توجه به موقعیت خطوط منتخب که در دیاگرام تک‌خطی شکل ۷ بین نقاط (۶،۷)، (۱۱،۱۰)، (۱۴،۱۵)، (۱۶،۱۷)، (۲۰،۲۱)، (۲۶،۲۷)، (۳۰،۳۱)، (۳۲،۲۶)، (۳۹،۳۸)، (۴۰،۳۲)، (۴۸،۸۰)، (۱۰۹،۱۱۱)، (۱۱۵،۱۱۱) و (۱۴۳،۱۴۴) قرار گرفته‌اند، این خطوط عمدتاً یا در شاخه اصلی فیدر قرار دارند و یا در شاخه‌های فرعی، بارهای بحرانی با ضریب اهمیت بالا را تأمین می‌کنند. لذا تقویت این خطوط در بدترین شرایط مالی، نشانه اهمیت آنها در افزایش هزینه‌های حذف بار در شرایط طوفان گرد و غبار می‌باشد.

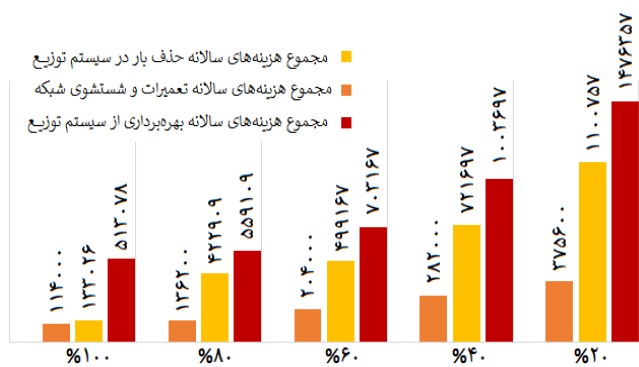
- در روش پیشنهادی، جایابی ژنراتورهای اضطراری با توجه به نتایج تقویت خطوط و محل تعیین‌شده برای کلیدها، می‌تواند با ایجاد تعامل بین قابلیت‌های بازآرایی شبکه و تأمین محلی بارهای بحرانی، علاوه بر کاهش هزینه‌های حذف بار، زمان بازیابی سیستم به شرایط عادی را به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش دهد.
- از میان اقدامات اجرایی برای بهبود تاب‌آوری شبکه توزیع در مقابل طوفان‌های گرد و غبار، بیشترین و کمترین شاخص سود به سرمایه به ترتیب متعلق به مقره‌های سیلیکونی به علت ارزان بودن آنها و ژنراتورهای اضطراری به علت گران‌تر بودن آنها بوده است.
- نتایج سود حاصل از اقدامات اجرایی در موارد مطالعاتی نشان داده که با افزایش تنوع اقدامات و ایجاد هماهنگی بین آنها، سود حاصل از برنامه‌ریزی افزایش خواهد یافت. در این حالت، بیشترین سود در شرایطی حاصل گردیده که بین اقدامات پیشگیرانه و اضطراری در بهره‌برداری از سیستم هماهنگی ایجاد شده است.
- تحلیل نتایج سود و سرمایه در برنامه‌ریزی با مقادیر مختلف بودجه نشان داده که تعداد ژنراتورهای اضطراری و کلیدهای اتوماتیک به ترتیب بیشترین و کمترین حساسیت را به محدودشدن منابع مالی سیستم به خود اختصاص داده‌اند.

مراجع

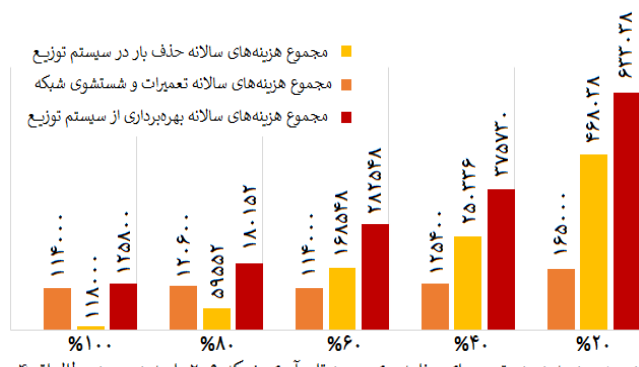
- [1] A. Gholami, F. Aminifar, and M. Shahidehpour, "Front lines against the darkness: enhancing the resilience of the electricity grid through microgrid facilities," *IEEE Electrification Magazine*, vol. 4, no. 1, pp. 18-24, Mar. 2016.
- [2] NERC, "Hurricane sandy event analysis report," Jan. 2014.
- [3] کمیسیون انرژی مجلس شورای اسلامی، گزارش بحران قطعی‌های آب، برق و مخابرات در بهمن‌ماه ۱۳۹۵ استان خوزستان، شماره ۹۹۸۹۶، اسفند ۱۳۹۵.
- [4] ف. امینی‌فر و م. فرهومندی، "مفاهیم و مبانی ارزیابی تاب‌آوری در شبکه‌های برق"، *مجله انجمن مهندسی برق و الکترونیک ایران*، سال ۱۵، شماره ۳، صص. ۹۱-۸۳، پاییز ۱۳۹۷.
- [5] N. M. Tabatabaie, S. Najafi, and N. Bizon, "Power systems resilience: modeling, analysis and practice," Springer, 2019.
- [6] M. Mahzarnia, M. P. Moghaddam, P. Teimourzadeh, and P. Siano, "A review of the measures to enhance power systems resilience," *IEEE Systems J.*, vol. 14, no. 3, pp. 4059-4070, Sept. 2020.
- [7] A. Arab, A. Khodaei, S. K. Khator, K. Ding, V. A. Emesih, and Z. Han, "Stochastic pre-hurricane restoration planning for electric power systems infrastructure," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 6, no. 2, pp. 1046-1054, Mar. 2015.
- [8] A. Arif, Z. Wang, J. Wang, and C. Chen, "Power distribution system outage management with co-optimization of repairs, reconfiguration, and DG dispatch," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 9, no. 5, pp. 4109-4118, Sep. 2017.
- [9] X. Wu and A. J. Conejo, "An efficient tri-level optimization model for electric grid defense planning," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 32, no. 4, pp. 2984-2994, Jul. 2016.
- [10] X. Wang, Z. Li, M. Shahidehpour, and C. Jiang, "Robust line hardening strategies for improving the resilience of distribution systems with variable renewable resources," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 10, no. 1, pp. 386-395, Jan. 2017.
- [11] Y. Lin and Z. Bie, "Tri-level optimal hardening plan for a resilient distribution system considering reconfiguration and DG islanding," *Appl. Energy*, vol. 210, pp. 1266-1279, Jan. 2018.
- [12] W. Yuan, et al., "Robust optimization-based resilient distribution network planning against natural disasters," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 7, no. 6, pp. 2817-2826, Nov. 2016.
- [13] G. Huang, J. Wang, C. Chen, J. Qi, and C. Guo, "Integration of preventive and emergency responses for power grid resilience enhancement," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 32, no. 6, pp. 4451-4463, Nov. 2017.
- [14] E. Yamangil, R. Bent, and S. Backhaus, "Resilient upgrade of electrical distribution grids," in *Proc. 29th Conf. on Artificial Intelligence*, pp. 1233-1240, Austin, TX, USA, 25-30 Jan. 2015.



درصد بودجه در دسترس برای برنامه‌ریزی بهبود تاب‌آوری شبکه ۲۰۹ باسه در مورد مطالعاتی ۱



درصد بودجه در دسترس برای برنامه‌ریزی بهبود تاب‌آوری شبکه ۲۰۹ باسه در مورد مطالعاتی ۲



درصد بودجه در دسترس برای برنامه‌ریزی بهبود تاب‌آوری شبکه ۲۰۹ باسه در مورد مطالعاتی ۴

شکل ۸: هزینه‌های بهره‌برداری از شبکه ۲۰۹ باسه در مقادیر مختلف بودجه.

۶- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی برای بهبود تاب‌آوری سیستم‌های توزیع انرژی الکتریکی در مقابل طوفان‌های گرد و غبار ارائه شده است. در این راستا اقدامات پیشنهادی برای بهبود تاب‌آوری سیستم توزیع شامل تقویت خطوط توزیع با مقره‌های سیلیکونی با هدف کاهش احتمال آسیب‌پذیری، جایابی و نصب کلیدهای اتوماتیک با هدف افزایش قابلیت مانور در بازآرایی شبکه و به کارگیری ژنراتورهای اضطراری در شبکه با هدف تأمین محلی بارهای بحرانی می‌باشد. نتایج شبیه‌سازی و مطالعات عددی حاصل از پیاده‌سازی مدل پیشنهادی روی شبکه ۳۳ باسه IEEE و یک فیذر توزیع واقعی با ابعاد بزرگ نشان داده است که:

- در روش پیشنهادی می‌توان با شناسایی نقاط آسیب‌پذیر شبکه و تصمیم‌گیری برای تقویت آنها، احتمال وقوع خرابی در خطوط و در پی آن هزینه‌های خاموشی را به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش داد.
- در روش پیشنهادی، جایابی کلیدهای اتوماتیک بر اساس نتایج تقویت خطوط، علاوه بر افزایش قابلیت مانور در بازآرایی شبکه، کاهش هزینه‌های تمام‌شده سیستم را به همراه داشته است.

- [28] Iran-Insulator Co. Retrieved from: <https://iraninsulator.com/en/36-kv-pin-insulator-code0309/>
- [29] BSA Co. Retrieved from: <http://www.baspar-sazeh.com/index.php/en/products/silicone-insulators/pine-type-insulator/155-pine-type-p-1270-9.Iran-Insulator>
- [30] Y. Xu, Z. Y. Dong, R. Zhang, and D. J. Hill, "Multi-timescale coordinated voltage/var control of high renewable-penetrated distribution systems," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 32, no. 6, pp. 1498-4408, Nov. 2017.
- [31] J. Li, X. Ma, C. Liu, and K. P. Schneider, "Distribution system restoration with microgrids using spanning tree search," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 29, no. 6, pp. 3021-3029, Nov. 2019.
- [۳۲] ب. صمدیار، ع. محب‌الحجه و ا. طهماسبی پاشا، "بررسی آماری- دینامیکی توپان‌های همرفتی قوی در اهواز،" *مجله ژئوفیزیک ایران*، جلد ۱۵، شماره ۲، صص. ۱۷-۱، تابستان ۱۴۰۰.
- [33] R. E. Brown, *Electric Power Distribution Reliability*, CRC Press, 2008.
- مرتضی حق‌شناس** تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد مهندسی برق گرایش سیستم‌های قدرت به ترتیب در سال‌های ۱۳۹۰ و ۱۳۹۳ در دانشگاه آزاد اسلامی و دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه بیرجند به پایان رساند و در حال حاضر در مقطع دکترای مهندسی برق گرایش سیستم‌های قدرت در دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه اصفهان مشغول به تحصیل می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان شامل مدل‌سازی، برنامه‌ریزی و بهره‌برداری از سیستم‌های توزیع انرژی الکتریکی و مطالعات قابلیت اطمینان در سیستم قدرت می‌باشد.
- رحمت‌الله هوشمند** تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد مهندسی برق- قدرت به ترتیب در سال‌های ۱۳۶۸ و ۱۳۷۰ در دانشگاه فردوسی مشهد و دانشگاه تهران به پایان رساند و مدرک دکتری مهندسی برق- قدرت را در سال ۱۳۸۲ از دانشگاه تربیت مدرس تهران اخذ نمود. وی هم‌اکنون استاد گروه مهندسی برق دانشکده فنی مهندسی دانشگاه اصفهان می‌باشد و زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه او عبارت هستند از بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت و شبکه‌های توزیع انرژی، کاربرد سیستم‌های هوشمند در مسایل بهینه‌سازی و سیستم‌های قدرت تجدید ساختار یافته.
- مهدی قلی‌پور** تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد مهندسی برق- قدرت به ترتیب در سال‌های ۱۳۶۷ و ۱۳۷۱ در دانشگاه صنعتی اصفهان و دانشگاه تهران به پایان رساند و مدرک دکتری مهندسی برق- قدرت را در سال ۱۳۸۲ از دانشگاه نانسو فرانسه اخذ نمود. وی هم‌اکنون دانشیار دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه اصفهان می‌باشد و زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه او عبارت هستند از کنترل ولتاژ و توان راکتیو، بررسی حالت‌های گذرا، برنامه‌ریزی و بهره‌برداری از سیستم‌های انرژی الکتریکی.
- [15] Q. Shi, F. Li, *et al.*, "Post-extreme-event restoration using linear topological constraints and DER scheduling to enhance distribution system resilience," *International J. of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 131, Article ID: 107029, 9 pp., Oct. 2021.
- [16] B. Taheri, A. Safdarian, M. Moeini-Aghtaie, and M. Lehtonen, "Distribution system resilience enhancement via mobile emergency generators," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 36, no. 4, pp. 2308-2319, Aug. 2021.
- [17] J. Najafi, A. Peiravi, A. Anvari-Moghaddam, and J. M. Guerrero, "Resilience improvement planning of power-water distribution systems with multiple microgrids against hurricanes using clean strategies," *J. of Cleaner Production*, vol. 223, no. 1, pp. 109-126, Jun. 2019.
- [18] M. Ghasemi, A. Kazemi, A. Mazza, and E. Bompard, "A three-stage stochastic planning model for enhancing the resilience of distribution systems with microgrid formation strategy," *IET Gen., Trans. and Dist.*, vol. 15, no. 13, pp. 1908-1921, Feb. 2021.
- [19] J. Najafi, A. Parvini, and J. M. Guerrero, "Power distribution system improvement planning under hurricanes based on a new resilience index," *Sustainable Cities and Society*, vol. 39, no. 1, pp. 592-604, May. 2018.
- [20] Y. P. Fang and G. Sansavini, "Optimum post-disruption restoration under uncertainty for enhancing critical infrastructure resilience," *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 185, no. 1, pp. 1-11, May. 2019.
- [21] S. Ma, L. Su, Z. Wang, F. Qiu, and G. Guo, "Resilience enhancement of distribution grids against extreme weather events," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 33, no. 5, pp. 4842-4853, Sept. 2018.
- [22] S. Ma, S. Li, Z. Wang, and F. Qiu, "Resilience-oriented design of distribution systems," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 34, no. 4, pp. 2880-2891, Jul. 2019.
- [23] A. Rashki, N. J. Middleton, and A. S. Goudie, "Dust storms in Iran-Distribution, causes, frequencies and impacts," *Aeolian Research*, vol. 48, Article ID: 100655, 17 pp., Jan. 2021.
- [24] IEC/TS60815-1 "Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in polluted conditions-Part 1: Definitions, information and general principles," 2008.
- [۲۵] پژوهشگاه نیرو، *سند راهبردی و نقشه راه توسعه فناوری‌های نوین تجهیزات فشارقوی و عایق‌ها در مناطق با اقلیم خاص*، ۱۳۹۲.
- [26] M. R. Shariati, A. R. Moradian, M. Rezaei, and S. J. A. Vaseai, "Providing the pollution map in south west provinces of Iran based on DDG method," in *Proc. IEEE/PES Trans. Dist. Conf.: Asia and Pacific*, 5 pp., Dalian, China, 18-18 Aug. 2005.
- [27] M. Haghshenas, R. A. Hooshmand, and M. Gholipour, "Power distribution system resilience enhancement planning against extreme dust storms via pre-and post-event actions considering uncertainties," *Sustainable Cities and Society*, vol. 78, Article ID: 103626, 19 pp., Mar. 2022.