



Computational Intelligence in Electrical Engineering
Vol. 15, No. 3, 2024
pp. 117-136
Research Paper

Introducing a Novel Clustering Method for Distribution Networks to Enhance Network Performance and Ensure Load Supply in the Event of Contingencies: A Fuzzy Function-Based Approach

Mohamad Reza Mohamadi¹, Mohammad Sadegh Ghazizadeh^{*2}, Mohamad Abedini³

¹ PhD student, Faculty of Electrical Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

² Associate Professor, Power System Planning & Operation Dept. Faculty of Electrical Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

³ Associate Professor, Engineering Science, Ayatollah Boroujerdi University, Boroujerd, Iran

Abstract:

To improve the resiliency of the distribution system during normal and emergency conditions, approaches for planning and operating are required so that the network can supply more loads during normal and emergency times. Thus, with the cellular approach in network planning, according to the production and consumption, the cellularization of the network to supply more loads can be considered. Consequently, the identification of energy cells and the boundary of energy cells is a challenge in the planning issue. This article achieves and identifies the maximum number of energy cells and the border among energy cells of distribution systems. The proposed objective functions for solving the resilience problem include the number of supplied loads and the number of unsupplied loads in normal or abnormal conditions. Furthermore, the eigenvalues and eigenvectors of the Graph Laplacian matrix of the distribution network are used to identify the maximum number of cells in the distribution network and the boundary among the generated cells, considering the prediction of distributed generation and consumption load based on fuzzy modeling. To show the efficiency of the proposed method, the test systems of 69 and 118 buses have been simulated. The results prove the proper performance of the proposed method.

Keywords: Distributed Generation, Resilience, Cellular approach and Graph Laplacian Matrix.



This is an open access article under the CC BY-NC-ND/4.0/ License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).



<https://doi.org/10.22108/ISEE.2024.139486.1660>

مقاله پژوهشی

ارائه روش جدید برای خوشه‌بندی شبکه‌های توزیع با هدف افزایش عملکرد شبکه به

منظور تأمین بار در حالت رخداد حادثه و مدل‌سازی عدم قطعیت بر پایه توابع فازی

محمد رضا محمدی^۱، محمدصادق قاضی‌زاده^{۲*}، محمد عابدینی^۳

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

moha_mohammadi@sbu.ac.ir

۲- دانشیار، گروه برنامه‌ریزی و بهره‌برداری سیستم‌های قدرت، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

m_ghazizadeh@sbu.ac.ir

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه آیت ... بروجردی، بروجرد، ایران

m.abedini@abru.ac.ir

چکیده: به منظور افزایش تاب‌آوری سیستم توزیع، به رویه‌هایی برای برنامه‌ریزی و بهره‌برداری سیستم توزیع نیاز است تا در زمان نرمال و حادثه، شبکه بارهایی بیشتر را تأمین کند؛ به طوری که با رویکرد سلولی در برنامه‌ریزی شبکه توزیع با توجه به تولید و مصرف، سلول‌بندی شبکه برای تأمین بارهای بیشتر را می‌توان مدنظر قرار داد؛ بنابراین، شناسایی سلول‌های انرژی و مرز سلول‌های انرژی چالشی در موضوع برنامه‌ریزی است. در این مقاله، به منظور دستیابی و شناسایی بیشترین تعداد سلول‌های انرژی و مرز بین سلول‌های انرژی سیستم توزیع در دو حالت نرمال و حادثه، از مقادیر ویژه و بردار ویژه ماتریس لاپلاسیان گراف شبکه توزیع با تابع چندهدفه تاب‌آوری استفاده شده است. تابع چندهدفه شامل میزان بارهای تأمین‌شده و بارهای تأمین‌نشده (عملکرد شبکه) در حالت نرمال یا حادثه با توجه به پیش‌بینی میزان تولید منابع انرژی و نیز بارهای شبکه بر پایه مدل‌سازی فازی است. به منظور نمایش کارایی روش پیشنهادی سیستم مورد مطالعه، ۶۹ و ۱۱۸ بار در نظر گرفته شده‌اند که نتایج عملکرد روش پیشنهادی را اثبات می‌کنند.

واژه‌های کلیدی: فازی، تاب‌آوری، بردار ویژه و رویکرد سلولی.

۱- مقدمه

فسیلی کاهش یافته‌اند، تغییرات زیاد منابع و بارها به عدم اطمینان در برنامه‌ریزی منجر می‌شوند. در این راستا، برای برنامه‌ریزی و بهره‌برداری یکپارچه، بیشترین تعداد و مرزهای سلول‌های انرژی در شبکه را می‌توان بر اساس اصطلاح رویکرد سلولی (CA)^۱ مشخص کرد [۲]. با مطالعه وضعیت تاب‌آوری، درمی‌یابیم بیشترین تعداد و مرزهای سلول‌های انرژی (EC)^۲ در برنامه‌ریزی سیستم توزیع مشخص نشده است؛ به طوری که سلول‌ها قادر هستند توازن انرژی خود را با در نظر گرفتن محدودیت‌های فنی مدیریت کنند؛ بنابراین، تأمین انرژی بر اساس سلول‌های انرژی اجازه می‌دهد تا در رابطه با تقاضای انرژی (برق)، گرما و گاز و ...، پتانسیل‌های نسل تجدیدپذیر و گزینه‌های انعطاف‌پذیر محلی چالشی باشند تا زیرساخت‌ها به‌گونه‌ای

برای توسعه الزامات و رویه‌ها برای برنامه‌ریزی و بهره‌برداری سیستم توزیع، به تعریف استانداردشده تاب‌آوری نیاز است تا سیستم قادر به حفظ شرایط عملیاتی عادی پس از یک حادثه مانند قطع خط یا ژنراتور باشد [۱]. همچنین، گفتنی است با توجه به حضور گسترده منابع انرژی تجدیدپذیر در سیستم‌های انرژی، اگرچه منابع انرژی

^۱ تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۲/۰۷/۲۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۶/۲۵

نام نویسنده مسئول: محمدصادق قاضی‌زاده

نشانی نویسنده مسئول: ایران، تهران، دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده مهندسی برق

برای افزایش تاب‌آوری سیستم، یک روش جامع جدید بر اساس شکل‌گیری بهینه ریزشکبه‌ها پیشنهاد شده است که ادغام تولیدهای پراکنده در یک ریزشکبه را در نظر می‌گیرد. یک الگوریتم اصلاح‌شده جدید برای شناسایی طرح بازسازی سیستم توزیع بهینه به منظور بهبود تاب‌آوری شبکه با توجه به عملیات سوئیچینگ برای بازیابی سیستم در مرجع [۱۸] ارائه شده است. در مرجع [۱۹]، برنامه‌ریزی ریزشکبه‌ها از نظر مکان و ظرفیت بهینه در ترکیب با عملیات سوئیچینگ برای بازیابی بارهای بحرانی، با یک روش بهینه‌سازی اکتشافی توسعه یافته به منظور به حداکثر رساندن تاب‌آوری شبکه توسعه داده شده است.

مرجع [۲۰]، یک مدل دومرحله‌ای قبل و بعد از رویداد به منظور افزایش تاب‌آوری سیستم توزیع و اثربخشی معاملات هم‌تا به هم‌تا (P2P)^۲ استفاده کرده است؛ به طوری که مصرف‌کنندگان مجهز به منابع انرژی توزیع‌شده (DER) می‌توانند با انجام تراکنش‌های P2P برای بهبود انعطاف‌پذیری سیستم توزیع، منبع تغذیه را به صورت محلی پشتیبانی کنند. یک روش دومرحله‌ای از تصمیم‌گیری اپراتور سیستم توزیع (DSO)^۳ برای افزایش انعطاف‌پذیری سیستم‌های توزیع در مرجع [۲۱] پیشنهاد شده است؛ به طوری که در مرحله اول، ویژگی‌های تصادفی خطرات لرزه‌ای برای ایجاد رویدادهای زلزله مصنوعی مدل‌سازی می‌شوند و در مرحله دوم، کاهش انرژی تأمین‌نشده (ENS)^۴ است که به عنوان یک مسئله فرمول‌بندی شده است و بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO)^۵ برای حل آن اعمال شده است. نویسندگان در [۲۲] روشی را برای افزایش ظرفیت بازیابی شبکه‌های الکتریکی با نفوذپذیری جالب توجهی از انرژی تجدیدپذیر، با تمرکز بر سیستم‌های ذخیره انرژی زیرزمینی معرفی می‌کنند؛ به طوری که یک مدل بهینه دولایه برای کنترل عملکرد و برنامه‌ریزی سیستم‌های ذخیره انرژی زیرزمینی در مواجهه با شرایط آب‌وهوایی شدید به منظور انعطاف‌پذیری شبکه توسعه داده شده است. به منظور افزایش تاب‌آوری سیستم‌های توزیع برق، روشی جدید به نام روش ارزیابی آسیب زیرساخت تصادفی سیستمی در مرجع [۲۳] معرفی شده است که منحنی‌های شکنندگی را با پارتیشن‌بندی شبکه ترکیب

برنامه‌ریزی شوند که این منابع و پتانسیل‌ها بتوانند تا حد ممکن کارآمد و یکپارچه باشند؛ از این رو، مرز سلول‌های انرژی به منظور تبادل توان مابین سلول‌ها و خودکفایی سلول‌ها از اهمیتی بسیار برخوردار است. برای مثال، مرجع [۳] چالش‌ها و مزایای داشتن بخش‌هایی از یک سیستم توزیع برق توسط ریزشکبه‌ها برای مدیریت کارآمد منابع انرژی توزیع‌شده به منظور بهبود تاب‌آوری سیستم توزیع برق در برابر بلایای طبیعی را ارائه می‌کند. راهبرد برنامه‌ریزی جدید برای برنامه‌ریزان سیستم توزیع به منظور افزایش انعطاف‌پذیری سیستم‌های توزیع در مواجهه با شرایط اضطراری در مراجع [۴-۶] ارائه شده است. در مراجع [۷ و ۸]، مدل بهینه‌سازی تصادفی دومرحله‌ای برای طراحی شبکه‌های توزیع انعطاف‌پذیر در برابر رویدادهای تصادفی ارائه شده است. در مرجع [۹]، رویکردی برای اولویت‌بندی اقدامات نوسازی در بخش‌هایی از شبکه‌های توزیع نیروی برق برای بهبود انعطاف‌پذیری در برابر امواج گرما پیشنهاد شده است. مرجع [۱۰] یک چارچوب ارزیابی کمی را توسعه می‌دهد که شامل شناسایی خطوط آسیب‌پذیر و توسعه یک شاخص ارزیابی تاب‌آوری جدید است. در مرجع [۱۱]، یک برنامه خطی عدد صحیح مختلط برای بازیابی بارهای اولویت‌بندی‌شده به منظور بررسی تاب‌آوری سیستم توزیع ارائه شده است. یک چارچوب فعال که راه‌حل‌های سمت شبکه و سمت تقاضا را برای افزایش انعطاف‌پذیری کلی سیستم ترکیب می‌کند در مرجع [۱۲] پیشنهاد شده است. در مرجع [۱۳]، یک تحلیل فنی - اقتصادی بر اساس درک مفاهیم آب‌وهوا به منظور طراحی بهینه ریزشکبه ارائه شده است. در مرجع [۱۴]، یک مسئله بهینه‌سازی شبکه‌های توزیع هوشمند که قادر به کار در هر دو حالت عملیات متصل به شبکه و جزیره‌ای هستند، به منظور افزایش تاب‌آوری فرموله شده است. در مرجع [۱۵]، یک روش جدید ارزیابی قابلیت اطمینان مبتنی بر خوشه‌بندی به منظور بررسی تاب‌آوری توسعه داده شده است. در مرجع [۱۶]، کاربرد ریزشکبه‌ها برای بهبود تاب‌آوری سیستم قدرت در برابر رویدادهای با احتمال کم و شدت زیاد، با استفاده از یک رویکرد برنامه‌ریزی خطی اعداد صحیح مختلط بررسی شده است. در مرجع [۱۷]،

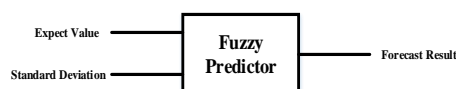
سیستم آورده شده است. تابع هدف تاب‌آوری سیستم در بخش پنجم معرفی می‌شود. روش سلول‌بندی با استفاده از مقادیر ویژه و بردار ویژه ماتریس لاپلاسین گراف در بخش ششم معرفی شده است و در نهایت، نتایج شبیه‌سازی و نتیجه‌گیری آورده شده است.

۲- رویکرد فازی برای پیش‌بینی بار شبکه، سرعت باد و تابش خورشید

در این مقاله، رویکرد فازی به منظور انتخاب تابع عضویت بهینه برای پیش‌بینی ورودی‌های سیستم مانند بار شبکه، سرعت باد و تابش خورشید پیشنهاد شده است. بار شبکه، سرعت باد و تابش خورشید برای بازه‌های زمانی یک‌ساعته با استفاده از ۱۰۰۰ داده ورودی برای هر ساعت پیش‌بینی شده‌اند. در سیستم استنتاج فازی پیشنهادی، از ویژگی‌های تصادفی سری‌های زمانی ورودی شامل میانگین‌ها و انحرافات استاندارد استفاده شده است. این ماهیت آماری ویژگی‌ها و مشخصات سری‌های زمانی را نشان می‌دهد.

۲-۱- مدل‌سازی سیستم با استفاده از روش سیستم فازی

در سیستم پیشنهادی، ورودی‌ها ابتدا با استفاده از میانگین و انحراف معیار فازی می‌شوند و سپس، در چارچوبی حاوی قوانین فازی بر اساس اصطلاحات If-Then وارد می‌شوند [۲۵]. مدل‌سازی فازی به‌کاررفته در این چارچوب در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل (۱): سیستم استنتاج فازی

در این بخش، سه مرحله برای تولید قوانین فازی توضیح داده می‌شوند که به شرح زیر هستند [۲۶]:
مرحله ۱: تبدیل فضاهای ورودی و خروجی داده‌های عددی داده‌شده به مناطق فازی
مرحله ۲: ایجاد قوانین فازی از جفت داده ورودی -

می‌کند. در [۲۴]، مکانیسمی برای تعیین بهینه تاب‌آوری محور تصمیم‌های مرتبط با یک ریزش‌بکه در معرض اختلال در خطوط برق آن ارائه شده است؛ بنابراین، با توجه به روش‌های مختلف برای افزایش تاب‌آوری، می‌توان این روش‌ها را به دو دسته پیشگیرانه و واکنشی تقسیم‌بندی کرد. تاب‌آوری پیشگیرانه انجام اقدامات پیشگیرانه و آغاز تلاش‌های بازسازی در پیش‌بینی یک رویداد برای بهبود تاب‌آوری سیستم است. همچنین، تاب‌آوری واکنشی را می‌توان به عنوان توانایی سیستم برای بازیابی توصیف کرد.

در این مقاله، از هر دو مفهوم پیشگیرانه و واکنشی به منظور افزایش تاب‌آوری سیستم توزیع استفاده شده است؛ به طوری که برای شناسایی سلول‌های انرژی و مرز سلول-های انرژی به منظور خودکفایی هر سلول برای تأمین توان بارهای درون هر سلول و نیز تبادل توان مابین سلول‌ها از رویکرد سلولی استفاده شده است؛ از این رو، در این مقاله، برخلاف کارهای گذشته، سلول‌بندی شبکه و مرز مابین سلول‌ها برای اولین بار با استفاده از مقادیر ویژه و بردار ویژه ماتریس لاپلاسین گراف شبکه انجام شده است؛ به طوری که در مقاله‌ها، تعداد میکروگریدهای ایجادشده شبکه و مرز مابین آن‌ها به عنوان فرض مسئله در نظر گرفته شده است؛ بنابراین، با استفاده از ویژگی مقادیر ویژه و بردار ویژه ماتریس لاپلاسین گراف شبکه توزیع، با پیش‌بینی تولیدهای پراکنده و بار مصرفی با استفاده از منطق فازی، شناسایی بیشترین تعداد سلول‌های شبکه و مرز بین سلول‌های شبکه به منظور افزایش تاب‌آوری انجام شده است؛ به طوری که علاوه بر شناسایی مرز سلول‌های انرژی که چالشی برای تشخیص بیشترین تعداد سلول‌های انرژی است، از مقادیر ویژه ماتریس لاپلاسین گراف شبکه برای اولین بار استفاده شده است؛ از این رو، تابع چندهدفه تاب‌آوری با توجه به دو حالت در شبکه شامل حالت عادی شبکه که در آن خطایی رخ نداده است و حالت حادثه در شبکه برای تأمین بار تشکیل شده است.

در بخش دوم، رویکرد فازی برای پیش‌بینی بار شبکه، سرعت باد و تابش خورشید معرفی می‌شود و در بخش سوم، تولیدهای پراکنده توربین بادی و فتوولتائیک مدل‌سازی خواهند شد. در بخش چهارم، مفهوم تاب‌آوری

خروجی مدنظر

مرحله ۳: تعیین نقشه‌برداری از فضای ورودی به فضای خروجی بر اساس قوانین فازی ترکیبی با استفاده از روش فازی‌سازی

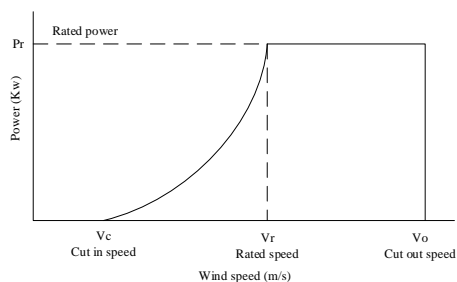
و در دو بازه فصلی تابستان و زمستان هستند. فواصل دامنه به پنج منطقه تقسیم می‌شوند که توسط متغیرهای زبانی تعیین می‌شوند: به ترتیب VL (بسیار کم)، L (کم)، M (متوسط)، H (زیاد) و VH (بسیار زیاد). یک تابع عضویت فازی به هر منطقه اختصاص داده شده است که در جدول (۱) نشان داده شده است. تابع عضویت هر مجموعه فازی GBell فرض شده است که در شکل (۲) نشان داده شده است [۲۷].

۲-۲- توابع عضویت ورودی و خروجی

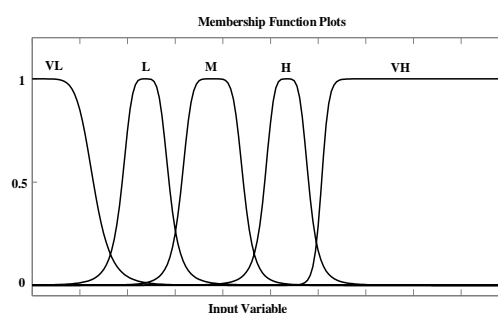
ورودی‌های سیستم فازی میانگین و انحراف استاندارد بار شبکه، سرعت باد و تابش خورشید در سال‌های گذشته

جدول (۱): مقدار متغیر برای تابع عضویت فازی

مقدار متغیر	VL		L		M		H		VH	
	تابستان	زمستان	تابستان	زمستان	تابستان	زمستان	تابستان	زمستان	تابستان	زمستان
سرعت باد (m/s)	۰/۴۳۵۹	۲/۰۶۶۵	۱/۸۶۵۸	۵/۵۱۴۴	۳/۲۹۵۷	۸/۹۶۲۳	۴/۷۲۵۶	۱۲/۴۱۰۲	۶/۱۵۵۷	۱۵/۸۵۸۲
تابش خورشید (KWh/m ²)	.	.	۰/۲۱۳	۰/۰۹۸	۰/۴۲۶	۰/۱۹۶	۰/۶۳۹	۰/۲۹۴	۰/۸۵۲۰	۰/۳۹۲
بار صنعتی (pu)	۰/۰۶۴۸	۰/۰۶۸۵	۰/۴۰۸۴	۰/۴۳۲۹	۰/۷۵۲	۰/۷۹۷۳	۱/۰۹۵۶	۱/۱۶۱۷	۱/۴۳۹۱	۱/۵۲۶۱
بار تجاری (pu)	۰/۱۱۸۳	۰/۲۶۳۹	۰/۴۴۹	۰/۵۴۰۱	۰/۷۷۹۷	۰/۸۱۶۴	۱/۱۱۰۴	۱/۰۹۲۶	۱/۴۴۱۱	۱/۳۶۸۹
بار مسکونی (pu)	۰/۰۳۱۲	۰/۰۰۰۴۶	۰/۴۶۸	۰/۴۶۵۳	۰/۹۰۴۷	۰/۹۳۰۱	۱/۳۴۱۵	۱/۳۹۴۹	۱/۷۷۸۳	۱/۸۵۹۸



شکل (۳): منحنی عملکرد توربین بادی



شکل (۲): تابع عضویت GBell

با توجه به پارامترهای توربین بادی، توان تولیدی آن را می‌توان از معادله (۱) به دست آورد:

$$P_{wind} = \begin{cases} 0 & V \leq V_c \\ L(V) & V_c \leq V \leq V_r \\ P_{rated} & V_r \leq V \leq V_o \\ 0 & V \geq V_o \end{cases} \quad (1)$$

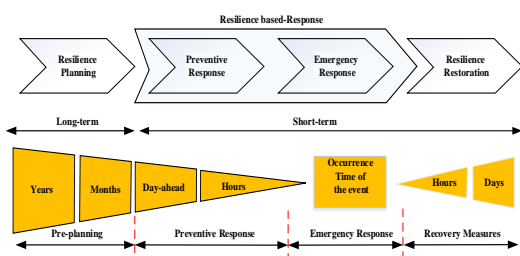
مقدار $L(V)$ از معادله زیر محاسبه می‌شود:

۳- مدل تولیدهای پراکنده توربین بادی و فتوولتائیک

۳-۱- مدل توربین بادی

منحنی قدرت ایده‌آل برای توربین‌های بادی در شکل (۳) آورده شده است [۲۸].

آب‌وهوایی از جمله عللی هستند که می‌توانند در شبکه باعث خاموشی‌های گسترده شود. تا کنون، حوادث طبیعی باعث برجای گذاشتن خسارت‌هایی زیاد بر روی شبکه قدرت شده‌اند که در سال‌های گذشته، میزان این خسارت‌ها رو به افزایش بوده است [۳۱]. مفهوم تاب‌آوری توانایی یک سیستم برای تنظیم وضعیت خود برای کاهش تلفات فرآیند خطا در صورت بروز اختلال یا شکست جالب توجه و بازگشتن به شرایط عادی اولیه خود در سریع‌ترین زمان ممکن پس از پایان حادثه است؛ بنابراین، مفهوم تاب‌آوری دارای ویژگی‌های بلندمدت و کوتاه‌مدت است و با توجه به زمان وقوع حادثه، تاب‌آوری را می‌توان به دو حوزه برنامه‌ریزی و بهره‌برداری برای کمک به درک و بحث طبقه‌بندی کرد [۳۲-۳۳]. برنامه‌ریزی تاب‌آوری به عنوان فعالیتی بلندمدت در نظر گرفته می‌شود که در طی آن، سیستم‌های توزیع با برنامه‌ریزی، قوی‌تر و هوشمندتر از قبل برای دفاع در برابر رویدادهای با احتمال کم اما تأثیر زیاد^۷ در شبکه برق می‌شوند. همچنین، بازسازی و پاسخ مبتنی بر تاب‌آوری، هر دو به عنوان اقدامات کوتاه‌مدت دیده می‌شوند. در شکل (۴) وقوع رویدادها و ارتباط فرآیند تاب‌آوری نشان داده شده است.



شکل (۴): فرآیند وقوع رویداد و ارتباط فرآیند تاب‌آوری

بنابراین، به منظور تجسم رفتار سیستم‌های قدرت در طول یک رویداد فاجعه‌بار، دوزنقه ارتجاعی توسط [۳۵-۳۴] معرفی شده است. شکل (۵) بیانگر منحنی تاب‌آوری است.

$$L(V) = (aV^2 + bV + c)P_{\text{Rated}} \quad (2)$$

در معادله بالا، P_{Rated} توان خروجی توربین بادی است و پارامترهای a ، b و c شرایطی ثابت هستند و بر اساس V_c و V_r بیان می‌شوند که در معادلات زیر آمده‌اند [۲۹].

$$a = \frac{1}{(V_c - V_r)^2} \left[2 - 4 \left(\frac{V_c + V_r}{2V_r} \right)^3 \right] \quad (3)$$

$$b = \frac{1}{(V_c - V_r)^2} \left[4(V_c + V_r) \left(\frac{V_c + V_r}{2V_r} \right)^3 - (3V_c + V_r) \right] \quad (4)$$

$$c = \frac{1}{(V_c - V_r)^2} \left[V_c(V_c + V_r) - 4V_c V_r \left(\frac{V_c + V_r}{2V_r} \right)^3 \right] \quad (5)$$

۳-۲- مدل فتوولتائیک

توان خروجی ماژول P_V را می‌توان به صورت معادله زیر محاسبه کرد [۳۰].

$$P_V = P_{\text{Rated}(V)} D_f \left(\frac{R}{R_s} \right) (1 + \alpha(T_c - T_{\text{ref}})) \quad (6)$$

P_V توان خروجی، $P_{\text{Rated}(V)}$ قدرت نامی و D_f ضریب کاهش عملکرد ماژول فتوولتائیک است. همچنین، R_s و R به ترتیب تابش خورشید در طول ساعت t و تابش تحت شرایط استاندارد برحسب کیلووات بر مترمربع هستند.

α ضریب دمای توان است و T_c و T_{ref} به ترتیب دمای ماژول فتوولتائیک در شرایط کاری و شرایط استاندارد هستند. به منظور سادگی، ضریب دمای توان برابر صفر فرض می‌شود؛ بنابراین، معادله ساده‌شده زیر برای محاسبه توان خروجی ماژول P_V استفاده می‌شود:

$$P_V = P_{\text{Rated}} D_f \left(\frac{R}{R_s} \right) \quad (7)$$

۴- مفهوم تاب‌آوری

از جمله اهداف صنعت برق تأمین مشترکان نهایی به صورت بدون وقفه و با قابلیت اطمینان زیاد است. حوادث

چندهدفه تاب‌آوری شامل مقدار بار تأمین‌شده (F_1) و عملکرد شبکه (F_2) است. این تابع هم برای شرایط عادی شبکه و هم در طول یک حادثه قابل اعمال است. توجه به این نکته ضروری است که از آنجا که مؤلفه‌های تابع چندهدفه تاب‌آوری با یکدیگر تعارض دارند، آن‌ها برای رسیدن به جواب نهایی نرمالیزه می‌شوند که این کار با به‌کارگیری معادله (۸) انجام می‌شود [۳۸]: از این رو، میزان بار تأمین‌شده و عملکرد شبکه دو پارامتر بسیار مهم در سلول‌های انرژی هستند که رابطه‌ای مستقیم با تعداد سلول‌ها دارند و در ادامه شرح داده خواهد شد.

$$F_T = \max(F_{1pu} + F_{2pu}) \quad (۸)$$

۵-۱- میزان بار تأمین‌شده (F_1)

مقدار بار تأمین‌شده با افزایش تعداد سلول‌های انرژی کاهش می‌یابد. تابع هدف مربوط به صورت زیر است:

$$F_1(i) = \sum_{j=1}^i \frac{\left(\frac{P_j - D_j}{|P_j - D_j|}\right) (D_j - P_j) + (P_j + D_j)}{2} \quad (۹)$$

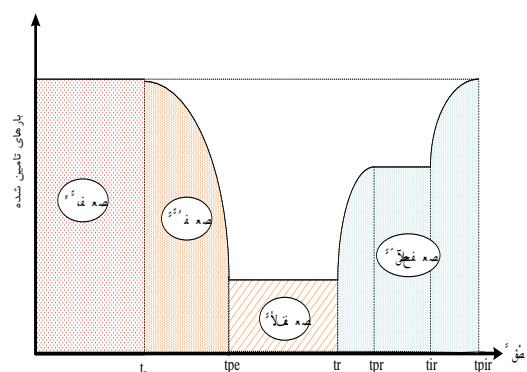
معادله (۹) میزان بار تأمین‌شده در شرایط عادی شبکه را نشان می‌دهد که از کل مقدار توان تولیدی و بار مصرفی تمام سلول‌های شبکه ایجاد می‌شود. P_j و D_j به ترتیب توان تولیدی و مصرفی در سلول j ام و i تعداد سلول‌ها هستند.

$$\sum_{j=1}^i P_j = P_T, \quad \sum_{j=1}^i D_j = D_T \quad (۱۰)$$

در معادله (۱۰)، مشاهده می‌شود کل توان تولیدی و مصرفی به ترتیب برابر مجموع توان تولیدی و مصرفی سلول‌ها است. در صورتی که تعداد سلول‌ها افزایش یابد، خواهیم داشت:

$$\text{if } i \rightarrow \infty \Rightarrow P_j \rightarrow 0 \Rightarrow F(i) \rightarrow 0 \\ D_j \rightarrow 0$$

بنابراین، با افزایش تعداد سلول‌ها در شرایط عادی شبکه، مقدار بار تأمین‌شده کاهش می‌یابد. به منظور درک بهتر، مسئله مثالی مطرح شده است. در این مثال، سه حالت



شکل (۵): منحنی تاب‌آوری

بخش اول منحنی تاب‌آوری تا قبل از زمان t_e ، شرایط نرمال شبکه قبل از وقوع خطا است. این حالت شبکه بدون خطا است و در آن، تمامی بارها به صورت کامل تأمین خواهند شد. بخش دوم حالتی را نشان می‌دهد که در زمان t_e خطا رخ می‌دهد و در زمان t_{pe} جداسازی شبکه از خطا انجام می‌شود. در بخش سوم، از زمان t_r فرآیند بازسازی انجام می‌شود؛ به طوری که در این مدت تعدادی از بارها تأمین‌نشده باقی خواهند ماند (از زمان t_{pe} تا t_r). در بخش چهارم، در طول زمان t_r تا t_{pr} ، عملیات سوئیچینگ مطابق برنامه بازسازی انجام می‌شود و در طول زمان مابین t_{pr} و t_{ir} ، بارهای ازدست‌رفته با توجه به برنامه بازسازی احیا و تأمین انرژی می‌شوند. در زمان t_{ir} ، تجهیزات معیوب در اثر حادثه تعمیر می‌شوند و در بازه زمانی مابین t_{ir} و t_{pir} ، برنامه‌ریزی برای بازگشت سیستم به وضعیت پیش از خطا انجام می‌شود و پس از گذشت زمان

۵- تابع هدف تاب‌آوری

در این مقاله، با توجه به مفهوم منحنی تاب‌آوری شبکه توزیع که در شکل (۵) نشان داده شده است، برنامه‌ریزی شبکه توزیع بر اساس بخش اول و دوم منحنی به منظور بهینه‌سازی تعداد و مکان سوئیچ‌ها برای کمینه کردن تلفات بار در طول یک حادثه انجام شده است؛ به طوری که بیشترین تعداد سلول‌های انرژی در شبکه توزیع و مرزهای آن‌ها را برای مکان سوئیچ‌ها شناسایی می‌کنیم. هدف این فرآیند افزایش عرضه بار و افزایش عملکرد شبکه در شرایط عادی شبکه و در طول یک رویداد خطا است؛ بنابراین، تابع

همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش سلول‌ها، میزان بار تأمین‌شده کل کاهش پیدا می‌کند.

۵-۲- عملکرد شبکه (F_۲)

بیشینه کردن عملکرد شبکه، به ویژه هنگام وقوع حوادث، هدفی دیگر است که در معادله‌های (۱۱) و (۱۲) بیان شده است و بر افزایش انعطاف‌پذیری با استفاده از رویکرد سلولی در زمان حادثه تمرکز دارد.

$$F_2(i) = \text{Max}\{R_k(i) : 1 \leq k \leq i\} \quad (11)$$

$$R_k(i) = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^i \frac{\left(\frac{P_j - D_j}{|P_j - D_j|}\right)(D_j - P_j) + (P_j + D_j)}{2} \quad (12)$$

سلول‌بندی به راهبرد پارتیشن‌بندی شبکه به بخش‌های کوچک‌تر و ایزوله‌تر اشاره دارد؛ به این ترتیب، خرابی در یک منطقه کمترین تأثیر را بر بقیه شبکه دارد؛ بنابراین، عملکرد شبکه با توجه به احتمال حادثه در شبکه با افزایش تعداد سلول‌ها افزایش می‌یابد و $R_k(i)$ در بدترین حالت حادثه، زمانی به بیشترین مقدار خود می‌رسد که P_j و D_j سلول‌ها برابر باشند و i تا حد امکان بزرگ باشد؛ همان‌طور که در معادله‌های (۱۳)، (۱۴) و (۱۵) نشان داده شده است.

$$P_i = \frac{P_T}{i}, \quad D_i = \frac{D_T}{i} \quad (13)$$

$$R(i) = \frac{i-1}{2i} \left(\left(\frac{P_T - D_T}{|P_T - D_T|} + 1 \right) D_T - \left(\frac{P_T - D_T}{|P_T - D_T|} - 1 \right) P_T \right) \quad (14)$$

$$\text{if } i \rightarrow \infty, \quad R(i) = D_T \quad (15)$$

از این رو، برای درک بهتر مسئله، مثال قبل با توجه به حادثه مطرح می‌شود.

حالت اول: در این حالت، در صورت حادثه، عملکرد شبکه برابر است با:

$$R=0$$

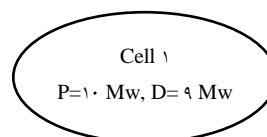
حالت دوم: در این حالت، حادثه برای سلول ۱ یا سلول ۲ اتفاق خواهد افتاد و در بدترین حالت، عملکرد شبکه برابر است با:

$$\text{Cell 1: } P_1 > D_1, \quad R_1 = 0, \quad \text{Cell 2: } P_2 < D_2, \quad R_2 = 3$$

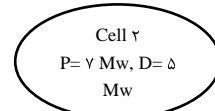
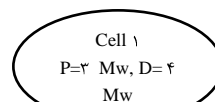
$$R_T = R_2 = 3$$

برای شبکه در نظر گرفته خواهند شد.

حالت اول: در حالت اول، شبکه توزیع با توجه به مقادیر توان تولیدی و مصرفی به صورت یک سلول در نظر گرفته خواهد شد که در زیر نشان داده شده است:



در این حالت، میزان بار تأمین‌شده برابر ۹ مگاوات خواهد بود که این مقدار با کل بار مورد تقاضا برابر است. حالت دوم: اگر سلول‌بندی شبکه توزیع به صورت زیر باشد:

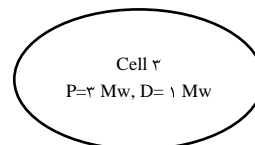
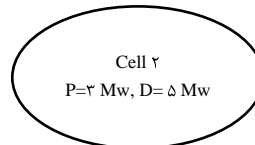
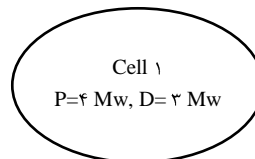


در این حالت، میزان بار تأمین‌شده به صورت زیر خواهد بود:

$$\text{Cell 1: } P_1 < D_1, \quad S_1=3, \quad \text{Cell 2: } P_2 > D_2, \quad S_2=0$$

$$S_T = S_1 + S_2 = 3$$

حالت سوم: اگر سلول‌بندی شبکه به صورت زیر باشد:



میزان بار تأمین‌شده به صورت زیر خواهد بود:

$$\text{Cell 1: } P_1 > D_1, \quad S_1=3, \quad \text{Cell 2: } P_2 < D_2, \quad S_2=0$$

$$\text{Cell 3: } P_3 > D_3, \quad S_3=1, \quad S_T = S_1 + S_2 + S_3 = 4$$

$$\varphi(s) = \frac{\partial(s)}{\text{vol}(s)} \quad (18)$$

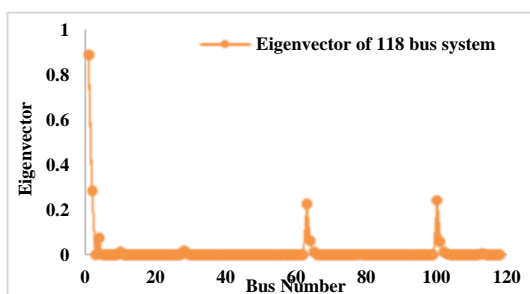
$$\partial(s) = \sum w_{ab} \quad (19)$$

$$\text{vol}(s) = \sum d_a \quad (20)$$

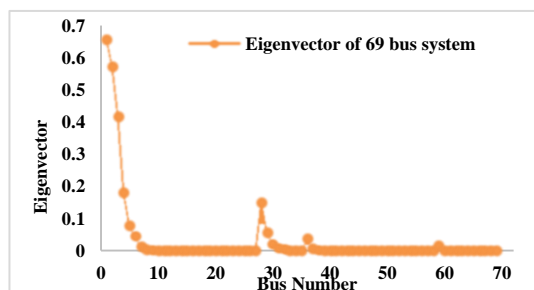
در سیستم توزیع، با توجه به ماتریس لاپلاسیان گراف، بر روی درایه‌های قطر اصلی مقدار بار مصرفی و توان تولیدی روی باس‌ها و بر روی درایه‌های دیگر مقدار توان انتقالی در خطوط در نظر گرفته شده است. در معادله (۱۶)، توان عبوری از خطوط برابر $\partial(s)$ و میزان بار مصرفی و توان تولیدی در باس a برابر d_a است.

۶-۲- بردار ویژه

با توجه به ماتریس لاپلاسیان گراف شبکه توزیع، مقادیر ویژه و بردار ویژه به دست آمده‌اند و در نهایت، نمودار بردار ویژه ماتریس لاپلاسیان سیستم‌های ۶۹ و ۱۱۸ در شکل‌های (۶) و (۷) به ترتیب نشان داده شده است.



شکل (۶): بردار ویژه سیستم توزیع ۱۱۸ باس



شکل (۷): بردار ویژه سیستم توزیع ۶۹ باس

حالت سوم: در این حالت، حادثه برای سلول ۱ یا سلول ۲ یا سلول ۳ اتفاق خواهد افتاد و در بدترین حالت، عملکرد شبکه برابر است با:

$$\text{Cell 1: } P_r < D_r, P_r > D_r \Rightarrow R_r = 3+1 = 4$$

$$\text{Cell 2: } P_r < D_r, P_r > D_r \Rightarrow R_r = 3+1 = 4$$

$$\text{Cell 3: } P_r < D_r, P_r < D_r \Rightarrow R_r = 3+3 = 6$$

$$R_T = R_r = 4$$

همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش سلول‌ها، عملکرد شبکه افزایش پیدا می‌کند.

۶- روش سلول‌بندی با استفاده از مقادیر ویژه و بردار ویژه ماتریس لاپلاسیان گراف

به منظور شناسایی سلول‌های شبکه توزیع از مقدار ویژه و بردار ویژه ماتریس لاپلاسیان شبکه استفاده شده است [۳۹]. با استفاده از این روش، داده‌ها از مختصات قدیم به مختصات جدید توسط ماتریس تبدیل تشکیل شده از بردار ویژه انتقال خواهند یافت. در مختصات جدید، داده‌هایی که دارای تشابه بیشتر نسبت به یکدیگر هستند، در فاصله‌ای کمتر از یکدیگر قرار خواهند گرفت [۴۰].

۶-۱- ماتریس لاپلاسیان گراف

ماتریس گراف به صورت زیر است:

$$G = (V, E) \quad (16)$$

در این معادله، V رأس گراف و E یال گراف است.

با توجه به گراف، ماتریس لاپلاسیان گراف به صورت

زیر خواهد بود:

$$L_{ij} = \begin{cases} d_{ij} & \text{if } i = j \\ -w_{ij} & \text{if } i \neq j \text{ } (i, j) \in E \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (17)$$

در این معادله، d_{ij} درجه رأس گراف و w_{ij} یال گراف

است. با توجه به اینکه شبکه توزیع به صورت گراف است، می‌توان با استفاده از ماتریس لاپلاسیان گراف شبکه توزیع و معادله زیر که بر اساس ماتریس لاپلاسیان گراف به دست می‌آید، تغییرات توان عبوری از خطوط را مشاهده کرد.

مراحل بالا با شرایط زیر تکرار می‌شوند تا A_k تک‌سلولی شود:

- هیچ سلولی بدون میکروتوربین گازی نباشد.

$$\forall x \in A_i \exists DG \in x \quad (30)$$

- هیچ رأسی به‌تنهایی سلولی را تشکیل ندهد.

$$\forall 1 \leq i \leq n; \exists D_j, \quad x_i \in D_j \quad (31)$$

n_i و n_j نشان‌دهنده تعداد رأس‌ها در سلول i ام و j ام هستند. اعضای A_k در هر مرحله تکرار بیانگر مقدار ویژه هر سلول هستند. با استفاده از این روش، در هر مرحله، یک کاندید برای اتصال دو سلول وجود خواهد داشت و فضای جست‌وجو در مقایسه با الگوریتم‌های فراابتکاری [۴۱-۴۳] کاهش خواهد یافت و دستیابی به جواب نهایی در زمانی کمتر انجام خواهد شد.

نمودار حل مسئله در شکل (۸) نشان داده شده است. همان‌طور که در نمودار حل مسئله مشاهده می‌شود، روش بهینه‌سازی تابع هدف مرحله به مرحله به شرح زیر است:

مرحله ۱: دریافت داده‌های ورودی مسئله و پیش‌بینی سرعت باد، تابش خورشید و بار، مدل‌سازی توان تولیدی تولیدهای پراکنده

مرحله ۲: تشکیل ماتریس لاپلاسیان گراف شبکه با استفاده از معادله (۱۷)

مرحله ۳: به دست آوردن بردار ویژه و مقدار ویژه ماتریس لاپلاسیان گراف شبکه

مرحله ۴: سلول‌بندی شبکه با توجه به معادله‌های (۲۱) تا (۲۹)

مرحله ۵: بررسی قیود مربوط به هر سلول با توجه به معادله‌های (۳۰) و (۳۱)

مرحله ۶: بررسی تابع چندهدفه و مشخص شدن جواب‌های به‌دست‌آمده با توجه به معادله‌های (۹) و (۱۱)

مرحله ۷: رسیدن به جواب نهایی مسئله با توجه به

فرمول‌بندی بر این اساس که رئوس وابسته به هم دارای مقادیر بردار ویژه نزدیک به یکدیگر هستند، به منظور سلول‌بندی انجام می‌شود. به همین منظور، از فرمول زیر برای سلول‌بندی استفاده شده است:

$$A_1 = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\} \quad (21)$$

A_1 بردار ویژه اولیه شبکه توزیع است. x_n مقدار بردار ویژه سلول n است.

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{if } i \text{ connect to } j \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (22)$$

a_{ij} ضریب ارتباط سلول‌های i و j است که در صورت وجود ارتباط بین آن‌ها برابر ۱ است.

$$n = n_i + n_j \quad (23)$$

n_i و n_j به ترتیب تعداد رئوس سلول i و سلول j هستند و n تعداد رئوس ادغام‌شده از سلول i و سلول j است.

$$b_{ij} = a_{ij} |x_i - x_j| e^n \quad (24)$$

b_{ij} فاصله بین دو سلول i و j است.

$$x'_{ij} = \min\{b_{ij}\} > 0 \quad (25)$$

x'_{ij} اولویت ایجاد یک سلول جدید است.

$$x''_{ij} = \frac{x_i + x_j}{2} \quad (26)$$

x''_{ij} مقدار بردار ویژه سلول جدید از ادغام سلول‌های i و j است.

$$X_{\text{new}} = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n, x''_{ij}\} - \{x_i, x_j\} \quad (27)$$

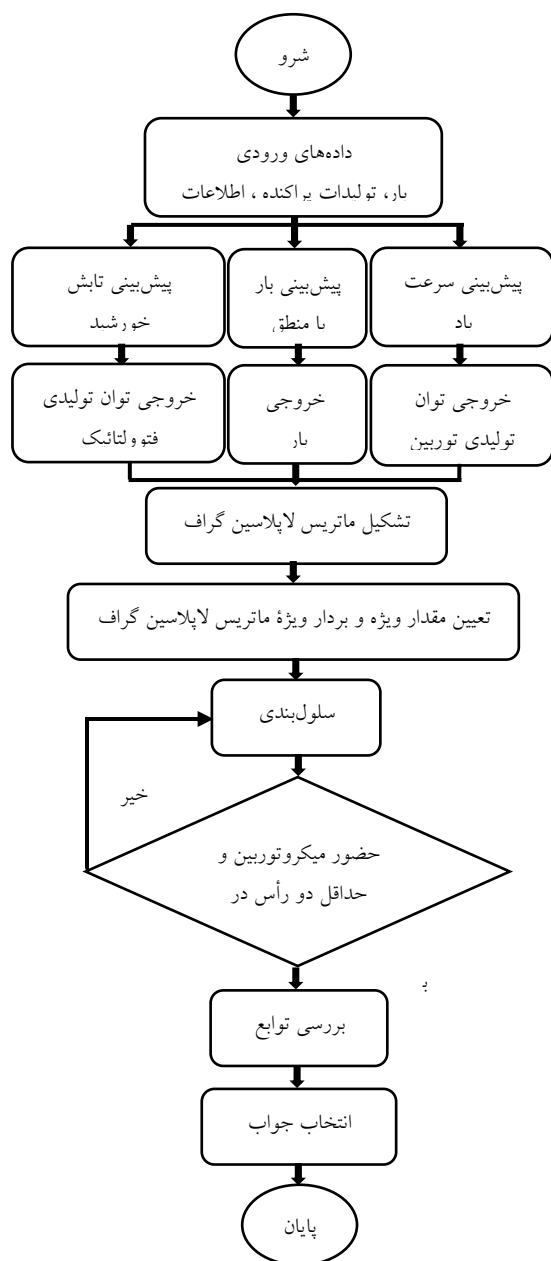
$$C_1 = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n, x''_{ij}\}, \quad D_1 = \{x_i, x_j\} \quad (28)$$

X_{new} به‌روزرسانی بردار ویژه سلول‌های جدید است که از ادغام سلول‌های قبلی و جدید تشکیل شده است.

$$A_2 = \{y_1, y_2, y_3, \dots, y_m\} = X_{\text{new}} \quad (29)$$

معادله (۸)

شکل (۸): نمودار حل مسئله



۷- نتایج شبیه‌سازی

۷-۱- پیش‌بینی بار، سرعت باد و تابش خورشید

با منطق فازی

در این بخش، نتایج شبیه‌سازی روش پیشنهادی برای بازه‌های زمانی یک‌ساعته با استفاده از ۱۰۰۰ داده ورودی در هر ساعت از هر فصل ارزیابی می‌شوند. تجزیه و تحلیل حساسیت برای توابع مختلف عضویت، فواصل دامنه‌های مختلف و قوانین فازی مختلف انجام می‌شود و نتایج به دست آمده تجزیه و تحلیل می‌شوند.

همان‌طور که در جدول‌های (۲) و (۳) مشاهده می‌شود، پیش‌بینی تابش خورشید در فصل‌های تابستان و زمستان در ساعت‌هایی که تابش وجود ندارد، برابر صفر است. همچنین، پیش‌بینی سرعت باد نیز نزدیک به مقدار میانگین داده‌های اولیه است. پیش‌بینی بارهای صنعتی، تجاری و مسکونی در دو فصل تابستان و زمستان در جدول (۴) و (۵) نشان داده شده است که به‌عنوان داده‌های ورودی جهت سلول‌بندی شبکه استفاده می‌شود.

جدول (۲): پیش‌بینی داده‌های سرعت باد و تابش خورشید در تابستان

زمان	مقدار میانگین		انحراف معیار		پیش‌بینی	
	سرعت باد (m/h)	تابش خورشید (KWh/m ²)	سرعت باد (m/h)	تابش خورشید (KWh/m ²)	سرعت باد (m/h)	تابش خورشید (KWh/m ²)
۱	۳/۳۱۵۴	.	۰/۹۰۲۴	.	۳/۲۱۵۱	.
۲	۲/۹۴۲۲	.	۰/۸۲۸۳	.	۲/۸۵۰۲	.
۳	۲/۹۵۰۹	.	۱/۲۹۱۱	.	۲/۸۰۷۵	.
۴	۳/۴۷۸۹	.	۱/۰۱۴۱	.	۳/۳۶۶۲	.
۵	۳/۱۶۶۲	.	۱/۱۷۲۰	.	۳/۰۳۶۰	.
۶	۳/۵۳۹۴	۰/۳۹۳۳	۱/۱۸۸۵	۰/۰۳۱۳	۳/۴۰۷۳	۰/۳۸۹۹
۷	۳/۳۲۷۹	۰/۵۰۴۸	۱/۱۶۸۸	۰/۰۲۴۵	۳/۱۹۸۰	۰/۵۰۲۱
۸	۲/۷۰۹۸	۰/۴۴۲۲	۰/۶۸۲۴	۰/۰۴۳۱	۲/۶۳۴۰	۰/۴۳۷۴
۹	۳/۱۳۱۱	۰/۴۰۹۲	۰/۳۵۹۹	۰/۰۲۸۲	۳/۰۹۱۱	۰/۴۰۶۱
۱۰	۳/۴۹۹۱	۰/۴۲۶۲	۱/۰۵۱۰	۰/۰۲۰۶	۳/۳۸۲۳	۰/۴۲۳۹
۱۱	۳/۹۱۳۱	۰/۴۴۱۵	۰/۸۱۴۰	۰/۰۱۱۶	۳/۸۲۲۷	۰/۴۴۰۲
۱۲	۳/۰۵۶۸	۰/۴۳۵۲	۱/۰۸۱۸	۰/۰۳۸۵	۲/۹۳۶۶	۰/۴۳۱۰
۱۳	۳/۳۲۲۰	۰/۳۴۴۱	۰/۷۸۵۳	۰/۰۵۰۴	۳/۲۳۴۸	۰/۳۳۸۵
۱۴	۳/۱۱۰۳	۰/۵۰۹۳	۱/۳۵۴۶	۰/۰۵۱۶	۲/۹۵۹۸	۰/۵۰۳۶
۱۵	۳/۱۱۹۰	۰/۴۷۵۹	۱/۵۱۰۲	۰/۰۱۸۶	۲/۹۵۱۲	۰/۴۷۳۹
۱۶	۳/۳۷۶۵	۰/۳۷۹۷	۰/۹۸۴۳	۰/۰۴۳۷	۳/۲۶۷۱	۰/۳۷۴۸
۱۷	۳/۱۴۰۶	۰/۴۶۶۴	۱/۱۰۲۲	۰/۰۰۷۶	۳/۰۱۸۲	۰/۴۶۵۵
۱۸	۳/۱۶۳۵	۰/۵۱۲۶	۱/۰۳۷۷	۰/۰۱۳۱	۳/۰۴۸۲	۰/۵۱۱۲
۱۹	۳/۰۴۶۶	۰/۳۹۶۵	۲/۰۱۸۰	۰/۰۲۶۲	۲/۸۲۲۳	۰/۳۹۳۶
۲۰	۳/۱۲۸۰	۰/۴۸۶۲	۰/۱۸۴۵	۰/۰۳۱۵	۳/۱۰۷۵	۰/۴۸۲۷
۲۱	۲/۹۳۱۸	.	۱/۱۶۸۷	.	۲/۸۰۲۰	.
۲۲	۲/۸۰۴۹	.	۰/۹۶۵۳	.	۲/۶۹۷۶	.
۲۳	۱/۸۷۳۴	.	۰/۷۹۸۸	.	۱/۷۸۴۷	.
۲۴	۱/۵۴۱۷	.	۱/۰۷۰۷	.	۱/۴۲۲۸	.

جدول (۳): پیش‌بینی داده‌های سرعت باد و تابش خورشید در زمستان

زمان	مقدار میانگین		انحراف معیار		پیش‌بینی	
	سرعت باد (m/h)	تابش خورشید (KWh/m ²)	سرعت باد (m/h)	تابش خورشید (KWh/m ²)	سرعت باد (m/h)	تابش خورشید (KWh/m ²)
۱	۱۰/۵۵۸۴	.	۴/۸۴۳۰	.	۱۰/۰۲۰۲	.
۲	۱۰/۴۷۷۲	.	۴/۷۳۷۲	.	۹/۹۵۰۸	.
۳	۹/۵۵۵۸	.	۵/۵۵۲۲	.	۸/۹۳۸۹	.
۴	۱۱/۱۴۱۶	.	۴/۳۹۵۹	.	۱۰/۶۵۳۲	.
۵	۱۰/۴۵۳۷	.	۴/۵۴۰۵	.	۹/۹۴۹۲	.
۶	۱۰/۶۵۴۱	.	۳/۶۴۹۹	.	۱۰/۲۴۸۶	.
۷	۱۰/۹۰۰۸	۰/۱۵۲۳	۴/۸۰۳۱	۰/۰۱۰۰	۱۰/۳۶۷۱	۰/۱۵۱۲
۸	۱۰/۰۴۵۹	۰/۱۹۰۴	۲/۶۳۲۶	۰/۰۰۸۲	۹/۷۵۳۳	۰/۱۸۹۵
۹	۱۰/۳۰۳۵	۰/۲۱۱۵	۵/۲۶۹۹	۰/۰۰۴۹	۹/۷۱۷۹	۰/۲۱۱۰
۱۰	۱۰/۷۷۷۹	۰/۲۰۰۳	۵/۷۴۱۹	۰/۰۱۰۵	۱۰/۱۳۹۹	۰/۱۹۹۲
۱۱	۱۰/۶۸۲۳	۰/۱۹۰۸	۴/۵۲۰۲	۰/۰۰۸۶	۱۰/۱۸۰۱	۰/۱۸۹۸

۱۲	۱۰/۶۷۴۹	-/۱۶۷۶	۲/۹۵۵۱	-/۰۰۷۶	۱۰/۳۴۶۵	-/۱۶۶۷
۱۳	۱۰/۷۲۴۸	-/۱۳۳۲	۳/۲۶۷۰	-/۰۰۳۷	۱۰/۳۶۱۸	-/۱۳۲۸
۱۴	۱۱/۷۸۰۰	-/۲۰۰۴	۳/۵۸۵۹	-/۰۰۸۰	۱۱/۳۸۱۶	-/۱۹۹۵
۱۵	۱۰/۴۲۳۲	-/۲۱۲۱	۲/۸۰۷۹	-/۰۱۰۱	۱۰/۱۱۱۲	-/۲۱۰۹
۱۶	۱۰/۲۳۵۲	-/۱۵۰۸	۱/۶۴۹۲	-/۰۰۱۵	۱۰/۰۵۱۹	-/۱۵۰۶
۱۷	۱۰/۴۳۹۰	-/۲۱۵۲	۸/۰۸۹۷	-/۰۱۱۵	۹/۵۴۰۱	-/۲۱۳۹
۱۸	۹/۴۹۲۸	-/۱۴۸۴	۴/۶۹۷۸	-/۰۰۷۸	۸/۹۷۰۹	-/۱۴۷۵
۱۹	۷/۷۰۶۸	-	۲/۸۷۴۰	-	۷/۳۸۷۵	-
۲۰	۶/۸۰۳۱	-	۱/۶۴۵۱	-	۶/۶۲۰۳	-
۲۱	۶/۴۱۴۲	-	۱/۹۷۳۴	-	۶/۱۹۵۰	-
۲۲	۶/۲۷۲۷	-	-/۳۳۵۷	-	۶/۲۳۵۴	-
۲۳	۶/۰۳۴۵	-	۱/۷۳۵۰	-	۵/۸۴۱۷	-
۲۴	۱۰/۵۵۸۴	-	۱/۸۸۶۹	-	۳/۷۸۴۲	-

جدول (۴): پیش‌بینی داده‌های بار در تابستان

زمان	مقدار میانگین			انحراف معیار			پیش‌بینی		
	صنعتی	تجاری	مسکونی	صنعتی	تجاری	مسکونی	صنعتی	تجاری	مسکونی
۱	-/۷۳۵۹	۰/۸۳۱۲	-/۷۲۸۸	-/۰۵۸۲	۰/۰۲۱۶	-/۰۲۵۶	-/۷۴۲۴	۰/۸۳۳۶	-/۷۲۶۰
۲	-/۶۸۲۳	۰/۸۰۹۰	-/۴۳۳۴	-/۰۵۲۱	۰/۰۳۰۷	-/۰۴۰۲	-/۶۸۸۱	۰/۸۱۲۴	-/۴۲۸۹
۳	-/۷۵۷۴	۰/۷۳۲۶	-/۶۵۱۱	-/۰۶۱۳	۰/۰۰۹۴	-/۱۴۳۷	-/۷۶۴۲	۰/۷۳۳۶	-/۶۳۵۱
۴	-/۶۲۸۱	۰/۶۶۵۸	-/۵۲۹۹	-/۰۵۷۱	۰/۰۲۹۸	-/۰۳۹۶	-/۶۴۴۵	۰/۶۶۹۱	-/۵۲۵۵
۵	-/۷۱۷۹	۰/۷۵۲۷	-/۶۹۵۵	-/۰۹۱۸	۰/۰۳۲۲	-/۲۴۹۱	-/۷۲۸۱	۰/۷۵۶۳	-/۶۶۷۸
۶	-/۶۶۰۳	۰/۸۸۰۱	-/۷۱۰۵	-/۰۲۵۹	۰/۰۲۳۱	-/۰۶۷۶	-/۶۶۳۲	۰/۸۸۲۷	-/۷۰۲۹
۷	-/۷۴۸۲	۰/۷۸۱۵	-/۶۰۸۴	-/۱۱۸۴	۰/۰۶۸۲	-/۰۳۰۰	-/۷۶۱۳	۰/۷۸۹۰	-/۶۰۵۰
۸	-/۶۶۳۹	۰/۸۶۰۶	-/۸۶۸۲	-/۱۰۵۵	۰/۰۳۰۲	-/۱۰۴۱	-/۶۷۵۶	۰/۸۶۴۰	-/۸۵۶۶
۹	-/۸۴۷۳	۰/۹۳۷۶	-/۶۴۶۹	-/۰۹۳۴	۰/۰۳۷۴	-/۰۳۴۰	-/۸۵۷۷	۰/۹۴۱۸	-/۶۴۳۱
۱۰	-/۶۵۰۳	۰/۷۶۷۷	-/۷۸۷۶	-/۰۵۹۵	۰/۰۸۵۶	-/۰۱۶۰	-/۶۵۶۹	۰/۷۷۷۲	-/۷۸۵۸
۱۱	-/۸۵۸۹	۰/۷۵۴۸	-/۷۳۶۸	-/۰۱۰۸	۰/۱۲۳۲	-/۰۳۰۶	-/۸۶۰۲	۰/۷۶۸۴	-/۷۳۳۴
۱۲	-/۶۱۵۰	۰/۷۶۸۰	-/۵۸۳۷	-/۰۳۰۷	۰/۰۱۶۷	-/۱۴۴۱	-/۶۱۸۴	۰/۷۶۹۹	-/۵۶۷۷
۱۳	-/۷۷۳۳	۰/۷۳۲۳	-/۷۳۸۹	-/۰۷۹۹	۰/۰۴۰۰	-/۰۲۷۷	-/۷۸۲۲	۰/۷۳۶۷	-/۷۳۵۸
۱۴	-/۹۴۴۵	۰/۷۶۹۲	-/۷۴۹۶	-/۰۵۶۵	۰/۰۶۸۶	-/۰۵۳۶	-/۹۵۰۸	۰/۷۷۶۸	-/۷۴۳۷
۱۵	-/۶۲۹۷	۰/۷۹۰۹	-/۸۳۰۲	-/۰۹۲۷	۰/۰۴۰۷	-/۰۸۱۶	-/۶۴۰۰	۰/۷۹۵۴	-/۸۲۱۱
۱۶	-/۸۲۷۲	۰/۷۹۹۲	-/۷۵۴۹	-/۰۹۴۳	۰/۰۵۴۵	-/۱۱۴۰	-/۸۳۷۷	۰/۸۰۵۳	-/۷۴۲۲
۱۷	-/۷۷۴۰	۰/۸۸۴۶	-/۶۷۳۱	-/۰۴۷۷	۰/۰۳۷۵	-/۰۶۱۸	-/۷۷۹۳	۰/۸۸۸۸	-/۶۶۶۲
۱۸	-/۷۶۸۵	۰/۸۲۵۷	-/۷۱۴۱	-/۰۴۷۴	۰/۰۳۱۵	-/۰۶۸۵	-/۷۷۳۷	۰/۸۲۹۲	-/۷۰۶۵
۱۹	-/۷۳۱۲	۰/۷۰۶۲	-/۶۰۱۶	-/۰۸۲۳	۰/۰۵۱۸	-/۰۶۶۱	-/۷۴۰۳	۰/۷۱۱۹	-/۵۹۴۳
۲۰	-/۶۷۹۷	۰/۹۳۸۸	-/۷۵۵۶	-/۰۵۲۶	۰/۰۳۵۴	-/۰۷۱۸	-/۶۸۵۵	۰/۹۴۲۷	-/۷۴۷۶
۲۱	-/۴۵۵۳	۰/۷۸۵۴	-/۷۳۲۲	-/۰۲۶۴	۰/۰۷۷۰	-/۰۲۷۲	-/۴۵۸۲	۰/۷۹۳۹	-/۷۲۹۲
۲۲	-/۴۷۴۹	۰/۹۰۲۶	-/۷۱۷۰	-/۰۱۵۸	۰/۰۲۶۶	-/۰۳۴۶	-/۴۷۶۷	۰/۹۰۵۵	-/۷۱۳۱
۲۳	-/۶۸۵۹	۰/۸۰۳۶	-/۹۶۶۱	-/۰۶۸۶	۰/۰۱۲۱	-/۰۴۸۲	-/۶۹۳۵	۰/۸۰۵۰	-/۹۶۰۷
۲۴	-/۶۱۴۱	۰/۸۷۶۴	-/۶۷۲۱	-/۰۵۶۷	۰/۰۳۱۷	-/۰۸۴۰	-/۶۲۰۴	۰/۸۸۰۰	-/۶۶۲۸

جدول (۵): پیش‌بینی داده‌های بار در زمستان

زمان	مقدار میانگین			انحراف معیار			پیش‌بینی		
	صنعتی	تجاری	مسکونی	صنعتی	تجاری	مسکونی	صنعتی	تجاری	مسکونی
۱	-/۷۵۱۸	۰/۷۴۰۷	-/۵۸۰۵	-/۰۳۷۸	۰/۰۲۵۳	-/۰۷۷۹	-/۷۵۱۸	۰/۷۴۰۷	-/۵۸۰۵
۲	-/۶۵۵۵	۰/۷۹۰۵	-/۶۰۴۷	-/۰۹۸۱	۰/۰۵۰۴	-/۰۶۲۸	-/۶۵۵۵	۰/۷۹۰۵	-/۶۰۴۷
۳	-/۶۹۲۳	۰/۷۷۳۷	-/۷۳۰۶	-/۰۷۴۱	۰/۰۵۰۱	-/۱۰۶۲	-/۶۹۲۳	۰/۷۷۳۷	-/۷۳۰۶
۴	-/۶۲۱۹	۰/۸۶۲۷	-/۵۸۵۱	-/۰۵۴۷	۰/۰۴۲۸	-/۰۷۴۷	-/۶۲۱۹	۰/۸۶۲۷	-/۵۸۵۱
۵	-/۶۱۳۶	۰/۹۱۸۲	-/۵۶۰۸	-/۰۴۶۹	۰/۰۵۶۳	-/۰۴۳۸	-/۶۱۳۶	۰/۹۱۸۲	-/۵۶۰۸
۶	-/۶۲۲۲	۰/۹۰۲۸	-/۶۰۶۴	-/۰۴۵۹	۰/۰۴۸۸	-/۱۲۱۷	-/۶۲۲۲	۰/۹۰۲۸	-/۶۰۶۴
۷	-/۷۸۸۱	۰/۹۳۲۱	-/۷۳۱۱	-/۰۵۸۹	۰/۰۱۱۱	-/۰۸۰۸	-/۷۸۸۱	۰/۹۳۲۱	-/۷۳۱۱
۸	-/۷۸۱۳	۰/۷۹۵۵	-/۵۶۴۹	-/۰۷۴۶	۰/۰۴۶۰	-/۱۲۳۰	-/۷۸۱۳	۰/۷۹۵۵	-/۵۶۴۹
۹	-/۵۷۶۷	۰/۸۸۳۸	-/۷۳۵۶	-/۰۵۷۱	۰/۰۳۵۷	-/۱۱۵۸	-/۵۷۶۷	۰/۸۸۳۸	-/۷۳۵۶
۱۰	-/۷۲۸۸	۰/۷۴۷۶	-/۷۲۴۶	-/۰۶۳۰	۰/۰۵۸۷	-/۱۰۷۵	-/۷۲۸۸	۰/۷۴۷۶	-/۷۲۴۶
۱۱	-/۸۲۱۹	۰/۷۸۴۵	-/۹۳۸۹	-/۰۹۰۰	۰/۰۳۵۴	-/۱۰۰۴	-/۸۲۱۹	۰/۷۸۴۵	-/۹۳۸۹
۱۲	-/۸۲۳۰	۰/۹۰۱۹	-/۵۶۴۳	-/۰۳۵۹	۰/۰۳۳۴	-/۰۵۶۷	-/۸۲۳۰	۰/۹۰۱۹	-/۵۶۴۳
۱۳	-/۵۵۷۹	۰/۸۰۴۶	-/۶۳۹۰	-/۰۸۲۸	۰/۰۷۸۳	-/۰۵۴۶	-/۵۵۷۹	۰/۸۰۴۶	-/۶۳۹۰
۱۴	-/۵۲۹۴	۰/۸۲۰۶	-/۹۰۰۱	-/۰۴۰۱	۰/۰۳۳۴	-/۲۲۸۷	-/۵۲۹۴	۰/۸۲۰۶	-/۹۰۰۱
۱۵	-/۶۸۳۹	۰/۶۶۲۶	-/۹۵۴۶	-/۰۷۳۹	۰/۰۳۳۱	-/۰۵۰۷	-/۶۸۳۹	۰/۶۶۲۶	-/۹۵۴۶
۱۶	-/۷۱۹۱	۰/۶۷۷۷	-/۶۱۴۶	-/۰۸۰۲	۰/۰۴۳۳	-/۰۷۸۹	-/۷۱۹۱	۰/۶۷۷۷	-/۶۱۴۶
۱۷	-/۷۹۹۳	۰/۸۲۹۵	-/۷۶۸۱	-/۱۳۷۰	۰/۰۳۰۱	-/۱۰۴۳	-/۷۹۹۳	۰/۸۲۹۵	-/۷۶۸۱
۱۸	-/۷۵۹۶	۰/۶۵۲۲	-/۶۴۲۴	-/۰۴۰۵	۰/۰۲۵۲	-/۰۴۸۷	-/۷۵۹۶	۰/۶۵۲۲	-/۶۴۲۴
۱۹	-/۶۶۶۴	۰/۷۵۰۴	-/۸۵۵۲	-/۱۱۷۴	۰/۰۱۶۴	-/۰۸۱۴	-/۶۶۶۴	۰/۷۵۰۴	-/۸۵۵۲
۲۰	-/۵۶۵۰	۰/۸۳۰۴	-/۵۸۴۵	-/۰۵۷۷	۰/۰۱۸۵	-/۱۱۵۹	-/۵۶۵۰	۰/۸۳۰۴	-/۵۸۴۵
۲۱	-/۸۳۵۴	۰/۸۶۸۲	-/۷۸۲۰	-/۰۷۴۹	۰/۰۱۱۶	-/۰۶۴۵	-/۸۳۵۴	۰/۸۶۸۲	-/۷۸۲۰
۲۲	-/۶۹۲۷	۰/۷۸۳۱	-/۷۸۶۱	-/۰۸۹۴	۰/۰۴۵۵	-/۱۱۲۴	-/۶۹۲۷	۰/۷۸۳۱	-/۷۸۶۱
۲۳	-/۶۰۷۶	۰/۹۰۱۳	-/۵۲۹۶	-/۰۵۸۰	۰/۰۴۴۵	-/۰۵۶۵	-/۶۰۷۶	۰/۹۰۱۳	-/۵۲۹۶
۲۴	-/۷۵۶۴	۰/۶۸۹۱	-/۷۰۴۰	-/۰۹۲۵	۰/۰۴۷۹	-/۰۳۷۲	-/۷۵۶۴	۰/۶۸۹۱	-/۷۰۴۰

مسکونی در جدول‌های (۶) و (۷) و همچنین، محل قرار-گیری تولیدهای پراکنده در جدول (۸) آورده شده است. با توجه به معادله (۱۸) و تغییرات ماتریس لاپلاسین گراف شبکه بر اساس توان عبوری از خطوط و تلفات خطوط، جدول‌های (۹) و (۱۰) آورده شده‌اند.

۷-۲- سیستم مورد مطالعه

به منظور ارزیابی روش پیشنهادی در این مقاله، دو شبکه توزیع ۶۹ و ۱۱۸ باسه [۴۴-۴۷] با بار کل ۱۲/۷۹۸۱mw و ۲/۰۸۶۴mw به ترتیب در نظر گرفته شده‌اند. نوع باس بارها از لحاظ بارهای صنعتی، تجاری و

جدول (۶): نوع باس بارها در سیستم توزیع ۶۹ باسه

نوع باس	شماره باس
باس‌های مسکونی	۲،۳،۴،۵،۶،۷،۸،۹،۱۰،۱۱،۱۲،۱۳،۱۴،۱۵،۱۶،۱۷،۱۸،۱۹،۲۰،۲۱،۲۲،۲۳،۲۴،۲۵ ۲۶،۲۷،۳۶،۳۷،۳۸،۳۹،۴۰،۴۱،۵۵،۵۶،۵۷،۵۸
باس‌های تجاری	۲۸،۲۹،۳۰،۳۱،۳۲،۳۳،۳۴،۳۵،۳۶،۳۷،۳۸،۳۹،۴۰،۴۱،۴۲،۴۳،۴۴،۴۵،۴۶،۴۷،۴۸،۴۹،۵۰،۵۱،۵۲،۵۳،۵۴
باس‌های صنعتی	

جدول (۷): نوع باس بارها در سیستم توزیع ۱۱۸ باسه

نوع باس	شماره باس
باس‌های مسکونی	۴.۵.۶.۷.۸.۹.۱۰.۱۱.۱۲.۱۳.۱۴.۱۵.۱۶.۱۷.۱۸.۱۹.۲۰.۲۱.۲۲.۲۳.۲۴.۲۵.۲۶.۲۷.۲۸.۲۹.۳۰.۳۱.۳۲.۳۳.۳۴.۳۵.۳۶.۳۷.۳۸.۳۹.۴۰.۴۱.۴۲.۴۳.۴۴.۴۵.۴۶.۴۷.۴۸.۴۹.۵۰. ۵۱.۵۲.۵۳.۵۴.۵۵.۵۶.۵۷.۵۸.۵۹.۶۰.۶۱.۶۲.۶۳.۶۴.۶۵.۶۶.۶۷.۶۸.۶۹.۷۰.۷۱.۷۲.۷۳.۷۴.۷۵.۷۶.۷۷.۷۸.۷۹.۸۰.۸۱.۸۲.۸۳.۸۴.۸۵.۸۶.۸۷.۸۸.۸۹.۹۰.۹۱.۹۲.۹۳.۹۴.۹۵.۹۶.۹۷.۹۸.۹۹.۱۰۰.۱۰۱.۱۰۲.۱۰۳.۱۰۴.۱۰۵.۱۰۶.۱۰۷.۱۰۸.۱۰۹.۱۱۰.۱۱۱.۱۱۲.۱۱۳.۱۱۴.۱۱۵.۱۱۶.۱۱۷
باس‌های تجاری	۲.۳.۱۰.۱۱.۱۹.۲۱.۲۴.۲۵.۲۹.۳۳.۳۵.۴۱. ۵۴.۵۹.۶۴.۶۵.۷۲.۷۶.۷۸.۸۱. ۸۲.۸۳.۸۴.۱۰۴.۱۰۵.۱۰۸.۱۱۰.۱۱۰.۱۱۱.۱۱۳.۱۱۵
باس‌های صنعتی	۲۰.۲۸.۳۱.۳۲.۳۴.۳۹.۴۳.۴۶.۴۷.۴۸.۵۶. ۶۱.۶۲.۶۳.۶۶.۷۰.۷۱.۷۴.۷۹.۸۰.۸۶. ۹۶.۹۷.۱۰۱.۱۰۲.۱۰۳.۱۰۷.۱۰۹.۱۱۸

جدول (۸): مکان تولیدهای پراکنده در سیستم توزیع

سیستم توزیع IEEE	نوع تولید پراکنده	شماره باس
سیستم توزیع ۶۹ باسه	توربین بادی	۳۲ - ۱۶ - ۶
	فتوولتائیک	۵۳ - ۱۱ - ۵۹
	میکروتوربین	۲۵ - ۴۷ - ۶۶
سیستم توزیع ۱۱۸ باسه	توربین بادی	۴۱ - ۶۳ - ۶۰ - ۲۲ - ۸۶
	فتوولتائیک	۴۴ - ۱۰۷ - ۶۸ - ۷۲ - ۴۸
	میکروتوربین	۱۷ - ۵۳ - ۷۷ - ۹۶ - ۱۱۱

جدول (۹): ماتریس لاپلاسیین گراف شبکه بر اساس توان عبوری از خطوط

سیستم توزیع IEEE	$\Phi(s)_{\text{without DG}} (pu)$	$\Phi(s)_{\text{with DG}} (pu)$	Total = $\frac{\Phi(s)_{\text{with DG}}}{\Phi(s)_{\text{without DG}}}$
سیستم توزیع ۶۹ باسه	۳۱۳/۴۸۳	۲۱۹/۳۷۰	۰/۶۹۹۸
سیستم توزیع ۱۱۸ باسه	۱۸۴/۳۹۶	۱۴۷/۳۶۳	۰/۷۹۹۲

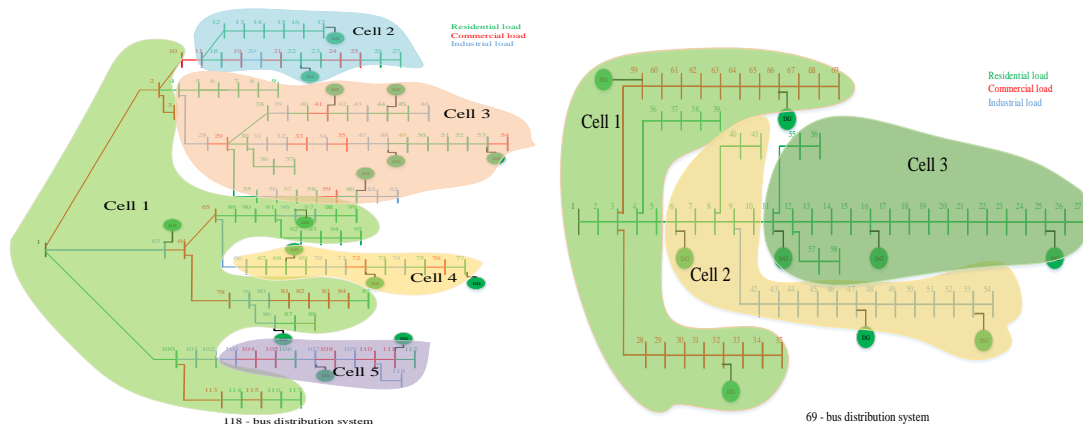
پراکنده به ترتیب ۴۳ درصد و ۱۹ درصد است. نمودار سلول‌های ایجاد شده با توجه به رویکرد سلولی و مرز سلول‌ها در سیستم‌های توزیع ۶۹ و ۱۱۸ باسه در شکل (۹) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود سیستم ۶۹ باسه حداکثر به ۳ سلول انرژی و سیستم ۱۱۸ باسه حداکثر به ۵ سلول انرژی بر اساس توابع هدف چندهدفه تقسیم شده است. نتایج برای بیشترین تعداد سلول‌ها و مرزهای سلول‌بندی شبکه توزیع ۶۹ و ۱۱۸ باسه، با توجه به توابع هدف تاب‌آوری و روش سلول‌بندی بر اساس بردار ویژه ماتریس لاپلاسیین گراف شبکه و شروط معادله‌های (۳۱) و (۳۲) که بیانگر حضور میکروتوربین گازی در سلول‌ها هستند، در جدول (۱۱) نشان داده شده است.

همان‌طور که در جدول (۹) مشاهده می‌شود، $\Phi(s)$ در هر دو سیستم مورد مطالعه با توجه به حضور و عدم حضور تولیدهای پراکنده ارزیابی شده است. از نتایج به دست آمده مشاهده می‌شود $\Phi(s)$ در سیستم ۶۹ باسه در زمان حضور تولیدهای پراکنده ۳۰ درصد و در سیستم ۱۱۸ باسه ۲۱ درصد کاهش یافته است. دلیل این امر آزاد شدن ظرفیت خطوط و کاهش توان انتقالی در شبکه به منظور تأمین بارهای دورتر به باس اسلک توسط تولیدهای پراکنده است.

اگر ماتریس لاپلاسیین گراف شبکه بر اساس تلفات خطوط در نظر گرفته شود، نتایج به دست آمده در جدول (۱۰) به دست خواهد آمد؛ به طوری که در سیستم ۶۹ باسه و سیستم ۱۱۸ باسه، کاهش تلفات در زمان حضور تولیدهای

جدول (۱۰): ماتریس لاپلاسیان گراف شبکه بر اساس تلفات خطوط

سیستم توزیع IEEE	$\Phi(s)$ without DG (pu)	$\Phi(s)$ with DG (pu)	Total = $\frac{\Phi(s)_{with DG}}{\Phi(s)_{without DG}}$
سیستم توزیع ۶۹ باسه	۰/۷۰۹۴	۰/۴۰۲۹	۰/۵۶۷۹
سیستم توزیع ۱۱۸ باسه	۰/۷۲۰۴	۰/۵۸۶۲	۰/۸۱۳۷



شکل (۹): مرز سلول‌بندی در سیستم‌های مورد مطالعه

است.

همچنین، مشاهده می‌شود با افزایش تعداد سلول‌ها، تابع هدف F_1 که نشان‌دهنده بار تأمین‌شده در حالت نرمال شبکه است، کاهش یافته است؛ به طوری که زمانی که فقط یک سلول در شبکه وجود دارد، مقدار F_1 برابر $۲/۰۸۶۴ \text{ mw}$ است و زمانی که ۳ سلول وجود دارند، برابر $۱/۷۸۴۷ \text{ mw}$ است؛ بنابراین، همان‌طور که اثبات شده بود، با افزایش تعداد سلول‌ها، میزان بار تأمین‌شده در شرایط نرمال شبکه به دلیل تفاوت در میزان تولید و مصرف سلول‌ها کاهش می‌یابد. همچنین، در رابطه با تابع هدف F_2 که برای حالت حادثه در نظر گرفته شده است، با افزایش تعداد سلول‌ها، عملکرد شبکه بهتر شده است؛ همان‌طور که مورد انتظار و اثبات شده بود؛ به طوری که در حالتی که شبکه دارای ۳ سلول باشد، مقدار عملکرد شبکه F_2 در بدترین حالت ممکن، یعنی زمانی که برای سلولی که دارای میزان بار بیشتر است حادثه‌ای اتفاق افتاده باشد، برابر $۰/۸۱۵۸ \text{ mw}$ است؛ از این رو، با رویکرد سلولی و سلول‌بندی شبکه از انتشار حادثه به قسمت‌های مختلف دیگر شبکه جلوگیری شده است. همچنین، در صورتی که سلول‌بندی در شبکه مدنظر نباشد،

جدول (۱۱): بیشترین تعداد سلول‌ها و مرز سلول‌ها

الف. سیستم توزیع ۶۹ باسه					
تعداد سلول‌ها	$N_c=۳$	$N_c=۲$	$N_c=۱$		
$F_1(\text{mw})$	۱/۶۸۲۷	۱/۸۶۶۸	۲/۰۸۶۴		
$F_2(\text{mw})$	۰/۸۱۵۸	۰/۴۱۴۹	-		
$F_T(\text{pu})$	۱/۷۸۴۷	۱/۲۹۲۰	۱		
Cells border	[۵-۶],[۱۰-۱۱]	[۵-۶]	-		
Number of keys	۳	۱	-		
ب. سیستم توزیع ۱۱۸ باسه					
تعداد سلول‌ها	$N_c=۵$	$N_c=۴$	$N_c=۳$	$N_c=۲$	$N_c=۱$
$F_1(\text{mw})$	۷/۷۹۶۱	۹/۷۱۰۱	۱۱/۱۷۲۶	۱۱/۴۶۹۴	۱۲/۷۹۸۱
$F_2(\text{mw})$	۴/۱۷۹۷	۴/۰۹۷۴	۳/۹۲۲۸	۳/۱۴۶۲	-
$F_T(\text{pu})$	۱/۸۲۴۱	۱/۸۴۸۴	۱/۹۱۷	۱/۶۹۴۸	۱
Cells border	[۱۰-۱۱],[۲-۴],[۶۵-۶۶],[۱۰۲-۱۰۳]	[۱۰-۱۱],[۲-۴],[۶۵-۶۶]	[۱۰-۱۱],[۲-۴]	[۲-۴]	-
Number of keys	۱۰	۶	۳	۱	-

در جدول (۱۱)، مشاهده می‌شود در سیستم ۶۹ باسه، بیشترین تعداد سلول‌ها برابر ۳ است و بر اساس تابع هدف تاب‌آوری، بهترین جواب زمانی که دست خواهد آمد که ۳ سلول وجود دارند و مرز سلول‌های شبکه باس‌های ۵-۶ و ۱۰-۱۱ هستند؛ همان‌طور که در شکل (۹) نیز مشخص شده

جدول (۱۲): بار و توان تولیدی سیستم ۶۹ باسه در رویکرد

سلولی

تعداد سلول‌ها	Nc=۱	Nc=۲	Nc=۳
D(MW) بار سلول	$D_1=۲/۰۸۶۴$	$D_1=۰/۵۳۴۵$	$D_1=۰/۵۳۴۵$
P(MW) توان سلول	$P_1=۲/۰۸۶۴$	$P_1=۰/۴۱۴۹$ $D_2=۱/۵۵۱۹$ $P_2=۱/۴۵۱۹$	$P_1=۰/۴۱۴۹$ $D_2=۱/۱۵۱۰$ $P_2=۰/۸۶۵۸$ $D_3=۰/۴۰۰۹$ $P_3=۰/۵۸۳۰$
F_1 (mw)	$F_1=۲/۰۸۶۴$	$F_1=۱/۸۶۶۸$	$F_1=۱/۶۸۴۷$
F_2 (mw)	$F_2=۰$	$F_2=۰/۴۱۴۹$	$F_2=۰/۸۱۵۸$

همانطور که در جدول (۱۲) مشاهده می‌شود، می‌توان

نتیجه گرفت:

در حالت تک‌سلولی شبکه: مقدار بار و تولید برابر است و مقدار بار تأمین‌شده در حالت عادی شبکه برابر بار کل است و در زمان حادثه، عملکرد شبکه به دلیل انتشار خطا در کل شبکه برابر صفر شده است.

در حالت دوسلولی شبکه: در سلول اول، مقدار توان تولیدی کمتر از بار است و بار تأمین‌شده برابر توان تولیدی سلول است که برابر است با $۰/۴۱۴۹$ mw. همچنین، در سلول دوم، مشابه سلول اول، بار تأمین‌شده برابر $۱/۸۶۶۸$ mw است و در مجموع، بار تأمین‌شده کل $۱/۴۵۱۹$ است. مقدار عملکرد شبکه در زمان حادثه با توجه به بدترین حالت ممکن، یعنی زمانی که برای سلول دوم که بار بیشتر دارد خطایی رخ دهد، برابر $۰/۴۱۴۹$ mw می‌شود.

در حالت سه‌سلولی شبکه: همانند حالت دوسلولی، با توجه به مقدار توان تولیدی و بار هر سلول، مقدار بار تأمین‌شده برابر مجموع توان تولیدی سلول اول، توان تولیدی سلول دوم و بار سلول سوم است که برابر $۱/۶۸۴۷$ است. همچنین، عملکرد شبکه در صورت رخداد حادثه برای سلول دوم که دارای بار بیشتر است، برابر $۰/۸۱۵۸$ خواهد شد که با مجموع توان تولیدی سلول اول و بار سلول سوم برابر است.

۸- نتیجه‌گیری

در این مقاله، از مقادیر ویژه و بردار ویژه ماتریس

اگر حادثه‌ای ایجاد شود، مقدار عملکرد شبکه F_p برابر صفر خواهد شد؛ بنابراین، مشاهده می‌شود دو تابع هدف در تضاد با یکدیگر هستند و بهترین جواب نیز در حالتی است که شبکه ۳ سلول داشته باشد و مرز سلول‌ها باس‌های ۵-۶ و ۱۰-۱۱ است.

همچنین، در جدول (۱۱)، برای سیستم ۱۱۸ باسه مشاهده می‌شود حداکثر ۵ سلول ایجاد شده است. در صورتی که شبکه تک‌سلولی باشد، مقدار بار تأمین‌شده F_1 در شرایط نرمال شبکه برابر $۱۲/۷۹۸۱$ mw است و در صورت افزایش تعداد سلول‌ها، مقدار F_1 کاهش یافته است و در حالتی که بیشترین تعداد سلول ایجاد شده‌اند، برابر $۷/۷۹۶۱$ mw شده است که دلیل کاهش عدم تعادلی است که در تولید و مصرف سلول‌ها به وجود آمده است. همچنین، عملکرد شبکه F_p در زمان حادثه با افزایش تعداد سلول‌ها افزایش یافته است. همان‌طور که از نتایج به‌دست‌آمده مشاهده می‌شود، در حالتی که شبکه تک‌سلولی است، مقدار عملکرد شبکه برابر صفر شده است و در حالتی که بیشترین تعداد سلول ایجاد شده است، برابر $۴/۰۹۷۴$ است؛ اما به دلیل تضاد در توابع هدف، به یک نقطه تعادل نیاز است. بهترین جواب با توجه به معادله (۸)، زمانی که ۳ سلول وجود دارند، به دست خواهد آمد. همچنین، با توجه به بار کل سیستم ۶۹ باسه و ۱۱۸ باسه که به ترتیب برابر $۲/۰۸۶۴$ mw و $۱۲/۷۹۸۱$ mw است و با مشاهده جدول (۱۱)، می‌توان دریافت مقدار بار تأمین‌شده F_1 در هر دو سیستم، در حالتی که شبکه تک‌سلولی است، تأمین می‌شود و برابر بار کل شبکه است. همچنین، مقدار عملکرد شبکه F_p در زمان حادثه برابر صفر است که نشان از انتشار حادثه در تمام شبکه دارد. با افزایش سلول‌بندی شبکه، عملکرد شبکه در زمان حادثه افزایش پیدا خواهد کرد. جدول (۱۲) به منظور بیان نحوه تأمین بار شبکه در تعداد مختلف سلول‌های شبکه سیستم ۶۹ باسه نشان داده شده است.

- Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 132, 2021.
- [5] G. Zhang, F. Zhang, X. Zhang, Q. Wu, K. Meng, "A multi-disaster-scenario distributionally robust planning model for enhancing the resilience of distribution systems." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 122, 2020.
- [6] A. H. Aldarajee, S. H. Hosseinian, B. Vahidi, S. Dehghan, "A coordinated planner-disaster-risk-averse-planner investment model for enhancing the resilience of integrated electric power and natural gas networks." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 119, 2020.
- [7] E. Yamangil, R. Bent, S. Backhaus, "Resilient upgrade of electrical distribution grids", *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, Vol. 29, No. 1, 2015.
- [8] S. Ma, B. Chen, Z. Wang, "Resilience enhancement strategy for distribution systems under extreme weather events" *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 9, No. 2, pp. 1442-1451, 2018.
- [9] L. Bellani, M. Compare, E. Zio, A. Bosisio, B. Greco, G. Iannarelli, A. Morotti, "A reliability-centered methodology for identifying renovation actions for improving resilience against heat waves in power distribution grids." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 137, 2022.
- [10] X. Lian, T. Qian, Z. Li, X. Chen, W. Tang, "Resilience assessment for power system based on cascading failure graph under disturbances caused by extreme weather events." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 145, 2023.
- [11] M. A. Gilani, A. Kazemi, M. Ghasemi, "Distribution system resilience enhancement by microgrid formation considering distributed energy resources", *Energy*, Vol. 191, 2020.
- [12] D. K. Saini, M. Sharma, "Techno-economic hardening strategies to enhance distribution system resilience against earthquake", *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 213, 2021.
- [13] J. Shim, D. Park, H. T. Chung, H. Ryu, G. Choi, J.M. Lee, "Techno-economic analysis of micro-grid system design through climate region clustering." *Energy Conversion and Management*, Vol. 274, 2022.
- [14] M. Z. El-Sharafy, H. E. Farag, "Back-feed power restoration using distributed constraint optimization in smart distribution grids clustered into microgrids", *Applied Energy*, ۱۶۱۵۸ mw است. همچنین، در حالت عادی، اگر شبکه تک سلولی باشد، بارهای تأمین شده برابر ۳ mw و ۲/۰۸۶۴ سلول داشته باشد، برابر ۳ mw خواهد بود. همچنین، استفاده از ماتریس لاپلاسین گراف شبکه موجب کاهش فضای جست و جو برای رسیدن به جواب نهایی شده است؛ بنابراین، این مقاله نشان می دهد روش پیشنهاد شده برای سلول بندی شبکه موجب افزایش تاب آوری شبکه و رسیدن به جواب در زمان کمتر خواهد شد.
- ۹- مراجع**
- [1] D. K. Mishra, M. J. Ghadi, A. Azizivahed, L. Li, J. Zhang, "A review on resilience studies in active distribution systems." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 135, 2021.
- [2] B. Uhlemeyer, J. Jakob, M. Zdrallek, C. Baumann, W. Wellbow, J. Dickert, ..., A. Schinke-Nendza, "The cellular approach as a principle in integrated energy system planning and operation", *CIREP Workshop*, 2020.
- [3] E. Galvan, P. Mandal, Y. Sang, "Networked microgrids with roof-top solar PV and battery energy storage to improve distribution grids resilience to natural disasters", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 123, 2020.
- [4] M. Ghasemi, A. Kazemi, E. Bompard, F. Aminifar, "A two-stage resilience improvement planning for power distribution systems against hurricanes." *International*

- Resilient Infrastructure, Vol. 6, No. 1-2, pp. 56-72, 2021.
- [25] S. C. Pandian, K. Duraiswamy, C. C. Rajan, N. Kanagaraj, "Fuzzy approach for short term load forecasting", *Electric Power Systems Research*, Vol. 76, No. (6-7), pp. 541-548, Apr 2006.
- [26] F. J. Chang, Y. T. Chang, "Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System for Prediction of Water Level in Reservoir", *Advances in Water Resources*, Vol. 29, No. 1, pp. 1-10, 2006.
- [27] S. Javadi, Z. Hojjatinia, "Wind speed modeling and prediction in wind farms using fuzzy logic", *Proceedings of the 6th WSEAS International Conference on Computer Engineering and Applications, (EA'12)*, Stevens Point, Wisconsin, USA, 2012.
- [28] O. Hafez, "Some aspects of microgrid planning and optimal distribution operation in the presence of electric vehicles", MS thesis, University of Waterloo, 2012.
- [29] N. D. Hatziaargyriou, T. S. Karakatsanis, M. Papadopoulou, "Probabilistic load flow in distribution systems containing dispersed wind power generation", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 8, No. 1, pp. 159-165, 1993.
- [30] C. Tao, D. Shanxu, C. Changsong, "Forecasting power output for grid-connected photovoltaic power system without using solar radiation measurement", *The 2nd International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems*, IEEE, 2010.
- [31] T. Ding, Y. Lin, Z. Bie, C. Chen, "A resilient microgrid formation strategy for load restoration considering master-slave distributed generators and topology reconfiguration", *Applied Energy*, Vol. 199, pp. 205-216, 2017.
- [32] G. Huang, J. Wang, C. Chen, J. Qi, C. Guo, "Integration of preventive and emergency responses for power grid resilience enhancement", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 32, No. 6, pp. 4451-4463, 2017.
- [33] M. Mahzarnia, M. P. Moghaddam, P. T. Baboli, P. Siano, "A review of the measures to enhance power systems resilience", *IEEE Systems Journal*, Vol. 14, No. 3, pp. 4059-4070, 2020.
- [34] P. Panteli, M. Pierluigi, M. Dimitris, N. Trakas, E. Kyriakides, N. D. Hatziaargyriou, "Metrics and quantification of operational and infrastructure resilience in power systems", *IEEE Transactions on Power* Vol. 206, pp. 1102-1117, 2017.
- [15] M. Memari, A. Karimi, H. Hashemi-Dezaki, "Clustering-based reliability assessment of smart grids by fuzzy c-means algorithm considering direct cyber-physical interdependencies and system uncertainties", *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 2022.
- [16] A. Younesi, H. Shayeghi, P. Siano, A. Safari, "A multi-objective resilience-economic stochastic scheduling method for microgrid." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 131, 2021.
- [17] A. Abessi, S. Jadid, M.M.A. Salama, "A new model for a resilient distribution system after natural disasters using microgrid formation and considering ICE cars", *IEEE Access*, Vol. 9, pp. 4616-4629, 2020.
- [18] C. Yuan, M. S. Illindala, A. S. Khalsa, "Modified Viterbi algorithm based distribution system restoration strategy for grid resiliency", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 32, No. 1, pp. 310-319, 2017.
- [19] M. Borghei, M. Ghassemi, C. C. Liu, "Optimal capacity and placement of microgrids for resiliency enhancement of distribution networks under extreme weather events", *IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT)*, 2020.
- [20] Y. Zhu, Y. Xiao, X. Wang, C. Chen, Z. Lu, X. Wang, "Enhancing Distribution System Resilience with Peer-to-Peer Transactions." *IEEE Transactions on Power Systems*, 2024.
- [21] M. H. Oboudi, M. Mohammadi, "Two-stage seismic resilience enhancement of electrical distribution systems", *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 241, 2024.
- [22] D. Liu, F. Li, Y. Xue, H. Liang, K. Zhang, Y. Si, T. Hu, "Resilience Enhancement of Renewable Energy High Penetration Power Systems." In 2024 8th International Conference on Green Energy and Applications (ICGEA), pp. 217-222. IEEE, 2024.
- [23] A. Shahbazian, A. Fereidunian, S. D. Manshadi, R. Haghghi, "A Systemic Stochastic Infrastructure Damage Evaluation Framework, Incorporating Fragility Curves, Reinforced by Network Reduction in Distribution Systems." *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2024.
- [24] X. Chen, W. Su, A. Kavousi-Fard, A.G. Skowronska, Z.P. Mourelatos, Z. Hu, "Resilient microgrid system design for disaster impact mitigation", *Sustainable and*

- [42] M. R. Mohamadi, M. Abedini, B. Rashidi, "An adaptive multi-objective optimization method for optimum design of distribution networks", *Engineering Optimization*, Vol. 52, No. 2, pp. 194-217, 2020.
- [43] A. Bosisio, A. Berizzi, D. Lupis, A. Morotti, G. Iannarelli, B. Greco, "A Tabu-Search-Based Algorithm for Distribution Network Restoration to Improve Reliability and Resiliency", *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2022.
- [44] D. Q. Hung, N. Mithulananthan, K. Y. Lee, "Determining PV penetration for distribution systems with time-varying load models", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 29, No. 6, pp. 3048-3057, 2014.
- [45] D. R. Prabha, T. Jayabarathi, "Optimal placement and sizing of multiple distributed generating units in distribution networks by invasive weed optimization algorithm" *Ain Shams Engineering Journal*, Vol. 7, No. 2, pp. 683-694, 2016.
- [46] K. S. Rani, B. K. Saw, P. Achargee, A. K. Bohre, "Optimal sizing and placement of renewable DGs using GOA considering seasonal variation of load and DGs", *International Conference on Computational Intelligence for Smart Power System and Sustainable Energy (CISPSSE)*, IEEE, 2020.
- [47] H. H. Youssef, H. B. Mokhailis, M. S. A. Talip, M. Alsamman, M. A. Muhammad, N. N. Mansor, "Distribution network reconfiguration based on artificial network reconfiguration for variable load profile", *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, Vol. 28, No. 5, pp. 3013-3035., 2020.
- Systems, Vol. 32, No. 6, pp. 4732-4742, 2017.
- [35] M. Panteli, P. Mancarella, D. N. Trakas, E. Kyriakides, N. D. Hatziargyriou, "Boosting the power grid resilience to extreme weather events using defensive islanding", *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 7, No. 6, pp. 2913-2922, 2016.
- [36] S. Ghasemi, J. Moshtagh, "Distribution system restoration after extreme events considering distributed generators and static energy storage systems with mobile energy storage systems dispatch in transportation systems", *Applied Energy*, Vol. 310, 2022.
- [37] S. Ghasemi, A. Khodabakhshian, R. Hooshmand, "Active distribution networks restoration after extreme events", *Journal of Operation and Automation in Power Engineering*, Vol. 8, No. 2, pp. 152-163, 2020.
- [38] G. Mavrotas, "Effective implementation of the ϵ -constraint method in multi-objective mathematical programming problems", *Applied Mathematics and Computation*, Vol. 213, No. 2, pp. 455-465, 2009.
- [39] J. W. Bialek, V. Vahidinasab, "Tree-partitioning as an emergency measure to contain cascading line failures", *IEEE Transactions on Power Systems*, 2021.
- [40] S. Boyd, L. Vandenberghe, "Introduction to applied linear algebra: vectors, matrices, and least squares", Cambridge University Press, 2018.
- [41] C. A. C. Coello, G. T. Pulido, M. S. Lechuga, "Handling multiple objectives with particle swarm optimization", *IEEE Trans Evol Com*, Vol. 8, No. 3, pp. 256-279, 2004.

¹ Cellular Approach

² Energy Cells

³ Peer-to-Peer

⁴ Distribution System Operator

⁵ Energy Not Supply

⁶ Particle Swarm Optimization

⁷ High Impact Low Probability

