



دانشگاه صنعتی سهند

DOR:

[20.1001.1.23223146.1399.7.2.3.7](https://doi.org/10.1001.1.23223146.1399.7.2.3.7)

نشریه علمی غیرخطی در مهندسی برق

دوره ۷ - شماره ۲

پاییز و زمستان ۱۳۹۹

صفحات ۳۸ الی ۶۳

ISSN: 2322-3146

<http://journals.sut.ac.ir/jnsee>

بهینه‌سازی مقاوم شبکه‌های توزیع با استفاده از دو الگوی متفاوت خوشه‌بندی تصادفی در حضور منابع تولید پراکنده

یونس قره‌داغی^۱، جواد علمائی^۲ و سجاد نجفی روادانق^۳

^۱دانشجوی دکتری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب،

St_y_gharedaghi@azad.ac.ir

^۲نویسنده مسئول، دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب،

J_olamaei@azad.ac.ir

^۳استاد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، s.najafi@azaruniv.edu

(تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۱/۱۷ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۹/۱۵)

چکیده

واژه‌های کلیدی

الگوریتم مقاوم به‌عنوان یکی از جدیدترین مدل‌های مقاوم‌سازی در زمینه بهینه‌سازی شبکه‌های توزیع بسیار بزرگ و پیچیده با در نظرگیری عدم قطعیت می‌باشد. در این مقاله بستر لازم در قالب بررسی و انتخاب الگوی خوشه‌بندی مناسب برای ورود به مبحث تحلیل بررسی و نتیجه‌گیری خواهد شد. بررسی تحلیل بهینه‌سازی حالت مجزا و تطبیقی منابع تولید پراکنده، در مورد شبکه استاندارد توزیع منتخب در همه موارد به‌غیر از حالت جزیره‌ای منابع تولید پراکنده هزینه‌های کلی و جزئی کمتر در حالت تطبیقی را نشان می‌دهد (هزینه کلی در حالت تطبیقی ۸۰ درصد حالت مجزاء است). از نتایج بدست آمده در حالت تطبیقی، در مبحث خوشه‌بندی با انتخاب نقاط کاندید شامل منابع تولید پراکنده و منابع تغذیه در سطح شبکه فشار متوسط استفاده شده است. بررسی داده‌های نرم‌افزاری در هر دو حالت تک‌خوشه‌ای با تکرارهای اول تا پنجم و دهم؛ یک تا پنج خوشه و ده خوشه‌ای در تکرار اول؛ در قالب خروجی‌های عددی و گراف نشان‌گر ویژگی‌های برتر الگوی خوشه‌بندی براساس میانگین داده به علت سه ویژگی برجسته حساسیت به تمامی نقاط کاندید وزن‌دار، سرعت عملیات قابل قبول نسبت به الگوی خوشه‌بندی براساس تراکم داده و جزیره‌ای شدن تغذیه خوشه‌ها در زمان کثرت بیشتر تعداد خوشه؛ به‌عنوان روش منتخب برای استفاده در کدنویسی بهینه‌سازی مقاوم شبکه توزیع در مجاورت منابع تولید پراکنده تعیین شده است.

الگوریتم درخت با حداقل طول

شاخه،

بهینه‌سازی مقاوم،

خوشه‌بندی براساس تراکم داده،

خوشه‌بندی براساس میانگین داده،

عدم قطعیت.



Sahand University
of Technology

DOR:

[20.1001.1.23223146.1399.7.2.3.7](https://doi.org/10.1001.1.23223146.1399.7.2.3.7)

Journal of Nonlinear
Systems in Electrical
Engineering

Vol.7, No.2

Autumn and Winter 2020

ISSN: 2322 – 3146

<http://journals.sut.ac.ir/jnsee>

Robust Optimization of Distribution Networks with DGs using Two Different Patterns Random Clustering

Younes Gharedaghi¹, Javad Olamaei² and Sajjad Najafi-Ravadanegh³

¹Department of Electrical Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran Email: St_y_gharedaghi@azad.ac.ir

²**Corresponding author**, Department of Electrical Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran Email: J_olamaei@azad.ac.ir

³Department of Electrical Engineering, Azerbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran Email: s.najafi@azaruniv.edu

ABSTRACT

Keywords

K-means,
K-medoids,
Minimum Spanning Tree,
Robust Optimization,
Uncertainty.

Robust algorithm is known as the one of high potential models for strengthening in optimization of large and complex distribution networks considering uncertainty. In this research we are looking for some suitable template and appropriate clustering pattern in order to analyze the operation of distribution network. The analysis of optimization process in both individual and adaptive cases of distributed generation sources applied to some standard distribution network shows that the adaptive case of DGs determines less partial and total operation cost. except in islanded case of DGs. The results of clustering approach based on choosing the candidate points which includes DGs and feeders are used in medium voltage (MV) network level. By investigating the software data in both single cluster with first up to fifth and tenth repetition, one to five clusters and finally ten clusters case shows the superiority of mean data based clustering. because of having the three following properties such as being sensitive to all weighted candidate points, the speed of acceptable operation and feeding the clusters in islanded case in multiplicity of clusters, it is suitable to designate the robust optimization method using pattern random clustering.

۱- مقدمه

انرژی الکتریکی یکی از ضروری‌ترین انرژی‌های جامعه بشری می‌باشد اما تولید این انرژی به واسطه قیمت سوخت، هزینه تأسیس نیروگاه و ... نیازمند صرف هزینه‌های بالایی می‌باشد. شبکه‌های توزیع انرژی الکتریکی به‌عنوان نقطه اتصال بین تولید و مصرف نقش عمده‌ای را در سیستم‌های قدرت بازی می‌کند [۱ و ۲]. به دلیل گستردگی این شبکه‌ها، طراحی و بهره‌برداری از آن‌ها با چالش‌های زیادی روبرو است. جهت رفع چالش‌های فوق، شبکه‌های توزیع الکتریکی^۱ بایستی به‌صورت بهینه بهره‌برداری و طراحی گردد. از دیدگاه برنامه‌ریزی قطعی^۲ و با در نظر گیری حداکثر ظرفیت ممکن، به‌لحاظ بهره‌برداری محدود با جواب مطمئن ولی غیراقتصادی مواجه خواهیم شد که شرایط ایده‌آلی نخواهد بود [۳].

با مدل‌سازی بهینه‌ی متغیرهای اصلی و فرعی سیستم قدرت در شبکه‌های توزیع برق و در نظر گرفتن سه شاخص کاهش تلفات، افزایش قابلیت اطمینان و اصلاح پروفیل ولتاژ در تابع هدف مربوطه با لحاظ نمودن محدودیت‌های ذیربط، می‌توان در شرایط استاتیکی و دینامیکی شبکه توزیع به پاسخ‌های متناسب برای مدل‌سازی دست یافت [۴ و ۵]. یکی از مهمترین ایده‌های فنی و اقتصادی که در مدل‌سازی شبکه توزیع برق به‌عنوان شاخصه کنترل‌پذیر^۳ در تعریف تابع هدف جدید با ویژگی‌های منحصر به فرد آن می‌تواند مطرح شود [۶ و ۷]؛ معیار عدم قطعیت^۴ در متغیرهای ورودی و تاثیر آن در متغیرهای خروجی مدل‌سازی می‌باشد.

بدیهی است هرچه افق زمانی^۵ انتخاب شده برای طراحی در شبکه توزیع مورد نظر بلندتر باشد، میزان خطای متغیرهای ورودی و به تبع آن متغیرهای خروجی مدل بزرگ‌تر خواهد بود که باتوجه به این امر تا حد امکان این محدوده زمانی کمتر از پنج سال در نظر گرفته می‌شود. در نظر گرفتن شرایط استاندارد منطبق با الزامات شبکه توزیع و همچنین رعایت اصول بهینه‌سازی سنتی شبکه توزیع با هدف کاهش تلفات و بهبود پروفیل ولتاژ از یکسو، و مدل‌سازی عدم قطعیت در میزان برآورد بار^۶ و نرخ تورم^۷ در افق زمانی طراحی شبکه توزیع از سوی دیگر تغییراتی را در قالب تابع هدف بهینه‌سازی سیستم با رویکرد افزایش قابلیت اطمینان سیستم و حداقل‌سازی تابع هزینه^۸ در حوزه مطالعاتی در شبکه توزیع برق سبب می‌شود.

مقاله حاضر، یک الگوریتم مقاوم^۹ را به عنوان روش حل مسئله تابع هدف دو بخشی^{۱۰} مورد تحلیل قرار می‌دهد. بخش اول (اصلی) در قالب یک برنامه‌ریزی خطی^{۱۱} با ویژگی برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط^{۱۲} و بخش دوم که خود شامل دو زیربخش است در قالب برنامه‌ریزی غیر خطی^{۱۳} قابل تبدیل به برنامه‌ریزی خطی مشابه بخش اولیه قابل حل می‌باشد.

در این مقاله بستر لازم برای استفاده از معیار عدم قطعیت در قالب الگوریتم مقاوم در طراحی بهینه و مقاوم شبکه‌های توزیع در حضور منابع تولید پراکنده شامل توربین‌های بادی^{۱۴} و منابع تولید هم‌زمان حرارت و برق^{۱۵} و سلول‌های فتوولتائیک^{۱۶} و پیل

¹ Electrical Distribution Networks

² Deterministic Planning

³ Controllable Index

⁴ Uncertainty Criteria

⁵ Time Horizon

⁶ Load Estimation

⁷ Inflation Rate

⁸ Cost Function

⁹ Robust Algorithm

¹⁰ Two-Part Objective Function

¹¹ Linear Programming

¹² Mixed Integer Programming

¹³ Non-Linear Programming

¹⁴ WT: Wind Turbine

¹⁵ CHP: Combined Heat and Power

¹⁶ PV: Photovoltaic Cells

سوختی^۱ و با انتخاب الگوی خوشه‌بندی^۲ متناسب با الگوریتم موردنظر ارائه خواهد شد [۸-۱۱]. لازم به ذکر است که شبکه توزیع موردنظر از نوع اکتیو با ساختار نامشخص از دیدگاه نقاط کاندید و مطالعات دینامیکی^۳ در سطح ولتاژ فشار متوسط^۴ شبکه‌های توزیع می‌باشد و تمامی محاسبات با در دسترس بودن اطلاعات فنی مربوط به این سطح ولتاژ طراحی خواهد شد. همچنین مکان‌های کاندید برای منابع تولید پراکنده قابل کنترل و نیز غیرقابل کنترل بادر نظرگیری شرایط جغرافیایی منطقه و منحنی‌های رفتار منابع تولید پراکنده در آن منطقه مورد تحلیل قرار خواهد گرفت. از تکنیک خوشه‌بندی در بررسی و طراحی سیستم توزیع در شبکه برق در قالب خوشه‌های تعریفی به‌عنوان مراکز ثقل بار در ابعاد موردنظر جغرافیایی استفاده می‌شود.

از دیگر مفاهیم کاربردی که در تحلیل موضوعی بارهای تراکم یکنواخت در سطح هر خوشه و جهت یافتن حداقل شاخه مورد بحث می‌باشد به موضوعاتی چون تحلیل درخت و جنگل^۵ می‌توان اشاره داشت [۱۹-۱۲]. در هر سیستم قدرت بخش شبکه توزیع به‌عنوان نقطه تحویل انرژی پاک الکتریکی به مصرف‌کنندگان نهایی از پیچیدگی خاصی برخوردار می‌باشد. برای بررسی اجزای بخش‌های دخیل در طراحی این مجموعه بزرگ شامل منابع تولید فشارقوی، فشارمتوسط و خطوط فشارمتوسط و فشارضعیف و منابع تولید پراکنده کنترل‌پذیر؛ یک الگوی ساده برای تحلیل‌های تخصصی ارائه خواهد شد و معیار اصلی آن انجام محاسبات شبکه‌ای سیستم توزیع در سطح فشارمتوسط می‌باشد. از این پس سطح فشارضعیف، ۴۰۰ ولت و سطوح ولتاژ متوسط و قوی به ترتیب ۲۰ کیلوولت و بالاتر از ۶۳ کیلوولت و در قالب استانداردهای سطوح ولتاژ بین‌المللی مدنظر می‌باشد [۱۶-۱۴]. مدل‌سازی یک شبکه توزیع واقعی با مدل‌سازی تک‌تک اجزای آن میسر بوده و پس از آن تحلیل شبکه موردنظر فراهم خواهد شد.

۱-۱-۱ مدل‌سازی شبکه ثانویه سیستم توزیع

دیماند^۶ مصرفی در شبکه ثانویه شامل شبکه فشارضعیف براساس برآورد بار مبتنی بر شاخصه‌های جغرافیایی و تجارب پیشین و شاخص‌های بار و نقشه راه آتی^۷ شبکه موجود تعیین می‌شود و نتایج بدست آمده برای تحلیل مسئله طراحی سیستم توزیع مورد استفاده قرار می‌گیرد.

برای تعیین هزینه‌های فیدرهای فشارضعیف بادر نظرگیری الگوریتم خوشه‌بندی و تخمین بار واقعی در سه بخش ذیل و در قالب فلوجارت‌های شکل‌های ۱ و ۲ با انتقال تمامی نتایج به سطح ولتاژ فشارمتوسط اطلاعات این قسمت تعیین می‌شود [۱۷].

۱-۱-۱-۱ الگوریتم تعیین بار

برای خوشه‌سازی در مطالعات بار روشهای مختلف وجود دارد که هر یک دارای نقاط قوت خاص خود می‌باشند. در این بخش از تحقیق، تعیین بار در دو مرحله انجام می‌گیرد، به شکلی که در مرحله اول به‌ازای فاصله و همچنین حاصل ضرب فاصله در توان در هر بلوک به ابعاد ۵۰٪*۵۰ مترمربعی با مرکزیت منبع تولید پراکنده و منبع تولید ۲۰ کیلوولت ذی‌ربط تعیین شده و یک ماتریس سه‌ستونه با مشخصات مذکور تشکیل می‌یابد.

در مرحله دوم، در صورت شمول محدودیت‌های تابع هدف به‌قرار شاخصه‌های معین شده، شاخص‌های فنی و محاسباتی مربوطه به‌ترتیب به‌ازای هر خوشه تعریف شده و به بخش دوم کار در قالب الگوریتم خوشه‌بندی می‌رسیم. تمامی پارامترهای مختلف

¹ FC: Fuel Cell

² Clustering

³ Dynamic Studies

⁴ Medium Voltage

⁵ Forest and Tree Analysis

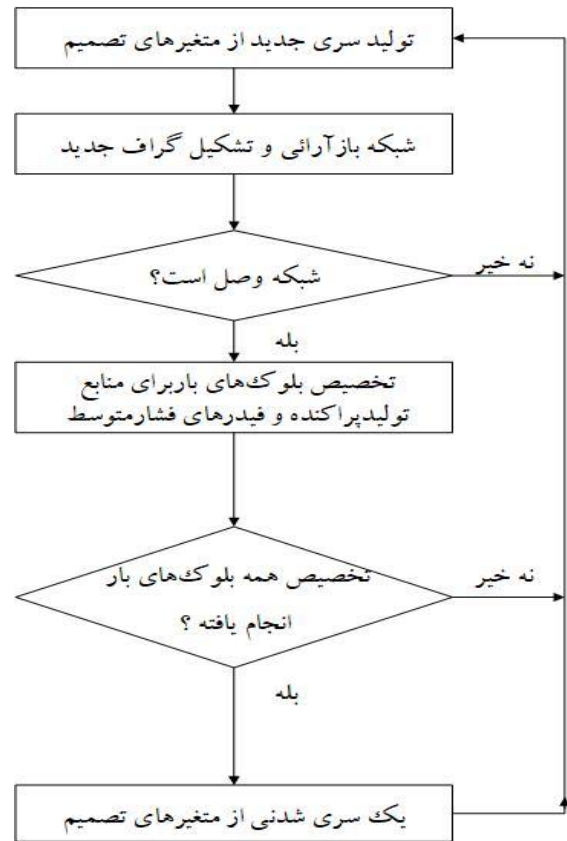
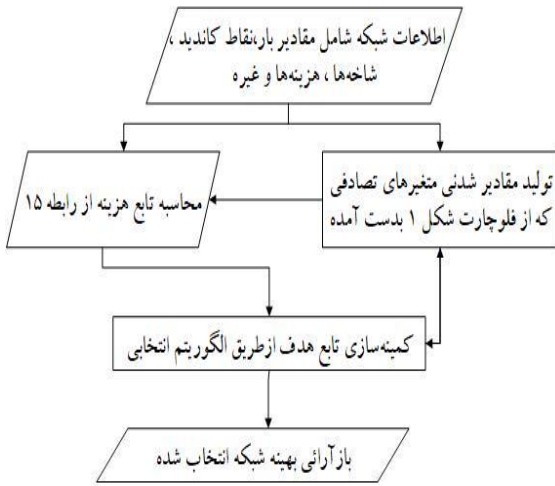
⁶ Demand

⁷ Future Road Map

مرتبط با روابط استخراجی در قالب جدول آورده شده که براساس پارامترهای ورودی، مقادیر خروجی مدل‌سازی هر جزء شبکه را برای تحلیل بهینه‌سازی فراهم می‌کند.

جدول ۱. معرفی پارامترهای مختلف مورد نظر تحقیق در شبکه توزیع برق

ردیف	شاخص متغیر	عنوان متغیر	ردیف	شاخص متغیر	عنوان متغیر	ردیف	شاخص متغیر
۱	ALDF	متوسط ضریب بار سالیانه ترانس / منبع / پست	۲۱	EDmax	حداکثر فاصله الکتریکی	۴۱	R
۲	ALSF	متوسط ضریب بار سالیانه ترانس / پست	۲۲	ELCF	ضریب هزینه تلفات انرژی الکتریکی	۴۲	Ri
۳	APF _{j,i}	ضریب توان متوسط لایه j از i ترانس / منبع	۲۳	FP	بهای سوخت	۴۳	Rij
۴	CC	هزینه سرمایه‌ای برای ترانس	۲۴	HR	نرخ حرارت و گرمایش	۴۴	S
۵	CC	هزینه سرمایه‌ای برای منبع	۲۵	I	جریان فیدر ۲۰ کیلوولت	۴۵	SDG
۶	CC	هزینه سرمایه‌ای برای فیدر	۲۶	Imax	حداکثر جریان مجاز فیدر ۲۰ کیلوولت	۴۶	SDT
۷	CFDG	تابع هزینه مولدهای توزیع برق	۲۷	IRR	مبنای پول ایرانی به ریال	۴۷	Smax
۸	CFMVF	تابع هزینه فیدرهای ۲۰ کیلوولت توزیع برق	۲۸	LCOE	هزینه سوخت برای تولید انرژی الکتریکی	۴۸	SPL
۹	CF _{DT} ^{DG_i}	تابع هزینه ترانس نسبت به منبع شاخه i ام	۲۹	MVFi	فیدر ۲۰ کیلوولت شاخه i ام	۴۹	SSi
۱۰	CFOM	هزینه ثابت عملیات و نگهداری	۳۰	NDG	تعداد کاندید منابع تولید پراکنده	۵۰	SSMVF
۱۱	CVOM	هزینه متغیر عملیات و نگهداری	۳۱	NDT	تعداد کاندید ترانس	۵۱	SSS
۱۲	CFSS	تابع هزینه پستهای توزیع برق	۳۲	NSMVF	تعداد فیدرهای ۲۰ کیلوولت پس از محاسبات حداقلی	۵۲	TL
۱۳	CFt	تابع هزینه معادل در شبکه توزیع برق	۳۳	NUMVF _i	تعداد فیدرهای ۲۰ کیلوولت بالادستی به پست	۵۳	TLT
۱۴	CL	هزینه تلفات مقاومتی و هسته ترانس / پست	۳۴	P	اندازه منبع تولید پراکنده	۵۴	TP
۱۵	CPF	ضریب ظرفیت	۳۵	PF	ضریب توان	۵۵	TRP
۱۶	CRF	ضریب بازافت ظرفیت	۳۶	PFDT _i	ضریب توان شاخه i ام ترانس	۵۶	USD2IRR
۱۷	DGi	منبع تولید پراکنده کاندید شاخه i ام	۳۷	Pmax	حداکثر توان اکتیو منبع تولید پراکنده	۵۷	VDMV _{max}
۱۸	di	فاصله فیدر ۲۰ کیلوولت شاخه i ام	۳۸	PNLL	تلفات بی باری ترانس / پست	۵۸	VMV
۱۹	DR	نرخ بهره بانکی	۳۹	PSCL	تلفات بار کامل ترانس / پست	۵۹	X
۲۰	DTi	ترانس کاندید شاخه i ام	۴۰	PVD	ارزش فعلی استهلاک	۶۰	Xi

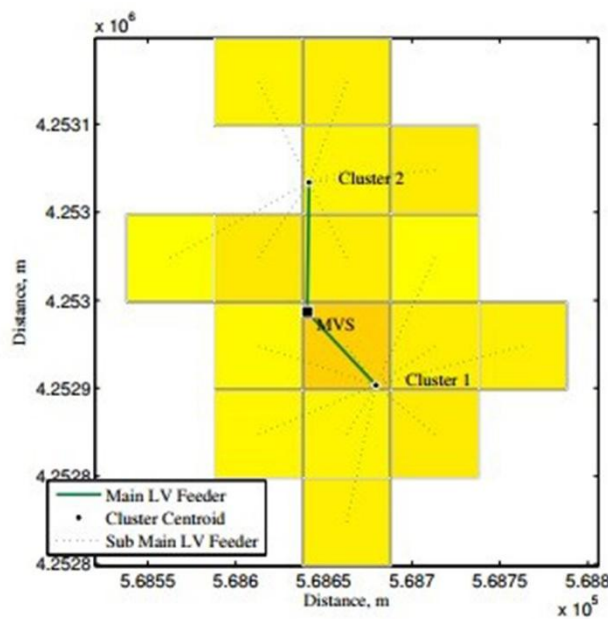


شکل ۱. فلوجارت روش تولید متغیرهای تصمیم

شکل ۲. فلوجارت روش پیشنهادی طراحی شبکه

۱-۱-۲- الگوریتم خوشه‌بندی

با استفاده از الگوریتم خوشه‌بندی براساس میانگین داده^۱، یک قالب دو خوشه‌ای مطابق شکل ۳ نمایش داده شده است.



شکل ۳. نمونه‌ای از خوشه‌بندی شبکه در حضور منبع ولتاژ فشار متوسط

^۱K-Means Method

۱-۱-۳- هزینه افت ولتاژ فیدرهای موجود

هزینه‌های قسمت شبکه فشارضعیف شامل دوبخش است. هزینه فیدرهای فشارضعیف متصل به منابع تولید ۲۰ کیلوولت و متصل به منابع تولید پراکنده تعیین می‌شود که بادر نظرگیری پدیده جزیره‌ای شدن منابع تولید پراکنده در قالب روابط فنی و محاسباتی استخراج خواهد شد.

۱-۲- مدل سازی پست‌های فشارمتوسط سیستم توزیع

پس از مدل سازی سطح ولتاژ فشارضعیف سائز منابع تولید سطح فشارمتوسط یا همان ظرفیت پست‌های ۲۰ کیلوولت تعیین می‌گردند. با استفاده از روابط (۱) تا (۴) ظرفیت پست مورد نظر به دست می‌آید ولیکن سائزهای استاندارد پست‌های توزیع عبارتند از (کیلوولت آمپر): ۲۵ و ۵۰ و ۱۰۰ و ۱۲۵ و ۲۰۰ و ۲۵۰ و ۳۱۵ و ۴۰۰ و ۵۰۰ و ۶۳۰ و ۸۰۰ و ۱۰۰۰ و ۱۲۵۰ و ۱۶۰۰ و ۲۰۰۰.

$$CF_{DT} = \sum_{i=1}^{NDT} \{CC(DT_i).S(DT_i) + CL(DT_i).T_p.8760\}. \lambda_i \quad (1)$$

$$CL(DT_i) = \{P_{NLL}(DT_i) + P_{SCL}(DT_i).TL^2(DT_i).ALSF(DT_i)\}.ELCF \quad (2)$$

$$TL(DT_i) = \left(\sum_{j=1}^{N_{ctus,i}} \sum_{k=1}^{N_{LB,j,i}} P_k \right) / \{S(DT_i).PF(DT_i)\} \quad (3)$$

$$ALSF = 0.15.ALDF + 0.85.ALDF^2 \quad (4)$$

۱-۳- مدل سازی منابع تولید پراکنده در سطح فشارمتوسط سیستم توزیع

از روابط (۵) تا (۷) ظرفیت منابع تولید پراکنده که مجموع دیمانند متصل به هر منبع می‌باشد (عملاً "حدود ۲۵ کیلووات) تعیین شده است.

$$CF_{DG} = \sum_{i=1}^{NDG} \{ [LCOE(DG_i).P(DG_i).USD2IRR].T_p.8760 + CF_{DT}^{DG_i} \}. K_i \quad (5)$$

$$LCOE(DG_i) = \frac{CC(DG_i).CRF.(1-TRP.PVD)}{8760.CPF(DG_i).(1-TRP)} + \frac{CFOM(DG_i)}{8760.CPF(DG_i)} + \frac{CVOM(DG_i)}{1000} + \frac{FP(DG_i).HR(DG_i)}{1000000} \quad (6)$$

$$CRF = \frac{DR.(1+DR)}{(1+DR)^{TL}-1} \quad (7)$$

۱-۴- مدل سازی خطوط فشارمتوسط سیستم توزیع

با در نظرگیری شرط اتصال هر خط فشارمتوسط که با اپراتور صفر یا یک در محاسبات تعیین می‌شود و همچنین بابه کارگیری الگوریتم درخت با حداقل طول شاخه مدل سازی این بخش انجام می‌یابد. با در نظر گرفتن این که ظرفیت استاندارد منابع تولید سطح بالادست ۲۰ کیلوولت و فشارقوی در قالب ۳ و ۸ و ۱۵ و ۲۵ و ۳۰ و ۵۰ مگاوات آمپر می‌باشند طبق روابط (۸) تا (۱۱) مقادیر هزینه‌ای این بخش استخراج می‌شود.

$$CF_{MVF} = \sum_{i=1}^{N_{SMVF}} \{ CC(MVF_i).d_i + I^2(MVF_i).R_i.ELCF.T_p.8760 \} \quad (8)$$

$$I(MVF_i) < I_{max}(MVF_i) \quad \forall i \in S_{SMVF} \quad (9)$$

$$\sum_{j=1}^{N_{UMVF,i}} \frac{(R_j.PF_j + X_j.\sqrt{(1-PF_j^2)}) . d_j . I(MVF_j)}{V_{MV,0.01}} < VD_{MV,max} \quad \forall i \in \{S_{DT}, S_{DG} \mid \lambda_i = 1 \vee K_j = 1\} \quad (10)$$

$$S_{SMVF} = \{1, 2, \dots, N_{SMVF}\} \quad (11)$$

۱-۵- مدل‌سازی پست‌های فوق‌توزیع در سیستم توزیع

برابر روابط (۱۲) تا (۱۴) و با ذکر این نکته که ظرفیت ۴۰ درصدی منابع تولید پراکنده به‌ازای ترانس افزایش یافته مربوطه اعمال می‌شود، تمام محاسبات هزینه‌ای را براساس تحلیل در سطح ولتاژ فشار متوسط برآورد نموده و وارد مبحث تحلیل داده‌ای و استخراج نتایج بخش کدنویسی مدل‌سازی^۱ می‌شویم.

$$CF_{SS} = \sum_{i=1}^{N_{SS}} \{CC(SS_i) \cdot S(SS_i) + CL(SS_i) \cdot Tp \cdot 8760\} \cdot \gamma_i \quad (12)$$

$$CL(SS_i) = \{P_{NLL}(SS_i) + P_{SCL}(SS_i) \cdot TL^2(SS_i) \cdot ALSF(SS_i)\} \cdot ELCF \quad (13)$$

$$TL(SS_i) = \frac{\sum_{i=1}^{N_{DT}} \left(\sum_{j=1}^{N_{Clus,i}} \sum_{k=1}^{N_{LB,j,i}} P_k \right) \cdot \lambda_i + 0.4 \cdot \sum_{i=1}^{N_{DT}} \left(\sum_{j=1}^{N_{Clus,i}} \sum_{k=1}^{N_{LB,j,i}} P_k \right) \cdot \lambda_i}{S(SS_i) \cdot PF(SS_i)} \quad (14)$$

۲- طراحی بهینه شبکه توزیع با حضور منابع تولید پراکنده^۲

با رویکرد مدل‌سازی متمرکز بر یک سطح ولتاژ در سیستم توزیع، بر انتقال المان‌های طراحی سطوح مختلف ولتاژ فشارقوی، فشار متوسط و فشار ضعیف بر شبکه فشار متوسط انجام شده و با این فرض تابع هزینه در رابطه (۱۵) شامل پنج جزء منابع تولید فشارقوی؛ فیدرهای فشار متوسط، منابع تولید پراکنده، منابع تولید فشار متوسط و فیدرهای فشار ضعیف خواهد بود.

$$CF_t = CF_{HVS} + CF_{MVF} + CF_{DG} + CF_{MVS} + CF_{LVF} \quad (15)$$

لازم به ذکر است در تابع هزینه فوق متغیرهای تصمیم^۳ بصورت تصادفی و بادر نظرگیری شبکه شعاعی و افت ولتاژ و ... محاسبه خواهد شد. در بهینه‌سازی قطعی^۴ شبکه توزیع با حضور منابع تولید پراکنده، ضمن کدنویسی مبتنی بر خوشه‌بندی منتخب در محیط نرم‌افزار MATLAB با اجرای همزمان آن در کنار برنامه‌های پخش بار^۵ و درخت با حداقل شاخه^۶ به خروجی‌های مورد نظر دست خواهیم یافت.

معرفی برنامه درخت با حداقل شاخه تحت نرم‌افزار MATLAB

در تحلیل فنی و محاسباتی شبکه‌های واقعی توزیع، دسترسی به شاخه‌هایی از درختها که دارای حداقل ممکن مسیر شاخه در خوشه براساس الگوریتم فنی تحقیق باشد مورد انتظار است. دستور درخت با حداقل شاخه در کدنویسی MATLAB به حداقل اسپین درختی از خوشه اشاره دارد که به‌ازای ماتریس تعریف شده در یک شبکه نمونه اعمال می‌شود و با فرض‌های اولیه حداقل‌سازی

^۱ Modelling Coding

^۲ Distributed Generators

^۳ Decision Variables

^۴ Deterministic Optimization

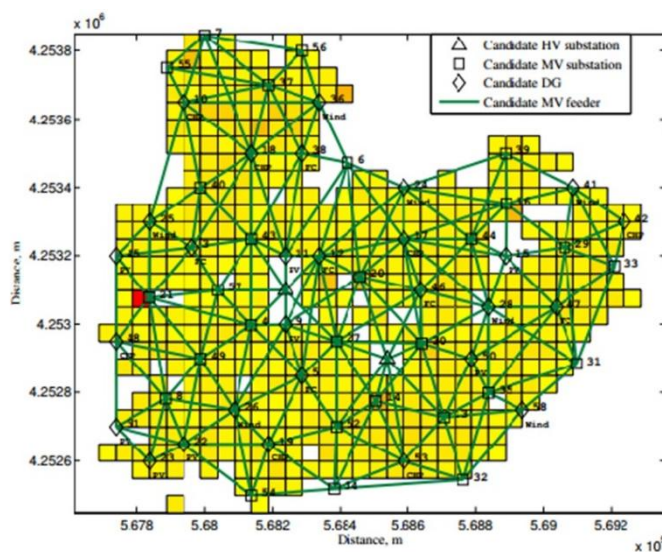
^۵ Power Flow GS Software

^۶ MST Prim Software

هر کدام از اسپن‌های درخت متناظر با شبکه توزیع الگوریتم بهینه‌سازی را پیاده‌سازی می‌نماید. پس از اشاره به اصول و مبنای الگوریتم بهینه‌سازی، روش‌های مختلف تحلیل خوشه‌بندی ذکر شده و الگوی ایده‌آل برای تحلیل تحقیق انتخاب خواهیم می‌شود.

۳- بهینه‌سازی شبکه نمونه بر اساس دو سناریوی مجزا و تطبیقی

مطابق شکل ۴ و براساس یک نمونه واقعی از شبکه مسکونی در گرینفیلد^۱ که به ۵۰۶ بلوک خوشه‌ای ۵۰*۵۰ مترمربعی منطبق با شرایط تعریفی تقسیم‌بندی شده است، برابر جداول ۲ و ۳ به ترتیب مشخصات حالت تطبیقی منابع تغذیه شامل فیدرهای فشار متوسط و منابع تولید پراکنده آورده شده است.



شکل ۴. شبکه مسکونی گرینفیلد با ۵۰۶ بلوک ۵۰*۵۰ مترمربعی

جدول ۲. مشخصات حالت تطبیقی منابع تغذیه

اندازه منبع تغذیه (کیلوولت آمپر)	بار (کیلووات)	شماره شینه	اندازه منبع تغذیه (کیلوولت آمپر)	بار (کیلووات)
۳۱۵	۱۵۳/۲	۳۳	۸۰۰۰	(پست فوق توزیع) ۱
۱۲۵	۵۸/۸	۳۴	۲۵۰	۴
۴۰۰	۲۰۵/۳	۳۷	۵۰	۶
۴۰۰	۲۰۹	۴۰	۵۰۰	۸
۲۵۰	۱۲۴/۳	۴۳	۶۳۰	۱۴
۳۱۵	۱۴۱/۷	۴۴	۴۰۰	۱۶
۲۵۰	۱۳۷/۲	۴۹	۲۵۰	۲۰
۴۰۰	۲۰۹/۲	۵۲	۶۳۰	۲۱
۱۰۰	۴۹	۵۴	۴۰۰	۲۹
۴۰۰	۲۰۰/۷	۵۵	۳۱۵	۳۰
۲۵	۸/۹	۵۶	۳۱۵	۳۲

¹ Residential Area In Greenfield

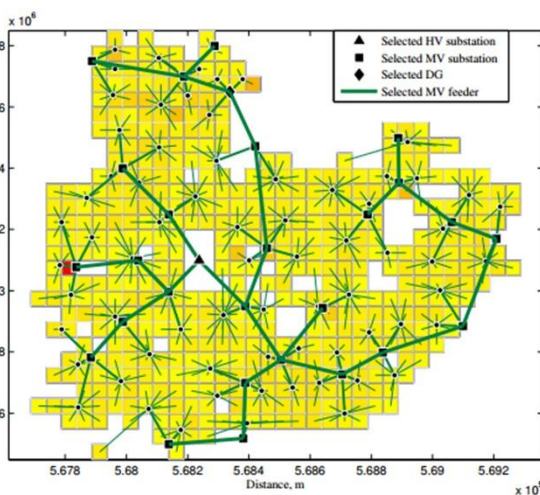
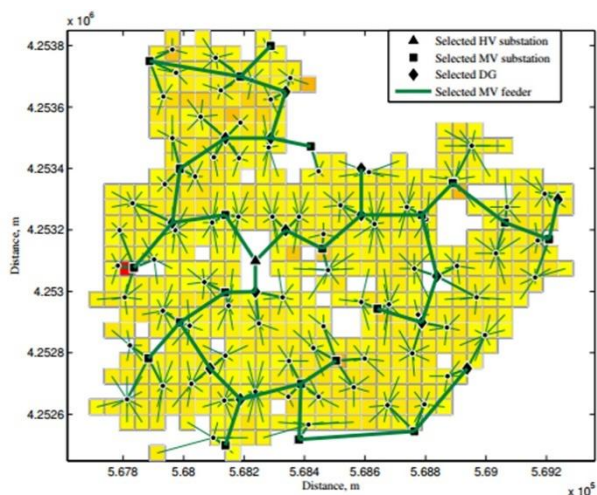
جدول ۳. مشخصات حالت تطبیقی منابع تولید پراکنده

شماره شینه	نوع منبع تولید پراکنده	بار (کیلووات)	اندازه منبع تولید پراکنده (کیلووات)	اندازه منبع تغذیه (کیلوولت آمپر)
۳	پیل سوختی	۱۶۷/۱	۲۵۰	۳۱۵
۹	فتوولتائیک	۱۰۷/۸	۱۷۵	۲۰۰
۱۲	پیل سوختی	۱۶۵/۶	۲۵۰	۳۱۵
۱۷	همزمان برق و حرارت	۱۸۴/۹	۲۷۵	۴۰۰
۱۸	همزمان برق و حرارت	۳۵۸/۴	۵۲۵	۸۰۰
۱۹	همزمان برق و حرارت	۱۳۲/۶	۲۰۰	۲۵۰
۲۴	توربین بادی	۵۸/۲	۱۰۰	۱۲۵
۲۶	توربین بادی	۱۵۹	۲۵۰	۳۱۵
۲۸	توربین بادی	۱۹۵/۲	۳۰۰	۴۰۰
۳۶	توربین بادی	۱۵۷/۳	۲۲۵	۳۱۵
۳۸	پیل سوختی	۹۰	۱۵۰	۲۰۰
۴۲	همزمان برق و حرارت	۶۲/۶	۱۰۰	۱۲۵
۵۰	فتوولتائیک	۲۲۷/۲	۳۲۵	۵۰۰
۵۸	توربین بادی	۱۰۶/۹	۱۷۵	۲۰۰

در جدول ۴ به پارامترهای هزینه سوخت برای تولید انرژی الکتریکی در منابع تولید پراکنده اشاره شده است. تجهیزات موجود شامل دو دستگاه پست فوق توزیع و ۲۸ منبع تولید پراکنده و ۲۸ پست توزیع و ۱۸۶ فیدر فشار متوسط بوده با بار مجموع ۵/۶ مگاوات می‌باشد که در قالب دو سناریوی مجزا و تطبیقی منابع تولید پراکنده مورد تحلیل قرار گرفته و خروجی‌های شکل‌های ۶ و ۵ متناظرا " بدست آمده‌اند.

جدول ۴. پارامترهای هزینه سوخت برای تولید انرژی الکتریکی در منابع تولید پراکنده

شاخصه	توربین بادی	فتوولتائیک	پیل سوختی	تولید همزمان برق و حرارت
هزینه سرمایه‌ای ترانس، فیدر یا منبع تغذیه اولیه	۹۱۹/۱	۴/۷۰۲	۵/۶۶۵	۰/۷۸۱
هزینه ثابت عملیات و نگهداری	۳۶/۱۷	۳۲/۲۴	۲۳۵/۹۳	۱۱/۹۳
هزینه متغیر عملیات و نگهداری	۱۱/۹۹	۰	۱۹/۹۷	۷/۵۸
ضریب ظرفیت	۳۷/۱۱	۱۹/۰۴۴۶	۹۴/۳۳	۳۸/۴
ارزش فعلی استهلاک	۰/۸۳۱۵۵	۰/۸۳۱۵۵	۰/۸۳۱۵۵	۰/۵۹۴۷۶
نرخ حرارت و گرمایش	۳۴۱۲	۳۴۱۲	۷۲۹۷/۵	۹۹۵۷/۸



شکل ۵. خروجی نرم‌افزاری حالت مجزای تحلیل شبکه

شکل ۶. خروجی نرم‌افزاری حالت تطبیقی تحلیل شبکه

در طراحی بهینه قطعی بدون در نظرگیری شرایط عدم قطعیت، مقایسه تفکیکی هزینه‌های دو سناریوی حالت مجزای و تطبیقی در جدول ۵ آمده که نتایج حاصله برتری تحلیل حالت تطبیقی بر حالت مجزای را به وضوح نشان داده است [۱۷].

جدول ۵. مقایسه هزینه‌ای دو سناریوی مجزای و تطبیقی

تابع هزینه	حالت مجزای	حالت تطبیقی
تابع هزینه فیدرهای فشارضعیف	۱۴۷۸۵۵۴/۷۱	۱۳۲۶۵۹۴/۶۵
تابع هزینه فیدرهای فشارمتوسط	۴۱۴۰۱۱۲۴/۰۳	۳۸۵۸۰۸/۷
تابع هزینه پستهای توزیع	۱۶۲۴۴۰۹/۰۷	۱۰۴۷۳۶۰/۳۶
تابع هزینه منابع تولید پراکنده	۲۲۲۴۵۶۱/۰۷	۳۵۳۸۹۱۶۶/۵۷
تابع هزینه پستهای فوق توزیع	۲۳۰۰۷۸۳/۵۴	۱۲۲۰۰۶۱/۷۸
مجموع تابع هزینه	۴۹۰۲۹۴۳۲/۴۲	۳۹۳۶۸۹۹۲/۰۶

۴- بهینه‌سازی مقاوم شبکه توزیع و مقایسه تحلیل خوشه‌بندی

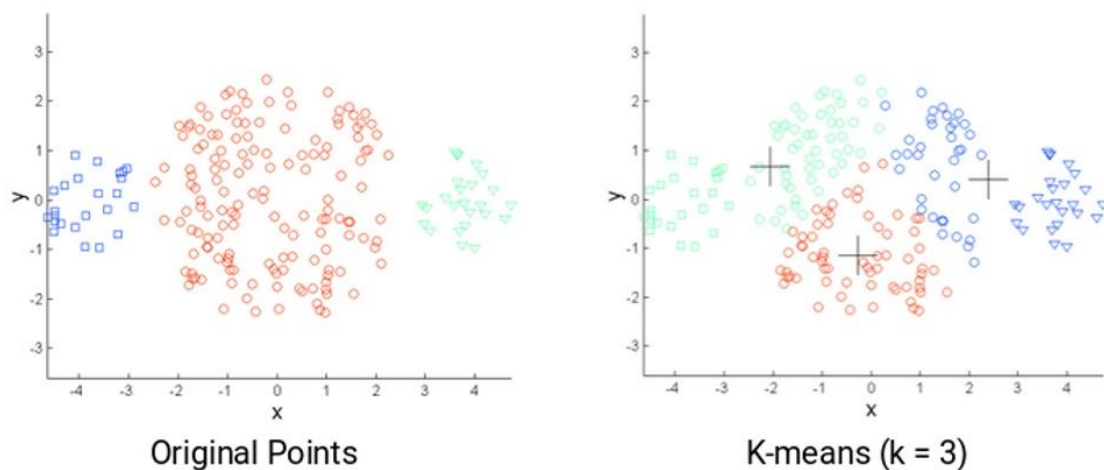
روش‌های متداول در طراحی شبکه‌های توزیع زمانی قابلیت استفاده در حل مسائل بهینه‌سازی را خواهند یافت اگر چنانکه در بستر یک محیط نرم‌افزاری پایه با کدنویسی مختص آن در سیستم‌های رایانه‌ای پیاده‌سازی شده و در قالب امکانات سیستم رایانه‌ای با حجم بزرگ محاسبات پاسخ‌گو باشند. در این بخش، با استفاده از تحلیل نقاط کاندید منتخب از نمونه مطالعاتی در قالب جدول ۶ به تحلیل ساختاری نوین مبتنی بر مقاوم‌سازی شبکه توزیع در طراحی بهینه خواهیم پرداخت (واحدهای طول و عرض جغرافیایی بر حسب کیلومتر است). در این مبحث ضمن ورود به عدم قطعیت در متغیرهای تصادفی با کدنویسی پایه در نرم‌افزار MATLAB، تحلیل خوشه‌بندی در قالب‌های مقایسه‌ای در بندهای ۱-۴ تا ۶-۴ به شکل مبسوط بحث شده و نتایج تحلیلی هر بخش به صورت جداگانه برای نتیجه‌گیری نهایی ارائه خواهند شد [۲۰-۱۸].

جدول ۶. نقاط کاندید منابع تغذیه و تولید پراکنده جهت تحلیل الگوریتم مقاوم

شماره شینه	طول جغرافیائی	عرض جغرافیائی	توان الکتریکی (کیلووات)	شماره شینه	طول جغرافیائی	عرض جغرافیائی	توان الکتریکی (کیلووات)
۱	۵۰۰	۶۰۰	۲۰۰	۱۷	۶۰۰	۸۰۰	۲۴۰
۲	۷۰۰	۵۰۰	۱۶۰	۱۸	۱۰۰۰	۸۵۰	۷۵۶
۳	۹۰۰	۵۵۰	۷۵۶	۱۹	۴۰۰	۵۰۰	۱۲۰
۴	۹۵۰	۱۰۵۰	۱۲۰	۲۰	۵۵۰	۳۰۰	۲۴۰
۵	۶۰۰	۱۰۰۰	۱۵۰	۲۱	۱۲۵۰	۹۰۰	۳۰۰
۶	۵۰۰	۴۰۰	۳۰۰	۲۲	۱۱۰۰	۱۰۵۰	۱۹۲
۷	۷۵۰	۶۵۰	۹۶۰	۲۳	۴۰۰	۷۰۰	۳۷۸
۸	۴۵۰	۷۵۰	۶۰	۲۴	۷۰۰	۳۰۰	۲۴۰
۹	۸۰۰	۱۰۰۰	۱۲۰	۲۵	۹۵۰	۶۵۰	۷۵۶
۱۰	۹۰۰	۸۰۰	۹۶۰	۲۶	۱۲۰۰	۸۰۰	۱۹۲
۱۱	۹۵۰	۴۵۰	۷۵۶	۲۷	۱۴۰۰	۶۰۰	۲۴۰
۱۲	۱۰۵۰	۷۰۰	۷۵۶	۲۸	۱۱۵۰	۵۰۰	۷۵۶
۱۳	۱۳۰۰	۶۰۰	۳۷۸	۲۹	۱۳۵۰	۴۰۰	۱۲۰
۱۴	۱۳۵۰	۸۰۰	۴۸۰	۳۰	۱۲۰۰	۲۵۰	۱۲۰
۱۵	۱۱۵۰	۸۵۰	۱۲۰	۳۱	۱۵۰۰	۳۰۰	۵۰
۱۶	۷۰۰	۹۰۰	۱۲۵	۳۲	۷۵۰	۴۵۰	۱۹۲

۴-۱- تحلیل خوشه‌بندی تصادفی مبتنی بر خوشه‌بندی براساس میانگین داده

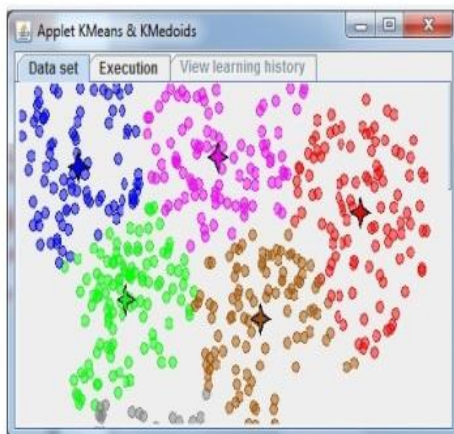
در روش خوشه‌بندی براساس میانگین داده نقاط بار براساس کم‌ترین میانگین فواصل بین نقاط بار تشکیل یک خوشه را داده و در هر خوشه بارهای متمرکز با حداقل فواصل با مرکزیت نقطه بار وسط تشکیل خوشه خواهند داد. این روش از بابت تمرکز بر روی متوسط بارهای نمونه و گرانیگاهی با عنایت به ویژگی‌های الگوریتم خاص می‌تواند روشی مناسب برای خوشه‌بندی باشد [۱۸]. شماتیک تخصیص سه خوشه از یک نمونه فضای مرکب از نقاط کاندید بار الکتریکی در قالب شکل ۷ نمایش داده شده است.



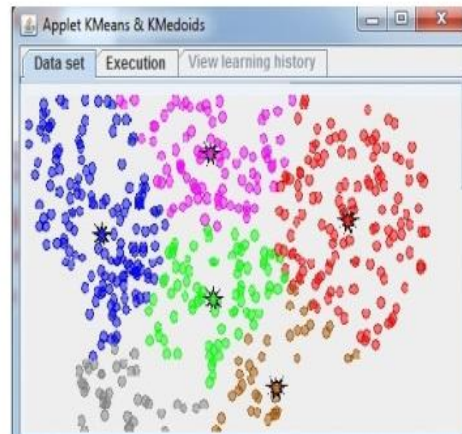
شکل ۷. شماتیک تخصیص سه خوشه از یک نمونه فضای نقاط کاندید بار الکتریکی

۴-۲- تحلیل خوشه‌بندی تصادفی مبتنی بر خوشه‌بندی براساس تراکم داده

الگوریتم خوشه‌بندی براساس تراکم داده^۱ الگوریتمی مبتنی بر شیء می باشد و نماینده خوشه‌ها را از میان خود داده‌ها و نه میانگین‌گیری از آنها انتخاب می‌کند. در واقع هسته یک خوشه، مرکزی‌ترین عنصر خوشه است. هدف این روش، کم کردن حساسیت^۲ نسبت به مقادیر بزرگ در مجموعه داده‌ها بوده و در این الگوریتم هر خوشه با یکی از داده‌های نزدیک به مرکز معرفی می‌شود. این روش از جنبه تقسیم‌بندی بخشی به خوشه‌های یکپارچه و ویژگی حداقل فاصله از بار مرکز مشابه روش خوشه‌بندی براساس میانگین داده بوده و تمایز آن در ویژگی لحاظ کردن فاصله خود نقطه بار نسبت به بارهای مجاور می‌باشد که باعث گرانش آن نقطه بار به سمت نقطه موردنظر می‌گردد. این روش نیز با توجه به ویژگی خاص خود می‌تواند در تحلیل الگوریتم کاربرد داشته باشد. شماتیک مقایسه‌ای خوشه‌بندی براساس میانگین داده و تراکم داده برای یک فضای نمونه‌ای از نقاط کاندید در شکل ۸ نشان داده شده است. مطابق شکل ۹ روش‌های دیگری نظیر DBSCAN، دسته‌ای، تضاد و مصنوعی در تحلیل خوشه‌بندی وجود دارند که در شاخه تقسیم‌بندی به جهت کاربردی بودن در زمینه مقاوم‌سازی دو زیرمجموعه برمبنای میانگین داده و تراکم داده جهت تحلیل در این تحقیق انتخاب شده است [۱۸ و ۱۹].



Cluster head of K-Means

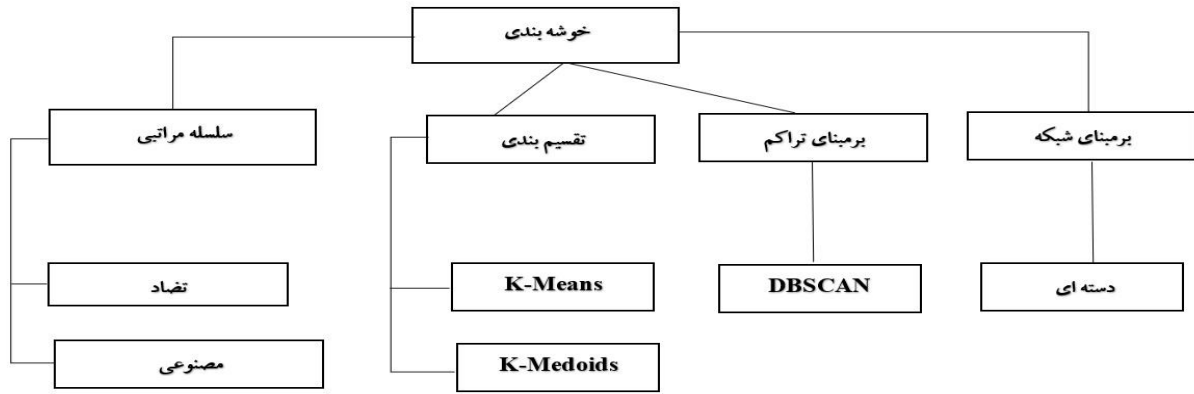


Cluster head of K-Medoids

شکل ۸. شماتیک مقایسه‌ای خوشه‌بندی براساس میانگین داده و تراکم داده

^۱ K-Medoids Method

^۲ Sensitivity



شکل ۹. نمودار انواع روش‌های موجود خوشه‌بندی در قالب الگوریتم‌های خاص

۴-۳- قیاس ویژگی‌های خوشه‌بندی میانگین داده و تراکم داده در خوشه‌های متعدد

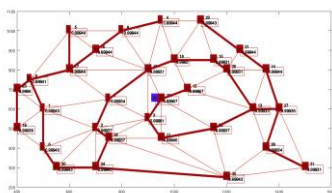
پس از انتخاب نقاط کاندید طبق جدول ۶، با اجرای بهینه‌سازی مقاوم^۱ در قالب خوشه‌بندی با روش خوشه بندی میانگین داده و تراکم داده بدون در نظر گیری تعداد خوشه‌های زیاد و به ازای یک خوشه؛ خروجی‌های گرافیکی مطابق شکل‌های اشکال ۱۰ تا ۱۵ در دو وضعیت (الف) و (ب) و به ترتیب نمایش گر خروجی هر کدام از روش‌های مذکور در تکرارهای ۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۱۰ می‌باشند. مقایسه متناظر هر یک از خروجی‌ها در شکل‌های ذیل به ظاهر تفاوت چندانی را در روش خوشه‌بندی نشان نمی‌دهد ولیکن در اجرای دستورات کدنویسی MATLAB در الگوی نمونه نقاط کاندید انتخابی، زمان اجرای دستور و همچنین دقت شناسایی نقاط کاندید تفاوت‌هایی به قرار ذیل مشاهده می‌گردد که در تحلیل حجم بالاتر از نقاط کاندید سبب تسهیل و یا بروز مشکلاتی خواهد بود. این مباحث در ورود به بهینه‌سازی شبکه‌های توزیع بسیار بزرگ و پیچیده بحث و بررسی فراوانی را می‌طلبد [۲۸-۲۲].

اولین نکته در خصوص دو مدل خوشه‌بندی مورد نظر مسئله گرانش مدل به نقاط بار مرکزی است که در روش خوشه‌بندی براساس میانگین داده برحسب میانگین فواصل نقاط کاندید و گرانش نقطه مرکزی به عنوان نقطه گرانیگاه بوده ولی در روش خوشه-بندی براساس تراکم داده، نقطه مرکزی یکی از نقاط کاندید می‌باشد که سایر نقاط نسبت به آن سنجیده می‌شوند. از نظر حساسیت نسبت به نقاط کاندید با وزن بزرگ را حساسیت نداشته و مانند سایر نقاط کاندید اعمال می‌گردد. این ویژگی در وضعیت (ب) از گراف‌های شکل‌های فوق مشخص بوده و این خاصیت به عنوان یک نقطه ضعف اساسی در بهینه‌سازی مقاوم نقاط کاندید است. به این دلیل که هر بار با وزن بالاتر می‌تواند به عنوان یک تهدید مهم در محاسبات بهینه مقاوم تلقی شده و این اغماض‌ها سبب اختلال فاحشی در نتایج حاصله از مقاوم‌سازی خواهند بود.

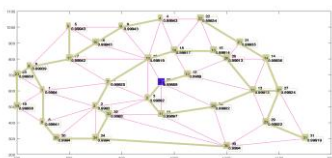
دومین نکته حائز اهمیت در خصوص سرعت انجام محاسبات دستورات کدنویسی است که در روش خوشه‌بندی براساس تراکم داده نسبت به خوشه‌بندی براساس میانگین داده دارای سرعت مطلوب‌تری بوده و این موضوع در اجرای دستورات یک شبکه واقعی با حجم سنگین اطلاعاتی یک مزیت مطلوب است [۲۸-۲۶].

در مورد مبحث بازآرایی شبکه توزیع در بهینه‌سازی شبکه با نقاط کاندید مورد نظر این نکته لازم به ذکر است که در هر یک از حالات تکرار توان اکتیو هر نقطه کاندید مقدار متفاوتی خواهند بود ولیکن مجموع عددی توانهای تمام نقاط مقدار ثابتی است که همان مقدار توان اکتیو مصرفی شبکه را شامل می‌شود [۲۳-۲۱].

¹ Robust Optimization

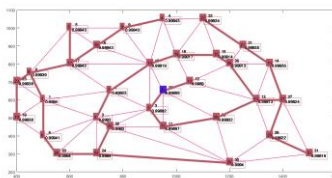


(الف)

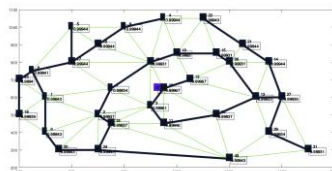


(ب)

شکل ۱۰. خروجی مقایسه‌ای تکرار اول

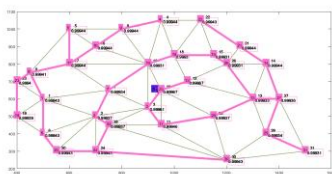


(الف)

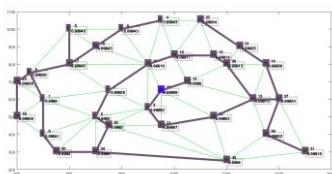


(ب)

شکل ۱۱. خروجی مقایسه‌ای تکرار دوم

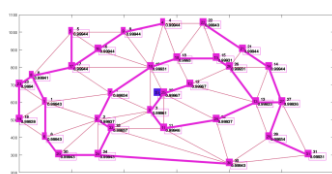


(الف)

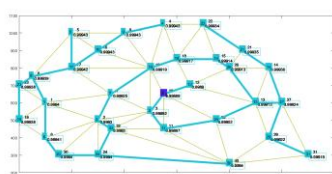


(ب)

شکل ۱۲. خروجی مقایسه‌ای تکرار سوم

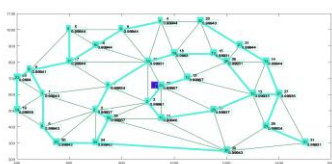


(الف)

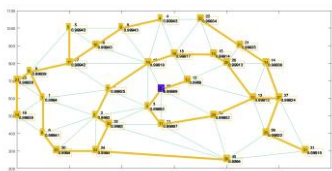


(ب)

شکل ۱۳. خروجی مقایسه‌ای تکرار چهارم

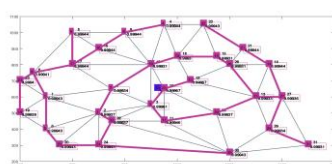


(الف)

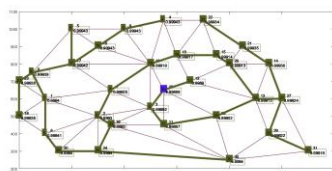


(ب)

شکل ۱۴. خروجی مقایسه‌ای تکرار پنجم



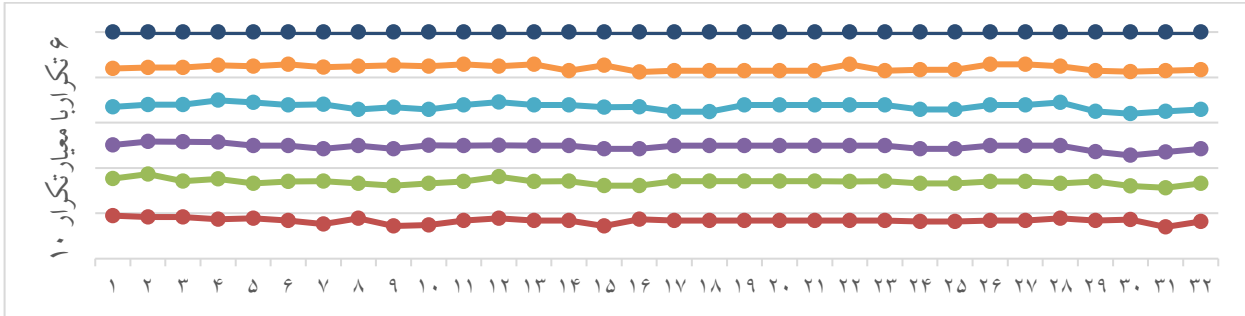
(الف)



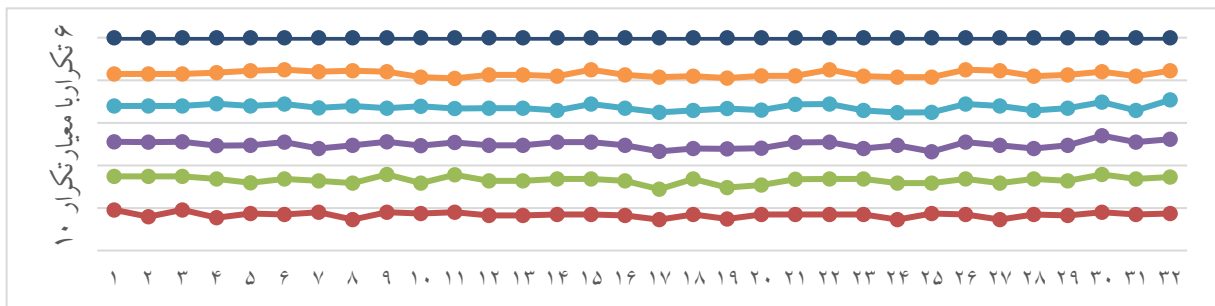
(ب)

شکل ۱۵. خروجی مقایسه‌ای تکرار دهم

جهت نمایش تغییرات نسبی توان اکتیو نقاط کاندید در تکرارهای صورت پذیرفته برابر شکل‌های ۱۶ و ۱۷ به ترتیب در خصوص الگوی خوشه‌بندی براساس میانگین داده و تراکم داده مقادیر ذریبط به صورت متناظر براساس معیار تکرار ۱۰ ام مقایسه شده است. از بررسی متناظر و نقطه به نقطه شکل‌های مذکور نکات مهمی در خصوص تایید خواص و ویژگی‌های دو الگوی خوشه‌بندی براساس میانگین داده و تراکم داده بدست می‌آید که مویده دو مشخصه مذکور شامل سرعت و زمان محاسبات؛ حساسیت نقاط کاندید نسبت به نقاط کاندید وزن دار خواهد بود.



شکل ۱۶. مقایسه تغییرات نسبی توان اکتیو در تکرارهای تک خوشه با معیار تکرار ۱۰ ام (روش میانگین داده)



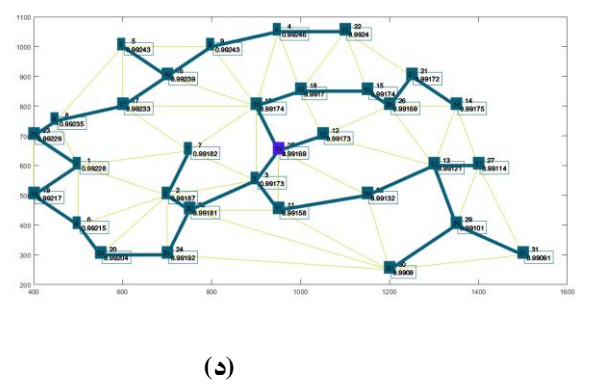
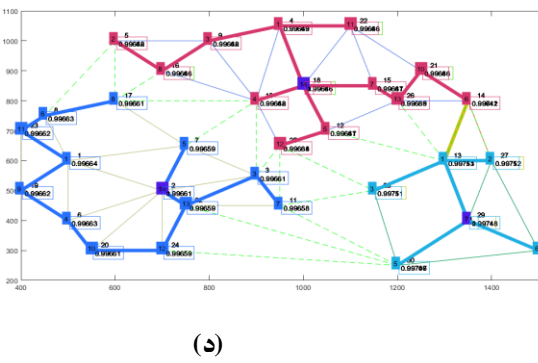
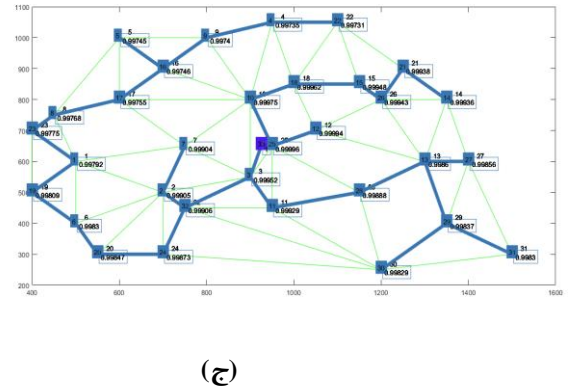
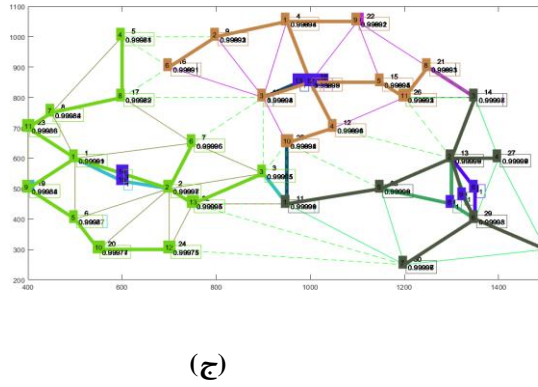
شکل ۱۷. مقایسه تغییرات نسبی توان اکتیو در تکرارهای تک خوشه با معیار تکرار ۱۰ ام (روش تراکم داده)

۴-۴- خوشه‌بندی تصادفی تکرار اول چند خوشه‌ای مبتنی بر خوشه‌بندی براساس میانگین داده و تراکم داده

در شرایط مشابه با فضای نمونه‌ای مذکور در بند ۳-۴ و با در نظر گیری تعداد خوشه‌های بیشتر به ازای تکرار اول؛ خروجی‌های گرافیکی مطابق شکل‌های ۱۸ تا ۲۳ در دو وضعیت (ج) و (د) خواهد بود که به ترتیب نمایش‌گر خروجی هر کدام از روش‌های مذکور در تعداد ۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۱۰ خوشه می‌باشد.

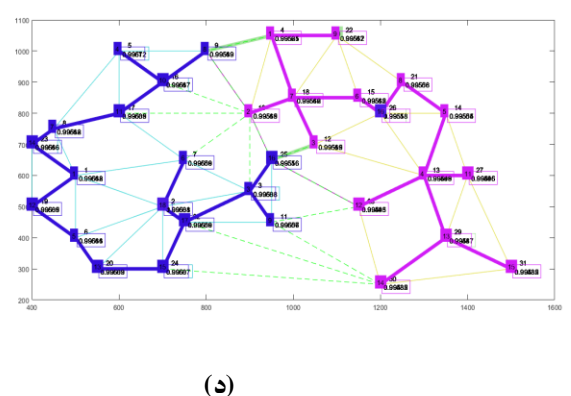
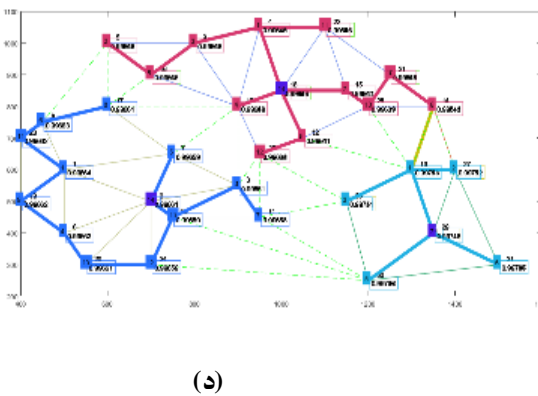
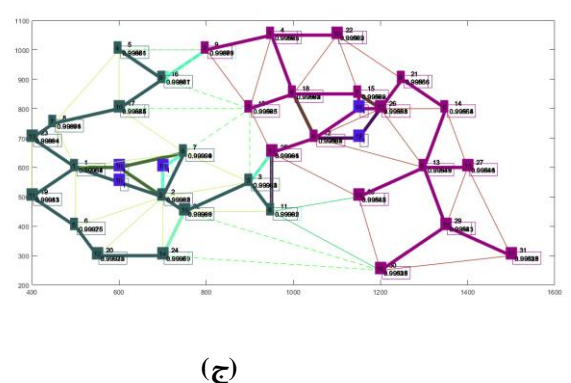
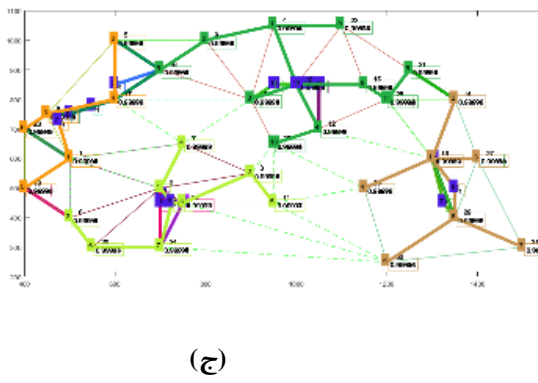
توجه به این نکته اساسی که تعداد خوشه‌ها به عنوان پارامتر اصلی در تحلیل بهینه‌سازی مقاوم شبکه‌های توزیع بوده و در قالب نقاط کاندید وزن دار توده‌ای در شبکه‌های بسیار بزرگ و پیچیده توزیع نقش بسیار مهمی دارد، از نتایج مراجع [۲۷-۲۵] به این نکته می‌توان رسید که بررسی دقیق تعدد خوشه چه تاثیری را در روند تحلیل بهینه‌سازی مقاوم شبکه توزیع در بخش کدنویسی و همچنین سایر پارامترهای نرم‌افزاری نظیر سرعت اجرای دستورات محیط نرم‌افزاری باز آرائی شبکه خواهد داشت.

مقایسه متناظر هر یک از خروجی‌ها، تفاوت فاحشی را در روش خوشه‌بندی نشان می‌دهد، و در اجرای دستورات کدنویسی MATLAB در الگوی نمونه نقاط کاندید انتخابی زمان اجرای دستور و همچنین دقت شناسایی نقاط کاندید تفاوت‌های فراوانی را سبب شده است که در حجم بالاتر از نقاط کاندید و در ورود به مبحث بهینه‌سازی شبکه‌های توزیع بسیار بزرگ و پیچیده در صورتی- که تعداد خوشه‌ها بیشتر شود تغذیه جزیره‌ای را سبب خواهد شد و میزان هزینه سرمایه گذاری به شدت بالا می‌رود.



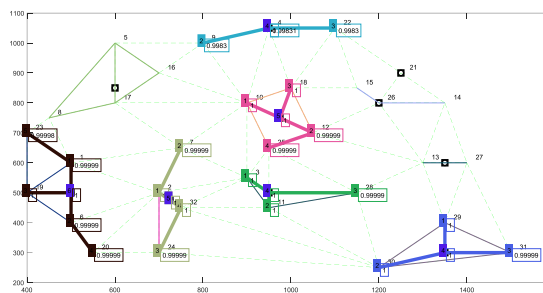
شکل ۲۰. خروجی مقایسه‌ای سه خوشه‌ای

شکل ۱۸. خروجی مقایسه‌ای یک خوشه‌ای

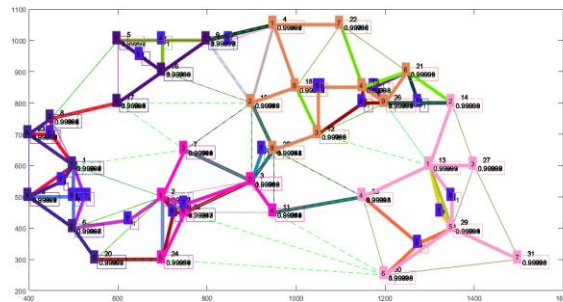


شکل ۲۱. خروجی مقایسه‌ای چهار خوشه‌ای

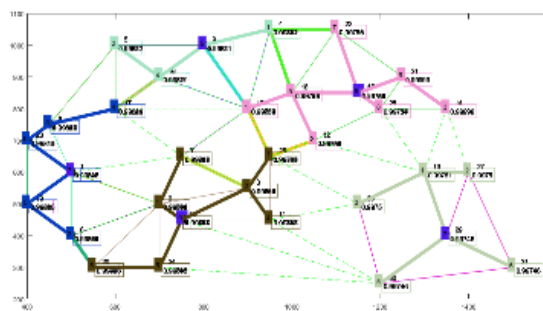
شکل ۱۹. خروجی مقایسه‌ای دو خوشه‌ای



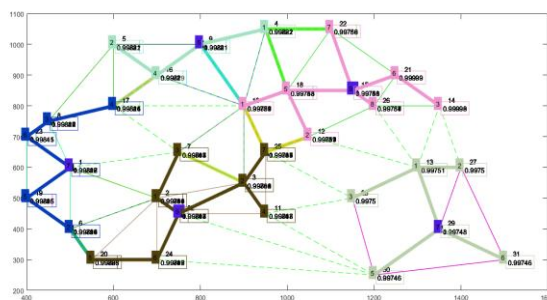
(ج)



(ج)



(د)



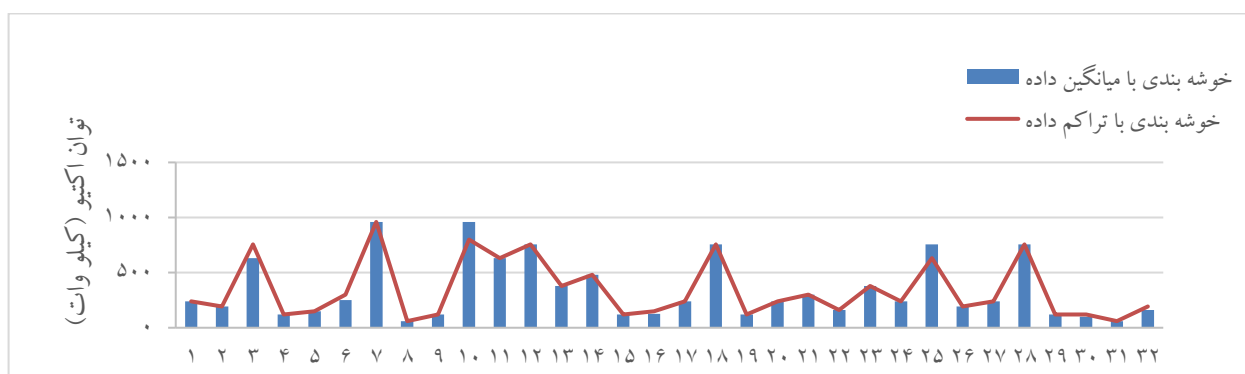
(د)

شکل ۲۳. خروجی مقایسه‌ای ده خوشه‌ای

شکل ۲۲. خروجی مقایسه‌ای پنج خوشه‌ای

۴-۴-۱- خوشه‌بندی تصادفی تکرار اول تک خوشه‌ای مبتنی بر خوشه‌بندی براساس میانگین داده و تراکم داده

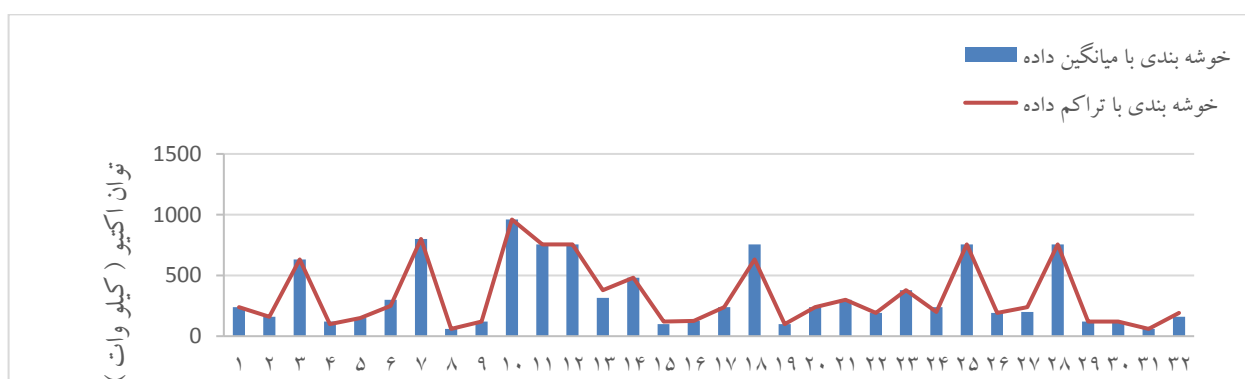
بررسی خروجی‌های نرم افزار MATLAB در تحلیل خوشه‌بندی تک خوشه‌ای برای تکرار اول دو روش موردنظر، برابر شکل ۲۴ روند تغییرات توان اکتیو نقاط کاندید نمایش داده است. با کنترل نقطه به نقطه منحنی‌های مقایسه‌ای شکل‌های ۱۶ و ۱۷ برای تکرار اول تک خوشه‌ای نتایج مشابه با این حالت را نشان داده و کنترل حساسیت وزنی نقاط کاندید و سرعت عملیات نرم‌افزاری به همان شکل می‌باشد.



شکل ۲۴. مقایسه تغییرات توان اکتیو نقاط کاندید در تکرار اول حالت تک خوشه‌ای

۴-۴-۲- خوشه‌بندی تصادفی تکرار اول دو خوشه‌ای مبتنی بر خوشه‌بندی براساس میانگین داده و تراکم داده

بررسی خروجی‌های نرم افزار MATLAB در تحلیل خوشه‌بندی دو خوشه‌ای برای تکرار اول دو روش موردنظر، برابر شکل ۲۵ روند تغییرات توان اکتیو نقاط کاندید را نمایش داده است. با کنترل نقطه به نقطه منحنی‌های مقایسه‌ای شکل‌های ۲۴ و ۲۵ برای تکرار اول تک خوشه‌ای و دو خوشه‌ای تشابه و هماهنگی تغییرات موزون این دو حالت، با کشش منحنی تغییرات به جهت کاهش سطح حداکثری توان قابل مشاهده است.

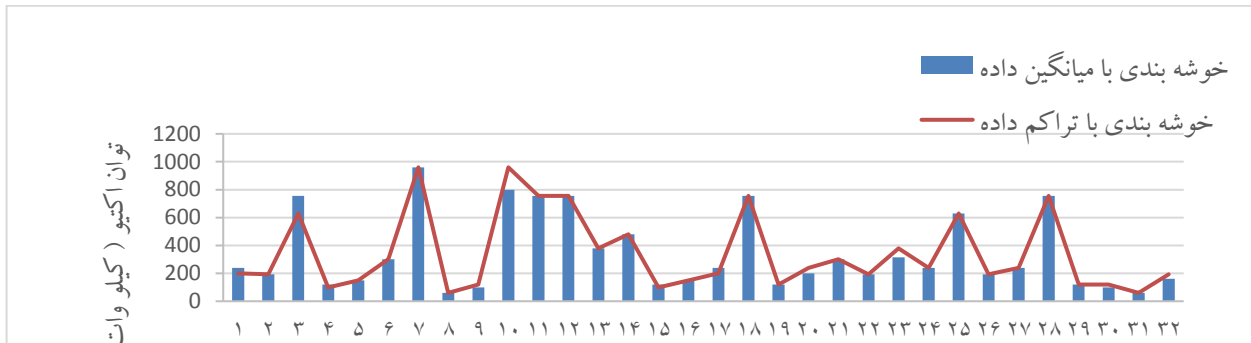


شکل ۲۵. مقایسه تغییرات توان اکتیو نقاط کاندید در تکرار اول حالت دو خوشه‌ای

۴-۴-۳- خوشه‌بندی تصادفی تکرار اول سه خوشه‌ای مبتنی بر خوشه‌بندی براساس میانگین داده و تراکم داده

بررسی خروجی‌های نرم افزار MATLAB در تحلیل خوشه‌بندی سه خوشه‌ای در تکرار اول در دو روش موردنظر برابر شکل ۲۶ روند تغییرات توان اکتیو نقاط کاندید را نمایش داده است. با کنترل نقطه به نقطه منحنی‌های مقایسه‌ای شکل‌های ۲۴ تا ۲۶ برای

تکرار اول تک خوشه‌ای تا سه خوشه‌ای، تشابه و هماهنگی این حالات تکرار شده و کشش کاهشی تغییرات سطح توان قابل تشخیص است.

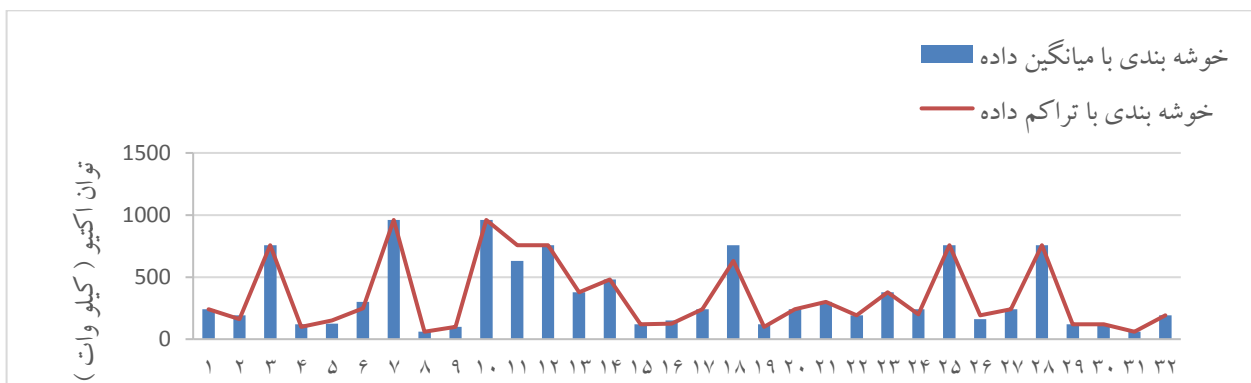


شکل ۲۶. مقایسه تغییرات توان اکتیو نقاط کاندید در تکرار اول حالت سه خوشه ای

۴-۴-۴- خوشه‌بندی تصادفی تکرار اول چهار خوشه‌ای مبتنی بر خوشه‌بندی براساس میانگین داده و تراکم داده

بررسی خروجی‌های نرم افزار MATLAB در تحلیل خوشه‌بندی چهار خوشه ای در تکرار اول در دو روش موردنظر برابر

شکل ۲۷ روند تغییرات توان اکتیو نقاط کاندید را نمایش داده است. با کنترل نقطه به نقطه منحنی‌های مقایسه‌ای شکل‌های ۲۴ تا ۲۷ برای تکرار اول تک خوشه‌ای تا چهار خوشه‌ای، تشابه و هماهنگی این حالات با قالبی دیگر تکرار شده است.

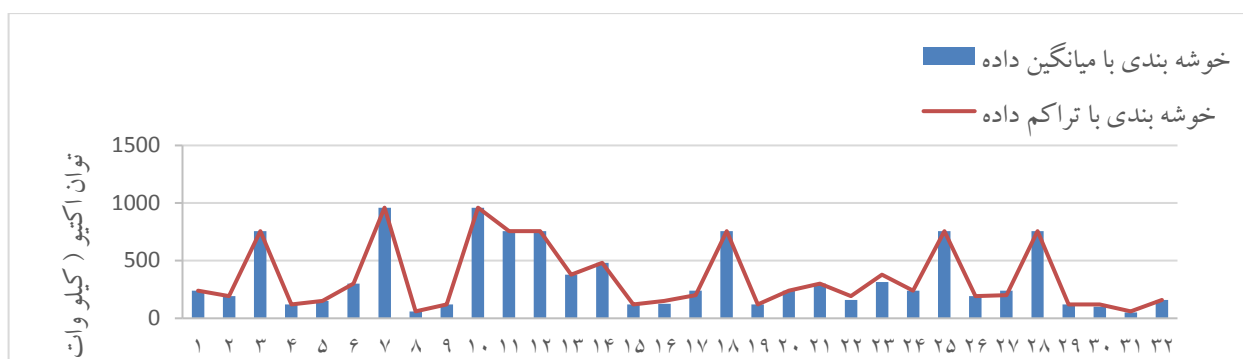


شکل ۲۷. مقایسه تغییرات توان اکتیو نقاط کاندید در تکرار اول حالت چهار خوشه ای

۴-۴-۵- خوشه‌بندی تصادفی تکرار اول پنج خوشه‌ای مبتنی بر خوشه‌بندی براساس میانگین داده و تراکم داده

بررسی خروجی‌های نرم افزار MATLAB در تحلیل خوشه‌بندی پنج خوشه ای در تکرار اول در دو روش موردنظر برابر

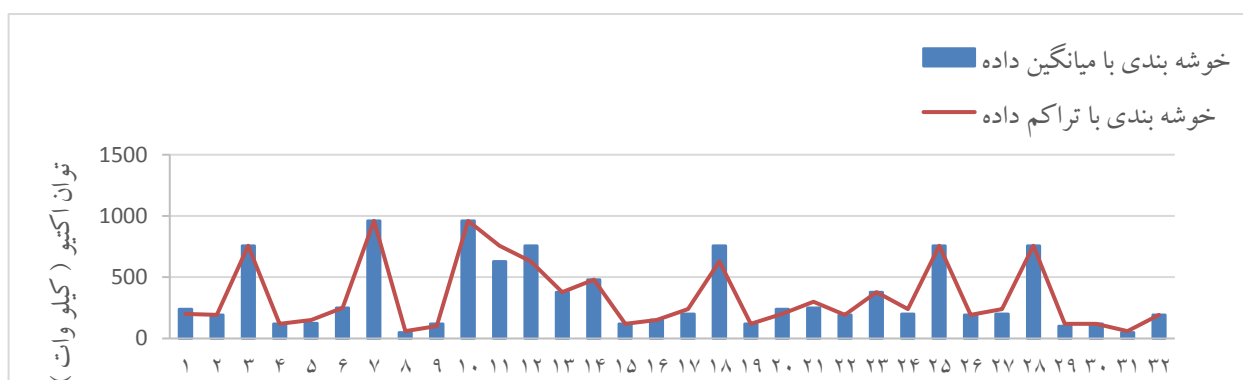
شکل ۲۸ روند تغییرات توان اکتیو نقاط کاندید را نمایش داده است. با کنترل نقطه به نقطه منحنی‌های مقایسه‌ای شکل‌های ۲۴ تا ۲۸ برای تکرار اول تک خوشه‌ای تا پنج خوشه‌ای، تشابه و هماهنگی این حالات نیز باروندی کندتر تکرار شده است.



شکل ۲۸. مقایسه تغییرات توان اکتیو نقاط کاندید در تکرار اول حالت پنج خوشه ای

۴-۶- خوشه‌بندی تصادفی تکرار اول ده خوشه‌ای مبتنی بر خوشه‌بندی براساس میانگین داده و تراکم داده

بررسی خروجی‌های نرم افزار MATLAB در تحلیل خوشه‌بندی ده خوشه ای در تکرار اول در دو روش موردنظر برابر شکل ۲۹ روند تغییرات توان اکتیو نقاط کاندید را نمایش داده است. با کنترل نقطه به نقطه منحنی‌های مقایسه‌ای شکل‌های ۲۴ تا ۲۹ برای تکرار اول تک خوشه‌ای تا ده خوشه‌ای تشابه و هماهنگی این حالات، با روندی همسان با تعداد خوشه‌های کمتر با شکل متراکم-تر کاهش سطح توان تکرار شده است.



شکل ۲۹. مقایسه تغییرات توان اکتیو نقاط کاندید در تکرار اول حالت ده خوشه ای

مشابه تحلیل بند ۳-۴؛ بازآرایی شبکه توزیع در بهینه‌سازی شبکه با نقاط کاندید مورد نظر نشانگر این واقعیت است که در هر یک از حالات تکرار اول چند خوشه‌ای، مقادیر توان اکتیو هر نقطه کاندید مقدار متفاوتی را دارد ولیکن مجموع عددی توان‌های تمام نقاط مقدار ثابتی است که همان مقدار توان اکتیو مصرفی شبکه را شامل می‌شود. نمایش تغییرات نسبی توان اکتیو نقاط کاندید در خوشه‌های متعدد تکرار اول برابر شکل‌های ۲۴ تا ۲۹ به ترتیب در خصوص الگوی خوشه‌بندی براساس میانگین داده و تراکم داده مقادیر ذیربط بصورت متناظر براساس معیار تکرار اول در خوشه‌ها مقایسه شده است. از بررسی متناظر و نقطه به نقطه این شکل‌ها نکات مهمی در خصوص تایید خواص و ویژگی‌های دو الگوی خوشه‌بندی براساس میانگین داده و تراکم داده بدست آمده که ضمن تاکید بر دو مشخصه سرعت و زمان محاسبات؛ حساسیت نقاط کاندید نسبت به نقاط کاندید وزن‌دار به عنوان یک نکته دیگر مطرح شده است.

نکته سوم در بررسی روش‌های خوشه‌بندی با خوشه‌های متعدد به این مفهوم اشاره دارد که هرچقدر تعداد خوشه بیشتر شود به همان میزان فشردگی سطح توان اکتیو نقاط کاندید بیشتر و در نتیجه نیاز به تامین بار متمرکز در نقاط گرانگه‌ها شدیدتر

می‌گردد. این مفهوم موید جزیره‌ای شدن تغذیه خوشه‌ها در زمان کثرت بیشتر تعداد خوشه است که در عمل همان موضوع مقاوم‌سازی بازآرایی شبکه توزیع در حضور منابع تولید پراکنده متعدد را شامل می‌شود که بیان فنی و مستدلی بر مبنای ریز شبکه‌ها در شبکه توزیع گسترده و پیچیده خواهد بود. نتیجه مذکور در کنار دو نکته حساسیت به وزن نقاط کاندید و زمان محاسبات با در نظر گیری شکل خوشه در دو روش؛ تاثیر فراوانی را در طراحی شبکه و هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه و زیرساخت‌های پیاده‌سازی شبکه توزیع سبب خواهد شد [۲۷-۲۱]. پیشرفت روزافزون فن آوری و ظهور مستمر انواع مختلف نرم افزارهای کدنویسی با سطوح دسترسی متنوع سبب ایجاد بستر مناسب به تحلیل‌های دقیق و کامل شده ولی وجه تمایز این محیط‌های نرم افزاری در نظر گیری امکانات اجرای نرم افزار شامل حساسیت وزنی نقاط کاندید در روند تحلیل محیط نرم‌افزاری و نیز سرعت اجرای برنامه در محیطی با توده انبوه محاسبات پیچیده و زمان بر می‌باشد [۲۸-۲۱].

۴-۵- خوشه‌بندی وزن دار و تاثیر آن در بهینه‌سازی مقاوم شبکه توزیع

روش‌های مختلف و نوین خوشه‌بندی در تحلیل شبکه‌های توزیع، با مفهوم خوشه‌بندی وزن دار^۱ و وزن نقاط کاندید در فضای نمونه‌ای انتخاب شده دارای ارتباط ویژه‌ای است؛ که در تحلیل بهینه‌سازی مقاوم شبکه توزیع به عنوان یک فاکتور اصلی منظور خواهد شد.

از آنجاکه بهینه‌سازی با روش‌های مختلف صورت پذیرفته و هر روش نیز نقاط قوت و ضعف خاص خود را دارد، ولی در روش الگوریتم مقاوم یکی از ویژگی‌های موکد مربوط به سازگاری با متغیر سخت^۲ و همچنین در نظر گیری نکات حائز اهمیت در سخت بودن متغیر انتخابی مثل وزن خود نقطه کاندید است.

مدل‌سازی الگوریتم مقاوم با توجه به ویژگی‌های ذاتی خود دارای قابلیت اعمال ضرائب وزنی هر متغیر در مسیر الگوریتم بهینه‌سازی است که از طریق نرم‌افزارهای واسط و سازگار با نرم‌افزار پایه MATLAB این امکان را فراهم می‌نماید. کدنویسی مبتنی بر نرم افزار MATLAB از طریق نرم‌افزارهای واسط مختلفی نظیر YALMIP، ROME و غیره، قابلیت ارتباط با الگوریتم مقاوم‌سازی را ممکن می‌کند و بدین طریق می‌توان به بررسی جامع در نظر گیری پارامترهای دخیل در الگوریتم مقاوم پرداخت. در این تحقیق نرم‌افزار YALMIP انتخاب شده است.

۴-۶- الگوریتم مطلوب جهت بهینه‌سازی مقاوم شبکه توزیع

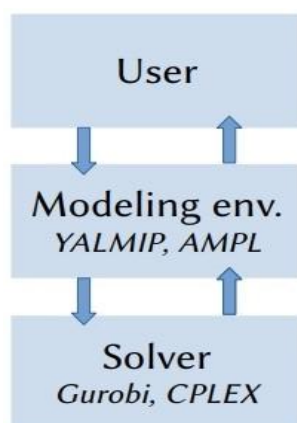
الگوریتم مقاوم روشی مقاوم در مقابل عوامل عدم قطعیت موجود را در بهینه‌سازی شبکه‌های توزیع برق فراهم می‌نماید و به عنوان یکی از جدیدترین الگوریتم‌های منتخب در تحقیقات می‌باشد. بررسی دو الگوی بحث شده در قالب الگوریتم مقاوم در زمینه دو فاکتور وزن نقاط کاندید و همچنین زمان انجام محاسبات با در نظر گیری سهولت تمرکز بار در نقاط کاندید و اهمیت دقت در قبال سرعت عملیات الگوریتم مقاوم؛ روش الگوی خوشه بندی براساس میانگین داده را بعنوان راهکار مناسب منتخب در تحلیل بهینه‌سازی مقاوم شبکه توزیع تعیین می‌نماید [۲۸ و ۲۷].

¹ Hard Variable

² Weight Clustering

۴-۷- قابلیت‌های نرم افزار واسط YALMIP

در حل هر مسئله، فرآیند مدل‌سازی با هسته مرکزی محاسبات بعنوان اصلی‌ترین قسمت فرآیند حل مسئله بوده و نقش نرم‌افزار واسط در این بخش مانند بخش محاسبات مرکزی است. نرم‌افزار YALMIP به‌عنوان نرم‌افزار واسط در محیط نرم‌افزاری MATLAB برای حل بخش محاسباتی الگوریتم مقاوم مورد استفاده قرار خواهد گرفت؛ شکل ۳۰ ارتباط دوسویه نرم‌افزار واسط YALMIP در بخش کاربر و حل‌کننده را نشان داده است. نرم‌افزار واسط YALMIP در محیط نرم‌افزاری MATLAB قابل اجراء می‌باشد و با نصب^۱ و مسیره‌دهی^۲ مناسب آن در محیط کار نرم‌افزاری MATLAB می‌توان از قابلیت‌های بالای آن بهره‌برد. با نصب و اجرای^۳ نرم‌افزار می‌توان در بخش‌های مختلف آن به فرمولبندی^۴ مدنظر که در لایه^۵ yalmip/modules/robust قابل حصول است دست یافت و با ادغام در کدنویسی اصلی، الگوریتم مقاوم را در پخش بار بهینه اعمال نمود. از جمله لایه‌های مهم این نرم‌افزار واسط می‌توان به SDPVAR^۶ اشاره داشت که برنامه‌ریزی نیمه‌محدود متغیرهای تصمیم را در حل مسئله بهینه‌سازی مقاوم شامل بوده و موثر در تمام لایه‌ها است.



شکل ۳۰. شماتیک ارتباط دوسویه در نرم‌افزار واسط YALMIP با کاربر و حل‌کننده مسئله بهینه‌سازی مقاوم

۵- نتیجه‌گیری

خوشه‌بندی تصادفی به این مفهوم است که در پخش بار یک شبکه نمونه جواب‌های یکسانی برای حل مسئله بهینه‌سازی شبکه حاصل آید. با این تفاوت که نقاط کاندید شبکه مورد نظر حسب شرایط مربوطه توان متناسب و در محدوده جواب خود را داشته و تغییری ذاتی در شبکه حادث نشده باشد. هرکدام از حالات خوشه‌های تصادفی در تکرار مربوطه در واقع یک پاسخ بهینه مقاوم برای تحلیل شبکه موردنظر بوده و در بیان کلی‌تر به مفاهیم الگوریتم مقاوم به‌عنوان روش بهینه‌سازی مقاوم شبکه منجر خواهد شد. در این

¹ Installation

² Formulation

³ Running

⁴ Path Finding

⁵ Layer

⁶ SDPVAR: Semi-Definite-Programming-Variable

مقاله با توجه به سه ویژگی حساسیت به نقاط کاندید وزن‌دار، سرعت مطلوب داده‌پردازی نسبت به سایر روش‌های موجود و جزیره‌ای شدن تغذیه خوشه‌ها در زمان کثرت بیشتر نعداد خوشه، روش خوشه‌بندی براساس میانگین داده به‌عنوان روش منتخب برای تحلیل بهینه‌سازی مقاوم شبکه توزیع در قالب الگوریتم مقاوم انتخاب شده است. خوشه‌بندی تصادفی با روش خوشه‌بندی براساس میانگین داده سرفصل مبنای ورود به الگوریتم مقاوم با استفاده از نرم‌افزار واسط YALMIP بوده و با در نظرگیری نقاط کاندید وزن‌دار امکان بهینه‌سازی مقاوم شبکه توزیع واقعی در حضور منابع تولید پراکنده را فراهم می‌نماید. از لایه‌های مهم این نرم‌افزار واسط که برنامه‌ریزی نیمه‌محدود متغیرهای تصمیم را در حل مسئله بهینه‌سازی مقاوم شامل می‌شود در تمام لایه‌ها موثر بوده و در تحلیل شرایط مقاوم‌سازی استفاده می‌شود.

در منابع [۱۲ و ۱۳] روش‌های جدیدی برای استفاده از الگوریتم‌های پیشنهادی در بهینه‌سازی شبکه توزیع شعاعی با حضور منابع تولید پراکنده استفاده شده است. ولی روش جامعی که برای بهینه‌سازی ساختار محور در زمینه ایجاد بستر نرم‌افزاری موثر در شبکه‌های پیچیده و بزرگ توزیع مناسب باشد ارائه نشده است. در این تحقیق با استخراج نتایج عددی دو خوشه‌بندی در شرایط واقعی شبکه نمونه، به نقطه قوت سرعت بالای تحلیل نقاط کاندید وزن‌دار با حداکثر حساسیت به وزن نقاط کاندید اشاره شده است.

بررسی الگوریتم مقاوم در زمینه روش‌های مختلف پیشنهادی چند مرحله‌ای موضوعی است که در تحقیقات امروزی صورت پذیرفته و در منابع [۱۹ و ۱۸] به خوبی به آن پرداخته شده است. موضوعی که تحقیق حاضر به‌عنوان یک دیدگاه ویژه و با اهمیت به آن اشاره دارد، انتخاب روش منتخب سازگار با اشاره به نقاط قوت مرتبط با چارچوب منطقی الگوریتم مقاوم در خوشه‌بندی مبنایی برای ورود به مباحث و مفاهیم محاسباتی تابع هدف در بهینه‌سازی مقاوم شبکه توزیع بوده است و خوشه‌بندی مبتنی بر میانگین داده از میان دو روش بررسی شده از روش‌های گوناگون خوشه‌بندی ارائه شده است.

در مبحث تحلیل خوشه‌بندی براساس میانگین داده نکته‌ای که اهمیت خاصی را در استفاده از آن روش در الگوریتم‌های منتخب تحقیق دارد، ترکیب ویژگی‌های ذاتی آن با امتیازهای الگوریتم منتخب است. در منابع [۲۸-۲۶] ضمن پرداخت به این ویژگی بررسی موردی در زمینه مطالعاتی تحقیق انجام یافته و نقاط قوت و ضعف هر یک اشاره شده است؛ در این تحقیق از نتایج حاصل با استفاده از نرم‌افزار واسط YALMIP برای ارتباط نرم‌افزاری الگوریتم مقاوم در بهینه‌سازی مقاوم شبکه توزیع واقعی در حضور منابع تولید پراکنده استفاده شده که نگرش جامع و کلی به ارائه مدلی مبتنی بر اعمال عدم قطعیت نه در یک بخش خاص بلکه در کل ساختار شبکه ویژگی آن می‌باشد.

مراجع

- [1] S.K. Injeti, V.K. Thunuguntla, "Optimal integration of DGs into radial distribution network in the presence of plug-in electric vehicles to minimize daily active power losses and to improve the voltage profile of the system using bio inspired optimization algorithms," Protection and Control of Modern Power Systems, Springer open, 2020.
- [2] Y.Cao, Y.Li, G.Zhang, K.Jermsttiparsert, N.Razmjoo, "Experimental modeling of PEM fuel cells using a new improved seagull optimization algorithm", Elsevier Ltd, Energy Reports Volume 5, Pages 1616-1625, November 2019.

- [3] H. Falaghi, M.R. Haghifam, "Distributed generation impacts on electric distribution systems reliability: sensitivity analysis," Proceedings of EUROCON 2005 Conference Serbia & Montenegro, Belgrade, Nov. 2005.
- [4] S. Najafi Ravadanegh, R. Gholizadeh Roshanagh, "A heuristic algorithm for optimal multistage sizing, siting and timing of MV distribution substations", Electric Power Systems Research, Volume 105, Pages 134-141, December 2013.
- [5] M.R. Haghifam, M. Shahabi, "Optimal location and sizing of HV/MV substations in uncertainty load environment using genetic algorithm", Electric Power Systems Research, Volume 63, Pages 37-50 Issue 1, August 2002.
- [6] A. Abiri-Jahromi, M. Fotuhi-Firuzabad, M. Parvania, M. Musleh, "Optimized Sectionalizing Switch Placement Strategy in Distribution Systems", Power Delivery, IEEE Transactions on, Volume: 27, Issue: 1, Page(s): 362 – 370, 2012.
- [7] A. Moradi, M., Fotuhi-Firuzabad, "Optimal Switch Placement in Distribution Systems Using Trinary Particle Swarm Optimization Algorithm", Power Delivery, IEEE Transactions on, Volume: 23, Issue: 1, Page(s): 271 – 279, 2008.
- [8] K. W. Hedman, Project Leader, A. S. Korad, PhD Student "The application of Robust optimization in power systems", Arizona State University, 2014.
- [9] D. A. Das, "no iterative load flow algorithm for radial distribution networks using fuzzy set approach and interval arithmetic". Electric Power Components and Systems, 33(1), 59-72, 2005.
- [10] S. Najafi, S.H. Hosseinian, M. Abedi, A. Vahidnia, S. Abachizadeh, "A framework for optimal planning in large distribution networks." IEEE Trans Power Syst., 24(3):1019-28, 2009.
- [11] T. Gönen, "Electr power distribution systems engineering." McGraw-Hill: New York; 1986.
- [12] H. Falaghi, C. Singh, MR. Haghifam, M. Ramazani, "DG integrated multistage distribution system expansion planning." Int J Electric Power Energy Syst., 33: 1489-97, 2011.
- [13] J. A. Martínez, F. H. Martínez, "Optimization of maintenance management of trees in power distribution systems." Tecnura vol.17 no.35 Bogotá Jan./Mar. 2013, Print version ISSN 0123-921X.
- [14] M.S. Nazar, M.R. Haghifam, "Multi objective electric distribution system expansion planning using hybrid energy hub concept." Electr Power Syst Res., 79: 899-911, 2009.
- [15] A. Soroudi, M. Ehsan, "A distribution network expansion planning model considering distributed generation options and techno-economical issues.", Energy., 35: 3364-74, 2010.
- [16] M. Esmi Jahromi, M. Ehsan, A. Fattahi Meyabadi, "A dynamic fuzzy interactive approach for DG expansion planning.", Int J Electr Power Energy Syst., 43:1094-105, 2012.
- [17] R. G. Roshaneagh, S. N. Ravadanegh, and S. H. Hosseinian, "A Framework for Optimal Coordinated Primary-Secondary Planning of Distribution Systems Considering MV Distributed Generation.", IEEE Trans, 2016.
- [18] C. xin, Q. letu, y. bai, "Robust Optimization for the Hazardous Materials Transportation Network Design Problem", International Conference on Combinatorial Optimization and Applications, pp 373-386, COCOA 2013.
- [19] L. R. Matthews, C. E. Gounaris, I. G. Kevrekidisa, "Designing networks with resiliency to edge failures using two-stage robust optimization," Elsevier Ltd, European Journal of Operational Research, Volume 279, Issue 3, 16, Pages 704-720, December 2019.
- [20] G. T. Heydt, "The next generation of power distribution systems," IEEE Trans. Smart Grid, vol. 1, no. 3, pp. 225–235, Dec. 2010.
- [21] M. Sedghi, M. Aliakbar-Golkar, and M.R. Haghifam, "Distribution network expansion considering distributed generation and storage units using modified PSO algorithm," Int. J. Electr. Power Energy Syst., vol. 52, pp. 221–230, Nov. 2013.
- [22] A. Bagheri, H. Monsef, and H. Lesani, "Integrated distribution network expansion planning incorporating distributed generation considering uncertainties, reliability, and operational conditions," Int. J. Electr. Power Energy Syst., vol. 73, pp. 56–70, Dec. 2015.
- [23] S. N. Ravadanegh and R. G. Roshanagh, "A heuristic algorithm for optimal multistage sizing, siting and timing of MV distribution substations," Electr. Power Syst. Res., vol. 105, pp. 134–141, Dec. 2013.
- [24] S. N. Ravadanegh and R. G. Roshanagh, "On optimal multistage electric power distribution networks expansion planning," Int. J. Electr. Power Energy Syst., vol. 54, pp. 487–497, Jan. 2014.

- [25] M. Grzanic, M. Giacomo Flaming. Prettico, "Distribution Network Model Platform: A First Case Study," Energies journal, 12, 4079, 2019.
- [26] X. Zhang, Y. He, Y. Jin, H. Qin, M. Azhar, J. Zhexue," A Robust K-Means Clustering Algorithm Based on Observation Point Mechanism," Hindawi Complexity, 3650926, 11 pages, 2020.
- [27] W. Lu," Improved K-Means Clustering Algorithm for Big Data Mining under Hadoop Parallel Framework," J Grid Computing, 6 December 2019.
- [28] M. Haghi, S.M.T. Fatemi Ghomi, F. Jolai, "Developing a robust multi-objective model for pre/post disaster times under uncertainty in demand and resource," Journal of Cleaner Production 154 188e202, 2017.