

# مکان یابی تجهیزات کنترلی و حفاظتی با رویکرد خودترمیم اتوماسیون شبکه توزیع هوشمند

عباس شهبازیان<sup>۱</sup>، دانشجوی دکتری؛ علیرضا فریدونیان<sup>۲</sup>، استادیار

۱- محور شبکه‌های هوشمند انرژی، کریتک، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران -  
Ashahbazian@email.kntu.ac.ir

۲- محور شبکه‌های هوشمند انرژی، کریتک، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران -  
fereidunian@eed.kntu.ac.ir

**چکیده:** اتوماسیون شبکه توزیع انرژی الکتریکی، راه‌کاری جهت دستیابی به حد مناسبی از پایداری است. یکی از ویژگی‌های مهمی که اتوماسیون شبکه توزیع ایجاد می‌کند، توان خودترمیمی در این شبکه‌ها است. توان خودترمیمی یک شبکه، مستلزم به‌کارگیری تجهیزات مختلفی از جمله تجهیزات حفاظتی و کنترلی است. مشارکت اصلی این مقاله، ارائه مدلی جامع برای نوع‌سنجی و مکان‌یابی تجهیزات فوق‌الذکر، با در نظر گرفتن ترتیب و هماهنگی میان اجزاء و در نظر گرفتن خطاهای گذرا و دائم، در قالب یک برنامه‌ریزی محدب است. از طرفی، با تحلیل حساسیت نسبت به بیشینه سرمایه‌گذاری اولیه و ضرایب حساسیت تعریف‌شده در تابع هدف، که بخش‌های تابع هدف را وزن‌دهی می‌کنند، تحلیل جامعی از تأثیر به‌کارگیری تجهیزات مذکور در شبکه توزیع ارائه شده‌است. همچنین در حل برنامه‌ریزی ارائه‌شده از حل‌کننده قدرتمند BONMIN در نرم‌افزار گمز استفاده شده‌است.

**واژه‌های کلیدی:** اتوماسیون شبکه توزیع هوشمند، خودترمیمی، پایداری، کلیدبازبست، فیوز، کلید کنترل از راه دور، کلید کنترل دستی.

## Allocation of controller and protective devices with the self-healing approach in smart distribution network

Abbas Shahbazian<sup>1</sup>, Ph.D student; Alireza Fereidunian<sup>2</sup>, Assistant Professor

1- Center for Research and Technology, Faculty of Electrical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran,  
Email: Ashahbazian@email.kntu.ac.ir

2- Center for Research and Technology, Faculty of Electrical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran,  
Email: fereidunian@eed.kntu.ac.ir

**Abstract:** One of the preminent features of distribution network automation to enhance the reliability is self-healing ability in these networks. Self-healing ability of a network requires protective and control equipment. The main contribution of this paper is to provide a comprehensive model for the measurement and location of the aforementioned equipment, taking into account the arrangement and coordination between the components and the consideration of momentary and permanent faults in the form of convex programming. Planning follows the optimality of a function that consists of different parts. The first part of the objective function is to optimize the economic index, including the cost of installing and annual repairing of equipment and the cost of customer blackout time during the study period. The second and third parts of the objective function provide the optimality of mean indexes of system interruption duration and momentary interruptions frequency mean, respectively. On the other hand, by analyzing the sensitivity to the maximum initial investment and the sensitivity coefficients defined in the objective function that weigh the parts of the target function, a comprehensive analysis of the impact of the using the equipment above on the distribution network is provided. The problem has been solved by BONMIN solver using General Algebraic Modeling System (GAMS) optimization software.

**Keywords:** Smart distribution network automation, self-healing, reliability, recloser, fuse, remote control switch, manual switch.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۷/۰۸/۲۲

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۷/۱۱/۲۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۳/۰۸

نام نویسنده مسئول: علیرضا فریدونیان

نشانی نویسنده مسئول: ایران - تهران - خیابان شریعتی - دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی - دانشکده مهندسی برق.

## ۱- مقدمه

تداوم برق‌رسانی و سرویس‌دهی به مصرف‌کنندگان، اهمیت بالایی دارد. لذا در این راستا تمامی دست‌اندرکاران این صنعت در تمام جهان، پیوسته در جهت نیل به تأمین برق مطمئن و پایدار در شبکه برق‌رسانی کوشیده و سرمایه‌گذاری نموده‌اند. با بهبود شاخص‌های پایایی شبکه می‌توان رضایت‌مندی مشترکین و بهره‌بردار شبکه را مهیا کرد [۱]. این در حالی است که مشترکین در دسته‌های مختلفی قرار می‌گیرند. برای برخی از این مشترکین همانند کارخانه‌های ذوب فلزات، شیشه و غیره، تداوم وقفه مشکل‌ساز است، درحالی‌که برخی از مشترکین همانند کارخانه‌های تولید وسایل الکترونیکی، ریسندگی و غیره، فراوانی وقفه را ناخوشایند می‌دانند. وقفه‌های پیش‌آمده می‌تواند به دلیل خطا در تجهیزات مختلف شبکه، بلایای طبیعی و غیره باشد. جلوگیری کامل از وقوع وقفه در شبکه ناممکن است اما می‌توان با تدابیری فراوانی و تداوم آن‌ها را برای مشترکین مختلف کاهش داد. تداوم و فراوانی وقفه‌ها در قالب شاخص‌های پایایی در یک شبکه توزیع انرژی الکتریکی مطرح می‌شوند. با استفاده از شاخص پایایی سایدی، میانگین تداوم وقفه شبکه و مشترکین محاسبه می‌شود. شاخص‌های سایدی و مایفی نیز به ترتیب فراوانی وقفه‌های ماندگار و گذرا را در شبکه انعکاس می‌دهند.

تجهیزات حفاظتی و کنترلی برای کاهش تداوم و فراوانی وقفه‌ها در شبکه توزیع استفاده می‌شوند. هر یک از این تجهیزات به‌نحوی منجر به بهبود پایایی شبکه می‌شوند. یکی از این تجهیزات حفاظتی، کلیدهای بازبست است. اهمیت استفاده از کلید بازبست آنجا مشخص است که حدود ۷۰٪ از خطاهایی که در شبکه توزیع رخ می‌دهد خطاهای گذرا هستند و کلید بازبست با عملکردی که دارد می‌تواند موجب رفع خطاهای گذرا، ایزوله‌کردن خطاها، مدیریت ساختار شبکه و در نتیجه بهبود پایایی سیستم شود. دیگر تجهیزات حفاظتی فیوزها هستند که در ابتدای انشعاب‌ها قرار می‌گیرند و فراوانی خطاهای دائم را کاهش می‌دهند. کلیدهای کنترلی با توجه به عملکردی که دارند، ناحیه متأثر از خطا را کاهش داده و در نتیجه موجب کاهش مدت‌زمان تجربه خاموشی در نقطه بارهای مختلف شبکه می‌شوند [۲،۳].

مسئله‌ی مکان‌یابی تجهیزات کنترلی در سیستم‌های توزیع الکتریکی امری ضروری و غیرقابل‌انکار است. به‌همین منظور تاکنون مطالعات زیادی در این زمینه صورت گرفته است. بررسی و مقایسه این مطالعات مستلزم ارائه آن‌ها در یک جدول است. جدول (۱) این دسته - بندی را نشان می‌دهد، ستون اول جدول شماره مقالات را با توجه به چیدمان مقالات در مراجع نشان می‌دهد. ستون دوم، سوم، چهارم، پنجم، ششم و هفتم به ترتیب مکان‌یابی کلیدهای کنترل از راه دور، کلیدهای دستی، کلید مانور کنترل از راه دور، فیوز، مدارشکن و کلید بازبست را مشخص می‌کنند. ستون هشتم الگوریتم‌های مورد استفاده جهت بهینه‌سازی و روش‌های حل مسئله با نام اختصاری را نشان می‌دهد. ستون‌های نهم و دهم به ترتیب خطی‌بودن یا غیرخطی‌بودن برنامه‌ریزی صورت‌گرفته را مطرح می‌کنند. جنس تابع هدف با توجه به ستون‌های ده و یازده مشخص می‌شود که می‌تواند از نوع هزینه و یا شاخص‌های پایایی سیستم باشد. ذکر این نکته ضروری است که منظور از مکان‌یابی

کلیدهای مانور انتخاب این نقاط مانور از میان نقاط کاندیدایی است که امکان ایجاد مانور را فراهم می‌کنند. زیرا تعیین نقاط مانور بستگی به شرایط جغرافیایی شبکه‌ی مورد بررسی و همچنین محاسبات اقتصادی از جمله هزینه‌ی احداث خط یا خطوط جدید می‌باشد که عموماً طراحی اشاره‌شده در طرح‌های توسعه در نظر گرفته می‌شود. بنابراین مراجعی که در آن‌ها کلیدهای مانور را مورد بررسی قرار داده‌اند، صرفاً انتخاب بهترین مکان‌ها را برای نصب کلید مانور از میان تعدادی نقطه‌ی کاندیدا بررسی کرده‌اند.

در حالت کلی می‌توان عنوان کرد که مقالات [۲۷-۴] تنها به مکان-یابی تجهیزات کنترلی از جمله کلیدهای کنترلی اتوماتیک و دستی و کلیدهای مانور پرداخته‌اند. مابین این پژوهش‌ها، مقالات [۴،۵] مسئله را در قالب یک برنامه‌ریزی خطی و در مقالات [۶-۲۷] مسئله را در قالب یک برنامه‌ریزی غیرخطی ارائه داده‌اند. در مقالات [۲۸-۴۲] از کلید بازبست به‌عنوان یک تجهیز حفاظتی برای رفع خطاهای گذرا و ایزولاسیون محل خطا استفاده شده است. در مقالات [۲۸-۳۰] مسئله مکان‌یابی همزمان کلید بازبست و کلید اتوماتیک با یک برنامه‌ریزی خطی و در مقالات [۳۱-۴۲] توسط یک برنامه‌ریزی غیرخطی ارائه شده است. برخی از مقالات که از اهمیت بالاتری در این مقاله برخوردار است، در زیر بررسی شده‌اند.

مکان بهینه کلید بازبست در مرجع [۳۱] با استفاده از الگوریتم ژنتیک چند جمعیتی و با در نظر گرفتن شاخص‌های پایایی مشخص شده است. در مرجع [۳۲] مکان بهینه کلید بازبست در حضور منابع تولید پراکنده با هدف بهبود شاخص‌های پایایی شبکه توزیع توسط الگوریتم ژنتیک انجام شده است. مرجع [۳۳] برنامه‌ریزی چند هدفه برای مکان‌یابی بهینه کلیدهای اتوماتیک و کلیدهای بازبست با توجه به هزینه‌های سرمایه‌گذاری، شاخص‌های تداوم و فراوانی پایایی شبکه و شاخص نآآمدگی منابع تولید پراکنده مادامی که امکان بهره‌برداری جزیره‌ای شبکه مجاز نباشد ارائه داده است. در این مرجع خطاهای گذرا و بلندمدت تفکیک نشده و معیاری از خطاهای گذرای شبکه ارزیابی و ارائه نشده است. برنامه‌ریزی چند هدفه مکان‌یابی کلید بازبست، فیوزها و کلیدهای اتوماتیک به‌منظور مینیمم‌کردن شاخص‌های تداوم (سایدی) و فراوانی (سایفی) خطای بلندمدت و شاخص فراوانی خطای گذرا (مایفی) شبکه در مرجع [۳۴] صورت گرفته است. الگوریتم ژنتیک به‌منظور دستیابی به نقطه‌ی بهینه در این برنامه‌ریزی استفاده شده است. مکان بهینه کلید بازبست به‌منظور کاهش خطاهای گذرا و مدیریت ایزولاسیون در هنگام بازآرایی شبکه در مرجع [۳۵] مشخص شده است. در این مرجع تابع هدف متشکل از شاخص‌های میانگین تداوم (سایدی) و فراوانی (سایفی) خطای بلند مدت و شاخص میانگین انرژی تأمین‌نشده انتخاب شده است. خطاهای گذرا و بلند مدت در این مرجع تفکیک شده است اما معیاری از خطاهای گذرا در تابع هدف تعریف نشده است و از الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر آموزش و یادگیری استفاده شده است. در مرجع [۳۶] روشی مبتنی بر استفاده از کلید بازبست برای کاهش خطاهای گذرا با در نظر گرفتن بارهای حساس ارائه شده است. برنامه‌ریزی غیرخطی آمیخته با عدد صحیح برای مسئله مکان بهینه

جدول ۱: دسته‌بندی پژوهش‌های انجام‌شده

Obj.Fun		Prog		Algorithm	Recloser	CB	Fuse	RCTS	MS	RCS	Ref No
RI	Cost	NLP	LP								
*	*		*	CPLEX					*	*	[4]
	*		*	PMAPS						*	[5]
	*	*		GA						*	[6]
	*	*		GREEDY						*	[7]
	*	*		GA-ACO-PSO				*	*	*	[8]
*	*	*	*	PSO				*		*	[9]
	*	*	*	GAMS						*	[10]
*		*		GA					*		[11]
*		*		AHP				*		*	[12]
*	*	*		SFLA					*	*	[13]
*	*	*		ACO						*	[14]
	*	*		PSO		*		*		*	[15]
	*	*		TS						*	[16]
	*	*		AIS					*	*	[17]
*		*		GBA					*		[18]
	*	*		DA				*		*	[19]
	*	*		ACO						*	[20]
	*	*		VBM						*	[21]
*		*		RADPOW				*		*	[22]
*		*		AIS						*	[23]
	*	*		BOA						*	[24]
	*	*		ET						*	[25]
	*	*		SA						*	[26]
	*	*		GA						*	[27]
			*	VBO	*		*				[28]
			*	MILP	*					*	[29]
*	*		*	CPLEX	*					*	[30]
*		*		MPGA	*						[31]
*		*		GA	*						[32]
*	*			NSGA	*					*	[33]
*		*		GA	*		*			*	[34]
*		*		TLBO	*						[35]
*		*		----	*						[36]
	*	*		ACO	*						[37]
*	*	*		DE	*					*	[38]
*	*	*		ACO	*					*	[39]
*		*		GA	*						[40]
*	*	*		GA	*						[41]
	*	*			*	*	*				[42]

فرمول‌بندی و ارائه می‌شود. در بخش چهارم برنامه‌ریزی ارائه‌شده بر روی شبکه‌ی نمونه RBTS4 اجرا شده و نتایج آن مورد تحلیل و ارزیابی قرار می‌گیرد. با توجه به محدودیت بیشینه هزینه سرمایه‌گذاری اولیه و چند-بخشی بودن تابع هدف و ضرایب وزنی تعریف‌شده برای آن، در بخش پنجم به تحلیل حساسیت نتایج نسبت به تغییر ضرایب و بودجه پرداخته و نهایتاً در بخش ششم به جمع‌بندی و نتیجه‌گیری پرداخته می‌شود. فرضیاتی در مسئله نظیر امکان قرارگیری عملی تجهیزات در مکان‌های کاندید، عدم رشد بار سالانه و فراهم‌بودن زیرساخت اتوماسیون شبکه در نظر گرفته شده است.

## ۲- مدل‌سازی ریاضی مسئله

هدف مسئله‌ی مکان‌یابی کلید بازبست، فیوز، کلید اتوماتیک و کلید غیراتوماتیک، انتخاب نقاط بهینه‌ی نصب این تجهیزات بر اساس تابع و یا توابع هدف برگزیده‌ی فنی و اقتصادی و در نظر گرفتن هماهنگی عملکردی در نصب تجهیزات است. بنابراین مسئله‌ی مکان‌یابی کلید بازبست، فیوز، کلید اتوماتیک و کلید غیراتوماتیک؛ در قالب یک مسئله‌ی بهینه‌سازی غیرخطی با در نظر گرفتن توابع هدف فنی و اقتصادی مدل‌سازی می‌شود. در ادامه، توابع هدف فنی و اقتصادی ارائه می‌گردد. شکل ۱ مدت زمان عملکردی و اولویت عملکردی هر تجهیز را

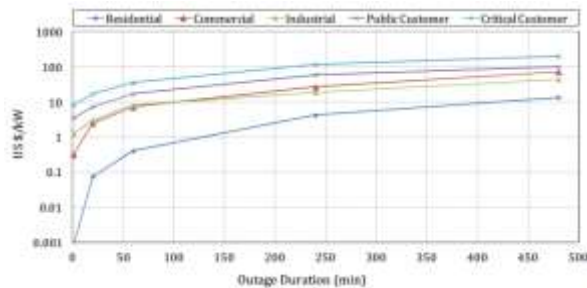
کلید بازبست و منابع تولید پراکنده توسط الگوریتم کلونی مورچگان در مرجع [۳۷] ارائه شده است.

در مراجعی که مورد ارزیابی قرار گرفت، خلاء یک برنامه‌ریزی برای مکان‌یابی و نوع‌سنجی همزمان کلیدهای کنترل دستی و اتوماتیک، فیوزها و کلیدهای بازبست که بهبود شاخص‌های پایایی و هزینه را دنبال کنند وجود دارد. در حال حاضر یکی از معضلات اصلی شرکت‌های توزیع انتخاب نوع تجهیز و مکان نصب آن، با توجه به بودجه‌ای است که در اختیار دارند.

در این مقاله یک برنامه‌ریزی خطی محدب برای مکان‌یابی و نوع-سنجی هم‌زمان تجهیزات حفاظتی و کنترلی شامل کلیدهای کنترل دستی و اتوماتیک، فیوزها و کلیدهای بازبست ارائه می‌شود. برنامه‌ریزی صورت‌گرفته با تفکیک خطاهای گذرا و ماندگار و با در نظر گرفتن احتمال عملکردی تجهیزات، شاخص‌های پایایی و هزینه را بهینه می‌کند. ویژگی اصلی برنامه‌ریزی صورت‌گرفته محدب‌بودن آن است که می‌تواند تضمینی برای رسیدن به بهینه کلی مسئله باشد. از طرفی با در نظر گرفتن ضرایب بالانس در تابع هدف و قیود فنی و اقتصادی مختلف در برنامه‌ریزی، شرایط مد نظر بهره‌بردار شبکه را می‌توان لحاظ نمود. مدل‌سازی ریاضی مسئله همراه با فلوجارت‌های مربوطه با بیان مفاهیم ترتیب و هماهنگی عملکردی تجهیزات کنترلی و حفاظتی در بخش سوم

هزینه خاموشی هر مشترک توسط رابطه (۷) محاسبه می‌شود. در این رابطه، با توجه به نوع مشترک در نقطه بار مربوطه و مدت زمان تداوم وقفه، هزینه‌ی وقفه مشترکین از شکل (۲) محاسبه می‌شود.

$$IC_j = \sum_{i=1}^{n_f} cost_{z,j}^i \quad \forall z \in \{\text{all customer in load } j\} \quad (7)$$



شکل ۲: جریمه ناشی از وقفه انواع بارها [۱۷]

ضریب ارزش کنونی سرمایه با توجه به نرخ تورم و بهره در هر سال از روابط (۸) و (۹) به دست می‌آید.

$$PW_t = \left( \frac{1}{1+At} \right)^t \quad (8)$$

$$At+1 = (1+Inf).(1+Int) \quad (9)$$

از جمله شاخص‌های مهم در توصیف پایایی یک شبکه توزیع الکتریکی، شاخص متوسط زمان خاموشی در سیستم و شاخص متوسط فراوانی وقفه گذرا است. روابط (۱۰) و (۱۱) نحوه محاسبه این دو شاخص را نشان می‌دهند.

$$SAIDI = \frac{\sum_{j=1}^{n_c} (u_j \cdot N_j)}{\sum_{j=1}^{n_c} N_j} \quad (10)$$

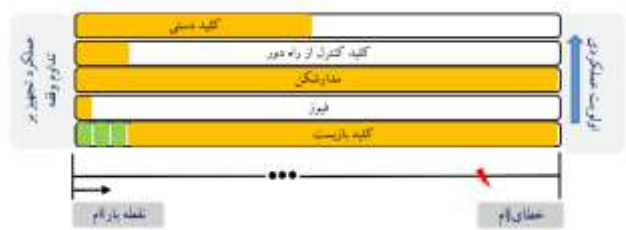
$$MAIFI = \frac{\sum_{i=1}^{n_c} IM_i \cdot N_{mi}}{N_T} \quad (11)$$

یکی از مهم‌ترین پارامترها در محاسبه‌ی شاخص‌های پایایی یک شبکه نرخ خرابی نقطه بارهای مختلف است. در شبکه‌های توزیع الکتریکی خطاها را می‌توان به دو دسته‌ی کلی، خطاهای بلند مدت و خطاهای کوتاه مدت یا گذرا تقسیم‌بندی کرد. هر یک از این خطاها با نرخ مشخصی که بستگی به محل خطا در شبکه دارد مدل‌سازی می‌شوند. رابطه‌ی (۱۲) نرخ خرابی ناشی از خطاهای بلند مدت را در نقطه بار نام شبکه مشخص می‌کند. این نرخ خرابی متشکل از مجموع نرخ‌های خرابی است که خطاهای مختلف شبکه نقطه بار مذکور را تحت-تأثیر خود قرار می‌دهند.

$$\lambda_i^s = \sum_{j=1}^{n_f} \lambda_{i,j}^s \quad (12)$$

رابطه‌ی (۱۳) نرخ خرابی خطاهای بلند مدت نقاط مختلف شبکه بر نقطه بار نام شبکه را مشخص می‌کند.

در برابر یک خطای مشخص نشان می‌دهد. این هماهنگی و ترتیب عملکردی در مدل‌سازی مسئله وارد شده است.



شکل ۱: مدت زمان و اولویت عملکردی تجهیزات

رابطه (۱) تابع هدف مسئله را که شامل مجموعه هزینه‌ها، میانگین مدت وقفه سیستم و میانگین فراوانی خطاهای گذرای سیستم است را نشان می‌دهد. مجموعه هزینه‌ها شامل هزینه وقفه مشترکین، هزینه تعمیرات و نگهداری و هزینه سرمایه‌گذاری اولیه است. با توجه به اینکه هر بخش از تابع هدف مقادیر مختص به خود را دارد، برای اعمال هر یک از آن‌ها در تابع هدف، باید هر بخش به صورت یکایی تبدیل شده و در تابع هدف مشارکت داده شوند. هر بخش از تابع هدف توسط مقادیر پایه مربوطه به صورت یکایی در آمده است. مقادیر پایه هر بخش، با اعمال ضریب وزنی یک برای آن بخش به دست می‌آید. هر بخش از رابطه (۱) توسط ضرایب وزنی در تابع هدف وزن‌دهی می‌شوند. رابطه (۲) محدودیت اعمالی بر ضرایب وزنی را مشخص می‌کند. این ضرایب با توجه به اهداف بهره‌بردار شبکه مقدار می‌پذیرند.

$$\text{Min OF} = \alpha \cdot \frac{\text{cost}}{\text{cost}_{\min}} + \beta \cdot \frac{\text{SAIDI}}{\text{SAIDI}_{\min}} + \delta \cdot \frac{\text{MAIFI}}{\text{MAIFI}_{\min}} \quad (1)$$

$$\alpha + \beta + \delta = 1 \quad (2)$$

توسط رابطه (۳) ارزش کنونی هزینه‌های ناشی از خاموشی مشترکین، خرید و نصب تجهیزات و هزینه‌های نگهداری و تعمیرات در طول دوره‌ی مورد مطالعه محاسبه می‌شود.

$$\text{cost} = \text{cost}^{\text{inv}} + \sum_{t=1}^{n_t} \left( PW_t (\text{cost}^m + \text{CIC}) \right) \quad (3)$$

روابط (۴) تا (۶) به ترتیب بیانگر هزینه خرید و نصب تجهیزات منصوبه، هزینه تعمیرات و نگهداری و هزینه ناشی از خاموشی مشترکین در طول دوره‌ی مورد مطالعه است. هزینه‌ی ناشی از خاموشی مشترکین شامل هزینه‌ی انرژی توزیع‌نشده و جریمه‌ی ناشی از خاموشی است که توسط شرکت توزیع به مشترکین مختلف داده می‌شود.

$$\text{cost}^{\text{inv}} = N^{\text{RCS}} \cdot c_{\text{RCS}}^{\text{inv}} + N^{\text{MS}} \cdot c_{\text{MS}}^{\text{inv}} + N^{\text{fuse}} \cdot c_{\text{fuse}}^{\text{inv}} + N^{\text{Rec}} \cdot c_{\text{rec}}^{\text{inv}} \quad (4)$$

$$\text{cost}^m = N^{\text{RCS}} \cdot c_{\text{RCS}}^m + N^{\text{MS}} \cdot c_{\text{MS}}^m + N^{\text{fuse}} \cdot c_{\text{fuse}}^m + N^{\text{Rec}} \cdot c_{\text{rec}}^m \quad (5)$$

$$\text{CIC} = \sum_{j=1}^{n_c} IC_j \quad (6)$$

سالانه مشترک نام ناشی از خطای زام از رابطه‌ی (۱۷) قابل محاسبه است.

$$u_i = \sum_{j=1}^{n_f} u_{i,j} \quad (16)$$

$$u_{i,j} = \lambda_{i,j}^s \cdot r_{i,j} \quad (17)$$

مدت زمانی که هر خطا می‌تواند مشترک را با وقفه در تأمین انرژی الکتریکی روبرو سازد بستگی به وجود و عدم وجود تجهیزات کنترلی و حفاظتی مذکور در مسیر رخداد خطا تا نقطه بار مربوطه دارد. رابطه‌ی (۱۸) این مدت زمان وقفه را مشخص می‌کند. روندنمای محاسبه مدت زمان، فراوانی گذرا و فراوانی بلند مدت وقفه در شکل (۳) ارائه شده است.

$$r_{i,j} = \left( 1 - \left( \left( I_{i,j}^{RCS} \right) U \left( I_{i,j}^{MS} U I_{i,j}^{rec} \right) \right) \right) r_j + I_{i,j}^{RCS} \cdot r^{RCS} + I_{i,j}^{MS} \cdot r^{MS} + I_{i,j}^{rec} \cdot r^{rec} + P^{RCS} \cdot I_{i,j}^{RCS} \cdot r_j + P^{MS} \cdot I_{i,j}^{MS} \cdot r_j + P^{rec} \cdot I_{i,j}^{rec} \cdot r_j \quad (18)$$

امروزه، جنبه‌ی اقتصادی هر پروژه‌های مهم‌ترین وجه آن پروژه به- حساب می‌آید زیرا هر شرکت سرمایه‌گذار امکان سرمایه‌گذاری به میزان بودجه‌ی خود را داراست. محدودیت اقتصادی مفروض مطابق با رابطه (۱۹) در برنامه‌ریزی مورد نظر وارد می‌شود. هرچه طول یک فیدر بیشتر

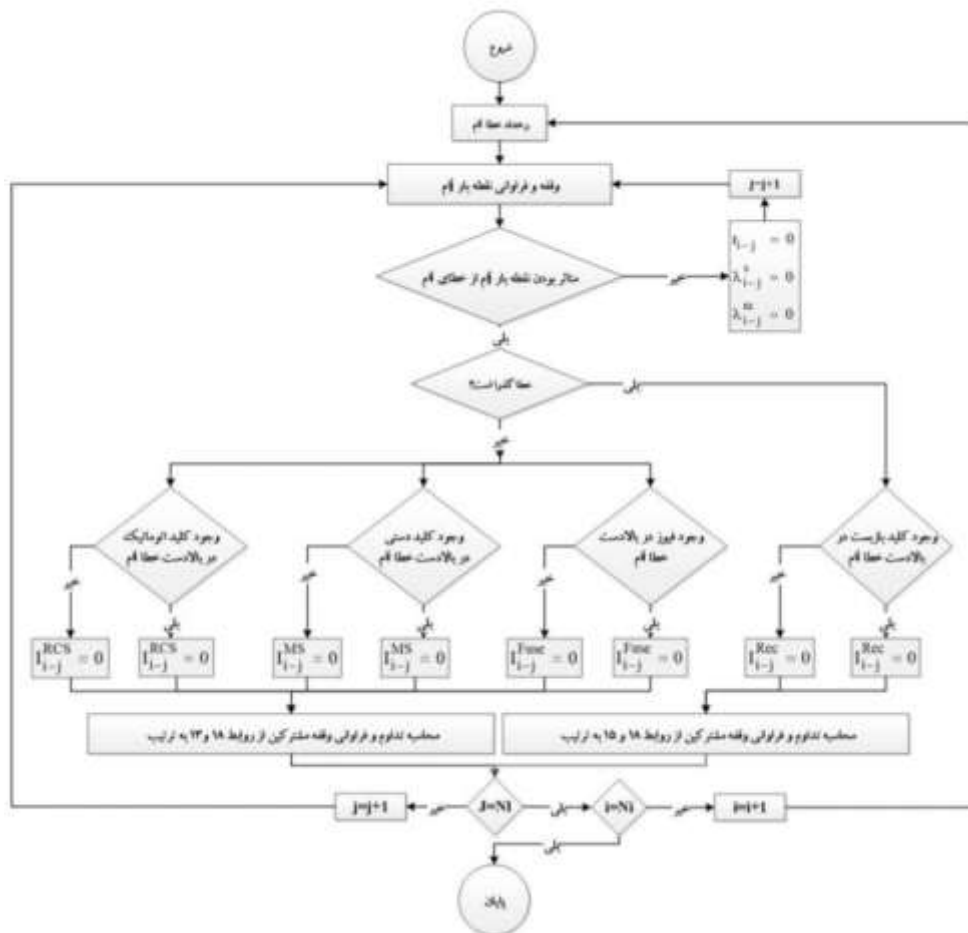
$$\lambda_{i,j}^s = \left( 1 - \left( \left( I_{i,j}^{fuse} \right) U \left( I_{i,j}^{rec} \right) \right) \right) \lambda_j^s + \left( I_{i,j}^{fuse} \cdot P^{fuse} + I_{i,j}^{rec} \cdot P^{rec} \right) \lambda_j^s \quad (13)$$

آهنگ خرابی خطاهای گذرا بر نقطه بارهای مختلف شبکه را می‌توان از روابط (۱۴) و (۱۵) به‌دست آورد. رابطه‌ی (۱۴) نرخ خرابی ناشی از خطاهای گذرا را در نقطه بار نام شبکه مشخص می‌کند. این نرخ خرابی متشکل از مجموع نرخ‌های خرابی است که خطاهای مختلف شبکه نقطه بار مذکور را تحت تأثیر خود قرار می‌دهند. رابطه‌ی (۱۵) نرخ خرابی خطاهای گذرا در نقاط مختلف شبکه بر نقطه بار نام شبکه را مشخص می‌کند.

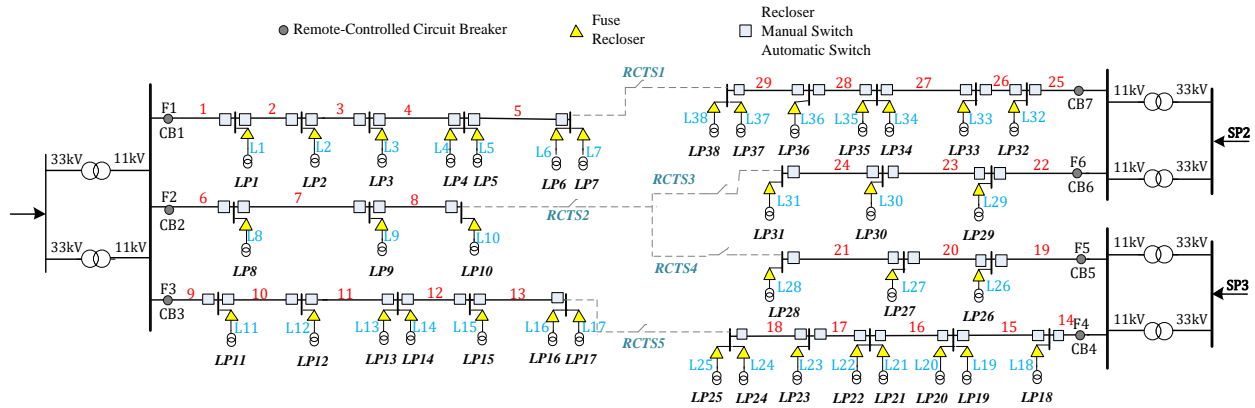
$$\lambda_i^m = \sum_{j=1}^{n_f} \lambda_{i,j}^m \quad (14)$$

$$\lambda_{i,j}^m = (1 - I_{i,j}^{rec}) \cdot \lambda_j^m + I_{i,j}^{rec} \cdot P^{rec} \cdot \lambda_j^m \quad (15)$$

برای ارزیابی میزان هزینه‌ی ناشی از وقفه هر مشترک، باید مدت زمان وقفه هر مشترک را حساب کرد، سپس با توجه به منحنی هزینه وقفه‌ها در شکل (۲)، هزینه مشترک مورد نظر را با توجه به میانگین مدت وقفه‌ای که تجربه می‌کند، محاسبه کرد. تجهیزات کنترلی و حفاظتی هر کدام به‌نحوی می‌توانند میزان وقفه‌ای که هر مشترک در هر سال تجربه می‌کند را تحت تأثیر خود قرار دهند. از رابطه‌ی (۱۶) مدت زمان وقفه سالانه‌ی هر نقطه بار به‌دست می‌آید. مدت زمان وقفه



شکل ۳: روندنمای محاسبه مدت زمان، فراوانی گذرا و فراوانی بلند مدت وقفه



شکل ۴: شبکه مورد مطالعه همراه با مکان کاندید تجهیزات [۲۲]

اطلاعات تکمیلی تجهیزات مورد استفاده اعم از احتمالات عملکردی این تجهیزات، مدت زمان عملکرد تجهیزات و هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه جهت خرید و نصب هر یک از تجهیزات در جدول (۲) مشخص شده است. شرایط نایقینی در عملکرد تجهیزات با ضریب احتمالاتی در مسئله مذکور وارد شده است.

نتایج حاصل از سه سناریو مذکور بر روی شبکه مورد مطالعه و تحت شرایط یکسان در جداول (۳) و (۴) گزارش شده است. این نتایج در شرایطی که بیشینه هزینه سرمایه‌گذاری اولیه ۲۰۰ هزار دلار و ضرایب

جدول ۲: مدت زمان، احتمال عملکردی و هزینه‌های اولیه جهت خرید

و نصب هر یک از تجهیزات [۴۳]

تجهیز	زمان عملکرد	احتمال عملکرد صحیح تجهیزات	قیمت (دلار)
کلید بازبست	۱ دقیقه	۰/۹۶۵	۶۰۰۰
کلید اتوماتیک	۳۰ ثانیه	۰/۹۶۵	۴۷۰۰
کلید دستی	۱ ساعت	۰/۹۸	۲۵۰۰
فیوز	۰	۰/۹	۱۵۰۰

وزنی تابع هدف برای مجموعه هزینه‌ها، میانگین مدت وقفه سیستم و میانگین فراوانی خطای گذرا به ترتیب ۰/۶، ۰/۲ و ۰/۲ بوده، حاصل شده است.

مکان و تعداد هر تجهیز در سناریوهای مختلف در جدول (۳) مشخص شده است. در سناریو اول ۳۸ کلید کنترلی و ۲۸ فیوز به صورت همزمان مکان‌یابی شده‌اند، همچنین مشاهده می‌شود که در ۷۴٪ از انشعاب‌ها فیوزها مکان‌یابی شده‌اند. این بدین معناست که ۳۶٪ از نقطه‌بارها به‌گونه‌ای بوده‌اند که از لحاظ فراوانی وقفه در سیستم حائز اهمیت کم‌تری بوده‌اند، به‌عنوان مثال در برخی نقطه‌بارها همانند بارهای ۲۶ تا ۳۱ که تعداد مشترکین آن‌ها تنها یک مشترک بوده، فراوانی وقفه این نقطه‌بارها نسبت به سایر نقطه‌بارها که مشترکین بیشتری را تغذیه می‌کنند، بسیار کمتر بوده است. از طرفی نقطه‌بارهای ۲۶ تا ۳۱ که فاقد حفاظت فیوزی بوده‌اند، چون مقدار توان مصرفی مشترکین آن‌ها قابل ملاحظه است کلیدهای کنترلی بیشتری در خطوط اصلی تغذیه‌کننده آن‌ها تعبیه شده است. به‌گونه‌ای که از ۱۰ مکان کاندید در این خطوط، ۶ کلید کنترلی نصب شده است تا در مواقع موردنیاز با بازیابی شبکه،

گردد، افت ولتاژ در آن فیدر بیشتر می‌گردد لذا بایستی ولتاژ در تمامی نقطه‌بارهای انتقالی و نیز سایر نقطه‌بارهای همان فیدر در یک محدوده مجاز باشد. لذا این محدودیت بایستی بر اساس رابطه (۲۰) بر برنامه‌ریزی صورت‌گرفته تحمیل شود. همچنین بایستی به این نکته توجه کرد که هنگام بازیابی بارها توسط بازآرایی بایستی ساختار شعاعی شبکه حفظ گردد چرا که شبکه‌های توزیع همواره به‌صورت شعاعی مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند.

$$\text{cost}^{\text{Inv}} \leq \text{Budget} \quad (14)$$

$$V_i^{\text{min}} \leq V_i \leq V_i^{\text{max}} \quad (15)$$

### ۳- مطالعه موردی

در این مطالعه مکان‌یابی کلیدهای بازبست، فیوز، کلیدهای اتوماتیک و غیر اتوماتیک در شبکه‌ی توزیع با استفاده از مدل‌سازی ارائه شده، برای باس شماره‌ی چهار شبکه‌ی نمونه‌ی روی بیلینتون انجام می‌شود. مکان کاندید نصب کلیدها، کلید بازبست و فیوزها بر روی شبکه در شکل (۴) مشخص شده‌اند. مکان کاندید کلیدهای اتوماتیک و غیر اتوماتیک نقاط ابتدایی و انتهایی خطوط اصلی، مکان کاندید نصب کلیدهای بازبست ابتدا و انتهای خطوط اصلی و ابتدای انشعاب‌ها هستند و فیوزها نیز در ابتدای انشعاب‌های فرعی قرار می‌گیرند. به‌همین روال، ۵۱ مکان کاندید کلیدهای اتوماتیک و غیر اتوماتیک، ۳۸ مکان کاندید فیوز و ۸۹ مکان کاندید کلید بازبست که از این تعداد ۳۸ مکان بر انشعاب‌ها و ۵۱ مکان بر خطوط اصلی می‌باشد.

#### ۱-۳- نتایج نوع‌سنجی و مکان‌یابی تجهیزات

ارزیابی و تعیین بهترین ترکیب استفاده از تجهیزات مختلف در مسئله‌ی مکان‌یابی بهینه این تجهیزات، نیازمند تعریف سناریوهای مختلف و مقایسه این سناریوها با یکدیگر از جهات مختلف است. به همین منظور سه سناریو برای تعیین بهترین ترکیب تجهیزات در مسئله انتخاب می‌شود، سپس در بخش‌های بعدی مقاله به تحلیل‌های مختلفی که می‌تواند بر مسئله اعمال شود، پرداخته می‌شود. در این بخش سه سناریو مطابق زیر تعریف می‌شود:

- ۱) مکان‌یابی کلیدهای کنترلی و فیوزها؛
- ۲) مکان‌یابی کلیدهای کنترلی و کلیدهای بازبست؛
- ۳) مکان‌یابی کلیدهای کنترلی، فیوزها و کلیدهای بازبست؛

## جدول ۳: مکان و تعداد تجهیزات در هر سناریو

$\alpha = 0.6, \beta = 0.2, \delta = 0.2, \text{Budget}^{\text{Max}} = 200k\$$ ، مکان بهینه تجهیزات در سناریوهای مختلف به‌ازای

مورد مطالعه	فیوز		کلیدهای بازبست				کلیدهای کنترلی	
	تعداد	مکان	خطوط اصلی		انشعاب		اتوماتیک	
			تعداد	مکان	تعداد	مکان	تعداد	مکان
سناریو اول	۲۸	All - {L3,L8,L9,L10,L26,L27,L28, L29,L30, L31}	---	---	---	---	۲۸	2D,2U,3U,4D,4U,5D,7D,7U,8D,11D,11U,12D,12U,16D,16U,17D,18D,20U,21U,23U,24D,25U,26U,27U,28D,28U,29D,29U
سناریو دوم	---	---	۷	3U,4U,11U,12D,13D,17D,28D	۲۰	All- {L1,L3,L8,L9,L10,L11,L12,L14,L15,L16,L17,L18,L26,L27,L28,L29,L30,L31}	۳	8D,21D,24U
سناریو سوم	۲۲	All - {L8,L10,L11,L12, L13,L18,L19,L26, L27,L28, L29,L30, L31,L32, L33, L36}	۸	3D,5D,12D,16D,17D,18D,24D,28D	۸	L11,L12,L13,L18,L19,L32,L33,L38	۷	4U,8D,11U,16U,20U,21D,29U
								1U,6U,9U,10U,14U,15D,15U,19U,22U,26D
								2U,7U,10U,15U,20U,23U,26U,27U
								1U,2U,3U,6,7U,9U,10U,14U,15U,23U,25U,26U,27U

هر یک از تجهیزات کنترلی و حفاظتی، به‌نحوی شاخص‌های پایایی و هزینه‌های ناشی از وقفه مشترکین را در یک شبکه توزیع الکتریکی، تحت‌تاثیر خود قرار می‌دهند. برای بررسی تغییرات و حساسیت هر یک از این پارامترها نسبت به نصب تجهیزات مذکور در شبکه، جدول (۴) ارائه شده است. در این جدول پارامترهای مختلف شبکه در سناریوهای مختلف و شبکه‌ی تجهیز نشده گزارش شده‌است. مقادیر ستون دوم جدول (۴)، مقدار تابع هدف را در هر سناریو و شبکه اولیه نمایش می‌دهد. این تابع هدف در برگزیده مجموعه هزینه‌های شبکه، میانگین وقفه سیستم و میانگین فراوانی خطای گذرا است که هر بخش به‌صورت یکایی و با ضریب وزنی در تابع هدف مشارکت داده شده‌اند. با استفاده از مقادیر ستون دوم، می‌توان مقایسه‌ای کلی بین سناریوهای مختلف که جوانب مختلف را در هم آمیخته انجام داد. با توجه به نتایج می‌توان گفت که سناریو اول، سناریو دوم و سناریو سوم به‌ترتیب ۷۷٪، ۷۳٪ و ۸۰٪ کاهش در تابع هدف ایجاد کرده‌اند، پس در نهایت سناریو سوم می‌تواند بهینه‌ترین تابع هدف را ایجاد کند.

در ستون سوم جدول (۴)، هزینه‌های ناشی از وقفه مشترکین در طول دوره مورد مطالعه (۱۵ سال) گزارش شده است. سناریو اول که کلیدهای کنترلی و فیوزها در شبکه مکان‌یابی می‌شوند، کمترین هزینه را در بردارد. در واقع این سناریو به میزان ۱۴۵۲۰۰۰ دلار هزینه ناشی از وقفه مشترکین را در طول دوره مورد مطالعه کاهش می‌دهد. البته این

حداکثر برق‌رسانی را به بارها منجر سازند و میانگین مدت وقفه سیستم را کاهش دهند.

در سناریو دوم ۱۱ کلید کنترلی به‌همراه ۲۷ کلید بازبست در شبکه تعبیه شده است. در این سناریو کلیدهای بازبست با توجه به عملکردهایی که دارند علی‌رغم قیمت بالای آن‌ها، به تعداد بیشتری نسبت به کلیدهای کنترلی هم در خطوط اصلی و هم در انشعاب‌ها قرار گرفته‌اند. همانند فیوزها، کلیدهای بازبست نیز در کاهش فراوانی خطا، مشارکت مستقیم دارند. دلیل عدم به‌کارگیری کلیدهای بازبست نیز در برخی انشعابات به‌مانند فیوزها در سناریو اول است. با توجه به این‌که کلیدهای بازبستی قرارگرفته در خطوط اصلی، هنگام خطا در شبکه می‌توانند موجب تسریع روند بازآرایی گردند به‌همراه کلیدهای کنترلی در خطوط اصلی قرار داده شده‌اند.

در سناریو سوم ۲۰ عدد کلید کنترلی، ۱۶ عدد کلید بازبست به‌همراه ۲۲ فیوز در شبکه قرار داده شده است. در انشعاب‌های پرعراضه که احتمال رخداد خطاهای گذرا بیش‌تر است کلید بازبست قرار گرفته است. همچنین از ۴۱ مکان کاندید نصب ادوات در خطوط اصلی، در ۲۸ مکان کاندید، کلیدهای بازبست و کلیدها قرار گرفته‌اند که از این تعداد ۱۳ کلید دستی، ۷ کلید اتوماتیک و ۸ کلید بازبست است. کلیدهای بازبست و فیوزها ۷۹٪ از انشعاب‌ها را پوشش داده‌اند که از این میان ۲۲ عدد فیوزها و ۸ عدد کلیدهای بازبست هستند.

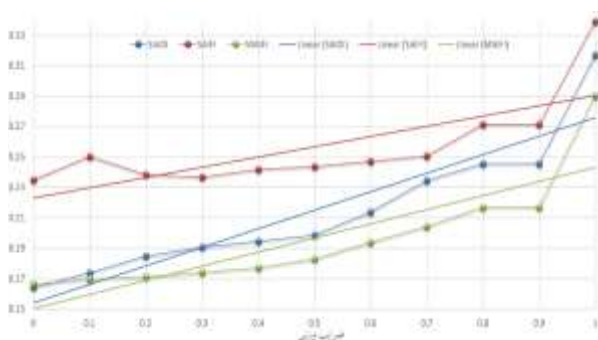
## جدول ۴: شاخص‌های پایایی و هزینه در هر سناریو

مورد مطالعه	تابع هدف (pu)	IC (US \$)	C <sup>INV</sup> (US \$)	C <sup>Rec</sup> (US \$)	C <sup>RCS</sup> (US \$)	C <sup>MS</sup> (US \$)	C <sup>Fuse</sup> (US \$)	ASAI	MAIFI	SAIFI	SAIDI (h/year.cust)
شبکه اولیه	۵/۶۲۶۳	۱۷۱۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۹۹۹۷۳۹	۰/۶۸۸۳	۰/۶۸۷۹	۲/۲۸۲۳
سناریو اول	۱/۲۸۴۷	۲۵۸/۹	۱۹۸/۶	۰	۱۳۱/۶	۲۵	۴۲	۰/۹۹۹۹۷۴	۰/۳۹۷۶	۰/۳۲۸	۰/۲۱۹۹
سناریو دوم	۱/۵۲۴	۳۵۴/۸	۱۹۶/۱	۱۶۲	۱۴/۱	۲۰	۰	۰/۹۹۹۹۶۴	۰/۳۱۰۵	۰/۳۴۳۴	۰/۳۱۱۵
سناریو سوم	۱/۱۵۰۲	۲۸۲/۶	۱۹۴/۴	۹۶	۳۲/۹	۳۲/۵	۳۳	۰/۹۹۹۹۷۵	۰/۱۸۳۸	۰/۲۴۷	۰/۲۱۳۹

و بخش اول آن مجموعه هزینه‌ها و بخش‌های دوم و سوم شاخص‌های پایایی شبکه هستند، ضرایب وزنی را طوری تغییر داده می‌شود که شاخص‌های پایایی با ضرایب وزنی یکسان در تابع هدف مشارکت داشته باشند. در این صورت ضریب وزنی مجموعه هزینه‌ها در تابع هدف، از مقدار ۰ تا ۱ با پله‌های ۰/۱ افزایش یافته و ضرایب دو بخش دیگر که شاخص‌های پایایی هستند هر یک از مقدار ۰/۵ تا ۰ با پله‌های ۰/۱ کاهش یافته است.

مادامی که فقط شاخص‌های پایایی در تابع هدف مشارکت دارند، طبق نتایج سطر اول جدول (۵) تجهیزات کنترلی و حفاظتی مذکور چنان در شبکه مکان‌یابی شده‌اند که میانگین وقفه مشترکین و میانگین فراوانی خطای گذرا حداقل شده است. این در حالی است که هزینه وقفه مشترکین نسبت به شبکه تجهیز نشده کاهش یافته است اما این بیشترین کاهش ممکن نسبت به قرارگیری تجهیزات در شبکه نیست. حال با تأثیرپذیری تابع هدف از مجموعه هزینه‌ها، کاهش هزینه وقفه مشترکین در شبکه بیش‌تر می‌شود. بیش‌ترین کاهش هزینه وقفه مشترکین مادامی رخ می‌دهد که تابع هدف تنها متأثر از مجموعه هزینه‌ها است و نتایج سطر آخر جدول (۵) گویای این امر است.

برای ملموس‌تر شدن تأثیر ضرایب وزنی بر شاخص‌های پایایی شبکه، شکل (۵) ارائه شده است. در شکل (۵) شاخص‌های پایایی شبکه شامل میانگین وقفه مشترکین، میانگین فراوانی خطای دائم و میانگین فراوانی خطای گذرا، به‌ازای تغییرات ضریب وزنی نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که هر سه شاخص مذکور با افزایش مشارکت مجموعه هزینه‌ها در تابع هدف، روند افزایشی داشته‌اند و این شبکه از لحاظ پایایی رو به افول است. شاخص‌های میانگین وقفه مشترکین، میانگین فراوانی خطای گذرا و میانگین فراوانی خطای دائم به ترتیب بیشترین شیب‌های افزایشی را دارند. دلیل اینکه شاخص میانگین فراوانی خطای دائم نسبت به دو شاخص دیگر شیب افزایشی کم‌تری دارد، این است که این شاخص به‌صورت مستقیم در تابع هدف مشارکت نداشته است. هر چند که مقدار این شاخص به‌همراه شاخص‌های دیگر بر هزینه ناشی از وقفه مشترکین



شکل ۵: حساسیت پارامترهای پایایی به تغییرات ضرایب وزنی

تأثیرگذار است.

## ۲-۳-۲ تحلیل حساسیت تابع هدف به بیشینه هزینه سرمایه‌گذاری اولیه

مادامی که تصمیم به انجام یک پروژه گرفته می‌شود، مهم‌ترین مسئله‌ای که وجود دارد بودجه‌ای است که می‌توان به آن پروژه اختصاص داد. در

کاهش هزینه در سناریو سوم ۱۴۲۸۰۰۰ دلار می‌باشد که نزدیک به مقدار کاهش‌یافته در سناریو اول است و می‌تواند قابل‌قبول باشد. ستون‌های ۴ تا ۸ هزینه‌های خرید و نصب تجهیزات مختلف را در هر سناریو نشان می‌دهد.

ستون‌های ۹ تا ۱۲ جدول (۴)، شاخص‌های پایایی شبکه را نشان می‌دهند. مطابق نتایج این جدول مشاهده می‌شود که در هر چهار شاخص، سناریو سوم بهترین نتیجه را حاصل می‌دهد. در سناریو سوم شاخص‌های میانگین وقفه سیستم، میانگین فراوانی خطای دائم و میانگین فراوانی خطای گذرا به ترتیب ۰/۹۰، ۰/۶۴ و ۰/۷۳ کاهش یافته است، همچنین میانگین آمادگی سیستم با مقدار ۰/۹۹۹۹۷۵ بالاترین مقدار خود را در سناریوها دارد. در نهایت می‌توان اظهار کرد که سناریو سوم یعنی مکان‌یابی همزمان کلیدهای بازبست، فیوزها و کلیدهای کنترلی می‌تواند به‌عنوان بهترین آرایش تجهیزات در مسئله بهینه‌سازی پارامترهای مختلف شبکه انتخاب گردد. در همین راستا تحلیل‌های مختلفی در بخش‌های بعدی پایان‌نامه بر روی سناریو سوم انجام می‌شود و مورد تحلیل و ارزیابی قرار می‌گیرند.

## ۲-۳-۲ تحلیل حساسیت نتایج به تغییرات پارامترهای مختلف شبکه

نتایج هر برنامه‌ریزی با تغییر پارامترها و شرایط شبکه تغییر می‌کند. در واقع برنامه‌ریزی که برای مسئله مکان‌یابی تجهیزات کنترلی و حفاظتی در این فصل ارائه شد، می‌تواند تحت تأثیر دو فاکتور مهم قرار گیرد: یکی از آن‌ها میزان هزینه سرمایه‌گذاری اولیه است و بستگی به بودجه تخصیص داده شده دارد و فاکتور دیگر اهداف بهره‌بردار شبکه از نتایج برنامه‌ریزی صورت گرفته است که این اهداف به‌صورت کمی در تابع هدف وارد می‌شوند و با ضرایب مناسب وزن‌دهی می‌شوند. اهداف بهره‌بردار شبکه می‌تواند یک یا چند هدف مختلف باشد، لذا در برنامه‌ریزی صورت گرفته در این فصل سه هدف برای بهره‌برداری شبکه در نظر گرفته شده است. حال می‌توان با تغییر ضرایب وزنی در تابع هدف تحلیلی را بر اهداف بهره‌برداری انجام داد.

## ۱-۲-۳ تحلیل حساسیت تابع هدف به تغییرات ضرایب وزنی تابع هدف

در برنامه‌ریزی انجام شده در این فصل سه ضریب وزنی در تابع هدف تعریف شده است. هر یک از این ضرایب یک بخش از تابع هدف را وزن‌دهی می‌کنند. ضریب  $\alpha$  مجموعه هزینه‌ها که شامل هزینه سرمایه‌گذاری اولیه، تعمیرات، نگهداری و هزینه ناشی از وقفه مشترکین در طول دوره مورد مطالعه است را وزن‌دهی می‌کند. ضرایب  $\beta$  و  $\delta$  به ترتیب میانگین مدت وقفه سیستم و میانگین فراوانی خطای گذرا را وزن‌دهی می‌کند.

با تغییر ضرایب وزنی تابع هدف، استراتژی انتخاب و چیدمان تجهیزات در مسئله بهینه‌سازی تغییر می‌کند. جدول (۵) نتایج حاصل از مسئله بهینه‌سازی مد نظر را با تغییر ضرایب وزنی نشان می‌دهد. با ارزیابی نتایج جدول (۵)، می‌توان به اهمیت اهداف بهره‌بردار شبکه از مسائل بهینه‌سازی اشاره کرد. با توجه به اینکه تابع هدف سه بخش دارد



جدول ۵: نتایج تحلیل حساسیت تابع هدف به تغییرات ضرایب وزنی تابع هدف در سناریو سوم به‌ازای بیشینه سرمایه‌گذاری اولیه ۲۰۰ هزار دلار

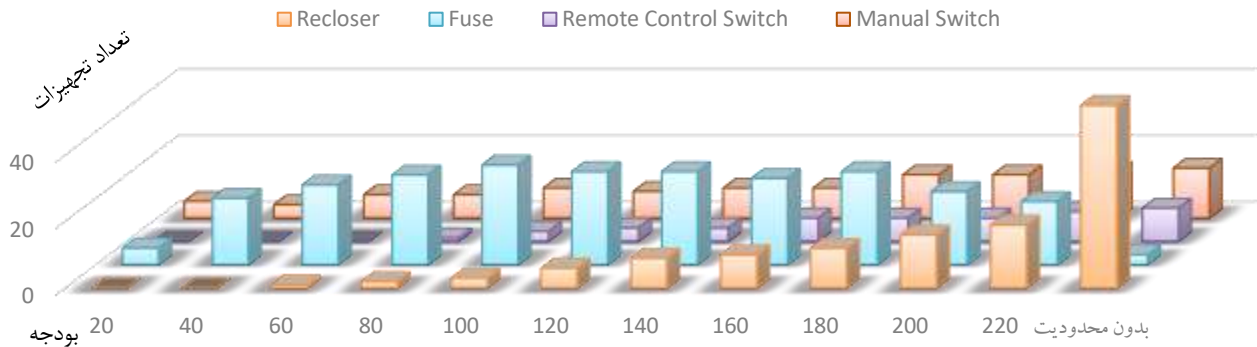
IC (US k\$)	C <sup>INV</sup> (US k\$)	تعداد				SAIDI (h/year.cust)	SAIFI	MAIFI	ضرایب وزنی		
		Rec	Fuse	RCS	MS				δ	β	α
۴۱۹/۸۴۲	۱۹۴/۳	۱۷	۲۹	۴	۱۲	۰/۱۷۳۷	۰/۲۵۰۳	۰/۱۶۹۷	۰/۴۵	۰/۴۵	۰/۱
۳۸۴/۰۱	۱۹۶/۸	۱۹	۲۱	۴	۱۳	۰/۱۸۴۸	۰/۲۳۸۲	۰/۱۷۱۳	۰/۴	۰/۴	۰/۲
۳۴۰/۳۴۱	۱۹۹/۸	۲۰	۱۹	۴	۱۳	۰/۱۹۰۷	۰/۲۳۶۷	۰/۱۷۴۱	۰/۳۵	۰/۳۵	۰/۳
۳۰۰/۳۹۷	۱۹۵/۸	۲۰	۱۸	۴	۱۲	۰/۱۹۴۷	۰/۲۴۱۷	۰/۱۷۷۳	۰/۳	۰/۳	۰/۴
۲۹۶/۵۹۷	۱۹۵/۴	۱۸	۱۸	۷	۱۱	۰/۱۹۸۷	۰/۲۴۳۸	۰/۱۸۳	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۵
۲۸۲/۶	۱۹۴/۴	۱۶	۲۲	۷	۱۳	۰/۲۱۳۹	۰/۲۴۷	۰/۱۹۳۸	۰/۲	۰/۲	۰/۶
۲۵۱/۴۷۳	۱۹۸	۲۰	۱۸	۵	۱۱	۰/۲۳۴۷	۰/۲۵۰۶	۰/۲۰۴۴	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۷
۲۳۲/۶۵۸	۱۹۷/۵	۱۳	۲۵	۱۰	۱۴	۰/۲۴۵۶	۰/۲۷۱۵	۰/۲۱۶۹	۰/۱	۰/۱	۰/۸
۲۳۲/۶۵۸	۱۹۷/۵	۱۳	۲۵	۱۰	۱۴	۰/۲۴۵۶	۰/۲۷۱۵	۰/۲۱۶۹	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۹

می‌شود که با افزایش سرمایه‌گذاری، تعداد کلیدهای بازبست و کلیدهای اتوماتیک که می‌توانند عملکرد بهتری در شبکه داشته باشند، بیشتر می‌شود. شکل (۶) به‌خوبی گویای این موضوع است. در این شکل میزان به‌کارگیری تجهیزات مختلف در کنار یکدیگر در هر سرمایه‌گذاری نشان داده شده است. همچنین مشاهده می‌شود که بیشترین سرمایه‌گذاری که توجیه‌پذیر است و می‌تواند بیش‌ترین بهینگی را در تابع هدف ایجاد کند، ۴۱۹ هزار دلار است و اگر بیش‌تر از این مقدار در این شبکه سرمایه‌گذاری انجام شود، نمی‌تواند شرایط بهتری ایجاد کند. این‌که با افزایش سرمایه‌گذاری در شبکه شرایط پایایی شبکه بهبود می‌یابد، مشهود است. اما همان‌گونه که بیان شد، این سرمایه‌گذاری باید تحت عنوان یک مسئله بهینه‌سازی با در نظر گرفتن اهداف بهره‌بردار شبکه انجام شود. به‌عنوان مثال بیش‌ترین بهینگی تابع هدف در شبکه مورد مطالعه زمانی است که ۴۱۹ هزار دلار سرمایه‌گذاری شود. از این مبلغ تنها ۳۳۰ هزار دلار صرف خرید و نصب کلید بازبست شده است که حدود ۷۹٪ هزینه سرمایه‌گذاری کلی شبکه است. دلیل این همه سرمایه‌گذاری برای خرید و نصب کلید بازبست، نقش آن در بهبود عملکرد حفاظتی و کنترلی شبکه و همچنین نقش کلیدی آن در رفع

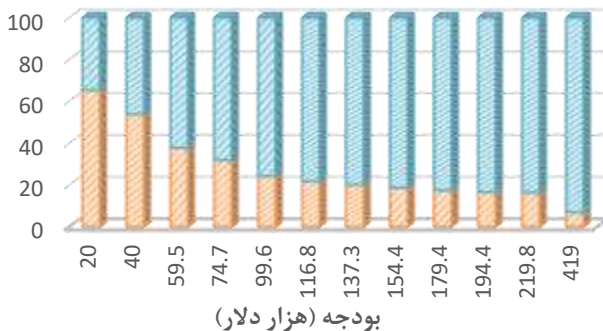
مسئله مکان‌یابی تجهیزات کنترلی و حفاظتی نیز، میزان سرمایه‌گذاری اولیه محدودکننده خواهد بود [۴۴]. این یعنی با اختصاص مقادیر مختلف بودجه به پروژه، مکان و نوع تجهیزات به‌کاررفته در شبکه تغییر می‌کند. از این‌رو با تغییر بیشینه سرمایه‌گذاری در مسئله بهینه‌سازی مذکور در این فصل، حساسیت پارامترهای مختلف شبکه نسبت به این تغییر مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. نتایج حاصل از بیشینه سرمایه‌گذاری‌های مختلف در جدول (۶) گزارش شده است. ستون اول این جدول بیشینه سرمایه‌گذاری ممکن را نشان می‌دهد. نتایج این جدول به‌ازای بیشینه سرمایه‌گذاری از مقدار ۲۰ هزار دلار تا ۲۲۰ هزار دلار با فواصل ۲۰ هزار دلاری ارائه شده است. مادامی که کم‌ترین سرمایه‌گذاری (۲۰ هزار دلار) انجام گرفته، تجهیزات با هزینه‌های اولیه پایین‌تر در شبکه قرار داده شده است. استفاده از فیوزها و کلیدهای کنترلی غیراتوماتیک، چون از لحاظ سرمایه‌گذاری اولیه مقرون‌به‌صرفه هستند و با توجه به عملکردهای حفاظتی و کنترلی که دارند، در سرمایه‌گذاری‌های کم بسیار حائز اهمیت است. با افزایش سرمایه‌گذاری اولیه، استفاده از تجهیزات با هزینه‌های اولیه بالاتر و کارآمدتر در شبکه، توجیه اقتصادی پیدا می‌کند، لذا مشاهده

جدول ۶: نتایج تحلیل حساسیت تابع هدف به تغییرات بیشینه سرمایه‌گذاری اولیه در سناریو سوم به‌ازای ضرایب وزنی:  $\alpha = 0.6, \beta = 0.2, \delta = 0.2$

تابع هدف	IC (US k\$)	C <sup>INV</sup> (US k\$)	تعداد				SAIDI (h/year.cust)	SAIFI	MAIFI	بیشینه سرمایه‌گذاری (US k\$)
			Rec	Fuse	RCS	MS				
۳/۵۴۸	۱۱۱۶/۳۶۱	۲۰	۰	۵	۰	۵	۱/۱۳۸۷	۰/۶۱۶۳	۰/۶۰۴۴	۲۰
۲/۶۹۲	۹۲۰/۷۴۳	۴۰	۰	۲۰	۰	۴	۰/۸۱۶۳	۰/۴۲۲۱	۰/۳۹۳	۴۰
۲/۰۶۵	۶۴۴/۰۳۶	۵۹/۵	۱	۲۴	۰	۷	۰/۶۳۱	۰/۳۶۴۹	۰/۳۲۸۳	۶۰
۱/۷۵۸	۵۴۳/۸۳۱	۷۴/۷	۲	۲۷	۱	۷	۰/۵۰۲۶	۰/۳۲۵۲	۰/۲۸۳۷	۸۰
۱/۴۹۵	۴۱۲/۰۲۲	۹۹/۶	۳	۳۰	۳	۹	۰/۴۰۵۱	۰/۲۸۹۱	۰/۲۴۲۱	۱۰۰
۱/۳۸۴	۳۷۳/۹۴۹	۱۱۶/۸	۶	۲۸	۴	۸	۰/۳۴۹	۰/۲۷۵۲	۰/۲۲۲۲	۱۲۰
۱/۲۸۲	۳۴۳/۳۵۸	۱۳۷/۳	۹	۲۸	۴	۹	۰/۲۹۹۸	۰/۲۷۲۵	۰/۲۱۸۳	۱۴۰
۱/۲۳۳	۳۱۷/۸۱۴	۱۵۴/۴	۱۰	۲۶	۷	۹	۰/۲۷۶۳	۰/۲۶۴۴	۰/۲۰۶۸	۱۶۰
۱/۱۹۳	۲۹۷/۸۰۴	۱۷۹/۴	۱۲	۲۸	۷	۱۳	۰/۲۵۳۱	۰/۲۵۰۶	۰/۱۹۹	۱۸۰
۱/۱۵۰	۲۸۲/۶	۱۹۴/۴	۱۶	۲۲	۷	۱۳	۰/۲۱۳۹	۰/۲۴۷	۰/۱۹۳۸	۲۰۰
۱/۱۲۷	۲۷۸/۸۷۶	۲۱۹/۸	۱۹	۱۹	۹	۱۴	۰/۲۰۱۳	۰/۲۴۱۹	۰/۱۸۳۱	۲۲۰



شکل ۶: تعداد تجهیزات در تحلیل بیشینه سرمایه‌گذاری اولیه



شکل ۷: هزینه کاهش یافته وقفه مشترکین در سرمایه‌گذاری‌های

بخش شامل مجموعه هزینه‌ها (هزینه تعمیرات و نگهداری و وقفه مشترکین در طول دوره مورد مطالعه و هزینه خرید و نصب تجهیزات)، شاخص میانگین مدت وقفه مشترکین و شاخص میانگین فراوانی وقفه مشترکین است.

برای انتخاب بهترین ترکیب از تجهیزات مورد استفاده در شبکه توزیع هوشمند جهت بهبود خودترمیمی، سه سناریو از به‌کارگیری تجهیزات مختلف با یکدیگر مطرح شد و هر کدام به‌صورت یک مسئله بهینه‌سازی با شرایط یکسان حل شد. نتایج حاصل از این سه سناریو، به‌کارگیری کلید بازبست را به‌همراه فیوزها و کلیدهای کنترلی در شبکه، به‌عنوان بهترین ترکیب تجهیزات موجب شد. بررسی تأثیرپذیری مکان و تعداد تجهیزات به تغییر پارامترهای مختلف شبکه دو تحلیل حساسیت انجام شد. اولین تحلیل حساسیت مربوط به تغییر ضرایب وزنی در تابع هدف بود که بستگی به اهداف بهره‌بردار شبکه دارند. تحلیل دوم بر روی بیشینه سرمایه‌گذاری اولیه انجام شد. نتایج این تحلیل گویای این بود که در سرمایه‌گذاری‌های کم، تجهیزات با هزینه‌های اولیه کم‌تری جایابی شده‌اند تا بتوانند به تعداد بیش‌تری در شبکه قرار گیرند و موجب بهینه‌سازی بیشتر تر تابع هدف شوند. با افزایش سرمایه‌گذاری کلیدهای بازبست و کلیدهای اتوماتیک که به نسبت، هزینه‌ی بیشتری دارند و کارآمدتر هستند، بیشتر در شبکه جایابی شدند.

#### علائم و نشانه‌ها

#### مجموعه‌ها:

$\Pi_1$  طول دوره مورد مطالعه؛

$\Pi_c$  تعداد نقطه بارها؛

خطاهای گذرا در شبکه است. از طرفی نتایج این بخش به‌خوبی اهمیت به‌کارگیری کلید بازبست را در کنار سایر تجهیزات کنترلی و حفاظتی نشان می‌دهد.

یکی از مقاصد مهم در مسئله‌ی مکان‌یابی تجهیزات کنترلی و حفاظتی شبکه یا در واقع بهبود خودترمیمی شبکه توزیع هوشمند الکتریکی، کاهش هزینه ناشی از وقفه مشترکین شبکه است. این کاهش هزینه وقفه مشترکین ارتباط مستقیمی با میزان سرمایه‌گذاری اولیه دارد. شکل (۷) میزان کاهش هزینه وقفه مشترکین را به درصد در سرمایه‌گذاری‌های مختلف نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در کم‌ترین سرمایه‌گذاری اولیه حدود ۴۰٪ هزینه وقفه مشترکین کاهش یافته است. این یعنی حدود ۵۹۵ هزار دلار در طول دوره مورد مطالعه و به‌طور میانگین ۳۹ هزار دلار سالانه کاهش هزینه وقفه مشترکین است و این رقم قابل‌ملاحظه‌ای در مقابل ۲۰ هزار دلار سرمایه‌گذاری است که انجام شده است. همچنین می‌توان به این نکته اشاره کرد که نه تنها هزینه سرمایه‌گذاری اولیه در سال اول جبران می‌شود بلکه ۱۹ هزار دلار بهره‌بردار از این سرمایه‌گذاری سود می‌برد.

همان‌گونه که مطرح شد با حداقل سرمایه‌گذاری (۲۰ هزار دلار) حدود ۴۰٪ هزینه ناشی از وقفه مشترکین شبکه کاهش یافت. دلیل این همه کاهش هزینه این است که شبکه اولیه مجهز به هیچ تجهیز حفاظتی یا کنترلی نشده بود و در مسئله بهینه‌سازی با قرارگیری چند تجهیز، شرایط پایایی شبکه بهتر شد. حال سوالی که مطرح می‌شود این است که با هر میزان افزایش سرمایه‌گذاری، به همان میزان کاهش هزینه ناشی از وقفه مشترکین خواهیم داشت؟ خیر، زیرا با افزایش سرمایه‌گذاری نسبت به سرمایه‌گذاری قبلی نقاط مانوری که برای نصب تجهیزاتی که بتوانند هزینه وقفه مشترکین را بیش‌تر کاهش دهند، کم‌تر می‌شود و همان‌گونه که در شکل (۷) پیداست با افزایش سرمایه‌گذاری در ابتدا هزینه وقفه مشترکین با شیب بیش‌تری کاهش می‌یابد و رفته‌رفته با افزایش بیش‌تر سرمایه‌گذاری این شیب کاهشی کم‌تر می‌شود.

#### ۴- جمع‌بندی

در این مقاله استفاده از کلیدهای بازبست در کنار فیوزها و کلیدهای کنترلی در قالب یک مسئله‌ی بهینه‌سازی به‌صورت یک برنامه‌ریزی غیرخطی آمیخته با عدد صحیح در شبکه توزیع هوشمند مطرح شد. تابع هدف در نظر گرفته‌شده برای این مسئله سه بخش دارد که هر بخش آن به‌صورت یکایی با ضرایب وزنی در تابع هدف مشارکت دارند. این سه

نرخ خرابی نقطه بار نام ناشی از خطای بلند مدت نام؛	$\lambda_{i,j}^s$	نوع مشترکین؛	Z
نرخ خرابی نقطه بار نام ناشی از کلیه خطاهای بلند مدت؛	$\lambda_i^s$	کل خطاهای شبکه؛	$n_f$
نرخ خرابی نقطه بار نام ناشی از خطای گذرا نام؛	$\lambda_{i,j}^m$	<b>ثابت‌ها:</b>	
نرخ خرابی نقطه بار نام ناشی از کلیه خطاهای گذرا؛	$\lambda_i^m$	مقدار تابع هدف مادامی که $\alpha=1$ ؛	$cost^{\min}$
مدتی که خطای نام در نقطه بار نام وقفه ایجاد کند؛	$\tau_{i,j}$	مقدار تابع هدف مادامی که $\beta=1$ ؛	$SAIDI^{\min}$
متغیر باینری مشخص‌کننده وجود کلید اتوماتیک از مسیر خطای نام تا نقطه بار نام؛	$I_{i,j}^{RCS}$	مقدار تابع هدف مادامی که $\delta=1$ ؛	$SAIFI^{\min}$
متغیر باینری مشخص‌کننده وجود کلید دستی از مسیر خطای نام تا نقطه بار نام؛	$I_{i,j}^{MS}$	هزینه خرید و نصب کلید کنترل از راه ور؛	$C_{RCS}^{inv}$
متغیر باینری مشخص‌کننده وجود کلید بازبست از مسیر خطای نام تا نقطه بار نام؛	$I_{i,j}^{rec}$	هزینه خرید و نصب کلید دستی؛	$C_{MS}^{inv}$
متغیر باینری مشخص‌کننده وجود فیوز از مسیر خطای نام تا نقطه بار نام؛	$I_{i,j}^{fuse}$	هزینه خرید و نصب فیوز؛	$C_{fuse}^{inv}$
		هزینه تعمیرات و نگهداری کلید کنترل از راه ور؛	$C_{RCS}^m$
		هزینه تعمیرات و نگهداری کلید دستی؛	$C_{MS}^m$
		هزینه تعمیرات و نگهداری کلید بازبست؛	$C_{rec}^m$
		هزینه تعمیرات و نگهداری فیوز؛	$C_{fuse}^m$

### مراجع

- Conducted by the National Energy Technology Laboratory for the U.S. Department of Energy Office of Elect, *Self-Heals*, Delivery and Energy Reliability, 2007.
- R. E. Brown, *Electric Power Distribution Reliability*, CRC press, 2002.
- Thomas, Ponny. *Evaluating an empirical relationship between recloser placement and reliability improvement in distribution networks*. Ph.D. Thesis, University of Johannesburg, 2016.
- ع. شهبازیان، ع. فریدونیان، «برنامه‌ریزی خطی مکان‌یابی و نوع‌سنجی کلیدهای کنترل از راه دور و کنترل دستی، برای بهبود پایایی شبکه‌های توزیع هوشمند»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد 48، شماره 4، شماره پیاپی 1615-1605، زمستان 1397.
- Izadi, Milad, et al. "A multistage MILP-based model for integration of remote control switch into distribution networks." Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS), 2016 International Conference on. IEEE, 2016.
- A. Fereidunian, M.M Hosseini, and M. Abbasi Talabari, "Toward Self-financed Distribution Automation Development: Time Allocation of Automatic Switches Installation in Electricity Distribution Systems," IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 11, no. 13, pp. 3350-3358, 2017.
- Xu, Yin, et al. "Placement of remote-controlled switches to enhance distribution system restoration capability," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 31, no. 2, pp. 1139-1150, 2016.
- A. Shahsavari, A. Fereidunian, S.M. Mazhari, "A joint automatic and manual switch placement within distribution systems considering operational probabilities of control sequences," International Transactions on Electrical Energy Systems, vol. 25, no. 11, pp. 2745-2768, 2015.
- J. R. Bezerra, G. C. Barroso, R. P. S. Leão and R. F. Sampaio, "Multiobjective Optimization Algorithm for Switch Placement in Radial Power Distribution Networks," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 30, no. 2, pp. 545-552, 2015.
- A. Abiri-Jahromi, M. Fotuhi-Firuzabad, M. Parvania and M. Mosleh, "Optimized Sectionalizing Switch Placement Strategy in Distribution Systems," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 27, no. 1, pp. 362-370, 2012.
- H. Dezaki, A. Abyaneh, A. Agheli, K. Mazlumi, "Optimized Switch Allocation to Improve the Restoration Energy in Distribution Systems," Journal of Electrical Engineering, vol. 63, no. 1, pp. 47-52, 2012.
- D.P. Bernardon, M. Sperandio, V.J. Garcia, L.N. Canha, A. Abaide, E.F. BoeckDaza, "AHP Decision- Making Algorithm to Allocate Remotely Controlled Switches in Distribution Networks," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 26, no. 3, pp. 1884-1892, 2011.
- I. G. Sardou, M. Banejad, R. Hooshmand, A. Dastfan, "Modified shuffled frog leaping algorithm for optimal switch placement in

- [31] Z. Li, X. Yuqin, W. Zengping, "Research on optimization of recloser placement of DG-enhanced distribution networks," 2008 Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, Nanjing, pp. 2592-2597, 2008.
- [32] A. Pregelj, M. Begovic and A. Rohatgi, "Recloser allocation for improved reliability of DG-enhanced distribution networks," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 21, no. 3, pp. 1442-1449, 2006.
- [33] A. Pombo, Vieira, João Murta-Pina, V. Fernão Pires, "A multiobjective placement of switching devices in distribution networks incorporating distributed energy resources," Elec. Power Sys., vol. 130, pp. 34-45, 2016.
- [34] G. D. Ferreira, A. S. Bretas and G. Cardoso, "Optimal distribution protection design considering momentary and sustained reliability indices," 2010 Modern Electric Power Systems, Wroclaw, pp. 1-8, 2010.
- [35] S. kh. A. Attari, et al, "A Novel Method Based on Teaching-Learning-Based Optimization for Recloser Placement with Load Model Consideration in Distribution System," Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science, vol. 2, pp. 1-10, 2016.
- [36] K. V. R. Gadiraju and M. R. Vallem, "Methods for reducing momentary interruptions in distribution systems," 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting, San Diego, CA, pp. 1-6, 2012.
- [37] L. Wang and C. Singh, "Reliability-Constrained Optimum Placement of Reclosers and Distributed Generators in Distribution Networks Using an Ant Colony System Algorithm," in IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews), vol. 38, no. 6, pp. 757-764, 2008.
- [38] A. Alam, V. Pant, B. Das, "Switch and recloser placement in distribution system considering uncertainties in loads, failure rates and repair rates," Electric Power Systems Research, vol. 140, pp. 619-630, 2016.
- [39] W. Tippachon, D. Rerkpreedapong, "Multi-objective optimal placement of switches and protective devices in electric power distribution systems using ant colony optimization," Electric Power Systems Research, vol.79, pp. 1171-1178, 2009.
- [40] Karpov, Anton I., and Dmitry A. Akimov. "Integral indicators improvement (SAIFI) of power supply reliability in electric distribution systems based on reclosers placement optimization." Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), 2018 IEEE Conference of Russian, 2018.
- [41] Almeida, Carlos Frederico Meschini, Gabriel Albieri Quiroga, Henrique Kagan, and Nelson Kagan. "Optimal Allocation of Automatic Reclosers" In Electric Distribution Network Planning, pp. 355-381. Springer, Singapore, 2018.
- [42] Heidari, A., Dong, Z. Y., Zhang, D., Siano, P., & Aghaei, J, "Mixed-Integer Nonlinear Programming Formulation for Distribution Networks Reliability Optimization," IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 14, no. 5, pp. 1952-1961, 2018.
- [43] M. Tawarmalani, N. V. Sahinidis, "A polyhedral branch-and-cut approach to global optimization," Mathematical Programming, vol. 103, no. 2, pp. 225-249, 2005.
- [۴۴] س.عباسپور، ک.زارع، ب.محمدی ایواتلو، «ارزیابی جنبه‌های فنی و اقتصادی شبکه توزیع با هدف توسعه DG بر مبنای کاربرد مدیریت اکتیو در شبکه»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۴، شماره ۴، شماره پیاپی ۷۰، زمستان ۱۳۹۳.
- distribution automation system using a multi-objective fuzzy approach," IET Generation, Transmission & Distribution vol. 6, no. 6, pp. 493-502, 2012.
- [14] H. Falaghi, M. R. Haghifam, Ch. Singh, "Ant Colony Optimization-Based Method for Placement of Sectionalizing Switches in Distribution Networks Using a Fuzzy Multi objective Approach," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 24, no. 1, pp. 268-276, 2009.
- [15] A. Moradi, M. Fotuhi-Firuzabad, "Optimal Switch Placement in Distribution Systems Using Trinary Particle Swarm Optimization Algorithm," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 23, no. 1, pp. 271-279, 2008.
- [16] L. Silva, R. Pereira, J. Rivier Abbad, J. Mantovani, "Optimized placement of control and protective devices in electric distribution systems through reactive tabu search algorithm," Electric Power Systems Research, vol.78, no. 3 pp. 372-381, 2008.
- [17] C.S. Chen, C.H. Lin, H.J. Chuang, C.S. Li, M.Y. Huang and Ch.W. Huang, "Optimal Placement of Line Switches for Distribution Automation Systems Using Immune Algorithm," IEEE Trans. on Power System, vol. 21, no. 3, pp. 1209-1217, 2006.
- [18] Y. Mao, *Protection System Design for Power Distribution Systems in the Presence of Distributed Generation*, Ph.D. Thesis, Faculty of Drexel University, 2005.
- [19] P. M. S. Carvalho, L. A. F. Ferreira and A. J. C. da Silva, "A decomposition approach to optimal remote controlled switch allocation in distribution systems," IEEE Transa. on Power Delivery, vol. 20, no. 2, pp. 1031-1036, 2005.
- [20] J.-H. Teng, Y.-H. Liu, "A novel ACS-based optimum switch relocation method," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 18, no. 1, pp. 113-120, 2003.
- [21] J. H, Teng and C. N. Lu, "Feeder - Switch Reallocation for Customer Interruption Cost Minimization," IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 17, pp. 254-259, 2002.
- [22] Ying. He, G. Anderson, and R.N. Allan, "Determining optimum location and number of automatic switching devices in distribution systems," Proceeding of the IEEE power of Tech'99 Conference, Budapest, Hungary, pp. 182-186, 1999.
- [23] G. Celli, F. Pilo, "Optimal sectionalizing switches allocation in distribution networks," IEEE Transaction Power Systems, vol. 14, no. 3, pp. 1167-1172, 1999.
- [24] G. Celli, F. Pilo, "Optimal sectionalizing switches allocation in distribution networks," IEEE Transaction Power Delivery, vol. 14, no. 3, pp.1167-1172, 1999.
- [25] P. Wang, R. Billinton, "Demand-side optimal selection of switching devices in radial distribution system planning," IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution, vol. 145, no. 4, pp. 409-414, 1998.
- [26] R. Billinton, S. Jonnavithula, "Optimal switching device placement in radial distribution systems," IEEE Transaction Power Systems, vol. 11, no. 3, pp. 1646-1651, 1996.
- [27] G. Levitín, S. Mazal-Tov, D. Elmakis, "Optimal sectionalizer allocation in electric distribution systems by genetic algorithm," Electric Power Systems Research, vol.31, no. 2, pp. 97-102, 1994.
- [28] J. M. Sohn, S. R. Nam, J. K. Park, "Value-based radial distribution system reliability optimization," in IEEE Trans. on P. S., vol. 21, no. 2, pp. 941-947, 2006.
- [29] Ž. Popović, S. Knežević and B. Brbaklić, "Optimal number, type and location of remotely controlled and supervised devices in distribution networks," IEEE Eindhoven PowerTech, Eindhoven, pp. 1-6, 2015.
- [30] Z. Popovic, B. Brbaklic, S. Knezevi, "A mixed integer linear programming based approach for optimal placement of different types of automation devices in distribution networks," Electric Power Systems Research, vol. 148, pp. 136-146, 2017.