



Semnan University

# Journal of Modeling in Engineering

Journal homepage: <https://modelling.semnan.ac.ir/>

ISSN: 2783-2538



## Research Article

# Online Vulnerability Assessment in Cascading Failure Analysis Using an Intelligence Monitoring Model

Saber Armaghani<sup>a,\*</sup>, Zahra Moravej<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Postdoctoral researcher, Faculty of Electrical and Computer Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

<sup>b</sup> Professor, Faculty of Electrical and Computer Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

## PAPER INFO

### Paper history:

Received: 12 September 2023

Revised: 25 December 2023

Accepted: 15 January 2024

### Keywords:

Special protection scheme,  
Under voltage load shedding,  
Shedding cost and loss minimization,  
Price based demand response model,  
Mixed integer optimization problem,  
Discrete- continuous PSO algorithm.

## ABSTRACT

Today, the Special Protection Scheme usage has been proposed as an effective and efficient strategy to reduce the impact of disturbance and avoid the occurrence of blackouts of the transmission network, which has different tasks. One of the tasks of the Special Protection Scheme is to develop a corrective control action to prevent the occurrence of long-term voltage instability. In this paper, a new model is proposed in the Special Protection Scheme for long-term under-voltage load shedding, which is based on minimizing the shedding cost and power losses in power systems, modeling voltage-dependent loads, load response model, and considering feeders. The economic and technical considerations in the proposed model play an essential role in the characteristics of the Special Protection Scheme for under voltage load shedding. Thus, in this paper, Demand Response modeling will be based on determining the cost of electric energy consumption in the emergency of the network in such a way as to cause a shift of consumption to improve the performance of the network. Since load feeders and load response are considered in this paper, the mentioned problem is defined in the form of discrete-continuous optimization to determine the location and amount of necessary load removal as well as the amount of load transfer between the load buses to establish long-term voltage stability in the transmission network using discrete and continuous particle swarm algorithm. The proposed model has been simulated in the standard IEEE 57-bus test system to determine and prove the effectiveness of the proposed Special Protection Scheme for load shedding.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2024.31740.2530>

© 2024 Published by Semnan University Press.

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

\* Corresponding author.

E-mail address: [zmoravej@semnan.ac.ir](mailto:zmoravej@semnan.ac.ir)

## How to cite this article:

Armaghani, S., & MORAVEJ, Z. (2024). Optimal Special Protection Scheme for long-term under-voltage load shedding based on minimizing shedding cost and power losses in power system. Journal of Modeling in Engineering, 22(77), 273-290. doi: 10.22075/jme.2024.31740.2530

# بهبود طرح حفاظت ویژه حذف بار تحت افت ولتاژ بلند مدت به منظور کاهش خاموشی- تلفات در سیستم قدرت

صابر ارمغانی<sup>۱</sup>، زهرا مروج<sup>۲\*</sup>

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۶/۲۱	<p>امروزه استفاده از طرح حفاظت ویژه به عنوان راهکاری موثر و کارا در کاهش اثرات نامطلوب اغتشاش و اجتناب از وقوع خاموشی سراسری شبکه انتقال مطرح شده است؛ که دارای وظایف مختلفی است. یکی از وظایف طرح حفاظت ویژه تدوین راهکار کنترل اصلاحی شبکه به منظور جلوگیری از وقوع ناپایداری بلند مدت ولتاژ است. در این مقاله، مدل جدید در طرح حفاظت ویژه حذف بار تحت افت ولتاژ بلند مدت پیشنهاد شده است که مبتنی بر کاهش هزینه خاموشی و کاهش تلفات در سیستم‌های قدرت، مدل‌سازی بارهای وابسته به ولتاژ، مدل پاسخ‌گویی بار، و در نظر گرفتن فیدرهای تغذیه کننده بار است. ملاحظات در نظر گرفته شده در مدل‌سازی، نقش مهم در مشخصه فنی و اقتصادی طرح حفاظت ویژه حذف بار تحت افت ولتاژ دارند. به طوریکه در این مقاله، مدل‌سازی پاسخ‌گویی بار بر اساس تعیین هزینه مصرف انرژی الکتریکی در وضعیت اضطراری شبکه به نحوی خواهد بود که باعث جابجایی مصرف در جهت بهبود عملکرد شبکه شود. از آنجایی که فیدرهای تغذیه کننده بار و پاسخ‌گویی بار در این مقاله در نظر گرفته شده است، مسئله مذکور در قالب بهینه‌سازی گسسته-پیوسته تعریف می‌شود؛ تا مکان و مقدار حذف بار لازم و همچنین مقدار جابجایی بار بین شین‌های شبکه برای برقراری پایداری ولتاژ بلند مدت در شبکه انتقال با استفاده از الگوریتم دسته‌ذرات گسسته و پیوسته تعیین شود. مدل پیشنهادی در شبکه نمونه استاندارد ۵۷ شین شبیه‌سازی شده است تا کارایی طرح حفاظت ویژه حذف بار پیشنهادی مشخص و اثبات شود.</p>
بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۱۰/۰۴	
پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۱۰/۲۵	
<p><b>واژگان کلیدی:</b>            طرح حفاظت ویژه،            حذف بار تحت افت ولتاژ،            کاهش هزینه خاموشی و تلفات،            مدل‌سازی پاسخ بار بر اساس قیمت،            بهینه‌سازی گسسته-پیوسته،            الگوریتم دسته ذرات گسسته-پیوسته.</p>	

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2024.31740.2530>

© 2024 Published by Semnan University Press.

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

## ۱- مقدمه

دارد [۲]؛ که نشانه‌ی آن، ایجاد پروفیل ولتاژ نامطلوب در بخشی از مناطق موجود در شبکه قدرت است [۳]. به منظور جلوگیری و یا کاهش اثرات نامطلوب فروپاشی ولتاژ و وقوع خاموشی در شبکه قدرت، حذف بار تحت افت ولتاژ می‌تواند شرایط ایمن بعد از اغتشاش در شبکه قدرت را ایجاد کند. حذف بار تحت افت ولتاژ به عنوان یکی از وظایف طرح حفاظت ویژه تعریف می‌شود؛ که فعالیت کنترلی اصلاحی

خاموشی پس از وقوع اغتشاش در سیستم‌های قدرت، معمولاً با منشاء وقوع انواع ناپایداری ولتاژ (ناپایداری ولتاژ کوتاه مدت، میان مدت، و بلندمدت) در سیستم‌های قدرت پدیدار می‌شود [۱]. از انواع مختلف اغتشاش که ممکن است در شبکه قدرت رخ دهد، قطع شدن ژنراتور و یا قطع شدن خط انتقال، بیشترین تاثیر را در وقوع انواع ناپایداری ولتاژ

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: [zmoravej@semnan.ac.ir](mailto:zmoravej@semnan.ac.ir)

۱. پژوهشگر پسا دکترا، دانشکده برق و کامپیوتر-گروه قدرت، دانشگاه سمنان

۲. استاد، دانشکده برق و کامپیوتر-گروه قدرت، دانشگاه سمنان

استناد به این مقاله:

ولتاژ در طرح حفاظت ویژه حذف بار تحت افت ولتاژ بلند مدت ولتاژ بسیار با اهمیت است، نقیصه دیگر مدل‌سازی‌های انجام شده در [۲، ۵، ۷-۱۱] این است که بار به صورت توان ثابت مدل‌سازی شده است؛ که باعث عدم کارایی مدل‌سازی‌ها در محیط بهره‌برداری واقعی می‌شود. بدین سبب، بار سیستم قدرت در مسئله حذف بار تحت افت ولتاژ بلند مدت که در [۱۲] مورد تحقیق قرار گرفته شده است، به صورت بار وابسته به ولتاژ است. اما ملاحظات فنی بهبود دهنده عملکرد شبکه در طرح حذف بار مانند کاهش تلفات سیستم و بهبود پروفیل ولتاژ سیستم‌های قدرت در نظر گرفته نشده است. همچنین، مدل‌سازی روشن و واضح در خصوص پاسخ‌گویی بار در [۱۲] انجام نشده است.

از طرفی دیگر، پاسخ‌گویی بار، روشی و تکنیکی است که استفاده از آن باعث پایداری شبکه می‌شود [۱۳]. مرجع [۱۴] مفاهیم اساسی و اصلی پاسخ‌گویی بار را پیشنهاد داده است؛ و در مرجع [۱۵] پاسخ‌گویی بار مبتنی بر ((قیمت)) و مبتنی بر ((انگیزه)) مدل‌سازی شده است. همچنین مدل پاسخ‌گویی بار مبتنی بر قیمت، در [۱۶] به عنوان روشی برای جابجا کردن مقدار بار کل شبکه از زمانی به زمان دیگر استفاده شده است تا انعطاف‌پذیری شبکه را افزایش دهد. در این مقاله، از روش تشریح در [۱۶] برای مدل‌سازی پاسخ‌گویی بار در حذف بار تحت افت ولتاژ استفاده شده است؛ که مقدار بار را بین شین‌های بار جابجا می‌کند. در نتیجه در این مقاله، مدل صریح و روشن برای در نظر گرفتن پاسخ‌گویی بار مبتنی بر تعیین قیمت در حل مسئله حذف بار تحت افت ولتاژ پیشنهاد شده است. در خصوص روش‌های حل مسئله حذف بار تحت افت ولتاژ، از آنجایی که مسئله طرح حفاظت ویژه حذف بار تحت افت ولتاژ بلند مدت دارای خصوصیت غیرخطی به دلیل بکارگیری تحلیل پخش بار در فرآیند حل است، استفاده از الگوریتم‌های جستجوی تصادفی اقبال بیشتری نسبت به روش‌های بهینه‌سازی تحلیلی یافته‌اند. به‌طوریکه روش‌های جستجوی تصادفی از جمله الگوریتم زنبور عسل [۷]، روش ملخ [۹]، الگوریتم تکاملی مبتنی بر تئوری آشوب در [۱۰]، و الگوریتم دسته ذرات باینری در [۱۱ و ۱۲] برای حل بهینه مسئله حذف بار تحت افت ولتاژ بلند مدت از سوی محققان پیشنهاد شده است. بعلاوه به منظور افزایش کارایی و دقت روش‌های جستجوی تصادفی، الگوریتم‌های جستجوی

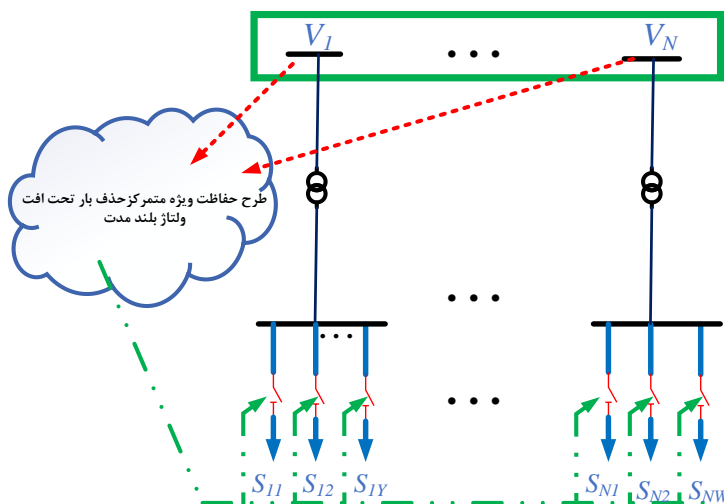
موثر و کارا است [۴]. در پایداری بلند مدت ولتاژ، افت ولتاژ شین به آهستگی در سیستم‌های قدرت اتفاق خواهد افتاد. بدین سبب، از تحلیل استاتیکی سیستم‌های قدرت (تحلیل پخش بار) به منظور اجتناب از صرف زمان زیاد برای انجام محاسبات استفاده می‌شود [۵]. طرح حفاظت ویژه دارای دو فاز است [۶]، فاز اول شامل مدل‌سازی، طراحی، و تدوین طرح اصلاحی حذف بار تحت افت ولتاژ است، و فاز دوم پیاده‌سازی فاز اول در شرایط بهره‌برداری بهنگام است (که جزء هدف این مقاله برای تحقیقات آینده است). فاز اول طرح حفاظت ویژه حذف بار تحت افت ولتاژ بلند مدت، در حقیقت تعیین می‌کند که ((چه مقدار بار؟)) و ((در کجا؟)) از سیستم‌های قدرت حذف شود تا فعالیت اصلاحی منجر به خارج شدن شبکه از وضعیت ناپایداری بلند مدت ولتاژ شده و در وضعیت پایداری ولتاژ بلند مدت قرار گیرد [۶]. همچنین، تعریف مسئله در قالب مسئله‌ای بهینه‌سازی، یکی از پرکاربردترین رویکردها است که توسط محققان پیشنهاد شده است [۲، ۵، ۷-۱۲].

معمولاً رویکرد بهینه‌سازی برای حل مسئله حذف بار تحت افت ولتاژ بلند مدت با در نظر گرفتن ملاحظات اقتصادی مانند کاهش مقدار خاموشی مورد نیاز [۲] و تسویه‌بازار برق در [۵]، و ملاحظات فنی-اقتصادی مانند کاهش مقدار خاموشی و کاهش تلفات در [۷]، کاهش مقدار و هزینه خاموشی و همچنین کاهش مقدار جهش ولتاژ تمام شین‌ها از مقدار مطلوب ۱ پربونیت در [۸]، کاهش مقدار خاموشی و افزایش پایداری ولتاژ در [۹]، و کاهش شاخص پایداری ولتاژ پیشنهادی در [۱۰] مورد تحقیق قرار گرفته شده است. تمام مدل‌سازی‌هایی که در [۲، ۵، ۷-۱۰] انجام شده است مبتنی بر بهینه‌سازی پیوسته است؛ که دارای نقیصه ((عدم کارایی)) در طرح حفاظت ویژه حذف بار تحت افت ولتاژ بلند مدت در محیط بهره‌برداری واقعی سیستم‌های قدرت است. زیرا نقش اساسی فیدرهای تغذیه‌کننده بار متصل به شین‌های بار در مدل‌سازی حذف بار در نظر گرفته نشده است. شماتیک طرح حفاظت ویژه متمرکز حذف بار تحت افت ولتاژ بلند مدت در شکل (۱) نشان داده شده است.

با توجه به شکل (۱)، کاهش مقدار و هزینه خاموشی با در نظر گرفتن فیدرهای تغذیه‌کننده بار در [۱۱]، و کاهش مقدار خاموشی با در نظر گرفتن مدل پاسخ‌گویی بار و فیدرهای تغذیه‌کننده بار در [۱۲] مورد تحقیق قرار گرفته شده است. بعلاوه، از آنجایی که مدل‌سازی بار وابسته به

دسته ذرات باینری که در [۱۱ و ۱۲] پیشنهاد شده است از نوع گسسته است. زیرا ماهیت مسئله بهینه‌سازی به دلیل مدل‌سازی فیدرهای تغذیه‌کننده بار از نوع بهینه‌سازی گسسته است. مرور جامعی از انواع روش‌های حل مسئله حذف بار تحت افت ولتاژ بلند مدت ولتاژ در [۱۷] تشریح شده است.

تصادفی ترکیبی مانند دسته ذرات- ژنتیک در [۲]، دسته ذرات-زنبور عسل در [۸] برای حل مسئله طرح حفاظت ویژه حذف بار تحت افت ولتاژ پیشنهاد شده است. همانطور که تشریح شد، الگوریتم‌های جستجوی تصادفی پیشنهاد شده در [۲، ۵، ۷-۱۰] از نوع پیوسته هستند؛ زیرا ماهیت مسئله بهینه‌سازی پیوسته بوده است. در حالی که الگوریتم



شکل ۱: شماتیک طرح حفاظت ویژه متمرکز حذف بار تحت افت ولتاژ بلند مدت با در نظر گرفتن فیدر تغذیه بار

جدول ۱: مقایسه کیفی بین مدل‌سازی پیشنهادی در این مقاله با مدل‌های مورد تحقیق قرار گرفته شده توسط محققان دیگر

مدل‌سازی ماهیت بار			ملاحظات فنی			ملاحظات اقتصادی		روش‌ها
پاسخ‌گویی بار	مدل بار وابسته به ولتاژ	فیدر تغذیه کننده بار	شاخص پایداری ولتاژ	پروفیل ولتاژ	تلفات	تسویه بازار برق	هزینه خاموشی	
							*	[۲]
							*	[۵]
					*		*	[۷]
				*			*	[۸]
			*				*	[۹]
			*				*	[۱۰]
		*					*	[۱۱]
*	*	*					*	[۱۲]
*	*	*	*	*	*		*	پیشنهادی

سیستم‌های قدرت، در پایداری ولتاژ شبکه بعد از اغتشاش موثر است. مدل‌سازی بار وابسته به ولتاژ در رابطه (۱) و (۲) به ترتیب برای توان اکتیو و راکتیو در شبکه انتقال تشریح شده است [۱۲].

$$P_{Li}(V_i) = P_{Li}^0 \left[ \alpha_P^Z \left( \frac{V_i}{V_0} \right)^2 + \beta_P^I \left( \frac{V_i}{V_0} \right) + \gamma_P^P \right] \quad (1)$$

$$Q_{Li}(V_i) = Q_{Li}^0 \left[ \alpha_Q^Z \left( \frac{V_i}{V_0} \right)^2 + \beta_Q^I \left( \frac{V_i}{V_0} \right) + \gamma_Q^P \right] \quad (2)$$

که در آن  $P_{Li}^0$  و  $Q_{Li}^0$  به ترتیب توان اکتیو و راکتیو پایه هستند،  $V_0$  ولتاژ نامی که معمولاً ۱ پریونیت در نظر گرفته می‌شود،  $\alpha_P^Z$  و  $\alpha_Q^Z$  به ترتیب ضرایب مربوط به بخش امپدانس ثابت توان اکتیو و راکتیو است،  $\beta_P^I$  و  $\beta_Q^I$  به ترتیب ضرایب مربوط به بخش جریان ثابت در توان اکتیو و راکتیو بار می‌شود، و در نهایت  $\gamma_P^P$  و  $\gamma_Q^P$  به ترتیب ضرایب مربوط به بخش توان ثابت در توان اکتیو و راکتیو است.

## ۲-۲- مدل‌سازی پاسخ‌گویی بار مبتنی بر هزینه مصرف انرژی در هر شین

به منظور ایجاد امکان جابجا شدن بار بین شین‌های سیستم قدرت به منظور بهبود عملکرد سیستم قدرت در وضعیت اضطراری بعد از اغتشاش، از مدل پاسخ‌گویی بار مبتنی بر هزینه مصرف انرژی در هر شین به عنوان روشی موثر و کارا در این مقاله استفاده می‌شود. نرخ تغییرات توان اکتیو بارها  $k^{el}$  و نرخ تغییرات قیمت مصرف انرژی در هر شین  $k^{PF}$  به ترتیب در رابطه‌های (۳) و (۴) تشریح شده است.

$$k^{el} = \frac{\Delta P_D^{el}}{P_D^{el}} \quad (3)$$

$$k^{PF} = \frac{\Delta P_p^{PF}}{P_p^{PF}} \quad (4)$$

که در آن  $\Delta P_D^{el}$  تغییرات بار،  $P_D^{el}$  مقدار بار پایه،  $\Delta P_p^{PF}$  تغییرات هزینه مصرف انرژی،  $P_p^{PF}$  هزینه پایه است. در مدل پاسخ‌گویی بار ارتباط بین نرخ تغییرات بار و تغییرات هزینه مصرف انرژی در هر شین در رابطه (۵) تشریح شده است.

$$k_i^{el} = e_{ij} k_j^{PF} \quad (5)$$

$$k_j^{el} = e_{ij} k_j^{PF} \quad (6)$$

که در آن  $e_{ij}$  و  $e_{ji}$  به ترتیب ضرایب الاستیته خودی و متقابل

به منظور افزایش کارایی طرح حفاظت ویژه حذف بار تحت افت ولتاژ بلند مدت در محیط بهره‌بردار واقعی با در نظر گرفتن هدف کاهش تلفات، بهبود پروفیل ولتاژ، و افزایش شاخص پایداری ولتاژ در سیستم‌های قدرت، در این مقاله مدل حذف بار تحت افت بلند مدت ولتاژ با هدف کاهش هزینه خاموشی، کاهش تلفات، بهبود پروفیل ولتاژ، افزایش پایداری ولتاژ، مدل‌سازی بار وابسته به ولتاژ، و فیدرهای تغذیه‌کننده بار پیشنهاد شده است. بعلاوه مدل‌سازی صریح و روشن در خصوص ماهیت پاسخ‌گویی بار در این مقاله پیشنهاد و انجام شده است. همچنین به منظور حل مدل پیشنهاد حذف بار تحت افت ولتاژ بلند مدت پیشنهادی از الگوریتم دسته‌ذرات باینری-پیوسته استفاده شده است. زیرا در نگاه نخست، مدل پیشنهادی، دارای متغیرهای گسسته (فیدر تغذیه‌کننده بار) و پیوسته (تعیین قیمت مصرف انرژی در هر شین) است؛ و در نگاه دوم، الگوریتم دسته ذرات دارای خصوصیات ویژه‌ای مانند پیاده‌سازی ساده، تعداد پارامترهای کنترلی از پیش تعریف شده کم، ظرفیت حافظه مطلوب، کارایی و موثری زیاد در ایجاد تنوع در جمعیت است [۱۸]. مقایسه کیفی از مدل‌سازی پیشنهادی در این مقاله با مدل‌سازی انجام شده توسط محققان دیگر در جدول ۱ تشریح شده است.

این مقاله به این شرح بخش‌بندی می‌شود که مدل‌بینه‌سازی پیشنهادی به همراه مدل‌سازی بار وابسته به ولتاژ در بخش دوم تشریح شده است، در بخش سوم در نظر گرفتن مدل بار وابسته به ولتاژ در تحلیل بخش بار توضیح داده شده است و در انتها بخش سوم، الگوریتم دسته ذرات باینری-پیوسته در حل مسئله پیشنهادی تشریح شده است، کارایی مدل پیشنهادی در بخش چهارم از طریق نتایج عددی اثبات شده است، و بخش پنجم از این مقاله به نتیجه‌گیری پرداخته شده است.

## ۲- مدل‌سازی طرح حفاظت ویژه متمرکز بار تحت افت ولتاژ بلند مدت

در این بخش، مدل ریاضی بارهای وابسته به ولتاژ، پاسخ‌گویی بار مبتنی بر هزینه مصرف، شاخص پایداری ولتاژ پیشنهادی، و نیز مدل‌سازی مسئله طرح حفاظت ویژه متمرکز حذف بار تحت افت ولتاژ بلند مدت تشریح می‌شوند.

### ۲-۱- مدل‌سازی بارهای وابسته به ولتاژ

در واقعیت، مشخصه وابسته به ولتاژ بودن بارها در

شناخته می‌شود،  $V_i$  دامنه ولتاژ شین  $i$ ام است که به عنوان شین ابتدای خط  $k$  ام شناخته می‌شود، و  $X_{ij}^k$  راکتانس سری خط  $k$ ام است که شین‌های  $i$  و  $j$  را به یکدیگر متصل کرده است.  $FVSIL(k)$  تابع شاخص پایداری ولتاژ برای خط  $k$ ام است، و  $FVSI$  شاخص پایداری ولتاژ سیستم قدرت است. اما اگر از شاخص [۱۷] به طور مستقیم در تابع هدف استفاده شود باعث می‌شود که ولتاژ شین‌ها به طور فزاینده‌ای بیشتر از مرز بالا مجاز ولتاژ شود. زیرا شاخص پایداری ولتاژ سریع رابطه معکوس با مجذور ولتاژ دارد. بدین سبب، شاخص پایداری ولتاژ پیشنهادی به منظور غلبه بر این نقیصه در این مقاله ارائه شده است که در رابطه (۹) تشریح شده است.

$$FVSIE = \sum_{k=1}^{NL} \left| \frac{FVSIL(k) - FVSIL_D(k)}{FVSIL_D(k)} \right| \quad (9)$$

که در آن  $FVSIE$  شاخص پایداری پیشنهادی منطبق یافته با مسئله بهینه‌سازی است،  $FVSIL_D$  شاخص پایداری ولتاژ سریع خط  $k$ ام به ازای دامنه ولتاژ مطلوب در سیستم قدرت است. در این مقاله، برای محاسبه  $FVSIL_D$  فرض شده است که ولتاژ مطلوب شین‌های ژنراتور برابر ولتاژ تنظیم شده در شرایط بهره‌برداری نرمال است و دامنه ولتاژ مطلوب برای شین‌های بار برابر ۱ پریونت است.

## ۲-۴- مدل‌سازی طرح حذف بار تحت افت ولتاژ به منظور جلوگیری از ناپایداری ولتاژ بلند مدت در قالب مسئله بهینه‌سازی

مدل‌سازی مسئله طرح حذف بار تحت افت ولتاژ به منظور جلوگیری از ناپایداری ولتاژ بلند مدت در قالب مسئله بهینه‌سازی، دارای تابع هدف و قیود است که در این بخش تشریح می‌شوند. هدف، جلوگیری از وقوع ناپایداری ولتاژ بلند مدت به همراه کاهش تلفات، تنها با طراحی حذف بار است؛ و از مدل‌سازی فعالیت تغییر تپ ترانس، تنظیم ولتاژ شین‌های ژنراتوری، کلیدزنی و تنظیم مقدار توان راکتیو بانک‌های خازنی صرف نظر شده است (مدیریت سمت بار).

### الف) تابع هدف:

تابع هدف در مسئله طرح حذف بار تحت افت ولتاژ به منظور جلوگیری از وقوع ناپایداری ولتاژ بلند مدت در قالب هزینه خاموشی، تلفات، پروفیل ولتاژ، و پایداری ولتاژ سیستم‌های قدرت (تابع چند هدفه) مدل‌سازی شده است که در رابطه (۱۰) تشریح شده است.

انرژی مصرفی و هزینه است که نشان‌دهنده پاسخ‌گویی بار به تغییرات هزینه مصرف در شین  $i$ ام و یا شین  $j$ ام است. بدین سبب، می‌توان مدل پاسخ بار در قالب ماتریس ارتباط بین شین‌ها تعریف کرد که در رابطه (۷) تشریح شده است.

$$\begin{bmatrix} k_1^{el} \\ k_2^{el} \\ \vdots \\ k_{NB}^{el} \end{bmatrix} = E \begin{bmatrix} k_1^{pr} \\ k_2^{pr} \\ \vdots \\ k_{NB}^{pr} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$= \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & \cdots & e_{1NB} \\ e_{21} & e_{22} & \cdots & e_{2NB} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e_{NB1} & e_{NB2} & \cdots & e_{NB NB} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_1^{pr} \\ k_2^{pr} \\ \vdots \\ k_{NB}^{pr} \end{bmatrix}$$

که در آن  $NB$  تعداد شین در سیستم قدرت،  $E$  ماتریس الایسته مصرف بر اساس قیمت مصرف انرژی است که درایه قطری آن الایسته خودی و درایه غیر قطری آن الایسته متقابل است. با توجه به رابطه (۳)، (۴)، و (۷)، تغییرات هزینه مصرف انرژی در شین‌ها به عنوان متغیر مستقل در بهینه‌سازی تعریف می‌شود و تغییرات توان شین‌ها به عنوان متغیر وابسته در الگوریتم بهینه‌سازی تعریف خواهد شد.

## ۲-۳- شاخص پایداری ولتاژ پیشنهادی

به منظور تعریف تابع پایداری ولتاژ، از شاخص پایداری ولتاژ سریع در این مقاله استفاده شده است. شاخص پایداری ولتاژ برای هر خط انتقال در شبکه و خصوصیات ولتاژ و بارهای متصل به شین‌های ابتدا و انتهای یک خط انتقال تعریف می‌شود؛ که به عنوان پرکاربردترین شاخص پایداری ولتاژ برای تعیین شین ضعیف به منظور فعالیت حذف بار شناخته می‌شود [۱۷]. به طوریکه مقدار شاخص پایداری ولتاژ سریع برای هر خط انتقال در ((بازه صفر و یک)) قرار می‌گیرد. هرچه مقدار شاخص پایداری ولتاژ کوچکتر باشد به معنی پایداری بیشتر ولتاژ سیستم قدرت است [۱۷]. شاخص پایداری ولتاژ سریع در رابطه (۸) تشریح شده است.

$$FVSIL(k) = \frac{4 \times (Z_{ij}^k)^2 \times Q_j}{V_i^2 \times X_{ij}^k} \quad (8)$$

$$FVSI = \sum_{k=1}^{NL} FVSIL(k)$$

که در آن  $Z_{ij}^k$  امپدانس سری خط انتقال  $k$ ام است که شین‌های  $i$  و  $j$  را به یکدیگر متصل می‌کند،  $Q_j$  توان راکتیو بار متصل به شین  $j$ ام که به عنوان شین انتهایی خط

که در آن  $G_k$  کندوکنانس خط  $k$ ام که شین  $m$ ام را به شین  $m$ ام متصل کرده است،  $V_m, V_n$  به ترتیب دامنه ولتاژ شین‌های  $m$  و  $n$  که خط  $k$ ام بین آنها متصل شده است،  $\theta_{nm}$  اختلاف زاویه ولتاژهای شین  $n$  و  $m$  است،  $NL$  تعداد خطوط موجود در شبکه انتقال، و  $\theta_{ij}$  زاویه امیدانس خط متصل کننده شین  $m$ ام به  $n$ ام است،  $b$ ، شمارنده شین‌های موجود در سیستم‌های قدرت است. تابع توصیف پروفیل ولتاژ در رابطه (۱۳) تشریح شده است.

$$f_3 = \sum_{b=1}^{NB} |1 - V_b| \quad (13)$$

که در آن  $V_b$  ولتاژ شین  $b$ ام است. تابع توصیف پایداری ولتاژ در رابطه (۱۴) تشریح شده است

$$f_4 = FVSIE \quad (14)$$

#### ب) قیود

قیود مسئله پیشنهادی طرح حذف بار برای جلوگیری از وقوع ناپایداری ولتاژ بلند مدت که به سه دسته اصلی (قیود مربوط به پخش توان و امنیت سیستم قدرت بعد از اغتشاش، قیود فنی مربوط به اجرای حذف بار، و قیود مربوط به مدل پاسخ‌گویی بار) تقسیم می‌شوند که در (۱۵) تا (۲۴) تشریح شده است. روابط (۱۵) و (۱۶) پخش بار گره‌ای را مدل می‌کند. که در آن،  $UV^P$  و  $UV^Q$  عددی بین صفر تا حداکثر مقدار حذف بار مجاز است که نشان‌دهنده مقدار درصد بار پایه ( $P_{Lk}^0$  و  $1$ ) حذف شده است (متغیر بهینه‌سازی است که در الگوریتم حل تعیین می‌شود).

$$OF = \min \left( \begin{array}{l} \alpha_1 \times f_1 + \alpha_2 \times \omega_1 \times f_2 \\ + \alpha_3 \times \omega_2 \times f_3 + \alpha_4 \times \omega_3 \times f_4 \end{array} \right) \quad (10)$$

که در آن  $OF$  تابع چندهدفه است،  $f_1$  تابع هزینه خاموشی،  $f_2$  تابع تلفات شبکه،  $f_3$  تابع پروفیل ولتاژ،  $f_4$  تابع پایداری ولتاژ شبکه است،  $\alpha_1$  اولویت‌دهی تابع هدف هزینه نسبت به اهداف دیگر،  $\alpha_2$  ضریب اولویت‌دهی تابع هدف تلفات به نسبت اهداف دیگر،  $\alpha_3$  ضریب اولویت‌دهی تابع هدف پروفیل ولتاژ نسبت به اهداف دیگر، و  $\alpha_4$  ضریب اولویت‌دهی تابع هدف پایداری ولتاژ نسبت به اهداف دیگر است (مجموع ضرایب اولویت‌بندی برابر عدد ۱ است).  $\omega_1$  تا  $\omega_3$  ضرایب همسان‌سازی اهداف تلفات، پروفیل ولتاژ، و پایداری ولتاژ نسبت به تابع هدف هزینه خاموشی است. تابع توصیف هزینه خاموشی بار در رابطه (۱۱) تشریح شده است.

$$f_1 = \sum_{i=1}^{NB} \left( C_i \times \sum_{j=1}^{NF_i} C_{ij} \times \Delta P_j^{shed} \right) \quad (11)$$

که در آن  $\Delta P_j^{shed}$ ،  $C_i$ ،  $C_{ij}$ ،  $NF_i$ ، و  $NB$  به ترتیب مقدار توان اکتیو حذف شده از فیدر  $i$ ام در شین  $i$ ام است، ثابت هزینه خاموشی بار تحمیل شده به مصرف کنندگان متصل به شین  $i$ ام، هزینه خاموشی بار تحمیل شده به مصرف‌کنندگان متصل به فیدر  $i$ ام در شین  $i$ ام، تعداد فیدرهای متصل به شین  $i$ ام، و تعداد کل شین‌های بار در شبکه انتقال است. تابع توصیف تلفات کل شبکه در رابطه (۱۲) تشریح شده است.

$$f_2 = \sum_{k=1}^{NL} G_k \left( V_n^2 + V_m^2 - 2V_n V_m \cos \theta_{nm} \right) \quad (12)$$

$$P_{Gk} - \gamma_P^P (1 - UV^P) P_{Lk}^0 = \left\{ V_k \sum_{n=1}^{NB} V_n Y_{kn} \cos(\delta_k - \delta_n - \theta_{kn}) + (1 - UV^P) P_{Lk}^0 \left[ \alpha_P^Z \left( \frac{V_k}{V_{0k}} \right)^2 + \beta_P^I \left( \frac{V_k}{V_{0k}} \right) \right] \right\} \quad (15)$$

$$Q_{Gk} - \gamma_Q^Q (1 - UV^Q) Q_{Lk}^0 = \left\{ V_k \sum_{n=1}^{NB} V_n Y_{kn} \sin(\delta_k - \delta_n - \theta_{kn}) + (1 - UV^Q) Q_{Lk}^0 \left[ \alpha_Q^Z \left( \frac{V_k}{V_{0k}} \right)^2 + \beta_Q^I \left( \frac{V_k}{V_{0k}} \right) \right] \right\} \quad (16)$$

$$V_{Lk}^{\min} \leq V_{Lk} \leq V_{Lk}^{\max} \quad k = 1, 2, \dots, NB \quad (17)$$

$$Q_{Gk}^{\min} \leq Q_{Gk} \leq Q_{Gk}^{\max} \quad k = 1, 2, \dots, NG \quad (18)$$

در قیود نامساوی مربوط به ولتاژ شین‌ها، توان راکتیو خروجی ژنراتورها، و توان عبوری از خطوط بعد از اغتشاش (به عنوان قیود امنیت سیستم قدرت) به ترتیب روابط (۱۷) تا (۱۹) معرفی می‌شوند:

عملکرد شبکه در وضعیت اضطراری بهبود یابد.

### ۳- روش حل مسئله

در ابتدای این بخش، در نظر گرفتن بار وابسته به ولتاژ در تحلیل پخش بار تشریح می‌شود و در انتهای این بخش، حل مسئله با استفاده از الگوریتم دسته ذرات تشریح خواهد شد.

#### ۳-۱- تحلیل پخش بار با مدل بار وابسته به ولتاژ

بدون از دست رفتن کلیت موضوع و با فرض اینکه  $UV^P$  و  $UV^Q$  در رابطه‌های (۱۵) و (۱۶) برابر صفر باشند (حذف بار صورت نگیرد)، برای حل روابط (۱۵) و (۱۶) چهار گام اصلی روش نیوتن-رافسون تشکیل می‌شود. بردارهای مجهول و معلوم در تکرار  $k$ ام در رابطه (۲۵) تشریح شده است.

$$\Delta y^{ZIP}(i) = \begin{bmatrix} \Delta P^{ZIP}(i) \\ \Delta Q^{ZIP}(i) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P^{ZIP} - P^{ZIP}[X^{ZIP}(i)] \\ Q^{ZIP} - Q^{ZIP}[X^{ZIP}(i)] \end{bmatrix} \quad (25)$$

که در آن  $X^{ZIP}(i)$  بردار جواب معادله غیر خطی است که مطابق رابطه (۲۶)، شامل بردار زاویه و اندازه ولتاژ شین‌ها در شبکه انتقال است.

$$X^{ZIP}(i) = \begin{bmatrix} \delta^{ZIP}(i) \\ V^{ZIP}(i) \end{bmatrix} \quad (26)$$

مقدار ثابت توان اکتیو  $P^{ZIP}$  و راکتیو  $Q^{ZIP}$  در رابطه (۲۵) مطابق رابطه (۲۷) خواهد بود

$$\begin{aligned} P^{ZIP} &= P_G - P_{Lk}^0 \gamma_P^P \\ Q^{ZIP} &= Q_G - Q_{Lk}^0 \gamma_Q^P \end{aligned} \quad (27)$$

در نهایت، تابع غیر خطی وابسته به بردار مجهول  $P^{ZIP}[X^{ZIP}(i)]$  و  $Q^{ZIP}[X^{ZIP}(i)]$  در رابطه (۲۵) برای شین  $k$ ام به صورت رابطه (۲۸) تعریف می‌شود.

از آنجایی که وابستگی بار تنها به اندازه ولتاژ در شین است، زیرماتریس‌های  $J1$  و  $J3$  مربوط به ژاکوبین معادل غیرخطی پخش بار بارهای ZIP مشابه زیر ماتریس‌های  $J1$  و  $J3$  ژاکوبین مربوط به بار توان ثابت است؛ و تنها زیرماتریس‌های  $J2$  و  $J4$  مربوط به ماتریس ژاکوبین شبکه انتقال با بار ZIP با زیرماتریس‌های  $J2$  و  $J4$  مربوط به ماتریس ژاکوبین شبکه انتقال با بار توان ثابت متفاوت است. زیر ماتریس‌های مربوط

$$|S_{Lk}| \leq |S_{Lk}^{\max}| \quad k = 1, 2, \dots, NL \quad (19)$$

که در آن  $NG$  و  $NL$  به ترتیب تعداد کل شین‌های ژنراتوری، و تعداد کل خطوط شبکه انتقال هستند. قیود مربوط به اجرای حذف بار شامل: (۱) حداکثر مقدار حذف بار در شین، و (۲) ثابت بودن ضریب قدرت بار متصل به شین بعد از حذف شدن بار است که به ترتیب در روابط (۲۰) و (۲۱) تشریح شده است.

$$\sum_{j=1}^{NF_j} \Delta P_j^{shed} \leq \Delta P_i^{shed, \max} \quad (20)$$

$$\frac{\Delta P_{ji}^{shed}}{P_{ji}^0} = \frac{\Delta Q_{ji}^{shed}}{Q_{ji}^0} \quad (21)$$

به منظور در نظر گرفتن و برآورده کردن قیود مدل‌سازی پاسخ بار، شاخص برآورده‌سازی انتظارات مشتری تعریف می‌شود تا از کنترل‌پذیری تغییرات بار در محدوده مجاز اطمینان حاصل شود. همچنین مجموع تغییرات بار بین شین‌های سیستم قدرت باید برابر صفر شود؛ و در نهایت تغییرات هزینه مصرف انرژی در هر شین باید در محدوده قرار گیرد. قیود مربوط به سطح انتظار مشتریان، مجموع تغییرات بار در شین‌ها، محدوده مجاز تغییرات قیمت مصرف انرژی در هر شین به ترتیب در روابط (۲۲) تا (۲۴) تشریح شده است.

$$Sat = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{NB} |\Delta P_D^{el}(i)|}{\sum_{i=1}^{NB} P_D^{el}(i)}, \quad Sat \geq Sat^{\min} \quad (22)$$

$$\sum_{i=1}^{NB} \Delta P_D^{el}(i) = 0 \quad (23)$$

$$|\Delta P_p^{pr}| \leq \Delta P_p^{pr, \lim} \quad (24)$$

که در رابطه (۲۲)،  $Sat$  شاخص انتظار و سطح رضایتمندی مصرف کننده انرژی الکتریکی است که باید از  $Sat^{\min}$  بیشتر باشد،  $Sat^{\min}$  حداقل سطح رضایتمند مصرف کننده است، و  $\Delta P_p^{pr, \lim}$  بیشینه تغییرات مجاز قیمت در شین بار است. بدین سبب، با تنظیم قیمت مصرف انرژی در هر شین می‌توان بار سیستم قدرت را به نحوی تنظیم کرد که



برابر با  $J_2^P$  و  $J_4^P$  است؛ که درایه قطر اصلی آن مشتق وابستگی بار به اندازه ولتاژ شین متصل به آن است؛ و درایه غیر قطر اصلی آن برابر صفر است. با تشکیل شدن ماتریس ژاکوبین برای حل معادلات پخش بار در شبکه انتقال با بارهای وابسته به ولتاژ در هر تکرار، مقدار جابجایی بردار مجهول با حل رابطه (۳۰) محاسبه خواهد شد.

$$\begin{bmatrix} J_1^{ZIP}(i) & J_2^{ZIP}(i) \\ J_3^{ZIP}(i) & J_4^{ZIP}(i) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta^{ZIP}(i) \\ \Delta V^{ZIP}(i) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P^{ZIP}(i) \\ \Delta Q^{ZIP}(i) \end{bmatrix} \quad (30)$$

و در نهایت مقدار بردار مجهول در تکرار  $(i+1)$  با استفاده از رابطه (۳۱) محاسبه می‌شود.

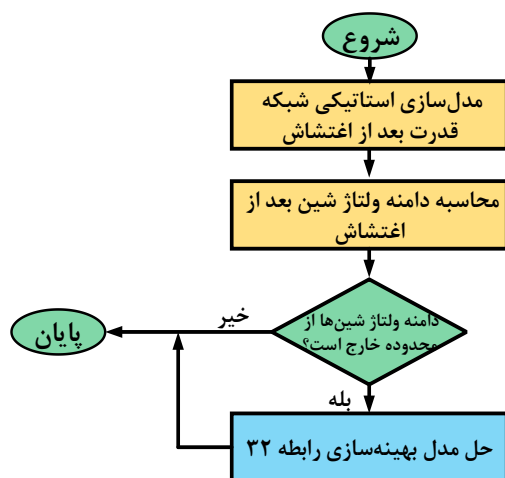
به ماتریس ژاکوبین معادلات پخش بار شبکه انتقال با بار ZIP در رابطه (۲۹) تشریح شده است.

$$\begin{aligned} J_1^{ZIP}(i) &= J_1^P(i) \\ J_2^{ZIP}(i) &= \begin{bmatrix} J_2^P(i) \\ +diag \left( P_L^0 \left[ 2\alpha_P^Z \left( \frac{V(i)}{V_0} \right) + \beta_P^I \left( \frac{1}{V_0} \right) \right] \right) \end{bmatrix} \\ J_3^{ZIP}(i) &= J_3^P(i) \\ J_4^{ZIP}(i) &= \begin{bmatrix} J_4^P(i) \\ +diag \left( Q_L^0 \left[ 2\alpha_Q^Z \left( \frac{V(i)}{V_0} \right) + \beta_Q^I \left( \frac{1}{V_0} \right) \right] \right) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (29)$$

که در آن تابع  $diag(\cdot)$  ماتریس قطری با ابعادی به ترتیب

$$\begin{aligned} P_k^{ZIP} \left[ X_k^{ZIP}(i) \right] &= P_{Lk}^0 \left[ \alpha_P^Z \left( \frac{V_k(i)}{V_{0k}} \right)^2 + \beta_P^I \left( \frac{V_k(i)}{V_{0k}} \right) \right] + V_k(i) \sum_{n=1}^{NB} V_n(i) Y_{kn} \cos(\delta_k(i) - \delta_n(i) - \theta_{kn}) \\ Q_k^{ZIP} \left[ X_k^{ZIP}(i) \right] &= Q_{Lk}^0 \left[ \alpha_Q^Z \left( \frac{V_k(i)}{V_{0k}} \right)^2 + \beta_Q^I \left( \frac{V_k(i)}{V_{0k}} \right) \right] + V_k(i) \sum_{n=1}^{NB} V_n(i) Y_{kn} \sin(\delta_k(i) - \delta_n(i) - \theta_{kn}) \end{aligned} \quad (28)$$

می‌شود،  $u$  متغیرهای وابسته مسئله بهینه‌سازی است (برای مثال، دامنه ولتاژ شین‌ها که از حل مسئله پخش بار بدست می‌آید)، و  $h$  مجموعه توابع مربوط به قیود نامساوی در مسئله بهینه‌سازی است. روند نمای کلی از حل اجرای حذف بار تحت افت ولتاژ در شکل ۲ نشان داده شده است. در حقیقت یافتن جواب (قابل وجود) برای معادلات پخش بار، با استفاده از حذف بار از طریق حل معادلات مسئله بهینه‌سازی رابطه (۳۲) هدف اصلی روند نمای شکل (۲) است.



شکل ۲: روندنمای بکارگیری راهکار حذف بار تحت افت ولتاژ

$$\begin{aligned} X(i+1) &= \begin{bmatrix} \delta^{ZIP}(i+1) \\ V^{ZIP}(i+1) \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \delta^{ZIP}(i) \\ V^{ZIP}(i) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta\delta^{ZIP}(i) \\ \Delta V^{ZIP}(i) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (31)$$

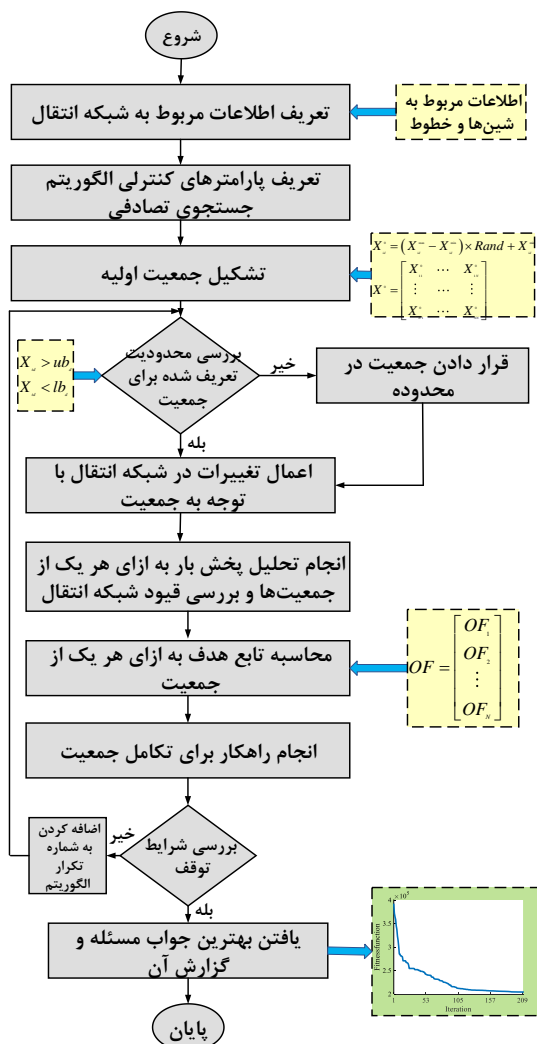
معادلات (۲۵)، (۳۰) و (۳۱) تا رسیدن به شرایط همگرایی روش نیوتن-رافسون حل می‌شود.

۳-۲- حل مسئله حذف بار تحت افت ولتاژ با بکارگیری الگوریتم دسته ذرات گسسته-پیوسته

مسئله بهینه‌سازی تعیین مقدار حذف بار تحت افت ولتاژ به صورت رابطه (۳۲) تشریح شده است.

$$\begin{aligned} OF(X), \quad X \in \{x^B, x^C\} \\ \text{subject to: } \quad g(X, u) = 0 \\ h(X, u) \leq 0 \end{aligned} \quad (32)$$

که در آن  $OF$  تابع هدف است که باید مقدار بهینه (کمینه و یا بیشینه) تعیین شود،  $X$  متغیر مستقل مسئله بهینه‌سازی است که شامل مجموعه متغیرهای  $X^B$  (باینری) و  $X^C$  (متغیرهای پیوسته) می‌شود و مقدار بهینه آن توسط الگوریتم‌های حل مسائل بهینه‌سازی تعیین می‌شود،  $g$  مجموعه توابع مربوط به قیود مساوی مسئله بهینه‌سازی



شکل ۳: روندنمای حل مسئله حذف بار ولتاژی برای جلوگیری از وقوع ناپایداری ولتاژ بلند مدت

**گام ششم:** بررسی قیود مربوط به عملکرد شبکه انتقال به ازای تغییرات در توان اکتیو و راکتیو در شبکه (قید مربوط به ولتاژ شینها، توان راکتیو خروجی ژنراتورها، و قید مربوط به پخش توان ظاهری در خطوط شبکه، قیود مربوط به مدل سازی پاسخ گویی بار با هدف جابجایی انرژی مصرفی بین شینها و تشکیل ضریب پنالتی برای قیودی که از محدوده خارج شده اند (در صورتی که قیود شبکه در محدوده مجاز باشند، ضریب پنالتی برابر عدد صفر است)

**گام هفتم:** محاسبه تابع هدف تشریح شده در رابطه (۳) و جمع آن با ضرایب پنالتی

**گام هشتم:** استفاده از روابط و راهکارهای تکامل دهنده جمعیت و حرکت دادن آن به سمت نقطه بهینه بر اساس ماهیت گسسته و پیوسته بودن مسئله (به عبارت دیگر، متغیرهای گسسته بر اساس روابط حرکت در الگوریتم

روندنمای بکارگیری الگوریتم جستجوی تصادفی دسته ذرات باینری-پیوسته به منظور حل مسئله حذف بار تحت افت ولتاژ در شکل (۳) نشان داده شده است. با توجه به شکل (۳)، گامهای بکارگیری الگوریتم جستجوی تصادفی در حل مسئله حذف بار تحت افت ولتاژ برای جلوگیری از وقوع ناپایداری ولتاژ بلند مدت به این شرح است که:

**گام اول:** تعریف اطلاعات مربوط به شین و خطوط انتقال  
**گام دوم:** تعریف پارامترهای کنترل برای الگوریتم جستجوی تصادفی (مانند تعداد بیشینه تکرار، تعداد جمعیت، تعداد ابعاد هر جمعیت، پارامترهای کنترلی جهت تکامل جمعیت به سوی نقطه بهینه و مرزهای بالا و پایین مربوط به محدودیت موقعیت مکان هر جمعیت)  
**گام سوم:** تشکیل ماتریس جمعیت اولیه با استفاده از رابطه (۳۳)

$$X^0 = \begin{bmatrix} X_{11}^0 & \dots & X_{1d}^0 & \dots & X_{1N}^0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{i1}^0 & \dots & X_{id}^0 & \dots & X_{iN}^0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{N1}^0 & \dots & X_{Nd}^0 & \dots & X_{NN}^0 \end{bmatrix}, \quad (33)$$

$$X_{id}^{0B} = [X_{i1}^{0B}, \dots, X_{ij}^{0B}, \dots, X_{iN}^{0B}]$$

$$X_{id}^{0B} \in \{0,1\}$$

$$X_{id}^{0C} = [X_{i1}^{0C}, \dots, X_{ij}^{0C}, \dots, X_{iN}^{0C}]$$

$$X_{id}^{0C} \in [X_{id}^{0C, \min}, X_{id}^{0C, \max}]$$

مقدار  $X_{id}$  در رابطه (۳۳)، برابر اعداد باینری و پیوسته تعریف کننده فیدر تغذیه کننده بار برای حذف مقدار توان اکتیو حذف شده از فیدر  $\lambda$ ام در شین  $d$ ام در جمعیت  $\lambda$ ام از جمعیت اولیه، و تغییر قیمت مصرف انرژی در شین  $d$ ام در جمعیت  $\lambda$ ام از جمعیت اولیه است. مقدار توان راکتیو حذف شده از فیدر  $\lambda$ ام در شین  $d$ ام در جمعیت  $\lambda$ ام بر اساس رابطه (۲۱) و (۳۳) تعیین می شود.

**گام چهارم:** بررسی محدودیت های مربوط به حداکثر مقدار حذف بار مجاز در شین  $\lambda$ ام و محدوده تغییرات قیمت مصرف انرژی در شینها

**گام پنجم:** اعمال تغییرات در مقدار توان اکتیو و راکتیو مصرفی در شینهای شبکه انتقال بر اساس جمعیت اولیه (رابطه ۳۳) و اجرای تحلیل پخش بار در شبکه انتقال، تعیین تغییرات توان مصرف در هر شین

به خود است و تمام شین‌های شبکه انتقال در قالب ۴ نوع بار دسته بندی می‌شوند. ضرایب مدل بار شین در جدول ۳ تشریح شده است [۲۰]. همچنین نحوه دسته‌بندی شدن شین‌ها در رابطه (۳۴) مشخص شده است [۲۱].

$$Tayp_i = \text{Rem}\left(\frac{i-1}{4}\right) + 1, i = 1, \dots, NB \quad (34)$$

که در آن Rem تابع است که باقیمانده را محاسبه می‌کند،  $i$  شماره شین است. مطابق با جدول ۳، نوع بار متصل به هر شین ثابت است و مقدار آن با توجه به مقدار اندازه ولتاژ شین تغییر می‌کند. بعلاوه مقدار توان اکتیو و ولتاژ شین‌های ژنراتوری در شرایط بهره‌برداری نرمال در جدول ۴ تشریح شده است.

دو نوع اغتشاش با نام‌های اغتشاش تکی (منفرد) و اغتشاش چندگانه در این بخش در نظر گرفته شده است تا طرح حذف بار برای تنظیم پروفیل ولتاژ شبکه انتقال بعد از اغتشاش برای شبکه انتقال نمونه ۵۷ شین طراحی شده و مورد مطالعه قرار بگیرد. نتایج حاصل از بکارگیری طرح حذف بار تحت افت ولتاژ به شرحی است که در ادامه تشریح خواهد شد. در این بخش، فرض می‌شود که هر شین بار دارای چندین فیدر است و بارها در هر شین از طریق این فیدرها به شین بار متصل هستند. در این بخش فرض می‌شود که مجموع بارهای متصل به شین‌ها از طریق فیدرها برابر مقدار باری است که در [۲۰] ارائه شده است و همچنین بارهای هر فیدر در هر شین با بار فیدرهای دیگر در همان شین برابر است. به عبارت دیگر کل بار موجود در شین به مقدار مساوی بین فیدرهای همان شین تقسیم شده است. لازم به ذکر است، از آنجایی که الگوریتم جستجوی تصادفی باینری-پیوسته دارای کارایی ضعیف‌تری نسبت به الگوریتم جستجوی تصادفی پیوسته در یافتن نقطه بهینه کل است، در این بخش هر مسئله به تعداد ۲۰ بار حل می‌شود و از بین تعداد آن‌ها، آن جوابی که دارای کمترین مقدار تابع هدف است به عنوان جواب نهایی مسئله گزارش شده است.

**۴-۲- حذف بار گسسته به ازای وقوع اغتشاش قطع شدن ژنراتور شین ۸ با در نظر گرفتن بار ZIP و پاسخ‌گویی بار**

نتایج حاصل از بکارگیری الگوریتم جستجوی تصادفی دسته‌ذرات گسسته به ازای ۲۰ مرتبه تکرار اجرای شبیه‌سازی در شکل (۴) نشان داده شده است. زمان اجرا

دسته ذرات باینری و متغیرهای پیوسته بر اساس روابط حرکت در الگوریتم دسته ذرات پیوسته تکامل می‌یابند) **گام نهم:** اگر شرایط توقف الگوریتم حل برآورده شده است، اجرای گام دهم؛ و در غیر این صورت رفتن به گام چهارم و تکرار گام‌های چهارم تا نهم.

**گام دهم:** یافتن بهترین جواب مسئله که دارای کمترین مقدار تابع هدف بوده است و گزارش آن به عنوان جواب مسئله؛ و پایان

#### ۴- شبیه‌سازی و نتایج عددی

در این بخش از مقاله، مسئله حذف بار تحت افت ولتاژ به منظور جلوگیری از وقوع ناپایداری ولتاژ بلند مدت با استفاده از الگوریتم دسته ذرات گسسته-پیوسته در شبکه قدرت نمونه ۵۷ شین حل می‌شود. پارامترهای کنترل عملکرد الگوریتم دسته‌ذرات گسسته-پیوسته در جدول ۲ تشریح شده است. دو نوع اغتشاش که شامل: (۱) حذف ژنراتور، و (۲) حذف همزمان ژنراتور و دو خط انتقال (خطوط شماره ۲ و ۴) در این شبکه در نظر گرفته شده و مقدار بار و شین باری که حذف شدن بار باعث قرار گرفتن ولتاژ در محدوده مجاز خواهند شد بدست خواهد آمد. در ابتدای این بخش، شبکه نمونه ۵۷ شین معرفی شده و در بخش دوم، نتایج عددی مورد بررسی و مطالعه قرار خواهند گرفت.

جدول ۲: پارامترهای تنظیم‌کننده عملکرد الگوریتم دسته‌ذرات

گسسته-پیوسته

پارامترهای الگوریتم دسته ذرات گسسته	مقدار	پارامترهای الگوریتم دسته ذرات پیوسته	مقدار
بیشینه تکرار	۳۰	بیشینه تکرار	۳۰
$C_1$	۱/۵	$C_1$	۱/۵
$C_2$	۲	$C_2$	۲
$\omega_{\max}$	۰/۵	$\omega_{\max}$	۰/۹
$\omega_{\min}$	۰/۱	$\omega_{\min}$	۰/۱

#### ۴-۱- معرفی سیستم قدرت نمونه ۵۷ شین

سیستم قدرت نمونه ۵۷ شین با تعداد ۷ ژنراتور و ۸۰ خط انتقال، برای طراحی حذف بار تحت افت ولتاژ در نظر گرفته شده است. اطلاعات شین و خطوط انتقال در [۱۹] تشریح شده است. بعلاوه، در این شبکه انتقال نمونه، فرض شده است که هر شین دارای ضرایب مربوط به مدل بار مخصوص

اغتشاش منفرد بدون اجرای حذف بار مقایسه شده است. اجرای فعالیت اصلاحی حذف بار گسسته-پیوسته با استفاده از الگوریتم دسته ذرات گسسته-پیوسته توانسته است که پایداری بلند مدت ولتاژ را در سیستم قدرت نمونه بعد از اغتشاش منفرد حفظ کند.

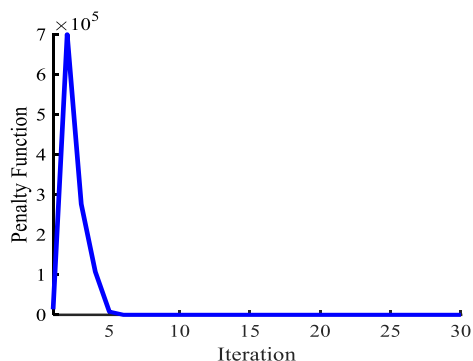
جدول ۳: ضرایب مدل بار [۲۰]

نوع بار	توان اکتیو			توان راکتیو		
	P	I	Z	P	I	Z
۱	۰/۵۶	۰/۳۱	۰/۳۱	۲/۹۷	-۳/۵۷	۱/۶۰
۲	۰/۶۶	-۰/۰۳	۰/۳۷	۲/۹۷	-۳/۵۶	۱/۵۹
۳	۰/۶۷	-۰/۰۷	۰/۳۹	۳/۰۴	-۳/۶۸	۱/۶۴
۴	۱/۳۱	-۱/۱۴	۰/۸۳	۳/۲۰	-۳/۸۸	۱/۶۸

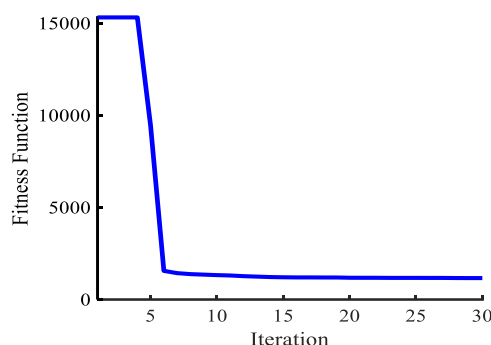
جدول ۴: مقادیر توان اکتیو و ولتاژ شین‌های ژنراتور [۱۷]

شماره ژنراتور	توان اکتیو	ولتاژ	دامنه ولتاژ	شماره ژنراتور	توان اکتیو	ولتاژ	دامنه ولتاژ
۱	۱۲۸/۹	۱/۰۴	۱	۸	۴۵۰	۱/۰۰۵	۱
۲	۰	۱	۱	۹	۰	۱	۱
۳	۴۰	۱	۱	۱۲	۳۱۰	۱/۰۱۵	۱
۶	۰	۱	۱	-	-	-	-

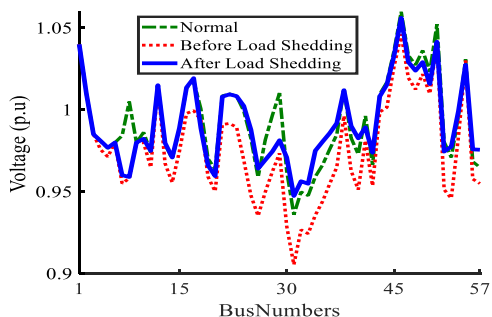
برای یک مرتبه اجرا طرح حفاظت ویژه برابر ۱۱۲/۴۷ ثانیه است. همانطور که از شکل (۴-الف و ب) مشخص است، جواب ((قابل وجود)). برای مسئله پخش بار تحت اغتشاش تکی حاصل شده است. زیرا شکل (۴-الف) مسیر حرکت بهترین جواب به سمت کمینه را نشان می‌دهد (نمودار شکل (۴-الف) اکیداً نزولی است). همچنین شکل (۴-ب) نشان می‌دهد که در بازه شروع تکرار تکاملی الگوریتم، جواب‌ها ((غیر قابل وجود)) هستند. زیرا ضریب پنالتی که به ازای تجاوز جواب‌ها از محدوده مجاز تعریف می‌شوند، مقدار غیر عدد صفر دارند. اما ضریب پنالتی در تکرارهای آخر برابر عدد صفر است (شکل ۴-ب) تکامل به عدد صفر همگرا شده‌اند؛ که نشانگر آن است که جواب بدست آمده تمام قیود مسئله را برآورده کرده است. بدین سبب، جواب بدست آمده ((قابل وجود)) است. شین‌های بار و مقدار بار حذف شده در شکل (۴-ج) نشان داده شده است. دامنه ولتاژها بعد از اجرای طرح اصلاحی حذف بار در شکل (۴-د) نشان داده شده است و با دامنه ولتاژهای حالت نرمال و



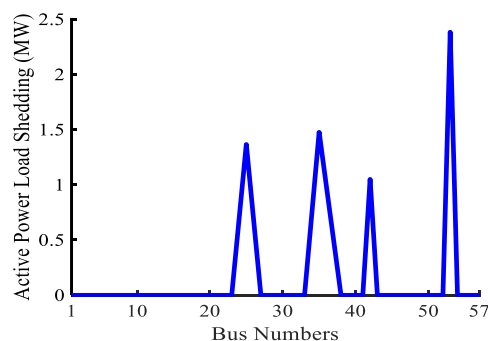
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۴: نتایج عددی بدست آمده از بکارگیری الگوریتم دسته ذرات در مسئله حذف بار تحت افت ولتاژ به ازای اغتشاش ، (الف) تابع شایستگی، (ب) تغییرات ضریب پنالتی، (ج) شین‌های حذف بار و مقادیر ZIP تکی، مدل پاسخ‌گویی بار و مدل بار بار حذف شده، (د) پروفیل ولتاژ

جدول ۵: شین‌ها و فیدرهای مشارکت کننده در حذف بار ولتاژی با مدل بار ZIP و اغتشاش تکی

شین بار	فیدر
۲۵	۱۱، ۹، ۸، ۶، ۵، ۴، ۳
۳۵	۹، ۷، ۶، ۵، ۲
۴۲	۱۱، ۹، ۶، ۵
۵۳	۱۴، ۱۰، ۸، ۴، ۲
مجموع بار قابل حذف	۵/۲۷ مگاوات

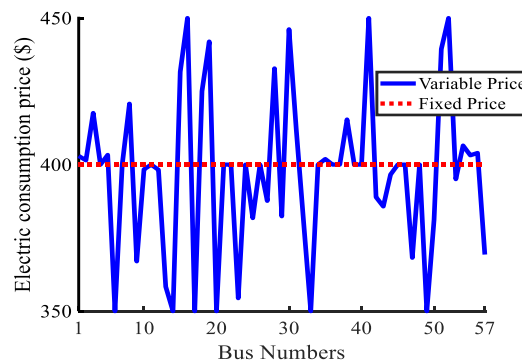
شین‌ها و فیدرهای مشارکت کننده در فعالیت اصلاحی حذف بار تحت افت ولتاژ در جدول ۵ تشریح شده است. همچنین مجموع کل بار قابل حذف در جدول ۵ تشریح شده است که برابر ۵/۲۷ مگاوات است.

**۳-۴- حذف بار گسسته به ازای وقوع اغتشاش قطع شدن همزمان ژنراتور شین ۱۲، و تعداد ۲ خط انتقال با در نظر گرفتن بار ZIP و پاسخ‌گویی بار**

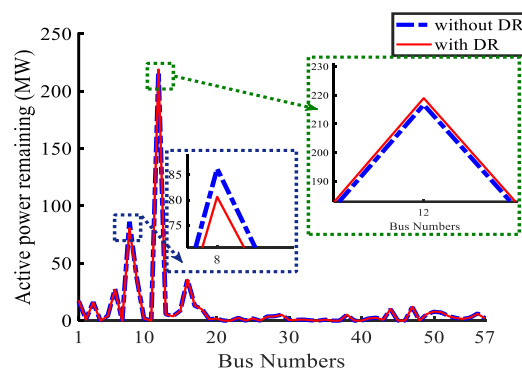
نتایج حاصل از بکارگیری الگوریتم جستجوی تصادفی دسته‌ذرات گسسته-پیوسته به ازای ۲۰ مرتبه تکرار اجرای شبیه‌سازی وضعیت اضطراری وقوع اغتشاش چندگانه در شکل (۶) نشان داده شده است. زمان اجرا برای یک مرتبه اجرا طرح حفاظت ویژه برابر ۱۱۴/۴۲ ثانیه است. همانطور که از شکل (۶-الف و ب) مشخص است، جواب ((قابل وجود))

برای مسئله پخش بار تحت اغتشاش چندگانه حاصل شده است. زیرا شکل (۶-الف) مسیر حرکت بهترین جواب به سمت کمینه را نشان می‌دهد (نمودار شکل (۶-الف) اکیداً نزولی است). همچنین شکل (۶-ب) نشان می‌دهد که در بازه شروع تکرار تکاملی الگوریتم، جواب‌ها ((غیر قابل وجود)) هستند. زیرا ضریب پنالیتی که به ازای تجاوز جواب‌ها از محدوده مجاز تعریف می‌شوند، مقدار غیر عدد صفر دارند. اما ضریب پنالیتی در تکرارهای آخر تکامل به عدد صفر همگرا شده‌اند؛ که نشانگر آن است که جواب بدست آمده تمام قیود مسئله را برآورده کرده است. بدین سبب، جواب بدست آمده ((قابل وجود)) است. شین‌های بار و مقدار بار حذف شده در شکل (۶-ج) نشان داده شده است. دامنه ولتاژها بعد از اجرای طرح اصلاحی حذف بار

بعلاوه، تغییرات هزینه مصرف انرژی تعیین شده برای هر شین و جابجایی بار انجام شده بین شین‌های سیستم قدرت که از طریق بکارگیری مدل پاسخ‌گویی بار حاصل شده است در شکل ۵ نشان داده شده است. از شکل ۵ الف مشخص است که تغییرات هزینه مصرف انرژی الکتریکی در هر شین بین ۳۵۰ تا ۴۵۰ دلار تعیین شده است تا تقاضای بار از شین‌هایی که دارای هزینه بالایی است به شین‌های دارای هزینه کم منتقل شود. انتقال تقاضا بار بین شین‌های سیستم موجب بهبود عملکرد شبکه سیستم قدرت نمونه مورد مطالعه شده است (با توجه به شکل ۴). شکل ۵ ب، مقدار جابجایی بار بین شبکه نمونه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. از شکل ۵ الف و ب مشخص است که توان مصرفی بار در شین ۸ به دلیل هزینه بیشتر از ۴۰۰ دلار کاهش یافته است و مصرف بار در شین ۱۲ به دلیل کاهش هزینه مصرف کمتر از ۴۰۰ دلار افزایش یافته است. افزایش و کاهش در هزینه مصرف انرژی باعث می‌شود که بار مصرف در شین‌ها به تغییر قیمت پاسخ داده و مصرف خود را تنظیم نمایند تا باعث بهبود در عملکرد شبکه بعد از اغتشاش قطع شدن ژنراتور شوند.



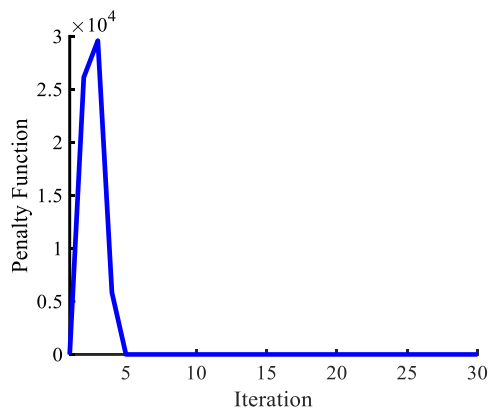
(الف)



(ب)

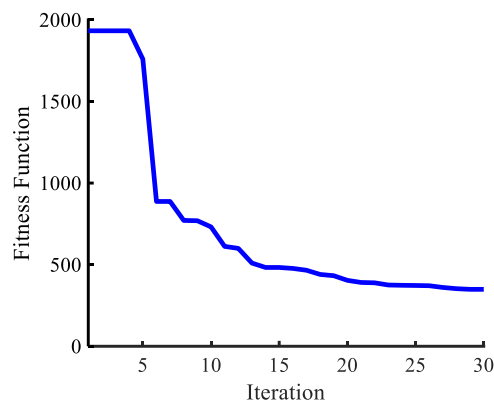
شکل ۵: هزینه گره‌ای مصرف انرژی برق و توان مصرفی شین‌ها بعد از اغتشاش قطع شدن ژنراتور

الگوریتم دسته ذرات گسسته-پیوسته توانسته است که پایداری بلند مدت ولتاژ را در سیستم قدرت نمونه بعد از اغتشاش شدید (چندگانه) حفظ کند.

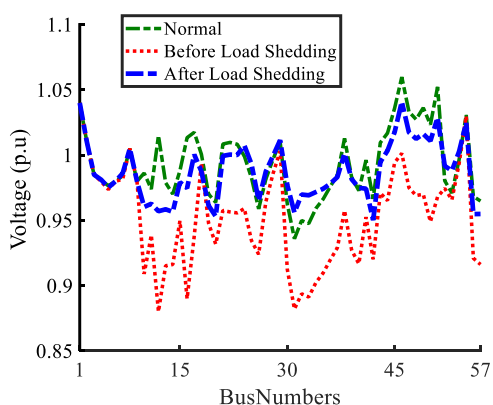


(ب)

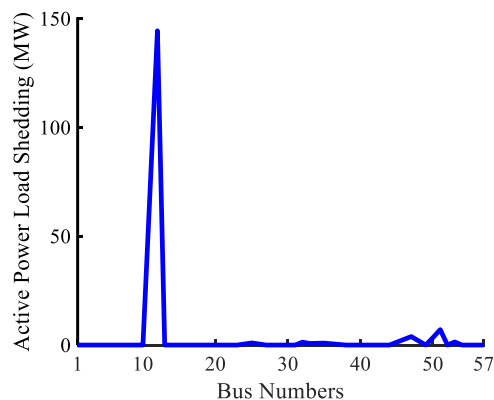
در شکل (۶-د) نشان داده شده است و با دامنه ولتاژهای حالت نرمال و اغتشاش چندگانه بدون اجرای حذف بار مقایسه شده است. شکل (۶-د) نشان می‌دهد که اجرای فعالیت اصلاحی حذف بار گسسته-پیوسته با استفاده از



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۶: نتایج عددی بدست آمده از بکارگیری الگوریتم دسته ذرات گسسته در مسئله حذف بار تحت افت ولتاژ به ازای اغتشاش و مدل سازی پاسخ گویی بار، (الف) تابع شایستگی، (ب) تغییرات ضریب پنالتهی، (ج) شین های حذف بار و مقادیر ZIP چندگانه و مدل بار حذف شده، (د) پروفیل ولتاژ

شین ها و فیدرهای مشارکت کننده در فعالیت اصلاحی حذف بار تحت افت ولتاژ در جدول ۶ تشریح شده است. مجموع کل بار قابل حذف در جدول ۶ تشریح شده است که برابر ۱۵۰/۲۰ مگاوات است. بعلاوه تغییرات هزینه مصرف انرژی تعیین شده برای هر شین و جابجایی بار انجام شده بین شین های سیستم قدرت که از طریق بکارگیری مدل پاسخ گویی بار حاصل شده است در شکل ۷ نشان داده شده است. از شکل ۷ الف مشخص است که تغییرات هزینه مصرف انرژی الکتریکی در هر شین بین ۳۵۰ تا ۴۵۰ دلار تعیین شده است تا تقاضای بار از شین هایی که دارای هزینه

جدول ۶: شین ها و فیدرهای مشارکت کننده در حذف بار ولتاژی با مدل بار ZIP، پاسخ گویی بار و اغتشاش چندگانه

شین بار	شین بار	فیدر	فیدر
۱۲	۴۷	۱۳، ۱۲، ۱۱، ۱۰، ۵، ۳	۱۲، ۱۱، ۶، ۳
۲۵	۵۰	۱۱، ۷، ۴، ۳، ۲	۱۰، ۹، ۴، ۳
۳۳	۵۱	۸، ۷، ۶، ۵، ۴، ۳، ۲	۸، ۷، ۶، ۵، ۴، ۳، ۲
۳۵	۵۳	۹، ۵، ۲	۱۰، ۷، ۴
مجموع بار قابل حذف		۱۵۰/۲۰ مگاوات	

جدول ۷: سناریوهای مختلف از اهداف تعریف شده در طرح

حفاظت ویژه پیشنهادی

سناریو	هزینه خاموشی	تلفات	پروفیل ولتاژ	پایداری ولتاژ
اول	۰/۴	۰/۲	۰/۰۵	۰/۳۵
دوم	۰/۴	۰/۲	۰/۴	۰
سوم	۰/۴	۰/۲	۰	۰/۴
چهارم	۰/۴	۰/۶	۰	۰
پنجم	۱	۰	۰	۰

۴-۴- تحلیل و بحث در خصوص بهبود طرح حفاظت

ویژه حذف بار تحت افت ولتاژ بلند مدت پیشنهادی

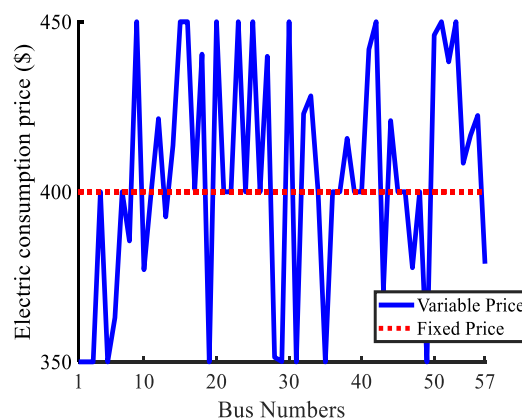
در این بخش، سناریوهای مختلف از اهداف مطرح در طرح حفاظت ویژه متمرکز حذف بار تحت افت ولتاژ بلند مدت پیشنهاد شده در این مقاله به همراه ضرایب اولویت هر یک از اهداف موجود در رابطه (۱۰) برای هر یک از سناریو، تولید شده است؛ که در جدول ۷ تشریح شده است. همانطور که از جدول ۷ مشخص است، پنج سناریو تولید شده است که عبارتند از: (۱) مدل سازی کامل اهداف تشریح شده در رابطه (۱۰)، (۲) هزینه خاموشی و تلفات، پروفیل ولتاژ، (۳) هزینه خاموشی، تلفات، و پایداری ولتاژ، و (۴) هزینه خاموشی و تلفات، و (۵) هزینه خاموشی بار.

جدول ۸: نتایج عددی حاصل از شبیه سازی طرح حفاظت ویژه

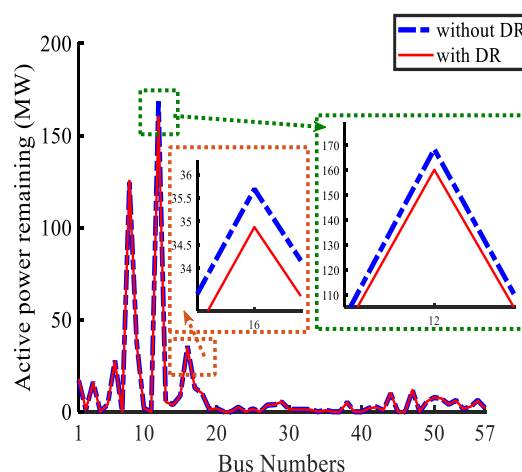
در برابر اغتشاش تکی قطع شدن ژنراتور شین شماره ۸

ماهیت بار	اهداف	سناریوهای مختلف از اهداف تعریف شده در طرح حفاظت ویژه پیشنهادی				
		اول	دوم	سوم	چهارم	پنجم
عدم پاسخ گویی بار	خاموشی	۳۲۵	۱۱۰	۲۹۴	۱۲۶	۹۵
	تلفات	۲۵/۴۲	۲۵/۵۴	۲۵/۳۱	۲۵/۱	۲۶/۲۴
	پروفیل	۱/۳۶	۱/۴۰	۱/۴۷	۱/۵۱	۱/۵۲
پاسخ گویی بار	پایداری	۲/۸۱	۳/۰۷	۲/۹۲	۳/۱۶	۳/۱۹
	خاموشی	۲۶۶	۱۱۰	۲۰۹	۱۲۱	۸۸
	تلفات	۲۴/۶۹	۲۵/۴۱	۲۴/۲۸	۲۳/۸۱	۲۵/۴۸
	پروفیل	۱/۳۱	۱/۳۱	۱/۴۴	۱/۴۷	۱/۴۷
پایداری	پایداری	۲/۶۹	۲/۹۹	۲/۷۵	۳/۰۷	۳/۱۲

بالایی است به شین های دارای هزینه کم منتقل شود. انتقال تقاضا بار بین شین های سیستم موجب بهبود عملکرد شبکه سیستم قدرت نمونه مورد مطالعه شده است (با توجه به شکل ۶). شکل (۷-ب)، مقدار جابجایی بار بین شبکه نمونه مورد مطالعه را نشان می دهد. از شکل (۷-الف و ب) مشخص است که توان مصرفی بار در شین ۱۲ به دلیل هزینه بیشتر از ۴۰۰ دلار کاهش یافته است و مصرف بار در شین ۱۶ نیز به دلیل افزایش هزینه مصرف بیشتر از ۴۰۰ دلار افزایش یافته است. افزایش و کاهش در هزینه مصرف انرژی باعث می شود که بار مصرف در شین ها به تغییر قیمت پاسخ داده و مصرف خود را تنظیم نمایند تا باعث بهبود در عملکرد شبکه بعد از وقوع همزمان اغتشاش قطع شدن ژنراتور و ۲ خط انتقال شوند.



(الف)



(ب)

شکل ۷: هزینه گره ای مصرف انرژی برق و توان مصرفی شین ها بعد از اغتشاش قطع شدن ژنراتور و ۲ خط انتقال



جدول ۹: نتایج عددی حاصل از شبیه‌سازی طرح حفاظت ویژه در برابر اغتشاش چندگانه قطع شدن ژنراتور شین شماره ۱۲ و دو خط انتقال

هزینه خاموشی و تلفات شبکه) به نسبت سناریوی پنجم باعث می‌شود که هزینه خاموشی بار به اندازه ۲۱۰ و ۱۳۷/۵ درصد به ترتیب برای اغتشاش تکی (جدول ۸) به ازای عدم و با در نظر گرفتن مدل پاسخ‌گویی بار افزایش بیابد. در حالی که پایداری ولتاژ ۸/۴۶ و ۱۳/۴۵ درصد به ترتیب برای اغتشاش تکی به ازای عدم و با در نظر گرفتن مدل پاسخ‌گویی بار بهبود یافته است (نسبت به سناریو پنجم). به طور مشابه، از جدول ۸ مشخص می‌شود که اگر چه در نظر گرفتن پایداری ولتاژ باعث می‌شود که هزینه خاموشی بار به اندازه ۱۹۳/۱۳ و ۲۶۴/۰۹ درصد به ترتیب برای اغتشاش چندگانه به ازای عدم و با در نظر گرفتن مدل پاسخ‌گویی بار به نسب سناریوی پنجم افزایش یافته است، پایداری ولتاژ با اندازه ۳۰/۳۶ و ۲۶/۷۸ درصد به ترتیب برای اغتشاش چندگانه به ازای عدم و با در نظر گرفتن مدل پاسخ‌گویی بار بهبود یافته است.

مقایسه سناریو دوم نسبت به سناریو پنجم و سوم در جدول ۸ و ۹ نشان می‌دهد که اگر چه افزایش هزینه خاموشی بار در سناریو دوم کمتر از افزایش هزینه خاموشی بار در سناریو سوم بوده است، اما معیارهای عملکرد شبکه مانند تلفات (به نسبت سناریو چهارم) و پایداری ولتاژ (به نسبت سناریو سوم) کاهش یافته است. در حالی سناریو اول (مدل پیشنهادی) باعث بهبود در عملکرد شبکه شده است. به طوریکه، شاخص پایداری ولتاژ پیشنهادی به همراه هدف بهبود پروفیل ولتاژ باعث بهبود عملکرد شبکه شده است. شاخص پروفیل ولتاژ سناریوی دوم در اغتشاش تکی (جدول ۸) به ترتیب به مقدار ۷/۹ و ۱۰/۸۸ درصد نسبت به سناریوی پنجم به ترتیب به ازای عدم پاسخ‌گویی بار و پاسخ‌گویی بار بهبود یافته است. همچنین شاخص پروفیل ولتاژ سناریوی دوم در اغتشاش چندگانه (جدول ۹) به ترتیب به مقدار ۲۶/۶۵ و ۲۳/۰۳ درصد نسبت به سناریوی پنجم به ازای حالت عدم پاسخ‌گویی بار و پاسخ‌گویی بار بهبود یافته است. همچنین شاخص پایداری ولتاژ سناریوی دوم در اغتشاش تکی (جدول ۸) به ترتیب به مقدار ۳/۷۶ و ۴/۱۷ درصد نسبت به سناریوی پنجم به ازای عدم پاسخ‌گویی بار و پاسخ‌گویی بار و همچنین شاخص پروفیل ولتاژ سناریوی دوم در اغتشاش چندگانه (جدول ۹) به ترتیب به مقدار ۱۲/۰۳ و ۸/۱۹ درصد نسبت به سناریوی پنجم به ازای حالت عدم پاسخ‌گویی بار و پاسخ‌گویی بار و پاسخ‌گویی بار بهبود یافته است. زیرا

ماهیت بار	اهداف	سناریوهای مختلف از اهداف تعریف شده در طرح حفاظت ویژه پیشنهادی			
		اول	دوم	سوم	چهارم
عدم پاسخ‌گویی بار	خاموشی	۵۸۸	۳۰۹	۶۸۳	۳۷۷
	تلفات	۱۹/۳۰	۲۰/۹۷	۱۸/۷۹	۱۸/۸۳
	پروفیل	۱/۱۲	۱/۱۹	۱/۴۵	۱/۵۴
پاسخ‌گویی بار	پایداری	۲/۹۰	۳/۴۴	۲/۷۳	۳/۶۸
	خاموشی	۵۱۲	۲۵۶	۶۵۹	۲۵۶
	تلفات	۱۹/۰۸	۱۹/۹۲	۱۸/۶۸	۱۸/۶۱
پاسخ‌گویی بار	پروفیل	۱/۱۱	۱/۱۷	۱/۴	۱/۴۳
	پایداری	۲/۸۳	۳/۳۶	۲/۶۸	۳/۳۵
	تلفات	۲۱/۹۶	۲۱/۹۶	۲۱/۹۶	۲۱/۹۶

نتایج حاصل از شبیه‌سازی سناریوهای مختلف در جدول ۷ برای اغتشاش تکی قطع شدن ژنراتور شین ۸، و جدول ۸ برای اغتشاش قطع شدن همزمان ژنراتور شین ۱۲، و تعداد ۲ خط انتقال (خطوط ۲ و ۴) در جدول ۹ تشریح شده است. از جدول ۸ و ۹ مشخص می‌شود در نظر گرفتن هدف کاهش تلفات (سناریو چهارم) باعث می‌شود که هزینه خاموشی به مقدار ۳۱/۵۸ درصد و ۳۷/۵ درصد برای اغتشاش تکی به ترتیب به ازای عدم پاسخ‌گویی بار و مدل پاسخ‌گویی بار (جدول ۸) افزایش بیابد. همچنین افزایش هزینه خاموشی در سناریو چهارم نسبت به سناریوی پنجم در جدول ۸ به ترتیب مقدار ۶۱/۸ و ۴۱/۴۴ درصد برای اغتشاش چندگانه به ازای عدم و با در نظر گرفتن مدل پاسخ‌گویی بار بوده است. در حالی که تلفات در سناریوی چهارم به نسبت سناریوی پنجم به ترتیب به اندازه ۴/۳۴ و ۶/۵۵ درصد برای اغتشاش تکی به ازای عدم و با در نظر گرفتن پاسخ‌گویی بار کاهش یافته است. همچنین تلفات سناریوی چهارم به نسبت سناریوی پنجم مطابق جدول ۸ به اندازه ۱۴/۵۳ و ۱۵/۲۸ درصد به ترتیب برای اغتشاش چندگانه به ازای عدم و با در نظر گرفتن پاسخ‌گویی بار کاهش یافته است.

نتایج سناریوی سوم (در نظر گرفتن پایداری ولتاژ علاوه بر



در جدول ۷ در نظر گرفته می‌شود. مقایسه نتایج حاصل از ماهیت بار در جدول ۱۰ تشریح شده است. جدول ۱۰ تشریح می‌کند که مدل‌سازی دقیق ماهیت بار اثر شدیدی در نتایج دارد. به طوریکه، اگر چه در نظر گرفتن مدل بار توان ثابت، بدترین شرایط را در نظر می‌گیرد؛ اما باعث می‌شود بار زیادی از شبکه حذف می‌شود که قابلیت اطمینان طرح حذف بار تحت افت ولتاژ را به شدت کاهش می‌دهد.

#### ۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

حذف بار تحت افت ولتاژ یکی از راهکارهای جلوگیری کننده از وقوع ناپایداری ولتاژ بلند مدت است که در طرح حفاظت ویژه تعریف می‌شود. بدین سبب، در این مقاله با استفاده از تعریف مسئله در قالب مسئله بهینه‌سازی گسسته-پیوسته چندهدفه، غیرخطی و همچنین حل آن با بکارگیری الگوریتم دسته ذرات باینری-پیوسته، طرح حذف بار پیاده‌سازی شد. همچنین مدل ZIP و پاسخ‌گویی بار مبتنی بر تعیین قیمت مصرف انرژی در هر شین برای بارهای موجود در شبکه در نظر گرفته شد. بعلاوه دو نوع اغتشاش که شامل: (۱) اغتشاش تکی، (۲) اغتشاش چندگانه است نیز در نظر گرفته شد. مسئله حذف بار تحت افت ولتاژ برای ملاحظات تشریح شده در شبکه نمونه ۵۷ شین پیاده سازی شد و نتایج عددی حاصل شده نشان دادند که:

- الگوریتم دسته ذرات گسسته-پیوسته توانایی یافتن بهینه جواب قابل برای جلوگیری از ناپایداری ولتاژ بلند مدت را دارا است،

- مدل‌سازی طرح حفاظت ویژه متمرکز حذف بار تحت افت ولتاژ بلند مدت به دلیل در نظر گرفتن فیدرهای تغذیه بار و بارهای ZIP به شرایط بهره‌برداری واقعی نزدیکتر است.

- در نظر گرفتن شاخص‌های بهبود عملکرد سیستم‌های قدرت در مسئله حذف بار باعث افزایش هزینه خاموشی می‌شود اما عملکرد شبکه مانند تلفات و بهبود پروفیل ولتاژ، و پایداری ولتاژ بهبود می‌یابد.

- مدل پاسخ‌گویی بار مبتنی بر هزینه مصرف انرژی با هدف جابجایی بارها بین شین‌های شبکه باعث می‌شود علاوه بر کاهش هزینه خاموشی، عملکرد سیستم قدرت مانند پروفیل ولتاژ و پایداری ولتاژ نیز بهبود یابد؛ در حالی که ممکن است اثر ضعیفی در کاهش تلفات داشته باشد.

شاخص پایداری ولتاژ نیز تلاش می‌کند که بهبود پروفیل ولتاژ نیز انجام شود. بدین سبب، در نظر گرفتن همزمان اهداف بهبود پروفیل ولتاژ و پایداری ولتاژ (سناریو اول) باعث می‌شود که مقدار پروفیل ولتاژ سناریوی اول به مقدار ۲/۸۶ و صفر درصد نسبت به سناریو دوم به ازای اغتشاش تکی و عدم پاسخ‌گویی بار به پاسخ‌گویی بار؛ و به مقدار ۵/۸۸ و ۵/۱۳ درصد نسبت به سناریوی دوم به ازای اغتشاش چندگانه و عدم پاسخ‌گویی بار به پاسخ‌گویی بار بهبود یابد. بعلاوه، مقدار پایداری ولتاژ سناریوی اول به مقدار ۸/۵ و ۱۰/۰۳ درصد نسبت به سناریو دوم به ازای اغتشاش تکی و عدم پاسخ‌گویی بار به پاسخ‌گویی بار؛ و به مقدار ۱۵/۷ و ۱۵/۷۷ درصد نسبت به سناریوی دوم به ازای اغتشاش چندگانه و عدم پاسخ‌گویی بار به پاسخ‌گویی بار بهبود یابد.

از طرفی دیگر، در نظر گرفتن مدل پاسخ‌گویی بار در طرح حفاظت ویژه حذف بار تحت افت ولتاژ باعث می‌شود که هزینه خاموشی بار کمتر شود. به طوریکه مقدار اهداف مربوط به بهبود عملکرد شبکه (تلفات، پروفیل ولتاژ، و پایداری ولتاژ) به ازای در نظر گرفتن پاسخ‌گویی بار و عدم پاسخ‌گویی بار به یکدیگر نزدیک است، اما هزینه خاموشی بار به ازای در نظر گرفتن پاسخ‌گویی بار کاهش بیشتری نسبت به عدم پاسخ‌گویی بار داشته است.

جدول ۱۰: تاثیر مدل‌سازی ماهیت بار بر هزینه خاموشی،

تلفات، پروفیل ولتاژ، و پایداری ولتاژ

ماهیت بار	اغتشاش	خاموشی	تلفات	پروفیل	پایداری
توان ثابت	تکی	۵۲۹	۱۰۸/۲۹	۱/۵۶	۳/۳۸
	چندگانه	۹۰۳	۴۲/۷۲	۱/۳۶	۳/۲۱
ZIP	تکی	۲۶۶	۲۴/۶۹	۱/۳۱	۲/۶۹
	چندگانه	۵۱۲	۱۹/۰۸	۱/۱۷	۲/۸۳

#### ۴-۵- تاثیر مدل‌سازی بار با ماهیت ZIP

در این بخش، ماهیت بار، توان ثابت (ضرایب Z و I) در جدول ۲ برابر عدد صفر و ضریب P در جدول ۲ برابر عدد ۱) فرض شده است و با نتایج حاصل از ماهیت بار ZIP مقایسه می‌شود. دیگر پارامترهای شبکه انتقال مطابق سناریوی اول

## مراجع

- [1] Khoshkhou, Hamid, Siavash Yari, Aref Pouryekt, Vigna K. Ramachandaramurthy, and Josep M. Guerrero. "A remedial action scheme to prevent mid/long-term voltage instabilities." *IEEE Systems Journal* 15, no. 1 (2020): 923-934.
- [2] Larik, Raja Masood, Mohd Wazir Mustafa, Abdulrahman Okino Otuoze, Obaloluwa Olatunji Mohammed, and Aliyu Hamza Sule. "A new technique of load shedding to stabilize voltage magnitude and fast voltage stability index by using hybrid optimization." *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences* 13, no. 8 (2018): 2734-2745.
- [3] Kundur PS, Malik OP. "Power system stability and control." McGraw-Hill Education; 2022.
- [4] Kundur, Prabha, John Paserba, Venkat Ajjarapu, Göran Andersson, Anjan Bose, Claudio Canizares, Nikos Hatziargyriou et al. "Definition and classification of power system stability IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions." *IEEE transactions on Power Systems* 19, no. 3 (2004): 1387-1401.
- [5] Hosseini-Bioki, M. M., M. Rashidinejad, and A. Abdollahi. "An implementation of particle swarm optimization to evaluate optimal under-voltage load shedding in competitive electricity markets." *Journal of Power Sources* 242 (2013): 122-131.
- [6] Cholley P. Crossley P. Van Acker V. Van Cutsem T. Fu W. Soto Idia Òez J. Ilar F. Karlsson D. Kojima Y. McCalley J. Piekutowski M. "System protection schemes in power networks". CIGRE Technical Brochure. 2001.
- [7] Mogaka, L. O., G. N. Nyakoe, and M. J. Saulo. "Power prioritization and load shedding in an island with RESs using ABC algorithm." *Journal of Engineering* 2020, no. 1 (2020): 8131952.
- [8] Kisengeu, Susan Mumbi, Christopher Maina Muriithi, and George Nyauma Nyakoe. "Under voltage load shedding using hybrid ABC-PSO algorithm for voltage stability enhancement." *Heliyon* 7, no. 10 (2021).
- [9] Ahmadipour, Masoud, Muhammad Murtadha Othman, Zainal Salam, Moath Alrifay, Hussein Mohammed Ridha, and Veerapandiyan Veerasamy. "Optimal load shedding scheme using grasshopper optimization algorithm for islanded power system with distributed energy resources." *Ain Shams Engineering Journal* 14, no. 1 (2023): 101835.
- [10] Abd Shukor, Saiful Firdaus, Ismail Musirin, Zulkiffli Abdul Hamid, Mohd Helmi Mansor, A. V. Sentilkumar, and Ahmad Asri Abd Samat. "Optimal Multi Load Shedding for Voltage Security Control in Bulk Power System." In 2022 IEEE International Conference on Power and Energy (PECon), pp. 448-453. IEEE, 2022.
- [11] Ahmadi, Ahmad, and Yousef Alinejad-Beromi. "A new integer-value modeling of optimal load shedding to prevent voltage instability." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 65 (2015): 210-219.
- [12] Ebrahimi, Reza, and Ahmad Ahmadi. "Real-time under-voltage load shedding method considering integer-value load model and feeder participation in demand response." *Electric Power Systems Research* 217 (2023): 109115.
- [13] Wagner, Lukas Peter, Lasse Matthias Reinhold, Maximilian Kiltbau, and Alexander Fay. "A systematic review of modeling approaches for flexible energy resources." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 184 (2023): 113541.
- [14] Kirschen, Daniel S., Goran Strbac, Pariya Cumperayot, and Dilemar de Paiva Mendes. "Factoring the elasticity of demand in electricity prices." *IEEE Transactions on Power Systems* 15, no. 2 (2000): 612-617.
- [15] Tan, Zhongfu, Liwei Ju, Brent Reed, Rao Rao, Daoxin Peng, Huanhuan Li, and Ge Pan. "The optimization model for multi-type customers assisting wind power consumptive considering uncertainty and demand response based on robust stochastic theory." *Energy Conversion and Management* 105 (2015): 1070-1081.
- [16] Wang, Wei, Shuhao Huang, Guangming Zhang, Jizhen Liu, and Zhe Chen. "Optimal operation of an integrated electricity-heat energy system considering flexible resources dispatch for renewable integration." *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy* 9, no. 4 (2021): 699-710.
- [17] Larik, Raja Masood, Mohd Wazir Mustafa, and Muhammad Naveed Aman. "A critical review of the state-of-art schemes for under voltage load shedding." *International Transactions on Electrical Energy Systems* 29, no. 5 (2019): e2828.
- [18] Adegoke, Samson Ademola, and Yanxia Sun. "Power system optimization approach to mitigate voltage instability issues: A review." *Cogent Engineering* 10, no. 1 (2023): 2153416.

[19] <https://matpower.org/docs/ref/matpower5.0/case57.html>, (accessed on 20 Dec 2022)

[20] Hajagos, Les M., and Behnam Danai. "Laboratory measurements and models of modern loads and their effect on voltage stability studies." IEEE Transactions on Power Systems 13, no. 2 (1998): 584-592.

[21] Ahmadi, Ahmad, Yousef Alinejad Beromi, and Hassan rezai soleymanpour. "Optimal load shedding by a new binary PSO." COMPEL-The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering 35, no. 3 (2016)