

## **Determining the Contribution of Harmonic Loads to Harmonic Contamination of the Power Network based on the Intelligent Classification of Measured Data**

**Mehdi Tadayon<sup>1</sup>, Rahmatallah Hooshmand<sup>2</sup>, Arash Kiyoumars<sup>3</sup>, Mehdi Torabian<sup>4</sup>**

<sup>1</sup> Faculty of Engineering, University of Isfahan, Iran

<sup>2</sup> Professor, Faculty of Engineering, University of Isfahan, Iran

<sup>3</sup> Associate Professor, Faculty of Engineering, University of Isfahan, Iran

<sup>4</sup> Isfahan Regional Electrical Company, Isfahan, Iran

### **Abstract:**

Nowadays, determining the contribution of the individual consumers to the harmonic contamination is required for improving power quality. Due to changes occurred in lines, transformers, loads and generators over time, network operating conditions and impedance of different sectors are frequently varied resulting in the change in the contribution of harmonic sources. In this paper, an intelligent-based three-step method is developed to continuously determine the contribution of each harmonic source to the harmonic voltage of different buses without any access to the voltage phase data at different buses in the network. In this algorithm, firstly, the K-means clustering method is used for pre-processing of the measured data in order to reduce the background harmonic destructive effect on accuracy of the harmonic contribution determination. After calculating the harmonic contribution, the K-nearest neighbor method is used to generalize the results, and subsequently to create a continuous harmonic contribution matrix (HCM). Finally, the method is applied to a standard power network-based calculation example. The results demonstrate the capability of the proposed algorithm to evaluate the effects of harmonic sources in power networks.

**Keywords:** Intelligent Data Classification, Harmonic Contribution, Harmonic Sources, Background Harmonic.

## تعیین سهم بارهای هارمونیک‌زا در آلودگی هارمونیکی شبکه براساس دسته‌بندی هوشمند اطلاعات اندازه‌گیری

مهدی تدین<sup>۱</sup>، رحمت‌الله هوشمند<sup>۲</sup>، آرش کیومرثی<sup>۳</sup>، مهدی ترابیان<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی، دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه اصفهان - اصفهان - ایران

mahdi.tadayon@eng.ui.ac.ir

۲- استاد، دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه اصفهان - اصفهان - ایران

hooshmand\_r@eng.ui.ac.ir

۳- دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه اصفهان - اصفهان - ایران

kiyoumars@eng.ui.ac.ir

۴- شرکت برق منطقه‌ای اصفهان - اصفهان - ایران

torabian\_mehdi@yahoo.com

**چکیده:** امروزه برای بهبود کیفیت ولتاژ شبکه، تعیین سهم هریک از منابع ایجادکننده هارمونیک از آلودگی هارمونیکی شبکه ضروری است. با توجه به اینکه خطوط، ترانسفورماتورها، بارها و ژنراتورها در طول زمان تغییر وضعیت می‌دهند، شرایط عملکردی شبکه و امپدانس بخش‌های مختلف به‌طور مکرر تغییر می‌یابند که به تغییر سهم هریک از منابع هارمونیکی منجر می‌شوند. در این مقاله روشی سه مرحله‌ای مبتنی بر روش‌های هوشمند، برای تعیین سهم پیوسته منابع هارمونیک از هارمونیک ولتاژ باس‌های مختلف شبکه بدون نیاز به اطلاعات فاز ولتاژ باس‌های مختلف طراحی شده است. در این الگوریتم به‌منظور کاهش اثر مخرب هارمونیک پس‌زمینه در مرحله پیش‌پردازش اطلاعات اندازه‌گیری از روش خوشه‌بندی k- میانگین<sup>۱</sup> استفاده شده است. بعد از محاسبه سهم هارمونیک، از روش دسته‌بندی k- نزدیک‌ترین همسایه<sup>۲</sup> برای تعمیم نتایج و ایجاد ماتریس پیوست سهم استفاده شده است. در پایان روش پیشنهادی بر یک مثال محاسباتی مبتنی بر شبکه استاندارد اعمال شده است. نتایج نشان می‌دهد الگوریتم پیشنهادی توان آنالیز تأثیر منابع مختلف هارمونیک بر شبکه را دارد.

**واژه‌های کلیدی:** دسته‌بندی هوشمند اطلاعات، سهم هارمونیکی، منابع هارمونیکی، هارمونیک پس‌زمینه

### ۱- مقدمه

روزبه‌روز در حال افزایش‌اند. تمامی این بارها با توجه به مشخصات و طرح داخلی، مرتبه‌های مختلفی از هارمونیک جریان را با شدت‌های مختلف به شبکه اعمال می‌کنند که با عبور از امپدانس شبکه، هارمونیکی شدن ولتاژ شبکه را موجب می‌شوند [۱]. تأثیرات مخرب اغتشاشات هارمونیکی به دو بخش کلی از دیدگاه شبکه و دیدگاه مشترکین تقسیم می‌شوند. از دیدگاه شبکه، این اغتشاشات به کاهش طول عمر تجهیزات، افزایش تلفات، اشغال ظرفیت خطوط، رزونانس هارمونیکی، تخریب خازن‌ها، تأثیر بر عملکرد رله‌ها و شاخص‌های قابلیت اطمینان منجر می‌شود [۲]. این

در سیستم‌های قدرت، بارهای غیرخطی مانند انواع یکسوسازها، کوره‌های قوس و کنترل دور موتورها،

<sup>۱</sup> تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۷/۱۰/۱۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۴/۰۱

نام نویسنده مسئول: رحمت‌الله هوشمند

نشانی نویسنده مسئول: ایران - اصفهان - دانشگاه اصفهان - گروه برق

زمینه بهبود دقت و قابلیت اطمینان روش‌های غیرتهاجمی در جریان است؛ زیرا به لحاظ پیاده‌سازی، این روش‌ها مقرون به صرفه‌اند [۱۴-۱۲].

از دیگر روش‌های تعیین امپدانس یا سهم مشترک در اغتشاشات هارمونیک، روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی‌اند؛ از جمله این روش‌ها به کاربرد شبکه عصبی [۱۵ و ۱۶]، استفاده از سیستم فازی [۱۷ و ۱۷] و روش‌های طبقه‌بندی اطلاعات و ترکیب آنها با روش‌های مبتنی بر تعیین امپدانس می‌توان اشاره کرد [۱۸ و ۱۹].

برای سنجش میزان تأثیر هر مشترک هارمونیک‌زا بر شبکه، تنها نمی‌توان به میزان جریان هارمونیک آن بار (ناشی از بخش غیر خطی) و امپدانس معادل شبکه اکتفا کرد. براساس مطالعات انجام‌شده گفتنی است چالش‌های جدی پیش رو برای تحلیل صحیح تأثیر منابع مختلف هارمونیک، بر کیفیت ولتاژ شبکه عبارت‌اند از:

- حل مسئله تعیین سهم مشترکین در آلودگی هارمونیک نقاط مختلف شبکه: تحلیل سهم منابع مختلف هارمونیک تنها در نقطه اتصال آنها و از طریق تحلیل هارمونیک جریان منبع مزبور و امپدانس معادل تونن شبکه کافی نیست؛ بلکه میزان سهم هریک از این منابع در هارمونیک شدن ولتاژ نقاط مختلف شبکه باید محاسبه شود.
- پیش‌پردازش و پالایش اطلاعات اندازه‌گیری به‌منظور افزایش دقت تعیین سهم: دقت محاسبات تعیین سهم، تأثیر گرفته از میزان نوسانات هارمونیک مشترک در مقایسه با هارمونیک پس‌زمینه است؛ بنابراین، انجام پیش‌پردازش اطلاعات اندازه‌گیری با استفاده از روش‌های هوشمند دسته‌بندی اطلاعات می‌تواند به خوبی کیفیت نتایج را بهبود دهد.

- تعیین سهم پیوسته مشترکین در آلودگی ولتاژ نقاط مختلف شبکه: به‌منظور فراهم شدن امکان ارزیابی هارمونیک شبکه در طول زمان، لازم است مقدار سهم هر مشترک در آلودگی هارمونیک ولتاژ هر باس در طول زمان تعیین شود. براین اساس، الگوریتم پیشنهادی در این مقاله، از مرحله اندازه‌گیری تا محاسبه منحنی پیوسته سهم هر منبع هارمونیک در ولتاژ هارمونیک هر باس هدف را شامل

آلودگی‌ها از دیدگاه مشترکین به عملکرد ناصحیح تجهیزات حساس، کاهش طول عمر موتورها و ترانسفورماتورها منجر می‌شود. همچنین، اثر تجمعی هارمونیک‌های جریان مشترکین بر هارمونیک ولتاژ شبکه سبب می‌شود در اثر وجود هارمونیک جریان مجاز (از دیدگاه استاندارد)، امکان بروز هارمونیک ولتاژ غیرمجاز وجود داشته باشد. بدیهی است مشترکین با بارهای غیرخطی، ایجادکننده آلودگی‌اند؛ بنابراین، مسئول رفع مشکل نیز هستند. از طرف دیگر، مدیر شبکه باید ضمن حفظ کیفیت برق، نیاز مشترکین مختلف را پاسخگو باشد و هزینه‌های ناشی از هارمونیک را به شیوه‌ای عادلانه از مشترکین آلوده‌کننده اخذ کند. مرحله نخست برای دستیابی به این هدف، تعیین سهم مشترکین مختلف و ایجاد سازوکار مناسب برای بهبود کیفیت توان است [۳].

برای تعیین سهم مشترکین از آلودگی هارمونیک، روش‌های مختلفی ارائه شده است که این روش‌ها در دو دسته کلی روش‌های تک‌نقطه‌ای (مربوط به نقطه اتصال مشترک به شبکه) و روش‌های چندنقطه‌ای (آنالیز تأثیر مشترک در نقاط مختلف شبکه) تقسیم می‌شوند [۶-۴]. روش‌های پیشین چندنقطه‌ای به وجود اطلاعات همزمان از نقاط مختلف شبکه نیاز دارند؛ اما روش‌های تک‌نقطه‌ای چنین نیازی ندارند. روش‌های تک‌نقطه‌ای قادر به تعیین سهم یک بار در دیگر باس‌های شبکه غیر از باس اتصال همان بار نیستند. روش‌های متنوعی در هریک از دسته‌های فوق وجود دارد؛ اما بخش بزرگی از این روش‌ها به‌صورت مستقیم یا غیرمستقیم بر مبنای امپدانس معادل شبکه و مشترک، در هارمونیک مورد مطالعه عمل می‌کنند.

روش‌های تعیین امپدانس به دو گروه کلی تهاجمی<sup>۳</sup> و غیرتهاجمی<sup>۴</sup> دسته‌بندی می‌شوند. روش‌های تهاجمی بر مبنای تزریق هارمونیک به نقطه اتصال و اندازه‌گیری امپدانس سمت شبکه و مشترک عمل می‌کنند و به وجود تجهیزات مناسب در این زمینه نیازمندند [۷ و ۸]. روش‌های غیرتهاجمی بر مبنای مقادیر اندازه‌گیری‌شده در نقطه اتصال مشترک عمل می‌کنند و به منبع جداگانه برای تزریق هارمونیک نیاز ندارند. این دسته از روش‌های تعیین امپدانس متنوع‌اند؛ اما وجه مشترک این روش‌ها، تحلیل اطلاعات نقطه PCC است [۱۱-۹]. هم‌اکنون پژوهش‌های مختلفی در

### ۳- دسته‌بندی هوشمند اطلاعات اندازه‌گیری

در یک شبکه قدرت گسترده، با توجه به امیدانس خطوط و ترانسفورماتورها، تعدادی از بارهای هارمونیک‌زا در ایجاد هارمونیک ولتاژ هر باس نقش اصلی دارند و سایرین تأثیر اندکی خواهند داشت. تأثیر هریک از این بارهای هارمونیک‌زا متأثر از در مدار بودن یا خارج از مدار بودن این خطوط و ترانسفورماتورها و همچنین مقدار هریک از این بارهای هارمونیک‌زا در مرتبه‌های مختلف است؛ بنابراین در این مقاله هدف آن است که روشی برای تعیین سهم پیوسته هر بار هارمونیک‌زا در هر باس هدف در شبکه پیشنهاد شود تا بر مبنای آن، شاخص‌های پیشنهادی، محاسبه و وضعیت شبکه به‌طور مناسب تحلیل شود.

اگر در شبکه مدنظر،  $m$  بار هارمونیک‌زا و  $n$  باس هدف در نظر گرفته شود، هدف، یافتن ماتریس سهم تمام بارها در تمام باس‌های مزبور است که تشکیل یک ماتریس  $m \times n$  می‌دهد. این ماتریس در طول زمان، ثابت نیست؛ بلکه با هر تغییر مهم در شبکه تغییر می‌کند؛ برای مثال، براساس این تغییرات مهم، پرپود ۲۴ ساعتی در شبکه مورد مطالعه را به چند بازه کوچک‌تر می‌توان تقسیم کرد. هدف آن است که ماتریس سهم برای هریک از بازه‌های زمانی مزبور محاسبه شود. طول هریک از این بازه‌ها حداکثر ۸ ساعت در نظر گرفته شده است (با توجه به شیفت‌های کاری صنایع). الگوریتم پیشنهادی به‌طوری طراحی شده است که تغییر در مقادیر امیدانس شبکه را شناسایی کند و طول بازه‌ها را در صورت نیاز کاهش دهد؛ بنابراین در طول ۲۴ ساعت شبانه‌روز، حداقل ۳ ماتریس  $m \times n$  سهم خواهیم داشت که برخی از درایه‌های آنها ممکن است بسیار شبیه به هم یا یکسان باشند.

یکی از چالش‌های همیشگی در موضوع تعیین سهم بارهای هارمونیک‌زا، میزان نوسان هارمونیک پس‌زمینه است [۱۰ و ۲۰]. به‌منظور دستیابی به ماتریس سهم با بهترین دقت ممکن، باید بخشی از اطلاعات را استفاده کرد که برای تحلیل سهم هر مشترک در هر باس مناسب است. درواقع الگوریتم تعیین سهم، مقدار سهم هر بار هارمونیک‌زا در هر باس را در طول زمان می‌تواند نتیجه دهد؛ اما نتیجه به‌دست‌آمده برای سهم بار  $l$  در هارمونیک باس  $b$  زمانی

می‌شود. برخی از مهم‌ترین ویژگی‌های این الگوریتم عبارت‌اند از:

- روش پیشنهادی با استفاده از دسته‌بندی هوشمند اطلاعات، فقط بر مبنای اطلاعات اندازه‌گیری عمل می‌کند و تأثیر مخرب هارمونیک پس‌زمینه در دقت محاسبات نیز به خوبی کاهش یافته است.

- با استفاده از دسته‌بندی هوشمند اطلاعات، برای هر لحظه از زمان و برای هر بار هارمونیک‌زا، میزان تأثیر در نقاط مختلف را به‌صورت منحنی پیوسته می‌توان در اختیار داشت.

- در این روش، وجود مشترکین در سطوح مختلف ولتاژ و تفاوت باس‌های محل اتصال از نظر سطح اتصال کوتاه به‌طور خودکار و تنها براساس اطلاعات اندازه‌گیری و بدون نیاز به سنجش نسبی فاز در نقاط مختلف شبکه به دست می‌آید.

بدین‌منظور، الگوریتم پیشنهادی با جزئیات مربوطه در بخش ۲ تا ۴، ارائه و سپس نتایج پیاده‌سازی روش پیشنهادی بر شبکه استاندارد ۱۴ شینه در بخش ۵ بیان می‌شود. نتایج شبیه‌سازی بیان‌کننده توانایی الگوریتم مذکور در تعیین دقیق سهم هارمونیک‌ها و تحلیل و ارزیابی تأثیر مشترکین هارمونیک‌زا بر شبکه است.

### ۲- فلوچارت کلی روش پیشنهادی

در روش پیشنهادی، الگوریتمی برای دسته‌بندی اطلاعات و همچنین برای تعمیم نتایج در نظر گرفته شده است تا با استفاده از آنها دقیق‌ترین ماتریس سهم در هر پرپود زمانی تعیین شود. فلوچارت کلی الگوریتم پیشنهادی در شکل (۱) نشان داده شده است.

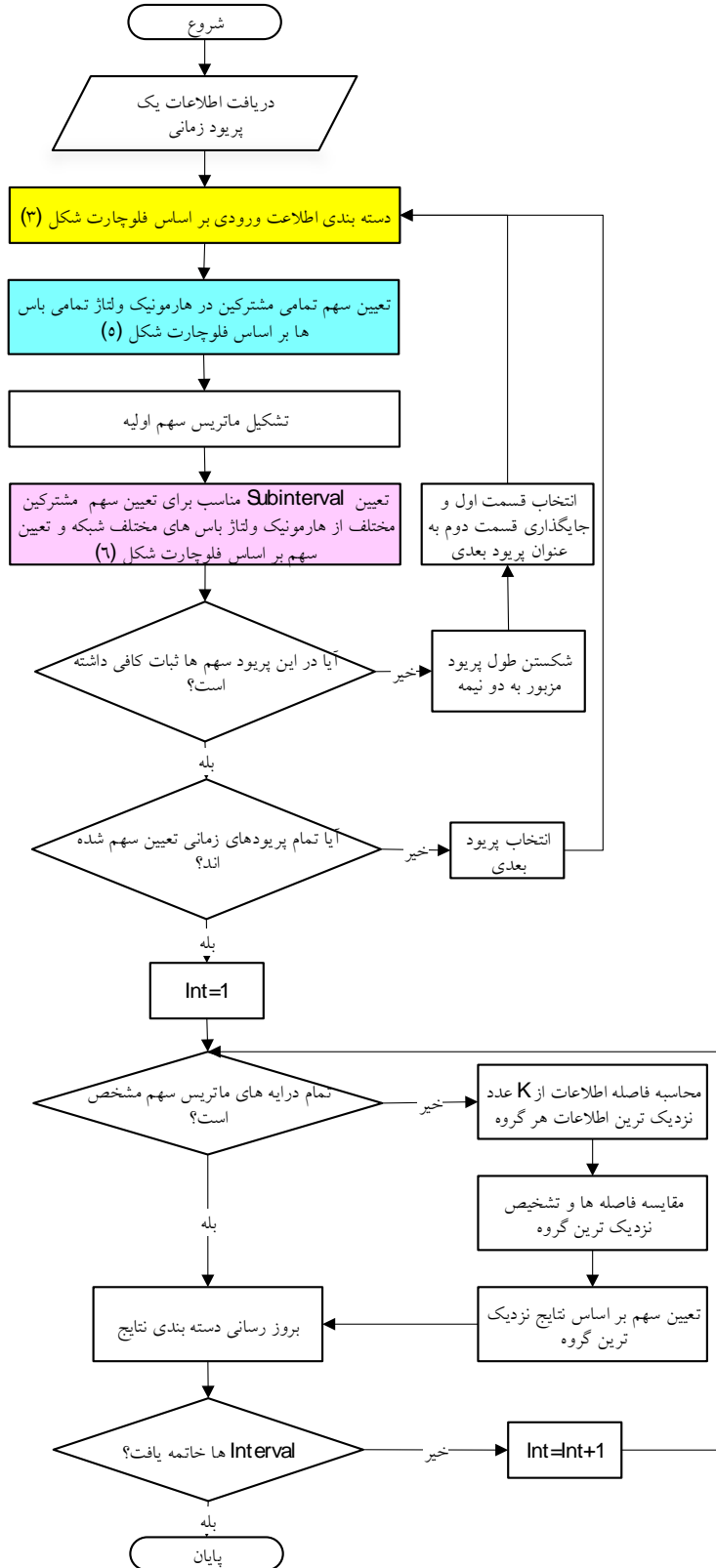
**مرحله اول:** دسته‌بندی اطلاعات ورودی براساس میزان تغییرات بارهای هارمونیک‌زا و تعیین بازه مناسب برای تعیین سهم هر بار هارمونیک‌ها؛

**مرحله دوم:** تعیین سهم مشترکین هارمونیک‌زا از هارمونیک ولتاژ باس‌های مختلف براساس نتایج مرحله اول و محاسبه مجدد بازه بهینه برای تعیین سهم؛

**مرحله سوم:** دسته‌بندی نتایج و اطلاعات ورودی به‌منظور تعمیم نتایج و تکمیل درایه‌های ماتریس سهم.

۴۴ تعیین سهم بارهای هارمونیک‌زا در آلودگی هارمونیک شبکه براساس دسته‌بندی هوشمند اطلاعات اندازه‌گیری

دقیق است که تغییرات هارمونیک ولتاژ ناشی از سایر بارهای در باس  $b$  در زمان مزبور کمتر از تغییرات ناشی از تفکیک زمانی ترسیم شده است. شکل (۲) برای شرح بهتر موضوع و چگونگی



شکل (۱): فلوجارت کلی روش پیشنهادی

پی‌درپی، دسته‌بندی اطلاعات تا جایی انجام می‌شود که با هر جابه‌جایی دیگر، فاصله بین اطلاعات تا میانگین دسته جدید کمتر نباشد.

در الگوریتم پیشنهادی، از روش K-Means clustering برای دسته‌بندی اطلاعات اندازه‌گیری به سه دسته شامل تغییرات کم، متوسط و زیاد استفاده شده است. اندازه جریان هارمونیک هر بار در هر مرتبه هارمونیک به‌عنوان مؤلفه مناسب برای دسته‌بندی استفاده شده است. اطلاعات حاصل از اندازه‌گیری در نقطه اتصال تمام بارهای هارمونیک‌زا در طول زمان به سه دسته تغییرات کم، متوسط و زیاد دسته‌بندی می‌شوند. همان‌طور که برای نمونه در شکل (۲) مشاهده می‌شود، براساس میزان تغییر بارهای هارمونیک‌زا، کل پرپود ۲۴ ساعته به ۸ زیربازه تقسیم شده است. در هر یک از این زیربازه‌ها، بارهایی کاندیدای تعیین سهم‌اند که تغییرات زیاد دارند؛ البته بارهای با تغییرات متوسط نیز در مواردی ممکن است گزینه مناسب برای تعیین سهم باشند که به شرایط شبکه و سهم بارهای مختلف در هارمونیک ولتاژ باس‌ها مرتبط‌اند.

پس از انجام مرحله بالا باید در هر بازه، از بین زیربازه‌هایی که برای تعیین سهم یک بار، مناسب تشخیص داده شده‌اند (شدت تغییرات هارمونیک آن بار در آن بازه‌ها زیاد بوده است)، بهترین زیربازه را مشخص کرد. ابتدا با فرض تساوی سهم بارهای هارمونیک‌زای مختلف، این انتخاب انجام می‌شود؛ بدین منظور، مثلاً بین زیربازه‌هایی که برای تعیین سهم بار  $L$  مناسب‌ترند، مقدار شاخص  $RLCHI$  با استفاده از رابطه (۱) محاسبه می‌شود. بازه‌ای که در آن  $RLCHI$  بالاترین مقدار را داشته باشد، بهترین بازه برای تحلیل اثر این بار در نظر گرفته می‌شود.

$$RLCHI = \frac{\sum_{t=t_1}^{t_2} ||I_L(t+1) - I_L(t)||}{t_2 - t_1} \quad (1)$$

$$\sum_{\substack{k=1 \\ k \neq L}}^m \frac{\sum_{t=t_1}^{t_2} ||I_k(t+1) - I_k(t)||}{t_2 - t_1}$$

این رابطه برای یک بازه بین زمان  $t_1$  و  $t_2$  نوشته شده است.

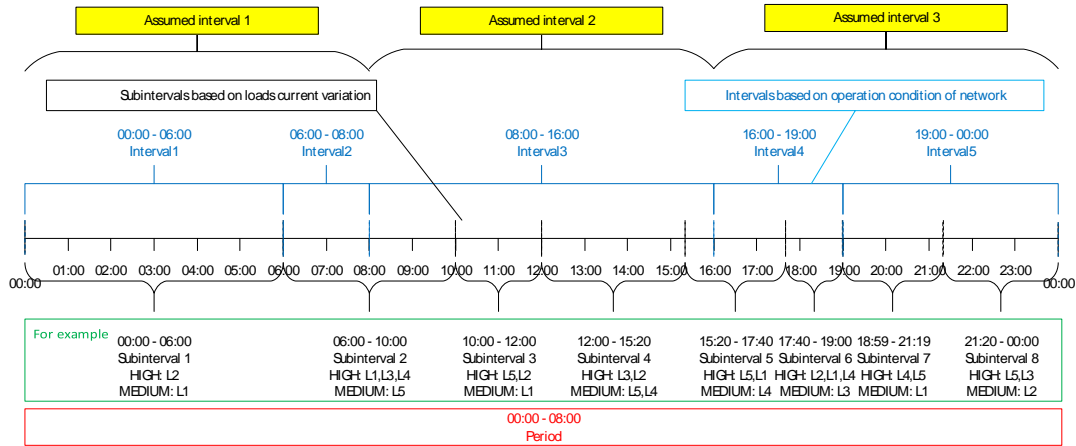
مطابق شکل (۲)، در این روش پیشنهادی، یک پرپود محاسبات ۲۴ ساعت در نظر گرفته شده است. این مدت به سه بازه پیش‌فرض ۸ ساعته تقسیم شده است. الگوریتم پیشنهادی تغییرات شبکه را از طریق تغییرات امپدانس دنبال می‌کند و در صورت نیاز، بازه‌های ۸ ساعته را به بازه‌های کوچک‌تری تغییر می‌دهد. به هریک از این حالات که ثبات تقریبی در شبکه برقرار است (وضعیت خطوط، بارها و ژنراتورهای مهم ثابت است) یک «حالت عملکرد» شبکه گفته می‌شود. در هر یک از این حالات عملکرد، سهم بارهای هارمونیک‌زا نیز تقریباً ثابت است. زیربازه‌ها مدت زمانی‌اند که براساس دسته‌بندی اطلاعات بارهای هارمونیک‌زا از نظر شدت تغییرات اندازه جریان تشکیل می‌شوند. نمونه‌ای از نتایج این دسته‌بندی نیز به صورت زیربازه‌های ۱ تا ۸ در شکل (۱) نشان داده شده است. هر حالت عملکردی شبکه، یک یا چند بازه زمانی براساس شدت تغییرات هارمونیک بارها را شامل می‌شود.

تاکنون طبقه‌بندی و دسته‌بندی اطلاعات با الگوریتم‌ها و روش‌های مختلفی انجام شده است [۲۷-۲۱]. برای نمونه به به‌کارگیری طبقه‌بندی Super Vector Machine (SVM) در پیش‌بینی شاخص‌های کیفیت توان [۲۲] یا استفاده از طبقه‌بندی Bayes در پیش‌بینی پخش خطاهای آبشاری [۲۳] اشاره می‌شود. همچنین روش KNN در تشخیص اغتشاشات کیفیت توان [۲۴] یا در پیش‌بینی تولید نیروگاه‌های بادی [۲۵] استفاده شده است. همچنین، به کاربرد روش K-Means Clustering در تعیین منبع فلیکر [۲۶] و در تعیین الگوی فروافتادگی ولتاژ [۲۷] می‌توان اشاره کرد.

روش دسته‌بندی K-Means یکی از بهترین و پرکاربردترین روش‌های دسته‌بندی هوشمند اطلاعات است که در موضوع کیفیت توان نیز استفاده شده است [۲۷ و ۲۶ و ۱۸]. این روش، دقت بالایی برای دسته‌بندی اطلاعات دارد و اطلاعات ورودی را به صورت خیره به تعداد دسته دلخواه تقسیم می‌کند. همان‌طور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود، در این روش ابتدا اطلاعات به صورت تصادفی در تعداد دسته دلخواه قرار می‌گیرند. سپس با جابه‌جایی اطلاعات بین دسته‌ها و میانگین‌گیری‌های

۴۶ تعیین سهم بارهای هارمونیک‌زا در آلودگی هارمونیک شبکه براساس دسته‌بندی هوشمند اطلاعات اندازه‌گیری

طی این رابطه، متوسط قدرمطلق تغییرات اندازه جریان بارها  $L$  بر متوسط قدرمطلق تغییرات اندازه جریان سایر بارها تقسیم می‌شود؛ بنابراین، برای هر بار  $L$ ، یک بازه بین کل بازه‌ها بیشترین مقدار را خواهد داشت که همان انتخاب می‌شود.



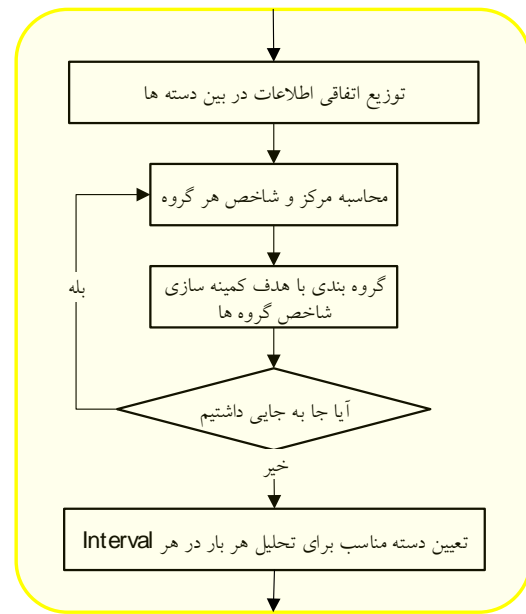
شکل (۲): نمونه‌ای از دسته‌بندی زمانی اطلاعات اندازه‌گیری

سهم با استفاده از روشی انجام شده است که در ادامه تشریح می‌شود. سپس براساس نتایج حاصل از آن، تعیین بازه بهینه برای تعیین سهم هر بار اصلاح می‌شود و پس از پایان حلقه بین مرحله‌های اول و دوم، نتیجه نهایی تعیین سهم به دست می‌آید. همان‌طور که گفته شد در این مقاله، ماتریسی برای هر بازه محاسبه می‌شود که درایه‌های آن میزان تأثیر هر بار هارمونیک‌زا در هارمونیک ولتاژ باس‌های مدنظر است. هارمونیک ولتاژ در باس نمونه ( $V_{hb}$ ) به صورت جمع هارمونیک ولتاژ ناشی از بار مدنظر ( $V_{hb}(L)$ ) و هارمونیک پس‌زمینه ناشی از سایر بارهای هارمونیک‌زا ( $BH_{hb}$ ) خواهد بود که به صورت زیر بیان می‌شود:

$$V_{hb} = V_{hb}(L) + BH_{hb} \quad (2)$$

براساس این رابطه، دیاگرام فازوری ولتاژ هارمونیک در مرتبه  $h$  در باس  $b$  به صورت شکل (۳) خواهد بود؛ براساس این، رابطه مثلثاتی برآیند جمع دو بردار به صورت زیر خواهد بود:

$$|V_{hb}|^2 = |V_{hb}(L)|^2 + |BH_{hb}|^2 - 2|V_{hb}(L)||BH_{hb}|\cos(\phi_{hb}) \quad (3)$$



شکل (۳): فلوچارت دسته‌بندی اولیه اطلاعات ورودی

#### ۴- دسته‌بندی هوشمند اطلاعات اندازه‌گیری

در انتهای مرحله پیش‌پردازش، با فرض مساوی بودن سهم بارهای هارمونیک‌زا در ولتاژ هارمونیک باس‌های مختلف، بازه‌های زمانی مناسب برای تعیین سهم هر بار هارمونیک‌زا در هر حالت عملکردی شبکه مشخص شد؛ بنابراین در این مرحله، براساس نتایج مرحله نخست، تعیین

این رابطه براساس نتایج دستگاه معادلات به صورت زیر، بازنویسی و مقدار  $\beta$  محاسبه می شود:

$$\cos(180 - \beta) = \frac{|V_{hb}|^2 + |Z_{hb}(L)|^2 |I_h(L)|^2 - |BH_{hb}|^2}{2|V_{hb}| |Z_{hb}(L)| |I_h(L)|} \quad (۷)$$

بدین ترتیب، سهم بار  $L$  در هارمونیک ولتاژ باس  $b$  به صورت زیر به دست می آید:

$$HC_{hb}(L) = \frac{|Z_{hb}(L)| |I_h(L)| \cos(\beta)}{|V_{hb}|} \quad (۸)$$

یکی از مزایای مهم روش پیشنهادی آن است که به اطلاعات فاز جریان و ولتاژ یا اختلاف آنها در تعیین سهم یک مشترک در آلودگی هارمونیک نقاط مختلف شبکه نیاز ندارد. بدین ترتیب، به در نظر گرفتن یک نقطه مرجع برای تعیین فازها نیاز ندارد و تنظیم زمانی سیستم به نحوی که اطلاعات ولتاژ و جریان در نقاط مختلف شبکه تقریباً همزمان باشد، کافی است. پس از تعیین سهم براساس فلوجارت شکل (۵)، همان طور که در شکل (۶) نشان داده شده است، نتیجه تعیین سهم در رابطه (۹) اعمال می شود. این رابطه نیز مشابه رابطه (۱) برای تعیین بازه مناسب به منظور تعیین سهم هارمونیک استفاده می شود؛ با این تفاوت که در این رابطه سهم بارها یکسان در نظر گرفته نمی شود.

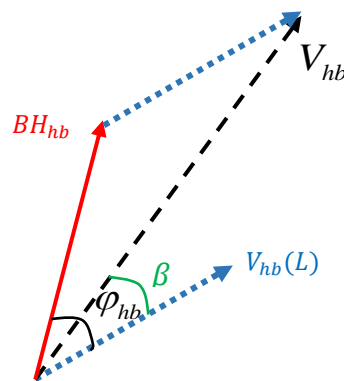
$$RLCH2 = \frac{HC_{hb}(L) \sum_{t=t_1}^{t_2} ||I_L(t+1)| - |I_L(t)||}{\sum_{k=1}^m \frac{HC_{hb}(k) \sum_{t=t_1}^{t_2} ||I_k(t+1)| - |I_k(t)||}{t_2 - t_1}} \quad (۹)$$

گفتنی است روابط ۱ و ۹ هر دو برای هارمونیک مرتبه  $h$  و تعیین بازه مناسب برای تعیین سهم بار  $k$  در باس  $b$  نوشته شده است. پریودهای زمانی در الگوریتم پیشنهادی ثابت نیستند. همان طور که در شکل (۱) مشاهده می شود، روندی برای تعیین لزوم تقسیم یک بازه به دو نیمه با مقادیر سهم متفاوت در نظر گرفته شده است. اگر بیش از ۵۰ درصد مقادیر ماتریس سهم در بازه ۱۰ درصدی حول مقدار متوسط همان درایه ماتریس سهم در پریود مزبور نباشد، بازه مزبور به دو نیمه تقسیم می شود و مطالعات تعیین سهم و

حال اگر ولتاژ هارمونیک ناشی از بار  $L$  را به صورت حاصل ضرب امپدانس فرضی  $Z_{hb}(L)$  در جریان هارمونیک بار  $L$  بنویسیم، آنگاه داریم:

$$|V_{hb}|^2 = |Z_{hb}(L)|^2 |I_h(L)|^2 + |BH_{hb}|^2 - 2|Z_{hb}(L)| |I_h(L)| |BH_{hb}| \cos(\varphi_{hb}) \quad (۴)$$

گفتنی است  $|I_h(L)|$  و  $|V_{hb}|$  از اندازه گیری به دست آمده و معلوم اند  $|Z_{hb}(L)|^2$ ،  $|BH_{hb}|^2$  و  $|Z_{hb}(L)| |BH_{hb}| \cos(\varphi_{hb})$  مجهول اند.



شکل (۴): دیاگرام فازوری میزان تأثیر یک مشترک هارمونیک را بر ولتاژ هارمونیک نقطه هدف

با توجه به پیش پردازش انجام شده بر اطلاعات اندازه گیری در مرحله نخست، مقدار تغییرات هارمونیک پس زمینه در مقایسه با هارمونیک بار  $L$  کم است؛ بنابراین با انتخاب سه رکورد متوالی اطلاعات (که با فرکانس مناسب رکوردگیری شده اند)، دستگاه معادلات خطی با سه معادله و سه مجهول می توان تشکیل داد. بدین ترتیب، سه بخش مجهول رابطه محاسبه می شوند.

برای دستیابی به درصد سهم بار مزبور در هارمونیک ولتاژ باس  $b$  باید  $|V_{hb}(L)|$  محاسبه شود. برای این منظور رابطه (۲) به صورت زیر بازنویسی می شود:

$$BH_{hb} = V_{hb} - V_{hb}(L) \quad (۵)$$

این رابطه برابر با جمع بردار برآیند یا همان ولتاژ هارمونیک باس  $b$  و منفی بردار تأثیر بار  $L$  است؛ بنابراین، با توجه به رابطه مثلثاتی برآیند، رابطه زیر به دست می آید:

$$|BH_{hb}|^2 = |V_{hb}|^2 + |V_{hb}(L)|^2 - 2|V_{hb}| |V_{hb}(L)| \cos(180 - \beta) \quad (۶)$$



۴۸ تعیین سهم بارهای هارمونیک‌زا در آلودگی هارمونیکی شبکه براساس دسته‌بندی هوشمند اطلاعات اندازه‌گیری

و ترانس‌ها و مقدار هریک از این بارهای هارمونیکی در مرتبه‌های مختلف است. به عبارت دیگر، میزان تبدیل هارمونیک جریان منابع مختلف به هارمونیک ولتاژ در باس‌های مختلف شبکه، متأثر از مکان منابع هارمونیکی و ماتریس امپدانس شبکه است. روش پیشنهادی در این مقاله قادر است با ارزیابی میزان سهم هریک از منابع هارمونیکی در ولتاژ هارمونیکی باس‌های مختلف، میزان تبدیل هارمونیک جریان هر منبع هارمونیکی به هارمونیک ولتاژ در باس‌های مختلف را ارزیابی کند.

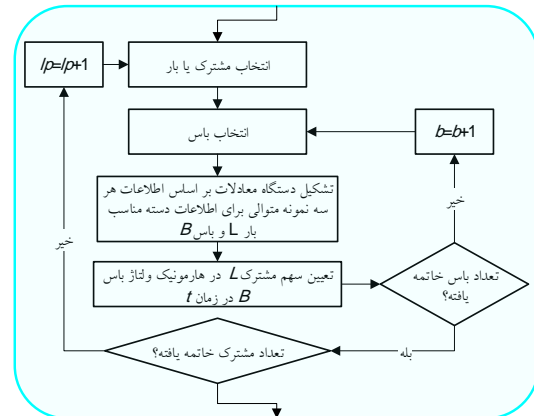
### ۵- دسته‌بندی هوشمند اطلاعات به منظور

#### تخمین درایه‌های ماتریس سهم

اگر میزان تغییرات هارمونیک پس‌زمینه در مقایسه با هارمونیک بار مورد مطالعه در طول یک بازه کم نباشد، تعدادی از درایه‌های ماتریس سهم در بازه مزبور با دقت مطلوب محاسبه نمی‌شوند. به عبارت دیگر، بارهای خطی موجود در شبکه، متأثر از هارمونیک ولتاژ ایجادشده در باس محل اتصال خود، مقداری هارمونیک جریان خواهند داشت. همچنین، همان‌طور که در شرط تشکیل دستگاه معادلات گفته شد، لازمه حل رابطه، کم‌بودن نوسان هارمونیک پس‌زمینه در مقایسه با هارمونیک منبع مدنظر است. با دسته‌بندی اطلاعات اندازه‌گیری، بازه‌های مناسب برای تعیین سهم منابع هارمونیکی مشخص می‌شوند و در این مرحله (مرحله سوم)، درایه‌هایی از ماتریس سهم که در برخی از بازه‌های زمانی با دقت مناسب قابل محاسبه نیستند، براساس بازه‌های مشابه پیشین تخمین زده می‌شوند. با این روش، میزان اثر هارمونیک پس‌زمینه در تعیین سهم منابع هارمونیکی به حداقل رسیده است.

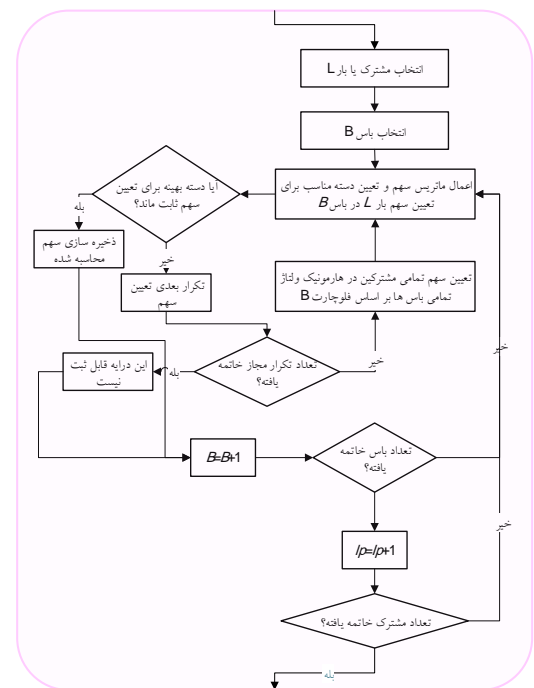
اگر از میان بارهای هارمونیک‌زای مورد مطالعه، فقط اثر یکی از آنها در باس مدنظر باقیمانده باشد (تمامی درایه‌های یک ستون ماتریس سهم به جز یک درایه محاسبه شده باشد)، آنگاه با تفاضل حاصل جمع درایه‌های آن ستون از ۱۰۰ درصد، درایه مزبور تخمین زده می‌شود؛ اما اگر بیش از یک درایه مجهول در یک ستون ماتریس سهم

تشکیل ماتریس مدنظر برای هر بازه، جداگانه و با روش مشابه پیگیری می‌شود.



شکل (۵): تعیین سهم تمامی مشترکین از هارمونیک ولتاژ

#### تمامی باس‌ها

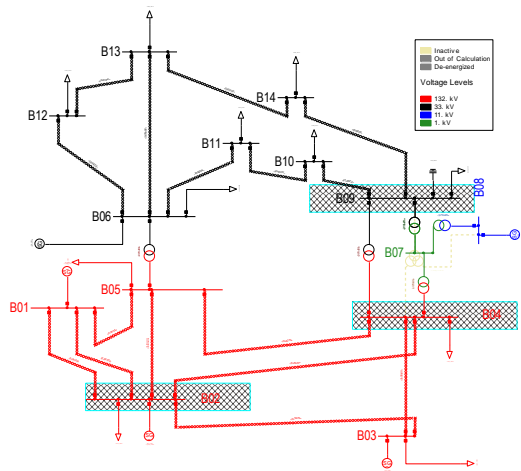


شکل (۶): فلوجارت تعیین بازه بهینه محاسبه درایه‌های

#### ماتریس سهم

در یک شبکه قدرت گسترده، با توجه به امپدانس خطوط و ترانسفورماتورها، تعدادی از بارهای هارمونیک‌زا در ایجاد هارمونیک ولتاژ هر باس نقش اصلی دارند و سایرین تأثیر اندکی خواهند داشت. تأثیر هریک از این بارها نیز متأثر از در مدار بودن یا خارج از مدار بودن این خطوط

شکل (۷)، سه بار هارمونیک در باس های ۲، ۴ و ۹ در نظر گرفته شده است که نسبت هارمونیک مرتبه ۵، ۷ و ۱۱ آنها در مقایسه با مؤلفه اصلی در جدول (۱) ارائه شده است.



شکل (۷): محل بارهای هارمونیک‌زا در شبکه ۱۴ شینه

جدول (۱): میزان مؤلفه هارمونیک بارهای آلوده‌کننده

عنوان	بار ۲	بار ۴	بار ۹
مؤلفه اصلی (مگاوات)	۲۱/۷	۴۷/۸	۳۳/۸۵
هارمونیک ۵	۱۰٪	۵٪	۱۵٪
هارمونیک ۷	۵٪	۱۵٪	۲۰٪
هارمونیک ۱۱	۱۵٪	۱۰٪	۵٪

## ۶-۲- نتایج شبیه‌سازی پیش‌پردازش اطلاعات

همان‌طور که گفته شد، به منظور تعیین دسته مناسب از اطلاعات اندازه‌گیری، از پیش‌پردازش اطلاعات با الگوریتم K-Means Clustering استفاده شده است. به منظور تست نتایج الگوریتم پیشنهادی در این مرحله، از اطلاعات تست تولیدشده با نرم‌افزار DIgSILENT استفاده شده است. بارهای متصل به باس های ۲، ۴ و ۹ و بارهای آلوده‌کننده در شبکه مورد مطالعه‌اند و برای هر یک از آنها، دو بار دیگر، نقش هارمونیک پس‌زمینه را دارند. اگر در این شبیه‌سازی، بررسی وضعیت هارمونیک ولتاژ در باس های ۲، ۴ و ۹ مدنظر باشد، هدف، تعیین ماتریس سهم با ابعاد ۳×۳ در هر بازه است. در این ماتریس، درایه سطر i و ستون j به معنی سهم بار هارمونیک‌زای iام در هارمونیک ولتاژ باس jام است.

وجود داشته باشد، مرحله نهایی از الگوریتم پیشنهادی به کمک خواهد آمد.

همان‌طور که در قسمت پایینی شکل (۱) مشاهده می‌شود، در این مرحله، درایه‌هایی از ماتریس سهم که محاسبه نشده‌اند، با دسته‌بندی اطلاعات ورودی و نتایج (مربوط به بازه‌های گذشته)، تخمین زده می‌شوند. به عبارت دیگر، دسته‌بندی هوشمند استفاده‌شده در این مرحله به دنبال تخمین درایه‌های خالی در ماتریس سهم، براساس نتایج بازه‌های گذشته است و ارتباط مستقیمی با دسته‌بندی استفاده‌شده در پیش‌پردازش ندارد. روش استفاده‌شده در این دسته‌بندی، الگوریتم K-Means\_Nearest Neighbor است. ملاک این دسته‌بندی اندازه ولتاژ و جریان اندازه‌گیری‌شده در نقطه اتصال تمامی بارهای هارمونیک‌زا و باس‌های هدف است. اگر فرض شود ماتریس سهم بازه شماره ۱ ناقص است، میانگین مقادیر اندازه ولتاژ و جریان هر بار و اندازه ولتاژ هر باس در طول این بازه محاسبه می‌شود. اگر m بار هارمونیک‌زا و n باس هدف وجود داشته باشد، آنگاه در یک فضای  $2 \times m + n$  بعدی، باید به دنبال K نقطه با کمترین فاصله بود؛ زیرا برای هر بار دو متغیر اندازه ولتاژ و اندازه جریان و برای هر باس یک متغیر اندازه ولتاژ استفاده خواهد شد. هر یک از این K نمونه اطلاعات، مربوط به بازه‌ای از گذشته است که ماتریس سهم آن کامل است؛ بنابراین، هر دسته‌ای که بین این K نمونه اطلاعات، اکثریت را داشته باشد، به‌عنوان دسته مناسب برای اطلاعات بازه شماره ۱ انتخاب می‌شود و نتیجه تعیین سهم آن دسته (ماتریس سهم مربوطه) به بازه شماره ۱ تعمیم می‌یابد.

## ۶-۳ نتایج شبیه‌سازی

در این بخش، الگوریتم پیشنهادی برای محاسبه سهم بارها و شاخص‌های پیشنهادی، در شبکه ۱۴ شینه IEEE استفاده شده است. در ابتدا شرایط شبیه‌سازی‌ها، بیان و سپس نتایج پیاده‌سازی الگوریتم ارائه می‌شود.

## ۶-۱ معرفی شبکه و ارائه اطلاعات

مبنای محاسبات، شبکه ۱۴ شینه موجود در مثال‌های نرم‌افزار DIgSILENT است. در این شبکه و مطابق با

۶-۳- ارزیابی دقت روش پیشنهادی برای تعیین

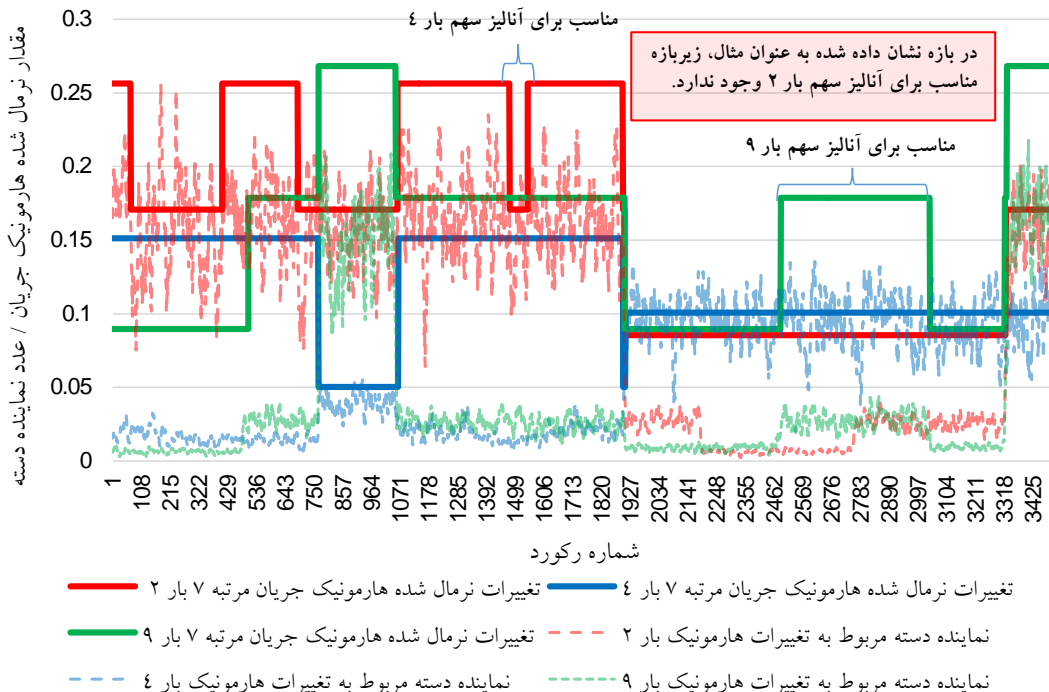
سهم

براساس قانون جمع آثار، مقدار ولتاژ هارمونیک در نقطه PCC برابر با جمع ولتاژ هارمونیک ناشی از شبکه و بار مشترک است. دیاگرام فازوری شکل (۹) نیز نشان می‌دهد که مقدار ولتاژ هارمونیک در نقطه PCC در واقع از جمع برداری ولتاژهای هارمونیک پس‌زمینه و مشترک تشکیل شده است. اگر  $\beta_h$  زاویه بین ولتاژ هارمونیک نقطه PCC و ولتاژ هارمونیک ناشی از شبکه (هارمونیک پس‌زمینه) در هارمونیک مرتبه  $h$  باشد و  $\alpha_h$  اختلاف فاز بین بردار  $V_{pcc_h}$  و  $Zu_h I_{pcc_h}$  باشد، سهم شبکه در اندازه ولتاژ هارمونیک در مرتبه  $h$  در نقطه اتصال و با تصویر بردار  $Vu_h$  در راستای  $V_{pcc_h}$  به دست آمده است. با این کار خواهیم داشت:

$$|V_{pcc, u_h}| = |Vu_h| \cos(\beta_h) \quad (10)$$

برای تولید مثال محاسباتی، تنظیمات گفته‌شده در بخش قبل، روی مدل شبکه ۱۴ شینه اعمال شد. سپس با اعمال نوسان در بارهای ۲، ۴ و ۹، مجموعه‌ای از اطلاعات ولتاژ نقاط مختلف شبکه و جریان هارمونیک این بارها تولید شد. سپس این اطلاعات در ورودی الگوریتم پیشنهادی قرار گرفت و نتایج دسته‌بندی همراه با اطلاعات ورودی ترسیم شد.

در شکل (۸)، نمونه‌ای از نتایج دسته‌بندی اطلاعات اندازه‌گیری به سه دسته با نوسانات کم، متوسط و زیاد ارائه شده است. با توجه به این شکل، الگوریتم پیشنهادی برای مرحله پیش‌پردازش به خوبی توانایی دسته‌بندی اطلاعات ورودی را دارد. در هر بازه، میزان تغییرات هارمونیک مشترکین مختلف ارزیابی می‌شود تا براساس شدت تغییرات آن، زیربازه‌ها تشکیل شوند. دو نمونه از زیربازه‌های مزبور در شکل (۸) نشان داده شده است.



شکل (۸): دسته‌بندی اطلاعات ورودی

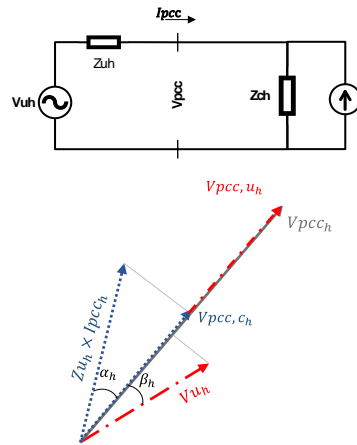
$$HC_{Load,h} = \frac{|Zu_h \parallel Ipcc_h| \cos(\delta_h + \theta_h)}{|Vpcc_h|} \times 100 \quad (13)$$

$$HC_{Utility,h} = 100 - HC_{Load,h} \quad (14)$$

همان‌طور که در رابطه (۱۳) مشاهده می‌شود، با در اختیار داشتن اندازه جریان و ولتاژ هارمونیک نقطه اتصال بار، اختلاف فاز جریان هارمونیک بار با ولتاژ نقطه اتصال، اندازه و فاز امپدانس معادل شبکه در مرتبه هارمونیک  $h$  از دید مشترک، سهم مشترک در هارمونیک ولتاژ باس اتصال را می‌توان محاسبه کرد.

در شبکه واقعی باید مقدار لحظه‌ای امپدانس معادل تونن شبکه را با استفاده از رابطه (۱۲) و در شرایطی محاسبه کرد که هارمونیک پس‌زمینه تغییرات کمی دارد [۳]؛ اما زمانی که برای تست نتایج از Calculation Examples استفاده می‌شود، مقدار دقیق این امپدانس با استفاده از ترسیم مشخصه امپدانس در نقطه اتصال بار در نرم‌افزار DigSILENT در دسترس است. شکل (۱۰) مشخصه امپدانس از دیدگاه بارهای ۲، ۴ و ۹ را نشان می‌دهد.

با استفاده از رابطه (۱۲) و براساس اطلاعات در دسترس در شبکه واقعی، مقدار امپدانس معادل تونن از دید بارهای ۲، ۴ و ۹ محاسبه شده است. براساس نتایج شبیه‌سازی که در جدول (۲) ارائه شده است، در باس شماره ۲، ۴ و ۹ که برای نمونه انتخاب شده‌اند، مقدار محاسبه شده از الگوریتم پیشنهادی در مقایسه با مشخصه امپدانس، خطایی کمتر از ۳/۵ درصد نشان می‌دهد. جزئیات میزان خطای روش‌های مختلف در جدول (۳) ارائه شده است؛ حال آنکه نتایج با استفاده از روش [۳] خطایی در حدود ۵/۲ درصد را نشان می‌دهد. در صورتی که از پیش‌پردازش پیشنهاد شده در قسمت یک مقاله برای بهبود دقت روش [۳] استفاده شود، دقت نتایج به خطایی در حدود ۳/۹ درصد می‌رسد؛ بر این اساس، الگوریتم پیشنهادی در تخمین امپدانس و محاسبه سهم مشترک موفق عمل کرده است. اگر یک باس هدف، نقطه اتصال مشترک در نظر گرفته شود، نتایج حاصل از روش پیشنهادی با مشخصه امپدانس، محاسبه و با نتایج حاصل از روش پیشنهادی [۳] مقایسه می‌شوند.



شکل (۹): دیاگرام فازوری ولتاژ هارمونیک در نقطه اتصال مشترک

سهم مشترک در اندازه ولتاژ هارمونیک در مرتبه  $h$  در نقطه اتصال در رابطه (۱۱) و با تصویر بردار  $Zu_h Ipcc_h$  در راستای  $Vpcc_h$  به دست آمده است.

$$|Vpcc,c_h| = |Zu_h \parallel Ipcc_h| \cos(\alpha_h) \quad (11)$$

براساس این رابطه مشاهده می‌شود میزان سهم مشترک از این ولتاژ هارمونیک، به جریان هارمونیک مشترک و امپدانس معادل تونن شبکه از دید مشترک وابسته است. اگر اختلاف فاز ولتاژ و جریان در نقطه PCC در هارمونیک  $h$  را  $\theta_h$  و فاز امپدانس  $Zu_h$  را  $\delta_h$  بنامیم، براساس دیاگرام فازوری شکل (۹) خواهیم داشت:

$$|Vu_h|^2 = |Vpcc_h|^2 + |Zu_h|^2 |Ipcc_h|^2 - 2|Vpcc_h| |Ipcc_h| |Zu_h| \cos(\delta_h) \cos(\theta_h) + 2|Vpcc_h| |Ipcc_h| |Zu_h| \sin(\delta_h) \sin(\theta_h) \quad (12)$$

که مقادیر  $|Ipcc_h|$ ،  $|Vpcc_h|$  و  $\theta_h$ ، معلوم و مقادیر  $|Zu_h|$ ،  $\delta_h$  و  $|Vu_h|^2$  مجهول‌اند. اگر میزان نوسانات هارمونیک پس‌زمینه ( $|Vu_h|^2$ ) در مقایسه با هارمونیک مشترک مورد مطالعه کم باشد، رابطه (۱۲) برای سه لحظه زمانی با شرایط مشابه نوشته می‌شود؛ زیرا مقدار امپدانس معادل تونن و فاز آن در بازه‌های زمانی کوتاه بدون تغییر خواهد بود. بدین ترتیب، دستگاه سه معادله و سه مجهول، تشکیل و مجهول محاسبه می‌شود.

اگر فاز  $Vpcc_h$  مبدا در نظر گرفته شود، فاز  $Zu_h \times Ipcc_h$  برابر با  $\delta_h + \theta_h$  خواهد بود؛ بنابراین، سهم مشترک از ولتاژ هارمونیک نقطه اتصال به صورت زیر محاسبه می‌شود:

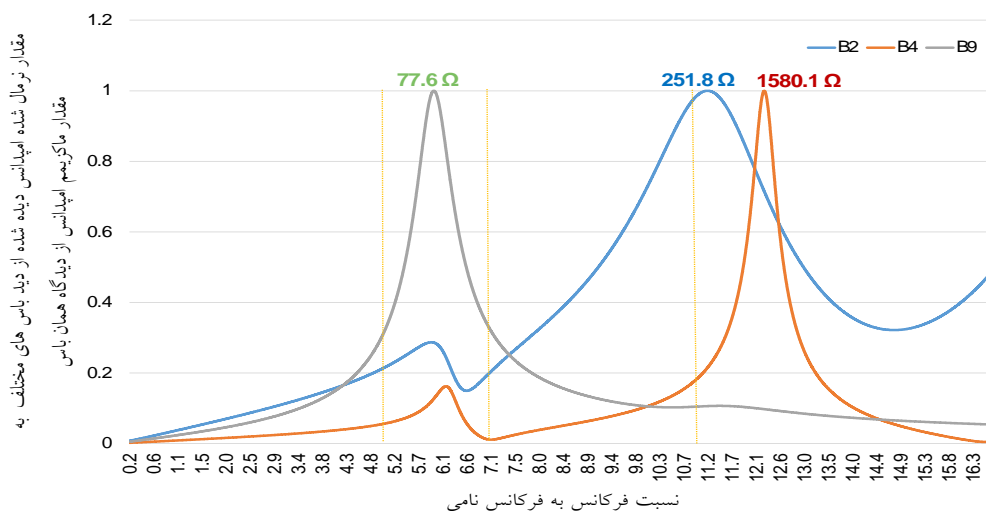
۵۲ تعیین سهم بارهای هارمونیک‌زا در آلودگی هارمونیک شبکه براساس دسته‌بندی هوشمند اطلاعات اندازه‌گیری

جدول (۳): مقایسه خطای تعیین امیدانس

Bus9	Bus4	Bus2	مرتبه هارمونیک	شرایط
۰.۷/۶۰	۰.۷/۸۰	۰.۵/۱۰	۵	استفاده از روش [۳]
۰.۲/۹۰	۰.۶/۰۰	۰.۴/۵۰	۷	
۰.۵/۰۰	۰.۶/۶۰	۰.۱/۷۰	۱۱	
۰.۴/۲۰	۰.۲/۵۰	۰.۲/۱۰	۵	روش [۳] همراه با پیش‌پردازش
۰.۴/۴۰	۰.۴/۳۰	۰.۴/۵۰	۷	
۰.۳/۶۰	۰.۴/۷۰	۰.۵/۱۰	۱۱	
۰.۵/۲۰	۰.۱/۹۰	۰.۱/۷۰	۵	روش پیشنهادی
۰.۴/۴۰	۰.۸/۶۰	۰.۲/۸۰	۷	
۰.۲/۴۰	۰.۲/۳۰	۰.۱/۹۰	۱۱	

جدول (۲): بررسی دقت روش تعیین امیدانس پیشنهادی با روش [۳] و مشخصه امیدانسی

Bus9	Bus4	Bus2	مرتبه هارمونیک	شرایط
۲۳/۹	۸۷/۳	۵۳/۶	۵	امیدانس واقعی
۲۶/۱	۱۸/۳	۴۹	۷	
۸/۱	۲۸۹/۹	۲۴۸/۴	۱۱	
۲۲/۱	۸۰/۵	۵۶/۳	۵	استفاده از روش [۳]
۲۵/۳	۱۹/۴	۵۱/۲	۷	
۷/۷	۳۰۹	۲۴۴/۱	۱۱	
۲۲/۹	۸۵/۱	۵۴/۷	۵	استفاده از روش [۳] همراه با پیش‌پردازش
۲۷/۲	۱۹/۱	۴۶/۸	۷	
۸/۴	۲۷۶/۱	۲۶۱/۲	۱۱	
۲۲/۷	۸۸/۹	۵۴/۵	۵	روش پیشنهادی
۲۷/۲	۱۹/۹	۵۰/۳	۷	
۸/۳	۲۹۶/۷	۲۴۳/۸	۱۱	



شکل (۱۰): مشخصه امیدانسی از دیدگاه باس بارهای ۲، ۴ و ۹

داده شده است. در این شکل، از رکورد شماره ۱ تا ۹۵ مربوط به حالت اصلی شبکه است. از رکورد ۹۵ تا ۱۳۵ مقدار بار در باس شماره ۴ به نصف تقلیل یافته و در رکوردهای ۱۳۵ تا ۱۸۰ مجدداً حالت اصلی شبکه حاکم است. از رکورد ۱۸۰ تا انتها، خط بین باس‌های ۲ و ۴ از مدار خارج است. با اعمال این تغییرات، حالات متنوعی از نوسان بارهای هارمونیک‌زا و تغییر در شرایط بهره‌برداری شبکه ایجاد می‌شود و مقادیری ذخیره شده‌اند که به‌طور متداول اندازه‌گیری می‌شوند (مانند اندازه و فاز جریان

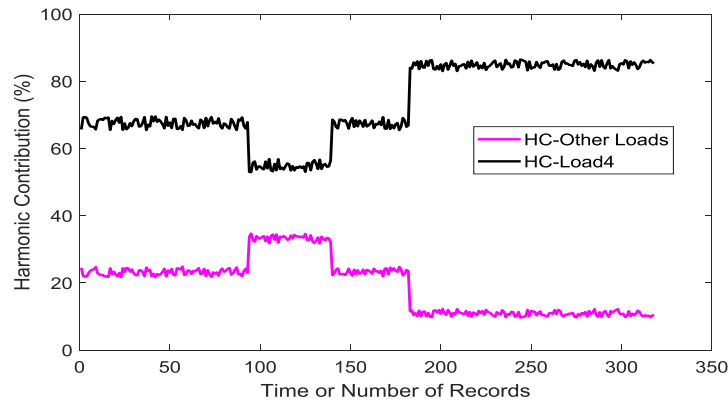
روش پیشنهادی دو مزیت اساسی دارد؛ نخست، تعیین سهم هر مشترک هارمونیک‌زا در هر باس دلخواه شبکه (و نه تنها در نقطه اتصال مشترک) به راحتی انجام می‌شود. دوم، روش مزبور در نهایت به یک دستگاه معادلات خطی منتهی شد که روش‌های حل متعدد و ساده‌ای برای آن وجود دارد.

### ۶-۴- تشکیل ماتریس سهم

به‌منظور ارزیابی قدرت روش پیشنهادی، وقوع دو تغییر در شبکه و بارها فرض شده است که در شکل (۱۱) نشان

شرایط عملکردی شبکه و خروج از یک بازه و ورود به بازه بعدی تشخیص داده شده است؛ بنابراین، برای هر بازه یا شرایط عملکردی شبکه، سهم‌ها، محاسبه و درایه‌های ماتریس سهم با استفاده از دسته‌بندی هوشمند اطلاعات تکمیل می‌شوند.

مشترک در نقطه اتصال و ولتاژ نقاط مختلف). سپس این اطلاعات، همانند اطلاعات اندازه‌گیری، به الگوریتم پیشنهادی وارد شده و نتایج تعیین سهم در آلودگی هارمونیک نقاط مختلف شبکه به دست آمده‌اند. همان‌طور که در شکل (۱۱) مشاهده می‌شود، با اعمال الگوریتم پیشنهادی بر اطلاعات ورودی، به خوبی تغییر



شکل (۱۱): منحنی تغییرات سهم بار ۴ و شبکه (جمع تأثیر بار ۲ و ۹) در هارمونیک ولتاژ مرتبه ۱۱ باس ۴

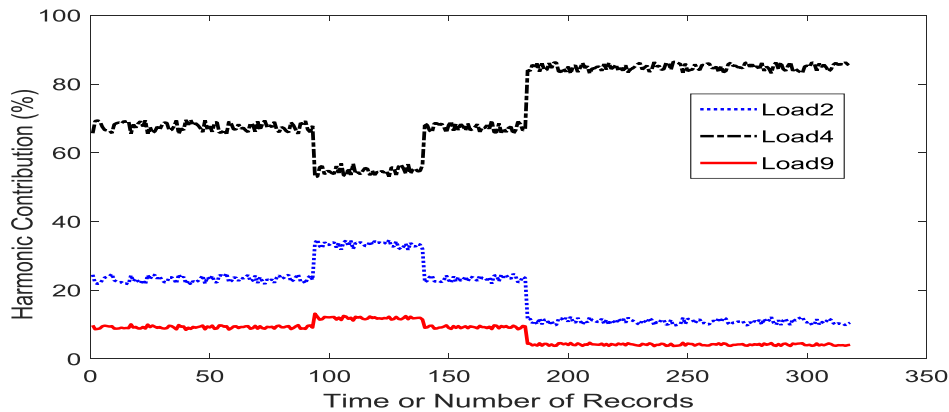
هارمونیک ولتاژ باس ۴ ایفا کند؛ اما با قطع یکی از دو خط اتصال باس ۴ به ۲ از رکورد ۱۸۰ تا آخر، باید میزان اثر بار ۲ در هارمونیک ولتاژ باس ۴ افت جدی داشته باشد. نتایج ارائه شده در شکل (۱۲) به خوبی این تغییرات را تأیید می‌کند. درباره بار باس ۹، افزایش تأثیر بار مزبور در هارمونیک ولتاژ باس ۴ با کاهش بار هارمونیک ۴ انتظار می‌رود؛ اما دلیل افت تأثیر این بار با خروج خط ۲ به ۴ نیز ناشی از افزایش امپدانس بین باس ۲ و ۴ است. بدین ترتیب، بخش کوچک‌تری از جریان هارمونیک بار ۹ بر ولتاژ هارمونیک آن سوی ترانسفورماتور ۱۳۲/۳۳ کیلوولت مؤثر شده است.

در شکل (۱۳)، منحنی پیوسته سهم بار شماره ۴ در باس‌های مختلف شبکه مشاهده می‌شود. براساس این شکل، سهم بار ۴ با کاهش ۵۰ درصدی مقدار آن (شامل بخش خطی و غیرخطی) در تمامی باس‌های شبکه کاهش می‌یابد. با بازگشت شرایط شبکه به شرایط پیش از کاهش بار، منحنی سهم نیز مجدداً به مقدار سهم پیشین بازمی‌گردد.

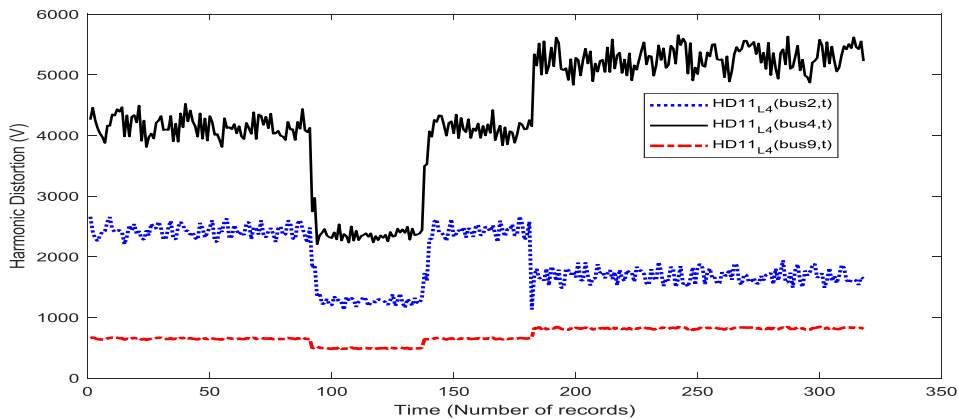
برای نمونه، همان‌طور که پیش‌بینی می‌شود، با کاهش ۵۰ درصدی بار ۴، میزان هارمونیک ولتاژ ناشی از این بار، کاهش و سهم شبکه (بارهای ۲ و ۹) افزایش یافته است. با خروج خط موجود بین باس ۲ و ۴ نیز سهم بار ۴ از هارمونیک ولتاژ باس ۴ افزایش یافته است؛ زیرا امپدانس معادل تونن شبکه افزایش یافته است. سهم بار ۲ در هارمونیک ولتاژ این نقطه نیز به دلیل خروج خط اتصال باس ۲ به ۴ قطعاً کاهش یافته است.

### ۶-۵- منحنی سهم بارهای هارمونیک

برای تحلیل میزان تأثیر مشترکین هارمونیک‌زا در طول زمان، در اختیار داشتن منحنی سهم آن بار در ولتاژ هارمونیک نقاط هدف در مرتبه‌های گوناگون بسیار مفید است؛ برای نمونه، در شکل (۱۲) نتیجه تعیین سهم بارهای ۲، ۴ و ۹ در هارمونیک ولتاژ باس ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که برای شکل (۱۱) بیان شد، اثرات تغییر بار ۴ در رکورد ۹۵، در هارمونیک ولتاژ باس ۴ قابل پیش‌بینی بود. درباره بار شماره ۲ انتظار آن است که با کاهش بار هارمونیک باس ۴، نقش بزرگ‌تری در



شکل (۱۲): منحنی سهم بارهای مختلف در هارمونیک ولتاژ مرتبه ۱۱ در باس بار ۴



شکل (۱۳): منحنی سهم بار شماره ۴ در هارمونیک ولتاژ مرتبه ۱۱ باس‌های مختلف شبکه

استفاده از دسته‌بندی هوشمند اطلاعات پس از تعیین سهم، درایه‌های باقیمانده ماتریس سهم تخمین زده می‌شود. بدین ترتیب، ماتریس پیوسته سهم مشترکین تشکیل می‌شود. نتایج پیاده‌سازی الگوریتم پیشنهادی روی شبکه نمونه، نشان می‌دهند که روش مزبور با خطای متوسطی کمتر از ۳/۵ درصد، قادر به تعیین سهم منابع هارمونیک است. همچنین، منحنی پیوسته سهم منابع مختلف، تغییرات شبکه را به خوبی شناسایی و دنبال می‌کند. دنبال‌شدن تغییرات شبکه در منحنی سهم هارمونیک، نشان‌دهنده توانایی روش پیشنهادی در تولید ماتریس سهم پیوسته منابع هارمونیک مختلف است.

### مراجع

- [1] Shojaie, M., Mokhtari, H.: 'A method for determination of harmonics responsibilities at the point of common coupling using data

همچنین در قسمت پایانی و در بازه رکوردهای ۱۸۰ تا پایان، با قطع خط بین باس ۲ و ۴، سهم بار ۴ در هارمونیک ولتاژ باس ۲ کاهش می‌یابد؛ اما با کاهش سهم بار ۲ در هارمونیک ولتاژ باس‌های ۹ و ۴، درصد سهم بار ۴ افزایش می‌یابد.

### ۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله با استفاده از تکنیک جدیدی در پیش‌پردازش اطلاعات اندازه‌گیری، روشی مناسب برای کاهش اثر مخرب اطلاعات نامناسب در فرایند تعیین سهم منابع هارمونیک مختلف از هارمونیک ولتاژ باس‌های مختلف شبکه پیشنهاد شده است. بدین ترتیب، اثر مخرب هارمونیک پس‌زمینه در تعیین سهم آلودگی مشترکین در شبکه تقلیل یافته است. در روش چندنقطه‌ای پیشنهادی، به اطلاعات فاز ولتاژ در نقاط مختلف شبکه نیاز نیست و با

- [15] Murugan, A.S.S., Suresh Kumar, V.: 'Determining true harmonic contributions of sources using neural network' *Neurocomputing*, 2016, 173, pp. 72–80.
- [16] Hatata, A.Y., Eladawy, M.: 'Prediction of the true harmonic current contribution of nonlinear loads using NARX neural network' *Alexandria Eng. J.*, 2017.
- [17] Silva, C.B.S., Silva, I.N., Aravechia, J.V.P., Fernandes, R.A.S.: 'A fuzzy-based approach for harmonic contribution determination at points of common coupling' 2015 IEEE Eindhoven PowerTech, PowerTech 2015, 2015.
- [18] Zang, T., He, Z., Fu, L., Wang, Y., Qian, Q.: 'Adaptive method for harmonic contribution assessment based on hierarchical K-means clustering and Bayesian partial least squares regression' *IET Gener. Transm. Distrib.*, 2016, 10, (13), pp. 3220–3227.
- [19] Yang, J., Yang, Y., Chen, J., Fu, L., He, Z.: 'Determining the Harmonic Contributions of Multiple Harmonic Sources Using Data Clustering Analysis' 2015, pp. 405–411.
- [20] Manito, A.R.A., de Matos, E.O., Bezerra, U.H., Costa, B.C., Mota Soares, T., Tostes, M.E. de L.: 'Using linear and non-parametric regression models to describe the contribution of non-linear loads on the voltage harmonic distortions in the electrical grid' *IET Gener. Transm. Distrib.*, 2016, 10, (8), pp. 1825–1832.
- [21] Kotsiantis, S.B., Zaharakis, I.D., Pintelas, P.E.: 'Machine learning: a review of classification and combining techniques' *Artif. Intell. Rev.*, 2006, 26, (3), pp. 159–190.
- [22] Song, J., Xie, Z., Zhou, J., Yang, X., Pan, A.: 'Power quality indexes prediction based on cluster analysis and support vector machine' *CIREC - Open Access Proc. J.*, 2017, 2017, pp. 814–817.
- [23] Pi, R., Cai, Y., Li, Y., Cao, Y.: 'Machine Learning Based on Bayes Networks to Predict the Cascading Failure Propagation' *IEEE Access*, 2018, 6, pp. 44815–44823.
- [24] Cai, L., Thornhill, N., Kuenzel, S., Pal, B.C.: 'Real-time Detection of Power System Disturbances Based on k-Nearest Neighbor Analysis' *IEEE Access*, 2017, 5.
- [25] Wu, W., Peng, M.: 'A Data Mining Approach Combining K-Means Clustering With Bagging Neural Network for Short-Term Wind Power Forecasting' *IEEE Internet Things J.*, 2017, 4, pp. 979–986.
- [26] Dejamkhooy, A., Dastfan, A., Ahmadifard, A.: 'K-means clustering and correlation coefficient based methods for detection of flicker sources in non-radial power system' *Russ. Electr. Eng.*, 2014, 85, pp. 251–259.
- [27] Duan, R.C., Wang, F.H., Zhang, J., Huang, R.H., Zhang, X.: 'Data mining & pattern recognition of voltage sag based on K-means clustering algorithm', in '2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting' (IEEE, 2015), pp. 1-5.
- correlation analysis' *IET Gener. Transm. Distrib.*, 2014, 8, (1), pp. 142–150.
- [2] Dao, T., Phung, B.T.: 'Effects of voltage harmonic on losses and temperature rise in distribution transformers' *IET Gener. Transm. Distrib.*, 2018, 12, (2), pp. 347–354.
- [3] Mokhtari, H., Zebardast, A.: 'Technique for online tracking of a utility harmonic impedance using by synchronising the measured samples' *IET Gener. Transm. Distrib.*, 2016, 10, (5), pp. 1240–1247.
- [4] Dirik, H., Duran, I.U., Gezegin, C.: 'A Computation and Metering Method for Harmonic Emissions of Individual Consumers' *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 2018, PP, pp. 1–9.
- [5] Cataliotti, A., Cosentino, V., Nuccio, S.: 'Comparison of Nonactive Powers for the Detection of Dominant Harmonic Sources in Power Systems' *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 2008, 57, (8), pp. 1554–1561.
- [6] Mazin, H.E., Xu, W., Huang, B.: 'Determining the Harmonic Impacts of Multiple Harmonic-Producing Loads' *IEEE Trans. Power Deliv.*, 2011, 26, (2), pp. 1187–1195.
- [7] Zebardast, A., Mokhtari, H.: 'New method for assessing the utility harmonic impedance based on fuzzy logic' *IET Gener. Transm. Distrib.*, 2017, 11, (10), pp. 2448–2456.
- [8] Hui, J., Freitas, W., Vieira, J.C.M., Yang, H., Liu, Y.: 'Utility Harmonic Impedance Measurement Based on Data Selection' *IEEE Trans. Power Deliv.*, 2012, 27, (4), pp. 2193–2202.
- [9] Wang, Y., Yong, J., Sun, Y., Xu, W., Wong, D.: 'Characteristics of Harmonic Distortions in Residential Distribution Systems' *IEEE Trans. Power Deliv.*, 2017, 32, (3), pp. 1495–1504.
- [10] Xu, F., Yang, H., Zhao, J., Wang, Z., Liu, Y.: 'Study on constraints for harmonic source determination using active power direction' *IEEE Trans. Power Deliv.*, 2018, 8977, (c).
- [11] Wilsun Xu, Ahmed, E.E., Xiqin Zhang, Xian Liu: 'Measurement of network harmonic impedances: practical implementation issues and their solutions' *IEEE Trans. Power Deliv.*, 2002, 17, (1), pp. 210–216.
- [12] Hui, J., Yang, H., Lin, S., Ye, M.: 'Assessing utility harmonic impedance based on the covariance characteristic of random vectors' *IEEE Trans. Power Deliv.*, 2010, 25, (3), pp. 1778–1786.
- [13] Karimzadeh, F., Hossein Hosseinian, S., Esmaili, S.: 'Method for determining utility and consumer harmonic contributions based on complex independent component analysis' *IET Gener. Transm. Distrib.*, 2016, 10, pp. 526–534.
- [14] Karimzadeh, F., Esmaili, S., Hosseinian, S.H.: 'A Novel Method for Noninvasive Estimation of Utility Harmonic Impedance Based on Complex Independent Component Analysis' *Power Deliv. IEEE Trans.*, 2015, 30, (4), pp. 1843–1852.



---

<sup>1</sup> K-Means Clustering

<sup>2</sup> K-Nearest Neighbor (KNN)

<sup>3</sup> Invasive

<sup>4</sup> Non Invasive