

یک روش جدید برای شناسایی اغتشاشات کیفیت توان با استفاده از تبدیل S

علی انشایی^۱، دانشجوی دکتری، رحمت‌الله هوشمند^۲، استاد،

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه صنعتی اصفهان - اصفهان - ایران - a.enshaee@ec.iut.ac.ir

۲- گروه برق - دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه اصفهان - اصفهان - ایران - hooshmand_r@eng.ui.ac.ir

چکیده: در این مقاله، روش جدیدی برای شناسایی اغتشاشات کیفیت توان ارائه می‌گردد. بر این اساس، ابتدا مشخصه‌های پیشنهادی با استفاده از تبدیل S از شکل موج اغتشاشات استخراج می‌گردند. سپس بر اساس مقادیر این مشخصه‌ها، نوع اغتشاش شناسایی می‌شود. این روش برای تشخیص و طبقه‌بندی ده گونه از اغتشاشات کیفیت توان شامل ضربه‌ای گذرا، قطعی، بیش‌بود، کمبود، شکاف، نوسانی گذرا، هارمونیک، فلیکر، هارمونیک با بیش‌بود و هارمونیک با کمبود مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج حاصل از این مطالعه نشان‌دهنده دقت و سرعت مناسب روش پیشنهادی در شناسایی اغتشاشات مذکور است. علاوه بر این، آزمایش این روش تحت شرایط نویزی مختلف، حساسیت خیلی کم آن را به نویز نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: کیفیت توان، طبقه‌بندی اغتشاشات، تبدیل S

A new approach for recognition of power quality disturbances utilizing S-transform

A. Enshaee, PhD Student¹, R.A. Hooshmand, Professor²,

1- Faculty of Electrical and Computer Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran, Email: a.enshaee@ec.iut.ac.ir

2- Faculty of Electrical Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran, Email: hooshmand_r@eng.ui.ac.ir

Abstract: In this paper, a new approach is presented for identification of power quality (PQ) disturbances. At first, the proposed characteristics are extracted from the disturbances waveforms using S-transform. Then, based on the values of these characteristics, the type of the disturbance is recognized. This approach is evaluated for detection and classification of ten types of PQ disturbances including impulse, interruption, swell, sag, notch, oscillatory transient, harmonic, flicker, harmonic with swell and harmonic with sag. The results of this study demonstrate the suitable accuracy and speed of the proposed approach in identification of the mentioned disturbances. In addition, testing of this approach under various noisy conditions shows that its sensitivity to noise is too low.

Keywords: Power quality, disturbances classification, S-transform

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۳/۱۰/۰۸

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۳/۱۰/۱۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۱۰/۲۰

نام نویسنده مسئول: رحمت‌الله هوشمند

نشانی نویسنده مسئول: ایران - اصفهان - خیابان هزارجریب - دانشگاه اصفهان - دانشکده مهندسی - گروه مهندسی برق

۱- مقدمه

انرژی الکتریکی کالایی است که به‌طور شبانه‌روزی در سراسر کشور توسط انواع مشترکین (مثل خانگی، تجاری، صنعتی و ...) مورد استفاده قرار می‌گیرد. کیفیت مطلوب چنین کالایی به دلیل استفاده روزافزون از تجهیزات الکترونیکی حساس (مثل رایانه‌ها، میکروکنترلرها و ...) و ساختار جدید رقابتی صنعت برق، بسیار مهم است [۶-۱]. اما کیفیت توان الکتریکی معمولاً توسط اغتشاشاتی که ناشی از گسترش شدید بارهای آلوده‌کننده (مثل ادوات الکترونیک قدرت، بارهای غیرخطی و ...) در شبکه‌های برق هستند، تنزل می‌یابد. این اغتشاشات خود می‌توانند مشکلاتی مانند عملکرد نادرست، کاهش عمر و خرابی تجهیزات الکتریکی را باعث شوند [۴-۱]. ضررهای اقتصادی ناشی از این مشکلات، مطالعات کیفیت توان الکتریکی را به یک مسئله مهم برای شرکت‌های برق و مشترکین تبدیل کرده است. به همین دلیل، نیاز به نظارت، کنترل و بهبود کیفیت توان موردتوجه قرار گرفته است [۱، ۲].

در یک شبکه واقعی، به‌منظور بهبود کیفیت توان لازم است ابتدا بدانیم نوع اغتشاشی که در شبکه رخ داده، چیست تا بتوانیم اقدامات مناسبی جهت رفع آن اتخاذ کنیم. از این‌رو، شرکت‌های برق با ساخت و نصب انواع گوناگون تجهیزات پایش کیفیت توان برای صنایع و مشترکان کلیدی خود، سعی در دستیابی به هدف مذکور دارند [۲، ۴، ۵، ۷]. در بیشتر موارد، این تجهیزات، اطلاعات متعددی را اندازه‌گیری و جمع‌آوری می‌کنند که باید به‌منظور تشخیص نوع اغتشاش، تحلیل شوند [۱، ۲، ۴، ۷]. بنابر این، لازم است برای تحلیل این حجم زیاد اطلاعات، روش‌های کارآمد و سریعی به کار گرفته شوند که امکان پیاده‌سازی سخت‌افزاری و نرم‌افزاری را نیز داشته و یا به‌طور خلاصه، خودکار هم باشند [۷].

در این روش‌ها، ابتدا ویژگی‌های مناسبی از شکل موج اغتشاشات کیفیت توان استخراج می‌شود؛ سپس با استفاده از این ویژگی‌ها، در مورد نوع هر یک از اغتشاشات تصمیم‌گیری می‌شود. برای استخراج ویژگی‌های مناسب از شکل موج اغتشاشات، تبدیل‌های مختلفی مانند تبدیل فوریه [۱، ۸-۵]، تبدیل فوریه زمان کوتاه، تبدیل موجک [۱۸-۵]، تبدیل S [۴-۲، ۲۵-۱۹] و ... به کار گرفته شده است.

اغلب برای استخراج محتوای فرکانسی یک شکل موج، تبدیل فوریه به کار می‌رود. اما این تبدیل برای تحلیل شکل موج‌های ایستا مناسب است و نمی‌تواند جهت پردازش شکل موج اغتشاشاتی مانند گذراهای ضربه‌ای و یا نوسانی که ماهیت گذرای دارند، مورد استفاده قرار گیرد [۳، ۴، ۲۱-۱۹]. زیرا در پردازش این شکل موج‌ها لازم است تا علاوه بر اطلاع یافتن از محتوای فرکانسی آن‌ها، از توزیع زمانی مؤلفه‌های فرکانسی نیز مطلع باشیم. اما تبدیل فوریه، توصیفی از توزیع مؤلفه‌های فرکانسی در زمان ارائه نمی‌کند. یکی از راه‌های برطرف کردن این مشکل، استفاده از تبدیل فوریه زمان کوتاه است. در این تبدیل، به‌منظور تعیین مؤلفه‌های فرکانسی یک شکل موج حول زمان

شکل موج در تابعی بنام پنجره ضرب می‌شود و با گرفتن انتگرال فوریه از این حاصل‌ضرب، محتوای فرکانسی شکل موج در همسایگی زمان t استخراج می‌شود [۴]. اما از آنجایی که عرض پنجره ثابت است، نمی‌تواند برای تحلیل شکل موج‌های غیرایستایی که هم مؤلفه‌های فرکانس بالا و هم مؤلفه‌های فرکانس پایین دارند، مناسب باشد [۳، ۴، ۱۹، ۲۰، ۲۲].

برخلاف تبدیل فوریه زمان کوتاه، تبدیل موجک از پنجره‌های باریک برای استخراج فرکانس‌های بالای شکل موج و از پنجره‌های پهن برای استخراج فرکانس‌های پایین آن استفاده می‌کند؛ یعنی، عرض پنجره در آن به نسبت عکس فرکانس تغییر می‌کند. این ویژگی تبدیل موجک، یک ابزار مؤثر را برای تحلیل شکل موج‌های غیرایستا در اختیار ما می‌گذارد [۳، ۴، ۱۹، ۲۱]. اما این تبدیل در پردازش اغتشاشاتی که تغییرات تدریجی تری دارند (مثل کمبودها و بیش‌بودهای ولتاژ)، نمی‌تواند ویژگی‌های مفیدی را ارائه دهد [۱۹، ۲۲]. علاوه بر این، محاسبات پیچیده [۳، ۲۵]، وابستگی دقت تشخیص اغتشاشات، به انتخاب سطح تجزیه و موجک مادر [۷، ۱۳، ۱۴، ۲۵] و حتی کاهش قابل توجه قابلیت‌های برخی از این روش‌ها تحت شرایط نویزی [۴، ۲۱، ۲۵] از دیگر نقایصی است که می‌توان برای این تبدیل ذکر کرد.

در سال‌های اخیر، تبدیل S به دلیل نداشتن نقایص مربوط به تبدیل فوریه زمان کوتاه و تبدیل موجک، توجه محققین را برای پردازش شکل موج‌های اغتشاشات کیفیت توان به خود معطوف داشته است. تبدیل S مانند تبدیل فوریه زمان کوتاه دارای این مزیت است که می‌تواند یک بیان زمان - فرکانسی را از یک شکل موج متغیر با زمان ایجاد کند [۴]. به‌علاوه این تبدیل به دلیل دارا بودن عرض پنجره متغیر مانند تبدیل موجک، می‌تواند ابزار کارآمدی را برای تحلیل شکل موج‌های غیرایستا فراهم آورد [۴]. از این‌رو، تبدیل S را می‌توان همان تبدیل فوریه زمان کوتاه با عرض پنجره متغیر و یا تبدیل موجک با فاز اصلاح‌شده در نظر گرفت [۱۹، ۲۱، ۲۲، ۲۵].

برای تصمیم‌گیری در مورد وقوع و تعیین نوع اغتشاش نیز در اغلب مقالات از مدل مارکوف مخفی [۸، ۲۱]، ماشین بردار پشتیبان [۱۷-۱۵]، شبکه‌های عصبی [۱۴-۱۲، ۲۴-۲۲]، سیستم‌های فازی [۷-۵، ۹، ۱۹] و یا ترکیبی از دو مورد اخیر [۱۰، ۱۱] استفاده شده است. اما باید توجه داشت که شبکه‌های عصبی، ماشین بردار پشتیبان و مدل مارکوف مخفی نیاز به فرآیند زمان‌بر آموزش و تنظیم دقیق پارامترهای متعدد دارند [۳، ۱۸، ۲۵]. در طراحی سیستم‌های فازی نیز، تعیین پارامترهای توابع عضویت و تدوین دقیق پایگاه قواعد نقش مهمی در عملکرد صحیح این سیستم‌ها دارد [۷].

در این مقاله روش جدیدی ارائه می‌شود که در آن، ابتدا با به‌کارگیری تبدیل S، ویژگی‌های پیشنهادی از شکل موج‌های اغتشاشات استخراج می‌گردد. سپس با توجه به مقادیری که مشخصه‌های تعریف‌شده بر اساس آن ویژگی‌ها، اختیار می‌کنند،

فرکانس $\left(\frac{b|f|}{\sqrt{2\pi}} \right) \cdot \exp\left(-\frac{t^2 b^2 f^2}{2}\right)$ است که به تابع پنجره گوسی موسوم است. بنابراین، از آنجایی که پیچش در حوزه زمان با حاصل ضرب در حوزه فرکانس معادل است؛ لذا تبدیل S شکل موج پیوسته در زمان $v(t)$ را می‌توان از حاصل ضرب تبدیل فوریه این شکل موج در تبدیل فوریه تابع پنجره گوسی نیز به دست آورد که تبدیل فوریه این تابع پنجره برابر است با [۱۹، ۴]:

$$G(f) = e^{-\frac{\pi^2 \alpha^2}{f^2}}, \quad \alpha = \frac{1}{b} \quad (5)$$

با توجه به رابطه (۴)، می‌توان مشاهده کرد که خروجی تبدیل S به دلیل وجود $e^{-j^2 \pi f t}$ ، یک عبارت مختلط است؛ لذا می‌توان آن را به صورت زیر نیز در نظر گرفت [۱۹، ۲۳]:

$$V_{ST}(f, \tau) = A(f, \tau) \cdot e^{j\phi(f, \tau)} \quad (6)$$

که $A(f, \tau)$ و $\phi(f, \tau)$ به ترتیب دامنه و فاز خروجی تبدیل S می‌باشند. در کاربردهای عملی که شکل موج پیوسته در زمان $v(t)$ به صورت گسسته در زمان $v(kT)$ است، صورت گسسته تبدیل S را می‌توان با جایگزین کردن f با $\frac{n}{NT}$ و τ با kT به صورت زیر به دست آورد [۴، ۱۹، ۲۱، ۲۲، ۲۴]:

$$V_{ST}\left(\frac{n}{NT}, kT\right) = \begin{cases} \sum_{m=0}^{N-1} V\left[\frac{m+n}{NT}\right] \cdot e^{-\frac{\pi^2 m^2 \alpha^2}{n^2}} \cdot e^{j\frac{\pi m}{N} k}, & n \neq 0 \\ \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} V\left[\frac{m}{NT}\right], & n = 0 \end{cases} \quad (7)$$

که T فاصله زمانی بین دو نمونه متوالی، N تعداد کل نمونه‌ها، $V\left[\frac{n}{NT}\right]$ تبدیل فوریه گسسته $v(kT)$ و $k, n, m = 0, 1, \dots, N-1$ می‌باشند.

۳- روش پیشنهادی در شناسایی اغتشاشات

۳-۱- تولید شکل موج‌های اغتشاشات مورد بررسی

در این مقاله، شکل موج‌های اغتشاشات کیفیت توان در دو نوع ساده و ترکیبی، فرض شده است. هشت پدیده ضربه‌ای گذرا، قطعی، بیش‌بود، کمبود، شکاف، نوسانی گذرا، هارمونیک و فلیکر به‌عنوان اغتشاشات ساده و رخداد‌های هارمونیک با بیش‌بود و هارمونیک با کمبود به‌عنوان اغتشاشات ترکیبی برای شکل موج ولتاژ در نظر گرفته شده است. تولید این اغتشاشات، بر اساس مدل‌های ارائه‌شده در جدول ۱، با مقاردهی تصادفی پارامترهای کنترلی موجود در آن‌ها، به صورت نمونه برداری شده (گسسته) و با استفاده از نرم‌افزار MATLAB صورت گرفته است. این مدل‌ها، بیان‌گر روابط ریاضی تطبیق‌یافته با شکل

دسته‌بندی اغتشاشات کیفیت توان صورت می‌گیرد. همچنین این دسته‌بندی برای اغتشاشات همراه با نویز نیز مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این راستا، در بخش بعدی توضیحات بیش‌تری درباره تبدیل S و همچنین چگونگی محاسبه آن، مطرح خواهد شد. ویژگی‌های پیشنهادی استخراج‌شده از شکل موج اغتشاشات و مشخصه‌های مبتنی بر آن‌ها در بخش ۳ تشریح می‌شوند. بخش ۴ نیز به ارزیابی روش پیشنهادی و ارائه نتایج حاصل از آن اختصاص دارد.

۲- مروری بر تبدیل S

تبدیل S را می‌توان از تبدیل موجک پیوسته با اصلاح فاز تابع پنجره (تابع موجک مادر) این تبدیل، به دست آورد [۴]. بر این اساس تبدیل S برای یک شکل موج پیوسته در زمان $v(t)$ برابر با تبدیل موجک پیوسته حاصل ضرب این شکل موج در تابع اصلاح فاز $e^{-j^2 \pi f t}$ است [۴، ۱۹-۲۳]:

$$V_{ST}(f, a, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} v(t) \cdot \psi(t - \tau, a) \cdot e^{-j^2 \pi f t} \cdot dt \quad (1)$$

که V_{ST} تبدیل S شکل موج $v(t)$ تابع موجک مادر، f فرکانس، a مقیاس موجک و $j = \sqrt{-1}$ می‌باشند.

در تبدیل S، موجک مادر (تابع پنجره) به گونه‌ای انتخاب می‌شود که به جای آن که تابعی از مقیاس a باشد، تابعی از محتوای فرکانسی شکل موج باشد [۴، ۱۹-۲۲]:

$$\psi(f, \sigma, t) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}} \cdot e^{-j^2 \pi f t} \quad (2)$$

در این رابطه، σ تابعی است که عرض تابع پنجره را کنترل می‌کند و به گونه‌ای تعریف می‌شود که متناسب با عکس محتوای فرکانسی شکل موج باشد؛ یعنی:

$$\sigma(f) = \frac{1}{c + b|f|} \quad (3)$$

که b و c اعداد حقیقی ثابت و $b \neq 0$ می‌باشند [۴، ۱۹]. لازم به ذکر است که صفر قرار دادن b ، تابع پنجره را به همان پنجره‌ای که در تبدیل فوریه زمان کوتاه مورد استفاده قرار می‌گیرد، تبدیل می‌کند. حال اگر به منظور ساده‌سازی، c را در رابطه (۳) برابر صفر در نظر بگیریم، رابطه (۱) را با توجه به روابط (۲) و (۳) می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد [۴، ۲۲]:

$$V_{ST}(f, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} v(t) \cdot \frac{b|f|}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(t-\tau)^2 b^2 f^2}{2}} \cdot e^{-j^2 \pi f t} \cdot dt \quad (4)$$

این رابطه نشان می‌دهد که تبدیل S برای شکل موج پیوسته در زمان $v(t)$ برابر با پیچش این شکل موج با تابع پنجره وابسته به

موج‌های اغتشاشات که از اندازه‌گیری‌ها در سیستم‌های واقعی به دست آمده‌اند و در استانداردها تعریف شده‌اند، هستند. هر شکل موج تولیدی، ۱۰ سیکل را با نرخ نمونه‌برداری ۶/۴ kHz که برای فرکانس اصلی ۵۰ Hz معادل ۱۲۸ نمونه در هر سیکل است، در بر می‌گیرد. مقدار مؤثر شکل موج سینوسی ایده‌آل نیز $V \frac{100}{\sqrt{2}}$ انتخاب شده است.

جدول ۱: مدل ریاضی اغتشاشات کیفیت توان [۷]

بازه تغییرات پارامترهای کنترلی	مدل ریاضی	سینوسی ایده‌آل
$-\pi \leq \varphi \leq \pi$	$v(t) = 100 \sin(\nu\pi \times \Delta \cdot t + \varphi)$	سینوسی ایده‌آل
$\cdot/\nu \leq v_p \leq 1$ $T \leq T_s \leq \nu T$ $T_e = T_s + 1 \text{ m sec}$	$v(t) = 1/\nu \cdot v_p \left(e^{-\nu/\Delta \times 10^3 (t-T_s)} - e^{-\nu/\nu \times 10^3 (t-T_s)} \right) [u(t-T_s) - u(t-T_e)]$	ضربه‌ای گذرا
$\cdot \leq v_n \leq \cdot/1$, $-\frac{\pi}{4} \leq \varphi \leq \frac{\pi}{4}$ $T_s = T, 2T, \dots, \lambda T$ $T_e - T_s = T, 2T, \dots, 9T$	$v(t) = 100 \cdot v_n \sin(\nu\pi \times \Delta \cdot t + \varphi) [u(t-T_s) - u(t-T_e)]$	قطعی
$\cdot/1 \leq v_n \leq \cdot/8$, $-\frac{\pi}{4} \leq \varphi \leq \frac{\pi}{4}$ $T_s = T, 2T, \dots, \lambda T$ $T_e - T_s = T, 2T, \dots, 9T$	$v(t) = 100 \cdot v_n \sin(\nu\pi \times \Delta \cdot t + \varphi) [u(t-T_s) - u(t-T_e)]$	بیش‌بود
$\cdot/1 \leq v_n \leq \cdot/9$, $-\frac{\pi}{4} \leq \varphi \leq \frac{\pi}{4}$ $T_s = T, 2T, \dots, \lambda T$ $T_e - T_s = T, 2T, \dots, 9T$	$v(t) = 100 \cdot v_n \sin(\nu\pi \times \Delta \cdot t + \varphi) [u(t-T_s) - u(t-T_e)]$	کمبود
$\omega = \nu\pi \times \Delta$, $\rho = \cdot/\Delta$ $\cdot \leq \alpha \leq \frac{\pi}{4}$, $\mu < \alpha$ $\mu = \frac{\nu \Delta \times \nu \pi}{\nu \cdot \times \nu \Delta \times \sqrt{\nu} \rho \sin(\alpha)}$ $\omega t \in \left[\alpha + \frac{k\pi}{\nu} , \alpha + \frac{k\pi}{\nu} + \mu \right]$	$v(t) = \begin{cases} 100 \left[\sin\left(\omega t + \frac{\pi}{\nu}\right) + \cdot/\Delta \rho \sin\left(\omega t + \frac{\Delta\pi}{\nu}\right) \right] & k = 1, \nu \\ 100 \left[\sin\left(\omega t + \frac{\pi}{\nu}\right) - \cdot/\Delta \rho \cos(\omega t) \right] & k = 2, 9 \\ 100 \left[\sin\left(\omega t + \frac{\pi}{\nu}\right) - \rho \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{\nu}\right) \right] & k = \Delta, 11 \\ 100 \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{\nu}\right) & \text{otherwise} \end{cases}$	شکاف
$\cdot/3 \leq v_n \leq 1$, $150 \leq \alpha \leq 1000$ $300 \leq f_n \leq 900$, $\cdot \leq \varphi \leq 2\pi$ $T_s = T, 2T, \dots, \nu T$	$v(t) = 100 \cdot \sin(\nu\pi \times \Delta \cdot t) \left[1 + \sqrt{\nu} v_n e^{-\alpha(t-T_s)} \sin(\nu\pi f_n (t-T_s) + \varphi) \right]$	نوسانی گذرا
$-\pi \leq \varphi \leq \pi$, $\text{THD} \geq \cdot/5$ $\cdot/15 \leq \alpha_{rk} \leq \cdot/3$, $\cdot/2 \leq \alpha_{rk+1} \leq \cdot/6$ $-\pi \leq \varphi_{rk} \leq \pi$, $-\pi \leq \varphi_{rk+1} \leq \pi$ $k = 1, 2, \dots, 10$	$v(t) = 100 \cdot [\sin(\nu\pi \times \Delta \cdot t + \varphi) + \dots + \alpha_{rk} \sin(\nu\pi(\nu k) \times \Delta \cdot t + \varphi_{rk}) + \alpha_{rk+1} \sin(\nu\pi(\nu k + 1) \times \Delta \cdot t + \varphi_{rk+1}) + \dots]$	هارمونیک
$\cdot \leq \varphi \leq 2\pi$ $\cdot/5 \leq v_n \leq \cdot/1$ $\lambda \leq f_n \leq 25$	$v(t) = 100 \cdot \sin(\nu\pi \times \Delta \cdot t + \varphi) [1 + v_n \sin(\nu\pi f_n t)]$	فلیکر
$-\pi \leq \varphi \leq \pi$, $\text{THD} \geq \cdot/5$ $\cdot/15 \leq \alpha_{rk} \leq \cdot/3$, $\cdot/2 \leq \alpha_{rk+1} \leq \cdot/6$ $-\pi \leq \varphi_{rk} \leq \pi$, $-\pi \leq \varphi_{rk+1} \leq \pi$ $k = 1, 2, \dots, 10$, $\cdot/1 \leq v_n \leq \cdot/8$ $T_s = T, 2T, \dots, \lambda T$ $T_e - T_s = T, 2T, \dots, 9T$	$v(t) = 100 \cdot [\sin(\nu\pi \times \Delta \cdot t + \varphi) + \dots + \alpha_{rk} \sin(\nu\pi(\nu k) \times \Delta \cdot t + \varphi_{rk}) + \alpha_{rk+1} \sin(\nu\pi(\nu k + 1) \times \Delta \cdot t + \varphi_{rk+1}) + \dots] [1 + v_n [u(t-T_s) - u(t-T_e)]]$	هارمونیک با بیش‌بود
$-\pi \leq \varphi \leq \pi$, $\text{THD} \geq \cdot/5$ $\cdot/15 \leq \alpha_{rk} \leq \cdot/3$, $\cdot/2 \leq \alpha_{rk+1} \leq \cdot/6$ $-\pi \leq \varphi_{rk} \leq \pi$, $-\pi \leq \varphi_{rk+1} \leq \pi$ $k = 1, 2, \dots, 10$, $\cdot/1 \leq v_n \leq \cdot/9$ $T_s = T, 2T, \dots, \lambda T$ $T_e - T_s = T, 2T, \dots, 9T$	$v(t) = 100 \cdot [\sin(\nu\pi \times \Delta \cdot t + \varphi) + \dots + \alpha_{rk} \sin(\nu\pi(\nu k) \times \Delta \cdot t + \varphi_{rk}) + \alpha_{rk+1} \sin(\nu\pi(\nu k + 1) \times \Delta \cdot t + \varphi_{rk+1}) + \dots] [1 - v_n [u(t-T_s) - u(t-T_e)]]$	هارمونیک با کمبود

۲-۳- استخراج ویژگی‌های پیشنهادی از شکل موج

اغتشاشات

شکل‌های ۱ الی ۹، شکل موج ولتاژ سینوسی ایده‌آل و هشت اغتشاش ساده مورد بررسی در این مقاله را به‌همراه منحنی‌های ویژگی‌های استخراج‌شده از آن‌ها نشان می‌دهند. هر شکل، شامل پنج نمودار است که در ادامه این بخش به توضیح هر یک خواهیم پرداخت.

البته پیش از پرداختن به این توضیحات، باید به این نکته اشاره کرد که بیش‌ترین فرکانس خروجی تبدیل S گسسته، همان‌گونه که در نمودارهای (ج) و (د) شکل‌های ۱ الی ۹ نیز مشاهده می‌شود، نصف فرکانس نمونه‌برداری است. از طرفی، این بیش‌ترین فرکانس باید حداقل دو برابر فرکانسی باشد که مؤلفه آن فرکانس در شکل موج مورد بررسی، موجود است. از این‌رو، به‌منظور برقراری تمامی این نسبت‌ها و با توجه به این که فرض شده، شکل موج اغتشاش هارمونیک حداکثر شامل مؤلفه هارمونیک ۲۵ام است؛ لذا، فرکانس نمونه‌برداری $6/4 \text{ kHz} / 25 = 5 \text{ kHz}$ ($> 4 \times 25 \times 50 = 5 \text{ kHz}$) انتخاب شده است.

نمودار (الف) در هر شکل، شکل موج اغتشاش مربوطه را نشان می‌دهد. البته در شکل ۱، این نمودار به شکل موج ولتاژ سینوسی ایده‌آل اختصاص دارد.

در بالای نمودار (الف) هر شکل، نسبت R به R_n نوشته شده است که R_n اولین درایه R برای شکل موج ولتاژ سینوسی ایده‌آل است و ماتریس سطری R برای هر اغتشاش با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$R[i] = \sqrt{\frac{1}{N_s} \sum_{k=0}^{N_s-1} v^2(kT + (i-1) \times N_s)} \quad (8)$$

که N_c تعداد کل سیکل‌ها و N_s تعداد نمونه‌ها در هر سیکل می‌باشند.

نمودار (ب) در هر شکل، انحراف معیار دامنه مؤلفه‌های فرکانسی مختلف را در هر زمان نشان می‌دهد.

برای رسم نمودار (ج) در هر شکل، ابتدا نسبت اندازه هر مؤلفه فرکانسی در هر سیکل به اندازه مؤلفه فرکانس اصلی در آن سیکل را با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌کنیم [۲۵]:

$$HR[f_h, i] = M[f_h, i] / M[f_1, i] \quad (9)$$

که $M[f_1, i]$ اندازه مؤلفه فرکانس اصلی در سیکل i ام است. $M[f_h, i]$ نیز اندازه مؤلفه هارمونیک h ام در سیکل i ام است و به کمک رابطه زیر به دست می‌آید [۲۵]:

$$M[f_h, i] = 2 \times \frac{1}{N_s} \sum_{k=0}^{N_s-1} A(f_h, kT + (i-1) \times N_s) \quad (10)$$

حال می‌توان گفت که نمودار (ج) در هر شکل، منحنی HR برای اولین سیکلی از شکل موج است که این منحنی در آن سیکل،

بیش‌ترین تعداد ماکزیمم نسبی را دارد. تعداد ماکزیمم نسبی‌های منحنی HR برای هر سیکل نیز در بالای نمودار (ج) هر شکل، نوشته شده است.

نمودار (د) در هر شکل، انحراف معیار دامنه هر مؤلفه فرکانسی را در زمان‌های مختلف نشان می‌دهد.

نمودار (ه) در هر شکل، ولتاژ ازدست‌رفته در هر سیکل از شکل موج را نشان می‌دهد. این ویژگی که بیان‌گر میزان فاصله گرفتن شکل موج ولتاژ اغتشاشی از شکل موج ولتاژ سینوسی ایده‌آل است، به کمک رابطه زیر به دست می‌آید:

$$v_{miss}[i, k+1] = v(kT + (i-1) \times N_s) - M[f_1, 1] \times \cos\left(P[f_1, 1] + \frac{2\pi k}{N_s}\right) \quad (11)$$

که $k = 0, 1, \dots, N_s - 1$ و $P[f_1, i]$ فاز مؤلفه فرکانس اصلی در سیکل i ام است و برابر است با:

$$P[f_1, i] = \frac{1}{N_s} \sum_{k=0}^{N_s-1} \phi(f_1, kT + (i-1) \times N_s) \quad (12)$$

تعداد ماکزیمم نسبی‌های قدرمطلق ولتاژ ازدست‌رفته که بزرگ‌تر از عدد ۲۴ می‌باشند نیز برای هر سیکل در بالای نمودار (ه) هر شکل نوشته شده است.

۳-۳- تعریف مشخصه‌های پیشنهادی

در روش پیشنهادی، تشخیص و شناسایی اغتشاشات بر پایه شش مشخصه ارائه می‌شود. لذا با توجه به شکل‌های ۱ تا ۹، این شش مشخصه به‌صورت زیر قابل بیان است:

(۱) C_{1min} : بیان‌گر کم‌ترین مقدار R/R_n است. اگر مقدار این مشخصه کم‌تر از ۰/۱ باشد، اغتشاش قطعی رخ داده و اگر بین ۰/۱ و ۰/۹ باشد، اغتشاش کمبود به وقوع پیوسته است.

(۲) C_{1max} : بیان‌گر بیش‌ترین مقدار R/R_n است که اگر مقدار این مشخصه بیش‌تر از ۱/۱ باشد، اغتشاش بیش‌بود رخ داده است.

درایه‌های ماتریس سطری R ، مقدار مؤثر شکل موج در هر سیکل را برحسب ولت بیان می‌کنند که از تقسیم هر یک از این مقادیر بر R_n ، مقدار مؤثر شکل موج در هر سیکل برحسب پریونیت به دست می‌آید. بدین ترتیب می‌توان گفت که حدود اشاره‌شده برای مشخصه‌های C_{1min} و C_{1max} با توجه به تعریف اغتشاشات قطعی، کمبود و بیش‌بود ولتاژ انتخاب شده‌اند.

(۳) C_2 : بیان‌گر تعداد سیکل‌هایی از شکل موج که تعداد ماکزیمم نسبی‌های منحنی HR در آن سیکل‌ها، بیش‌تر از ۲ باشد. چنان‌که مشاهده می‌شود، اگر مقدار این مشخصه، بزرگ‌تر یا مساوی ۴ باشد، اغتشاش هارمونیک به وقوع پیوسته است.

تعداد ماکزیمم نسبی‌های منحنی HR در هر سیکل شکل موج، تعداد مؤلفه‌های فرکانسی آن سیکل از شکل موج را مشخص می‌کند.

(مانند هارمونیک و فلیکرها)، معمولاً کوچک است و لذا لزومی به شمارش آن‌ها نیست. بررسی منحنی مذکور برای اغتشاشات مختلف نشان می‌دهد که شمارش تعداد ماکزیمم نسبی‌های آن در هر سیکل، می‌تواند اغتشاش‌های قطعی، بیش‌بود، کمبود، ضربه‌ای گذرا، نوسانی گذرا و شکاف را از شکل موج سینوسی ایده‌آل و اغتشاش‌های هارمونیک و فلیکرها متمایز سازد. لازم به ذکر است که سه نوع اغتشاش قطعی، بیش‌بود و کمبود ولتاژ را (با توجه به مقادیر مشخصه‌های C_{1min} و C_{1max}) می‌توان از سه نوع اغتشاش ضربه‌ای گذرا، نوسانی گذرا و شکاف متمایز ساخت. از طرفی با توجه به تعریف اغتشاش شکاف، این اغتشاش نیز مانند اغتشاش هارمونیک، حالت ماندگار دارد. بنابراین می‌توان آن را از اغتشاش‌های ضربه‌ای گذرا و نوسانی گذرا که ماهیت گذرا دارند، جداسازی نمود. بر این اساس است که اگر C_4 بزرگ‌تر یا مساوی ۴ باشد، می‌توان نتیجه گرفت که اغتشاش شکاف رخ داده است.

۴) C_5 : این مشخصه در صورت افزایش ناگهانی منحنی STD_f در یک سیکل، برابر ۱ و در صورت کاهش ناگهانی آن، مساوی ۱- تعریف می‌شود. بدین‌صورت که چون در لحظه وقوع اغتشاش ضربه‌ای گذرا، دامنه شکل موج، ابتدا افزایش و سپس کاهش ناگهانی می‌یابد، شاهد فرورفتگی منحنی STD_f در سیکل رخداد این اغتشاش خواهیم بود و لذا $C_5=1$ در نظر گرفته می‌شود. در طرف مقابل، از آنجایی که در لحظه وقوع اغتشاش نوسانی گذرا، ابتدا کاهش و سپس افزایش ناگهانی در دامنه شکل موج روی می‌دهد، منحنی در سیکل رخداد این اغتشاش، برآمدگی خواهد داشت و لذا $C_5=1$ در STD_f نظر گرفته می‌شود. بدین ترتیب، اگر با توجه به مشخصه‌های قبلی، اغتشاش به وقوع پیوسته یکی از دو نوع ضربه‌ای گذرا و یا نوسانی گذرا باشد، آنگاه به کمک مشخصه C_5 ، می‌توان این دو نوع اغتشاش را از یکدیگر متمایز ساخت. توضیحات ارائه‌شده برای مشخصه‌های پیشنهادی را می‌توان در جدول ۲ خلاصه کرد.

جدول ۲: مشخصه‌های شکل موج‌های اغتشاشات کیفیت توان

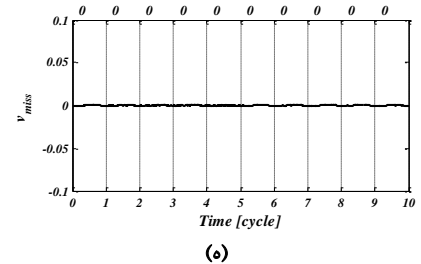
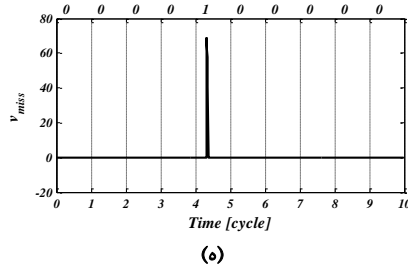
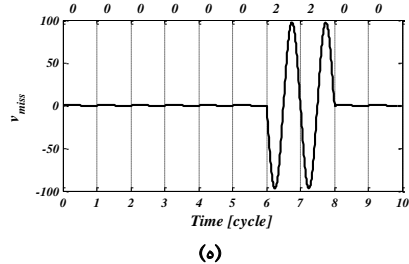
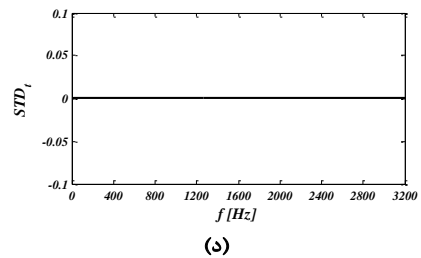
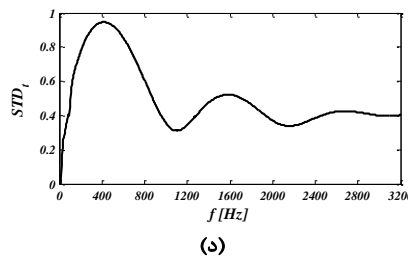
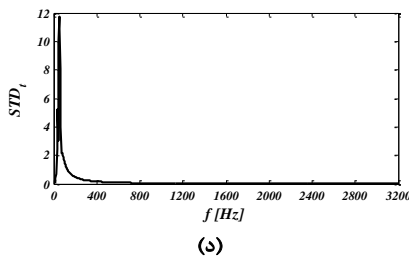
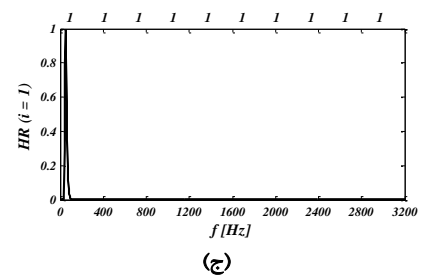
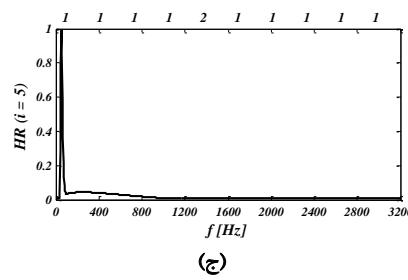
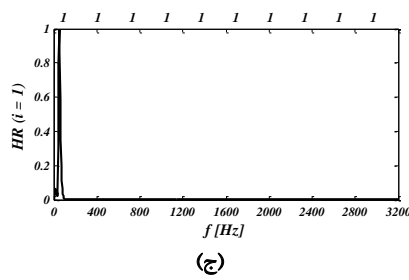
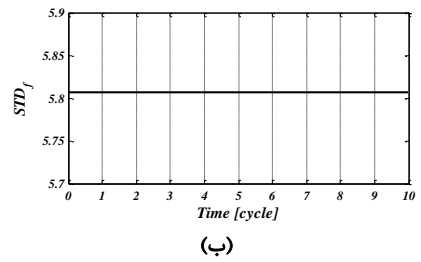
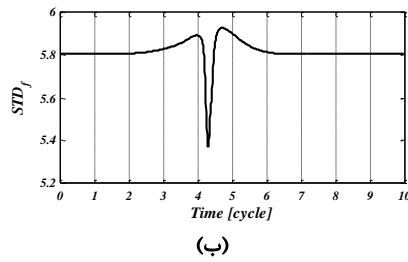
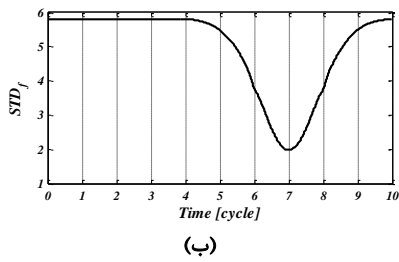
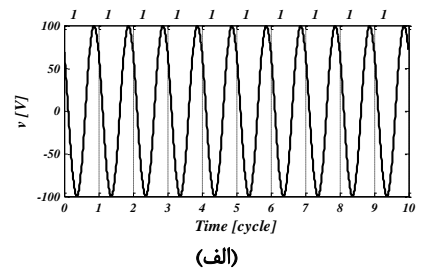
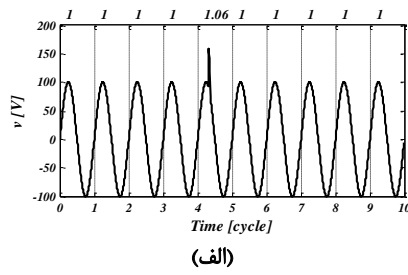
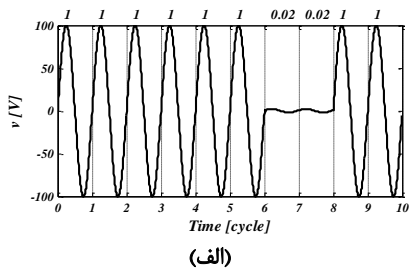
C_5	C_4	C_3	C_2	C_{1max}	C_{1min}	
-۱	< ۴	۰	< ۴	$\leq 1/1$	$\geq 0/9$	ضربه‌ای گذرا
-	-	-	-	-	< 0/1	قطعی
-	-	-	-	> 1/1	-	بیش‌بود
-	-	-	-	-	$\geq 0/1$ < 0/9	کمبود
-	≥ 4	۰	< ۴	$\leq 1/1$	$\geq 0/9$	شکاف
۱	< ۴	۰	< ۴	$\leq 1/1$	$\geq 0/9$	نوسانی گذرا
-	-	-	≥ 4	-	-	هارمونیک
-	-	۱	< ۴	$\leq 1/1$	$\geq 0/9$	فلیکرها

از طرفی دو فرض برای اغتشاش هارمونیک در نظر گرفته شده است. اول آن که، شکل موج اغتشاش هارمونیک در هر سیکل می‌باید علاوه بر مؤلفه اصلی دارای حداقل دو مؤلفه هارمونیکی نیز باشد. دوم آن که، این اغتشاش با توجه به تعریف آن، حالت ماندگار دارد. از این‌رو، تمامی ۱۰ سیکل شکل موج می‌باید دارای اغتشاش هارمونیک باشند. با توجه به فرض اول، مشخصه C_7 به‌صورتی که در فوق بدان اشاره شد، تعریف گردیده است؛ اما در توجیه مقداری که برای این مشخصه به‌منظور شناسایی اغتشاش هارمونیک انتخاب شده باید گفت که تعداد ماکزیمم نسبی‌های منحنی HR برای سیکل‌های حاوی اغتشاش ضربه‌ای گذرا یا نوسانی گذرا برابر ۲ است که این مقدار در صورت شدید بودن این اغتشاش‌ها (زیاد بودن دامنه و فرکانس آن‌ها) و به‌خصوص در حالت نویزی، ممکن است بیش‌تر از ۲ نیز به دست آید. در چنین حالتی، تنها راه تمایز این اغتشاش‌ها از اغتشاش هارمونیک، توجه به ماهیت گذرا بودن آن‌ها است؛ بدین مفهوم که اثر این اغتشاش‌ها، حداکثر پس از ۳ سیکل کاملاً از بین می‌رود. به‌همین دلیل اگر مقدار مشخصه C_7 بزرگ‌تر یا مساوی ۴ باشد، اغتشاش هارمونیک به وقوع پیوسته است.

۴) C_4 : اگر منحنی STD_f در نزدیکی فرکانس اصلی، ماکزیمم نسبی داشته باشد، مقدار این مشخصه برابر ۱ خواهد بود، در غیر این‌صورت مساوی صفر است. چنانکه مشاهده می‌شود، اگر هیچ‌یک از اغتشاشات قطعی، بیش‌بود، کمبود و یا هارمونیک رخ نداده باشد (یعنی C_{1min} بزرگ‌تر از $0/9$ ، C_{1max} کوچک‌تر از $1/1$ و C_2 کوچک‌تر از ۴ باشد)، آنگاه با وجود $C_4=1$ ، اغتشاش فلیکرها پدید آمده و در صورت $C_4=0$ ، یکی از اغتشاشات ضربه‌ای گذرا شکاف و یا نوسانی گذرا به وقوع پیوسته است.

شکل موج اغتشاش فلیکرها دارای پوشی است که فرکانس آن کم‌تر از فرکانس اصلی (۵۰ Hz) است. از این‌رو، منحنی STD_f برای این اغتشاش در فرکانسی کم‌تر از فرکانس اصلی نیز دارای ماکزیمم نسبی خواهد بود. به‌همین دلیل، مشخصه C_4 به‌صورت یک یا صفر به معنای وجود یا عدم وجود این ماکزیمم نسبی تعریف می‌شود تا بتوان به کمک آن، اغتشاش فلیکرها را شناسایی کرد.

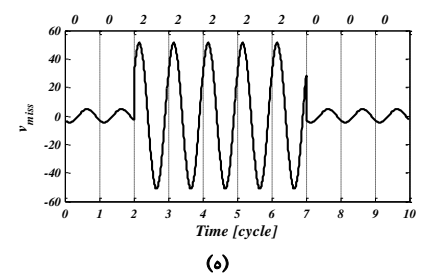
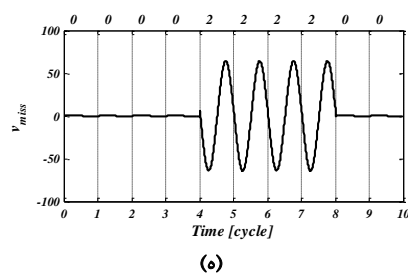
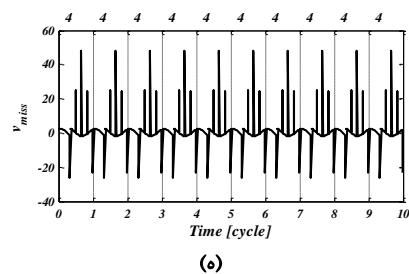
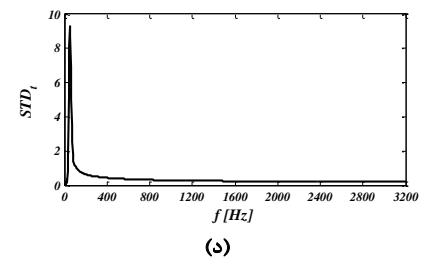
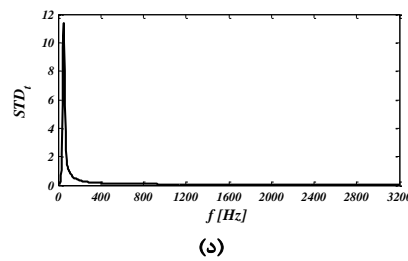
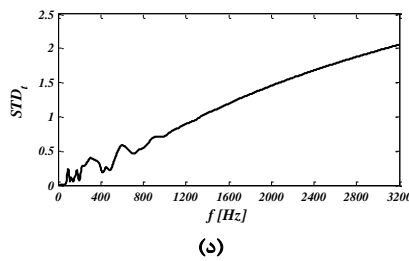
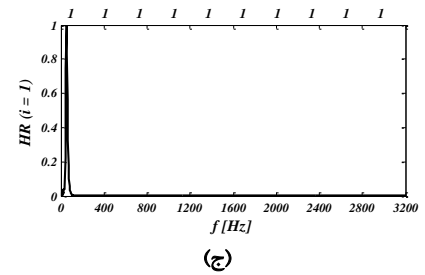
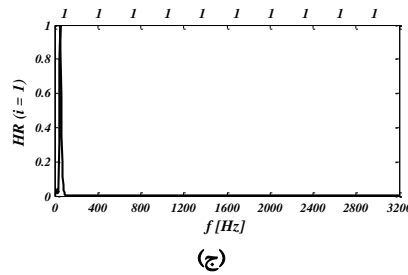
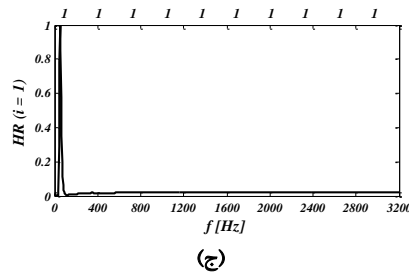
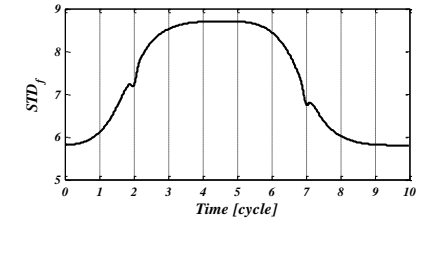
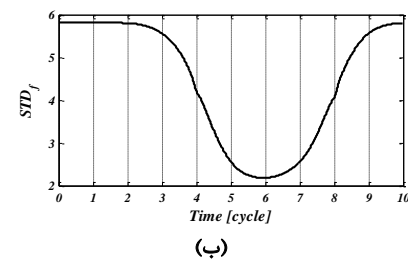
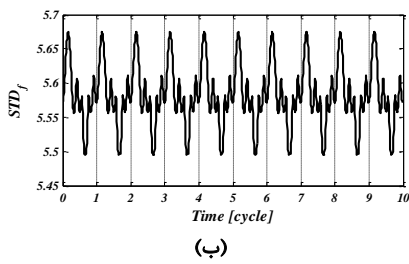
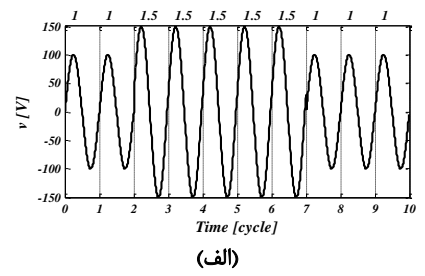
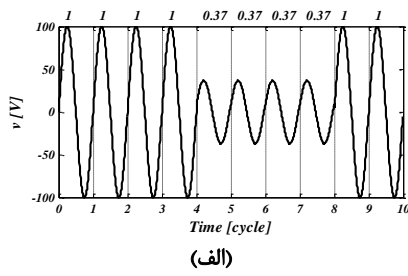
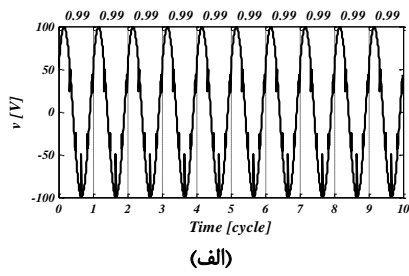
۵) C_6 : این مشخصه بیان‌گر تعداد سیکل‌هایی از شکل موج است که تعداد ماکزیمم نسبی‌های منحنی قدرمطلق ولتاژ از دست‌رفته در آن سیکل‌ها مخالف صفر باشد. البته مقدار این ماکزیمم نسبی‌ها بزرگ‌تر از ۲۴ است. حال اگر با توجه به مشخصه‌های قبلی، اغتشاش به وقوع پیوسته یکی از سه نوع ضربه‌ای گذرا، شکاف و یا نوسانی گذرا باشد، آنگاه اگر C_6 بزرگ‌تر یا مساوی ۴ باشد، اغتشاش شکاف رخ داده است. منحنی قدرمطلق ولتاژ از دست‌رفته در هر سیکل، ماکزیمم نسبی‌های متعددی دارد که مقدار آن‌ها در سیکل‌های بدون اغتشاش و یا در سیکل‌های با اغتشاشی بدون تغییرات ناگهانی در مقدار دامنه



شکل ۳: نمودارهای (الف) الی (ه) برای اغتشاش قطعی

شکل ۲: نمودارهای (الف) الی (ه) برای اغتشاش ضربه‌ای گذرا

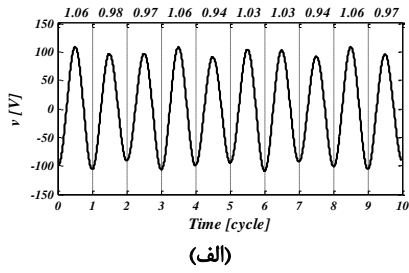
شکل ۱: نمودارهای (الف) الی (ه) برای ولتاژ سینوسی ایده‌آل



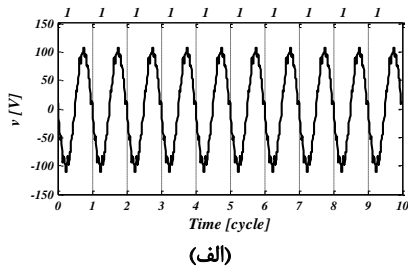
شکل ۶: نمودارهای (الف) الی (ه) برای اغتشاش شکاف

شکل ۵: نمودارهای (الف) الی (ه) برای اغتشاش کم‌بود

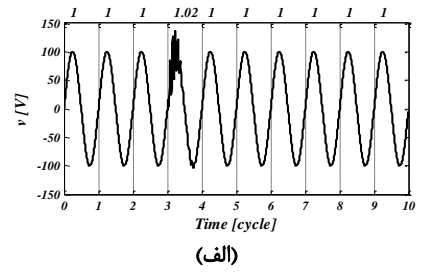
شکل ۴: نمودارهای (الف) الی (ه) برای اغتشاش بیش‌بود



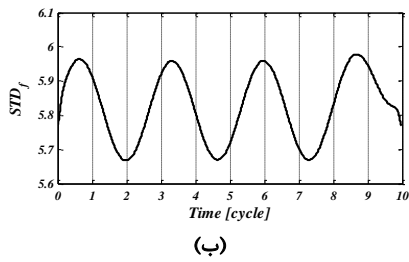
(الف)



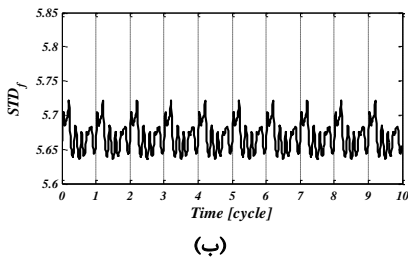
(الف)



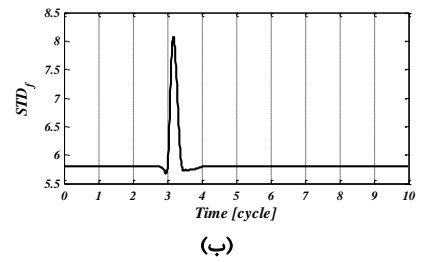
(الف)



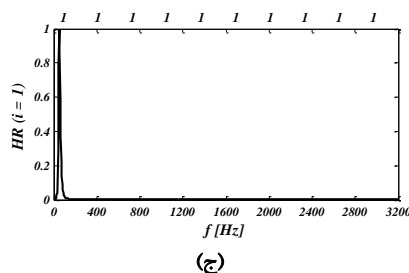
(ب)



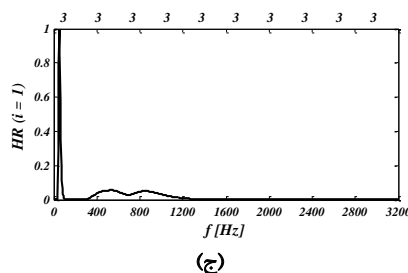
(ب)



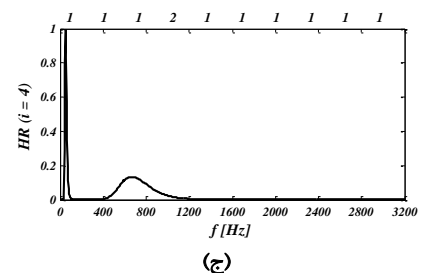
(ب)



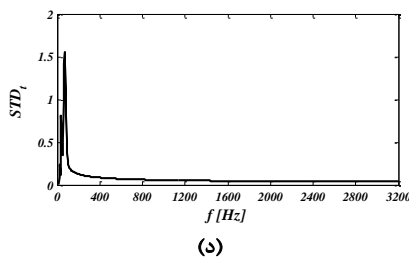
(ج)



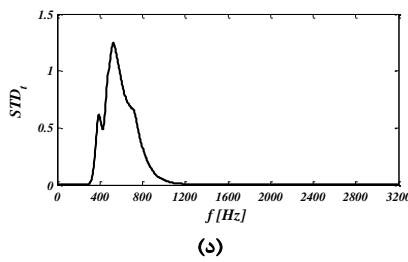
(ج)



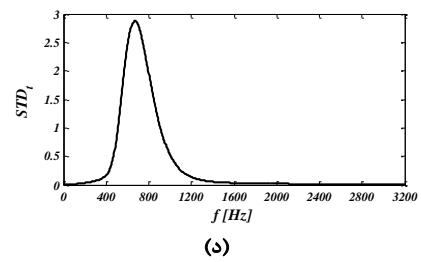
(ج)



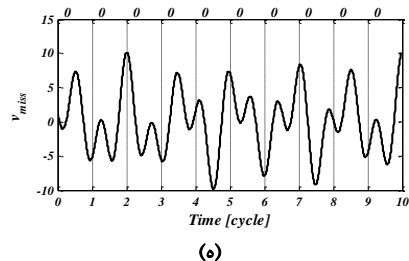
(د)



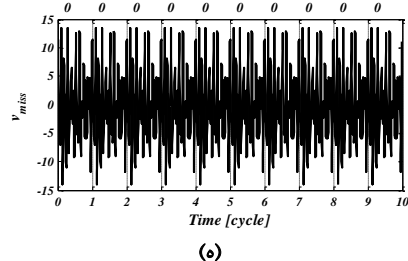
(د)



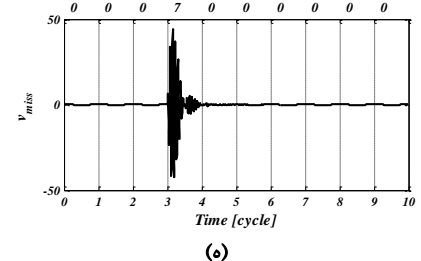
(د)



(ه)



(ه)



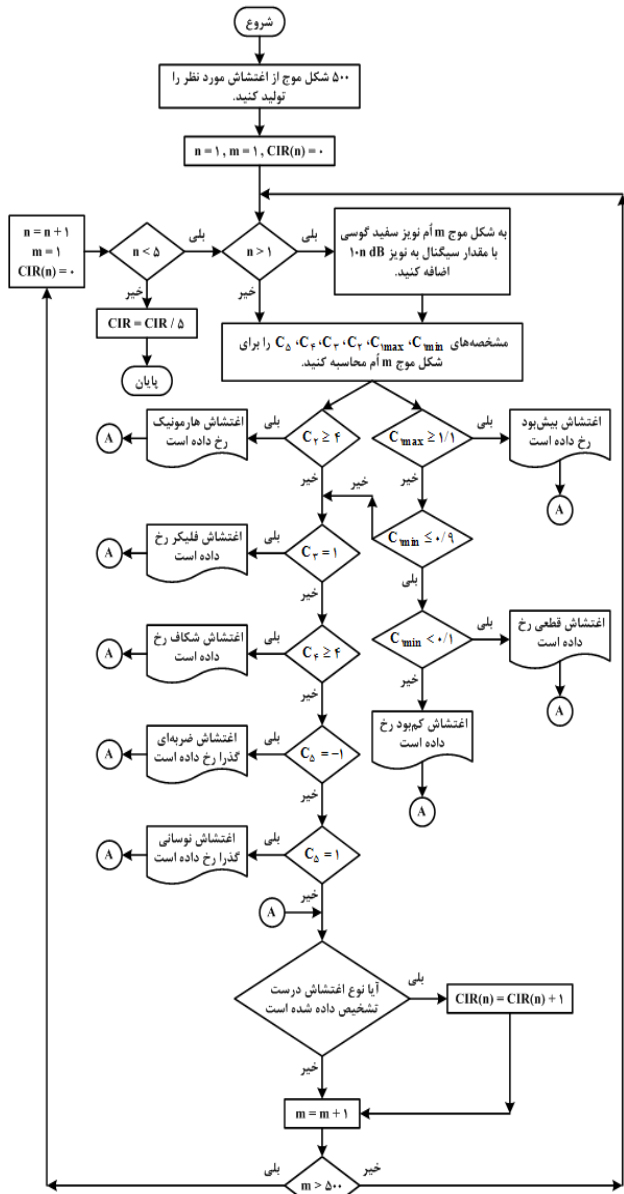
(ه)

شکل ۹: نمودارهای (الف) الی (ه) برای اغتشاش فلیکر

شکل ۸: نمودارهای (الف) الی (ه) برای اغتشاش هارمونیک

شکل ۷: نمودارهای (الف) الی (ه) برای اغتشاش نوسانی گذرا

۳-۴- روند نمای روش پیشنهادی



شکل ۱۰: روند نمای محاسبه درصد شناسایی صحیح هر نوع اغتشاش در شرایط مختلف

در جدول ۳ می‌توان دید که روش پیشنهادی، اغتشاشات ساده ضربه‌ای گذرا، قطعی، بیش‌بود، کمبود، شکاف و فلیکر را هم در شرایط بدون نویز و هم در صورت وجود نویز با مقادیر سیگنال به نویز ۴۰ و ۳۰ دسی‌بل، با خطای صفر درصد شناسایی می‌کند. از طرفی، چون درصد موارد تشخیص درست برای اغتشاش ساده هارمونیک در شرایط مذکور برابر ۱۰۰ درصد نیست، پیش‌بینی می‌شود که روش پیشنهادی در شناسایی اغتشاشات ترکیبی، خطا داشته باشد. جدول ۳ نیز این پیش‌بینی را تأیید می‌نماید. همچنین با توجه به جدول ۳ می‌توان گفت که روش پیشنهادی، ترکیب اغتشاش هارمونیک با اغتشاش بیش‌بود را در مقایسه با ترکیب این اغتشاش با اغتشاش کمبود، با خطای کم‌تری شناسایی می‌کند.

شکل ۱۰، روند انجام دسته‌بندی اغتشاشات را نشان می‌دهد. بدین‌صورت که ابتدا ۵۰۰ شکل موج از اغتشاش موردنظر تولید می‌گردد. سپس برای اولین شکل موج، مشخصه‌های پیشنهادی محاسبه می‌شود. در ادامه، بر مبنای مقادیر مشخصه‌ها، مشخص می‌شود که در شکل موج موردبررسی، چه اغتشاش یا اغتشاشاتی رخ داده است. اگر نوع اغتشاش، درست تشخیص داده شده بود، به اولین درایه ماتریس سطری CIR، یکی افزوده می‌شود. بدین ترتیب، فرآیند تصمیم‌گیری در مورد نوع اغتشاش اولین شکل موج پایان می‌یابد و روند مذکور برای شکل موج بعدی تا بررسی تمامی ۵۰۰ شکل موج تکرار می‌شود. این روند، برای ۵۰۰ شکل موج تولیدی سه مرتبه دیگر صورت می‌گیرد. با این تفاوت که در هر مرتبه، قبل از محاسبه مشخصه‌های پیشنهادی برای شکل موج موردبررسی، نویز سفید گوسی به آن اضافه می‌شود. مقدار سیگنال به نویز این نویز نیز در هر یک از این سه مرتبه، به ترتیب ۲۰، ۳۰ و ۴۰ دسی‌بل است. بدین ترتیب، هر درایه ماتریس سطری CIR بیان‌گر تعداد موارد شناسایی صحیح اغتشاش موردنظر در آن مرتبه از بررسی‌ها خواهد بود. از این‌رو، پس از پایان یافتن مرتبه چهارم از بررسی‌ها می‌توان درصد شناسایی صحیح اغتشاش موردنظر در شرایط مختلف را از تقسیم درایه‌های این ماتریس بر عدد ۵ به دست آورد.

لازم به ذکر است که به دلیل وجود لاینفک نویز در سیستم‌های قدرت واقعی و رایج بودن نویز سفید گوسی در تحقیقات مربوط به کیفیت توان، شرایط نویزی به طریق مذکور، در بررسی‌ها مورد توجه قرار گرفته است.

همچنین با توجه به شکل ۱۰ می‌توان به دو نکته اشاره کرد: یکی آن‌که، روش پیشنهادی قادر است ترکیب دو نوع اغتشاش {بیش‌بود، هارمونیک} و یا {کمبود، هارمونیک} را نیز شناسایی نماید. چراکه اولاً، مشخصه‌های پیشنهادی برای شناسایی این اغتشاشات، کاملاً مستقل از یکدیگر می‌باشند؛ ثانیاً، تصمیم‌گیری در مورد وقوع این اغتشاشات به‌طور هم‌زمان صورت می‌گیرد.

دیگری این‌که، اگر شکل موج مورد آزمایش فاقد هرگونه اغتشاش مورد مطالعه باشد، آن شکل موج، سینوسی ایده‌آل در نظر گرفته می‌شود.

۴- آزمایش روش پیشنهادی

۴-۱- نتایج آزمایش

با اجرای روش پیشنهادی بخش ۳-۴، درصد موارد تشخیص درست در شرایط مختلف برای شکل موج سینوسی ایده‌آل و تمامی ۱۰ نوع اغتشاش ساده و ترکیبی موردنظر تعیین می‌شود. جدول ۳، نتایج حاصل از این امر را نشان می‌دهد.

به حساب آورد. البته این افزایش درصد خطا برای طبقه‌بندی اغتشاشات نویزدار با مقدار سیگنال به نویز ۲۰ دسی‌بل به حدود ۳/۵ درصد می‌رسد، اما با این حال، روش پیشنهادی می‌تواند طبقه‌بندی اغتشاشات در این شرایط را هم با دقت قابل قبول بالایی انجام دهد.

۴-۲- مقایسه نتایج با دیگر روش‌ها

به منظور اثبات کارایی روش پیشنهادی، مقایسه‌ای بین دقت طبقه‌بندی اغتشاشات با استفاده از این روش و روش‌های ارائه شده در [۳، ۹-۷، ۱۴-۱۱، ۱۸-۱۶، ۲۲] در جدول ۴ صورت گرفته است. در تمامی این روش‌ها برای تولید انواع اغتشاشات کیفیت توان از مدل‌های ریاضی مشابه با آنچه در این مقاله به کار رفته، استفاده گردیده است. همان طوری که در این جدول مشاهده می‌شود، میزان دقت روش پیشنهادی تنها از روش مورد استفاده در [۱۱، ۲۲] کم‌تر است؛ اما در مقابل باید توجه داشت که روش پیشنهادی علاوه بر تمامی اغتشاشات مورد مطالعه در این مراجع، قادر به شناسایی اغتشاشات ضربه‌ای گذرا و شکاف نیز است.

از طرف دیگر، [۹، ۱۳، ۱۶، ۲۲، ۲۵] طبقه‌بندی اغتشاشات کیفیت توان نویزدار با مقادیر سیگنال به نویز ۳۰ و ۲۰ دسی‌بل را در نظر گرفته‌اند؛ همچنین [۳] طبقه‌بندی اغتشاشات نویزدار با مقدار سیگنال به نویز ۲۰ دسی‌بل را فقط انجام داده است. لذا در جدول‌های ۵ و ۶، مقایسه روش پیشنهادی با این مراجع در تشخیص اغتشاشات نویزدار با مقادیر سیگنال به نویز ۳۰ و ۲۰ دسی‌بل آورده شده است. لازم به ذکر است که دقت روش پیشنهادی با وجود بدترین شرایط نویزی از دقت روش ارائه شده در [۱۴] در شرایط عادی بدون نویز، بیش‌تر است. از این رو، از ارائه نتایج مندرج در این مرجع، در جداول ۵ و ۶ خودداری شده است.

جدول ۳: نتایج طبقه‌بندی اغتشاشات کیفیت توان با استفاده از روش پیشنهادی

درصد موارد درست تشخیص داده شده				
بدون نویز	با نویز ۴۰ دسی‌بل	با نویز ۳۰ دسی‌بل	با نویز ۲۰ دسی‌بل	
۱۰۰	۱۰۰	۹۹/۸	۹۷/۲	سینوسی ایده‌آل
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۹۳/۶	ضربه‌ای گذرا
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۹۸/۶	قطعی
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۹۲	بیش‌بود
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۹۷/۶	کمبود
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۹۰	شکاف
۹۸/۴	۹۸/۲	۹۸	۹۵/۶	نوسانی گذرا
۹۹/۲	۹۹/۲	۹۹	۹۷/۴	هارمونیک
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۹۶	فلیکر
۹۹	۹۸/۸	۹۸/۶	۹۶/۶	هارمونیک با بیش‌بود
۹۸	۹۷/۸	۹۷/۶	۹۶/۲	هارمونیک با کمبود
۹۹/۵۱	۹۹/۴۵	۹۹/۳۶	۹۵/۵۳	میانگین
۰/۴۹	۰/۵۵	۰/۶۴	۳/۴۷	درصد خطا

مطابق جدول ۳، هر چه مقدار نویز بیش‌تر می‌شود و یا به عبارت دیگر، هر چه سیگنال به نویز کاهش پیدا می‌کند، درصد خطای روش پیشنهادی افزایش می‌یابد. اما این افزایش درصد خطا برای طبقه‌بندی اغتشاشات نویزدار با مقدار سیگنال به نویز ۳۰ دسی‌بل در مقایسه با طبقه‌بندی اغتشاشات بدون نویز، تنها ۰/۱۵ درصد است. از این رو، روش پیشنهادی را می‌توان روشی مقاوم در مقابل نویز

جدول ۴: مقایسه درصد شناسایی صحیح اغتشاشات بدون نویز

روش پیشنهادی	مرجع [۳]	مرجع [۷]	مرجع [۸] (FFT)	مرجع [۸] (WT)	مرجع [۹]	مرجع [۱۱]	مرجع [۱۲]	مرجع [۱۳]	مرجع [۱۴]	مرجع [۱۶]	مرجع [۱۷]	مرجع [۱۸]	مرجع [۲۲]
ضربه‌ای گذرا	۱۰۰	-	۱۰۰	-	۱۰۰	-	۱۰۰	-	-	-	-	-	-
قطعی	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	-	۱۰۰	۱۰۰	۹۴/۵۵	۸۵/۵	۸۰/۵	۹۹/۵	-	۹۰	۹۹
بیش‌بود	۱۰۰	۹۸	۱۰۰	۹۳	۹۷	۹۴/۱۱۸	۹۶/۳۶	۹۶/۵	۱۰۰	۱۰۰	۹۹/۲	۹۷	۱۰۰
کمبود	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۹۷	۹۵	۹۷/۶۴۷	۹۸/۴۶	۹۷/۲۷	۸۸	۸۷	۹۶	۷۶/۵	۹۸
شکاف	۱۰۰	-	۹۶	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
نوسانی گذرا	۹۸/۴	۹۸	۱۰۰	۹۸	۱۰۰	۹۴/۵۳۱	-	-	-	-	۱۰۰	۹۷	۱۰۰
هارمونیک	۹۹/۲	۱۰۰	۹۷	۱۰۰	۱۰۰	۹۹/۷۳	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۹۸/۶	۱۰۰	۱۰۰
فلیکر	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۹۶	۹۶	۸۳/۲۴۸	-	-	-	-	-	۹۷/۷	۱۰۰
هارمونیک با بیش‌بود	۹۹	۹۸	۹۷	-	-	۹۷/۰۵۹	-	-	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۹۸	۱۰۰
هارمونیک با کمبود	۹۸	۹۸	۹۵	-	-	۹۶/۱۰	-	-	۹۹/۱۵	۹۷	۱۰۰	۷۱/۵	۱۰۰
میانگین	۹۹/۴۶	۹۹	۹۸/۵	۹۷/۴	۹۷/۶	۹۶/۲۷	۹۹/۶۷	۹۵	۹۴/۰۸	۹۹/۳۶	۹۸/۴	۸۸/۸۳	۹۹/۶۳

تبدیل S استخراج شد. سپس با استفاده از این ویژگی‌ها، مشخصه‌هایی تعریف گردید و بیان شد که چگونه می‌توان با توجه به مقادیری که این مشخصه‌ها در صورت وقوع اغتشاش اختیار می‌کنند، نوع آن اغتشاش را تشخیص داد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که دقت روش پیشنهادی در تشخیص گستره وسیعی از اغتشاشات کیفیت توان بیش از ۹۹٪ است. همچنین، این روش توانایی بالایی در طبقه‌بندی صحیح اغتشاشات کیفیت توان در بدترین شرایط نویزی دارد که این امر استفاده از آن را در کاربردهای عملی امکان‌پذیر می‌سازد.

مراجع

[1] M. Zhang, K. Li and Y. Hu, "A real-time classification method of power quality disturbances," *Electric Power Systems Research*, vol. 81, no. 2, pp. 660-666, February 2011.

[2] T. Nguyen and Y. Liao, "Power quality disturbance classification utilizing S-transform and binary feature matrix method," *Electric Power Systems Research*, vol. 79, no. 4, pp. 569-575, April 2009.

[3] Z. Moravej, A. A. Abdoos and M. Pazoki, "New combined S-transform and logistic model tree technique for recognition and classification of power quality disturbances," *Electric Power Components and Systems*, vol. 39, no. 1, pp. 80-98, 2011.

[4] A. M. Gargoom, N. Ertugrul and W. L. Soong, "Automatic classification and characterization of power quality events," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 23, no. 4, pp. 2417-2425, October 2008.

[5] M. Kezunovic and Y. Liao, "A novel software implementation concept for power quality study," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 17, no. 2, pp. 544-549, April 2002.

[6] Y. Liao and J. B. Lee, "A fuzzy-expert system for classifying power quality disturbances," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 26, no. 3, pp. 199-205, March 2004.

[7] علی انشایی و رحمت‌الله هوشمند، «تشخیص و طبقه‌بندی اغتشاش‌های ساده و ترکیبی کیفیت توان با استفاده از سیستم‌های فازی راهنمایی شده با الگوریتم بهینه‌سازی گروهی ذرات»، *مجله علمی-پژوهشی مهندسی برق مدرس*، دوره دهم، شماره ۲، صفحه ۱۶-۱، تابستان ۱۳۸۹.

[8] T. K. Abdel-Galil, E. F. El-Saadany, A. M. Youssef and M. M. A. Salama, "Disturbance classification using hidden Markov models and vector quantization," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 20, no. 3, pp. 2129-2135, July 2005.

[9] B. K. Panigrahi and V. R. Pandi, "Optimal feature selection for classification of power quality disturbances using wavelet packet-based fuzzy k-nearest neighbour algorithm," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 3, no. 3, pp. 296-306, March 2009.

[10] C. C. Liao and H. T. Yang, "Recognizing noise-influenced power quality events with integrated feature extraction and neuro-fuzzy network," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 24, no. 4, pp. 2132-2141, October 2009.

[11] G. M. S. Decanini, M. S. Tonelli-Neto, F. C. V. Malange and C. R. Minussi, "Detection and classification of voltage disturbances using a fuzzy-ARTMAP-wavelet network," *Electric Power Systems Research*, vol. 81, no. 12, pp. 2057-2065, December 2011.

[12] S. Kaewarsa, K. Attakitmongcol and T. Kulworawanichpong, "Recognition of power quality events by using multiwavelet-based neural networks," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 30, no. 4, pp. 254-260, May 2008.

[13] M. Uyar, S. Yildirim and M. T. Gencoglu, "An effective wavelet-based feature extraction method for classification of power quality disturbance signals," *Electric Power Systems Research*, vol. 78, no. 10, pp. 1747-1755, October 2008.

[14] H. He and J. A. Starzyk, "A self-organizing learning array system for power quality classification based on wavelet transform," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 21, no. 1, pp. 286-295, January 2006.

جدول ۵: مقایسه درصد شناسایی صحیح اغتشاشات با نویز ۳۰ دسی‌بل

روش پیشنهادی	مرجع [۹]	مرجع [۱۳]	مرجع [۱۶]	مرجع [۲۲]	مرجع [۲۵]
ضربه‌ای گذرا	۱۰۰	۸۶/۸۱۱۳	-	-	۹۸
قطعی	۱۰۰	۱۰۰	۷۸/۵	۹۸/۵	۹۲
بیش‌بود	۱۰۰	۹۵/۸۵۰۶	۹۳	۱۰۰	۹۹
کمبود	۱۰۰	۹۳/۲۸۳	۸۱/۵	۹۵/۵	۹۹
شکاف	۱۰۰	۸۶/۰۲۲۶	-	-	۹۹
نوسانی گذرا	۹۸	۹۱/۸۳۳۳	-	۹۹/۵	۹۹/۵
هارمونیک	۹۹	۸۱/۸۹۱۹	۹۵	۱۰۰	۹۸
فلیکر	۱۰۰	۱۰۰	-	-	-
هارمونیک با بیش‌بود	۹۸/۶	۱۰۰	۹۷/۵	۹۹/۵	۹۹/۵
هارمونیک با کمبود	۹۷/۶	۹۹/۵۵۱۶	۹۷/۵	۹۸/۵	۹۹
میانگین	۹۹/۳۲	۹۳/۵۲	۹۰/۵	۹۸/۷۹	۹۹

جدول ۶: مقایسه درصد شناسایی صحیح اغتشاشات با نویز ۲۰ دسی‌بل

روش پیشنهادی	مرجع [۳]	مرجع [۹]	مرجع [۱۳]	مرجع [۱۶]	مرجع [۲۲]	مرجع [۲۵]
ضربه‌ای گذرا	۹۳/۶	-	۱۰۰	-	-	۹۵
قطعی	۹۸/۶	۹۹/۵	۸۱/۵۳۸۴	۷۵/۵	۹۹	۸۲
بیش‌بود	۹۲	۱۰۰	۷۴	۹۰/۵	۱۰۰	۹۴
کمبود	۹۷/۶	۹۹/۵	۵۶/۳۰۲۵	۷۹	۹۲/۵	۹۷/۵
شکاف	۹۰	-	۱۰۰	-	-	۹۵
نوسانی گذرا	۹۵/۶	۹۵/۴	۹۴/۷۷۱۲	-	۹۷	۹۶
هارمونیک	۹۷/۴	۹۷/۳۵	۸۵/۲۲۷۲	۹۴	۹۸/۵	۹۸
فلیکر	۹۶	۹۷/۳۵	۹۸/۷۵	-	-	-
هارمونیک با بیش‌بود	۹۶/۶	۹۸	۱۰۰	۹۵/۵	۹۸	۹۷
هارمونیک با کمبود	۹۶/۲	۹۷	۱۰۰	۹۵	۹۷	۹۸
میانگین	۹۵/۳۶	۹۸/۰۱	۸۹/۰۶	۸۸/۲۵	۹۷/۴۳	۹۴/۷۲

همان‌طور که از جدول‌های ۵ و ۶ برمی‌آید، میزان دقت روش پیشنهادی برای مقدار سیگنال به نویز ۳۰ دسی‌بل از دیگر روش‌ها بالاتر است. این درحالی‌است که میزان دقت روش پیشنهادی برای مقدار سیگنال به نویز ۲۰ دسی‌بل از روش‌های ارائه‌شده در [۳، ۱۶] کم‌تر است. البته باید به این نکته توجه داشت که در این مورد نیز، روش پیشنهادی اغتشاشات متنوع‌تری را می‌تواند شناسایی نماید.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، روش جدیدی برای شناسایی اغتشاشات کیفیت توان بدون استفاده از طبقه‌بندی‌کننده‌های متداول ارائه گردید. در این روش، ابتدا ویژگی‌های مناسبی از شکل موج اغتشاشات با بهره‌گیری از

- [15] S. Ekici, "Classification of power system disturbances using support vector machines," *Expert Systems with Applications*, vol. 36, no. 6, pp. 9859-9868, August 2009.
- [16] H. Eristi, A. Ucar and Y. Demir, "Wavelet-based feature extraction and selection for classification of power system disturbances using support vector machines," *Electric Power Systems Research*, vol. 80, no. 7, pp. 743-752, July 2010.
- [17] G. S. Hu, F. F. Zhu and Z. Ren, "Power quality disturbance identification using wavelet packet energy entropy and weighted support vector machines," *Expert Systems with Applications*, vol. 35, no. 1-2, pp. 143-149, July-August 2008.
- [18] T. K. Abdel-Galil, M. Kamel, A. M. Youssef, E. F. El-Saadany and M. M. A. Salama, "Power quality disturbance classification using the inductive inference approach," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 19, no. 4, pp. 1812-1818, October 2004.
- [19] M. V. Chilukuri and P. K. Dash, "Multiresolution S-transform-based fuzzy recognition system for power quality events," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 19, no. 1, pp. 323-330, January 2004.
- [20] M. E. Salem, A. Mohamed and S. A. Samad, "Rule based system for power quality disturbance classification incorporating S-transform features," *Expert Systems with Applications*, vol. 37, no. 4, pp. 3229-3235, April 2010.
- [21] S. Hasheminejad, S. Esmaili and S. Jazebi, "Power quality disturbance classification using S-transform and hidden Markov model," *Electric Power Components and Systems*, vol. 40, no. 10, pp. 1160-1182, 2012.
- [22] M. Uyar, S. Yildirim and M. T. Gencoglu, "An expert system based on S-transform and neural network for automatic classification of power quality disturbances," *Expert Systems with Applications*, vol. 36, no. 3, pp. 5962-5975, April 2009.
- [23] C. N. Bhende, S. Mishra and B. K. Panigrahi, "Detection and classification of power quality disturbances using S-transform and modular neural network," *Electric Power Systems Research*, vol. 78, no. 1, pp. 122-128, January 2008.
- [24] S. Mishra, C. N. Bhende and B. K. Panigrahi, "Detection and classification of power quality disturbances using S-transform and probabilistic neural network," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 23, no. 1, pp. 280-287, January 2008.
- [25] F. Zhao and R. Yang, "Power-quality disturbance recognition using S-transform," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 22, no. 2, pp. 944-950, April 2007.