مجلهٔ علمی- پژوهشی
«مهندسی برق مدرس»
دورهٔ دهم، شمارهٔ ۲، تابستان ۱۳۸۹

# تشخیص و طبقه‌بندی اغتشاش‌های ساده و ترکیبی کیفیت توان با استفاده از سیستم‌های فازیِ راهنمایی شده با الگوریتم بهینه‌سازی گروهی ذرات

**علی انشایی[۱]، رحمت‌الله هوشمند[۲*]**
۱- کارشناس ارشد مهندسی برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه اصفهان
۲- دانشیار مهندسی برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه اصفهان

***اصفهان، دانشگاه اصفهان**
**Hooshmand_r@eng.ui.ac.ir**
(**دریافت مقاله**: دی ۱۳۸۸، **پذیرش مقاله**: مرداد ۱۳۸۹)

**چکیده**- یکی از مهمترین مسائل در سیستم‌های توزیع، تشخیص و طبقه‌بندی اغتشاش‌های کیفیت توان است. در این مقاله، الگوریتم جدیدی برای تشخیص و طبقه‌بندی اغتشاش‌های ساده و ترکیبی کیفیت توان با بهره‌گیری از منطق فازی و الگوریتم بهینه‌سازی گروهی ذرات (PSO[۱]) ارائه شده است. در این الگوریتم، ابتدا ویژگی‌های مناسبی از شکل‌موج اغتشاش‌های کیفیت توان استخراج می‌شود. استخراج این ویژگی‌ها، با استفاده از دو تبدیل فوریه و موجک صورت می‌گیرد. سپس با استفاده از این ویژگی‌ها، سیستم فازی پیشنهادی در مورد نوع هر یک از اغتشاش‌ها تصمیم‌گیری می‌کند. برای تعیین دقیق پارامترهای هر یک از توابع عضویت این سیستم، از الگوریتم بهینه‌سازی گروهی ذرات استفاده شده است. به‌منظور ارزیابی الگوریتم پیشنهاد شده، شکل‌موج اغتشاش‌های کیفیت توان در دو دسته ساده و ترکیبی، به‌صورت نمونه‌برداری شده، فرض شده است. پدیده‌های ضربه‌ای‌گذرا، قطعی، بیشبود، کمبود، شکاف، نوسانی‌گذرا، هارمونیک و نوسان به‌عنوان اغتشاش‌های ساده برای سیگنال ولتاژ مطرح است. رخدادهای هارمونیک با بیشبود، بیشبود با هارمونیک، بیشبود با نوسانی‌گذرا، هارمونیک با کمبود، کمبود با هارمونیک و کمبود با نوسانی‌گذرا به‌عنوان اغتشاش‌های ترکیبی برای سیگنال ولتاژ در نظر گرفته است. نتایج شبیه‌سازی، توانایی الگوریتم پیشنهادی را در شناسایی اغتشاش‌های ساده و ترکیبی با دقت حدود ۹۹٪ نشان می‌دهد.

**کلیدواژگان:** دسته‌بندی اغتشاش، کیفیت توان، تبدیل فوریه، تبدیل موجک، منطق فازی، الگوریتم بهینه‌سازی گروهی ذرات.

## ۱- مقدمه

رشد روزافزون به‌کارگیری بارهای حساس توسط مشترکان و لزوم بهره‌گیری از برق با کیفیت بالا، موجب شده که توجه خاصی به عوامل، اثرها و راه‌حل‌های رویارویی با اغتشاش‌های کیفیت توان صورت گیرد. از این رو، تولیدکنندگان برق، با ساخت و نصب انواع گوناگون تجهیزات نظارت بر کیفیت توان در سیستم‌های

1. Particle Swarm Optimization

توزیع، سعی در دستیابی به این هدف دارند. در بیشتر موارد، این تجهیزات نیاز به جمع‌آوری اطلاعات متعددی دارند که باید برای شناسایی نوع اغتشاش کیفیت توان، تحلیل شود. لذا لزوم به کارگیری روش‌هایی که امکان پیاده‌سازی سخت‌افزاری و نرم‌افزاری داشته و همچنین کارامد و سریع باشند، احساس می‌شود [۱].

از میان مهمترین انواع اغتشاش‌های کیفیت توان، می‌توان به ضربه‌ای‌گذرا[1]، قطعی[2]، بیشبود ولتاژ[3]، کمبود ولتاژ[4]، شکاف ولتاژ[5]، نوسانی‌گذرا[6]، هارمونیک[7] و نوسان ولتاژ[8] در سیستم‌های توزیع اشاره کرد [۲]. راه‌اندازی موتورهای الکتریکی بزرگ، برق‌دار یا بی‌برق کردن بانک‌های خازنی، بارهای غیرخطی، عملکرد کوره‌های قوس الکتریکی، تجهیزات دارای ادوات کلیدزنی حالت جامد، خطاهای سیستم توزیع و مانند اینها را می‌توان به‌عنوان عوامل اصلی وقوع این اغتشاش‌ها در نظر گرفت [۲].

اغتشاش‌های کیفیت توان طیف فرکانسی وسیعی دارند. برای پردازش شکل‌موج اغتشاش‌های کیفیت توان فرکانس پایین مانند نوسان ولتاژ، معمولاً از تبدیل فوریهٔ گسسته استفاده می‌شود، اما برای پردازش اغتشاش‌های کیفیت توان فرکانس بالا نظیر حالت‌های گذرا، بهتر است ضرایب موجک به‌کار رود [۸] تا [۳]. از این رو، برخی مقالات، این دو روش را در کنار یکدیگر به کار گرفته‌اند تا با استخراج ویژگی‌های مناسبی از شکل‌موج اغتشاش، شناسایی و طبقه‌بندی اغتشاش را ساده‌تر سازند [۷] تا [۳]. در بیشتر این مقالات، تصمیم‌گیری در مورد وقوع و تعیین نوع اغتشاش براساس قواعدی فازی صورت می‌گیرد [٦] تا [۳]. در این روش، گرچه تعداد بالای ورودی‌های سیستم فازی، بر دقت امر طبقه‌بندی اغتشاش‌های خواهد افزود، اما پیچیدگی را افزایش داده و از سرعت آن می‌کاهد [٤] و [۳]. در [۷] تا [۵]، اگرچه تا حدودی از پیچیدگی سیستم فازی طبقه‌بندی اغتشاش‌ها کاسته شده و دقت آن نیز چندان تغییر نیافته است، اما در مقابل، به‌موضوع شناسایی اغتشاش‌های ترکیبی توجه نشده است. از طرف دیگر، چنین به نظر می‌رسد که در این روش، مقداردهی پارامترهای توابع عضویت صرفاً براساس برداشت فردی و سعی و خطا با هدف افزایش دقت سیستم صورت گرفته است؛ از این رو، تضمینی برای دقت یا بهینه بودن مقادیر وجود ندارد.

روشهای دیگری نیز برای شناسایی و طبقه‌بندی اغتشاش‌های کیفیت توان ارائه شده است [۱۳] تا [۸]. اما اغتشاش‌های مدنظر در این روشها، یا دارای تنوع گسترده‌ای نیست [۲] تا [۸] یا با تعاریف موجود در استانداردها تطابق مطلوبی ندارد [۱۳].

در این مقاله، با استفاده از دو سیستم فازی راهنمایی شده با الگوریتم PSO، روش جدیدی برای تشخیص و طبقه‌بندی اغتشاش‌های ساده و ترکیبی پیشنهاد شده است. یکی از این دو سیستم، برای تشخیص و دیگری برای طبقه‌بندی اغتشاش‌ها ارائه شده است. الگوریتم PSO برای مقداردهی دقیق پارامترهای هر یک از توابع عضویت به‌کار می‌رود. ویژگی‌هایی که با استفاده از تبدیل‌های فوریه و موجک از شکل‌موج اغتشاش‌ها استخراج می‌شوند، ورودی‌های این سیستم‌ها هستند. تعداد و نوع ورودی‌ها به گونه‌ای انتخاب شده که از

1. Impulse
2. Interruption
3. Swell
4. Sag
5. Notch
6. Transient
7. Harmonic
8. Flicker

پیچیده شدن این مجموعه جلوگیری شود. تدوین پایگاه قواعد سیستم‌ها به نحوی صورت گرفته که دقت بالایی در شناسایی انواع اغتشاش‌های ساده و ترکیبی کیفیت توان داشته باشد.

نخست نحوهٔ استخراج ویژگی‌های مناسب از شکل‌موج اغتشاش‌ها بیان می‌شود. سپس در بخش ۳، روش طراحی سیستم‌های فازی شرح داده می‌شود. در بخش ٤، نحوهٔ به‌کارگیری الگوریتم PSO در سیستم‌های فازی پیشنهادی بیان می‌شود و در بخش ٥، با ارائهٔ نتایج شبیه‌سازی، قابلیت الگوریتم پیشنهادی در تشخیص انواع اغتشاش‌های کیفیت توان نشان داده خواهد شد.

## ۲- استخراج ویژگی‌ها از شکل‌موج اغتشاش‌ها

در این بخش به معرفی هشت ویژگی که به‌منظور به‌کارگیری در تشخیص و دسته‌بندی اغتشاش‌های کیفیت توان، از شکل‌موج اغتشاش‌ها استخراج می‌شوند، پرداخته می‌شود [۷] تا [۳].

**۱) مؤلفهٔ اصلی ($\mathbf{V}_n$):** این ویژگی، مؤلفهٔ اصلی سیگنال را در هر سیکل با استفاده از رابطهٔ (۱) محاسبه می‌کند:

$$V_n = \sqrt{۲}\,\mathrm{abs}(V^n[۱])/N \qquad (۱)$$

در این رابطه، $V^n[k]$ تبدیل فوریهٔ گسسته $n$ اُمین سیکل از سیگنال نمونه‌برداری شده است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$V^n[k] = \sum_{i=۰}^{N-۱} v[i+(n-۱)N]\,\mathrm{e}^{-\mathrm{j}(۲\pi k i/N)} \qquad (۲)$$

در این رابطه، $v[i]$، ۱۰ سیکل از سیگنال نمونه‌برداری شده با نرخ نمونه‌برداری ۲٥٦ نقطه بر سیکل را در بر می‌گیرد. در نتیجه $N$ که معرف تعداد نمونه‌ها در یک سیکل است، برابر ۲٥٦ خواهد بود. j عدد موهومی واحد و $n$=1, 2, …, 10 تعداد سیکل‌های نمونه‌برداری شده است.

لازم است ذکر است که از آنجا که هدف رابطهٔ (۱) محاسبهٔ مؤلفهٔ اصلی $n$ اُمین سیکل از سیگنال نمونه‌برداری شده است، لذا در رابطهٔ تعریف‌کنندهٔ تبدیل فوریهٔ گسسته یعنی رابطهٔ (۲)، $k$ برابر یک قرار داده شده است.

**۲) جابه‌جایی زاویه‌ای ($\mathbf{PS}_n$):** این ویژگی، اختلاف زاویهٔ بین تبدیل فوریهٔ گسستهٔ سیکل $n$ اُم و سیکل اول سیگنال نمونه‌برداری شده را به ازای مؤلفهٔ اصلی آن محاسبه می‌کند. بنابراین:

$$\mathrm{PS}_n = \mathrm{angle}\,(V^n[۱]) - \mathrm{angle}\,(V^۱[۱]) \qquad (۳)$$

**۳) اعوجاج هارمونیکی کل ($\mathbf{THD}_n$):** این کمیت به صورت نسبت مجذور جمع مربعات دامنهٔ تک‌تک مؤلفه‌های هارمونیکی شکل‌موج اعوجاج‌یافته به دامنهٔ مؤلفهٔ اصلی تعریف می‌شود:

$$\mathrm{THD}_n = \frac{\sqrt{\sum_{k=۲}^{\mathrm{int}(N/۲)} \{\mathrm{abs}(V^n[k])\}^۲}}{\mathrm{abs}(V^۱[۱])} \qquad (٤)$$

در این رابطه، abs(.) اندازهٔ عبارت داخل پرانتز را نشان می‌دهد. int($N$/2) برابر $N$/2 است اگر $N$ زوج باشد و مساوی $(N-1)/2$ اگر $N$ فرد باشد.

**٤) تعداد نقاط بیشینهٔ نسبی قدرمطلق ضرایب تبدیل موجک ($\mathbf{N}_n$):** این ویژگی، به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mathrm{N}_n = \mathrm{peak}(\mathrm{abs}(\mathrm{WC}^n)) \qquad (٥)$$

در این رابطه، $\mathrm{WC}^n$ ماتریسی شامل ضرایب تفصیلی سطح دوم حاصل از تجزیهٔ $n$اُمین سیکل از سیگنال نمونه‌برداری شده، با انتخاب تابع موجک مادر دابچیز ٤ است.

تابع (.)peak، تعداد نقاط بیشینه نسبی عبارت داخل پرانتز را به‌دست می‌دهد.

**٥) انرژی ضرایب تبدیل موجک ($\mathbf{EW}_n$):** این ویژگی، مجموع قدرمطلق عناصر ماتریس $\mathrm{WC}^n$ را با نام انرژی ضرایب تبدیل موجک در نظر می‌گیرد. بنابراین می‌توان نوشت:

$$\mathrm{EW}_n = \sum_{k=1}^{le} \mathrm{abs}(\mathrm{WC}^n[k]) \qquad (٦)$$

در این رابطه، $le$ برابر طول ماتریس $\mathrm{WC}^n$ است.

**٦) تعداد نقاط عبور از صفر ولتاژ از دست رفته ($\mathbf{OS}_n$):** این ویژگی، با شمارش تعداد نقاط عبور از صفر منحنی به‌دست آمده از تفاضل شکل‌موج حاوی اغتشاش و شکل‌موج سینوسی ایدئال، مشخص می‌شود. این ویژگی، بیانگر میزان فاصله گرفتن شکل‌موج ولتاژ اغتشاشی از شکل‌موج ولتاژ سینوسی ایدئال است:

$$\mathrm{OS}_n = \mathrm{root}(v_{\mathrm{miss}}^{\mathrm{s}}) \qquad (٧)$$

در این رابطه، تابع (.)root تعداد نقاط عبور از صفر عبارت داخل پرانتز را نشان می‌دهد. $v_{\mathrm{miss}}^{\mathrm{s}}$ به صورت آرایه‌ای شامل $v_{\mathrm{miss}}[i]$ تعریف می‌شود که در آن $i=0, 1, \ldots, N-1$. $v_{\mathrm{miss}}[i]$ که ولتاژ از دست‌رفته نامیده می‌شود، از رابطهٔ زیر محاسبه می‌شود:

$$v_{\mathrm{miss}}[i] = v[i] - ٢/N \times \mathrm{abs}(V^{١}[١]) \times \cos\{\mathrm{angle}(V^{١}[١]) + ٢\pi(i-١)/N\} \qquad (٨)$$

که (.)angle فاز عبارت داخل پرانتز را نشان می‌دهد.

**٧) اعوجاج هارمونیکی مراتب پایین ($\mathbf{TS}_n$):** این ویژگی، مانند ویژگی اعوجاج هارمونیکی کل است؛ با این تفاوت که در محاسبهٔ آن، فقط از مؤلفه‌های تا مرتبهٔ دهم استفاده می‌شود. بنابراین می‌توان نوشت:

$$\mathrm{TS}_n = \frac{\sqrt{\sum_{k=٢}^{١٠} \{\mathrm{abs}(V^{n}[k])\}^{٢}}}{\mathrm{abs}(V^{١}[١])} \qquad (٩)$$

**٨) تعداد نقاط عبور از صفر تغییرات مقدار مؤثر ($\mathbf{RN}$):** این ویژگی نخست با محاسبهٔ مقدار مؤثر هر سیکل از سیگنال نمونه‌برداری شده، آرایه‌ای از این مقادیر را ایجاد می‌کند، سپس با شمارش تعداد نقاط عبور از صفر تفاضل این آرایه و میانگین مقادیر مؤثر، میزان انحراف از این مقدار میانگین به‌دست می‌آید. لذا می‌توان نوشت:

$$\mathrm{RN} = \mathrm{root}(V_{\mathrm{rms}}^{\mathrm{s}} - \mathrm{mean}(V_{\mathrm{rms}}^{\mathrm{s}})) \qquad (١٠)$$

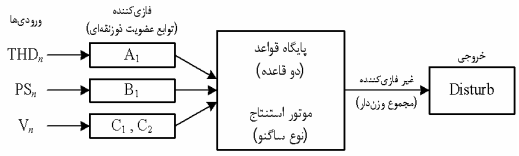
(.)mean میانگین عبارت داخل پرانتز را نشان می‌دهد. $V_{\mathrm{rms}}^{\mathrm{s}}$ به صورت آرایه‌ای شامل $V_{\mathrm{rms}}^{n}$ تعریف می‌شود که در آن $n=1, 2, \ldots, 10$ $V_{\mathrm{rms}}^{n}$ مقدار مؤثر سیکل $n$اُم سیگنال نمونه‌برداری شده است که از رابطهٔ زیر محاسبه می‌شود:

$$V_{\mathrm{rms}}^{n} = \sqrt{\frac{١}{N}\sum_{i=٠}^{N-١} v^{٢}[i+(n-١)N]} \qquad (١١)$$

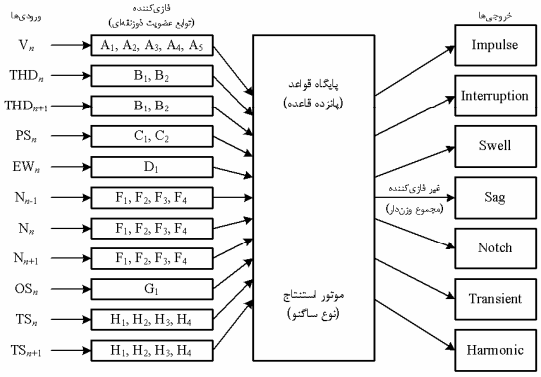
## ٣- سیستم‌های فازی پیشنهادی

در این بخش، به معرفی دو سیستم فازی می‌پردازیم که یکی به‌منظور تشخیص و دیگری با هدف طبقه‌بندی اغتشاش‌های کیفیت توان، طراحی شده است. شمای کلی این دو سیستم در شکل‌های (١) و (٢) نشان داده شده

است. بر مبنای این دو شکل، در ادامه، ابتدا ساختار این دو سیستم فازی تشریح می‌شود. سپس چگونگی تعامل این دو سیستم با یکدیگر در شناسایی و طبقه‌بندی اغتشاش‌های ساده و ترکیبی کیفیت توان مطرح می‌شود.




**شکل ۱** سیستم فازی تشخیص اغتشاش‌های کیفیت توان




**شکل ۲** سیستم فازی طبقه‌بندی اغتشاش‌های کیفیت توان

## ۳-۱- ورودی‌ها، خروجی‌ها و توابع عضویت آنها در دو سیستم فازی

**الف) سیستم فازی برای تشخیص اغتشاش:** ورودی‌های این سیستم، ویژگی‌های $THD_n$ ، $PS_n$ , $V_n$ و خروجی آن متغیر Disturb است که وقوع یا عدم وقوع اغتشاش را به ترتیب با یک یا صفر شدن خود، نشان می‌دهد.

نوع توابع عضویت هر یک از ورودی‌های این سیستم و پارامترهایی که اختیار کرده‌اند، در جدول (۱) ارائه شده است.

**ب) سیستم فازی برای طبقه‌بندی اغتشاش‌ها:** ورودی‌های این سیستم، ویژگی‌های $V_n$ ، $THD_n$ ، $THD_{n+1}$ ، $PS_n$ ، $EW_n$ ، $N_n$ ، $N_{n-1}$ ، $N_{n+1}$ ، $OS_n$ ، $TS_n$ , $TS_{n+1}$ و خروجی‌های آن متغیرهای Impulse ، Interruption ، Swell ، Sag ، Notch ، Transient و Harmonic است. با مخالف صفر شدن هر یک از این خروجی‌ها، نوع اغتشاش به ترتیبی که در بخش ۳-۳ گفته خواهد شد، مشخص می‌شود.نوع توابع عضویت هر یک از ورودی‌های سیستم و پارامترهایی که اختیار کرده‌اند، در جدول (۲) ارائه شده است.

## ۳-۲- پایگاه قواعد دو سیستم فازی

تدوین دقیق پایگاه قواعد دو سیستم فازی، موجب افزایش قابلیت آن در شناسایی موارد متنوع‌تر اغتشاش‌های کیفیت توان خواهد شد لذا لازم است در تعیین این قواعد از دانش افراد متخصص بهره گرفته شود.

**الف) سیستم فازی برای تشخیص اغتشاش:** جدول (۳) پایگاه قواعد این سیستم را نشان می‌دهد. برای نمونه، اولین قاعده استخراج شده از این جدول به صورت زیر قابل بیان است:

Rule 1: if $THD_n$ is $A_1$ or $PS_n$ is $B_1$ or $V_n$ is $C_2$ then Disturb = 1

در این قاعده، یک شدن متغیر Disturb ، وقوع اغتشاش را نشان می‌دهد و صفر شدن آن بیانگر عدم وقوع اغتشاش است.

**جدول ۱** توابع عضویت ورودی‌های سیستم فازی تشخیص اغتشاش‌های کیفیت توان

| عنوان | بازهٔ تغییرات | عنوان تابع عضویت | نوع تابع عضویت | پارامترهای تابع عضویت |
|---|---|---|---|---|
| $THD_n$ | [۱،۰] | $A_1$ | ذوزنقه‌ای | [۰،۰۴۸ ۰،۰۵ ۱،۱ ۱،۲] |
| $PS_n$ | [۱۸۰،۰] | $B_1$ | ذوزنقه‌ای | [۰،۸ ۱ ۱۸۰ ۱۹۰] |
| $V_n$ | [-۰،۲،۰۱،۵] | $C_1$<br>$C_2$ | ذوزنقه‌ای | [-۰،۱۸ -۰،۰۲ ۰،۹۸ ۱]<br>[۱ ۱،۰۲ ۲،۶ ۲،۷] |

**جدول ۲** توابع عضویت ورودی‌های سیستم فازی طبقه‌بندی اغتشاش‌های کیفیت توان

| عنوان | بازهٔ تغییرات | عنوان تابع عضویت | نوع تابع عضویت | پارامترهای تابع عضویت |
|---|---|---|---|---|
| $V_n$ , $V_{n+1}$ | [۲،۰] | $A_1$ | ذوزنقه‌ای | [−۰/۱۸ ۰/۰۲ ۰/۰۹۷ ۰/۱] |
| | | $A_2$ | | [۰/۱۰۳ ۰/۱۱ ۰/۸۹ ۰/۹٤] |
| | | $A_3$ | | [۰/۹٤ ۰/۹٦ ۱/۰٤ ۱/۰٦] |
| | | $A_4$ | | [۱/۰۰۷ ۱/۰۱ ۱/۰۹ ۱/۱۱] |
| | | $A_5$ | | [۱/۰۵ ۱/۱۱ ۲/۱ ۲/۲] |
| $THD_n$ , $THD_{n+1}$ | [۱،۰] | $B_1$ | ذوزنقه‌ای | [−۰/۲ −۰/۱ ۰/۰٤۸ ۰/۰۵] |
| | | $B_2$ | | [۰/۰٤۸ ۰/۰۵ ۱/۱ ۱/۲] |
| $PS_n$ | [−۱۸۰،۳] | $C_1$ | ذوزنقه‌ای | [−۲/۸ −۲ ٤/۸ ۵/۵] |
| | | $C_2$ | | [٤/۸ ۵/۵ ۱۸۱ ۱۸۲] |
| $EW_n$ | [۱۰،۰] | $D_1$ | ذوزنقه‌ای | [۰/۱۸ ۰/۲ ۱۰/۱ ۱۰/۲] |
| $N_{n-1}$ , $N_n$ , $N_{n+1}$ | [−۳۰،۱] | $F_1$ | ذوزنقه‌ای | [−۱/۸ −۱ ٤ ٤/۳] |
| | | $F_2$ | | [۰/۷ ۱ ٤ ٤/۳] |
| | | $F_3$ | | [−۱/۸ −۱ ۱٦ ۱٦/۳] |
| | | $F_4$ | | [۸/۷ ۹ ۲۹ ۲۹/۳] |
| $OS_n$ | [۱۰۰،۰] | $G_1$ | ذوزنقه‌ای | [٤/۸ ۵/۲ ۱۰۰/۱ ۱۰۰/۲] |
| $TS_n$ , $TS_{n+1}$ | [۱،۰] | $H_1$ | ذوزنقه‌ای | [−۰/۱۸ −۰/۰۲ ۰/۰۲۸ ۰/۰۳۱] |
| | | $H_2$ | | [−۰/۱۸ −۰/۰۲ ۰/۰٤۸ ۰/۰۵۱] |
| | | $H_3$ | | [۰/۰۳۸ ۰/۰٤۱ ۱/۱ ۱/۲] |
| | | $H_4$ | | [۰/۰٤۸ ۰/۰۵ ۱/۱ ۱/۲] |

**جدول ۳** پایگاه قواعد سیستم فازی تشخیص اغتشاش‌های کیفیت توان

| ورودی‌ها | | | خروجی |
|---|---|---|---|
| $THD_n$ | $PS_n$ | $V_n$ | Disturb |
| $A_۱$ | $B_۱$ | $C_۲$ | ۱ |
| - | - | $C_۱$ | ۱ |

**ب) سیستم فازی برای طبقه‌بندی اغتشاش‌ها:** جدول (٤) پایگاه قواعد این سیستم را نشان می‌دهد. برای نمونه، اولین قاعده استخراج شده از این جدول به صورت زیر قابل بیان است:

Rule 1: if $V_n$ is $A_4$ and $PS_n$ is $C_1$ and $EW_n$ is $D_1$ and $N_n$ is $F_2$ then Impulse = 1

در این قاعده، یک شدن متغیر Impulse ، وقوع اغتشاش ضربه‌ای گذرا را نشان می‌دهد و صفر شدن آن بیانگر عدم وقوع اغتشاش Impulse است.

موتور استنتاج فازی در این دو سیستم فازی، از نوع ساگنو است؛ زیرا این نوع موتور، برای مدل‌سازی تحلیل فرد متخصص، بسیار مناسب است [١٤]. به دلیل سادگی، توابع بیشینه (Max) و کمینه (min) به‌ترتیب برای عملگرهای فازی اجتماع (OR) و اشتراک (AND) به‌کار رفته‌اند [١٥]. روش مجموع وزن‌دار (wtsum) که تقریباً بهترین روش غیرفازی کردن است، برای غیرفازی‌سازی، انتخاب شده است [١٤].

## ۳-۳- عملکرد سیستم‌های فازی تشخیص و طبقه‌بندی اغتشاش‌های کیفیت توان

برای تصمیم‌گیری در مورد وقوع اغتشاش، ویژگی‌های $V_n$ , $PS_n$ ، $THD_n$ به‌ازای هر یک از سیکل‌های شکل‌موج مورد نظر محاسبه شده و به‌عنوان ورودی در اختیار سیستم فازی تشخیص اغتشاش‌های کیفیت توان قرار می‌گیرد. این سیستم بر مبنای ورودی‌ها، مشخص می‌سازد که آیا در سیکل بررسی شده، اغتشاشی رخ داده یا خیر. اگر پاسخ منفی بود، روند بالا برای سیکل بعدی تکرار می‌شود. اما اگر پاسخ مثبت باشد، باید نوع اغتشاش مشخص شود.

**جدول ٤** پایگاه قواعد سیستم فازی طبقه‌بندی اغتشاش‌های کیفیت توان

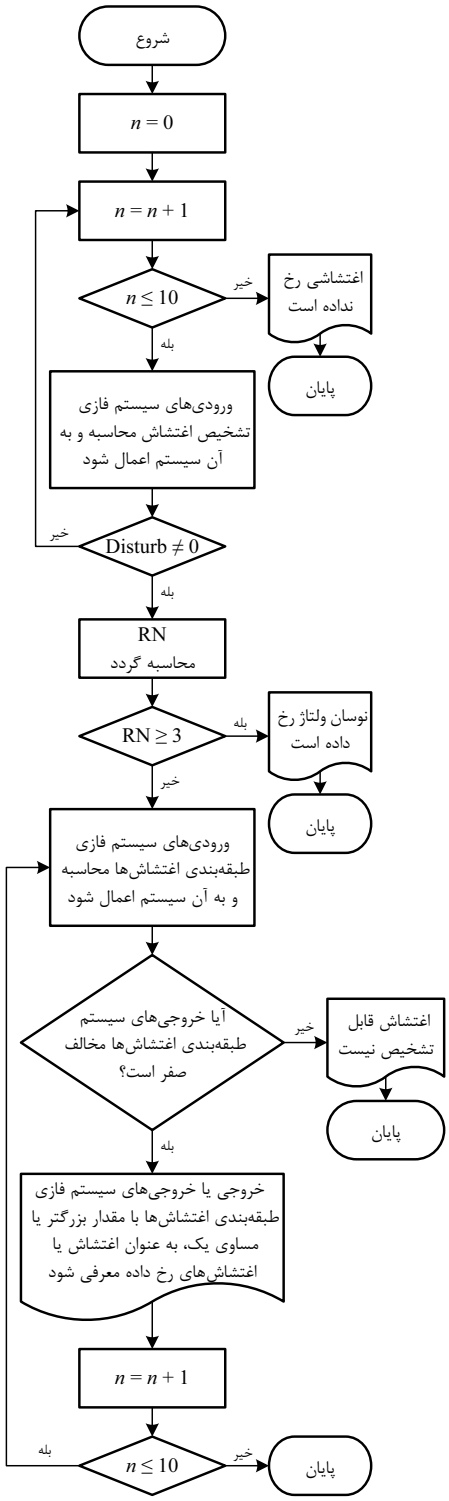
| ورودی‌ها | | | | | | | | | | | خروجی‌ها | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $V_n$ | $THD_n$ | $THD_{n+1}$ | $PS_n$ | $EW_n$ | $N_{n-1}$ | $N_n$ | $N_{n+1}$ | $OS_n$ | $TS_n$ | $TS_{n+1}$ | Impulse | Interruption | Swell | Sag | Notch | Transient | Harmonic |
| $A_4$ | - | - | $C_1$ | $D_1$ | - | $F_2$ | - | - | - | - | ۱ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ |
| $A_1$ | $B_1$ | - | - | - | - | - | - | - | $H_1$ | - | ۰ | ۱ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ |
| $A_5$ | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | ۰ | ۰ | ۱ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ |
| $A_5$ | - | - | $C_1$ | - | - | - | - | - | - | - | ۰ | ۰ | ۱ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ |
| $A_5$ | - | - | $C_2$ | $D_1$ | - | - | - | - | $H_2$ | - | ۰ | ۰ | ۱ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ |
| $A_2$ | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | ۰ | ۰ | ۰ | ۱ | ۰ | ۰ | ۰ |
| $A_2$ | - | - | $C_1$ | - | - | - | - | - | - | - | ۰ | ۰ | ۰ | ۱ | ۰ | ۰ | ۰ |
| $A_2$ | - | - | $C_2$ | $D_1$ | - | - | - | - | $H_2$ | - | ۰ | ۰ | ۰ | ۱ | ۰ | ۰ | ۰ |
| $A_3$ | $B_2$ | $B_2$ | $C_1$ | - | - | $F_3$ | - | $G_1$ | - | - | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۱ | ۰ | ۰ |
| - | $B_1$ | $B_1$ | - | - | $F_4$ | $F_4$ | $F_3$ | - | - | $H_2$ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۱ | ۰ |
| - | $B_1$ | $B_1$ | - | - | $F_1$ | $F_4$ | $F_3$ | - | - | $H_2$ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۱ | ۰ |
| - | $B_2$ | $B_1$ | - | - | $F_1$ | $F_4$ | $F_3$ | - | - | $H_2$ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۱ | ۰ |
| - | $B_2$ | $B_2$ | - | - | - | $F_4$ | - | - | - | - | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۱ |
| - | $B_2$ | $B_2$ | - | - | - | $F_4$ | $F_4$ | $G_1$ | $H_3$ | $H_3$ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۱ |
| - | $B_2$ | $B_2$ | - | - | - | $F_4$ | $F_4$ | $G_1$ | $H_4$ | $H_4$ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۱ |

در این مرحله، ابتدا ویژگی تعداد نقاط عبور از صفر تغییرات مقدار مؤثر (RN) شکل‌موج مورد نظر محاسبه می‌شود. اگر مقدار این ویژگی، سه یا بیشتر به‌دست آید، اغتشاش به‌عنوان نوسان ولتاژ تلقی می‌شود. در غیر این صورت، چنانچه $n$ شمارهٔ سیکل حاوی اغتشاش باشد، ویژگی‌های $V_n$ ، $THD_n$ ، $THD_{n+1}$ ، $PS_n$ ، $EW_n$ ، $N_n$ ، $N_{n-1}$ ، $N_{n+1}$ ، $OS_n$ ، $TS_n$ , $TS_{n+1}$ از شکل‌موج مورد نظر استخراج می‌شوند. با اعمال این ویژگی‌ها به سیستم فازی طبقه‌بندی اغتشاش‌ها، خروجی‌های سیستم، مقدار صفر یا مخالف صفر را اختیار می‌کنند. با توجه به این مقادیر، خروجی مساوی یا بیشتر از یک به‌عنوان نوع اغتشاش معرفی می‌شود. اگر چندین خروجی، مقادیر مساوی یا بیشتر از یک داشته باشند، تمامی این خروجی‌ها به‌عنوان نوع اغتشاش در نظر گرفته می‌شوند.

شکل (۳)، ارتباط دو سیستم فازی تشخیص و طبقه‌بندی اغتشاش‌ها را به‌منظور تصمیم‌گیری درباره وقوع و نوع اغتشاش، نشان می‌دهد.

## ٤- سیستم‌های فازی راهنمایی شده با الگوریتم PSO

یکی از مشکلات اساسی در طراحی سیستم‌های فازی پیشنهادی بخش قبل، تعیین پارامترهای توابع عضویت ورودی‌های این سیستم‌ها است. مقداردهی دقیق به این پارامترها، نقش مهمی در عملکرد صحیح الگوریتم پیشنهادی شناسایی نوع اغتشاش خواهد داشت. بدین منظور، از الگوریتم PSO برای تعیین دقیق پارامترهای توابع عضویت جدول‌های (۱) و (۲) استفاده شده است. در این بخش، ابتدا به اختصار الگوریتم PSO مرور شده و سپس، چگونگی به‌کارگیری این الگوریتم در سیستم‌های فازی پیشنهادی ارائه شده در بخش قبل تشریح می‌شود.




**شکل ۳** الگوریتم پیشنهادی برای تشخیص و طبقه‌بندی اغتشاش‌های کیفیت توان

## ٤-١- مرور الگوریتم PSO

الگوریتم PSO که در ۱۹۹۵ توسط J. Kennedy و R. C. Eberhart معرفی شده [١٦]، جزو گروه الگوریتم‌های تکاملی مبتنی بر جمعیت است. از این رو، مانند سایر الگوریتم‌های تکاملی مبتنی بر جمعیت، در ابتدا با جمعیت اولیه‌ای شامل $n$ ذره (به‌عنوان راه‌حل‌های ممکن برای مسألهٔ بهینه‌سازی) در فضای جستجوی چندبُعدی شروع می‌شود. بعضی از ذرات، موقعیت بهتری نسبت به ذرات دیگر دارند و تمامی ذرات به‌تدریج موقعیت خود را در این فضا - تا زمانی که با یکی از معیارهای توقف الگوریتم برخورد کنند - تغییر می‌دهند. معیار توقف ممکن است رسیدن به حالت بهینه یا پایان تعداد تکرارهای مشخص الگوریتم باشد. تغییر موقعیت هر ذره براساس تجربهٔ خود ذره در حرکتهای قبلی و تجربهٔ ذرات همسایه صورت می‌گیرد. در واقع هر ذره از بهترین موقعیت قبلی خود و بهترین موقعیت در میان تمامی ذرات آگاه است. در هر تکرار، بردار سرعت ذرهٔ $i$ اُم، با توجه به رابطهٔ (۱۲) به روز می‌شود:

(۱۲)

$$\vec{v}_i(t+1) = w\vec{v}_i(t) + c_1 r_1 (Pbest_i(t) - \vec{x}_i(t)) + c_2 r_2 (Gbest(t) - \vec{x}_i(t))$$

در این رابطه: $w$ ضریب لختی، $\vec{v}_i(t)$ بردار سرعت قبلی ذره، $\vec{v}_i(t+1)$ بردار سرعت کنونی ذره، ضرایب $c_1$ و $c_2$ ضرایب تحریک، $Pbest_i$ موقعیتی که ذره بهینه‌ترین مقدار تابع هدف را تا آن تکرار به‌دست آورده است، $Gbest$ بهترین موقعیتی که توسط هر یک

از ذرات در همسایگی ذره تا آن تکرار کسب شده است. $r_1$ و $r_2$ اعدادی تصادفی با توزیع یکنواخت در بازهٔ ۱-۰ است که برای هر ذره در هر تکرار تولید می‌شوند.

لازم است ذکر شود که ضریب $w>0$ تأثیر $\vec{v}_i(t)$ را در $\vec{v}_i(t+1)$ تنظیم می‌کند. ضریب $c_1 > 0$ باعث می‌شود که ذره به سمت $Pbest_i$ حرکت کند. ضریب $c_2 > 0$ باعث می‌شود که ذره به سمت $Gbest$ حرکت کند. معمولاً $c_1$ و $c_2$ مساوی بوده و به گونه‌ای انتخاب می‌شوند که $c_1 + c_2 \le 4$ باشد.

پس از آنکه بردار سرعت ذرهٔ $i$ اُم به روز شد، این ذره از موقعیت کنونی ( $\vec{x}_i(t)$ ) به موقعیت جدید ( $\vec{x}_i(t+1)$ ) با استفاده از رابطهٔ (۱۳) حرکت می‌کند:

$$\vec{x}_i(t+1) = \vec{x}_i(t) + \vec{v}_i(t+1) \qquad (۱۳)$$

سپس تابع هدف $f$ در موقعیت جدید ذرهٔ $i$ اُم ارزیابی می‌شود. اگر حداقل‌سازی تابع هدف مورد نظر باشد، $Pbest_i$ با توجه به رابطهٔ (۱٤) و $Gbest$ با استفاده از رابطهٔ (۱۵) به روز می‌شوند:

$$Pbest_i(t+1) = \begin{cases} Pbest_i(t) & if\ f(Pbest_i(t)) \le f(\vec{x}_i(t+1)) \\ \vec{x}_i(t+1) & if\ f(Pbest_i(t)) > f(\vec{x}_i(t+1)) \end{cases} \qquad (۱٤)$$

$$Gbest(t+1) \in \{Pbest_1(t+1),\ldots,Pbest_n(t+1)\} \mid f(Gbest(t+1)) = \min\{f(Pbest_1(t+1)),\ldots,f(Pbest_n(t+1))\} \qquad (۱۵)$$

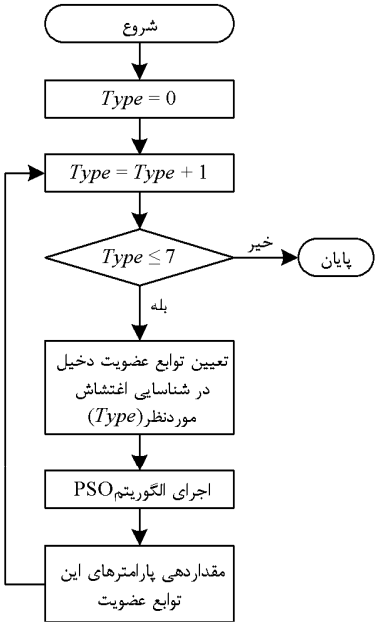
$\vec{v}_i$ در رابطهٔ (۱۲) به بازهٔ $(-v_{\max}, v_{\max})$ محدود می‌شود تا احتمال خروج از فضای جستجو توسط ذره را کم کند. معمولاً $v_{\max}$ بین ۱۰ تا ۲۰ درصد $(x_{\max} - x_{\min})$ انتخاب می‌شود. از طرف دیگر، انتخاب مناسب $w$ باعث تکرار کمتر الگوریتم برای رسیدن به نقطهٔ بهینه می‌شود. در الگوریتم PSO معمولی، ضریب $w$ از مقدار ۰٫۹ تا مقدار ۰٫٤ در طول اجرای الگوریتم و براساس رابطهٔ زیر کاهش می‌یابد:

$$w = w_{\max} - \frac{w_{\max} - w_{\min}}{k_{\max}} \times k \qquad (۱٦)$$

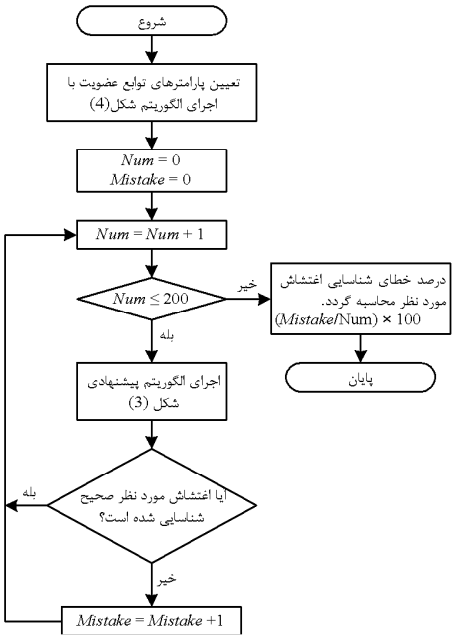
که $k_{max}$ بیشینه شمارهٔ تکرار و $k$ شمارهٔ تکرار کنونی است.

## ٤-۲- به‌کارگیری الگوریتم PSO در سیستم‌های فازی پیشنهادی

برای تعیین دقیق پارامترهای هر یک از توابع عضویت ورودی‌های سیستم‌های فازی پیشنهادی، از الگوریتم PSO استفاده می‌شود. بدین منظور ابتدا باید بازهٔ تغییرات این پارامترها مشخص شود. برای تعیین این بازه‌ها، لازم است بازهٔ تغییرات هر یک از ویژگی‌های معرفی شده در بخش ۲ برای شکل‌موج اغتشاش‌های موردنظر به‌دست آید. سپس با تجزیه و تحلیل بازهٔ این تغییرات، می‌توان بازهٔ تغییرات پارامترهای توابع عضویت هر قاعده از پایگاه قواعد را مشخص کرد. شکل (٤)، نحوهٔ اعمال الگوریتم PSO را برای تعیین پارامترهای توابع عضویت مؤثر در شناسایی هر اغتشاش ساده ($Type$) نشان می‌دهد.




**شکل ٤** چگونگی به‌کارگیری الگوریتم PSO در تعیین پارامترهای توابع عضویت




**شکل ٥** روش محاسبهٔ درصد خطای شناسایی هر اغتشاش براساس الگوریتم Fuzzy-PSO

بدین ترتیب، پس از بهینه‌سازی پارامترهای توابع عضویت، می‌توان از دستیابی به بیشترین دقت در اجرای الگوریتم ارائه شده در شکل (۳) اطمینان داشت.

شکل (٥) نحوهٔ محاسبهٔ درصد خطای شناسایی هر اغتشاش را به ازای ۲۰۰ نمونه از آن اغتشاش در روش پیشنهادی Fuzzy-PSO نشان می‌دهد. این شکل، ترکیبی از شکل‌های (۳) و (٤) است.

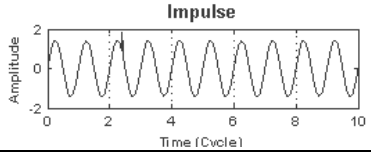
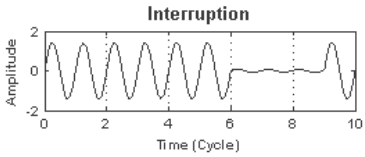
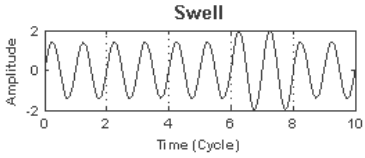
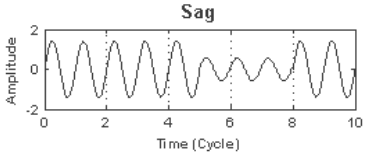
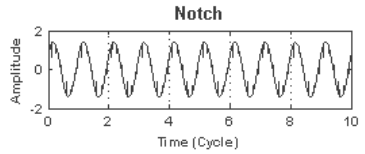
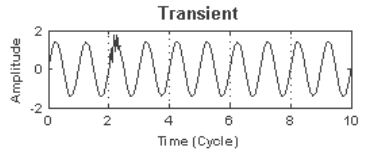
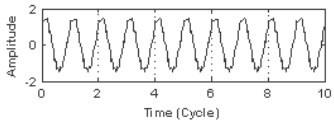
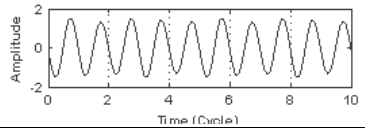
## ٥- نتایج شبیه‌سازی

### ٥-١- اطلاعات اولیه

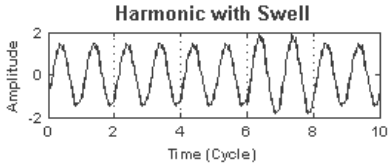
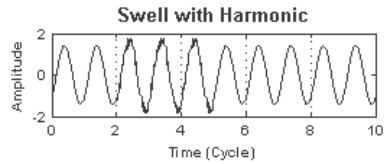
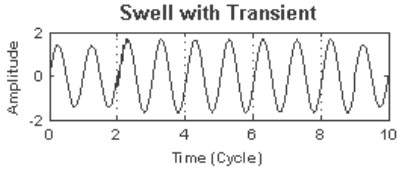
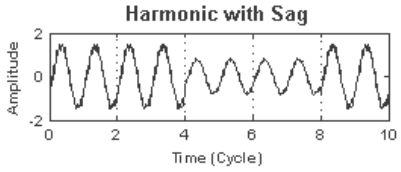
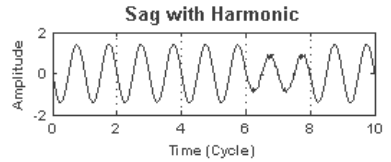
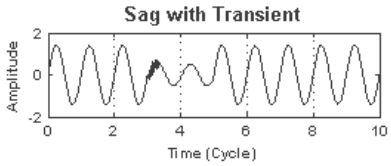
به‌منظور ارزیابی سیستم‌های فازی تشخیص و طبقه‌بندی اغتشاش‌های کیفیت توان، ۲۰۰ نمونه از هر نوع اغتشاش مورد نظر در این مقاله تولید شد. تولید این تعداد اغتشاش، براساس مدل‌های ارائه شده در جدول‌های (٥) و (٦) و با مقداردهی تصادفی پارامترهای کنترلی موجود در این مدل‌ها، با استفاده از نرم‌افزار متلب صورت گرفت. این مدل‌ها، بیانگر روابط ریاضی تطبیق‌یافته با انواع اغتشاش‌های موجود در سیستم‌های توزیع است.

در این مجموعه اغتشاش‌ها، اغتشاش ضربه‌ای گذرا بر اساس مدل ارائه شده در [۱۷] برای موج ضربهٔ ولتاژ ۱۰۰/۱۰۰۰ میکروثانیه تولید شده است. تولید اغتشاش شکاف ولتاژ بر مبنای کارکرد معمولی یکسوساز تمام‌موج سه‌فاز تریستوری صورت گرفته است [۱۸]. در تولید اغتشاش هارمونیک، وجود حداقل سه مؤلفهٔ فرکانسی ضروری در نظر گرفته شده که یکی مؤلفهٔ اصلی و دو مؤلفهٔ دیگر، مؤلفه‌های هارمونیکی است. مقدار مؤثر مؤلفه‌های هارمونیکی و اعوجاج هارمونیکی کل این شکل‌موج بر اساس [۱۹] انتخاب شده است.

**جدول ۵** مدل ریاضی و شکل‌موج اغتشاش‌های سادهٔ کیفیت توان [۱۰] و [۹ ، ۱۹] تا [۱۷]

| نوع اغتشاش | مدل ریاضی | بازهٔ تغییرات پارامترهای کنترلی |
|---|---|---|
| سینوسی ایدئال | $v(t)=\sqrt{۲}\sin(۲\pi\times ۵۰t+\phi)$ | $-\pi\le\varphi\le\pi$ |
| Impulse  | $v(t)=۱.۱۱v_p(e^{-۷.۵\times۱۰^۲(t-T_s)}-e^{-۳.۴۴\times۱۰^۲(t-T_s)})$ $(u(t-T_s)-u(t-T_e))$ | $۰.۲\le v_p\le ۱$ $T\le T_s\le ۷T$ $T_e=T_s+۱m$ sec |
| Interruption  | $v(t)=\sqrt{۳}v_n\sin(۲\pi\times ۵۰t+\phi)[u(t-T_s)-u(t-T_e)]$ | $۰\le v_n\le ۰.۱$ $-\pi/۴\le\phi\le\pi/۴$ $T_s=T,۲T,...,۸T$ $T_e-T_s=T,۲T,...,۹T$ |
| Swell  | $v(t)=\sqrt{۳}v_n\sin(۲\pi\times ۵۰t+\phi)[u(t-T_s)-u(t-T_e)]$ | $۱.۱\le v_n\le ۱.۸$ $-\pi/۴\le\phi\le\pi/۴$ $T_s=T,۲T,...,۸T$ $T_e-T_s=T,۲T,...,۹T$ |
| Sag  | $v(t)=\sqrt{۳}v_n\sin(۲\pi\times ۵۰t+\phi)$ $[u(t-T_s)-u(t-T_e)]$ | $0.1\le v_n\le 0.9$ $-\pi/4\le\varphi\le\pi/4$ $T_s=T,2T,...,8T$ $T_e-T_s=T,2T,...,9T$ |
| Notch  | $v(t)=\begin{cases}\sqrt{۲}[\sin(\omega t+\frac{\pi}{۶})+۰.۵\rho\sin(\omega t+\frac{۵\pi}{۶})] & k=۱,۷\\ \sqrt{۲}[\sin(\omega t+\frac{\pi}{۶})-۰.۵\rho\cos(\omega t)] & k=۳,۹\\ \sqrt{۲}[\sin(\omega t+\frac{\pi}{۶})-\rho\sin(\omega t+\frac{\pi}{۶})] & k=۵,۱۱\\ \sqrt{۲}\sin(\omega t+\frac{\pi}{۶}) & otherwise\end{cases}$ | $\omega=۲\pi\times ۵۰$ , $\rho=۰.۵$ $۰\le\alpha\le\pi/۲$ , $\mu<\alpha$ $\mu=\frac{۳۶۵۰۰\times ۲\pi/۲۰۰۰۰}{\sqrt{۲}\times ۴۶۰\rho\sin(\alpha)}$ $\omega t\in[\alpha+\frac{k\pi}{۶},\alpha+\frac{k\pi}{۶}+\mu]$ |
| Transient  | $v(t)=\sqrt{۲}\sin(۲\pi\times ۵۰t)$ $[۱+\sqrt{۳}v_n e^{-\alpha(t-T_s)}\sin(۲\pi f_n(t-T_s)+\phi)]$ | $۰.۳\le v_n\le ۱$ $۱۵۰\le\alpha\le ۱۰۰۰$ $T_s=T,۲T,...,7T$ $۳۰۰\le f_n\le ۹۰۰$ $۰\le\phi\le ۲\pi$ |
| Harmonic  | $v(t)=\sqrt{۲}[\sin(۲\pi\times ۵۰t+\phi)+...$ $+\alpha_{۲k}\sin(۲\pi(۲k)\times ۵۰t+\phi_{۲k})$ $+\alpha_{۲k+۱}\sin(۲\pi(۲k+۱)\times ۵۰t+\phi_{۲k+۱})+...]$ | $-\pi\le\phi\le\pi$ , THD $\ge ۵\%$ $۰.۰۱۵\le\alpha_{۲k}\le ۰.۰۳$ $۰.۰۳\le\alpha_{۲k+۱}\le ۰.۰۶$ $-\pi\le\phi_{۲k}\le\pi$ $-\pi\le\phi_{۲k+۱}\le\pi$ |
| Flicker  | $v(t)=\sqrt{۲}\sin(۲\pi\times ۵۰t+\phi)[۱+v_n\sin(۲\pi f_n t)]$ | $۰\le\phi\le ۲\pi$ $۰.۰۵\le v_n\le ۰.۱$ $۸\le f_n\le ۲۵$ |

**جدول ٦** مدل ریاضی و شکل‌موج اغتشاش‌های ترکیبی کیفیت توان

| نوع اغتشاش | مدل ریاضی | بازهٔ تغییرات پارامترهای کنترلی |
|---|---|---|
|  | $v(t)=\sqrt{۲}[\sin(۲\pi\times ۵۰t+\phi)+\ldots$<br>$+\alpha_{۲k}\sin(۲\pi(۲k)\times ۵۰t+\phi_{۲k})$<br>$+\alpha_{۲k+۱}\sin(۲\pi(۲k+۱)\times ۵۰t+\phi_{۲k+۱})+\ldots]$<br>$[۱+v_n(u(t-T_s)-u(t-T_e))]$ | $۰.۱\le v_n\le ۰.۸$<br>$T_s=\mathrm{T,۲T,...,۸T}$<br>$T_e-T_s=\mathrm{T,۲T,...,۹T}$<br>$-\pi\le\phi\le\pi$ , $\mathrm{THD}\ge ۵\%$<br>$۰.۰۱۵\le\alpha_{۲k}\le ۰.۰۳$<br>$۰.۰۳\le\alpha_{۲k+۱}\le ۰.۰٦$<br>$-\pi\le\phi_{۲k}\le\pi$<br>$-\pi\le\phi_{۲k+۱}\le\pi$<br>$k=۱,۲,...,۱۰$ |
|  | $v(t)=\sqrt{۲}v_n[\sin(۲\pi\times ۵۰t+\phi)+\ldots$<br>$+\alpha_{۲k}\sin(۲\pi(۲k)\times ۵۰t+\phi_{۲k})$<br>$+\alpha_{۲k+۱}\sin(۲\pi(۲k+۱)\times ۵۰t+\phi_{۲k+۱})+\ldots]$<br>$[u(t-T_s)-u(t-T_e)]$ | $۱.۱\le v_n\le ۱.۸$<br>$T_s=\mathrm{T,2T,...,8T}$<br>$T_e-T_s=\mathrm{T,2T,...,9T}$<br>$-\pi\le\phi\le\pi$ , $\mathrm{THD}\ge ۵\%$<br>$۰.۰۱۵\le\alpha_{۲k}\le ۰.۰۳$<br>$۰.۰۳\le\alpha_{۲k+۱}\le ۰.۰٦$<br>$-\pi\le\phi_{۲k}\le\pi$<br>$-\pi\le\phi_{۲k+۱}\le\pi$<br>$k=۱,۲,...,۱۰$ |
|  | $v(t)=\sqrt{۲}\sin(۲\pi\times ۵۰t)$<br>$[\sqrt{۲}v_{nt}e^{-\alpha(t-T_{st})}\sin(۲\pi f_n(t-T_{st})+\phi_t)$<br>$+\sqrt{۲}v_{ns}\sin(۲\pi\times ۵۰t+\phi_s)$<br>$[u(t-T_{ss})-u(t-T_{es})]$ | $۰.۳\le v_{nt}\le ۱$ , $۱.۱\le v_{ns}\le ۱.۸$<br>$۰\le\phi_t\le ۲\pi$ , $-\pi/٤\le\phi_s\le\pi/٤$<br>$۱۵۰\le\alpha\le ۱۰۰۰$<br>$T_{ss}=\mathrm{T,۲T,...,۸T}$<br>$T_{es}-T_{ss}=\mathrm{T,۲T,...,۹T}$<br>$T_{st}=\mathrm{T,۲T,...,}(T_{es}-T_{ss})-T$<br>$۳۰۰\le f_n\le ۹۰۰$ |
|  | $v(t)=\sqrt{۲}[\sin(۲\pi\times ۵۰t+\phi)+\ldots$<br>$+\alpha_{۲k}\sin(۲\pi(۲k)\times ۵۰t+\phi_{۲k})$<br>$+\alpha_{۲k+۱}\sin(۲\pi(۲k+۱)\times ۵۰t+\phi_{۲k+۱})+\ldots]$<br>$[۱-v_n(u(t-T_s)-u(t-T_e))]$ | $۰.۱\le v_n\le ۰.۹$<br>$T_s=\mathrm{T,۲T,...,۸T}$<br>$T_e-T_s=\mathrm{T,۲T,...,۹T}$<br>$-\pi\le\phi\le\pi$ , $\mathrm{THD}\ge ۵\%$<br>$۰.۰۱۵\le\alpha_{۲k}\le ۰.۰۳$<br>$۰.۰۳\le\alpha_{۲k+۱}\le ۰.۰٦$<br>$-\pi\le\phi_{۲k}\le\pi$<br>$-\pi\le\phi_{۲k+۱}\le\pi$<br>$k=۱,۲,...,۱۰$ |
|  | $v(t)=\sqrt{۲}v_n[\sin(۲\pi\times ۵۰t+\phi)+\ldots$<br>$+\alpha_{۲k}\sin(۲\pi(۲k)\times ۵۰t+\phi_{۲k})$<br>$+\alpha_{۲k+۱}\sin(۲\pi(۲k+۱)\times ۵۰t+\phi_{۲k+۱})+\ldots]$<br>$[u(t-T_s)-u(t-T_e)]$ | $۰.۱\le v_n\le ۰.۹$<br>$T_s=\mathrm{T,۲T,...,8T}$<br>$T_e-T_s=\mathrm{T,۲T,...,9T}$<br>$-\pi\le\phi\le\pi$ , $\mathrm{THD}\ge ۵\%$<br>$۰.۰۱۵\le\alpha_{۲k}\le ۰.۰۳$<br>$۰.۰۳\le\alpha_{۲k+۱}\le ۰.۰٦$<br>$-\pi\le\phi_{۲k}\le\pi$<br>$-\pi\le\phi_{۲k+۱}\le\pi$<br>$k=۱,۲,...,۱۰$ |
|  | $v(t)=\sqrt{۲}\sin(۲\pi\times ۵۰t)$<br>$[\sqrt{۲}v_{nt}e^{-\alpha(t-T_{st})}\sin(۲\pi f_n(t-T_{st})+\phi_t)$<br>$+\sqrt{۲}v_{ns}\sin(۲\pi\times ۵۰t+\phi_s)$<br>$[u(t-T_{ss})-u(t-T_{es})]$ | $۰.۳\le v_{nt}\le ۱$ , $۰/۱\le v_{ns}\le ۰/۹$<br>$۰\le\phi_t\le ۲\pi$ , $-\pi/٤\le\phi_s\le\pi/٤$<br>$۱۵۰\le\alpha\le ۱۰۰۰$<br>$T_{ss}=\mathrm{T,۲T,...,۸T}$<br>$T_{es}-T_{ss}=\mathrm{T,2T,...,9T}$<br>$T_{st}=\mathrm{T,۲T,...,}(T_{es}-T_{ss})-T$<br>$۳۰۰\le f_n\le ۹۰۰$ |

### ۵-۲- تشخیص و طبقه‌بندی اغتشاش‌های ساده

با اجرای روش پیشنهادی بخش ٤-۲، درصد موارد تشخیص درست برای هر نوع اغتشاش ساده تعیین می‌شود. جدول (۷)، نتایج حاصل را نشان می‌دهد.

در جدول (۷) می‌توان دید که الگوریتم پیشنهادی تمامی اغتشاش‌های سادهٔ موردنظر را به‌جز اغتشاش‌های شکاف ولتاژ و هارمونیک با خطای صفر درصد شناسایی می‌کند. خطای تشخیص اغتشاش‌های شکاف ولتاژ و هارمونیک به‌ترتیب برابر ٤ و ۳ درصد است که دلیل آن در ادامه آورده می‌شود.

**جدول ۷** نتایج طبقه‌بندی اغتشاش‌های سادهٔ کیفیت توان با استفاده از الگوریتم پیشنهادی

| نوع اغتشاش کیفیت توان | تعداد آزمایش | تعداد موارد درست تشخیص داده شده | تعداد موارد نادرست تشخیص داده شده | درصد موارد درست تشخیص داده شده |
|---|---|---|---|---|
| ضربه‌ای‌گذرا | ۲۰۰ | ۲۰۰ | ۰ | ۱۰۰ |
| قطعی | ۲۰۰ | ۲۰۰ | ۰ | ۱۰۰ |
| بیشبود ولتاژ | ۲۰۰ | ۲۰۰ | ۰ | ۱۰۰ |
| کمبود ولتاژ | ۲۰۰ | ۲۰۰ | ۰ | ۱۰۰ |
| شکاف ولتاژ | ۲۰۰ | ۱۹۲ | ۸ | ۹٦ |
| نوسانی‌گذرا | ۲۰۰ | ۲۰۰ | ۰ | ۱۰۰ |
| هارمونیک | ۲۰۰ | ۱۹٤ | ٦ | ۹۷ |
| نوسان ولتاژ | ۲۰۰ | ۲۰۰ | ۰ | ۱۰۰ |
| **مجموع** | **۱٦۰۰** | **۱۵۸٦** | **۱٤** | **≈ ۹۹** |

همان‌گونه که پیشتر گفته شد، اغتشاش شکاف ولتاژ بر مبنای کارکرد معمولی یکسوساز تمام‌موج سه‌فاز تریستوری تولید شده است. این نوع یکسوساز علاوه بر شکاف ولتاژ، می‌تواند موجب بروز اغتشاش‌های دیگری مانند هارمونیک نیز بشوند. بنابراین سیستم فازی طبقه‌بندی اغتشاش‌ها ممکن است در برخی موارد، شکل‌موج حاوی این نوع اغتشاش را، دارای اغتشاش هارمونیک نیز معرفی کند. عکس این موضوع نیز می‌تواند رخ دهد؛ یعنی در بعضی موارد، سیستم فازی طبقه‌بندی اغتشاش‌ها، شکل‌موج حاوی اغتشاش هارمونیک را، علاوه بر این اغتشاش، دارای اغتشاش شکاف ولتاژ نیز در نظر بگیرد. وجود چنین خطاهایی، نزدیک بودن ویژگی‌های شکل‌موج این دو نوع اغتشاش را نشان می‌دهد.

### ۵-۳- تشخیص و طبقه‌بندی اغتشاش‌های ترکیبی

به‌منظور تعیین درصد موارد تشخیص درست برای هر نوع اغتشاش ترکیبی نیز، روش پیشنهادی ارائه شده در بخش ٤-۲ اجرا شد. جدول (۸)، نتایج حاصل را نشان می‌دهد.

**جدول ۸** نتایج طبقه‌بندی اغتشاش‌های ترکیبی کیفیت توان با استفاده از الگوریتم پیشنهادی

| نوع اغتشاش کیفیت توان | تعداد آزمایش | تعداد موارد درست تشخیص داده شده | تعداد موارد نادرست تشخیص داده شده | درصد موارد درست تشخیص داده شده |
|---|---|---|---|---|
| هارمونیک با بیشبود | ۲۰۰ | ۱۹٤ | ٦ | ۹۷ |
| بیشبود با هارمونیک | ۲۰۰ | ۲۰۰ | ۰ | ۱۰۰ |
| بیشبود با نوسانی‌گذرا | ۲۰۰ | ۲۰۰ | ۰ | ۱۰۰ |
| هارمونیک با کمبود | ۲۰۰ | ۱۹۰ | ۱۰ | ۹۵ |
| کمبود با هارمونیک | ۲۰۰ | ۲۰۰ | ۰ | ۱۰۰ |
| کمبود با نوسانی‌گذرا | ۲۰۰ | ۲۰۰ | ۰ | ۱۰۰ |
| **مجموع** | **۱۲۰۰** | **۱۱۸٤** | **۱٦** | **≈ ۹۹** |

در ایـن جـدول، مـوارد تـشخیص نادرسـت، بـرای اغتشاش‌های ترکیبی هارمونیک با بیشبود و هارمونیـک بـا کمبود، ناشی از خطای سیستم فازی طبقه‌بندی اغتشاش‌ها در شناسایی اغتشاش هارمونیـک اسـت. علـت تـشخیص نادرست آن است که این سیستم در برخـی مـوارد ممکـن است، سیکل‌هایی از این نـوع شـکل‌مـوج‌هـا را کـه فقـط حاوی اغتشاش هارمونیک هستند، دارای اغتشاش شـکاف ولتاژ نیز معرفی کند. اما در سیکل‌هایی که حـاوی هـر دو نوع اغتشاش هارمونیک و بیشبود یا هارمونیـک و کمبـود هستند، این تشخیص نادرست رخ نمی‌دهد. زیـرا ویژگـی مؤلفهٔ اصـلی چنـین سـیکل‌هـایی، در بـازهٔ تغییـرات ایـن ویژگـی بـرای شـکل‌مـوج اغتـشاش شـکاف ولتـاژ قـرار نمی‌گیرد. به همین دلیل تعداد مـوارد تـشخیص نادرسـت برای اغتشاش‌های ترکیبی بیشبود با هارمونیک و کمبود با هارمونیک، در جدول (۸) برابر صفر است.

در جدول (۸) دیده می‌شود که درصد موارد تـشخیص درست برای اغتشاش‌های ترکیبی بیشبود با نوسانی‌گذرا و کمبود با نوسانی‌گذرا، برابر ۱۰۰ درصد اسـت. ایـن قابـل پیش‌بینی بود زیرا سیستم فازی راهنمایی شده با الگـوریتم PSO بـرای طبقـه‌بنـدی اغتـشاش‌هـا، در شناسـایی اغتـشاش‌هـای سـادهٔ بیـشبود، کمبـود و نوسـانی گـذرا خطایی نداشت.

## ٦- نتیجه‌گیری

در این مقاله، با استخراج ویژگی‌هایی بر پایـهٔ تبـدیل‌هـای فوریه و موجک از روی شکل‌موج اغتشاش‌هـای سـاده و ترکیبی کیفیـت تـوان، الگـوریتمی بـه‌منظـور تـشخیص و طبقه‌بندی این اغتشاش‌ها پیشنهاد شـد. ایـن الگـوریتم بـا بهـره‌گیـری از مـشارکت دو سیـستم فـازی تـشخیص و طبقـه‌بنـدی اغتـشاش‌هـا مـی‌توانـد گـسترهٔ وسـیعی از اغتشاش‌های ساده و ترکیبی کیفیت توان را شناسایی کنـد. پارامترهای هر یک از توابع عضویت سیستم‌های فازی نیز بـا اسـتفاده از الگـوریتم PSO مقـداردهی شـد. نتـایج شبیه‌سازی نشان داد که روش ارائه شده، توانـایی و دقـت بالایی در تشخیص و طبقه‌بندی صحیح انواع اغتشاش‌های کیفیت توان دارد. محاسبات کم و دقت بالا در طبقه‌بنـدی اغتشاش‌هـای کیفیـت تـوان، اسـتفاده از ایـن روش را در کاربردهای عملی، امکان پذیر می‌سازد.

## ۷- منابع


[1] Andami H., Jalilian A., "Voltage Notch Detection Using Fuzzy Expert System", IEEE Canadian Conf. on Electrical and Computer Engineering, Vol. 1, 2003, pp. 479-482.

[2] IEEE recommended practice for monitoring electric power quality, IEEE std. 1159-2009, 2009.

[3] Kezunovic M., Liao Y., "A Novel Software Implementation Concept for Power Quality Study", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 17, No. 2, 2002, pp. 544-549.

[4] Liao Y., Lee J. B., "A Fuzzy-expert System for Classifying Power Quality Disturbances", Int. Jour. Elec. Power & Energy System, Vol. 26, No. 3, 2004, pp. 199-205.

[5] Thapar A., Saha T. K., Dong Z. Y., "Investigation of Power Quality Categorization and Simulating Its Impact

on Sensitive Electronic Equipment", Power Engineering Society General Meeting, Vol. 1, 6-10 Jun. 2004, pp. 528-533.

[6] Bizjak B., Planinsic P., "Classification of Power Disturbances Using Fuzzy Logic", Int. Conf. on Power Electronics and Motion Control, Aug. 30-Sept. 1 2006, pp. 1356-1360.

[7] Hu G. S., Xie J., Zhu F. F., "Classification of Power Quality Disturbances Using Wavelet and Fuzzy Support Vector Machines", Int. Conf. on Machine Learning and Cybernetics, Vol. 7, 18-21 Aug. 2005, pp. 3981-3984.

[8] Kaewarsa S., Attakitmongcol K., Kulworawanichpong T., "Recognition of Power Quality Events by Using Multiwavelet-based Neural Networks", Int. Jour. Elec. Power & Energy System, Vol. 30, No. 4, 2008, pp. 254-260.

[9] Galil T. K. A., Kamel M., Youssef A. M., Saadany E. F. El., Salama M. M. A., "Power Quality Disturbance Classification Using the Inductive Inference Approach", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 19, No. 4, 2004, pp. 1812-1818.

[10] Galil T. K. A., Youssef A. M., Saadany E. F. El., Salama M. M. A., "Disturbance Classification Using Hidden Markov Models and Vector Quantization", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 20, No. 3, 2005, pp. 2129-2135.

[11] Uyar M., Yildirim S., Gencoglu M. T., "An Effective Wavelet-based Feature Extraction Method for Classification of Power Quality Disturbance Signals", Int. Jour. Elec. Power System Research, Vol. 78, No. 10, 2008, pp. 1747-1755.

[12] Gargoom A. M., Ertugrul N., Soong W. L., "Automatic Classification and Characterization of Power Quality Events", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 23, No. 4, 2008, pp. 2417-2425.

[13] Panigrahi B. K., Pandi V. R., "Optimal Feature Selection for Classification of Power Quality Disturbances Using Wavelet Packet-based Fuzzy k-nearest Neighbor Algorithm", IET Power Gener. Transm. & Distrib., Vol. 3, No. 3, 2009, pp. 296-306.

[14] Sivanandam S. N., Sumathi S., Deepa S. N., *Introduction to Fuzzy Logic Using Matlab*, Springer 2006.

[15] MathWorks, Inc., "Matlab Help Files", Version 7.6.0.324, Feb. 2008.

[16] Kennedy J., Eberhart R. C., "Particle Swarm Optimization", IEEE Int. Conf. on Neural Networks, Vol. 4, 1995, pp. 1942-1948.

[17] Naidu M. S., Kamaraju V., *High Voltage Engineering*, McGraw Hill 1999.

[18] Ghandehari R., Shoulaie A., Habibinia

D., "The Problems of Voltage Notch Phenomena in Power AC/DC Converters", Universities Power Engineering Conf. (UPEC'07), 2007, pp. 992-996.

[19] IEC 61000-2 Report, Electromagnetic Compatibility (EMC), sections 2 and 4, 2002.