

# آشکار سازی و تمایز عیوب داخلی ترانسفورماتورهای قدرت از روی نتایج آنالیز گازهای محلول در روغن ترانسفورماتور با استفاده از روش منطق فازی

مسعود نوری

دفتر پشتیبانی فنی و نظارت بر تولید

شرکت مادر تخصصی تولید نیروی برق حرارتی

تهران، ایران

پیمان حاجی حسینی و رضا عفت نژاد

دانشکده فنی و مهندسی

دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات البرز

کرج، ایران

عیوب استفاده شده است. همچنین در سایر مقالات، تلاشی برای تشخیص عیب تجزیه شدن کاغذ عایقی ترانسفورماتور در کنار سایر عیوب الکتریکی و حرارتی صورت نگرفته است. اما سیستم استنتاج فازی ارائه شده در این مقاله، قادر به تشخیص این عیب نیز می باشد.

واژه‌های کلیدی — عیوب داخلی<sup>۶</sup>، پایش وضعیت<sup>۷</sup>، گازکروماتوگرافی<sup>۸</sup>، منطق فازی.

چکیده — یکی از مهمترین ابزار پایش وضعیت ترانسفورماتورهای قدرت، انجام آزمایش گازکروماتوگرافی روغن آن و آنالیز گازهای محلول در روغن (DGA<sup>۱</sup>) است. در این مقاله، یک سیستم استنتاج فازی (FIS<sup>۲</sup>) جهت آشکار سازی<sup>۳</sup> و تمایز<sup>۴</sup> عیوب داخلی ترانسفورماتور قدرت بر پایه نتایج آزمایش گازکروماتوگرافی روغن آن مطابق با IEC<sup>۵</sup> 60599 guidelines معرفی شده است. جهت اعتبار سنجی صحت عملکرد این سیستم، نتایج آزمایش گازکروماتوگرافی روغن بیش از ۳۰۰۰ ترانسفورماتور قدرت موجود در شبکه برق ایران مطالعه و نتایج مربوط به ترانسفورماتورهای مشکوک به داشتن عیب داخلی که دمونتاژ گردیده، جداسازی و با نتایج به دست آمده از سیستم مذکور مقایسه و نهایتاً میزان دقت و صحت عملکرد این سیستم، ۹۲.۱٪ به دست آمده که عدد مناسبی جهت اعتماد به عملکرد آن در تشخیص عیوب داخلی ترانسفورماتورهای قدرت در آینده است. در بیشتر مقالات منتشره در خصوص موضوع این مقاله، بر اساس یک یا دو مورد از موارد ذیل، تشخیص و تمایز عیوب صورت گرفته است: مقادیر مطلق گازهای آزاد و محلول در روغن، مجموع گازهای قابل اشتعال محلول در روغن، مجموع گازهای قابل اشتعال روغن، نسبت برخی از گازها به یکدیگر و رشد گازها. اما در این مقاله از بیشتر این مقادیر جهت تشخیص و تمایز

## ۱. مقدمه

ترانسفورماتورهای قدرت، از مهمترین و گران ترین تجهیزات شبکه های برق می باشند. با توجه به اهمیت این تجهیزات، مراقبت از آن امری حساس و حیاتی می باشد. در چند دهه قبل نحوه مراقبت از این تجهیز، به صورت منظم و دوره ای و همراه با خروج آن از مدار بوده است. اما از دو دهه قبل به این طرف، مراقبت از این تجهیز، در قالب پایش وضعیت ترانسفورماتور در مدار بوده است. در این راستا، آزمایش های گوناگونی به صورت on-line بر روی ترانسفورماتور انجام می شود که ابزاری جهت پایش وضعیت آن می باشد [۱]. یکی از این آزمایش ها، آزمایش شیمیایی گازکروماتوگرافی روغن ترانسفورماتور است. در این آزمایش، از روغن ترانسفورماتور در چند نوبت نمونه گیری شده و مقادیر گازهای محلول در آن اندازه گیری می شود. بر اساس تفسیری که کارشناس خبره از این مقادیر

<sup>1</sup> Dissolved Gas Analysis

<sup>2</sup> Fuzzy Inference System

<sup>3</sup> Detection

<sup>4</sup> Isolation

<sup>5</sup> International Electrotechnical Commission

<sup>6</sup> Internal Faults

<sup>7</sup> Condition Monitoring

<sup>8</sup> Gas Chromatography

ارائه می دهد ، عیب داخلی ترانسفورماتور مشخص می گردد. روش های رایج در تفسیر مقادیر گازها عبارت است از : دورنبرگ<sup>۱</sup> ، راجرز<sup>۲</sup> ، گازهای گازهای کلیدی<sup>۳</sup> ، مثلث دوال<sup>۴</sup> ، روش امتیازدهی<sup>۵</sup> ، استاندارد IEEE<sup>۶</sup> C57.104 و IEC 60599 guidelines. در این مقاله از IEC 60599 guidelines استفاده شده است. مقادیری که در این روش ها معمولاً به یک یا دو مورد از آن توجه می شود ، عبارت است از : مقادیر مطلق گازهای آزاد و محلول در روغن<sup>۷</sup> ، مجموع گازهای قابل اشتعال محلول در روغن<sup>۸</sup> [۲] ، مجموع گازهای قابل اشتعال روغن<sup>۹</sup> [۲] ، نسبت<sup>۱۰</sup> برخی از گازها به یکدیگر یکدیگر و رشد گازها<sup>۱۱</sup> . یکی از محاسن این مقاله نسبت به مقالات مشابه این است که مطابق با IEC 60599 guidelines ، از بیشتر این مقادیر ، استفاده شده است. مزیت سیستم های هوشمند<sup>۱۲</sup> این است که جایگزینی مناسب برای کارشناس خبره جهت تفسیر مقادیر گازها و تشخیص عیوب هستند. یکی از مهمترین معایب در روش های مبتنی بر کارشناس خبره ، این است که تشخیص کارشناس خبره با احتمال خطا همراه است. همچنین تعداد کارشناسان خبره کم بوده و اغلب در دسترس نمی باشند [۳]. در برخی از مقالات ، دقت روش های سنتی تشخیص عیوب داخلی ترانسفورماتور قدرت با روش های استفاده از سیستم های هوشمند مقایسه گردیده که در اغلب موارد دقت آن پایین تر یا بسیار پایین تر از روش های هوشمند بوده است [۴-۸]. یکی دیگر از مزایای این مقاله نسبت به مقالات مشابه ، امکان تشخیص عیب تجزیه کاغذ عایقی ترانسفورماتور در کنار سایر عیوب حرارتی و الکتریکی است. بیشتر مقالات مشابه از نظر در اختیار داشتن تعداد و تنوع داده های تجربی ضعیف هستند [۹ و ۱۰]. اما در این مقاله برای تشخیص میزان صحت عملکرد سیستم استنتاج فازی طراحی شده ، نتایج آزمایش های گاز کروماتوگرافی انجام شده از سال ۱۳۷۹ تا سال ۱۳۹۴ بر روی روغن بیش از ۳۰۰۰ ترانسفورماتور قدرت موجود در شبکه برق سراسری ایران مورد مطالعه قرار گرفته است. از این جامعه آماری ، نتایج آزمایش های گاز کروماتوگرافی مربوط به روغن ۱۸۵ دستگاه ترانسفورماتور قدرت مشکوک به داشتن عیب داخلی انتخاب شده است. از این تعداد ، ۱۵۷ دستگاه ترانسفورماتور قدرت افزایش یافته و کاهنده نصب شده در پست

<sup>1</sup> Durnenburg

<sup>2</sup> Rogers

<sup>3</sup> Key Gas

<sup>4</sup> Duval Triangle

<sup>5</sup> Scoring System

<sup>6</sup> Institute of Electrical and Electronics Engineers

<sup>7</sup> Absolute Concentrations of Free and Dissolved Gases

<sup>8</sup> Total Dissolved Combustible Gases (TDCG)

<sup>9</sup> Total Combustible Gases (TCG)

<sup>10</sup> Ratio

<sup>11</sup> Rate of Gas Increase

<sup>12</sup> Intelligent Systems

های انتقال ۴۰۰Kv ، ۲۳۰Kv ، ۱۳۲Kv و ۶۳Kv در سراسر کشور ، ۲۶ دستگاه ترانسفورماتور قدرت اصلی افزایش یافته<sup>۱۳</sup> و مصرف داخلی کاهنده<sup>۱۴</sup> نصب شده در برخی از نیروگاه های حرارتی مانند نیروگاه رامین اهواز، فردوسی مشهد، خلیج فارس ، منجیل ، پرند ، شازند اراک ، لوشان و زرنند کرمان و ۲ دستگاه ترانسفورماتور قدرت افزایش یافته نصب شده در نیروگاه آبی شهید عباسپور و مسجد سلیمان خوزستان می باشد. همچنین تعداد ۱۶۲ دستگاه ترانسفورماتور از این مجموعه ، دارای یکی از عیوب الکتریکی یا حرارتی یا شیمیایی و یا ترکیبی از این عیوب بوده و تحت پایش وضعیت قرار گرفته و با تشخیص عیب آن ، ترانسفورماتور از مدار خارج و تحت تعمیر قرار گرفته است. همچنین تعداد ۲۳ دستگاه ترانسفورماتور مابقی ، فاقد هرگونه عیبی بوده و کاملاً سالم در مدار قرار دارد. لازم به ذکر است موفقیت عملکرد یک FIS به کیفیت قوانین فازی تعریف شده برای آن از لحاظ دقت و جامعیت بستگی دارد [۱۱]. یکی از ویژگی های این تحقیق ، تدوین ۲۲۱ قانون فازی است که به دقت کلیه شرایط مندرج در جداول و شکل های IEC 60599 guidelines را پوشش می دهد.

در ادامه در بخش اول ، آزمایش گاز کروماتوگرافی توضیح داده شده است. در بخش دوم ، جداول و معیارهای مورد استفاده در IEC60599 guidelines و نحوه تشخیص و تمایز عیوب داخلی ترانسفورماتور قدرت بر اساس آن، توضیح داده شده است. در بخش سوم، مشخصات FIS طراحی شده به همراه مثال، توضیح داده شده است. در بخش چهارم، داده های تجربی و نتایج مورد استفاده در این مقاله به طور دقیق معرفی شده است. در بخش پنجم، ماتریس به هم ریختگی<sup>۱۵</sup> و معیار FI<sup>۱۶</sup> معرفی شده است. با این دو معیار ، درجه دقت و صحت<sup>۱۷</sup> عملکرد سیستم استنتاج فازی طراحی شده محاسبه شده است. در بخش ششم ، نتیجه گیری شده و پیشنهادهایی نیز ارائه شده است.

## ۲. آزمایش گاز کروماتوگرافی

روغن ترانسفورماتور ، معمولاً از نوع روغن های معدنی بوده و یک عایق الکتریکی است . این سیال ، نقش انتقال حرارت و خنک کنندگی را نیز بر عهده دارد [۱۲ و ۱۳]. هنگامی که عیب الکتریکی یا عیب حرارتی در ترانسفورماتور ایجاد می شود ، مولکول های روغن مجاور محل عیب ، تجزیه شده و در نتیجه گازهایی از آن متصاعد می شود [۱۴]. برخی از این

<sup>13</sup> Step-up Main Transformer

<sup>14</sup> Step-down Auxiliary Transformer

<sup>15</sup> Confusion Matrix

<sup>16</sup> FI Score

<sup>17</sup> Degree of Accuracy

## ۸ ترکیبی از عیوب تخلیه الکتریکی و نقطه داغ<sup>۸</sup>

در این مقاله از IEC 60599 guidelines جهت تفسیر مقادیر گازها استفاده شده که بخش بعدی اختصاص به تشریح آن دارد.

## ۳. IEC 60599 guidelines

این روش شامل گام های زیر می باشد :

گام اول : اگر مقدار مطلق فقط یکی از گازهای محلول در روغن بالاتر از مقادیر نرمال مندرج در جدول ۱ باشد و هم زمان نرخ رشد سالانه همان گاز از مقادیر نرمال مندرج در جدول ۲ تجاوز نماید ، یعنی ترانسفورماتور معیوب است. و آلا وضعیت ترانسفورماتور نرمال ارزیابی می گردد.

گام دوم : پس از تشخیص معیوب بودن ترانسفورماتور ، برای تشخیص نوع عیب آن ، ابتدا بایستی به جدول ۳ رجوع و عیب را یافت. در این جدول ، بایستی هر سه شرط مندرج در ستون های جدول برای نسبت گازهای ذکر شده برقرار باشد تا عیب متناظر با آن ، مشخص شود. به بیان دیگر شرط ها با یکدیگر AND می شود.

گام سوم : در صورتی که از طریق جدول ۳ ، نوع عیب مشخص نشد ، بایستی به مستطیل های گرافیکی یا مکعبات گرافیکی<sup>۹</sup> شکل ۱ رجوع و عیب را یافت.

گام چهارم : در پایان ، در صورتی که تشخیص عیب با مراجعه به مستطیل های گرافیکی یا مکعبات گرافیکی شکل ۱ نیز محقق نشد ، بایستی به مثلث دوال شکل ۲ رجوع کرد که حتماً نوع عیب در این مثلث ، مشخص خواهد شد. محدوده های عیوب داخل مثلث دوال در جدول ۴ ذکر شده است.

جدول ۱: محدوده های نرمال مقادیر مطلق گازهای محلول در روغن ترانسفورماتور

میکرو لیتر به لیتر (μl/l یا ppm) [۱۶]

	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	CO	CO <sub>2</sub>
All Transformers		50-150	30-130	60-280	20-90	400-600	3800-14000
NO OLTC	2-20						
Communicating OLTC	60-280						

گازها به صورت محلول در روغن درآمده و برخی دیگر به صورت آزاد در می آید. در این آزمایش ، ابتدا بایستی به صورت استاندارد ، از روغن ترانسفورماتور قدرت نمونه گیری شود. سپس با رعایت استانداردهای حمل و نقل ، نمونه ها به آزمایشگاه منتقل گردد. سپس با دستگاه گازکروماتوگراف ، گازها جداسازی شده و مقادیر گازهای آزاد و محلول در روغن اندازه گیری و ثبت شود [۱۵]. پس از آن مطابق با وضعیت ترانسفورماتور ، چندین بار نمونه گیری در دوره های مناسب زمانی تکرار و نتایج ثبت گردد. در مرحله بعد بر اساس یکی از روش های رایج ، مقادیر گازها توسط کارشناس خبره تحلیل و وضعیت سلامت ترانسفورماتور بررسی گردد. اگر ترانسفورماتور معیوب تشخیص داده شد ، نوع عیب داخلی آن هم مشخص می گردد. گازهای شاخص متصاعد شده در اثر عیوب داخلی ترانسفورماتور عبارت است از : دی اکسید کربن (CO<sub>2</sub>) ، مونو کسید کربن (CO) ، هیدروژن (H<sub>2</sub>) ، متان (CH<sub>4</sub>) ، استیلن (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>) ، اتیلن (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>) و اتان (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>) . همه این گازها غیر از دی اکسید کربن قابل اشتعال هستند. روش های متعددی وجود دارد که با بررسی مقادیر مطلق گازهای آزاد و محلول در روغن ، مجموع گازهای قابل اشتعال محلول در روغن ، مجموع گازهای قابل اشتعال روغن ، نسبت برخی از گازها به یکدیگر و رشد گازها می تواند به عیب درون ترانسفورماتور رهنمون شود. عیوبی که از این طریق می توان کشف نمود ، عبارت است از :

۱. تجزیه مولکولی و تخریب تدریجی کاغذ ترانسفورماتور<sup>۱</sup>
۲. تخلیه جزئی<sup>۲</sup>
۳. تخلیه الکتریکی با انرژی پایین<sup>۳</sup>
۴. تخلیه الکتریکی با انرژی بالا<sup>۴</sup>
۵. عیب حرارتی یا نقطه داغ با دمای کمتر از 300°C<sup>۵</sup>
۶. عیب حرارتی یا نقطه داغ با دمای بین 300°C و 700°C<sup>۶</sup>
۷. عیب حرارتی یا نقطه داغ با دمای بیشتر از 700°C<sup>۷</sup>

<sup>1</sup> Paper Decomposition (P)

<sup>2</sup> Partial Discharge (PD)

<sup>3</sup> Discharges of low energy (D1)

<sup>4</sup> Discharges of high energy (D2)

<sup>5</sup> Thermal fault <300°C (T1)

<sup>6</sup> 300°C < Thermal fault <700°C (T2)

<sup>7</sup> Thermal fault >700°C (T3)

<sup>8</sup> Discharges and Thermal (DT)

<sup>9</sup> graphical rectangles or cubes

جدول ۴: محدوده های عیوب داخل مثلث دوال [۱۶]

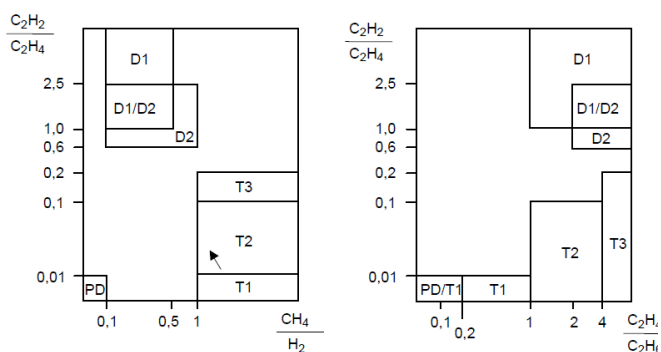
Limits of zones				
PD	98 % CH <sub>4</sub>			
D1	23% C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	13% C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>		
D2	23% C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	13% C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	40% C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	29% C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>
T1	4 % C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	20% C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>		
T2	4 % C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	20% C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	50% C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	
T3	15% C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	50% C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>		

جدول ۲: محدوده های نرمال رشد سالانه گازهای محلول در روغن

ترانسفورماتور (μl/year یا ppm<sup>۱</sup>/year) [۱۶]

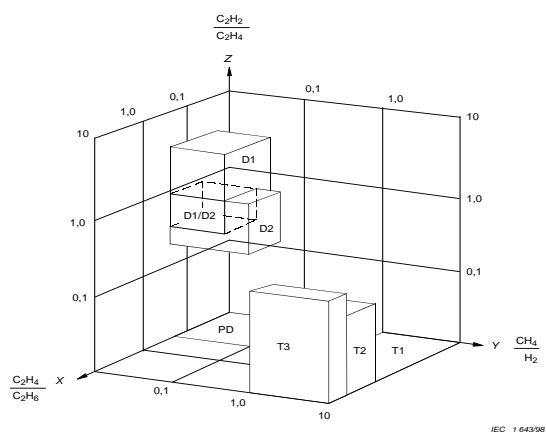
	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	CO	CO <sub>2</sub>
All Transformers		35-132	10-120	32-146	5-90	260-1060	1700-10000
NO OLTC	0-4						
Communicating OLTC	21-37						

جدول ۳: نحوه تشخیص عیب ترانسفورماتور در گام اول [۱۶]



شکل ۱: نحوه تشخیص عیب ترانسفورماتور در گام سوم: الف) مستطیل

های گرافیکی، ب) مکعبات گرافیکی [۱۶]



NOTE 1 The arrow indicates increasing temperature.

NOTE 2 The axes are limited to values of 10 for clarification of presentation, but actually extend to unlimited values.

NOTE 3 Each of the cases defined in Table 3 is represented by a volume or "box" on the 3-D graphic.

NOTE 4 The coordinates of each box are the same as in Table 3. It is more convenient to use this representation with the help of a computer software package.

Case	Characteristic fault	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	CH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>
PD	Partial discharges (see notes 3 and 4)	NS <sup>a</sup>	<0.1	<0.2
D1	Discharges of low energy	>1	0.1 – 0.5	>1
D2	Discharges of high energy	0.6 – 2.5	0.1 – 1	>2
T1	Thermal fault t < 300 °C	NS <sup>a</sup>	>1 but NS <sup>a</sup>	<1
T2	Thermal fault 300 °C < t < 700 °C	<0.1	>1	1 – 4
T3	Thermal fault t > 700 °C	<0.2 <sup>b</sup>	>1	>4

NOTE 1 In some countries, the ratio C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>/C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> is used, rather than the ratio CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>. Also in some countries, slightly different ratio limits are used.

NOTE 2 CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub> < 0.2 for partial discharges in instrument transformers. CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub> < 0.07 for partial discharges in bushings.

NOTE 3 Gas decomposition patterns similar to partial discharges have been reported as a result of stray gassing of oil.

NOTE 4 Gas decomposition patterns similar to partial discharges have been reported as a result of the decomposition of thin oil film between overheated core laminates at temperatures of 140°C and above.

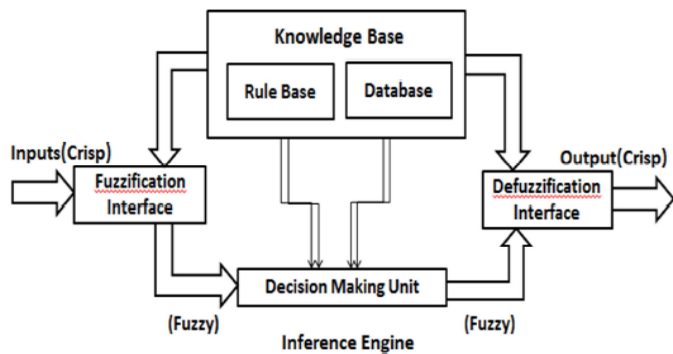
<sup>a</sup>NS = Non-significant whatever the value.

<sup>b</sup>An increasing value of the amount of C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> may indicate that the hot spot temperature is >1000°C.

اگر نسبت گاز CO<sub>2</sub> به گاز CO کمتر از عدد ۳ باشد، و نیز در عین حال، نسبت نرخ رشد سالانه این دو گاز به یکدیگر باز هم کمتر از عدد باشد، یعنی کاغذ عایقی ترانسفورماتور نیز به آرامی در حال تجزیه شدن و از بین رفتن است [۱۶].

<sup>۱</sup> parts per million

۳. غیر فازی ساز<sup>۱۱</sup>: هدف از این بخش، نگاشت مجموعه ای از



شکل ۳: بلوک دیاگرام یک سیستم استنتاج فازی [۱۷ و ۱۸]

اعداد حقیقی در بازه [0,1] به داده های واقعی<sup>۱۲</sup> با استفاده از توابع عضویت است [۱۷ و ۱۸].

۴. قوانین فازی: این قوانین جملات شرطی<sup>۱۳</sup> با ساختار IF...THEN هستند که با استفاده از عملگرهای AND، OR و NOT قوانین حاکم بر یک FIS را به نگارش در می آورد [۲۱]. قوانین فازی بر اساس دانش فرد خیره و با استفاده از متغیرهای زبانی<sup>۱۴</sup> تدوین می شود [۲۲]. متغیرهای زبانی پیچیدگی مدل های فازی را کاهش می دهد [۲۳].

در این بخش، مشخصات سیستم استنتاج فازی تشخیص و تمایز عیوب داخلی ترانسفورماتور قدرت توضیح داده شده است. طراحی این سیستم با استفاده از نرم افزار MATLAB بوده و شامل مشخصات زیر می باشد:

۱. در این تحقیق، مدل ممدانی<sup>۱۵</sup> برای سیستم استنتاج فازی انتخاب شده است. لازم است ذکر شود که یک بارهم مدل سوگنو<sup>۱۶</sup> برای سیستم استنتاج فازی انتخاب شد، اما عملکرد آن مناسب نبود. سیستم استنتاج فازی طراحی شده دارای ۲۵ ورودی مطابق با جداول و معیارهای بیان شده در IEC 60599 guidelines (جدول ۱ تا ۴ و شکل های ۱ و ۲) می باشد. این سیستم دارای ۱ خروجی با ۹ حالت<sup>۱۷</sup> می باشد. ۸ حالت اختصاص به کدهای عیوب دارد و ۱ حالت اختصاص به سلامت ترانسفورماتور (جدول ۵ و ۶).

<sup>10</sup> Output

<sup>11</sup> Defuzzifier

<sup>12</sup> Real Data

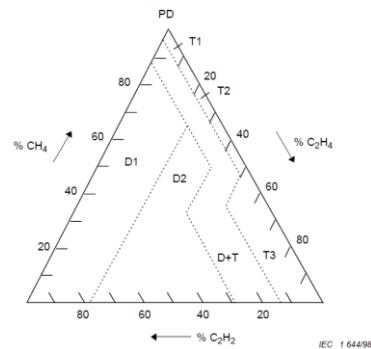
<sup>13</sup> Conditional Propositions

<sup>14</sup> Linguistic Variables

<sup>15</sup> Mamdani Model

<sup>16</sup> Sugeno Model

<sup>17</sup> State



شکل ۲: مثلث دوال و محدوده های ذکر شده برای آن (گام چهارم) [۱۶]

where  $\%C_2H_2 = ((100x)/(x+y+z))$  for  $x = [C_2H_2]$  in microlitres per litre ( $\mu\text{l/l}$ );  $\%C_2H_4 = ((100y)/(x + y + z))$  for  $y = [C_2H_4]$  in  $\mu\text{l/l}$ ; and  $\%CH_4 = ((100z)/(x + y + z))$ .

## ۴. سیستم استنتاج فازی (FIS)

استفاده از سیستم های هوشمند در پروژه هایی که با عدم قطعیت<sup>۱</sup> و احتمال وجود خطا همراه هستند، مفید است. در این مقاله از منطق فازی جهت تصمیم گیری در مورد سلامت ترانسفورماتور و طبقه بندی<sup>۲</sup> عیوب استفاده شده است. شکل ۳ بلوک دیاگرام یک سیستم استنتاج فازی را نمایش می دهد [۱۷ و ۱۸]. همان طور که در شکل ۳ ملاحظه می شود، یک FIS از اجزای زیر تشکیل شده است:

۱. فازی ساز<sup>۳</sup>: هدف از فازی سازی<sup>۴</sup>، انجام یک نگاشت<sup>۵</sup> از مجموعه داده های واقعی به مجموعه مقادیر بازه [0,1] توسط توابع عضویت<sup>۶</sup> می باشد [۱۸ و ۱۹]. در این تحقیق، کلیه ورودی های<sup>۷</sup> فازی ساز بر اساس جداول ۱ تا ۴ و شکل های ۱ و ۲ تعریف شده است. در واقع مقادیر نرمال و غیر نرمال از این جداول و شکل ها استخراج و به کمک توابع عضویت به بازه های نرمال و غیر نرمال [0,1] نگاشت شده است.
۲. موتور استنتاج فازی (واحد تصمیم گیری)<sup>۸</sup>: این بخش با انجام عملیات ریاضی ویژه و با استفاده از قوانین فازی<sup>۹</sup>، ورودی های فازی را به خروجی<sup>۱۰</sup> فازی تبدیل می کند [۲۰].

<sup>1</sup> Uncertainty

<sup>2</sup> Classification

<sup>3</sup> Fuzzifier

<sup>4</sup> Fuzzification

<sup>5</sup> Mapping

<sup>6</sup> Membership Function

<sup>7</sup> Inputs

<sup>8</sup> Fuzzy Inference Engine (Decision-Making Unit)

<sup>9</sup> Fuzzy Rules

جدول ۵: ورودی های FIS طراحی شده در این تحقیق

Number	Inputs
1	CO2
2	CO
3	H2
4	CH4
5	C2H2
6	C2H4
7	C2H6
8	Rate_CO2
9	Rate_CO
10	Rate_H2
11	Rate_CH4
12	Rate_C2H2
13	Rate_C2H4
14	Rate_C2H6
15	CO2 to CO
16	Rate_CO2 to Rate_CO
17	C2H2 to C2H4
18	CH4 to H2
19	C2H4 to C2H6
20	GraphicalC2H2 to C2H4
21	GraphicalCH4 to H2
22	GraphicalC2H4 to C2H6
23	CH4Percent
24	C2H2Percent
25	C2H4Percent

جدول ۶: حالت های مختلف خروجی FIS طراحی شده در این تحقیق

Number	1	2	3	4	5	6	7	8	9
States of Output	No Fault	P	PD	D1	D2	T1	T2	T3	DT

۲. در این تحقیق، نهایتاً از توابع مثلثی<sup>۱</sup> به عنوان توابع عضویت عضویت برای ورودی ها و خروجی استفاده شد. زیرا در میان سایر توابع عضویت، بهترین نتایج از این توابع به دست آمد.

<sup>۱</sup> Triangle

۳. برای عملگرهای دلالت<sup>۲</sup> (and) و تجمیع<sup>۳</sup> (or) از روش زاده<sup>۴</sup> یعنی به ترتیب min و max استفاده شده است [۲۵] و [۲۴].

۴. از روش مرکز جرم<sup>۵</sup> برای غیر فازی سازی استفاده شده است.

۵. در این سیستم، مطابق با جداول و معیارهای بیان شده در IEC 60599 guidelines، ۲۲۱ قانون فازی IF - THEN با استفاده از عملگر AND نگاشته شده است. به دلیل اهمیت یکسان همه این قوانین، عدد ۱ برای وزن<sup>۶</sup> همه آنها در نظر گرفته شده است.

در اینجا برای توضیح در خصوص چگونگی عملکرد سیستم فازی طراحی شده و قوانین حاکم بر این سیستم، مثالی را ذکر می کنیم. به عنوان مثال ترانسفورماتور T1 به قدرت نامی 160 MVA ساخت سال ۲۰۰۸ میلادی شرکت ایران ترانسفو منصوب در پست انتقال 230/63Kv بوئین زهرا زیر مجموعه شرکت برق منطقه ای زنجان را در نظر بگیرید. اطلاعات به دست آمده از چند دوره تست گاز کروماتوگرافی روغن این ترانسفورماتور به شرح جدول 7 است. بر اساس گام اول روش IEC 60599 guidelines، با دقت در مقادیر جدول ۲ در می یابیم، مقادیر گاز اتان (C2H6) محلول در ترانسفورماتور فوق الذکر، بیش از حد نرمال می باشد. برابر مقادیر مندرج در جدول فوق الذکر رشد این گاز از تاریخ ۳۰/۰۵/۲۰۱۰ (مقادیر قبلی<sup>۷</sup>) تا تاریخ ۰۲/۱۰/۲۰۱۰ (مقادیر کنونی<sup>۸</sup>)، برابر (157.2 ppm/year) ( $\mu\text{l/l/year}$ ) می باشد. لذا با دقت در جدول ۳ از گام اول در می یابیم رشد این گاز بیش از حد نرمال می باشد. در مرحله بعدی به جدول ۴ از گام اول مراجعه می کنیم. با توجه به مقادیر کنونی، داریم:  $(C_2H_2/C_2H_4)=0$ ،  $(CH_4/H_2) = 2.436$  and  $(C_2H_4/C_2H_6) = 0.033$  لذا طبق سطر چهارم از جدول ۴، عیب داخلی ترانسفورماتور مذکور، وجود نقطه یا نقاط داغ با دمای کمتر از  $300^{\circ}\text{C}$  یعنی (T1) است. با توجه به اینکه عیب در همین گام اول مشخص شده است، مراجعه به گام های دیگر منتفی می گردد. در سیستم فازی طراحی شده برای تشخیص عیب در شرایطی مانند شرایط ترانسفورماتور فوق الذکر، قانون شماره ۵۴ در مجموعه قوانین سیستم طراحی شده تعریف شده است:

<sup>۲</sup> Implication

<sup>۳</sup> Aggregation

<sup>۴</sup> Zadeh Method

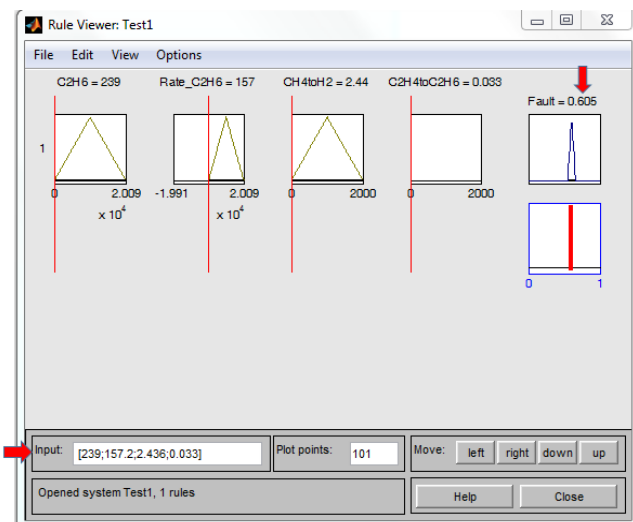
<sup>۵</sup> Centroid Technique

<sup>۶</sup> Weight

<sup>۷</sup> Previous Values

<sup>۸</sup> Present Values

تخلیه ی روغن و بازدید داخلی از این ترانسفورماتور معلوم شد که به علت لاک زنی<sup>۱</sup> معیوب در



شکل ۴: تعریف قانون فازی شماره ۵۴ در FIS طراحی شده و نتایج آن

If C2H6 = 239 and Rate\_C2H6 = 157.2 and CH4toH2 = 2.436 and C2H4toC2H6 = 0.033 Then Fault = 0.6050 (T1)



شکل ۵: کلکتور سالم ترانسفورماتور



شکل ۶: کلکتور معیوب و پوسیده ۶ رادیاتور ترانسفورماتور

کارخانه سازنده، لاک آن در کف ترانسفورماتور جمع شده و به مرور زمان باعث پوسیدگی<sup>۲</sup> کلکتور ۶ رادیاتور ترانسفورماتور و نهایتاً منجر به ایجاد گرما و نقطه داغ و گسترش عیب شده است. (شکل های ۵ و ۶) لذا

<sup>1</sup> Varnishing  
<sup>2</sup> Corrosion

#54. If (C2H6 is Abnormal) and (Rate\_C2H6 is Abnormal) and (CH4toH2 is BiggerThan1) and (C2H4toC2H6 is SmallerThan1) then (Fault is T1)

جدول ۷: نتایج آزمایش گازکروماتوگرافی روغن ترانسفورماتور T1 بوئین زهرا

CO <sub>2</sub> (ppm)	CO (ppm)	H <sub>2</sub> (ppm)	CH <sub>4</sub> (ppm)	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> (ppm)	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> (ppm)	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> (ppm)	تاریخ نمونه برداری
489	257	81	70	2,369	40	186	30/05/2010
1451	341	39	95	0	8	239	02/10/2010

جدول ۸: حالت های مختلف خروجی FIS طراحی شده در این تحقیق (عیوب)

داخلی ترانسفورماتور) و محدوده متناظر با هر عیب

Fault	No Fault	P	PD	D1	D2	T1	T2	T3	DT
Range	0 - 0.11	0.11 - 0.22	0.22 - 0.33	0.33 - 0.44	0.44 - 0.55	0.55 - 0.66	0.66 - 0.77	0.77 - 0.88	0.88 - 1

در تابع مثلثی در نظر گرفته شده برای ورودی C2H6، محدوده ۰ تا ۹۰ را محدوده Normal و محدوده ۹۰ تا ۲۰۰۹۰ را محدوده Abnormal تعریف نموده ایم. در تابع مثلثی در نظر گرفته شده برای ورودی Rate\_C2H6، محدوده -۱۹۹۱۰ تا ۹۰ را محدوده Normal و محدوده ۹۰ تا ۲۰۰۹۰ را محدوده Abnormal تعریف نموده ایم. در تابع مثلثی در نظر گرفته شده برای ورودی CH4toH2، محدوده ۰ تا ۰.۱ را محدوده Between0.1To0.5، محدوده 0.1 تا 0.5 را محدوده SmallerThan0.1، محدوده 0.1 تا ۱ را محدوده Between0.1To1، محدوده 1 تا 2000 را محدوده BiggerThan1 تعریف نموده ایم. در تابع مثلثی در نظر گرفته شده برای ورودی C2H4toC2H6، محدوده ۰ تا ۰.۲ را محدوده SmallerThan0.2، محدوده ۰ تا ۱ را محدوده Between1To4، محدوده 1 تا 2000 را محدوده BiggerThan1، محدوده ۲ تا 2000 را محدوده BiggerThan2 تعریف نموده ایم. محدوده ۴ تا 2000 را محدوده BiggerThan4 تعریف نموده ایم. محدوده حالت T1 از خروجی سیستم فازی را از ۰.۵۵ تا ۰.۶۶ تعریف نموده ایم. لازم به ذکر است کلیه عیوب داخلی ترانسفورماتور به صورت ۹ حالت از تنها خروجی این سیستم استنتاج فازی، در محدوده ۰ تا ۱ و به صورت مساوی و مطابق با جدول ۸ تعریف شده است. حال وقتی مقادیر گازهای محلول در روغن ترانسفورماتور مذکور را به این سیستم استنتاج فازی اعمال می کنیم، خروجی سیستم عدد ۰.۶۰۵۰ می شود که در محدوده حالت T1 از حالت های مختلف خروجی سیستم واقع است. لذا عیب داخلی ترانسفورماتور به تشخیص سیستم استنتاج فازی طراحی شده، وجود نقطه یا نقاط داغ با دمای کمتر از 300 °C یعنی همان T1 است. وضعیت قانون ۵۴ و نحوه عملکرد آن و محاسبه عدد ۰.۶۰۵۰ از روی ورودی های فوق الذکر در شکل ۴ مشخص شده است. در واقعیت پس از

مشخص گردید تشخیص عیب داخلی ترانسفورماتور مذکور توسط سیستم استنتاج فازی طراحی شده در این تحقیق، صحیح و منطبق بر واقعیت بوده است.

## ۵. نتایج تجربی<sup>۱</sup>

یکی از مزایای این تحقیق، استفاده از یک مجموعه بزرگ و مناسب از داده های واقعی است. توضیح اینکه نتایج آزمایش های گازکروماتوگرافی انجام شده از سال ۱۳۷۹ تا سال ۱۳۹۴ بر روی روغن بیش از ۳۰۰۰ ترانسفورماتور قدرت موجود در شبکه برق سراسری ایران مورد مطالعه قرار گرفته است. از این جامعه آماری، نتایج آزمایش های گازکروماتوگرافی مربوط به روغن ۱۸۵ دستگاه ترانسفورماتور قدرت مشکوک به داشتن عیب یا عیوب داخلی انتخاب شده است. از این تعداد، ۱۵۷ دستگاه ترانسفورماتور قدرت افزاینده و کاهنده نصب شده در پست های انتقال ۴۰۰Kv، ۲۳۰Kv، ۱۳۲Kv و ۶۳Kv در سراسر کشور، ۲۶ دستگاه ترانسفورماتور قدرت اصلی افزاینده و مصرف داخلی کاهنده نصب شده در برخی از نیروگاه های حرارتی مانند نیروگاه رامین اهواز، فردوسی مشهد، خلیج فارس، منجیل، پرند، شازند اراک، لوشان و زرنند کرمان و ۲ دستگاه ترانسفورماتور قدرت افزاینده نصب شده در نیروگاه آبی شهید عباسپور و مسجد سلیمان خوزستان می باشد. همچنین تعداد ۱۶۲ دستگاه ترانسفورماتور از این مجموعه، دارای یکی از عیوب الکتریکی یا حرارتی یا شیمیایی و یا ترکیبی از این عیوب بوده و تحت پایش وضعیت قرار گرفته و با تشخیص عیب آن، ترانسفورماتور از مدار خارج و تحت تعمیر قرار گرفته است. همچنین تعداد ۲۳ دستگاه ترانسفورماتور مابقی، فاقد هرگونه عیبی بوده و کاملاً سالم در مدار قرار دارد. نکته قابل توجه در این داده ها، تنوع و تکرار آنها بوده است. در مجموعه داده های انتخاب شده، ترانسفورماتورهای قدرت مربوط به شرایط اقلیمی متفاوت بوده است. کشور ایران به کشور چهار فصل معروف است. لذا ترانسفورماتورهای مجموعه انتخابی مربوط به آب و هوای گرم و خشک، گرم و مرطوب، سرد و خشک، سرد و مرطوب، معتدل و خشک و معتدل مرطوب بوده است. در جدول ۹، نمونه ای از داده های مورد استفاده در این مقاله ارائه شده است. داده های مذکور در قالب دستورهای نرم افزار MATLAB به عنوان ورودی به سیستم استنتاج فازی اعمال شده است. سیستم استنتاج فازی، پس از طی فرآیند محاسباتی فازی، عدد غیر فازی شده ای را تولید می کند. با توجه به محدوده های تعریف شده برای ۹ حالت خروجی، عیب داخلی

ترانسفورماتور مشخص می گردد. پس از اعمال همه ورودی ها، تشخیص سیستم استنتاج فازی با حالت واقعی عیب در جداولی مقایسه شده است. به عنوان مثال، همان گونه که در جدول ۹ قابل مشاهده است، در مورد ترانسفورماتور T1 پست خمسه شرکت برق منطقه ای زنجان، تشخیص سیستم طراحی شده، عیب D2 بوده که با شواهد واقعی منطبق بود. اما در مورد ترانسفورماتور مربوط به پست Palor-63 از شرکت برق منطقه ای هرمزگان، تشخیص سیستم استنتاج فازی طراحی شده، عیب T1 بوده که با شواهد واقعی منطبق نبود. لازم به ذکر است در واقعیت این ترانسفورماتور دارای دو عیب PD و T2 بوده است. در نهایت از طریق فرمول هایی، میزان دقت وصحت عملکرد این سیستم استنتاج فازی محاسبه شده است.

یکی از نکاتی که بایستی در نتایج تجربی این پروژه و تحلیل آن، به آن توجه شود این است که درست است تکیه صرف بر نسبت مقادیر گاز CO<sub>2</sub> به CO چندان قابل اطمینان نبوده و احتمال دارد با وجود کمتر بودن این نسبت از عدد ۳، کاغذ ترانسفورماتور سالم باشد، لیکن مطابق با IEC 60599 guidelines، برای تشخیص اینکه تغییر نسبت گازها نسبت به اندازه گیری دوره قبل، حاصل از ایجاد فالت جدید بوده یا خیر؟، بایستی ابتدا مقادیر جدید را از مقادیر قبلی کم کرده و سپس دوباره نسبت گازها را محاسبه کرد که در واقع این همان نسبت رشد گازها به یکدیگر می باشد. این مطلب مخصوصاً برای نسبت CO<sub>2</sub> به CO صادق است. لذا اگر نسبت گاز CO<sub>2</sub> به گاز CO کمتر از عدد ۳ باشد، و نیز در عین حال، نسبت نرخ رشد سالانه این دو گاز به یکدیگر باز هم کمتر از عدد ۳ باشد، یعنی کاغذ عایقی ترانسفورماتور نیز به آرامی در حال تجزیه شدن و از بین رفتن است [۱۶]. البته دو تست برای اطمینان از وضعیت کاغذ ترانسفورماتور وجود دارد که نمونه گیری از روغن ترانسفورماتور در یکی از این تست ها به صورت on-line انجام شده که همان تست اندازه گیری مقادیر فوران<sup>۲</sup> و محاسبه رشد سالانه آن و مقایسه آن با جداول استاندارد است و تست دیگر فقط به صورت off-line آن هم وقتی که ترانسفورماتور باز شده باشد، قابل انجام بوده که همان برداشتن تکه کوچکی از کاغذ ترانسفورماتور و اندازه گیری درجه پلیمریزاسیون<sup>۳</sup> آن می باشد [۲۸-۲۶]. در این پروژه از تست دوم جهت تشخیص صحت عملکرد سیستم فازی طراحی شده استفاده گردیده است که در اغلب موارد، تشخیص وجود عیب در کاغذ سلولزی<sup>۴</sup> توسط سیستم فازی ارائه شده در این تحقیق، منطبق بر نتایج واقعی آزمایش سنجش درجه پلیمریزاسیون کاغذ سلولزی پس از باز کردن

<sup>2</sup> Furanic Compounds (2-furfuraldehyde)

<sup>3</sup> Degree of Polymerization (DP)

<sup>4</sup> Cellulose Paper

<sup>1</sup> Experimental Results



جدول ۱۰: ماتریس به هم ریختگی [۲۹و۳۰]

		Actual Class	
		$f$	$-f$
Predicted Class	$f$	$a_f$	$b_f$
	$-f$	$c_f$	$d_f$

$$Recall_f = \frac{a_f}{a_f + c_f} \quad (1)$$

همچنین مقدار پیش گویی درست یا همان پارامتر دقت، طبق (۲) برابر نسبت میان پارامتر  $a_f$  به کل تعداد نتایج پیش گویی های که مثبت بوده تعریف می شود. در پایان، معیار  $F1_f$  از (۳) به دست می آید [۲۹].

$$Precision_f = \frac{a_f}{a_f + b_f} \quad (2)$$

$$F1_f = \frac{2 \times Precision_f \times Recall_f}{Precision_f + Recall_f} \quad (3)$$

از آنجا که دو پارامتر دقت و بازخوانی فقط در مسائل دسته بندی باینری (دو کلاسی) تعریف شده اند، برای به دست آوردن یک شاخص تک مقداری در مسائل چند کلاسی، نتایج به دست آمده را متوسط گیری می کنند [۳۰]. در متوسط گیری بزرگ<sup>۱۲</sup> که با متوسط گیری از نتایج گروه های مختلف در مسائل چند کلاسی انجام می شود،  $C$  را به عنوان تعداد کل گروه ها در مسئله چند کلاسی در نظر گرفته و عمل متوسط گیری بزرگ به صورتی که در (۴) بیان شده، انجام می شود [۲۹و۳۰]. هر چقدر معیار  $F1$  بزرگ تر باشد، نشان دهنده دقت و صحت بالاتر در نتایج تشخیص عیب می باشد. بنابراین هدف در پروژه های تشخیص عیب، حداکثر سازی معیار  $F1$  است.

$$F1 = \frac{\sum_{i=1}^C F1_f i}{C}, \quad (0 \leq F1 \leq 1) \quad (4)$$

### 5.1.2 محاسبه میزان دقت و صحت تشخیص عیب توسط

**FIS طراحی شده در این تحقیق با استفاده از معیار  $F1$ :** در این مرحله، نتایج تست های گازکروماتوگرافی مربوط به روغن ۱۸۵ ترانسفورماتور مشکوک به داشتن عیب یا عیوب داخلی که تحت پایش قرار گرفته، به ورودی های FIS طراحی شده در این تحقیق اعمال شده است. ماتریس به هم ریختگی برای مجموعه نتایج واقعی و نتایج حاصله از پیش گویی FIS مذکور در خصوص عیوب داخلی مربوط به این ۱۸۵ ترانسفورماتور در جدول ۱۱ آورده شده است. با توجه به تشکیل ماتریس به

ترانسفورماتور بوده است. شاید در موارد بسیار کمی که در آن سیستم فازی ما به اشتباه اعلام کرده: «کاغذ سلولزی در حال تخریب<sup>۱</sup> است» - که طبق جدول شماره ۱۰ از مقاله ما فقط ۲ مورد بوده است -، افزایش گازهای اکسید کربنی به علت وجود نشتی<sup>۲</sup> و ورود هوا به داخل تانک و یا اکسیداسیون<sup>۳</sup> روغن و یا ... بوده است و نه به علت تخریب کاغذ سلولزی. لازم به ذکر است تعداد قوانین نوشته شده برای تشخیص عیب تخریب تدریجی کاغذ سلولزی در سیستم فازی ارائه شده در این مقاله، ۳ قانون است.

### 5.1 محاسبه میزان دقت و صحت تشخیص عیب

#### 5.1.1 معیار $F1$ : از طریق معیار $F1$ می توان میزان دقت و

صحت تشخیص عیب را محاسبه نمود. این معیار به صورت گسترده در سیستم های هوشمند و یادگیرنده استفاده می شود. دلیل استفاده از این معیار، ساده کردن پروسه محاسبات مربوط به دقت و صحت تشخیص عیب با استفاده از یک شاخص ساده است که دو پارامتر دقت<sup>۴</sup> (مقدار پیش گویی صحیح<sup>۵</sup>) و بازخوانی<sup>۶</sup> (حساسیت<sup>۷</sup> یا مقدار TPR) را با هم ترکیب می کند. پس از تست هر یک از مجموعه عیوب آموزش داده شده در سیستم هوشمند با استفاده از داده های جدید، نتایج به دست آمده از تشخیص عیب می تواند در ماتریسی به نام ماتریس به هم ریختگی گردآوری شود (جدول ۱۰). در جدول ۱۰، پارامتر  $a_f$  تعداد تشخیص مثبت صحیح<sup>۸</sup>، پارامتر  $b_f$  تعداد تشخیص مثبت غلط<sup>۹</sup>، پارامتر  $c_f$  تعداد تشخیص منفی غلط<sup>۱۰</sup> و پارامتر  $d_f$  تعداد تشخیص منفی صحیح<sup>۱۱</sup> می باشد. به عبارت دیگر،  $a_f$  مبین تشخیص هایی است که به درستی به عیب  $f$  تعلق گرفته است  $b_f$  مبین تشخیص هایی است که به اشتباه به عیب  $f$  تعلق گرفته است،  $c_f$  مبین تشخیص هایی است که به اشتباه به عیب  $f$  تعلق داده نشده،  $d_f$  مبین تشخیص هایی است که به درستی به عیب  $f$  تعلق داده نشده است. برای این اساس، پارامتر TPR یا حساسیت، طبق (۱) برابر نسبت میان تشخیص های مثبتی که به درستی عیب  $f$  را آشکار کرده به کل تعداد تشخیص های مثبت واقعی تعریف می شود [۲۹و۳۰].

<sup>1</sup> Deterioration  
<sup>2</sup> Leakage  
<sup>3</sup> Oxidation  
<sup>4</sup> Precision  
<sup>5</sup> Positive Predictive Value  
<sup>6</sup> Recall  
<sup>7</sup> Sensitivity  
<sup>8</sup> Number of True Positive Diagnoses  
<sup>9</sup> Number of False Positive Diagnoses  
<sup>10</sup> Number of False Negative Diagnoses  
<sup>11</sup> Number of True Negative Diagnoses

<sup>12</sup> Macro-averaging

هم ریختگی، معیار F1 شاخص بسیار مناسبی جهت سنجش میزان دقت و صحت تشخیص عیب است. به عنوان مثال، جهت تعیین درجه دقت و صحت جدا سازی عیب T1 از سایر عیوب توسط FIS طراحی شده در این تحقیق، در ابتدا ۸ مرتبه معیار F1

جدول ۹: نمونه ای از داده های استفاده شده در این تحقیق مربوط به نتایج گاز کروماتوگرافی روغن چند نمونه از ترانسفورماتورهای قدرت شبکه برق ایران

Number	Comp. Name	Trans. Code	Present Sampling Data	Previous Sampling Data	Present Gas Concentration Values (ppm)						Previous Gas Concentration Values (ppm)							
					CO2	CO	H2	CH4	C2H2	C2H4	C2H6	CO2	CO	H2	CH4	C2H2	C2H4	C2H6
1	Bakhtar	9-1402 T6--100-104	2008/24/08	2007/30/08	952	416	387	40	0	2	7	706	266	215	25	0	0	0
2	Azarba yejan	SARD ROOD 2-T5	2014/26/07	2014/14/06	1132	204	1261	77	0	9.303	74	790	166	1014	65	0	11.35	56
3	Azarba yejan	SARD ROOD 2-T6	2014/26/10	2014/01/09	3402	206	379	22	75	20	0	3940	226	343	16	58	17	6.3
4	Zanjan	Khams eh - T1	2010/16/10	2009/06/06	3693	529	387	137	31	52	924	2347	360	348	56	17	28	519
5	Gilan	Siadati -T2	2003/06/02	2003/09/01	3482	603	25.62	134	0	58	155	3157	431	54.4	104	0	58.85	102
6	Hormo zgan	Palor-63	2013/02/09	2012/25/02	4545	870	454	10	0.24	58	23	1839	893	67	6.5	0.24	57	22
7	Khuze stan	Susang erde asli - T3	2006/09/08	2006/05/07	474	286	428	1984	9	2626	621	529	298	371	1735	0.82	2214	515
8	Zanjan	Khams eh - T2	2013/11/11	2013/01/01	2380	353	138	33	7	20	228	1186	126	0	0	17	20	9
9	Bakhtar	8-1401T1_22-26	2008/21/04	2007/19/09	1762	199	22	2	2	2	3	2084	259	35	3	0	2	3

Gas Increase Rate(ppm/year)							Gas Ratio					Duval Tri. Gas Percent			Real Fault	Diagnosed Fault
CO2	CO	H2	CH4	C2H2	C2H4	C2H6	$\frac{CO_2}{CO}$	$\frac{CO_2 \text{ Growth}}{CO \text{ Growth}}$	$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	$\frac{CH_4}{H_2}$	$\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$	CH4 %	C2H2%	C2H4 %		
249	152	174	15	0	2	7	2.228	1.64	0	0.103	0.286	0.952	0	0.05	P + T1	P
2908	316	2908	107	0	17	154	5.558	9.194	0	0.061	0.126	0.892	0	0.107	PD	PD
-3636	-135	245	43	114	22	-43	16.487	26.901	3.662	0.059	2000	0.191	0.636	0.174	D1	D1
767	124	28.6	59	10	17.59	297	6.981	7.946	0.596	0.354	0.056	0.623	0.141	0.236	D2	D2
4090	2163	-362	376	0	-11.831	665	5.771	10.873	0	5.227	0.375	0.698	0	0.302	T1	T1
1780	-15	254	2.368	0	0.395	0.685	5.224	-118	0.004	0.022	2.522	0.148	0.004	0.849	PD + T2	T1
-558	-122	579	2528	83	4177	1080	1.657	4.619	0.003	4.636	4.227	0.43	0.002	0.568	T3	T3
1392	265	161	38	-12	0	255	6.742	5.26	0.35	0.239	0.088	0.55	0.117	0.333	DT	DT
-547	-102	-22	-1.7	3.4	0	0	8.854	5.367	1	0.091	0.667	0.333	0.333	0.333	NoFault	NoFault

به بیان نحوه محاسبه  $F1(T1, P)$  و  $F1(T1, NoFault)$  به عنوان دو نمونه می پردازیم. در ابتدا بر اساس مقادیر مندرج در جدول ۱۱، پارامترهای دقت و بازخوانی برای  $F1(T1, NoFault)$  محاسبه می شود:

$a_f$ : تعداد ترانسفورماتورهایی که در واقعیت دارای عیب T1 بوده و به درستی توسط FIS طراحی شده در این تحقیق، دارای عیب T1 پیش گویی و تشخیص داده شده است = ۱۹.

به صورتی که ذیلاً خواهد آمد، محاسبه و سپس متوسط این ۸ مقدار گرفته شده و نهایتاً درجه دقت و صحت تشخیص عیب T1 محاسبه می شود (جدول ۱۲). به عنوان مثال، مقدار  $F1(T1, NoFault) = 92.7\%$ ، مبین درصد ترانسفورماتورها از میان ۱۸۵ ترانسفورماتور مشکوک به داشتن عیب داخلی است که در واقعیت دارای عیب داخلی T1 بوده و در عین حال توسط FIS طراحی شده در این تحقیق عیب آن به درستی تشخیص داده شده و از ترانسفورماتورهای سالم این مجموعه جداسازی شده است. در اینجا

$b_f$ : تعداد ترانسفورماتورهایی که در واقعیت سالم بوده، ولی به اشتباه توسط FIS طراحی شده در این تحقیق، دارای عیب T1 پیش گویی و تشخیص داده شده است = 0.

$c_f$ : تعداد ترانسفورماتورهایی که در واقعیت دارای عیب T1 بوده، ولی به اشتباه توسط FIS طراحی شده در این تحقیق، ترانسفورماتور سالم پیش گویی و تشخیص داده شده است = 3.

با استفاده از مقادیر فوق الذکر، به دست می آید:

$$Precision_{(T1,NoFault)} = \frac{a_f}{a_f+b_f} = \frac{19}{19+0} = 1,$$

$$Recall_{(T1,NoFault)} = \frac{a_f}{a_f+c_f} = \frac{19}{19+3} = 0.864,$$

$$F1_{(T1,NoFault)} = \frac{2 \times Precision_{(T1,NoFault)} \times Recall_{(T1,NoFault)}}{Precision_{(T1,NoFault)} + Recall_{(T1,NoFault)}} =$$

به همین طریق،  $F1_{(T1,P)}$  به صورت زیر محاسبه می شود:

$$Precision_{(T1,P)} = \frac{a_f}{a_f+b_f} = \frac{19}{19+0} = 1,$$

$$Recall_{(T1,P)} = \frac{a_f}{a_f+c_f} = \frac{19}{19+2} = 0.904,$$

$$F1_{(T1,P)} = \frac{2 \times Precision_{(T1,P)} \times Recall_{(T1,P)}}{Precision_{(T1,P)} + Recall_{(T1,P)}} =$$

به همین ترتیب برای سایر عیوب،  $F1_{(T1,Others(PD,D1,...))}$  را محاسبه کرده و نهایتاً درجه دقت و صحت تشخیص عیب T1 از سایر عیوب توسط FIS طراحی شده در این تحقیق، به صورت زیر محاسبه می شود:

$$F1_{(T1)} = \frac{\sum F1_{(T1,Others(PD,D1,...))}}{8} = 92.8\%$$

این بدان معناست که FIS طراحی شده در این تحقیق، قادر به جداسازی عیب T1 از سایر عیوب با 92.8٪ دقت و درستی است. پس از انجام کلیه محاسبات به شیوه فوق الذکر، معیار F1 برای هر یک از عیوب در جدول ۱۳ آورده شده است. در خصوص علت کم بودن نسبی مقادیر  $F1_{(PD)}$  و  $F1_{(D2)}$ ، می توان گفت: بیشتر ترانسفورماتورهایی که دارای این دو عیب بودند، ترکیبی از عیوب دیگر نیز در آنها وجود داشت. به عنوان مثال از ۱۸ مورد خطای تشخیص برای عیب PD، ۱۶ مورد آن در مورد ترانسفورماتورهایی است که علاوه بر عیب PD، دارای یک عیب یا دو عیب دیگر هم هستند.

نهایتاً می توان گفت میزان اثر بخشی FIS طراحی شده یا همان درصد دقت و صحت تشخیص عیوب داخلی ترانسفورماتورهای قدرت توسط این سیستم

، برابر متوسط معیار F1 برای هر عیب است. لذا داریم:

$$F1 = \frac{\sum F1(a\ fault, other\ faults)}{9} = 92.1\%$$

## ۶. نتیجه گیری

با توجه به اهمیت بالا و گران بودن ترانسفورماتورهای قدرت در شبکه برق، نحوه بهره برداری درست و مراقبت صحیح از این تجهیز، یکی از مهم ترین برنامه هایی است که ملاحظه نظر مدیران صنعت حساس برق می باشد. استراتژی مدیران در این خصوص، استراتژی «پایش وضعیت» است. ابزار پیاده سازی این استراتژی، آزمایش  $0.864 \times 1.11 \times 0.927 = 0.864$  ترکیبی و شیمیایی است که بر روی قسمت های مختلف ترانسفورماتور قدرت انجام می شود. یکی از آزمایش های شیمیایی که بر روی روغن ترانسفورماتور قدرت انجام می شود، آزمایش گازکروماتوگرافی است. کارشناس خبره با استفاده از نتایج این آزمایش، به تحلیل گازهای محلول در روغن و گازهای آزاد پرداخته و با استفاده از روش های گوناگونی که در استانداردهای بین المللی ذکر شده، اقدام به تفسیر مقادیر مطلق و نیز نرخ رشد گازهای مذکور و نسبت برخی از این گازها به یکدیگر پرداخته  $0.904 \times 1.09 \times 0.95 = 0.904$  سالم بودن تجهیز و یا وجود یک یا چند عیب از عیوب  $0.904$  دهد. معمولاً خطای انسانی در این گونه تفسیرها و تخمین ها به وفور مشاهده می شود. از سوی دیگر به دلیل کم بودن تعداد ترانسفورماتورهای معیوب نسبت به ترانسفورماتورهای کل شبکه برق، عموماً تجربه اندوخته شده در این زمینه اندک بوده و بالطبع تعداد کارشناسان خبره با تجربه فراوان برخورد با ترانسفورماتورهای قدرت معیوب، بسیار اندک می باشد، لذا طراحی سیستم های هوشمند تشخیص و تمایز عیوب داخلی ترانسفورماتور قدرت می تواند بسیار مفید واقع شود. در همین راستا، در این پروژه، بر اساس داده های جمع آوری شده از سراسر کشور در خصوص اطلاعات فنی و نتایج آزمایش های انجام شده بر روی ۱۶۲ ترانسفورماتور معیوب شناخته شده در کشور در ۱۵ سال گذشته و ۲۳ ترانسفورماتور سالم، سیستم استنتاج فازی طراحی شد که بر پایه نتایج آزمایش گازکروماتوگرافی انجام شده بر روی ترانسفورماتورهای مذکور و با استفاده از جداول و مراحل مطروحه در IEC 60599 guidelines، اقدام به تشخیص و تمایز عیب یا عیوب درونی ترانسفورماتور قدرت می نماید. نهایتاً بازدهی این سیستم به

نباستی تنها بر پایه نتایج این آزمایش انجام پذیرد، بلکه نتایج سایر آزمایش های تکمیلی نیز بایستی مد نظر قرار گیرد تا بتوان از برآیند آنها، به تصمیمات

معنای میزان تطبیق تشخیص سیستم استنتاج فازی با واقعیت، محاسبه شد که عدد ۹۱.۲٪ به دست آمد. اما لازم است به این نکته مهم توجه گردد که تصمیم گیری در خصوص نحوه بهره برداری از ترانسفورماتور قدرت،

جدول ۱۱: ماتریس به هم ریختگی برای عیوب داخلی ۱۸۵ ترانسفورماتور قدرت انتخاب شده جهت اعتبارسنجی

		Actual Faults								
		No Fault	P	PD	D1	D2	T1	T2	T3	DT
Predicted Faults	No Fault	21	0	0	1	0	3	1	1	0
	P	0	37	0	0	0	2	0	0	0
	PD	0	0	2	0	0	2	1	4	0
	D1	0	0	1	4	0	1	0	0	1
	D2	2	0	12	0	4	4	7	1	0
	T1	0	0	0	0	0	19	6	3	0
	T2	0	1	1	0	0	4	18	0	0
	T3	0	0	0	0	0	0	0	15	0
	DT	0	0	0	0	1	0	1	0	۴

جدول ۱۲: درجه دقت و صحت FIS طراحی شده در این تحقیق در تشخیص عیب T1 از سایر عیوب

Measure	F1(T1,NoFault)	F1(T1,P)	F1(T1,PD)	F1(T1,D1)	F1(T1,D2)	F1(T1,T2)	F1(T1,T3)	F1(T1,DT)	Total F1(T1)
Value,%	92.7%	95%	95%	97.4%	90.5%	79.2%	92.7%	100%	92.8%

جدول ۱۳: معیار F1 برای هر یک از عیوب داخلی ۱۸۵ ترانسفورماتور قدرت انتخاب شده

Measure	F1(NoFault)	F1(P)	F1(PD)	F1(D1)	F1(D2)	F1(T1)	F1(T2)	F1(T3)	F1(DT)
Value,%	97.7%	99.5%	73.55%	94.45%	77.2%	92.8%	93.6%	96.6%	95.8%

[2] IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineer – IEEE guide for the interpretation of gases generated in oil immersed transformer, IEEE Std C57.104–2008

[3] Lee, J.P., Lee, D.J., Ji, P.S., et al.: ‘Dissolved gas analysis of power transformer using fuzzy clustering and radial basis function neural network’. Int. Joint Conf. on Neural Networks, Vancouver, Canada, July 2006

[4] Castro, A.R.G., Miranda, V., Lima, S.: ‘Transformer fault diagnosis based on autoassociative neural networks’. 16th Int. Conf. on Intelligent System Application to Power Systems (ISAP), Hersonissos, Greek, 25–28 September 2011

[5] Guardado, J.L., Naredo, J.L., Moreno, P., et al.: ‘A Comparative study of neural networks efficiency in power transformers diagnosis using dissolved gas analysis’, IEEE Trans. Power Deliv., 2001, 16, pp. 643–647

[6] Gaikwad, S.G., Swami, P.S., Thosar, A.G.: ‘Comparison of conventional and fuzzy logic approach for DGA of EHV transformer’, Int. J. Recent Technol.Eng. (IJRTE), 2015, 4, pp. 30–37

[7] Abu-Siada, A., Hmood, S., Islam, S.: ‘A new fuzzy logic approach for consistent interpretation of dissolved gas-in-oil analysis’, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., 2013, 20, pp. 2343–2349

[8] Abu-Siada, A., Hmood, S.: ‘Fuzzy logic approach for power transformer asset management based on dissolved gas-in-oil analysis’, Chem. Eng. Trans. (CEt), 2013, 33, pp. 997–1002

صحيح در خصوص نحوه ادامه بهره برداری از ترانسفورماتور قدرت رسید.

یکی از محدودیت های سیستم استنتاج فازی طراحی شده در این تحقیق، تشخیص تنها یک عیب در ترانسفورماتوری است که دارای چند عیب هم زمان بوده است. گاهی اوقات این یک عیب نیز به اشتباه تشخیص داده می شود. لذا پیشنهاد می شود سیستم استنتاج فازی طراحی شده در این تحقیق، به گونه ای بهینه سازی شود که در تشخیص عیوب ترکیبی نیز دقت و صحت لازم را داشته باشد.

## ۷. منابع

[1] Suna, H.C., Huang, Y.C., Huang, C.M.: ‘A review of dissolved gas analysis in power transformers’. Second Int. Conf. on Advances in Energy Engineering (ICAEE), 2011

- [9] Cai, G., Liu, N., Yang, D.: 'The transformer fault diagnosis based on quantum neural network'. Int. Conf. on Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering (CMCE), Changchun, China, 24–26 August 2010
- [10] Sharma, E.N.: 'Power transformer diagnosis using fuzzy logic', Int. J. Latest Res. Sci. Technol., 2012, 1, pp. 149–151
- [11] Németh, B., Laboncz, S., Kiss, I.: 'Condition monitoring of power transformers using DGA and fuzzy logic'. IEEE Electrical Insulation Conf., Montreal, Canada, 31 May–3 June 2009
- [12] Cosemans, H.: 'Properties behind effective transformer oil cooling'. Transformer Life Management Conf., 2013
- [13] Soni, R., Chaudhari, K.: 'An approach to diagnose incipient faults of power transformer using dissolved gas analysis of mineral oil by ratio methods using fuzzy logic'. Int. Conf. on Signal Processing, Communication, Power and Embedded System (SCOPEs), 2016
- [14] Seifeddine, S., Khmais, B., Abdelkader, C.: 'Artificial intelligence tools aided-decision for power transformer fault diagnosis', Int. J. Comput. Appl., 2012, 38, pp. 1–8
- [15] IEC Publication 60567: 'Oil-filled electrical equipment – sampling of gases and oil for analysis of free and dissolved gases – Guidance', 2005–06
- [16] IEC Publication 60599: 'Interpretation of the analysis of gases in transformers and other oil-filled electrical equipment in service', 2014
- [17] Hmood, S., Abu-Siada, A., Masoum, M.A.S., et al.: 'Standardization of DGA interpretation techniques using fuzzy logic approach'. IEEE Int. Conf. on Condition Monitoring and Diagnosis, Bali, Indonesia, 23–27 September 2012
- [18] Chow, M.-Y., Irwin, J.D.: 'The industrial electronics handbook' (CRC Press, 1997)
- [19] Wang, L.-X.: 'A course in fuzzy systems and control' (Prentice-Hall International, Inc., 2014)
- [20] Fuzzy Logic Toolbox™: 'User's Guide' (The MathWorks, Inc., 2016)
- [21] Hoang, P., Tomsovic, K.: 'Design and analysis of an adaptive fuzzy power system stabilizer', IEEE Trans. Power Deliv., 1996, 11, pp. 455–461
- [22] Ramezani, S., Memariani, A.: 'A fuzzy rule based system for fault diagnosis, using oil analysis results', Int. J. Ind. Eng. Prod. Res., 2011, 22, (2), pp. 91–98
- [23] Espinosa, J., Vandewalle, J., Wertz, V.: 'Fuzzy logic, identification and predictive control' (Springer, London, 2005)
- [24] Zadeh, L.A.: 'Information and control' (Academic Press, New York, 1965)
- [25] Ekel, P., Kokshenev, I., Parreiras, R., et al.: 'Fuzzy set based models and methods of decision making and power engineering problems', Engineering, 2013, 5, (5A), pp. 41–51, doi: 10.4236/eng.2013.55A007
- [26] Yamagata, N., Miyagi, K., Oe, E.: 'Aging effects on mixture of thermally upgraded paper and Kraft paper in mineral oil'. Int. Symp. on High Voltage Engineering, Innes House, Johannesburg, 2009
- [27] Ariffin, M.F., Ghosh, P.S.: 'Estimating the age of paper insulation in 33/11 Kv distribution power transformers using mathematical modelling'. 19th Int. Conf. on Electricity Distribution, CIRED, Vienna, 21–24 May 2007
- [28] Miyagi, K., Oe, E., Yamagata, N.: 'Evaluation of aging for thermally upgraded paper in mineral oil', J. Int. Council Electr. Eng., 2011, 1, (2), pp. 181–187
- [29] Hajihosseini, P., Salahshoor, K., Moshiri, B.: 'Decentralized fault isolation by a combination of transfer entropy and classification methods', Chem. Eng. Commun., 2015, 202, pp. 1131–1144
- [30] Hajihosseini, P., Salahshoor, K., Moshiri, B.: 'Process fault isolation based on transfer entropy algorithm', ISA Trans., 2014, 53, pp. 230–240