

# تجربیات به دست آمده از عیب‌یابی ژنراتورهای نیروگاه‌های برق آبی ایران با استفاده از اندازه‌گیری تخلیه جزئی

محمد رحیمی<sup>۱</sup> اصغر اکبری ازیرانی<sup>۲</sup> پیتر ورله<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی- تهران- ایران

[m.rahimi@ee.kntu.ac.ir](mailto:m.rahimi@ee.kntu.ac.ir)

۲- استاد- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی- تهران- ایران

[akbari@kntu.ac.ir](mailto:akbari@kntu.ac.ir)

۳- استاد- انستیتو فشارقوی و مدیریت سرمایه- دانشگاه لایپنیتز هانوفر- هانوفر- آلمان

[werle@ifes.uni-hannover.de](mailto:werle@ifes.uni-hannover.de)

**چکیده:** در این مقاله به بررسی نتایج حاصل از انجام اندازه‌گیری‌های تخلیه جزئی بر روی بیش از ۲۵ ژنراتور نیروگاه‌های برق آبی کشور پرداخته شده است. کلیه عیوب ژنراتورها بررسی و تفکیک شده و گزارشی آماری از انواع عیوب عایقی ژنراتورها و سهم هر عیب آورده شده است. با استفاده از نتایج اندازه‌گیری‌های تخلیه جزئی آنلاین که به صورت هم‌زمان بر روی سه فاز انجام شده است به تفکیک عیوب مختلف به روش سه محوری و حذف نویز پرداخته شده است. اثر اندازه‌گیری در فرکانسهای بالا و پایین در عیوب مختلف بررسی شده است و ضرایبی برای تصحیح دامنه تخلیه‌های جزئی اندازه‌گیری شده در فرکانس بالا به منظور ارزیابی شدت وخامت عیب مورد نظر در فرکانس استاندارد ارائه شده است. الگوهای مبتنی بر فاز عیوب قابل تشخیص با استفاده از تحلیل تخلیه جزئی بررسی شده است. با توجه به اثر پذیری این الگوها از شرایط بار و دمای اندازه‌گیری، با ذکر چند عیب عایقی مشاهده شده، اثر تغییر بار و دما بر این الگوها بررسی شده است. با در نظر گرفتن اثرات تغییرات بار و دما امکان تحلیل دقیق‌تر داده‌های تخلیه جزئی و ارائه تخمین مناسب‌تر از وضعیت عایقی ژنراتور میسر خواهد شد.

**واژه‌های کلیدی:** تخلیه جزئی، عیوب عایقی، الگوی مبتنی بر فاز، اثر دما و بار.

**نوع مقاله:** پژوهشی

**DOI:** 10.52547/jiaeee.18.2.35

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۷/۸/۹

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۸/۱/۲۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۳/۳۱

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر اصغر اکبری ازیرانی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - تهران - خیابان شریعتی - ضلع جنوب شرقی پل سیدخندان - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی - دانشکده برق

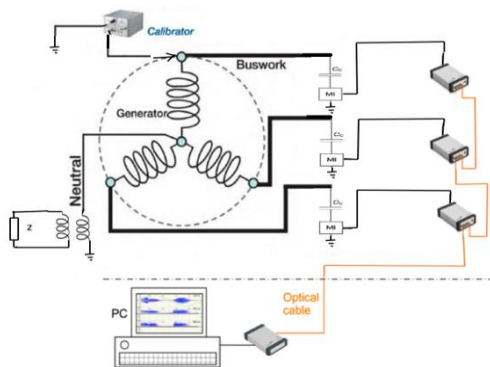
## ۱- مقدمه

روش عیب‌یابی به کمک تخلیه جزئی می‌تواند بهره‌بردار را برای انتخاب زمان و استراتژی مناسب جهت بهبود سیستم و تصحیح خرابی یاری نماید. اندازه‌گیری دوره‌ای تخلیه جزئی و تحلیل مناسب داده‌ها و بررسی روند تغییرات رخداد تخلیه جزئی از مواردی است که به تشخیص بهتر عیوب کمک شایانی می‌کند [۵].

طبق دستورالعمل استاندارد تخلیه جزئی [۶] اندازه‌گیری تخلیه جزئی در بازه‌های مختلف فرکانسی و با پهنای باند مختلف قابل انجام است، با این حال در مورد ژنراتورها توصیه شده است که اندازه‌گیری‌ها به صورت باند پهن انجام شود.

داده‌های تخلیه جزئی در این پروژه به کمک دستگاهی با پهنای باند بالا اندازه‌گیری شده است. محدوده فرکانسی ورودی به این دستگاه تا ۲۰ مگاهرتز است. با توجه به اینکه محدوده فرکانسی امپدانس اندازه‌گیری یا آشکارساز مورد استفاده بازه ۲۰ کیلوهرتز تا ۶ مگاهرتز است، اندازه‌گیری‌های ما محدود به این بازه خواهد بود. به طور معمول اندازه‌گیری‌های انجام شده در این مجموعه در دو بازه فرکانسی برای هر ژنراتور انجام شده است. بازه فرکانسی ۱۰۰ تا ۴۰۰ کیلوهرتز و بازه فرکانسی بالاتر در محدوده ۱/۷۵ تا ۳/۲۵ مگاهرتز. بازه اول بر اساس استاندارد IEC 60270:2000 و بازه دوم به منظور کاهش نویز محیطی در آن محدوده فرکانسی و امکان ثبت بهتر الگوها و تشخیص دقیقتر عیب انتخاب شده است.

در شکل (۱) مدار اندازه‌گیری تخلیه جزئی مشاهده می‌شود. برای انجام اندازه‌گیری از کوپلرهای خازنی نصب شده بر مدارهای ژنراتورها و یا در صورت موجود نبودن از کوپلر خازنی مجزا استفاده شده است. در شکل (۲) مدار اندازه‌گیری در حالیکه ژنراتور دارای کوپلر مخصوص نبوده و لذا از خازن کوپلاژ جداگانه برای اندازه‌گیری استفاده شده، نشان داده شده است. سیم‌بندی استاتور هر ژنراتور بزرگ معمولاً از چند مدار موازی تشکیل شده که در سالهای اخیر برای این ژنراتورها در ابتدای هر مدار موازی در محل خروج شینه از استاتور یک کوپلر خازنی مخصوص اندازه‌گیری تخلیه جزئی نصب شده و نیازی به اتصال خازن خارجی نیست. اندازه‌گیری‌ها به صورت هم‌زمان در هر سه فاز انجام شده و امکان استفاده از این داده‌ها در روش‌های کمکی برای تحلیل تخلیه جزئی ممکن است که در ادامه به آن پرداخته خواهد شد.



شکل (۱): مدار اندازه‌گیری تخلیه جزئی

امروزه انجام عیب‌یابی با استفاده از اندازه‌گیری تخلیه جزئی یکی از رایج‌ترین روش‌های تعیین وضعیت تجهیزات نیروگاهی است. بهبود قابلیت اعتماد سیستم تولید انرژی، تخمین وضعیت عایقی تجهیزات برای جلوگیری از رخ داد عیوب محتمل و خسارت بار و جلوگیری از وقوع قطعی‌های پیش‌بینی نشده از مزایای بهره‌گیری از این روش است [۱]. بیشترین آمار خرابی در قسمت‌های مختلف ژنراتورها مربوط به مشکلات عایقی است [۲]، لذا اندازه‌گیری تخلیه جزئی یکی از مهمترین روش‌های برای عیب‌یابی ژنراتورهاست. اندازه‌گیری تخلیه جزئی بر روی ژنراتورها به دو صورت آنالین و آفلاین صورت می‌پذیرد. یکی از مزایای انجام اندازه‌گیری‌ها به روش آنالین، مشاهده وضعیت ژنراتور تحت استرس‌های واقعی وارده بر ماشین در حالت عملکرد عادی آن در شبکه است، به علاوه، امکان انجام تست در حالات مختلف عملکردی از مواردی است که به افزایش قدرت تحلیل و تصمیم‌گیری به کمک این روش می‌انجامد [۳].

در این مقاله پس از تحلیلی آماری از عیوب مختلف عایقی ژنراتورهای برق‌آبی حاصل از اندازه‌گیری‌های مولفین و ارائه پارامترهای آماری نمودارهای PRPD عیوب مختلف عایقی، برخی از تجربیاتی که در اندازه‌گیری تخلیه جزئی بروی بیش از ۲۵ ژنراتور واحدهای نیروگاهی برق‌آبی در ایران به‌دست آمده، آورده شده است. اندازه‌گیری‌ها به روش برخط و در حالی که ژنراتور در حال کار بوده است، به صورت هم‌زمان بر روی سه فاز آن انجام شده است. با توجه به انجام تست‌ها در حالات مختلف بهره‌برداری، بررسی دقیقتر وضعیت تجهیزات و بررسی اثر شرایط مختلف دما و بارگیری بر روی اندازه‌گیری‌های انجام شده امکان پذیر شده و عیوب مختلف تخلیه جزئی مشاهده شده در ژنراتورهای مختلف از این نظر مورد مطالعه قرار گرفته است. چگونگی انتخاب بازه فرکانسی اندازه‌گیری و اثر اندازه‌گیری در فرکانسهای بالا و پایین در عیوب مختلف بررسی شده و ضرابی برای تصحیح دامنه تخلیه‌های جزئی اندازه‌گیری شده در فرکانس بالا به منظور ارزیابی شدت و خامت عیب مورد نظر بر اساس آنچه به صورت مرسوم در فرکانس مورد نظر استاندارد تخلیه جزئی IEC 60270 در نظر گرفته می‌شود ارائه شده است.

## ۲- تجهیزات اندازه‌گیری تخلیه جزئی

اندازه‌گیری تخلیه جزئی همواره به عنوان روشی غیر مخرب و با قابلیت اعتماد بالا در تشخیص وضعیت تجهیزات فشارقوی محسوب شده که همیشه می‌تواند برای عیب‌یابی تجهیز بویژه جهت اقدامات پیشگیرانه از خرابی به کار رود [۴]. با توجه به ماهیت دقیق اطلاعات به دست آمده، این روش می‌تواند برای تشخیص موثر نقاط ضعف عایقی ممکن در تجهیز به کار رود. به خاطر ماهیت فعالیت تخلیه جزئی که بسیار زودتر از رخداد عیوب خسارت بار در ماشین ظاهر می‌شود، استفاده از

مرتبط با شیار و عیوب رخ داده در سرکلاف‌ها هستند. در جدول (۱) مشخصات این عیوب آورده شده است.

با بررسی داده‌های حاصل از اندازه‌گیری‌های تخلیه جزئی انجام شده بر روی این مجموعه ۲۵ تایی از ژنراتورها، مشخص شد که هشت نوع عیب مختلف در سیستم عایقی این ژنراتورها وجود دارد. با توجه به اینکه در اکثر ژنراتورهای این مجموعه چندین عیب عایقی به طور هم‌زمان مشاهده شد، مجموعه آماری تعداد کل عیوب مشاهده شده در این اندازه‌گیری‌ها شامل ۷۰ مورد است. در شکل (۳) سهم هر یک از انواع عیوب عایقی در این مجموعه آماری مشخص شده است.

همانطور که مشاهده می‌شود، تخلیه‌های مربوط به نقاط انتهایی سیم‌پیچ بیشترین آمار را در بین تخلیه‌ها دارا هستند. تخلیه‌های سطحی در سرکلاف‌ها، تخلیه شینه به شینه در سرکلاف‌ها و کرونا در سرکلاف‌ها این گروه را تشکیل می‌دهند. تخلیه‌های سطحی در سرکلاف‌ها که بر اثر آلودگی در نقاط انتهایی تشدید شده‌اند بخش بزرگی از عیوب را شامل می‌شوند. ریسک مربوط به اینگونه تخلیه‌ها متوسط در نظر گرفته می‌شود. با توجه به میزان بالای اینگونه تخلیه‌های جزئی، نیاز به انجام دقیق‌تر تعمیرات و نگهداری در ژنراتورهای نیروگاه های برق آبی محسوس است.

جدول (۱): مشخصات عیوب عایقی قابل تشخیص به کمک اندازه‌گیری تخلیه‌های جزئی در ژنراتور [۹]

| نوع تخلیه جزئی     | محل                     | ریسک       |
|--------------------|-------------------------|------------|
| تخلیه              | سیم پیچ                 | کم         |
| داخلی              | فشارقوی                 | زیاد       |
|                    | تورق میان عایق و هادی   | زیاد       |
| تخلیه              | تخلیه شیار بر اثر لرزش  | زیاد       |
| شیاری              | تخلیه شیار الکتریکی     | استاتور    |
| تخلیه در سرکلاف‌ها | کرونا در سرکلاف‌ها      | سیم متوسط  |
|                    | تخلیه سطحی              | پیچی       |
|                    | تخلیه شینه به شینه      | سرکلاف‌ها  |
| تخلیه              | شکستگی در هادی یا اتصال | خروجی شیار |
| به صورت قوس        |                         | زیاد       |



شکل (۲): خازن خارجی نصب شده روی فازهای ژنراتور و بخشی از تجهیزات اندازه‌گیری تخلیه جزئی

اندازه‌گیری‌های انجام شده به صورت آنلاین و بر روی همه ژنراتورها بر اساس استاندارد با قرار گرفتن ماشین تحت ولتاژ نامی و سپس بارگیری در حالتی که ماشین در حال عملکرد عادی است انجام شده است. در دسترس بودن داده‌های مربوط به شرایط مختلف بارگیری و دمایی واحد به تحلیل دقیق تر و نتایج بهتر کمک فراوانی نموده است.

یکی از چالش‌های اندازه‌گیری تخلیه‌ی جزئی تداخلات الکترومغناطیسی و نویز است. سیستم مورد استفاده با دارا بودن بخش‌های مجزا و ارتباط میان این بخش‌ها توسط کابل‌های نوری، از تاثیر پذیری اندازه‌گیری‌ها از نویزهای احتمالی کاسته است. علاوه بر این، با توجه به اثر تغییر بازه فرکانسی اندازه‌گیری بر شدت اثر پذیری داده‌ها از نویز، همه اندازه‌گیری‌ها در دو بازه فرکانسی (با فرکانس اشاره شده در استاندارد و در فرکانس بالاتر) انجام شده است [۷]. در شرایطی که به دلیل نویز بالای محیط داده‌های تخلیه جزئی به شدت همراه با نویز می‌شوند، استفاده از اندازه‌گیری‌های با فرکانس مرکزی بالاتر راهگشاست.

### ۳- بررسی‌های آماری اندازه‌گیری‌های انجام شده

#### ۳-۱- انواع عیوب عایقی مشاهده شده

با توجه به اینکه در این دوره بر روی بیش از ۲۵ ژنراتور نیروگاه‌های آبی اندازه‌گیری تخلیه جزئی انجام شده است، می‌توان با در نظر گرفتن این تعداد به عنوان جامعه آماری، به بررسی عیوب موجود و پرتکرار در این دسته از ژنراتورها پرداخت. به‌طور کلی، عیوب عایقی در ژنراتورها بیش از ۵۴ درصد از عیوب کلی آن‌ها را تشکیل می‌دهند [۸]. اکثر این عیوب توسط روش تحلیل تخلیه‌های جزئی و یا با همراهی این روش و سایر روش‌ها قابل تشخیص هستند. عیوبی که در سیستم عایقی استاتور رخ می‌دهند و توسط اندازه‌گیری تخلیه جزئی قابل شناسایی هستند به‌طور کلی شامل عیوب تخلیه داخلی، عیوب

قدرتمندترین روش‌ها برای تشخیص عیوب تخلیه جزئی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۱]. در این الگوها، دامنه تخلیه‌های جزئی رخ داده با توجه به فاز رخ دادن آنها در سیکل ولتاژ اعمالی ترسیم می‌شود. برای هر تخلیه جزئی نوعی، بیشینه تخلیه به عنوان یک نقطه در نمودار قرار گرفته و با توجه به تعدد تکرار تخلیه‌ها و اعمال بازه رنگی بر اساس شدت تکرار، الگوهای مختلف برای عیوب مختلف عایقی در ژنراتورها مشخص می‌شود.

با توجه به تفاوت‌های ظاهری نمودارهای PRPD عیوب عایقی مختلف می‌توان در مورد عیوب ژنراتورهای مختلف تصمیم‌گیری نمود. یکی از روشهایی که می‌تواند در تشخیص عیوب عایقی توسط سیستم‌های اندازه‌گیری تخلیه جزئی به کار گرفته شود استخراج مؤلفه‌های آماری مختلف از نمودارهای PRPD است. مؤلفه‌هایی که در این قسمت از آن‌ها استفاده شده عبارتند از کشیدگی (Kurtosis)، چولگی (Skewness) و همبستگی متقابل (Cross-correlation). در روابط (۱-۵)، چگونگی محاسبه این مؤلفه‌ها به همراه روابط میانگین و واریانس استفاده شده آورده شده است [12,13].

$$\text{Average: } \mu = \frac{\sum_{i=1}^N x_i f(x_i)}{\sum_{i=1}^N f(x_i)} \quad (1)$$

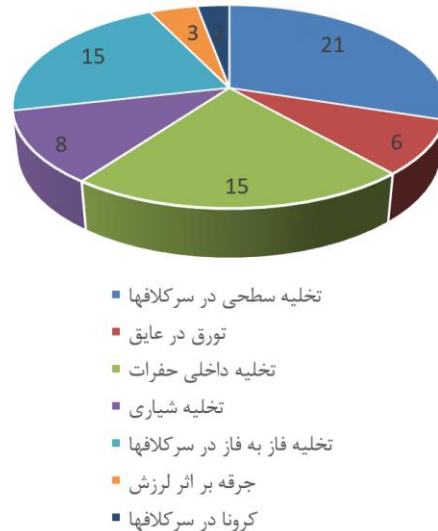
$$\text{Variance: } \sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2 f(x_i)}{\sum_{i=1}^N f(x_i)} \quad (2)$$

$$\text{Skewness: } S_k = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^3 f(x_i)}{\sigma^3 \sum_{i=1}^N f(x_i)} \quad (3)$$

$$\text{Kurtosis: } K_u = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^4 f(x_i)}{\sigma^4 \sum_{i=1}^N f(x_i)} - 3 \quad (4)$$

$$\text{Cross-correlation: } cc = \frac{\sum_{i=1}^N x_i^+ x_i^- - \sum_{i=1}^N x_i^+ \sum_{i=1}^N x_i^- / N}{\sqrt{\left[ \sum_{i=1}^N (x_i^+)^2 - \left( \sum_{i=1}^N x_i^+ \right)^2 / N \right] \left[ \sum_{i=1}^N (x_i^-)^2 - \left( \sum_{i=1}^N x_i^- \right)^2 / N \right]}} \quad (5)$$

در روابط فوق  $x_i$  فاز مربوط به تخلیه جزئی رخ داده،  $f(x_i)$  میزان بار تخلیه جزئی مذکور با معیار IEC،  $N$  تعداد پنجره‌های فاز در نظر گرفته شده و  $x_i^+$  و  $x_i^-$  تخلیه‌های جزئی مربوط به سیکل با دامنه مثبت و منفی ولتاژ اعمالی است.



شکل (۳): تقسیم بندی آماری تخلیه‌های جزئی مشاهده شده

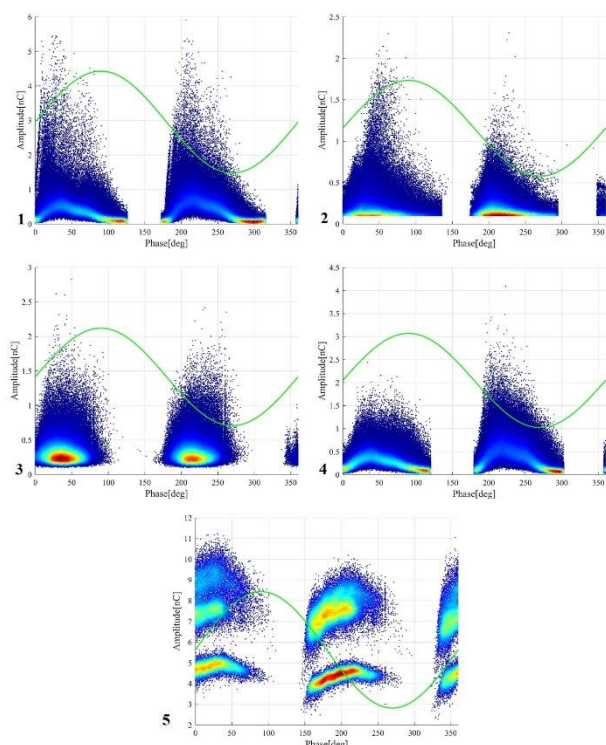
تخلیه‌های شکاری در برخی از واحدها مشاهده شده که با توجه به ریسک بالای این عیوب نیاز به بررسی و چاره‌جویی در این واحدها وجود دارد. تخلیه در شیار استاتور، تخلیه‌های مربوط به تورق در لایه‌های عایق و جداسازی لایه عایق و هادی از جمله این عیوب هستند.

تخلیه داخلی حفرات نیز در بخش زیادی از واحدها مشاهده شده است. ریسک مربوط به این نوع تخلیه در ژنراتورها به دلیل ساختار عایقی آنها عموماً بسیار پایین بوده و مشکلی را ایجاد نمی‌کنند. تخلیه‌هایی که به صورت جرقه در اندازه‌گیری‌های انجام شده مشاهده شده‌اند، تخلیه‌هایی با دامنه بالا و با تعداد پایین هستند که خطر احتمالی بالایی برای سیستم عایقی ژنراتور داشته و تاکنون به طور جدی در تحقیقات مورد بررسی قرار نگرفته‌اند.

به طور کلی، ریسک تخلیه‌های جزئی بیش از اینکه به طور مشخص به رخ دادن انواع مختلف تخلیه جزئی و خرابی‌ای که در اثر آن ممکن است، وابسته باشد به چگونگی پیشرفت عیب و اثرگذاری تخلیه جزئی بر سیستم عایقی است. از نظر زمانی، تخلیه‌های جرقه مانند در شیار استاتور قدرت کافی برای خرابی سریع سیستم عایقی را دارند. در مورد سایر عیوب عایقی، تخلیه شکاری سریع‌ترین عیب و تخلیه‌های مربوط به نقاط انتهایی سیم‌پیچ و تخلیه‌های داخلی زمان رسیدن به خرابی طولانی‌تری دارند. تخلیه‌های شینه به شینه معمولاً حدود ۵ سال یا بیشتر زمان برای رسیدن به خرابی عایقی را دارند. در مورد تخلیه‌های داخلی و عیوب مرتبط با تورق معمولاً زمانی کمتر از ده سال تا رسیدن به خرابی عایقی مد نظر قرار داده می‌شود. اثرات تخلیه‌های درون حفرات نیز قابل اغماض است [۱۰].

### ۳-۲- بررسی مؤلفه‌های آماری نتایج اندازه‌گیری‌ها

الگوهای مبتنی بر فاز تخلیه جزئی (PRPD) که اولین بار در اواخر دهه هفتاد میلادی ارائه شدند، هم‌اکنون به عنوان یکی از مهم‌ترین و



شکل (۴): نمودارهای PRPD مرتبط با عیوب عایقی مختلف، ۱- تخلیه سطحی در سرکلافها ۲- تخلیه در لایه‌های متورق عایق ۳- تخلیه داخلی ۴- تخلیه شیاری ۵- تخلیه شینه‌به‌شینه

مؤلفه‌های آماری و متغیرهای معرفی شده برای عیوب عایقی مختلف واحدهای مختلف نیروگاهی محاسبه شده و مقادیر میانگین آن‌ها در ادامه آورده شده است. این متغیرها در جدول (۲) مشاهده می‌شوند. در این جدول،  $N$  تعداد پالس‌های تخلیه جزئی عیب مربوطه در یک ثانیه از اندازه‌گیری،  $N_{Asym}$  نسبت تعداد پالسها در نیم سیکل منفی به نیم سیکل مثبت و فاز شروع محل شروع الگوی تخلیه جزئی در نمودار PRPD است که برای نیم سیکل مثبت و منفی ولتاژ ژنراتور مشخص شده است.

جدول (۲): مقادیر متغیرهای معرفی شده عیوب مختلف عایقی

| نوع عیب                | $Q_{IEC+}$ (nC) | $Q_{Asym}$ | $N$ (Pulse/s) | $N_{Asym}$ | فاز شروع  |
|------------------------|-----------------|------------|---------------|------------|-----------|
| تخلیه سطحی در سرکلافها | 51              | 1.005      | 7090          | 1.038      | 18°-202°  |
| تخلیه عایق متورق       | 29              | 0.72       | 12700         | 0.74       | 349°-170° |
| تخلیه داخلی            | 9.8             | 0.98       | 17790         | 0.96       | 335°-158° |
| تخلیه شیاری            | 25              | 1.86       | 19100         | 1.34       | 350°-170° |
| تخلیه شینه‌به‌شینه     | 34              | 0.99       | 1930          | 0.88       | 340°-160° |

با استفاده از روابط (۳-۵) مقادیر چولگی، کشیدگی و همبستگی متقابل برای نمودارهای PRPD عیوب عایقی ذکر شده برای واحدهای مختلف محاسبه شده و مقادیر میانگین آن‌ها برای هر عیب به دست آمده است. در شکل (۵) مقادیر مذکور به همراه بازه تغییرات آن‌ها

چولگی عدم تقارن نمودار تخلیه‌های جزئی را نسبت به توزیع نرمال نشان می‌دهد. اگر نمودار متقارن باشد  $S_k$  برابر با صفر، اگر نمودار نامتقارن بوده و به سمت چپ متمایل باشد  $S_k$  مثبت و در صورت تمایل شکل نمودار به سمت راست  $S_k$  منفی است. کشیدگی توصیف کننده میزان قله‌ای بودن یا مسطح بودن یک نمودار است. اگر نمودار متناسب با توزیع نرمال باشد  $K_{II}$  برابر صفر است. اگر نمودار تیزتر و یا مسطح‌تر از نمودار توزیع نرمال باشد به ترتیب  $K_{II}$  مقادیری مثبت و یا منفی را خواهد داشت.

برای انجام محاسبات آماری ابتدا داده‌های عددی نمودارهای PRPD استخراج شده و مؤلفه‌های آماری برای همه عیوب تشخیص داده شده در این مجموعه تحقیقات محاسبه شده است. با توجه به وجود عیوب مختلف به‌طور همزمان در اکثر واحدهای نیروگاهی، ابتدا با روشهایی که در قسمت ۴-۱ توضیح داده شده است عیوب مختلف جداسازی شده و نمودارهای PRPD مرتبط با هر یک از این عیوب به دست آمده است. با توجه به اینکه برخی داده‌ها با نویزهای مختلفی همراه بوده‌اند، تلاش شده است تا با حذف نویزها پیش از انجام محاسبات آماری، این نمودارها با دقت کافی ترسیم شوند.

با توجه به اینکه نمودارهای تخلیه جزئی PRPD شامل دو نیم سیکل ولتاژ اعمالی هستند، برای محاسبه مؤلفه‌های آماری داده‌های این دو نیم سیکل به صورت جداگانه به صورت نیم سیکل مثبت و منفی با توجه به ولتاژ ژنراتور در هنگام تست در نظر گرفته شده است. در نتیجه این موضوع، برخی پارامترهای محاسبه شده با پسوند مثبت و منفی مشخص شده‌اند که مربوط به این نیم سیکل‌ها هستند. در اکثر نمودارهای PRPD عیوب عایقی، الگوها از صفر ولتاژ شروع نمی‌شوند و معمولاً با اختلاف فاز همراه هستند، از این رو برای محاسبه دقیقتر مؤلفه‌های آماری نقاط شروع الگوها در نیم سیکل مثبت و منفی مشخص شده و با جابجایی فاز نمودار مناسب به دست آمده است.

علاوه بر مؤلفه‌های آماری ذکر شده، متغیرهای دیگری برای سنجش نمودارهای PRPD به کار گرفته شده است که در ادامه معرفی می‌شوند.  $Q_{IEC}$  طبق آنچه در استاندارد IEC 60270 آمده به صورت بار ظاهری مربوط به تخلیه‌های جزئی با نرخ تکرار ۱۰ بار در ثانیه تعیین و محاسبه شده است. مقادیر بیشینه  $Q_{IEC}$  در نیم سیکل های مثبت و منفی با  $Q_{IEC+}$  و  $Q_{IEC-}$  و مقدار عدم تقارن مربوط به این بار در دو نیم سیکل مثبت و منفی با رابطه (۶) مشخص شده است.

$$Q_{Asym} = \frac{Q_{IEC-}}{Q_{IEC+}} \quad (6)$$

در شکل (۴) نمودارهای PRPD مربوط به عیوب عایقی مختلف که محاسبات آماری برای آن‌ها انجام شده است به صورت نمونه برای یک واحد نشان داده شده است.



هوشمند از جمله آموزش الگوریتم‌های مختلف دسته بندی فراهم می‌کند. استفاده از روشهای دسته‌بندی بر اساس مشخصه‌های آماری به همراه سایر روش‌های عیب‌یابی از جمله مباحثی است که در ادامه این تحقیق به آن پرداخته خواهد شد.

#### ۴- نتایج اندازه‌گیری‌های انجام شده

در این قسمت نتایج برخی از اندازه‌گیری‌های انجام شده و نکات حائز اهمیت درباره آن‌ها آورده شده است. انجام اندازه‌گیری‌های تخلیه جزئی در شرایط مختلف بارگیری و دمایی ژنراتور و دو بازه فرکانسی مختلف امکان مقایسه داده‌های حاصله را فراهم کرده و سبب افزایش دقت در تشخیص عیوب عایقی می‌شود.

##### ۴-۱- جداسازی عیوب مختلف

به طور معمول در بررسی الگوهای تخلیه جزئی ژنراتورها وجود عیوب مختلف و متعدد در واحد سبب در هم رفتگی الگوهای مبتنی بر فاز ناشی از هر عیب شده و امتزاج این الگوها با اشکال مختلف و دامنه‌های مختلف مربوط به هر عیب سبب ناتوانی و اشکال در تشخیص عیوب از این طریق توسط متخصص می‌شود.

یکی از روش‌های موجود برای جداسازی این الگوها روش 3PARD است. اساس این روش بر تفاوت دامنه‌های پالس‌های تخلیه جزئی مشاهده شده ناشی از یک پالس تخلیه که در کوپلر فازهای مختلف بصورت همزمان آشکار شده استوار است. با استفاده از این روش الگوهای مربوط به عیوب با منشا متفاوت یا محل رخ داد متفاوت در محل‌های مختلف در نمودار سه محوری ظاهر می‌شوند و بدین صورت امکان جداسازی عیوب مختلف را میسر می‌سازد [۱۴]. در ادامه مبنای روش 3PARD آورده شده است.

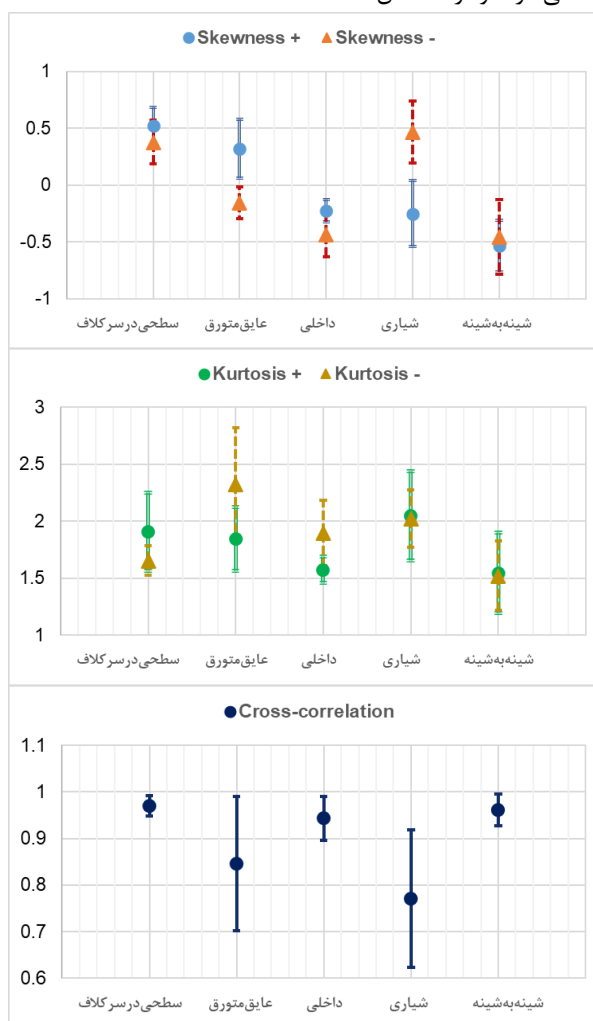
مقادیر  $|q_R|$ ،  $|q_S|$ ،  $|q_T|$  بار ظاهری تخلیه جزئی است که توسط دستگاه اندازه‌گیری ثبت شده است. در این روش بردارهایی به تخلیه‌های جزئی مربوط به هر فاز به صورت روابط (۷) تا (۹) نسبت داده می‌شود و با رسم جمع برداری آن‌ها طبق رابطه (۱۰) بر روی نمودار 3PARD نقطه مربوط به این تخلیه جزئی به صورت شکل (۶) مشخص می‌شود.

$$\vec{q_R} = |q_R| \angle 0^\circ \quad (7)$$

$$\vec{q_S} = |q_S| \angle 120^\circ \quad (8)$$

$$\vec{q_T} = |q_T| \angle 240^\circ \quad (9)$$

برای عیوب مختلف عایقی نشان داده شده است. هر یک از مؤلفه‌های چولگی و کشیدگی برای نیم سیکل مثبت و منفی محاسبه شده و همبستگی متقابل میان الگوهای تخلیه جزئی در دو نیم سیکل مثبت و منفی در نمودار مشخص شده است.

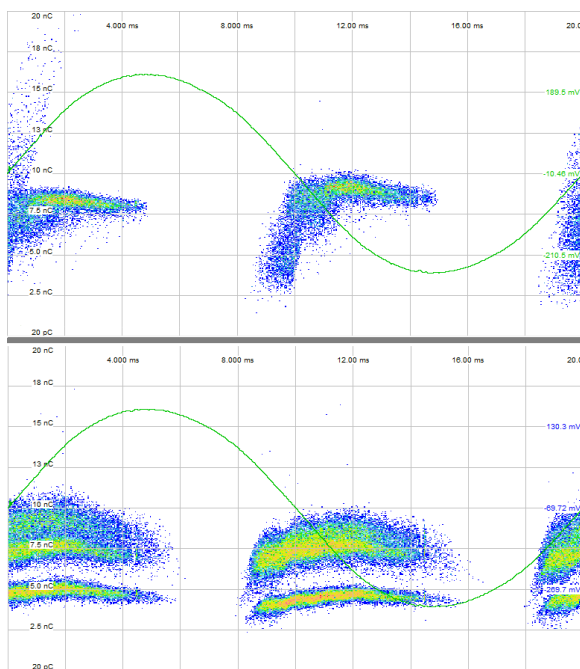


شکل (۵): مؤلفه‌های آماری الگوهای تخلیه جزئی در نمودارهای PRPD عیوب مختلف عایقی

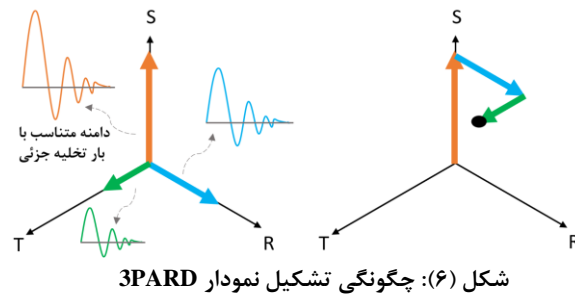
با دقت در نمودار شکل (۵) مشاهده می‌شود که مقادیر همبستگی متقابل میان نیم سیکل مثبت و منفی برای عیوب تخلیه سطحی در سرکلافها، داخلی و شینه به شینه تایید کننده شباهت الگوهای دو نیم سیکل در این عیوب است. برای عیوب تخلیه شیاری و عایق متورق تفاوت زیاد بین این دو نیم سیکل دیده می‌شود. با توجه به تفاوت‌ها در مقادیر مؤلفه‌های آماری و مقادیر سایر متغیرهای معرفی شده می‌توان از این مقادیر به عنوان راهنما در تفکیک عیوب مختلف از روی الگوهای نمودارهای PRPD استفاده نمود.

مؤلفه‌های آماری ذکر شده در این بخش به همراه سایر پارامترها پیش از این در مراجع مرتبط ارائه شده است. در دست بودن این مقادیر برای تعداد زیادی از واحدهای برق آبی پایگاه داده مناسبی را برای پیش‌برد تحقیق در زمینه سیستم‌های تشخیص عیب عایقی

بارگیری که به طور معمول دربردارنده نویز بیشتری هستند کارساز بوده و امکان مقایسه بین شرایط مختلف عملکرد را مهیا می‌سازد. یکی از مواردی که در استفاده از این روش مشاهده شد، تغییرات این الگو در اندازه‌گیری‌های با فرکانس‌های مختلف است. در اندازه‌گیری‌های با فرکانس‌های مختلف که در مورد یک ژنراتور انجام شده است، تغییرات زیادی در نمودار سه محوری ترسیم شده ایجاد می‌شود. در شکل (۹) نمونه‌ای از این تغییرات آورده شده است. نمودارهای 3PARD رسم شده برای فرکانسهای اندازه‌گیری بالاتر (در مورد شکل (۷) با فرکانس مرکزی ۴/۵ مگاهرتز) تفکیک شده تر هستند و امکان جداسازی بهتر عیوب را در مقایسه با نمودارهای مربوط به فرکانسهای پایین تر (نمودار شکل (۷)) را مهیا می‌سازند. لازم به ذکر است که نقاط متعدد نارنجی و قرمز موجود در نمودار شکل (۹) مربوط به پالس‌های سوئیچینگ مربوط به ادوات الکترونیک قدرت می‌باشند که البته در اندازه‌گیری‌های فرکانس پایین با شدت بیشتری ظاهر می‌شوند و تا حدودی به کمک این روش نیز قابل حذف کردن می‌باشند.



شکل (۸): عیوب تفکیک شده با روش 3PARD. بالا: الگوی PRPD عیب عایقی فاز S، پایین: الگوی PRPD عیب عایقی فاز R

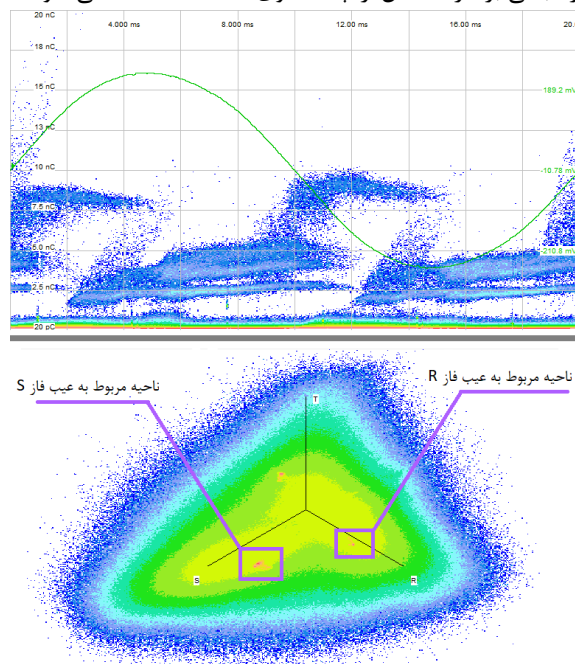


شکل (۶): چگونگی تشکیل نمودار 3PARD

$$\overrightarrow{q_{3PARD}} = \overrightarrow{q_R} + \overrightarrow{q_S} + \overrightarrow{q_T} \quad (10)$$

در صورتی که در الگوهای تخلیه جزئی PRPD شاهد پدیده القای پالس‌های تخلیه جزئی میان فازهای مجاور باشیم، این تخلیه‌ها در نمودار 3PARD در مجاورت فاز اصلی (که این تخلیه‌ها با دامنه بیشتری ثبت شده است) قرار می‌گیرند که به کمک این روش امکان تشخیص آنها و ساده‌سازی عیب‌یابی ممکن می‌شود.

در شکل (۷) نمونه‌ای از جداسازی به وسیله این روش برای نمودار مبتنی بر فاز متشکل از چند الگوی مختلف مشاهده می‌شود.



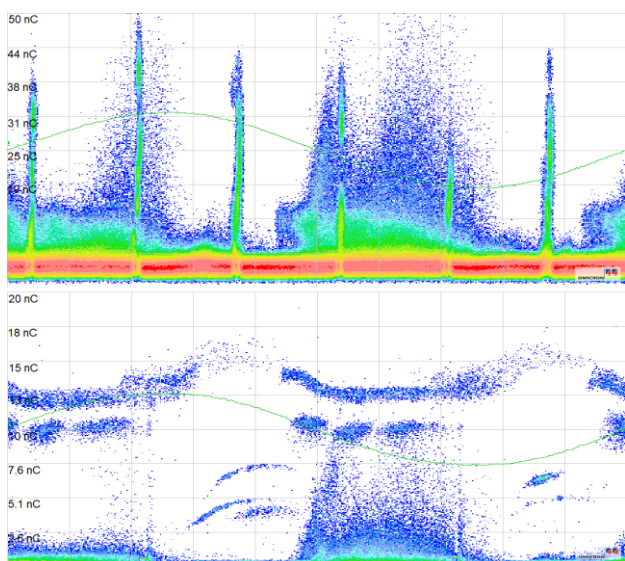
شکل (۷): جداسازی عیوب مختلف با روش 3PARD. ۱- الگوی PRPD عیوب چندگانه مختلف، ۲- استفاده از روش 3PARD برای جداکردن عیوب فازهای R و S

در نمودار این روش عیوب عایقی برای فازهای R و S که الگوی مربوط به آنها در نمودار PRPD با هم ترکیب شده در خوشه‌های جداگانه قرار گرفته و قابل تفکیک می‌باشند. همانطور که در شکل (۸) مشخص است، دو عیب مختلف موجود در این واحد در فازهای مختلف ژنراتور به کمک این روش کاملاً تفکیک شده‌اند و عیوب تخلیه‌شینه به شینه و تخلیه سطحی در انتهای شینه‌ها قابل تشخیص هستند. استفاده از این روش برای تفکیک الگوهای مربوط به

بالتر می‌تواند کارگشا بوده و سبب کاهش قابل ملاحظه نویز زمینه در اندازه‌گیری‌ها شود.

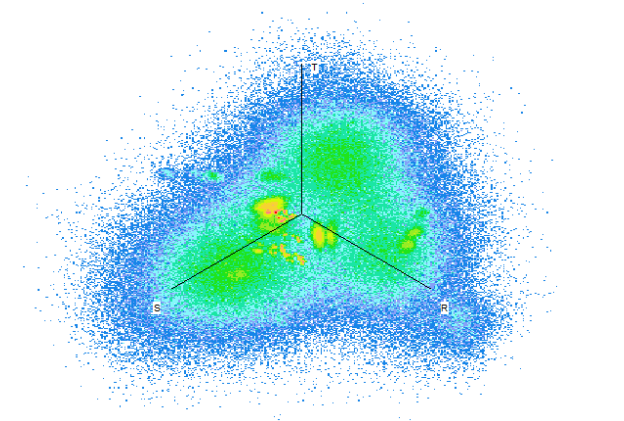
شکل (۱۰) نتایج اندازه‌گیری در فرکانس ۴۰۰-۱۰۰ kHz (بازه قابل قبول در استاندارد IEC) و فرکانس ۵/۷۵ MHz - ۳/۲۵ را برای یک فاز یک ژنراتور ۱۴۰ مگاواتی نشان می‌دهد. در هر دو حالت دستگاه اندازه‌گیری تخلیه جزئی کالیبره شده است. با مقایسه دو شکل مشاهده می‌شود که نویزهای ۶ پالسی مربوط به سیستم تحریک ژنراتور در اندازه‌گیری با فرکانس بالاتر دیده نمی‌شوند. دلیل این مشاهده در شکل (۱۱) که در آن پالس نویز مربوط به سیستم تحریک نشان داده شده قابل تشخیص است. با دقت در نمودار تبدیل فوریه این پالس دیده می‌شود که محتوای فرکانسی این پالس اکثراً در بازه فرکانسی پایین تر از ۲/۵ MHz قرار داشته و لذا حذف این گونه پالس‌ها در اندازه‌گیری‌های با بازه فرکانسی بالاتر مورد انتظار است.

همچنین در اندازه‌گیری‌های با فرکانس بالاتر، علاوه بر حذف پالس‌های ۶ تایی، نویز زمینه نیز تا حدی کاهش می‌یابد. همانند پالس‌های سوئیچینگ سیستم تحریک، محتوای فرکانسی این پالس‌ها در بازه فرکانسی پایین تری قرار دارد که در اندازه‌گیری‌های فرکانس بالا کمتر نشان داده می‌شود.



شکل (۱۰): نتایج PRPD برای یک ژنراتور ۱۴۰ مگاواتی در حالت، ۱- فرکانس IEC ۲- ۵/۷۵ MHz - ۳/۲۵

بر اساس شکل‌های (۱۰ و ۱۱)، اندازه‌گیری در فرکانس بالاتر سطوح نویز را کاهش داده و اندازه‌گیری و تحلیل را تسهیل می‌کند. با این حال، همانطور که در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود، الگوی تخلیه جزئی نیز ممکن است دستخوش تغییر شود و سبب تغییر اشتباه از نتایج گردد. به عنوان مثال در این اندازه‌گیری، با توجه به اندازه‌گیری در فرکانس IEC عیب تخلیه شیاری تشخیص داده می‌شود ولی در اندازه‌گیری فرکانس بالا عیب تخلیه شینه به شینه غالب و مورد توجه است. در این مورد هر دو عیب در ژنراتور تحت تست وجود داشته ولی



شکل (۹): نمودار PARD3 مربوط به الگوی رسم شده پیشین در فرکانس اندازه‌گیری بالاتر (فرکانس مرکزی ۴/۵ مگاهرتز)

در استفاده از این روش با انتخاب خوشه‌های مختلف تفکیک شده در نمودار 3PARD، عیوب مختلف به صورت جداگانه قابل مشاهده هستند. به طور مثال در مورد پالس‌های الکترونیک قدرت ذکر شده، با انتخاب و حذف نقاط مربوط به آنها، شاهد حذف آنها در نمودارهای PRPD خواهیم بود (پالس‌های الکترونیک قدرت مربوط به سیستم تحریک به صورت پالس‌هایی با دامنه‌های مختلف در یک فاز خاص در نمودار PRPD نشان داده می‌شوند، مانند نمونه ۱ شکل (۷)). متأسفانه تاکنون الگوی خاصی برای عیوب مختلف تخلیه جزئی در این نمودارها به دست نیامده و صرفاً با در نظر گرفتن یا حذف خوشه‌های مختلف ایجاد شده در این نمودار می‌توان به تفکیک عیوب مختلف پرداخت.

در این بررسی، از روش 3PARD که در مرجع شماره [۱۴] مبانی آن به تفصیل معرفی شده است برای کمک به تفکیک عیوب در نمودارهای PRPD در عیب‌یابی ژنراتورهای واحدهای برق آبی استفاده شده است که در مواردی که عیوب متعددی در سیستم عایقی تجهیز دیده می‌شود با امکان تفکیک عیوب به عیب‌یابی بهتر کمک شایانی نموده است. لازم به ذکر است که تغییر نمودارهای 3PARD در اندازه‌گیری‌های با فرکانس‌های مختلف که ناشی از تغییر محتوای فرکانسی پالس‌های ثبت شده است، توسط محققین در این بررسی‌ها مشاهده شده که بررسی دقیق‌تر این موضوع در آینده دور از نظر نخواهد بود.

## ۲-۴- بررسی اثر بازه فرکانسی اندازه‌گیری

اگرچه در اکثر اندازه‌گیری‌ها طبق بازه فرکانسی پیشنهادی استاندارد IEC 60270 عمل می‌شود و فرکانس‌های زیر یک مگا هرتز به کار می‌رود، در برخی اندازه‌گیری‌هایی که در نیروگاه انجام می‌شود، به خصوص تست‌های آنالیز، نویز محیط به اندازه‌ای بالاست که اندازه‌گیری دقیق تخلیه جزئی در بازه فرکانسی مطابق استاندارد مذکور ممکن نیست. در این حالت، انجام اندازه‌گیری‌ها در فرکانس‌های



با استفاده از نسبت به دست آمده در جدول (۳) می‌توان نتایج به دست آمده از اندازه‌گیری‌های فرکانس بالا را به اندازه‌گیری‌های فرکانس IEC به منظور یافتن موثرترین عیب تخلیه جزئی مرتبط نمود. با توجه به اینکه مقادیر تخلیه‌های جزئی در فرکانس IEC معیار تصمیم‌گیری در مورد وضعیت سیستم عایقی ژنراتور است، بررسی اندازه‌گیری‌های فرکانس بالا (که معمولاً از نویز محیطی تاثیر کمتری می‌پذیرند) و مقایسه دامنه با استفاد از ضرایب به دست آمده در این بخش به تشخیص دقیق تر عیوب سیستم عایقی ژنراتور کمک زیادی می‌کند.

با دقت در نتایج مشخص می‌شود که عیوبی که به محل اندازه‌گیری تخلیه جزئی در باس خروجی ژنراتور نزدیکتر هستند، مانند تخلیه سطحی در سرکلافها و تخلیه شینه به شینه در سرکلافها، در اندازه‌گیری فرکانس بالا نسبتاً با دامنه بیشتری ظاهر می‌شوند. در صورتی که عیوبی چون تخلیه داخلی با نسبت دامنه بسیار کمتری در اندازه‌گیری فرکانس بالا نمود پیدا می‌کنند. با توجه به این موارد برای استفاده از اندازه‌گیری‌های فرکانس بالا علاوه بر تغییر دامنه با توجه به نسبت به دست آمده، نیاز است که نمودارهای PRPD را با دقت برای یافتن عیوب ممزوج بررسی نمود، زیرا عیوب مهمی چون تخلیه شیری با دامنه کمتری ظاهر شده و ممکن است نادیده گرفته شوند. لذا استفاده از اندازه‌گیری‌های با فرکانس بالاتر به عنوان ابزار کمکی در تحلیل بهتر نتایج به همراه اندازه‌گیری فرکانس مورد تایید IEC پیشنهاد می‌شود.

### ۴-۳- بررسی اثر بارگیری و دما

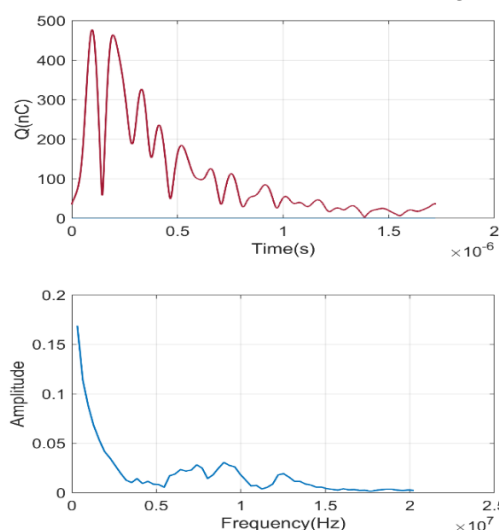
به منظور بررسی اثر بارگیری و دما، همه ژنراتورها با دور نامی راه‌اندازی شده و ولتاژ به تدریج تا مقدار نامی افزایش یافته است. در این زمان اندازه‌گیری تخلیه جزئی انجام شده (حالت آماده به کار)، سپس کلید ژنراتور (GCB) بسته شده و ژنراتور به شبکه متصل و بارگیری آغاز شده است. اندازه‌گیری تخلیه جزئی تا رسیدن به دمای پایدار و نهایی ادامه داشته است.

با بررسی نتایج اندازه‌گیری‌های تخلیه جزئی انجام شده در شرایط مختلف دمایی و بار، مشخص شد که در برخی عیوب عایقی اثرات این شرایط بر الگوهای مبتنی بر فاز تاثیرگذار است. در ادامه این موارد شرح داده خواهد شد.

### ۴-۳-۱- تخلیه‌های جزئی داخلی

یکی از رایج ترین انواع تخلیه‌های جزئی در ژنراتورها تخلیه‌های داخلی هستند. در شکل (۱۲) نمونه ای از الگوی مرتبط با این نوع تخلیه آورده شده است. این الگو مربوط به تخلیه‌های جزئی داخلی رخ داده درون حفرات عایق است. این نوع تخلیه به طور معمول مشکلی را برای سیستم عایقی ایجاد نمی‌کند، زیرا عایق‌های اپوکسی-میکا که

عیب تخلیه شیری در اندازه‌گیری فرکانس بالا بیشتر تحت تاثیر قرار گرفته و کاهش یافته است.



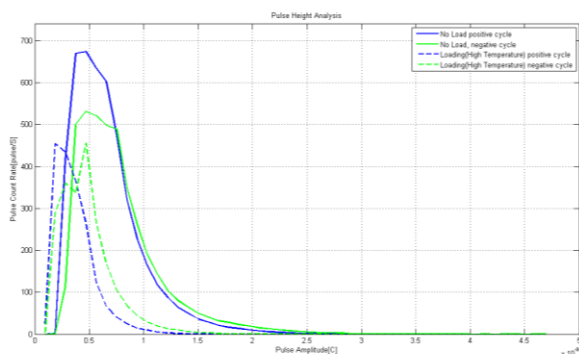
شکل (۱۱): ۱- شکل پالس نویز مربوط به سیستم تحریک ۲- محتوای فرکانسی آن

اندازه‌گیری در فرکانس‌های پایین مورد تایید استاندارد IEC 60270 کاهش دامنه را در عیوب مورد نظر ایجاد نمی‌کند و به همین دلیل برای تشخیص شدت وخامت عیب مناسب است. از آنجایی که همواره امکان انجام اندازه‌گیری در فرکانس IEC به خاطر سطوح بالای نویز ممکن نیست، بررسی چگونگی تخفیف یافتن عیوب مختلف در اندازه‌گیری‌های با فرکانس بالا کمک زیادی به عیب‌یابی خواهد نمود. جدول (۳) نتیجه مطالعه درباره اثر تغییر فرکانس در اندازه‌گیری تخلیه جزئی در ۲۵ ژنراتور را نشان می‌دهد. در همه حالات اندازه‌گیری فرکانس بالا در بازه ۵/۷۵ - ۳/۲۵ MHz انجام شده و مقدار بار اندازه‌گیری شده با اندازه‌گیری بر روی همان واحد در بازه فرکانسی ۴۰۰-۱۰۰ kHz (IEC) مقایسه شده است. این بازه فرکانسی پس از انجام اندازه‌گیری‌های مختلف به منظور کسب بهینه ترین حالت از نظر میزان نویز و حفظ شکل الگوهای تخلیه جزئی به دست آمده است.

جدول (۳): چگونگی کاهش سطح تخلیه جزئی عیوب مختلف در

اندازه‌گیری فرکانس بالا

| نوع عیب تخلیه جزئی             | $Q_{IEC}$ | $Q_{HF}$ | $Q_{HF}/Q_{IEC}$ |
|--------------------------------|-----------|----------|------------------|
| تخلیه سطحی در سرکلافها         | ۴۷ nC     | ۳۱ nC    | ۰/۶۷             |
| تورق عایق                      | ۲۹/۴ nC   | ۶/۴۴ nC  | ۰/۲۲             |
| تخلیه داخلی                    | ۹/۱ nC    | ۱/۰۵ nC  | ۰/۱۲             |
| تخلیه شیری                     | ۲۳ nC     | ۴/۷ nC   | ۰/۲              |
| تخلیه شینه به شینه در سرکلافها | ۳۰ nC     | ۲۱ nC    | ۰/۷              |

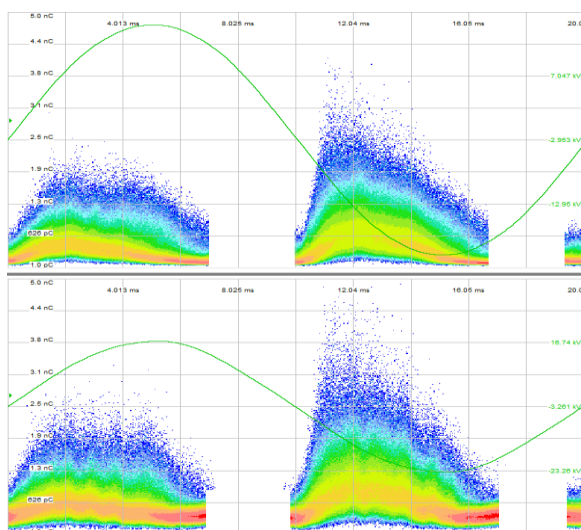


شکل (۱۳): نمودار تعداد پالس بر حسب دامنه برای تخلیه جزئی داخلی درون حفرات عایق در حالت بی باری و بارگیری و دمای بالا

#### ۴-۳-۲- تخلیه های جزئی شیاری

مهمترین و خطرناکترین تخلیه جزئی در ژنراتورها تخلیه های شیاری هستند. شکل (۱۴) الگوی مربوط به نمونه ای از تخلیه جزئی شیاری در یک ژنراتور را نشان می دهد.

رخ دادن تخلیه جزئی شیاری ریسک خطا در عملکرد ژنراتور را افزایش می دهد. این نوع تخلیه جزئی در فاصله هوایی میان هسته و شینه ها رخ می دهد. این عیب زمانی رخ می دهد که مقاومت لایه نیمه هادی شینه زیاد باشد یا زمانی که در اثر لرزش شینه و خوردگی پوشش نیمه هادی، عایق در معرض استرس ولتاژی زیادی در برابر هسته زمین شده قرار گیرد [۱۶]. این نوع تخلیه به صورت الگوی نامتقارن در دامنه و تعداد پالسهای رخ داده در سیکل های مثبت و منفی ولتاژ اعمالی ظاهر می شود. دامنه پالس های نیم سیکل منفی بیشتر بوده و شیب تند در هنگام شروع تخلیه در نیم سیکل منفی ولتاژ اعمالی از مشخصه های این الگو می باشد.

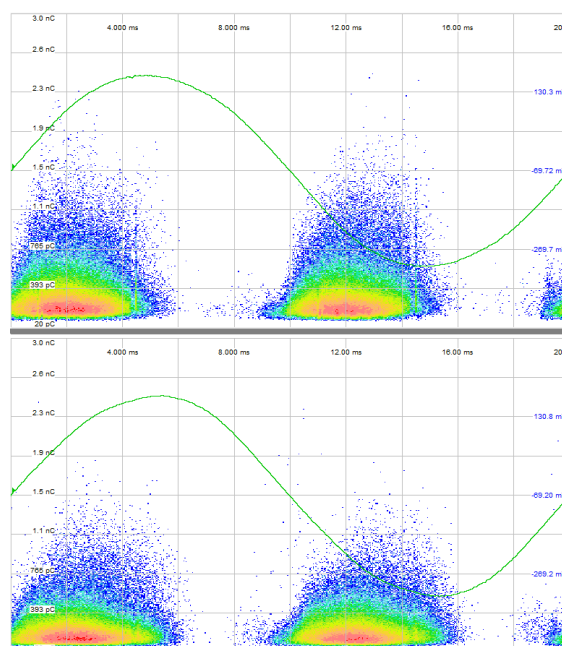


شکل (۱۴): الگوی مبتنی بر فاز تخلیه جزئی شیاری، ۱- در حالت بدون بار، ۲- در حالت بارگیری

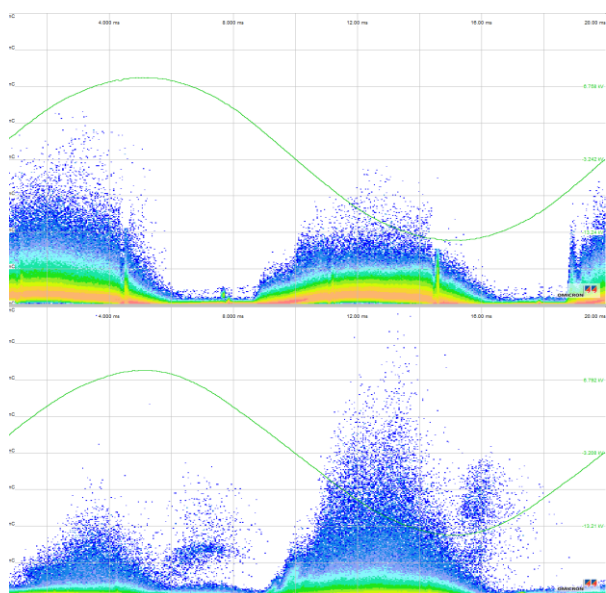
اکنون مورد استفاده قرار می گیرند در برابر این عیوب برای سالیان متمادی به خوبی مقاومت می کنند [۳].

فعالیت تخلیه جزئی داخلی به صورت الگویی متقارن در سیکل های مثبت و منفی هم از نظر دامنه و هم از نظر تعداد پالس های رخ داده در نمودارهای مبتنی بر فاز مشاهده می شود.

با دقت در شکل (۱۲) مشخص است که دامنه تخلیه های جزئی درون حفرات عایق با بارگیری و افزایش دمای ژنراتور نسبت به حالت بدون بار کاهش پیدا کرده است. دلیل احتمالی این مورد افزایش حجم حفرات درون عایق با افزایش دمای ژنراتور است که سبب کاهش رخ داد تخلیه های جزئی شده است. در شکل (۱۳) نمودار تعداد پالسهای تخلیه جزئی بر حسب دامنه برای این عیب رسم شده است. با دقت در این نمودار علاوه بر کاهش دامنه تخلیه های جزئی، کاهش تعداد تخلیه های جزئی نیز با افزایش دمای ژنراتور مشاهده می شود. این تغییر نیز در اثر تغییر ساختار فیزیکی حفرات درون عایق صورت گرفته است. لازم به ذکر است که این تغییرات در دماهای بالاتر از نقطه تبدیل دمایی به شیشه برای عایق میکا صورت گرفته است. در این نقطه ماده عایقی از حالت شیشه ای و محکم به حالتی با الاستیسیته بیشتر تغییر پیدا می کند [۱۵].

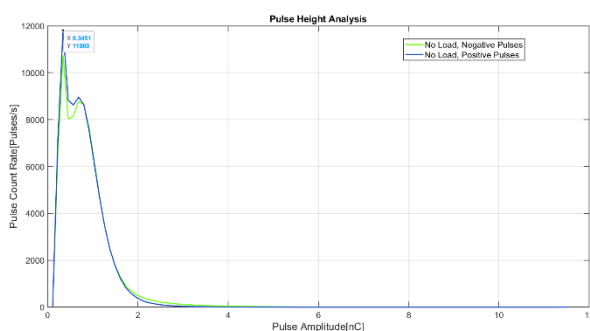


شکل (۱۲): الگوی مبتنی بر فاز تخلیه داخلی درون حفرات عایق، ۱- در حالت بدون بار ژنراتور، ۲- در حالت بارگیری و دمای بالا



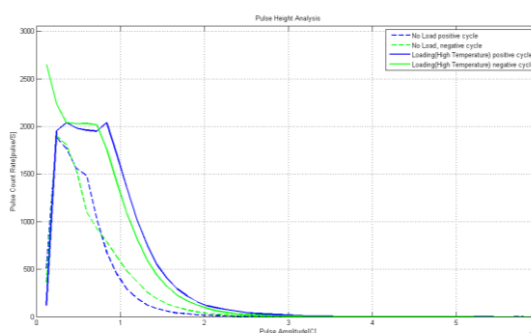
شکل (۱۶): الگوی مبتنی بر فاز تخلیه جزئی در عایق متورق، ۱-در حالت بدون بار، ۲-در حالت بارگیری

این عیب در حالت بی باری ژنراتور و دمای پایین آن مشاهده شده است. با آغاز بارگیری و افزایش دما این الگو به سرعت محو شده و قابل تشخیص نمی‌باشد. این مورد به دلیل بالا رفتن دمای ژنراتور و انبساط شینه و کم شدن تورق حاصل از آن در میان هادی شینه و عایق رخ می‌دهد. علاوه بر این با افزایش دما عیوب دیگر با دامنه‌های بیشتر به صورت عیوب غالب ظاهر می‌شوند و سبب محو شدگی این الگو می‌شوند که با دقت در شکل (۱۶) در حالت اول عیب مربوط به تورق کاملاً مشخص است ولی با افزایش دما این عیب کاهش یافته و عیوب دیگر، تخلیه شیاری، خود را بیشتر نشان می‌دهند. در این حالت خاص افزایش دما سبب افزایش فعالیت تخلیه جزئی شیاری شده است. نمودار تعداد تخلیه بر حسب دامنه برای این عیب در شکل (۱۵) رسم شده است. با توجه به حذف این عیب در بارگیری، این نمودار تنها در حالت بی باری ترسیم شده است.



شکل (۱۷): نمودار تعداد پالس بر حسب دامنه برای تخلیه جزئی شیاری در حالت بی باری و بارگیری

نمودار تعداد تخلیه بر حسب دامنه برای این عیب در شکل (۱۵) رسم شده است. با دقت در این نمودار و الگوی مبتنی بر فاز، در حالت بارگیری ژنراتور افزایش در دامنه و تعداد تخلیه‌های جزئی رخ داده در شیاری استاتور مشاهده می‌شود. افزایش دما سبب افزایش شکل‌گیری الکترونهای شروع کننده و تداوم فرایند بهمن الکترونی به سبب افزایش انرژی گرمایی الکترون‌ها است [۱۷]. علاوه بر این، افزایش بارگیری ژنراتور سبب افزایش لرزش در شینه‌ها، در حالتی که گوه‌ها محکم نباشند، شده و این جابجایی شینه در شیاری سبب افزایش تخلیه‌های جزئی مربوط می‌شود. در مورد ژنراتور مورد بحث، افزایش تخلیه‌های جزئی به دلیل افزایش دما مشاهده شد، زیرا هنگام شروع بارگیری افزایش قابل توجهی در فعالیت تخلیه جزئی صورت نگرفت.



شکل (۱۵): نمودار تعداد پالس بر حسب دامنه برای تخلیه جزئی شیاری در حالت بی باری و بارگیری

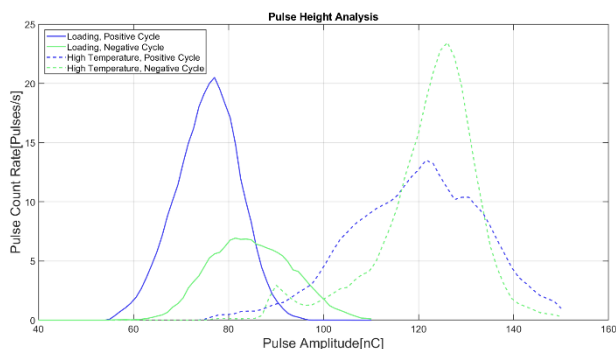
### ۴-۳-۳- تخلیه جزئی در عایق متورق

نمودار شکل (۱۶) الگوی تخلیه جزئی مبتنی بر فاز را برای تخلیه جزئی در عایق متورق را نشان می‌دهد. دو نوع تخلیه جزئی مرتبط با تورق در ژنراتورها رخ می‌دهد، تورق در لایه‌های عایق و دیگری تورق و جدا شدگی عایق در نزدیکی هادی شینه هاست. عیب مرتبط با الگوی ترسیم شده در این شکل مربوط به تورق عایق در فاصله نزدیک به هادی شینه هاست.

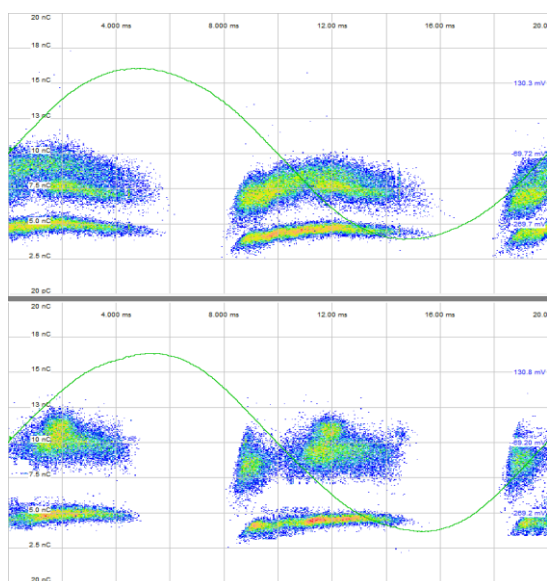
## ۴-۳-۴- تخلیه جزئی شینه به شینه

یکی از عیوبی که در این مجموعه اندازه‌گیری‌ها به تعدد در ژنراتورها مشاهده شد، تخلیه شینه به شینه در سرکلایهای ژنراتور است. این عیب زمانی به وجود می‌آید که فاصله هوایی بین شینه‌ها در نقاط انتهایی کمتر از مقدار لازم برای تحمل استرس ولتاژی باشد. این عیب سبب کاهش کیفیت عایقی و ایجاد گردی سفید رنگ در سرکلایها نیز می‌شود. این عیب می‌تواند میان فازهای مختلف و یا میان یک فاز و انتهای دیگر زمین شده همان فاز رخ دهد. الگوی مبتنی بر فاز برای این عیب به صورت تخلیه‌های با دامنه تقریباً ثابت در نیم سیکل مثبت و منفی ولتاژ اعمالی قابل تشخیص است. برخی مواقع الگو با شیف‌ت فازی ۳۰ درجه‌ای مشاهده می‌شود که نشان از تخلیه جزئی بین فازهای متفاوت است. در شکل (۲۰) نمودار مبتنی بر فاز این نوع تخلیه مشاهده می‌شود. در اکثر موارد تخلیه جزئی شینه به شینه، سطح فعالیت این نوع تخلیه متأثر از تغییرات دمای سیم پیچ هاست. همانگونه که در شکل (۱۸) و شکل (۱۹) مشاهده می‌شود، پس از بارگیری ژنراتور، با کارکرد آن و افزایش دمای سیم پیچ‌ها، دامنه تخلیه‌های جزئی شینه به شینه افزایش یافته است. این افزایش ناشی از افزایش انرژی الکترونها و افزایش آنها در فرایند ایجاد بهم‌الکترونی است و رخداد بیشتر تخلیه جزئی را سبب می‌شود.

در برخی از ژنراتورهای تحت بررسی، مشاهده شد که هنگام بارگیری ژنراتور، تخلیه‌های شینه به شینه در مقایسه با حالت بی‌باری افزایش پیدا می‌کنند. با توجه به عدم تغییر دمای سیم پیچ‌ها در کوتاه مدت، افزایش سطح اینگونه تخلیه‌های جزئی ناشی از لرزش سرکلای سیم پیچ‌ها و محکم نبودن آنهاست که سبب تغییر نمودار PRPD مرتبط با این عیب می‌شود که در شکل (۲۰) قابل مشاهده است.



شکل (۱۹): نمودار تعداد پالس بر حسب دامنه برای تخلیه جزئی شیاری در حالت بارگیری و رسیدن به دمای نهایی کار ژنراتور

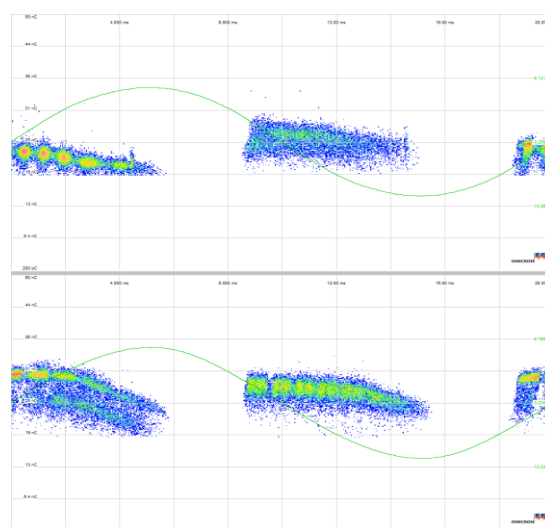


شکل (۲۰): نمودار مبتنی بر فاز تخلیه جزئی شینه به شینه، ۱-در حالت بدون بار، ۲-در حالت بارگیری

با توجه به نمودار مبتنی بر فاز این عیب، مشخص می‌شود که در بارگیری ژنراتور، سطح دامنه تخلیه‌های شینه به شینه افزایش می‌یابد که احتمالاً به دلیل لرزش حاصل از بار بر شینه‌های ژنراتور رخ داده است.

## ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله تجربیات به دست آمده از انجام اندازه‌گیری تخلیه جزئی بر روی ژنراتورهای متعددی از نیروگاه‌های برق‌آبی ارائه شده است. با توجه به کثرت اندازه‌گیری‌ها، پس از بررسی داده‌های تخلیه جزئی کلیه عیوب عایقی ژنراتورهای تحت اندازه‌گیری بررسی و معین شده و سهم هریک از عیوب مختلف در این جامع آماری مشخص شده است. با تحلیل داده‌های نمودارهای PRPD مؤلفه‌های آماری مختلفی برای عیوب مختلف عایقی در این واحدها به دست آمده است. با در دسترس بودن این مجموعه داده‌های آماری، امکان استفاده از این داده



شکل (۱۸): نمودار مبتنی بر فاز تخلیه جزئی شینه به شینه، ۱-در حالت ابتدای بارگیری، ۲-پس از رسیدن به پایداری دمایی



- [4] G. Stone, "A perspective on online partial discharge monitoring for assessment of the condition of rotating machine stator winding insulation," IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 28, no. 5, 2012.
- [5] مذهب جعفری علی، اکبری ازیرانی اصغر. مدلسازی سیم پیچ ترانسفورماتورهای قدرت با استفاده از مدل خط انتقال چند سیمه بمنظور مکانیابی تخلیه جزئی. مجله مهندسی برق و الکترونیک ایران. ۱۳۸۸؛ ۶ (۱): ۷۳-۸۳
- [6] I. S. IEC, "60270, High Voltage Test Techniques-Partial Discharge Measurements," International Electrotechnical Commission, 2000.
- [7] G. C. Stone, B. Lloyd, and M. Sasic, "Experience with continuous on-line partial discharge monitoring of generators and motors," in Condition Monitoring and Diagnosis, 2008. CMD 2008. International Conference on, 2008, pp. 212-216: IEEE.
- [8] Y. Luo, Z. Li, and H. Wang, "A Review of Online Partial Discharge Measurement of Large Generators," Energies, vol. 10, no. 11, p. 1694, 2017.
- [9] G. C. Stone, E. A. Boulter, I. Culbert, and H. Dhirani, Electrical insulation for rotating machines: design, evaluation, aging, testing, and repair. John Wiley & Sons, 2004.
- [10] S. Li and J. M. Chow, "Partial Discharge Measurements on Hydro Generator Stator Windings Case Studies," IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 23, no. 3, pp. 5-15, 2007.
- [11] T. Tanaka and T. Okamoto, "Analysis of qn and  $\phi$ -q characteristics of partial discharge in several electrode systems," in Electrical Insulation, 1980 IEEE International Conference on, 1980, pp. 190-193: IEEE.
- [12] A. Contin and S. Pastore, "Classification and separation of partial discharge signals by means of their auto-correlation function evaluation," IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 16, no. 6, pp. 1609-1622, 2009.
- [13] N. Sahoo, M. Salama, and R. Bartnikas, "Trends in partial discharge pattern classification: a survey," IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 12, no. 2, pp. 248-264, 2005.
- [14] W. Koltunowicz and R. Plath, "Synchronous multi-channel PD measurements," IEEE Transactions on Dielectrics and electrical Insulation, vol. 15, no. 6, 2008.
- [15] Farahani, M., E. Gockenbach, H. Borsi, and M. Kaufhold. "A method for the evaluation of insulation systems for high voltage rotating machines." In Proceedings of the 7th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials (Cat. No.

ها در سیستم های تعیین عیب خودکار و ترکیب روش دسته بندی با استفاده از مؤلفه های آماری با سایر روشها و ادامه تحقیق در این زمینه فراهم شده است. استفاده از روش سه محوری برای جداسازی عیوب مختلف عایقی به انجام دقیق تر عیب‌یابی کمک زیادی نموده است. اثر تغییر بازه فرکانسی اندازه‌گیری تخلیه جزئی بر نتایج روش سه محوری در این پژوهش مشاهده شد که نیاز به بررسی‌های بیشتر در این زمینه وجود دارد. با مقایسه نتایج عیوب مختلف در اندازه‌گیری های فرکانس بالا و اندازه‌گیری در فرکانس IEC 60270 چگونگی تغییر دامنه تخلیه های جزئی در این اندازه‌گیری های مشخص شده و ضرابی برای تصحیح دامنه تخلیه جزئی اندازه‌گیری انجام شده در فرکانس بالا به میزان مورد نظر فرکانس IEC ارائه شده است که تاکنون در پژوهش‌های پیشین در این زمینه به آن اشاره نشده است و به عنوان روشی جدید به بالا بردن دقت عیب‌یابی با استفاده از نمودارهای PRPD کمک می‌کند. با استفاده از این ضرایب میتوان در شرایطی که میزان نویز در اندازه‌گیری فرکانس IEC بالاست، اندازه‌گیری را در فرکانس بالاتری انجام داد و شدت تخلیه جزئی در فرکانس IEC را تخمین زده و در مورد وضعیت عایقی ژنراتور اظهار نظر نمود. در ادامه با توجه به اثر تغییرات شرایط اندازه‌گیری از قبیل بار و دمای استاتور بر عیوب عایقی، با مشخص نمودن موارد تاثیر پذیر از این شرایط، چگونگی تغییرات الگوهای مبتنی بر فاز تخلیه جزئی در این عیوب بررسی گردید که ضمن اینکه موید یافته های پیشین در مراجع مرتبط با این زمینه است، با توجه به تعدد واحدهای نیروگاهی بررسی شده در این پژوهش، این نتایج اهمیت به‌سزایی خواهد داشت. با استفاده از نتایج به‌دست‌آمده، تحلیل دقیق تر و تشخیص بهتر عیوب عایقی ژنراتورها با استفاده از اندازه‌گیری تخلیه جزئی میسر خواهد بود.

## سپاسگزاری

بر خود لازم می‌دانیم که از مدیریت نیروگاه‌های برق‌آبی در شرکت مدیریت منابع آب ایران برای فراهم کردن امکان انجام این اندازه‌گیری‌ها تقدیر و تشکر نماییم.

## مراجع

- [۱] جهانگیر حمید، اکبری ازیرانی اصغر، ورله پیترو. "بررسی عملکرد پروب‌های HF در آشکارسازی تخلیه جزئی در ترانسفورماتورهای فشار قوی". مجله مهندسی برق و الکترونیک ایران. ۱۳۹۷؛ ۱۵ (۳): ۳۳-۴۳
- [2] G. Stone, "Condition monitoring and diagnostics of motor and stator windings-A review," IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 20, no. 6, pp. 2073-2080, 2013.
- [3] C. Hudon and M. Belec, "Partial discharge signal interpretation for generator diagnostics," IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 12, no. 2, pp. 297-319, 2005.

- 03CH37417), vol. 3, pp. 1108-1111. IEEE, 2003.
- [16] C. Hudon, M. Bélec, and M. Lévesque, "Study of slot partial discharges in air-cooled generators," IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 15, no. 6, pp. 1675-1690, 2008.
- [17] van Breen, H. J., E. Gulski, J. J. Smit, H. F. A. Verhaart, and W. de Leeuw. "The importance of generator operating conditions on PD data evaluation." In Conference Record of the the 2002 IEEE International Symposium on Electrical Insulation (Cat. No. 02CH37316), pp. 582-585. IEEE, 2002.

