

Vol. 14/ No. 53/Autumn 2024

Research Article

# A Complete Analysis for Detection and Localization of Partial Discharges in XLPE Cables, Power Transformers and Generators

Amir Ghaedi, Associate Professor<sup>1\*</sup>  | Reza Sedaghati, Assistant Professor<sup>2</sup>  | Mehrdad Mahmoudian, Assistant Professor<sup>3</sup> 

<sup>1</sup>Department of Electrical Engineering, Dariun Branch, Islamic Azad University, Dariun, Iran, Amir.ghaedi@miau.ac.ir

<sup>2</sup>Department of Electrical Engineering, Beyza Branch, Islamic Azad University, Beyza, Iran, Reza.sedaghati@iau.ac.ir

<sup>3</sup>Department of Electrical and Electronic Engineering, Apadana Institute of Higher Education, Shiraz, Iran, m.mahmoudian@apadana.ac.ir

**Correspondence**

Amir Ghaedi, Associate Professor of Electrical Engineering, Dariun Branch, Islamic Azad University, Dariun, Iran, Amir.ghaedi@miau.ac.ir

**Received:** 15 July 2023  
**Revised:** 4 August 2023  
**Accepted:** 14 August 2023

**Abstract**

The failures of the power system are caused by insulation damages of HV apparatus including transformers, HV cables and generators. They are expensive. In the beginning, insulation failures occur in limited regions of insulation, which is called partial discharge (PD). When PDs are not detected online, they will spread along the insulation and bridge the whole of the insulation that eventually results in total breakdown. Thus, the HV apparatus fails. In this research, different sensors such as HFCT and coupling capacitor required to detect the PD of different HV devices including power transformers, HV cables, switchgears, motors and generators are introduced. The properties of PD signals occurred in HV apparatus is determined by experimental results related to PD signals detected from these HV apparatus. Then, an approach uses the correlation between signals energy is suggested to determine the location of PD occurred in the HV devices. The suitability of the proposed approach is satisfied by simulating the PD signals in the EMTP-RV software and processing the detected signals by MATLAB software. It is concluded from the experimental outcomes that the suggested sensors can accurately detect the PD signals occurred in the XLPE cables and transformers. The outcomes shown that the suggested method based on the correlation between signals energy can accurately determine the location of PD source in HV devices.

**Keywords:** Partial Discharge, Power Transformer, XLPE Cable, Correlation, EMTP-RV Software.

**Highlights**

- Performing a complete study on various sensors used for partial discharge detecting in the power transformers, high voltage cables and generators.
- Localization of partial discharges occurred in the power transformers, high voltage cables and generators through detecting of similarity and correlation of PD signals.
- Investigating the effectiveness of localization of PDs in the high voltage apparatus by simulation performed by MATLAB and EMTP-RV software.

**Citation:** A. Ghaedi, R. Sedaghati, and M. Mahmoudian, "A Complete Analysis for Detection and Localization of Partial Discharges in XLPE Cables, Power Transformers and Generators," *Journal of Southern Communication Engineering*, vol. 14, no. 53, pp. 29–52, 2024, doi:10.30495/jce.2023.1991428.1213, [in Persian].

## مقاله پژوهشی

## تجزیه و تحلیل کامل برای تشخیص و مکان یابی تخلیه های جزئی در کابل های XLPE، ترانسفورماتورهای قدرت و ژنراتورها

امیر قائدی\*<sup>۱</sup> | رضا صداقتی<sup>۲</sup> | مهرداد محمودیان<sup>۳</sup>

## چکیده:

اکثر خرابی های سیستم قدرت ناشی از آسیب های عایقی در تجهیزات فشار قوی از جمله ترانسفورماتورهای قدرت، کابل های فشار قوی و موارد مشابه است که گران ترین تجهیزات در سیستم قدرت هستند. خرابی های عایقی در مراحل اولیه در قسمت های محدودی از عایق رخ می دهد که به آن تخلیه جزئی (PD) گفته می شود. اگر این تخلیه ها به موقع تشخیص داده نشوند، در امتداد عایق گسترش می یابند و کل عایق را پوشش داده و در نهایت منجر به تخلیه کامل و آسیب عایقی تجهیزات فشار قوی می شوند. در این مقاله، حسگرهای مختلفی مانند ترانسفورماتور جریان فرکانس بالا و خازن کوپلینگ که برای تشخیص PD در تجهیزات فشار قوی مختلف از جمله ترانسفورماتورهای قدرت، کابل های فشار قوی، کلیدهای قدرت، موتورها و ژنراتورها مورد نیاز هستند، معرفی می شوند. ویژگی های سیگنال های PD ایجاد شده در تجهیزات فشار قوی با استفاده از نتایج تجربی مربوط به سیگنال های PD تشخیص داده شده از این تجهیزات فشار قوی تعیین می شود. سپس یک روش مبتنی بر همبستگی بین انرژی سیگنال ها برای تعیین محل PD رخ داده در تجهیزات فشار قوی پیشنهاد می شود. اثربخشی روش پیشنهادی با شبیه سازی سیگنال های PD در نرم افزار EMTP-RV و پردازش سیگنال های تشخیص داده شده با استفاده از نرم افزار MATLAB تأیید می شود. از نتایج تجربی استنباط می شود که حسگرهای پیشنهادی می توانند به دقت PD رخ داده در کابل های XLPE و ترانسفورماتورها را تشخیص دهند. این نتایج نشان می دهند که تکنیک پیشنهادی مبتنی بر همبستگی بین انرژی سیگنال ها می تواند به دقت محل وقوع PD در تجهیزات فشار قوی را تعیین کند.

کلید واژه ها: تخلیه جزئی، ترانسفورماتور قدرت، کابل XLPE، همبستگی، نرم افزار EMTP-RV

<sup>۱</sup> گروه برق، واحد داریون، دانشگاه آزاد اسلامی، داریون، ایران.  
amir.ghaedi@iau.ac.ir

<sup>۲</sup> گروه برق، واحد بیضا، دانشگاه آزاد اسلامی، بیضا، ایران.  
Reza.sedaghati@iau.ac.ir

<sup>۳</sup> دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی برق، موسسه آموزش عالی آپادانا شیراز، ایران.  
m.mahmoudian@apadana.ac.ir

نویسنده مسئول

<sup>\*</sup> امیر قائدی، دانشیار، گروه برق، واحد داریون، دانشگاه آزاد اسلامی، داریون، ایران.  
amir.ghaedi@iau.ac.ir

تاریخ دریافت: ۲۴ تیر ۱۴۰۲

تاریخ بازنگری: ۱۳ مرداد ۱۴۰۲

تاریخ پذیرش: ۲۳ مرداد ۱۴۰۲

<https://doi.org/10.30495/jce.2023.1991428.1213>

## ۱-مقدمه

امروزه، قابلیت اطمینان سیستم قدرت که منجر به ارائه خدمات مداوم با حداقل قطعی برق می شود، یک ویژگی مهم از سیستم قدرت است. تجربه نشان داده است که بیشتر خرابی های ثابت شده در سیستم قدرت ناشی از آسیب عایقی تجهیزات فشار قوی از جمله ترانسفورماتورهای قدرت، کابل های XLPE فشار قوی، موتورها و ژنراتورها، کلیدهای قدرت و موارد مشابه است. این تجهیزات گران ترین دستگاه های شبکه برق هستند و بنابراین خرابی آن ها می تواند هزینه های زیادی را به سیستم قدرت تحمیل

کند. تخلیه‌های جزئی (PD) سیگنال‌های فرکانس بالایی هستند که در محدوده کوچکی از عایق تجهیزات فشار قوی ناشی از کاهش استحکام عایق در آن ناحیه رخ می‌دهند. اگر این سیگنال‌های PD در مراحل اولیه تشخیص داده نشوند، در امتداد عایق گسترش می‌یابند و کل عایق را پوشش می‌دهند که منجر به شکست کامل عایق می‌شود. بنابراین، پایش وضعیت سیگنال‌های PD رخ داده در تجهیزات فشار قوی سیستم قدرت برای جلوگیری از آسیب عایقی این تجهیزات مهم است. با توجه به اهمیت تشخیص PD در تجهیزات سیستم قدرت، تحقیقات زیادی برای بررسی این سیگنال‌های فرکانس بالا رخ داده در تجهیزات فشار قوی از جمله ترانسفورماتورهای قدرت، کابل‌های XLPE، کلیدهای قدرت، موتورها و ژنراتورها انجام شده است. در [۱]، یک روش برای مکان‌یابی منابع مختلف PD با استفاده از متدولوژی‌های یادگیری ماشین از جمله استخراج ویژگی‌ها با کمک محاسبات ریاضی و طبقه‌بندی آنها پیشنهاد شده است. در این مقاله، حسگرهای نوری برای ثبت PD رخ داده در یک جعبه مکعبی که شامل یک مانع استوانه‌ای برای شبیه‌سازی ساختار هندسی در داخل کلیدهای قدرت است، به کار گرفته شده‌اند. در [۲]، یک مدل فیزیکی برای ترانسفورماتورهای فشار قوی با در نظر گرفتن تأثیر سیم‌پیچ‌ها و هسته‌ها بر انتشار امواج صوتی پیشنهاد شده است. در این مدل، هر گره یک نامزد برای محل PD است. در این مقاله، یک روش برای برآورد انتشار PD در طول زمان پیشنهاد شده است که از روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات برای محاسبه زمان انتشار و جستجوی موقعیت منبع PD استفاده می‌کند. در [۳]، ولتاژ شروع و محل PD با استفاده از تئوری پاشن<sup>۱</sup> تعیین می‌شود. در این مقاله، از محاسبات المان محدود دو بعدی و معادلات الکترواستاتیکی برداری و اسکالر برای تعیین ولتاژ شروع سیگنال‌های PD و محل منبع آن‌ها استفاده شده است. در [۴]، متدولوژی‌های مکان‌یابی PD در انتهای کابل‌ها به صورت آفلاین مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقاله، سه روش مختلف مبتنی بر روش آشکارسازی اعوجاج زمانی برای مکان‌یابی منبع PD در انتهای کابل‌ها پیشنهاد شده است. در [۵]، یک روش عملی برای تشخیص سیگنال‌های PD رخ داده در سیستم‌های خلا پیشنهاد شده است. در این مقاله، ولتاژ شروع PD رخ داده در کابل‌های محوری مختلف در محیط‌های متفاوت مشخص شده و یک مدل عنصر متراکم برای شبیه‌سازی توزیع فشار پیشنهاد شده است. در [۶]، یک الگوریتم جدید مبتنی بر تکنیک برآورد حداکثر دقت برای مکان‌یابی سیگنال‌های PD رخ داده در سیستم عایق روغنی با دقت بالا پیشنهاد شده است. در این مقاله، آمار توالی‌های پویای نويز و اندازه‌گیری در یک سیستم مکان‌یابی PD شناسایی شده و موقعیت منبع PD با استفاده از روش فیلتر کالمن گسترده تخمین زده می‌شود. در [۷]، یک روش جدید برای پایش آنلاین PD رخ داده در عایق تجهیزات فشار قوی از جمله کلیدهای قدرت، ترانسفورماتورها و ماشین‌های دوار پیشنهاد شده است. در این مقاله، مکان‌های استراتژیک در سرتاسر شبکه برای نصب حسگرهای PD آنلاین پیشنهادی برای پایش کامل وضعیت شبکه فشار قوی معرفی شده است. در [۸]، یک روش جدید برای برآورد اختلاف بین زمان‌های ورود سیگنال‌های تشخیص داده شده توسط حسگرهای صوتی نصب شده بر روی دیواره‌های ترانسفورماتور قدرت پیشنهاد شده است. در این مقاله، از اختلاف زمانی رسیدن بین سیگنال‌های تشخیص داده شده توسط چندین حسگر صوتی برای مکان‌یابی پالس‌های PD رخ داده در مخزن ترانسفورماتور استفاده شده است. در [۹]، حسگر فیبر نوری فابری-پروت برای تشخیص و مکان‌یابی سیگنال‌های PD در ترانسفورماتورهای قدرت پیشنهاد شده است. در این تحقیق، مکان‌یابی PD در ترانسفورماتورهای قدرت نوع روغنی از طریق یک سیستم تشخیص فراصوت متشکل از آرایه‌های حسگر فیبری با تیزی جهت خوب که منجر به مکان‌یابی دقیق می‌شود، انجام می‌گیرد. در [۱۰]، بر اساس شکل موج جریان سیگنال‌های PD، چهار نوع روش تشخیص PD مطابق با تکنیک یادگیری عمیق معرفی شده است. در این مقاله، یک سکوی آزمایشی مجهز به فرکانس بالا و جریان بر اساس استاندارد اصلاح شده IEC-60270 برای تشخیص شکل موج‌های جریان PD و سیگنال‌های ضربه‌ای جریان و فرکانس فوق بالای ضربه‌ای مرتبط ساخته شده است.

مقاله [۱۱] تأثیر میدان مغناطیسی بر PD رخ داده در رزین اپوکسی مورد استفاده در عایق سیم‌پیچ ابرسانا را مطالعه می‌کند. در این تحقیق، هدایت الکتریکی رزین اپوکسی و ویژگی‌های PD رخ داده در میدان مغناطیسی قوی ارزیابی می‌شود. در [۱۲]، مکان‌یابی دقیق سیگنال‌های PD رخ داده در هندسه‌های محوری انجام می‌شود. این تحقیق، رویکرد جدیدی را برای تعیین موقعیت بارهای متحرک که از جریان القا شده در یک مجموعه از الکترودهای مناسب بهره می‌برد، پیشنهاد می‌کند. مقاله [۱۳]

<sup>۱</sup> Paschen's law

اندازه گیری پالس های جریان PD حاوی فاصله های تخلیه کوچک رخ داده در فیلم های پلی ایمید را مطالعه می کند. این تحقیق، شکل موج های جریان پالس PD در مقیاس نانو ثانیه را تحت یک ولتاژ پیک AC ۲ کیلوولت با محدوده فرکانسی ۵۰ تا ۱۰۰۰ هرتز اندازه گیری می کند. مقاله [۱۴] روش شناسایی مبتنی بر فیبر فلئورسنت را برای تشخیص PD رخ داده در نیتروژن مایع برای دستگاه های قدرت فوق رسانای دمای بالا مطالعه می کند. در این مقاله، از یک حسگر فیبر نوری فلئورسنت برای شناسایی سیگنال های PD رخ داده در LN2 استفاده شده است. در [۱۵]، تأثیر ولتاژ هارمونیک بر ویژگی های سیگنال های PD رخ داده در عایق کاغذ لامینه شده نیتروژن مایع-پروپیلن مورد استفاده در کابل های DC دمای بالا مورد مطالعه قرار گرفته است. بر اساس روش شناسی پیشنهادی این مقاله، مؤلفه های هارمونیک که شامل فرکانس های ۵۰ تا ۳۵۰ هرتز هستند، بر روی ولتاژ DC برای بررسی مکانیسم دامنه و توالی هارمونیک بر روی PD اعمال می شوند. در [۱۶]، تجزیه و تحلیل طیفی تشخیص خطای تخلیه جزئی در ایستگاه فشار قوی گازی با یک حسگر نوری داخلی میکرو اعمال می شود. این تحقیق یک حسگر PD نوری سه باند فوق حساس را پیشنهاد می کند که به یک حسگر فرکانس فوق بالا با یک فلنج موجود در ایستگاه فشار قوی گازی متصل می شود. مقاله [۱۷] نقشه های زمان-فرکانس را برای جداسازی منابع متعدد PD در انتهای کابل ها ارائه می دهد. در این تحقیق، شکل موج هر پالس PD توسط تبدیل موجک سنکرونیزه-فشرده ارزیابی می شود و ۶ پارامتر ویژگی برای تشکیل نقشه های زمان-فرکانس پیشنهاد می شود. در [۱۸]، برهم کنش بین PD و حباب های تولید شده تحت پالس های صاعقه تکرار شونده در ترانسفورماتورها از طریق یک مدل ساختاری پیچیده مطالعه می شود. مدل پیشنهادی در این مقاله برای مطالعه ساختار عایقی مرتبط با فاصله گذارهای شعاعی و محوری متصل در ترانسفورماتورهای قدرت مناسب است. مقاله [۱۹] تأثیر فاز اعمال پالس سوئیچینگ را بر روی سیگنال های PD با شکل موج AC رخ داده در سطح اپوکسی در گاز SF6 مطالعه می کند. در این تحقیق، یک سکوی آزمایشی برای تولید ولتاژ ترکیبی با فاز قابل کنترل ارائه شده است. مقاله [۲۰] طراحی یک آنتن فراکتالی هیلبرت فرکانس بسیار بالا انعطاف پذیر را برای تشخیص سیگنال های PD رخ داده در کلیدهای قدرت عایق گازی ارائه می دهد. آنتن فراکتالی پیشنهادی روی ماده پلی دی متیل سیلوکسان انعطاف پذیر بارگذاری شده با یک شکاف دایره ای، ۲ شکاف مستطیلی در صفحه زمین هر زیربلوک، و یک شکاف مستطیلی در باز شو باریک برای گسترش باند تطبیق و بهبود بهره آنتن طراحی شده است. بر اساس مرور ادبیات صورت گرفته، یک مطالعه کامل در مورد روش های تشخیص و مکان یابی PD ضروری است. علاوه بر این، مکان یابی سیگنال های PD رخ داده در تجهیزات فشار قوی مختلف از جمله کابل های XLPE، ترانسفورماتورهای قدرت و ژنراتورها از طریق همبستگی بین انرژی سیگنال ها در تحقیقات قبلی انجام نشده است. جدول ۱ خلاصه مقالات بررسی شده در این بخش را به همراه مزایا و معایب اصلی آن ها ارائه می دهد.

به دلیل اهمیت تشخیص و مکان یابی PD، در این تحقیق تجزیه و تحلیل کاملی در مورد تشخیص و مکان یابی PD در تجهیزات فشار قوی شبکه برق انجام شده است. نوآوری اصلی این مقاله این است که مکان یابی PD در تجهیزات فشار قوی شامل کابل های XLPE، ترانسفورماتورهای قدرت و ژنراتورها از طریق تعیین همبستگی انرژی سیگنال های PD انجام می شود. برای ارائه اثربخشی رویکرد پیشنهادی، شبیه سازی PD در تجهیزات فشار قوی با استفاده از نرم افزارهای EMTP-RV و MATLAB انجام می شود. در فرایند شبیه سازی باید یک مدل دقیق از عایق تجهیزات فشار قوی در نظر گرفته شود. به دلیل مولفه های فرکانس بالای PD رخ داده در تجهیزات فشار قوی، مدل فشرده عایق دقیق نیست. بنابراین، یک مدل توزیع شده متشکل از مقاومت، خازن و سلف مربوط به عایق اعمال می شود. بنابراین، سازماندهی مقاله به شرح زیر خواهد بود:

در بخش دوم، پدیده PD و حسگرهای مختلف مانند ترانسفورماتور جریان فرکانس بالا و خازن کوپلینگ مناسب برای تشخیص این سیگنال ها رخ داده در تجهیزات فشار قوی مختلف از جمله ترانسفورماتورهای قدرت، کابل های فشار قوی، کلیدهای قدرت، موتورها و ژنراتورها معرفی می شوند. در بخش سوم، ویژگی های سیگنال های PD رخ داده در تجهیزات فشار قوی ارائه می شود که با استفاده از نتایج تجربی مربوط به سیگنال های PD تشخیص داده شده از این تجهیزات فشار قوی تعیین شده است. در بخش چهارم، یک روش مبتنی بر همبستگی بین انرژی سیگنال ها برای مشخص کردن محل PD رخ داده در تجهیزات فشار قوی پیشنهاد می شود. در این بخش، مناسب بودن روش پیشنهادی با شبیه سازی سیگنال های PD در نرم افزار EMTP-RV و پردازش سیگنال های تشخیص داده شده با استفاده از نرم افزار MATLAB تایید می شود. خلاصه مقاله در بخش پنجم ارائه می شود.

جدول ۱: خلاصه مرور مقالات بررسی شده

Table 1. The summary of the literature review

مراجع	مزایای اصلی	معایب
[۱]	مکان یابی PD در کلیدهای قدرت توسط تکنیک‌های یادگیری ماشین انجام می‌شود.	مکان یابی PD در تجهیزات فشار قوی دیگر مانند کابل، ترانسفورماتور و ژنراتور انجام نشده است.
[۲]	یک مدل فیزیکی برای ترانسفورماتور برای تعیین انتشار PD توسعه یافته است.	تشخیص و مکان یابی PD انجام نشده است.
[۳]	از تئوری پاشن برای تعیین ولتاژ شروع و محل منبع PD استفاده شده است.	حسگرهای مختلف و مسائل عملی مربوط به مکان یابی PD مورد بررسی قرار نگرفته است.
[۴]	مکان یابی PD در کابل‌ها در حالت آفلاین توسط روش انعکاس زمانی مورد مطالعه قرار گرفته است.	مکان یابی آنلاین تجهیزات فشار قوی انجام نشده است.
[۵]	یک روش عملی برای تشخیص PD در کابل‌های محوری ارائه شده است.	مکان یابی PD در تجهیزات فشار قوی انجام نشده است.
[۶]	از روش برآورد حداکثر درست‌نمایی برای مکان یابی PD در سیستم عایق روغنی استفاده شده است.	مکان یابی PD در تجهیزات فشار قوی مانند کابل انجام نشده است.
[۷]	پایش آنلاین PD در کلید قدرت، ترانسفورماتور و ماشین‌های دوار انجام شده است.	مکان یابی PD در تجهیزات فشار قوی انجام نشده است.
[۹-۸]	مکان یابی PD در ترانسفورماتورها توسط حسگرهای صوتی و نوری انجام شده است.	مکان یابی PD در تجهیزات فشار قوی دیگر مانند کابل انجام نشده است.
[۱۱]-	PD رخ داده در رزین اپوکسی، فیلم‌های پلی‌ایمید، نیتروژن مایع و ایستگاه فشار قوی عایق گازی مورد مطالعه قرار گرفته است.	تشخیص و مکان یابی PD در تجهیزات فشار قوی انجام نشده است.
[۱۹]-		
[۱۶-۱۳]		
[۱۲]	مکان یابی دقیق سیگنال‌های PD رخ داده در هندسه‌های محوری انجام شده است.	مکان یابی PD در تجهیزات فشار قوی دیگر مانند کابل، ترانسفورماتور و ژنراتور انجام نشده است.
[۱۷]	از نقشه‌های زمان-فرکانس برای جداسازی منابع متعدد PD در انتهای کابل‌ها استفاده شده است.	مکان یابی PD در تجهیزات فشار قوی مانند کابل، ترانسفورماتور و ژنراتور انجام نشده است.
[۱۸]	برهم‌کنش بین PD و حباب‌های تولید شده تحت پالس‌های صاعقه تکرار شونده در ترانسفورماتورها مورد مطالعه قرار گرفته است.	مکان یابی PD در تجهیزات فشار قوی مانند کابل، ترانسفورماتور و ژنراتور انجام نشده است.
[۲۰]	یک آنتن هیلبرت فرکانس بسیار بالای انعطاف‌پذیر برای تشخیص PD در کلیدهای قدرت عایق گازی مورد مطالعه قرار گرفته است.	مکان یابی PD در تجهیزات فشار قوی مانند کابل، ترانسفورماتور و ژنراتور انجام نشده است.

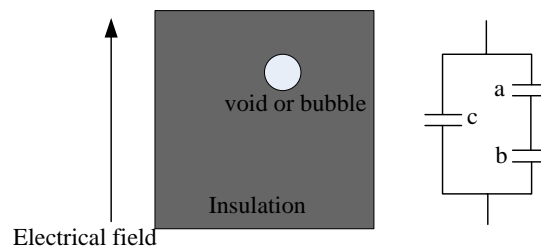
## ۲- تخلیه جزئی

در این بخش، پدیده PD رخ داده در تجهیزات فشار قوی سیستم قدرت و حسگرهای مناسب برای تشخیص این سیگنال‌ها در تجهیزات فشار قوی از جمله ترانسفورماتورهای قدرت، کلیدهای قدرت، کابل‌های XLPE، موتورها و ژنراتورها توضیح داده می‌شود.

### ۲-۲- پدیده تخلیه جزئی

به دلیل وجود ناخالصی‌ها، حفره‌ها، حباب‌های هوا و قطرات آب در عایق تجهیزات فشار قوی، استقامت عایق کاهش می‌یابد و شدت میدان الکتریکی اعمال شده به این ناخالصی‌ها منجر به ایجاد جریان‌های فرکانس بالا به نام PD می‌شود. در شکل ۱، مدل abc از PD نشان داده شده است. در این مدل، حفره یا حباب با خازن a، عایق موجود در بالا و پایین حفره با خازن b مدل‌سازی شده و بقیه عایق موجود در سمت راست و چپ حفره با خازن c نشان داده شده است. استحکام عایقی حفره کمتر از سایر

بخش های عایق است و اگر شدت میدان الکتریکی اعمال شده به حفره بیشتر از استحکام عایق باشد، PD در حفره رخ می دهد [۲۱].



شکل ۱: مدل abc از PD [۲۱]

Figure 1. The abc model of the PD [21]

اگر ولتاژ اعمال شده بر روی عایق  $v(t)$  باشد، ولتاژ اعمال شده بر روی حفره طبق معادله (۱) خواهد بود. اگر ولتاژ اعمال شده بر روی حفره بیشتر از ولتاژ شروع آن (حداکثر ولتاژی که حفره می تواند تحمل کند) باشد، خازن مربوطه  $a$  اتصال کوتاه شده و جریان های PD طبق معادله (۲) تولید می شوند [۲۱].

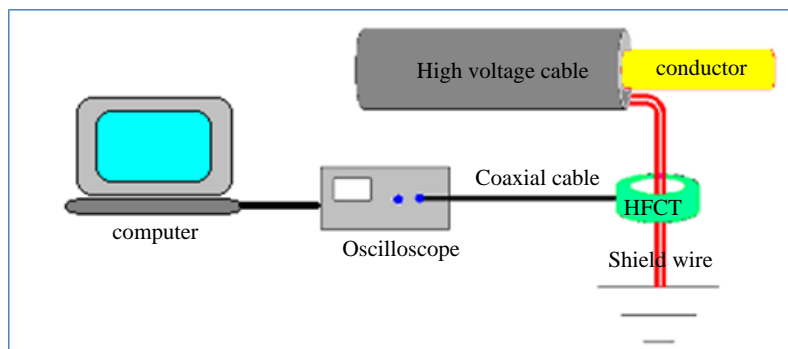
$$u(t) = \frac{C_b}{C_a + C_b} v(t) \quad (1)$$

$$i_{PD}(t) = C_a \frac{du(t)}{dt} \quad (2)$$

ویژگی های جریان PD رخ داده در تجهیزات فشار قوی مختلف به ویژگی های مواد داخل حفره یا حباب ها، ویژگی های عایق، فرکانس و دامنه ولتاژ و دمای حفره بستگی دارد. برای تشخیص پالس های فرکانس بالای PD، باید حسگرهای مختلفی در تجهیزات فشار قوی از جمله ترانسفورماتورهای قدرت، کابل های XLPE، کلیدهای قدرت، موتورها و ژنراتورها نصب شود.

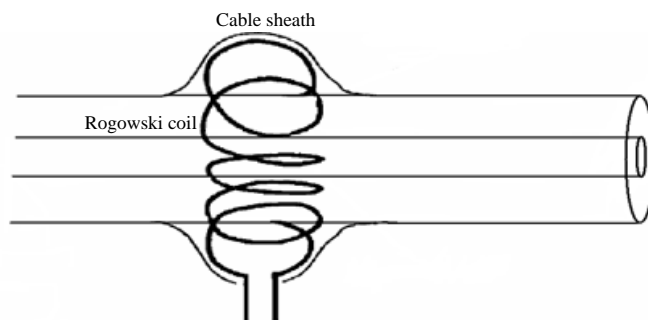
## ۲-۲- حسگرهای مناسب برای تشخیص تخلیه جزئی

از میان روش های مختلف اعمال شده برای تشخیص PD رخ داده در دستگاه فشار قوی، مانند روش های صوتی، شیمیایی و الکتریکی، به دلیل حساسیت بالا، روش های الکتریکی برای تشخیص پالس های جریان PD به کار می روند. برای تشخیص این پالس های فرکانس بالا، می توان از حسگرهای مختلفی از جمله حسگرهای کوپلینگ القایی، حسگرهای کوپلینگ گالوانیک، حسگرهای کوپلینگ خازنی، حسگرهای کوپلینگ جهت دار و حسگرهای اثر هال استفاده کرد. جریان های فرکانس بالای PD، میدان مغناطیسی در اطراف خود ایجاد می کنند. میدان مغناطیسی تولید شده می تواند جریان الکتریکی متناسب با دامنه خود را در ترانسفورماتور جریانی که سیم حاوی PD را احاطه می کند، القا کند. شکل ۲، تشخیص PD کابل XLPE را با استفاده از ترانسفورماتور جریان فرکانس بالا (HFCT) نشان می دهد. شکل ۳، سیم پیچ روگوفسکی را که می تواند به عنوان یک حسگر کوپلینگ القایی برای تشخیص سیگنال های PD کابل XLPE استفاده شود، نشان می دهد.



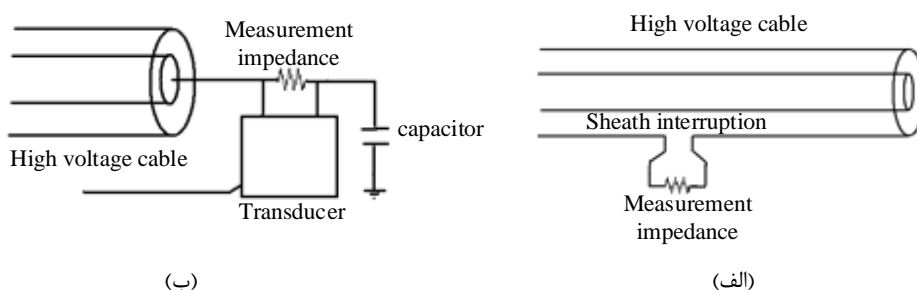
شکل ۲: تشخیص PD با استفاده از ترانسفورماتور جریان فرکانس بالا [۲۱]

Figure 2. PD detection using high frequency current transformer [21]



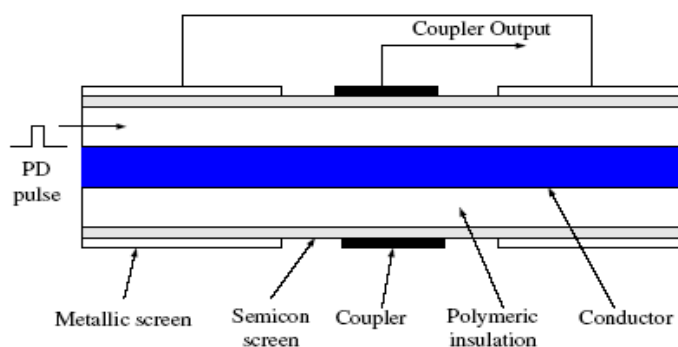
شکل ۳: سیم‌پیچ روگوفسکی [۲۲]  
Figure 3. The Rogowski coil [22]

در حسگرهای کوپلینگ گالوانیک، ولتاژ تولید شده به دلیل عبور جریان PD از یک مقاومت می‌تواند برای تشخیص دامنه رخ داده در تجهیزات فشار قوی به کار رود. برای فیلتر کردن جریان فرکانس قدرت از سیگنال‌های PD، می‌توان از یک فیلتر RC پل استفاده کرد. در شکل ۴، دو حسگر گالوانیک مورد استفاده در کابل‌های XLPE برای تشخیص PD ارائه شده است.

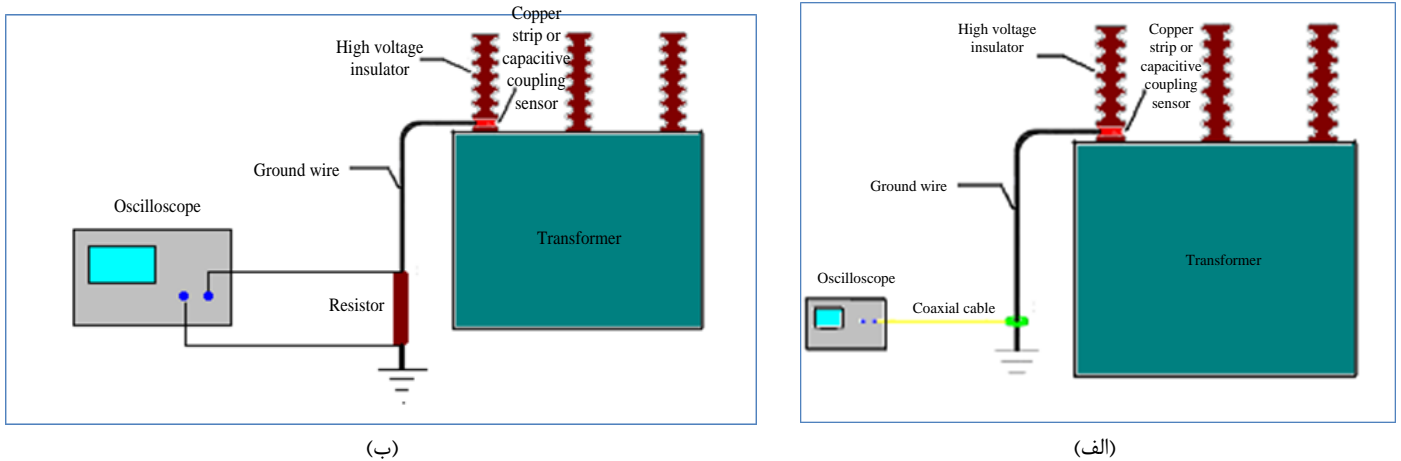


شکل ۴: حسگر گالوانیک، (الف) امپدانس قرار گرفته در غلاف کابل، (ب) امپدانس به هادی متصل شده است [۲۲]  
Figure 4. The galvanic sensor, (a) impedance placed in the cable sheath, (b) impedance is connected to the conductor [22]

به دلیل فرکانس بالای PD، امپدانس خازن‌ها کاهش می‌یابد و بنابراین، پالس‌های PD می‌توانند با استفاده از حسگرهای کوپلینگ خازنی تشخیص داده شوند. در شکل‌های ۵ و ۶، حسگرهای کوپلینگ خازنی مورد استفاده برای تشخیص سیگنال‌های PD کابل‌های XLPE و ترانسفورماتورهای قدرت به ترتیب ارائه شده است.

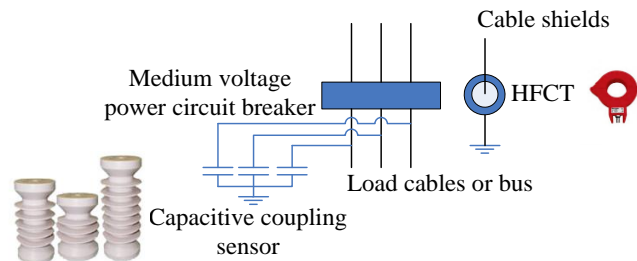


شکل ۵: حسگر کوپلینگ خازنی مورد استفاده در کابل XLPE [۲۲]  
Figure 5. The capacitive coupling sensor used in the XLPE cable [22]



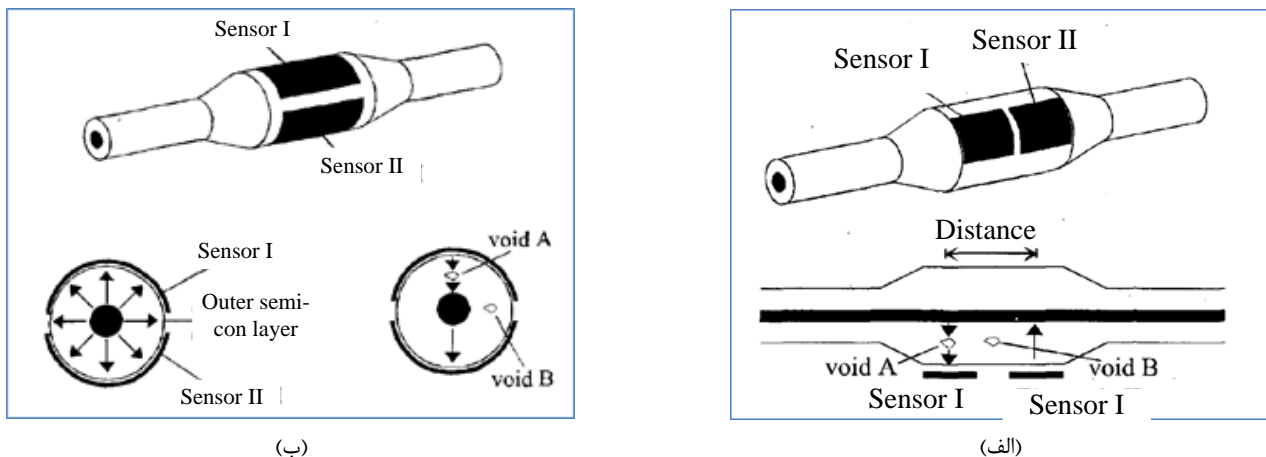
شکل ۶: حسگر کوپلینگ خازنی مورد استفاده در ترانسفورماتورها، (a) مجهز به HFCT، (b) مجهز به حسگر گالوانیک [۲۳-۲۴]  
 Figure 6. The capacitive coupling sensor used in the transformers, (a) equipped to the HFCT, (b) equipped to the galvanic sensor [23-24]

برای تشخیص PD رخ داده در کلیدهای قدرت ولتاژ متوسط، می توان از حسگرهای کوپلینگ خازنی و ترانسفورماتورهای جریان فرکانس بالا استفاده کرد، همانطور که در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل ۷: تشخیص PD در کلیدهای قدرت [۲۲]  
 Figure 7. Detection of PD in the switchgears [22]

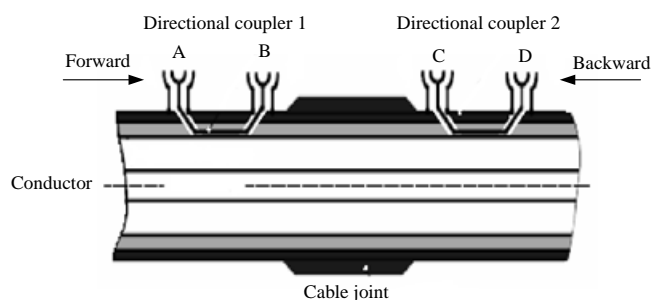
می توان از دو حسگر کوپلینگ خازنی در مفصل کابل برای مکان یابی منبع PD استفاده کرد، همانطور که در شکل ۸ نشان داده شده است. در این روش، دو حسگر خازنی دیفرانسیلی در امتداد یا اطراف مفصل کابل قرار می گیرند تا با استفاده از تأخیر زمانی بین سیگنال های PD تشخیص داده شده از طریق حسگرها، محل PD رخ داده در مفصل کابل را تعیین کنند.



شکل ۸: حسگرهای خازنی دیفرانسیلی (a) در امتداد اتصال کابل، (b) در اطراف اتصال کابل [۲۲]  
 Figure 8. Differential capacitive sensors (a) along the cable joint, (b) around the cable joint [22]

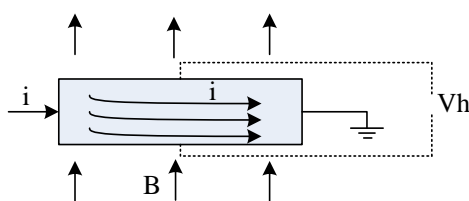


برای تعیین جهت PD رخ داده در تجهیزات فشار قوی، می‌توان از حسگرهای کوپلینگ جهت‌دار استفاده کرد. در این حسگرها، جهت PD تعیین می‌شود که می‌تواند در مکان‌یابی منبع PD کمک کند. در شکل ۹، یک حسگر کوپلینگ جهت‌دار، مبتنی بر حسگرهای کوپلینگ خازنی، که در مفصل کابل فشار قوی استفاده می‌شود، نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشخص است، از حسگرهای A و C به صورت دیفرانسیلی برای حذف نویزها و تشخیص پالس‌های PD رو به جلو و از حسگرهای B و D برای تشخیص سیگنال‌های PD رو به عقب استفاده می‌شود.



شکل ۹: حسگر کوپلینگ جهت‌دار [۲۲]  
Figure 9. Directional coupling sensor [22]

اگر یک میدان مغناطیسی از یک صفحه حامل جریان‌های الکتریکی عبور کند، طبق قانون لورنتز، میدان مغناطیسی یک نیرو بر روی جریان‌ها وارد می‌کند و آن‌ها را منحرف می‌سازد. بنابراین، یک ولتاژ بین دو طرف صفحه به نام ولتاژ اثر هال تولید می‌شود (شکل ۱۰). ولتاژ تولید شده متناسب با حاصل ضرب خارجی جریان الکتریکی و میدان مغناطیسی است و به ضخامت صفحه بستگی دارد. دامنه ولتاژ تولید شده پایین است و با استفاده از تقویت‌کننده تقویت می‌شود. حساسیت این حسگر بالا است و بنابراین می‌تواند برای تشخیص PD عبوری از هادی شیلد کابل‌های فشار قوی استفاده شود.



شکل ۱۰: اثر هال [۲۲]  
Figure 10. The Hall Effect [22]

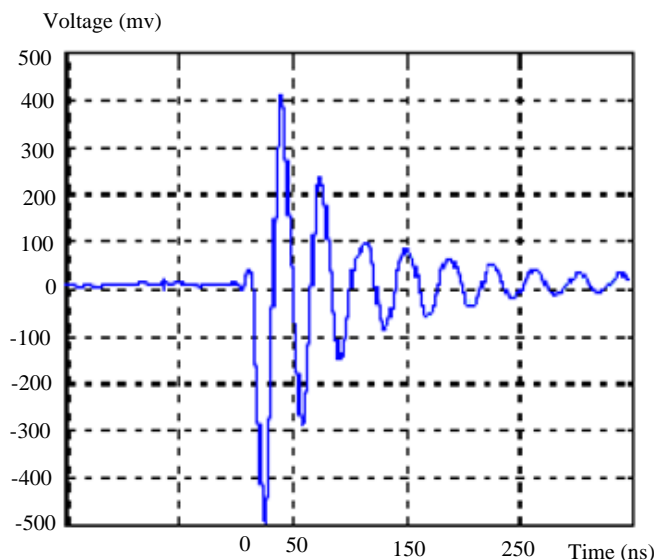
از لایه نیمه‌هادی خارجی می‌توان به عنوان یک حسگر بسیار حساس برای تشخیص PD رخ داده در کابل‌های XLPE استفاده کرد. دتکتورهای مقاومت دما (RTD) آنتن‌های رادیویی هستند که می‌توانند پالس‌های فرکانس بالای جریان‌های PD را تشخیص دهند. به دلیل پالس‌های فرکانس بالای PD، میزان تضعیف آن‌ها در کابل‌ها، سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتورها، موتورها، ژنراتورها و سایر دستگاه‌ها زیاد است. بنابراین، ترانسفورماتورهای جریان فرکانس بالا و حسگرهای کوپلینگ خازنی که دور از منبع PD قرار دارند، نمی‌توانند آن‌ها را به درستی تشخیص دهند. با این حال، در ماشین‌های دوار مانند ژنراتورها و موتورها، RTDها نزدیک به منبع PD نصب می‌شوند و بنابراین می‌توانند پالس‌های PD را به دقت تشخیص دهند. برای تشخیص سیگنال‌های PD آنلاین تجهیزات فشار قوی، باید از تکنیک‌های حذف نویز استفاده کرد تا پالس‌های فرکانس بالای PD را از سایر نویزها استخراج نمایند.

### ۳- ویژگی‌های تخلیه جزئی

در این بخش، PD رخ داده در تجهیزات فشار قوی سیستم قدرت از جمله کابل‌های XLPE فشار قوی و ترانسفورماتورها تشخیص داده می‌شود و با استفاده از تجزیه و تحلیل فرکانسی، ویژگی‌های این جریان‌های فرکانس بالا تعیین می‌گردد.

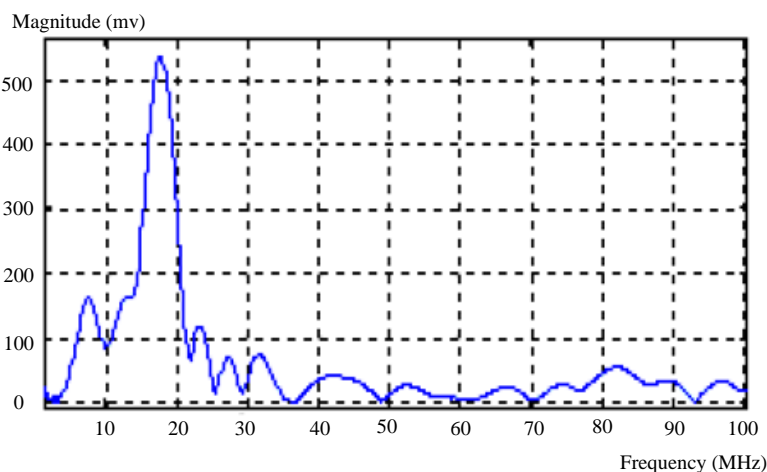
### ۳-۱- تخلیه جزئی کابل های پلی اتیلن کراس لینک شده

یک منبع ولتاژ AC متغیر ۲۰ کیلوولت به هادی یک کابل XLPE ۱۱ کیلوولت اعمال می شود. غلاف کابل به زمین متصل شده و با استفاده از HFCT قرار گرفته در اطراف سیم زمین، PD رخ داده در کابل مورد مطالعه تشخیص داده می شود. در شکل ۱۱، پالس PD تولید شده و در شکل ۱۲، مشخصه فرکانسی این پالس به ترتیب ارائه شده اند. همانطور که در شکل مشخص است، PD رخ داده در کابل XLPE یک پالس نوسانی است که شامل فرکانس کمتر از ۲۰ مگاهرتز با دامنه بالا و فرکانس بیش از ۲۰ مگاهرتز تا ۱۰۰ مگاهرتز با دامنه پایین است. برای تشخیص PD رخ داده در کابل XLPE، مشخصات دستگاه های پایش مانند ترانسفورماتور جریان فرکانس بالا و نوسان نگار باید مناسب انتخاب شوند.



شکل ۱۱: پالس PD رخ داده در کابل XLPE [۲۱]

Figure 11. The PD pulse occurred in XLPE cable [21]



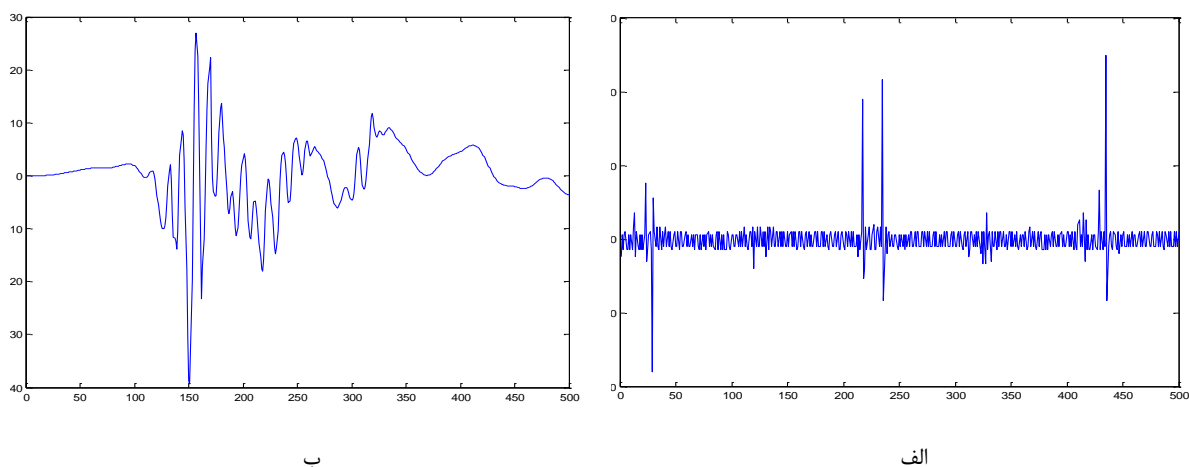
شکل ۱۲: مشخصه فرکانسی پالس PD رخ داده در کابل XLPE [۲۱]

Figure 12. The frequency-characteristic of PD pulse occurred in XLPE cable [21]

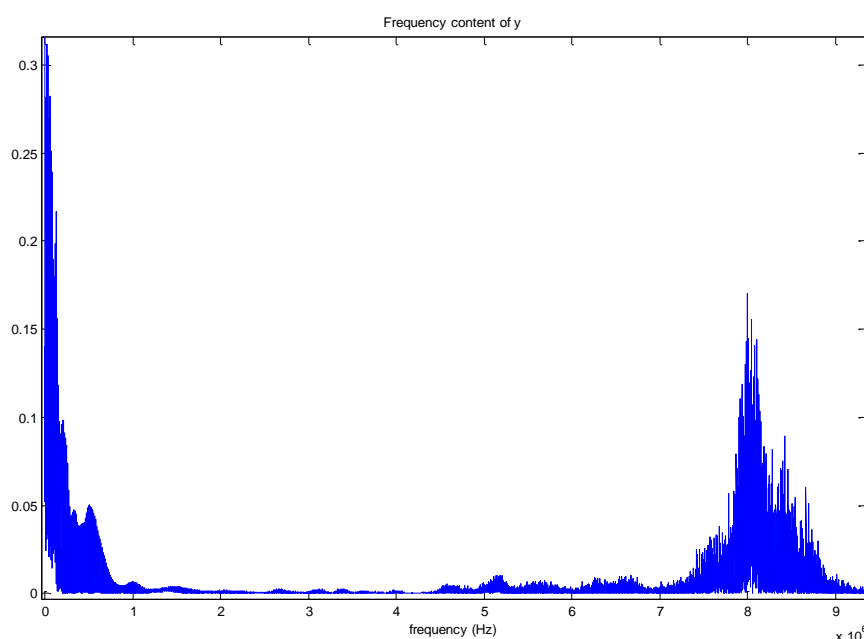
### ۳-۲- تخلیه جزئی در ترانسفورماتور

در این بخش یک منبع ولتاژ AC متغیر ۲۰ کیلوولت به سمت فشار قوی یک ترانسفورماتور قدیمی ۲۰ کیلوولت/۴۰۰ ولت اعمال می شود. یک نوار مسی به عنوان یک حسگر خازنی در اطراف بوشینگ فشار قوی ترانسفورماتور قرار داده شده و با استفاده از یک سیم، این نوار مسی به زمین متصل می شود. یک ترانسفورماتور جریان فرکانس بالا در اطراف سیم زمین برای تشخیص پالس های PD رخ داده در ترانسفورماتور قرار گرفته و شکل موج PD را بر روی صفحه نمایش نوسان نگار نمایش می دهد، همانطور

که در شکل ۶-ا نشان داده شده است. پالس‌های PD تولید شده در شکل ۱۳ و مشخصه فرکانسی این پالس‌ها در شکل ۱۴ ارائه شده است. همان‌طور که در شکل‌ها مشخص است، دامنه پالس‌های PD مربوط به فرکانس‌های چند صد کیلوهرتز و بین ۳ تا ۷ مگاهرتز قابل توجه است.



شکل ۱۳: پالس‌های PD رخ داده در ترانسفورماتور، الف- چندین پالس، ب- یک پالس بزرگ‌نمایی شده [۲۳]  
Figure 13. The PD pulses occurred in the transformer, (a) several pulses, (b) a magnified pulse [23]



شکل ۱۴: مشخصه فرکانسی پالس‌های PD رخ داده در ترانسفورماتور [۲۳]  
Figure 14. The frequency characteristic of PD pulses occurred in transformer [23]

#### ۴- مکان یابی تخلیه جزئی

در این بخش، تکنیک پیشنهادی برای مکان‌یابی PD رخ داده در تجهیزات فشار قوی معرفی می‌شود. با استفاده از نرم‌افزار EMTP-RV، خروجی‌های شبیه‌سازی برای بررسی مناسب بودن روش پیشنهادی ارائه می‌شود.

#### ۴-۱- تکنیک مکان‌یابی

در این مقاله، یک روش جدید با در نظر گرفتن اندازه‌گیری سیگنال‌های جریان با استفاده از محاسبه همبستگی انرژی آن‌ها برای مکان‌یابی منبع PD پیشنهاد می‌شود. برای این منظور، پالس PD به تجهیزات فشار قوی تزریق می‌شود. ویژگی پالس‌های PD برای تجهیزات فشار قوی مختلف، متفاوت است و به مکانیسم‌های مختلفی که منجر به تخلیه می‌شوند، مواد عایق،

ناخالصی های داخل عایق و دامنه و فرکانس ولتاژ اعمال شده بستگی دارد. ویژگی های اصلی سیگنال های PD شامل عرض پالس، دامنه، طیف فرکانسی، زمان صعود و زمان میرایی است. بر اساس ویژگی PD مربوط به تجهیز مورد مطالعه، پالس های PD مربوطه شبیه سازی می شوند. به دلیل حرکت سیگنال های PD در عایق، پالس ها تغییر می کنند و تضعیف می شوند (دامنه و عرض پالس سیگنال ممکن است تغییر کند). الگوریتم پیشنهادی می تواند موقعیت منبع PD را بر اساس تغییر شکل سیگنال به دلیل حرکت در عایق تعیین کند. یک پایگاه داده متشکل از سیگنال های PD رخ داده در مکان های مختلف عایق باید در دسترس باشد. در این روش، فاصله بین آشکارساز تا موقعیت منبع PD تغییر می کند و در هر وضعیت، شکل موج سیگنال PD تعیین می شود. برای مکان یابی منبع PD، PD تشخیص داده شده توسط حسگرهای مناسب با سیگنال های PD رخ داده در مکان های مختلف مقایسه می شود. موقعیت منبع PD با سیگنال موجود در پایگاه داده که بیشترین شباهت را با سیگنال PD تشخیص داده شده دارد، تعیین می شود. در این مطالعه، برای تشخیص شباهت بین دو سیگنال، معیار همبستگی بین انرژی دو سیگنال طبق رابطه [۲۵] محاسبه می شود:

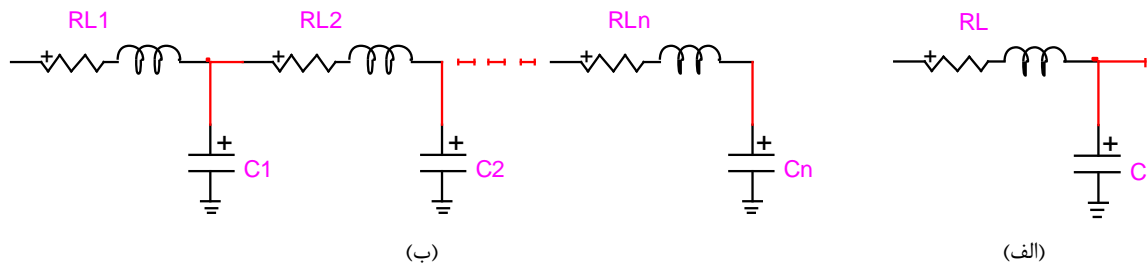
$$cor(A, B) = \frac{AB'}{\sqrt{(AA')(BB')}} \quad (3)$$

که A و B ماتریس های مرتبط با دو سیگنال هستند و A و B ماتریس ترانزاده مربوط به این دو ماتریس می باشند. پس از به دست آوردن سیگنال ثبت شده مشابه ترین به سیگنال شناسایی شده، استنباط می شود که تخلیه در نزدیکی محلی رخ می دهد که PD مربوط به سیگنال به دست آمده در پایگاه داده در آنجا واقع شده است. بنابراین، موقعیت منبع PD به طور دقیق تعیین می شود. برای پیاده سازی این روش متناظر با هر تجهیز، بر اساس ویژگی های سیگنال های PD، سیگنال PD مربوط به عایق تجهیز می تواند شبیه سازی شود. بنابراین، برای هر تجهیز، ابتدا پالس PD به بخش اول تجهیز (که می تواند سیم پیچ اول ترانسفورماتور، موتور و ژنراتور یا ابتدای طول کابل باشد) اعمال می شود و سیگنال پاسخ مربوطه، یعنی جریان دریافتی ( $i_1(t)$ ) در انتهای تجهیز (جایی که آشکارساز PD قرار گرفته) تعیین می شود. برای این حالت، موقعیت منبع PD و فاصله بین منبع PD و آشکارساز PD مشخص است و سیگنال بر اساس این فاصله در پایگاه داده ثبت می شود. همین کار برای کل بخش تجهیز (بسته به دقت، ممکن است تعداد مختلفی از دورها برای هر ترانسفورماتور، موتور و ژنراتور در نظر گرفته شود یا برای کابل های با طول های مختلف، هر بخش در نظر گرفته شود) و جریان های مربوطه، یعنی  $i_2(t)$  تا  $i_n(t)$  ثبت می شوند. بنابراین، پایگاه داده ای از سیگنال های پاسخ به اعمال پالس های PD در مکان های مختلف به دست می آید. برای تعیین موقعیت سیگنال های PD، با مقایسه سیگنال شناسایی شده با سیگنال های پایگاه داده، سیگنال مشابه ترین به پالس PD شناسایی شده مشخص می شود و موقعیت منبع PD تعیین می گردد.

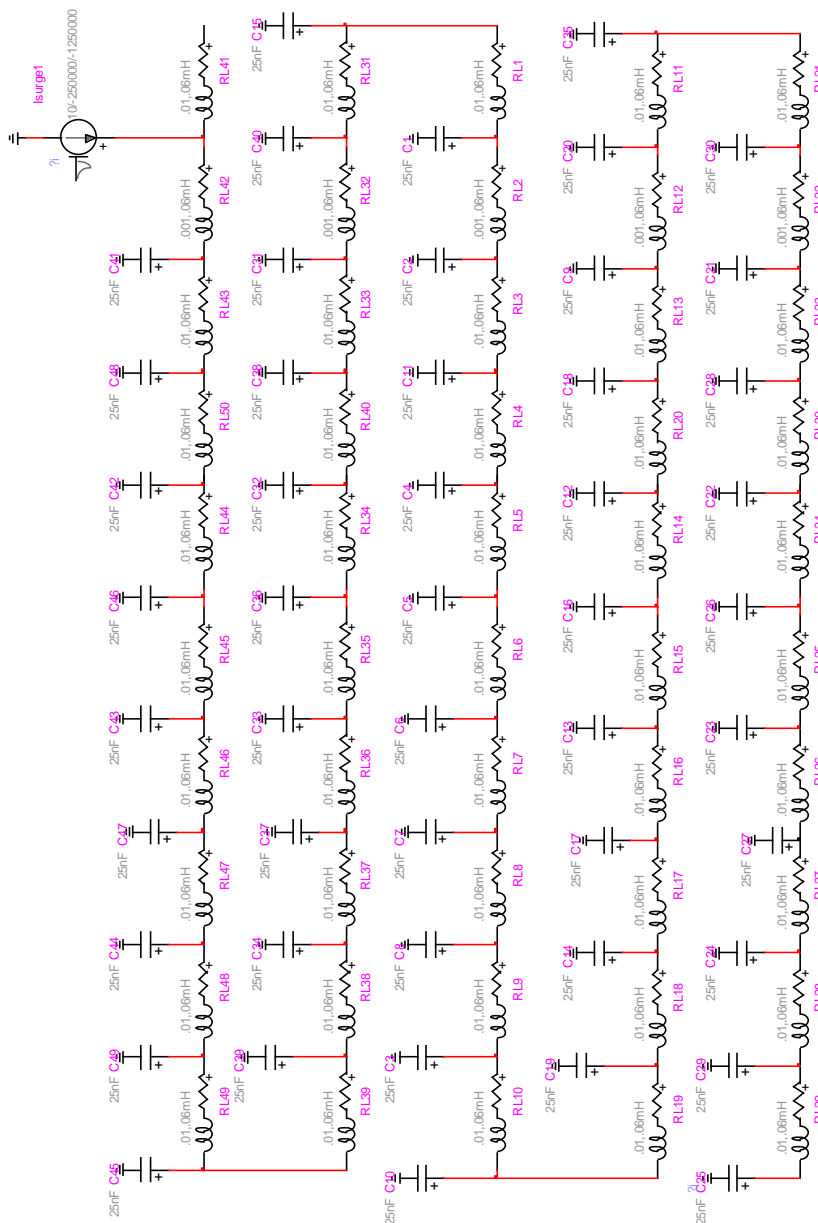
#### ۴-۲- مطالعه موردی ۱: تخلیه جزئی در کابل های XLPE

در این بخش، از نرم افزار EMTP-RV برای شبیه سازی تکنیک پیشنهادی برای موقعیت یابی سیگنال های PD در کابل های XLPE فشار قوی استفاده می شود. به دلیل محتوای فرکانس بالای امواج PD، نمی توان از مدل متراکم برای مدل سازی تجهیزات فشار قوی سیستم قدرت استفاده کرد. بنابراین، یک مدل توزیع شده متشکل از مدارهای متراکم متعدد همانطور که در شکل ۱۵ ارائه شده است، برای این منظور پیشنهاد می شود. برای تجهیزات مختلف، مقادیر R، L و C متفاوت است. مقادیر R، L و C از [۲۲] و [۲۶-۲۷] استخراج شده است. برای افزایش دقت مدل، هر مدار متراکم می تواند طول کوتاه تری (یا تعداد کمتری از دورها) از تجهیز را مدل کند.

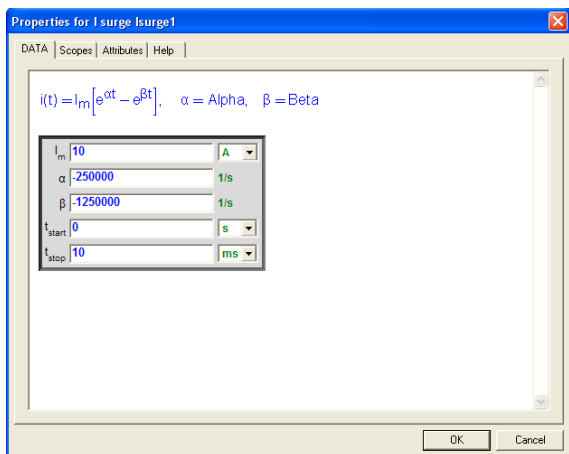
در این بخش، یک کابل XLPE در نرم افزار EMTP-RV همانطور که در شکل ۱۶ نشان داده شده است، با ۵۰ بخش متراکم مدل سازی شده است. یک پالس PD همانطور که در شکل ۱۷ نشان داده شده است، در مکان های مختلف به این کابل اعمال می شود و سیگنال های دریافتی در انتهای کابل تعیین و در شکل ۱۸ ارائه شده است. سیگنال های کامل دریافتی در انتهای کابل مربوط به اعمال سیگنال PD در مکان های مختلف نیز در شکل ۱۹ ارائه شده است.



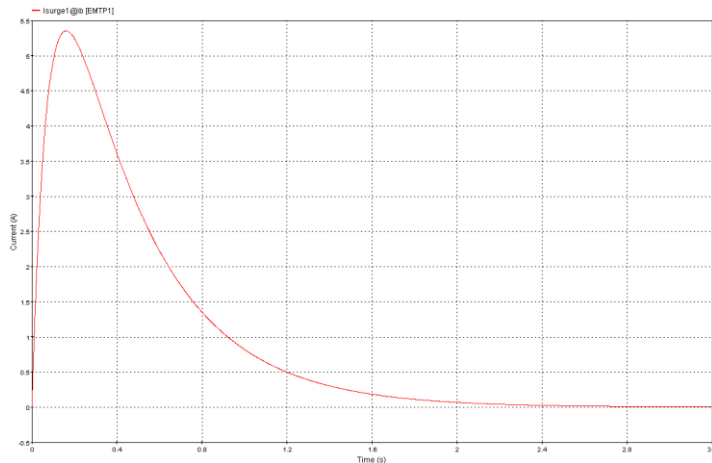
شکل ۱۵: مدل تجهیزات فشار قوی برای انتشار سیگنال‌های PD (الف) مدل یک طول کوتاه از تجهیز، (ب) مدل کامل  
 Figure 15. The model of high voltage apparatus for PD signals propagation (a) the model of a short length of the equipment, (b) total model



شکل ۱۶: مدل کابل XLPE در نرم‌افزار EMTP-RV  
 Figure 16. The model of the XLPE cable in the EMTP-RV software

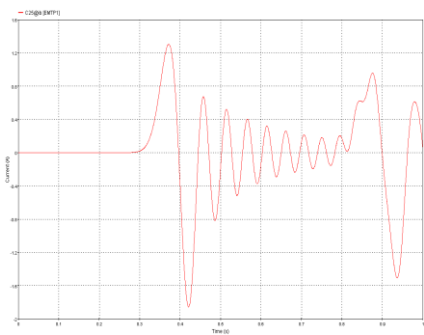


(ب)

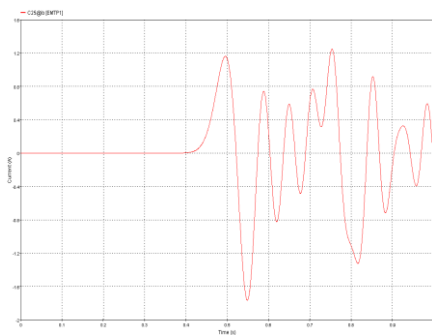


(الف)

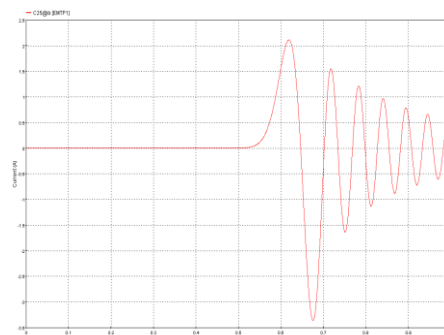
شکل ۱۷: سیگنال PD (الف) شکل موج، (ب) پارامترهای پالس  
Figure 17. The PD signal (a) the waveform, (b) the parameters of the pulse



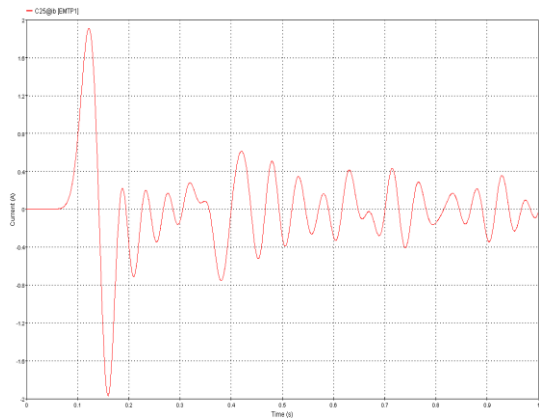
(ج)



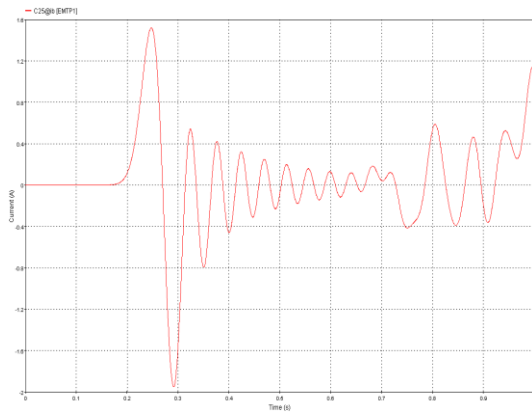
(ب)



(الف)

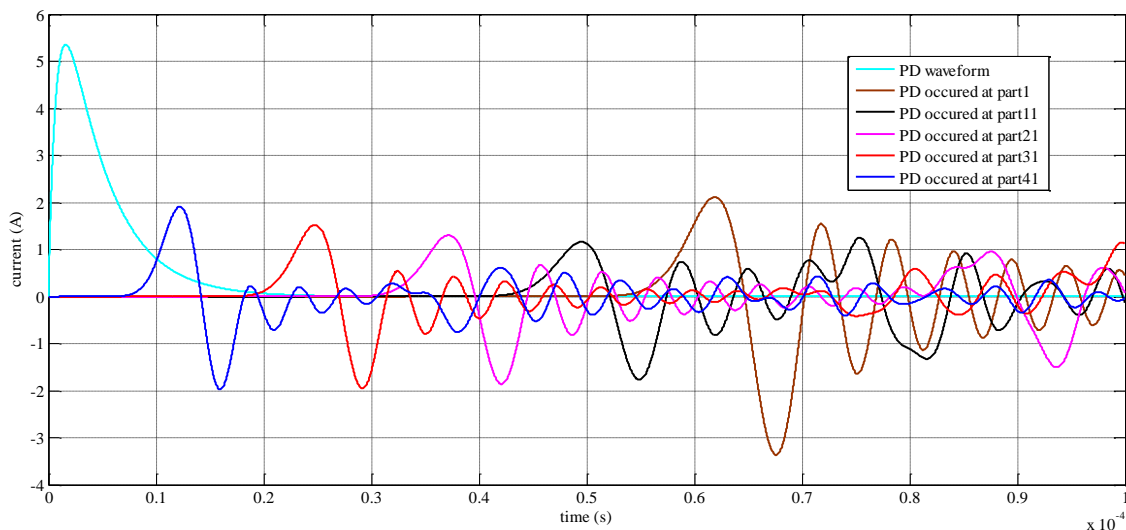


(ه)



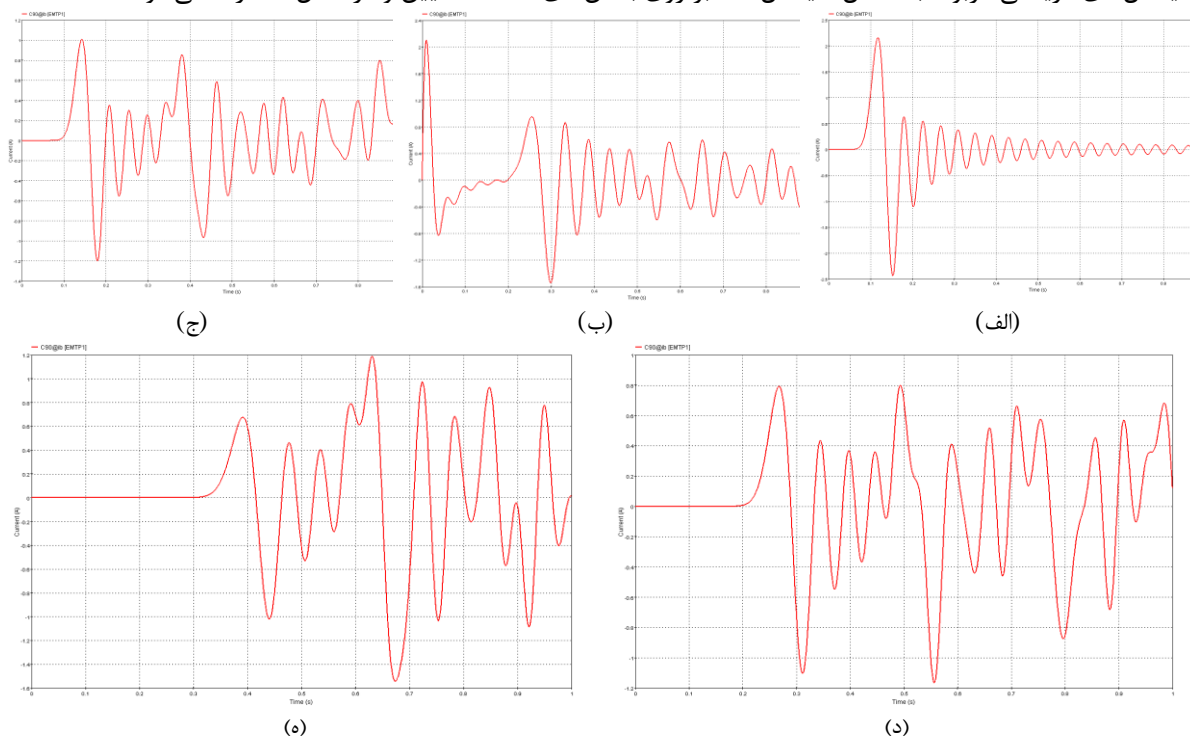
(د)

شکل ۱۸: سیگنال های دریافتی (الف) بخش ۰۱، (ب) بخش ۰۱، (ج) بخش ۲۱، (د)، بخش ۳۱، (ه) بخش ۴۱  
Figure 18. The received signals (a) part 1, (b) part 11, (c) part 21, (d), part 31, (e) part 41



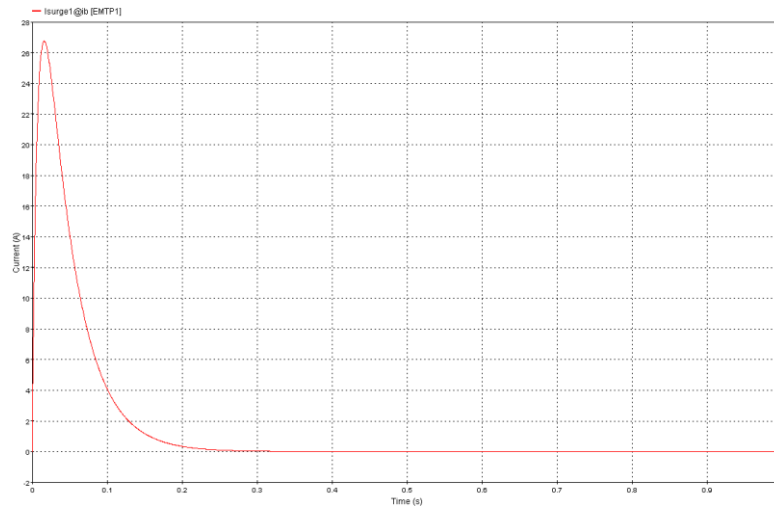
شکل ۱۹: سیگنال‌های دریافتی  
Figure 19. The received signals

برای تکمیل پایگاه داده، موقعیت آشکارساز تغییر می‌کند و سیگنال‌های دریافتی مربوط به اعمال سیگنال‌های PD بر روی بخش‌های مختلف تجهیز تعیین و ثبت می‌شوند. در این مرحله، آشکارساز در ۲۰٪ طول کابل (بخش ۱۰) قرار می‌گیرد و سیگنال‌های دریافتی مربوط به اعمال سیگنال PD بر روی بخش‌های مختلف تعیین و در شکل ۲۰ ارائه می‌شوند.

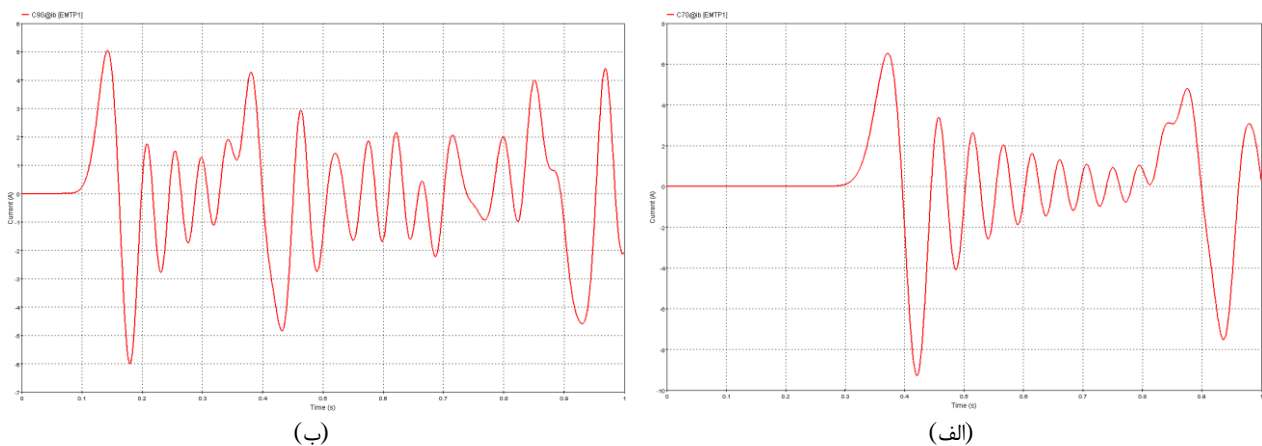


شکل ۲۰: سیگنال‌های دریافتی (الف) بخش ۰۱، (ب) بخش ۰۱۱، (ج) بخش ۰۲۱، (د)، بخش ۰۳۱، (ه) بخش ۰۴۱  
Figure 20. The received signals (a) part 1, (b) part 11, (c) part 21, (d), part 31, (e) part 41

در این مرحله، یک پالس PD همانطور که در شکل ۲۱ نشان داده شده است، در بخش ۲۱ کابل اعمال می‌شود و سیگنال‌های دریافتی توسط آشکارسازهای قرار گرفته در بخش ۱۰ و انتهای کابل تعیین و در شکل ۲۲ ارائه می‌شوند. همبستگی بین سیگنال‌های ثبت شده در پایگاه داده و سیگنال‌های شناسایی شده در مرحله دوم تعیین و در جدول ۲ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که روش پیشنهادی می‌تواند منبع PD را با دقت خوبی مکان‌یابی کند.



شکل ۲۱: سیگنال PD  
Figure 21. The PD signal



شکل ۲۲: سیگنال‌های دریافتی (الف) آشکارساز در انتها قرار گرفته، (ب) آشکارساز در بخش ۱۰ قرار گرفته  
Figure 22. The received signals (a) detector placed at the end, (b) detector placed at part 10

جدول ۲: همبستگی بین سیگنال‌ها

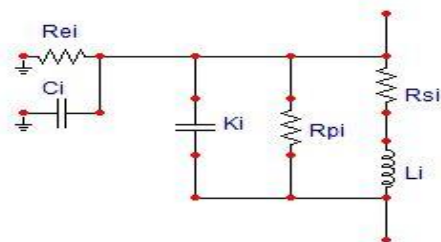
Table 2. The correlation between the signals

بخشی که PD اعمال شده است	۱	۱۱	۲۱	۳۱	۴۱
همبستگی با سیگنال آشکار شده در انتها	۰/۱۲۹۵	۰/۲۵۲۱	۰/۷۴۷۵	۰/۶۷۹۳	۰/۰۰۰۴
همبستگی با سیگنال آشکار شده در بخش ۱۰	۰/۱۳۳۴	۰/۴۷۴۸	۱	۰/۶۸۷۲	۰/۴۱۷۱

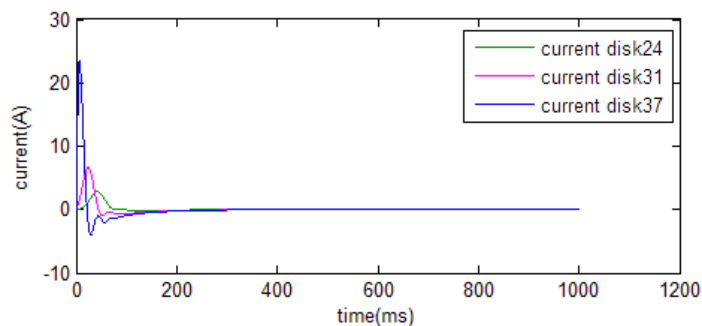
#### ۴-۳- مطالعه موردی ۲: تخلیه جزئی در ترانسفورماتور

در این بخش، از نرم‌افزار ATP-Draw برای شبیه‌سازی تکنیک پیشنهادی برای مکان‌یابی سیگنال‌های PD در ترانسفورماتورها استفاده می‌شود. مدل توزیع شده معادل هر دور سیم‌پیچ ترانسفورماتور در ATP-Draw در شکل ۲۳ ارائه شده است. یک سیگنال PD همانطور که در شکل ۲۴ نشان داده شده است، به ترانسفورماتور اعمال می‌شود و سیگنال‌های دریافتی در دیسک‌های مختلف ترانسفورماتور در شکل ۲۴ ارائه شده است. سپس، یک سیگنال PD همانطور که در شکل ۲۵ نشان داده شده است، در دیسک‌های ناشناخته به ترانسفورماتور اعمال می‌شود و سیگنال‌های دریافتی در دیسک‌های مختلف تعیین و در شکل ۲۶ ارائه شده است.

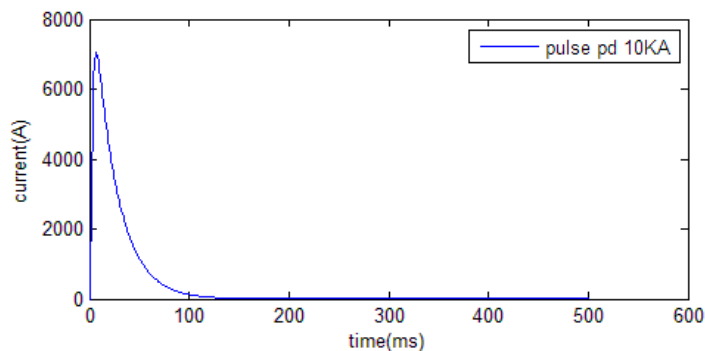




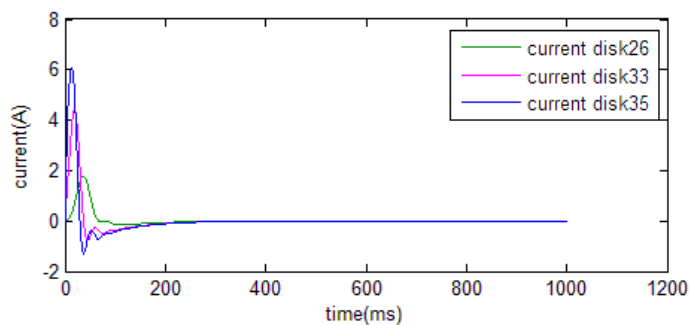
شکل ۲۳: مدل معادل هر دور سیم پیچ ترانسفورماتور در نرم افزار ATP-Draw  
 Figure 23. The equivalent model of each turn of the transformer winding in the ATP-Draw software



شکل ۲۴: سیگنال های دریافتی  
 Figure 24. The received signals



شکل ۲۵: سیگنال PD اعمال شده به ترانسفورماتور  
 Figure 25. The PD signal applied to the transformer



شکل ۲۶: سیگنال های دریافتی  
 Figure 26. The received signals

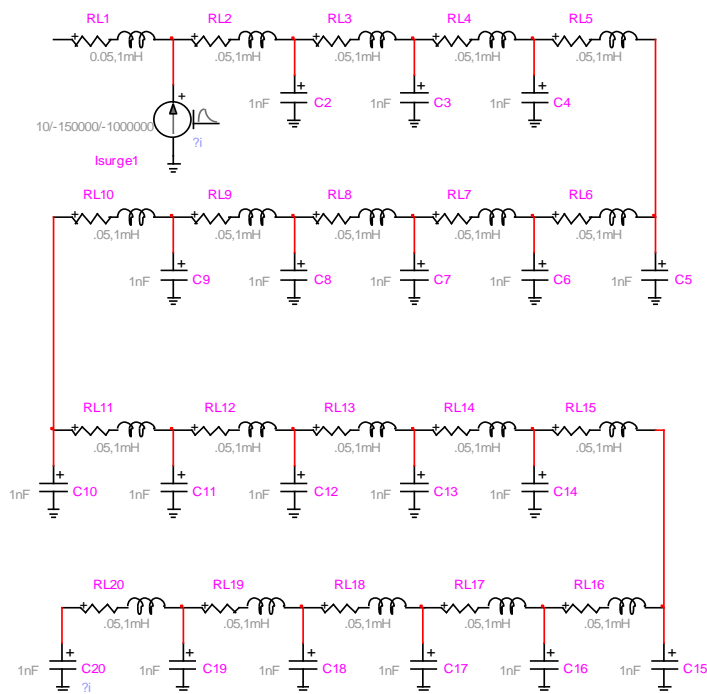
بر اساس روش پیشنهادی، همبستگی های بین سیگنال های مختلف محاسبه و در جدول ۳ ارائه شده است. این جدول نشان می دهد که سیگنال PD به ترتیب در دیسک های ۲۶ و ۳۵ ترانسفورماتور اعمال شده است.

جدول ۳: همبستگی بین سیگنال‌ها  
Table 3. The correlation between signals

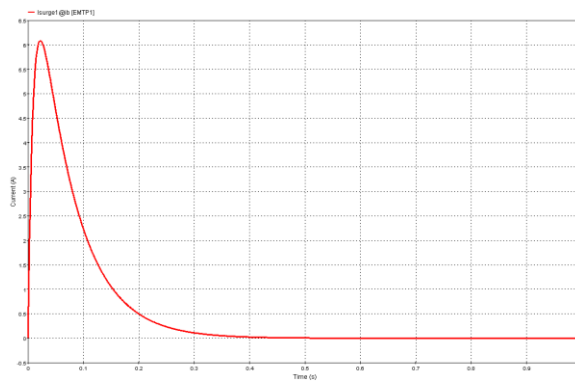
	I1	I2	I3	I4	I5	I6
I26	-.1185	-.1168	-.1132	-.1075	-.0991	-.0874
I35	-.1500	-.1513	-.1539	-.1576	-.1623	-.1679
	I7	I8	I9	I10	I11	I12
I26	-.0717	-.0513	-.0254	-.0068	-.0457	-.0916
I35	-.1741	-.1806	-.1870	-.1929	-.1978	-.2015
	I13	I14	I15	I16	I17	I18
I26	-.1448	-.2051	-.2720	-.3451	-.4234	-.5056
I35	-.2035	-.2036	-.2016	-.1972	-.1903	-.1804
	I19	I20	I21	I22	I23	I24
I26	-.5902	-.6749	-.7571	-.8334	-.9001	-.9529
I35	-.1671	-.1499	-.1279	-.1000	-.0650	-.0214
	I25	I26	I27	I28	I29	I30
I26	-.9876	1	-.9866	-.9451	-.8748	-.7772
I35	-.0326	-.0988	-.1785	-.2729	-.3817	-.5031
	I31	I32	I33	I34	I35	I36
I26	-.6563	-.5186	-.3727	-.2291	-.0988	-.0071
I35	-.6224	-.7617	-.8784	-.9653	1	-.9563
	I37	I38	I39			
I26	-.0779	-.1062	-.0961			
I35	-.8111	-.5684	-.2934			

۴-۴- مطالعه موردی ۳: تخلیه جزئی در ژنراتور

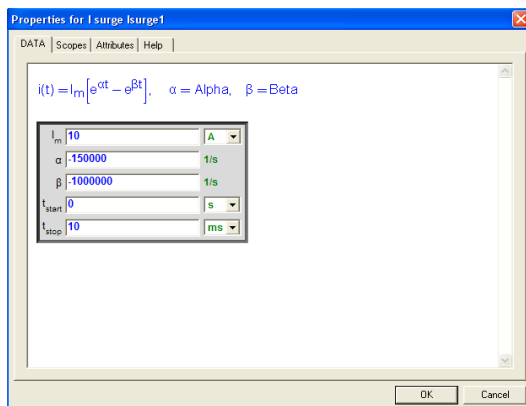
در این بخش، یک سیم پیچ ژنراتور متشکل از ۲۰ مدار متراکم همانطور که در شکل ۲۷ در نرم افزار EMTP-RV نشان داده شده است، در نظر گرفته می شود. پالس PD همانطور که در شکل ۲۸ نشان داده شده است، به سیم پیچ ژنراتور اعمال می شود.



شکل ۲۷: مدل سیم پیچ ژنراتور  
Figure 27. The model of the generator winding

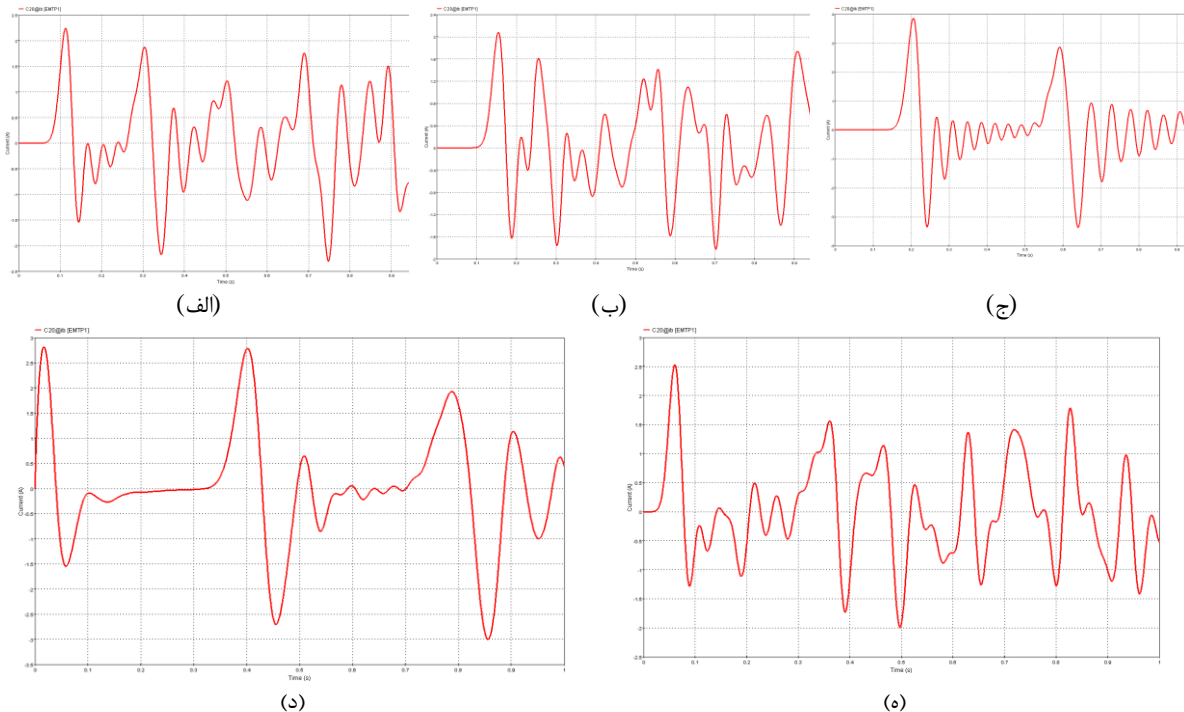


(الف)



(ب)

شکل ۲۸: سیگنال PD (الف) شکل موج، (ب) پارامترهای پالس  
Figure 28. The PD signal (a) the waveform, (b) the parameters of the pulse



(الف)

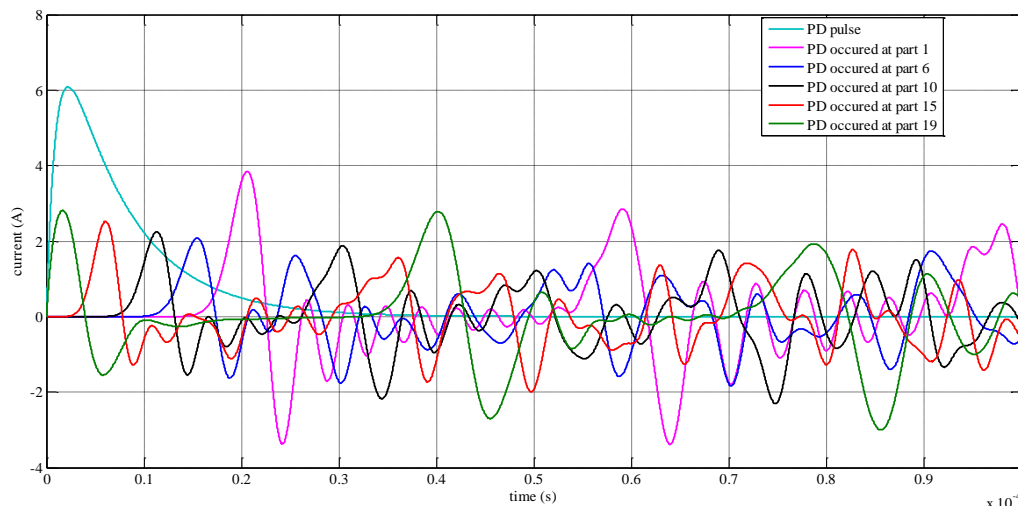
(ب)

(ج)

(د)

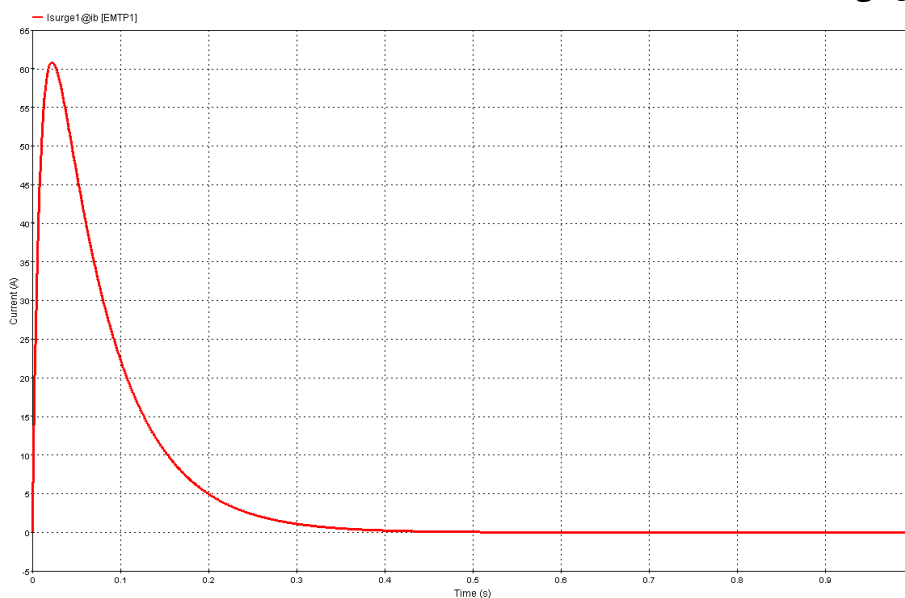
(ه)

شکل ۲۹: سیگنال‌های دریافتی (الف) بخش ۱، (ب) بخش ۶، (ج) بخش ۱۰، (د) بخش ۱۵، (ه) بخش ۱۹  
Figure 29. The PD signal (a) the waveform, (b) the parameters of the pulse

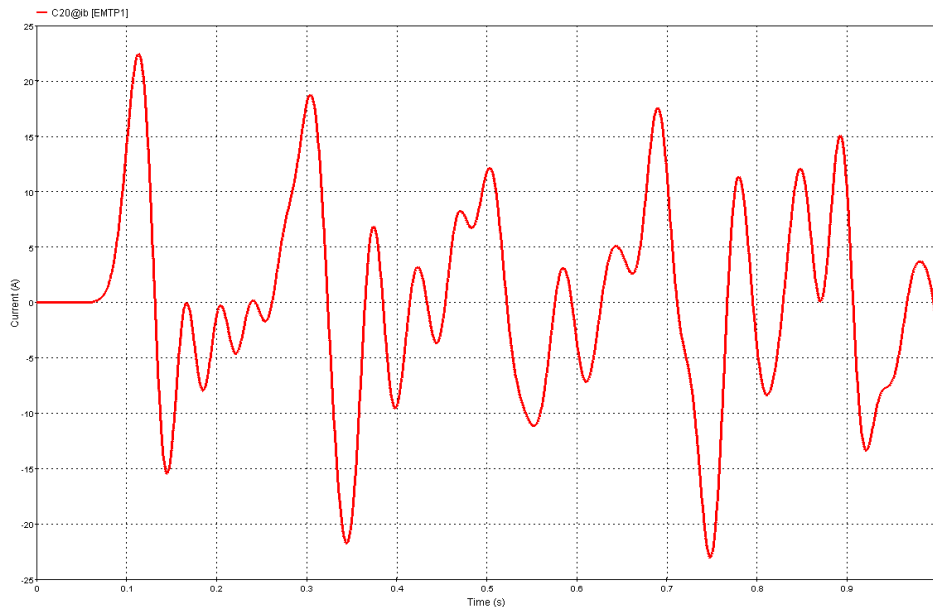


شکل ۳۰: سیگنال های دریافتی  
Figure 30. The received signals

در این مرحله، موقعیت اعمال پالس PD بر روی سیم پیچ ژنراتور تغییر می کند و سیگنال های دریافتی تعیین و در شکل ۲۹ ارائه می شوند. برای مقایسه شکل موج سیگنال های دریافتی، همه شکل موجها در شکل ۳۰ رسم شده اند. همانطور که می بینید، به دلیل حرکت سیگنال های PD در عایق سیم پیچ ژنراتور، شکل موج سیگنال PD تغییر شکل می یابد. در این مرحله، یک پالس PD همانطور که در شکل ۳۱ نشان داده شده است، به عایق سیم پیچ ژنراتور در قسمت ۱۰ اعمال می شود و سیگنال دریافتی تعیین و در شکل ۳۲ ارائه می شود. معیارهای همبستگی بین سیگنال دریافتی و ۵ سیگنال دریافتی از پایگاه داده محاسبه و در جدول ۴ ارائه می شوند. این جدول نشان می دهد که روش پیشنهادی با دقت خوبی می تواند منبع PD را در ژنراتور مکان یابی کند.



شکل ۳۱: پالس اعمال شده در قسمت ۱۰  
Figure 31. The PD pulse applied at part 10



شکل ۳۲: سیگنال دریافتی

Figure 32. The received signals

جدول ۴: همبستگی بین سیگنال دریافت شده و سیگنال‌های مختلف پایگاه داده

Table 4. The correlation between the received signal and different signals of database

شماره پالس PD اعمال شده	۱	۶	۱۰	۱۵	۱۹
میزان همبستگی	۰/۳۲۵۴	۰/۳۹۶۲	۱	۰/۲۵۴۵	۰/۰۹۷۵

در این بخش، برای ارائه اثربخشی روش پیشنهادی که برای مکان‌یابی سیگنال‌های PD در تجهیزات فشار قوی استفاده می‌شود، مقایسه‌ای بین روش پیشنهادی و سایر رویکردها انجام می‌شود. در [۲۸]، یک بررسی بر پیشرفت‌های اخیر انجام شده برای روش‌های مکان‌یابی PD انجام شده است. در این تحقیق، روش‌های مختلفی از جمله تکنیک رادیو فرکانسی، حسگرهای آکوستیک و نوری و روش استفاده از آنتن‌های مختلف ارزیابی می‌شوند. خطاهای مرتبط با روش‌های مختلف استفاده شده برای مکان‌یابی PD ها در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول ۵: مقایسه روش‌های مختلف مورد استفاده برای مکان‌یابی PD

Table 5. Comparison of different methods used for localization of PDs

روش‌های استفاده شده برای مکان‌یابی PD ها:	میزان خطا
اختلاف زمانی رسیدن سیگنال به حسگرهای مستقر در مکان‌های مختلف	۰/۲۱ متر برای PD ۲، ۰/۴۵ متر برای PD ۳ در آزمایشگاه و حدود ۰/۶ تا ۲ متر خطا در حالت واقعی
فیبر نوری نوع interference-type دو حلقه ای Signac	مقدار $\pm 80$ متر برای کابل ۶ کیلومتری
پراب فرکانس بسیار بالا	حدود ۱۰ سانتی متر
روش بازگشت زمانی الکترومغناطیسی	۰/۵ درصد خطا برای SNR=7dB
رفلکتومتری (reflectometry) حوزه زمان	۱۳۰ متر یا ۵ درصد

خطای روش پیشنهادی در مکان‌یابی سیگنال‌های PD رخ داده در تجهیزات فشار قوی، بستگی به پایگاه داده جمع آوری شده دارد. برای مثال، برای یک کابل XLPE یک کیلومتری، اگر مدل‌های فشرده سیگنال‌های PD از قسمت‌های مختلف با طول ۱ متر در دسترس باشد، خطای مکان‌یابی PD حدود ۰/۱ درصد است. بنابراین، برای یک ترانسفورماتور یا ژنراتور با ۱۰۰۰ دور، اگر مدل فشرده هر دور (یا سیگنال‌های PD رخ داده در تمام دورها) در پایگاه داده موجود باشد، خطای مکان‌یابی PD یک دور یا ۰/۱ درصد خواهد بود.

## ۵- نتیجه گیری

در این مقاله، تشخیص و مکان یابی سیگنال های PD رخ داده در تجهیزات فشار قوی سیستم قدرت مورد مطالعه قرار گرفته است. به دلیل ویژگی های پایش آنلاین PD تجهیزات فشار قوی سیستم قدرت، حسگرهای مختلفی از جمله حسگرهای کاپلینگ القایی مانند ترانسفورماتور جریان فرکانس بالا و بوبین روگوسکی، حسگرهای کاپلینگ خازنی، حسگرهای کاپلینگ جهتی، حسگرهای کاپلینگ گالوانیک، حسگرهای اثر هال، حسگرهای مقاومت دمایی و لایه نیمه هادی کابل معرفی شده اند. مشخصات فرکانسی سیگنال های PD رخ داده در کابل های XLPE و ترانسفورماتورها بر اساس ارزیابی فرکانسی سیگنال های PD ثبت شده در آزمایشگاه فشار قوی تعیین شده است. در این مطالعات تجربی، یک کابل XLPE ۱۱ کیلوولت و یک ترانسفورماتور ۲۰ کیلوولت/۴۰۰ ولت در نظر گرفته شده و با استفاده از منبع ولتاژ متغیر ۲۰ AC کیلوولت، PD در این تجهیزات رخ داده و با استفاده از حسگرهای پیشنهادی تشخیص داده می شود. برای تعیین موقعیت منبع PD در دستگاه های فشار قوی، این مقاله محاسبه شباهت بین سیگنال PD تشخیص داده شده و سیگنال های ثبت شده در پایگاه داده را بر اساس معیار همبستگی انرژی سیگنال ها پیشنهاد می کند. برای بررسی اثربخشی روش پیشنهادی، سه مطالعه موردی مربوط به مکان یابی سیگنال های PD رخ داده در کابل XLPE، ترانسفورماتور و ژنراتور با استفاده از نرم افزارهای EMTD-RV و ATP-Draw شبیه سازی شده اند. برای تعیین معیارهای همبستگی بین سیگنال های مختلف، از نرم افزار MATLAB استفاده شده است. از خروجی های عملی نتیجه گرفته می شود که حسگرهای پیشنهادی می توانند PD رخ داده در کابل های XLPE و ترانسفورماتورها را به طور دقیق تشخیص دهند. همچنین از خروجی های شبیه سازی نتیجه گرفته می شود که روش پیشنهادی مبتنی بر همبستگی بین انرژی سیگنال ها می تواند به طور دقیق موقعیت منبع PD را در تجهیزات فشار قوی تعیین کند.

## مراجع

- [1] A. Baug, N. Ray Choudhury, R. Ghosh, S. Dalai and B. Chatterjee, "Identification of single and multiple partial discharge sources by optical method using mathematical morphology aided sparse representation classifier," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 24, no. 6, pp. 3703-3712, 2017, doi: 10.1109/TDEI.2017.006398.
- [2] Y.B. Wang, D.G. Chang, Y.H. Fan, G.J. Zhang, J.Y. Zhan and X.J. Shao, "Acoustic localization of partial discharge sources in power transformers using a particle-swarm-optimization-route-searching algorithm," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 24, no. 6, pp. 3647-3656, 2017, doi: 10.1109/TDEI.2017.006857.
- [3] G. Parent, M. Rossi, S. Duchesne and P. Dular, "Determination of Partial Discharge Inception Voltage and Location of Partial Discharges by Means of Paschen's Theory and FEM," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 55, no. 6, pp. 1-4, 2019, doi: 10.1109/TMAG.2019.2902374.
- [4] A.R. Mor, P.H.F. Morshuis, P. Liovera, V. Fuster and A. Quijano, "Localization techniques of partial discharges at cable ends in off-line single-sided partial discharge cable measurements," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 23, no. 1, pp. 428-434, 2016, doi: 10.1109/TDEI.2015.005395.
- [5] A.B.J.M. Driessen, J. Van Duivenbode and P.A.A.F. Wouters, "Partial discharge detection for characterizing cable insulation under low and medium vacuum conditions," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 25, no. 1, pp. 306-315, 2018, doi: 10.1109/TDEI.2018.006837.
- [6] A. Wadi, W. Al-Masri, W. Siyam, M.F. Abdel-Hafez and A.H. El-Hag, "Accurate Estimation of Partial Discharge Location using Maximum Likelihood," *IEEE sensors letters*, vol. 2, no. 4, pp. 1-4, doi: 10.1109/LENS.2018.2878922.
- [7] L.A. Renforth, R. Giussani, M.T. Mendiola and L. Dodd, "Online partial discharge insulation condition monitoring of complete high-voltage networks," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 55, no. 1, pp. 1021-1029, 2018, doi: 10.1109/TIA.2018.2866983.

- [8] R. Ghosh, R., B. Chatterjee and S. Dalai, "A method for the localization of partial discharge sources using partial discharge pulse information from acoustic emissions," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 24, no. 1, pp. 237-245, 2017, doi: 10.1109/TDEI.2016.006080.
- [9] C. Gao, W. Wang, S. Song, S. Wang, L. Yu and Y. Wang, "Localization of partial discharge in transformer oil using Fabry-Pérot optical fiber sensor array," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 25, no. 6, pp. 2279-2286, 2018, doi: 10.1109/TDEI.2018.007065.
- [10] L. Duan, J. Hu, G. Zhao, K. Chen, J. He and S.X. Wang, "Identification of partial discharge defects based on deep learning method," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 34, no. 4, pp. 1557-1568, 2019, doi: 10.1109/TPWRD.2019.2910583.
- [11] M.Y. Wang, B.X. Du, X.T. Han and Z.L. Li, "Effects of magnetic field on partial discharge in epoxy resin for superconducting coil insulation," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 31, no. 8, pp. 1-3, 2021, doi: 10.1109/TASC.2021.3116560.
- [12] A. Villa, L. Barbieri and R. Malgesini, "Precise partial discharge localization in axisymmetric geometries," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 27, no. 2, pp. 606-612, 2020, doi: 10.1109/TDEI.2019.008444.
- [13] T. Okamoto and H. Uehara, "Partial Discharge Current Measurements with Small Discharge Gaps Over Polyimide Film," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 30, no. 1, pp. 158-164, 2022, doi: 10.1109/TDEI.2022.3226133.
- [14] G. D. P.Mahidhar, R. Sarathi and B. Srinivasan, "Fluorescence fiber based identification of partial discharges in liquid nitrogen for high-temperature superconducting power apparatus," *IEEE Sensors Letters*, vol. 4, no. 2, pp. 1-4, 2020, doi: 10.1109/LESEN.2020.2971015.
- [15] Z. Li, Z. Zhang, T. Han, B. Du, J. Li and L. Zhang, "Effect of Harmonic Voltage On Partial Discharge Properties of LN 2/PPLP Insulation for HTS DC Cable," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 31, no. 8, pp. 1-4, 2021, doi: 10.1109/TASC.2021.3091055.
- [16] M. Ren, Ming, J. Zhou and J. Miao, "Adopting spectral analysis in partial discharge fault diagnosis of GIS with a micro built-in optical sensor," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 36, no. 2, pp. 1237-1240, 2020, doi: 10.1109/TPWRD.2020.3028511.
- [17] Y. Li, J. Han, Y. Du and H. Jin, "Time-frequency Maps for Multiple Partial Discharge Sources Separation in Cable Terminations," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 38, no. 3, pp. 2228-2231, 2023, doi: 10.1109/TPWRD.2023.3256127.
- [18] L. Lu, S. Ichimura and T. Rokunohe, "Interaction between partial discharge and generated bubbles under repeated lightning impulses in transformers using a complex structure model," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 28, no. 2, pp. 727-735, 2021, doi: 10.1109/TDEI.2020.009341.
- [19] C. He, L. Zhang, X. Zhang, J. Li and X. Yao, "Study on the influence of switching impulse superposition phase on AC partial discharge of epoxy surface in SF 6 Gas," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 35, no. 3, pp. 1596-1598, 2019, doi: 10.1109/TPWRD.2019.2941121.
- [20] J. Tian, G. Zhang, C. Ming, L. He, Y. Liu, J. Liu and X. Zhang, "Design of a Flexible UHF Hilbert Antenna for Partial Discharge Detection in Gas-insulated Switchgear," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 22, no. 4, pp. 794-798, 2022, doi: 10.1109/LAWP.2022.3225627.
- [21] A. Ghaedi, M. Moeini Aghtaie and A. Ghaffari, "Detection of online PD signals in XLPE cables using the Bhattacharyya distance," *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, vol. 24, no. 5, pp. 3552-3563, 2016, doi: 10.3906/elk-1410-10.
- [22] D. Pommerenke, T. Strehl, R. Heinrich, W. Kalkner, F. Schmidt and W. Weissenberg, "Discrimination between internal PD and other pulses using directional coupling sensors on HV cable systems," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 6, no. 6, pp. 814-824, doi: 10.1109/94.822021.

- [23] M. Ghaffarian, M. Vakilian, V. Parvin and A. Ghaedi, "Investigation of online detected partial discharges in power transformer," *Australasian Universities Power Engineering Conference*, Sydney, NSW, Australia, 2008, pp. 1-6.
- [24] A.R. Alesaadi, A. Ghaedi, A. Ghaffari and V. Parvin, "De-noising of Online PD Signals in Power Transformers Using the Bhattacharyya Distance," *Trends in Applied Sciences Research*, vol. 7, no.10, pp. 813-828, 2012, doi: tasr.2012.813.828.
- [25] T. Pham-Gia and V. Choulakian, "Distribution of the sample correlation matrix and applications," *Open Journal of Statistics*, vol. 4, no. 5, 2014, doi: 10.4236/ojs.2014.45033.
- [26] N. Kartalović, D. Kovačević and S. Milosavljević, "An advanced model of partial discharge in electrical insulation," *Facta universitatis-series: Electronics and Energetics*, vol. 24, no. 1, pp. 41-55, 2011, doi: 10.2298/FUEE1101041K.
- [27] A. Mazhab Jafari, A. Akbari, H. R. Mirzaei, M. Kharezi and M. Allahbakhshi, "An algorithm for partial discharge localization in transformers using winding design data," *International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis*, Beijing, China, 2008, pp. 919-922, doi: 10.1109/CMD.2008.4580433.
- [28] J.Q. Chan, W.J.K. Raymond, H.A. Illias and M. Othman, "Partial Discharge Localization Techniques: A Review of Recent Progress," *Energies*, vol. 16, no. 6, p. 2863, 2023, doi: 10.3390/en16062863.

---

#### COPYRIGHTS

©2024 by the authors. Published by the Islamic Azad University Bushehr Branch. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>

---

