Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers
Vol. 21 No. 4, 2024
DOI: 10.61186/jiaeee.21.4.201

Partial Discharge Localization in GIS Using Electromagnetic Inverse Filter

Javad Zohrevand[1] , Hamidreza Karami[2] , Mohammad Hasan Moradi[3] ,

Alireza Hatami Sharifabadi[4]

[1] Ph.D. Student, Electrical Engineering Department, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran
j.zohrevand@eng.basu.ac.ir
[2] Associate Professor, Electrical Engineering Department, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran
hamidr.karami@basu.ac.ir
[3] Professor, Electrical Engineering Department, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran
mhmoradi@basu.ac.ir
[4] Assistant Professor, Electrical Engineering Department, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran
hatamisharif@basu.ac.ir

Abstract:

Till now, many different methods like heuristic methods, and the method of time difference of arrival (TDoA) have been proposed and implemented for the localization of partial discharge in power equipment, but their weaknesses have made their usage to be limited in practice. Because in complex situations like the presence of noise, scattering, barriers, and inhomogeneous mediums the accuracy of results will be strongly reduced. The new time-reversal method that has been recently proposed in the field of partial discharge localization showed that can accurately localize partial discharge using just a single sensor. In this paper, the implementation of a different version of the time-reversal method in the electromagnetic regime, named inverse filter has been proposed for the localization of partial discharge in GIS. For evaluation of the proposed method, different scenarios are designed and simulated in two pipe-shape and T-shape structures of a GIS in CST-MWS. Results show that in the case of using minimum entropy for determining the moment of refocusing the waves, this method can accurately localize partial discharge in GIS, in all scenarios.

Keywords: **Partial discharge, Partial discharge Localization, Inverse filter, Electromagnetic inverse filter, Gas-Insulated Switchgear, GIS.**

Article Type: Research

Received: 11. 20. 2022

Revised: 20. 05. 2023

Accepted: 06. 06. 2023

Corresponding author: M.H.Moradi

Corresponding author's address: Ahmadi Roshan Blvd. Elec. Eng. Dep., Bu-Ali Sina University. Hamedan, Iran.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

[DOI: 10.61186/jiaeee.21.4.167]

Copyright © 2024 The Authors. Published by Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.

1. Motivation of the work

Partial discharge can slowly erode the insulation of a power equipment. So, early detection of that can reduce the probability of insulation breakdown and the costs of repair and power loss. Although gas-insulated switchgear (GIS) is of the most reliable equipment in power system, in case of a breakdown repair costs and other side effects like power loss could not be negligible. Many different production or operation defects can lead to partial discharge. To better discover such a defect, it is very necessary to accurately determine the location of the partial discharge [1]. The occurrence of this type of discharge can be distinguished using one of its different physical effects such as chemical, electrical, acoustic optical and electromagnetic effects [1]. In the recent decades, different methods are developed for partial discharge localization, which most of them, are applied in the electromagnetic or acoustic regimes. Time Difference of Arrival, abbreviated as TDoA, can be said that is the most famous and useful conventional method for partial discharge localization [2]. Furthermore some heuristic methods, most of them in optical regime, are proposed to be used for localization of partial discharge [3, 4]. This work is focused on the application of one of the newest methods, known as inverse filter [5], in electromagnetic regime to localize partial discharge in GIS.

2. Contributions

Unlike the conventional methods for localizing the partial discharge in power equipment, the new time reversal method can be applied for that, in the realistic situations, like inhomogeneity of the medium, presence of barriers, noise, scattering, and so on [6]. Also when this method is applied in a cavity, it is possible to effectively localize the partial discharge in the equipment using just a single sensor [7]. These advantages are the results of the fact that the conventional TDoA method uses only zero crossing time parameter to localize the partial discharge. But, in the time reversal method, it is necessary to analyze whole the waveform. So the more data and details are be used and analyzed, which leads to a better localization accuracy and less sensors needed. The newer version of time reversal method, so called inverse filter, has been shown to be powerful in partial discharge localization.

3. Procedures

This work is investigating the application of Inverse filter method in partial discharge localization in GIS.

To do this, two cylinder-shape and T-shape substructure of a GIS has been modeled using CST-MWS. Also the partial discharge has been emulated as a Gaussian pulse and the process of localization of it has been simulated. The process includes three steps as described in follow.

In the forward step, the waves that are propagated in the GIS cavity are simulated and the waveform of the electric field measured by installed sensor(s), is saved.

In the second step, the measured signal is transferred to frequency space, inversed and the result is transferred back to the time space. This step is implemented in MATLAB. The inverse signal(s) are back-injected into the GIS model cavities in the third step, to backpropagation of electromagnetic waves be simulated using the software. To investigate the ability of proposed method, different challenging situations has been simulated in different scenarios like presence of barrier, noise and synchronous and asynchronous partial discharges.

4. Findings

The results of simulating different scenarios shows that the proposed inverse filter is able to accurately localize the partial discharge in the GIS using a single sensor in both cylinder-shape and t-shape modes. Also when minimum entropy is applied as a refocusing detection criteria, the results are more accurate than when another maximum field criteria is used. The results show that using minimum entropy, the inverse filter method can offer accurate partial discharge localization, even in challenging situations like as presence of barrier and noise, or multiple synchronous or asynchronous partial discharges. Conventional methods like TDoA, could be inaccurate or even fail in such a situations.

5. Conclusion

In this work, the new inverse filter method has been applied to localize partial discharge in GIS. It has been showed using simulations that, in different challenging scenarios which conventional methods could fail, inverse filter can effectively localize partial discharge in GIS with an acceptable error. Also, the simulations showed that as a refocusing criteria, minimum entropy criterion is much better than maximum field criterion when inverse filter is applied in GIS.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

[DOI: 10.61186/jiaeee.21.4.167]

نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران

نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال بیست و یکم، شماره چهارم، زمستان ۱۴۰۳، صفحات ۲۰۱-۲۱۰

DOI: 10.61186/jiaeee.21.4.201

مکان‌یابی تخلیه جزئی در GIS با استفاده از روش فیلتر معکوس الکترومغناطیسی

جواد زهره‌وند[۱]، حمیدرضا کرمی[۲]، محمدحسن مرادی[۳]، علیرضا حاتمی[۴]

۱ - گروه برق- دانشکده مهندسی- دانشگاه بوعلی سینا- همدان- ایران

j.zohrevand@eng.basu.ac.ir

۲ – دانشیار- گروه برق- دانشکده مهندسی- دانشگاه بوعلی سینا- همدان- ایران

hamidr.karami@basu.ac.ir

۳ – استاد- گروه برق- دانشکده مهندسی- دانشگاه بوعلی سینا- همدان- ایران

mhmoradi@basu.ac.ir

۴ – دانشیار- گروه برق- دانشکده مهندسی- دانشگاه بوعلی سینا- همدان- ایران

hatamisharif@basu.ac.ir

چکیده: برای مکان‌یابی تخلیه جزئی در ادوات قدرت، تاکنون روش‌های مختلفی از جمله روش‌های ابتکاری و روش اختلاف زمانی (TDoA) پیشنهاد و بکارگیری شده است که ضعف‌ها و معایب هر یک، کاربرد آن‌ها را در عمل محدود نموده است. زیرا در وضعیت‌های دارای اندکی پیچیدگی، مانند حضور نویز، موانع، بازتابنده‌ها و یا ناهمگنی محیط و ...، دقت نتایج حاصله به شدت تحت تاثیر قرار می‌گیرد. روش جدیدتر معکوس زمانی که اخیرا در زمینه مکان‌یابی تخلیه جزئی پیشنهاد شده است، بخوبی توانسته در چنین حالاتی و تنها با بکارگیری یک سنسور منفرد، دقت قابل توجهی را در مکان‌یابی تخلیه جزئی ارائه نماید. در این مقاله بکارگیری نسخه‌ی متفاوتی از روش معکوس زمانی به نام روش فیلتر معکوس، جهت مکان‌یابی تخلیه جزئی در GIS، در رژیم الکترومغناطیسی پیشنهاد شده و به منظور ارزیابی روش پیشنهادی، سناریوهای مختلفی طراحی، و با استفاده از نرم‌افزار CST-MWS در دو ساختار لوله‌ای‌شکل و T شکل، شبیه‌سازی شده است. نتایج کار نشان می‌دهد که در صورت بکارگیری معیار کمینه آنتروپی برای تعیین زمان بازتمرکز امواج، این روش در کلیه سناریوهای آزمایش شده با دقت مطلوبی قادر به مکان‌یابی تخلیه جزئی در GIS می‌باشد.

کلمات کلیدی: تخلیه جزئی، مکان‌یابی تخلیه جزئی، فیلتر معکوس، فیلتر معکوس الکترومغناطیسی، پست عایق گازی، GIS

نوع مقاله: پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۱/۸/۲۹

بازنگری: ۱۴۰۲/۰۲/۳۰

پذیرش: ۱۴۰۲/۳/۱۱

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر محمد حسن مرادی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران – همدان – بلوار شهید احمدی روشن – دانشگاه بوعلی سینا – دانشکده‌ی فنی و مهندسی

حق انتشار این مستند، متعلق به نویسندگان آن است. ۱۴۰۳ ©. ناشر این مقاله، انجمن مهندسین برق و الکترونیک ایران است.

این مقاله تحت گواهی زیر منتشرشده و هر نوع استفاده غیرتجاری از آن مشروط بر استناد صحیح به مقاله و با رعایت شرایط مندرج در آدرس زیر مجاز است.

Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International license

(https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

[DOI: 10.61186/jiaeee.21.4.167]

۱- مقدمه

مکان‌یابی تخلیه جزئی در تجهیزات قدرت باعث تسهیل شناسایی و رفع نقص اولیه منجر به آن شده و از این طریق می‌تواند علاوه بر جلوگیری از بروز فروشکست عایقی و قطع سرویس‌دهی دستگاه، از تحمیل هزینه‌های بالای تعمیرات و جرائم ناشی از قطع برق نیز پیشگیری نماید [۱]. بر اساس گزارش CIGRE، بین ۱۸ تا ۲۱ درصد خرابی‌ها در GIS ناشی از ضعف عایقی تجهیز است [۲]، که در این بین، تخلیه جزئی بیشترین سهم را در بروز فروشکست عایقی به خود اختصاص داده است.

پدیده تخلیه جزئی اثرات فیزیکی مختلف الکتریکی، شیمیایی، اپتیکی، آکوستیکی و الکترومغناطیسی را در محیط ایجاد می‌نماید که با استفاده از هر یک از آن‌ها می‌توان وقوع آن را شناسایی نمود [۴۱]، از این میان، مکان‌یابی تخلیه جزئی با بهره‌گیری صرف از خواص شیمیایی مقدور نبوده و با استفاده از اثرات الکتریکی نیز تنها قادر به مکان‌یابی تخلیه جزئی بصورت یک بعدی (تشخیص حلقه دارای تخلیه جزئی در ترانسفورماتور) خواهیم بود 4]] که مشخصا این روش کاربردی در GIS ندارد، اما روش‌های مبتنی بر انتشار امواج الکترومغناطیسی و آکوستیکی به طور گسترده‌تری برای مکان‌یابی سه‌بعدی تخلیه جزئی در تجهیزات قدرت مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۵] و بطور خاص برای تشخیص مکان تخلیه جزئی در GIS نیز بکار رفته‌اند [۷-۱۰]. همچنین اخیرا فعالیت‌های محدودی نیز برای مکان‌یابی تخلیه جزئی با استفاده از خواص اپتیکی آن صورت گرفته است [۱۰-۱۲]. در یک روش دیگر مبتنی بر تشخیص لبه تصویر و SVM ، فاصله سنسور از محل وقوع تخلیه جزئی محاسبه می‌شود [۹] اما عیب این روش وابستگی آن به تعداد زیاد آزمون اولیه جهت آموزش مدل می‌باشد.

تاکنون الگوریتم‌های متعددی جهت مکان‌یابی تخلیه جزئی با استفاده از خصوصیات امواج الکترومغناطیسی یا آکوستیکی منتشره از آن پیشنهاد شده است، که معروف‌ترین آن‌ها روش اختلاف زمانی[۱] (TDoA) است [۱۴]. اما به دلیل ضعف ذاتی این روش و سایر روش‌های مرسوم در مکان‌یابی تخلیه جزئی در ساختارهای پیچیده واقعی، اخیرا روش جدیدتر معکوس زمانی[۲] (TR) برای این منظور پیشنهاد شده است که توانسته نقاط ضعف روش اختلاف زمانی و سایر روش‌های پیشین را بخوبی پوشش دهد [۱۵].

روش فیلتر معکوس[۳] (IF) نسخه متفاوتی از روش معکوس زمانی است که پیش از این در سایر حوزه‌های مهندسی و علوم، از جمله در سنجش از دور [۱۶]، بازیابی و بازسازی عکس، در پردازش تصویر [۱۸,۱۷] تشخیص کلمات نجواگون در علم تشخیص گفتار [۱۹]، اکتشاف نفت و معدن‌کاوی [۲۰] و ... مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین اخیرا توانایی این روش جهت مکان‌یابی تخلیه جزئی در ترانسفورماتورها نیز مورد آزمون قرار گرفته است [۲۱].

در این مقاله به منظور مکان‌یابی تخلیه جزئی در GIS استفاده از روش فیلتر معکوس در رژیم الکترومغناطیسی[۴] پیشنهاد شده است. همچنین با اینکه بطور معمول در روش معکوس زمانی برای ساختارهای محصور در یک محفظه، از معیار بیشینه[۵] میدان بعنوان معیار بازتمرکز[۶] امواج پس‌انتشار[۷] یافته استفاده می‌شود، در این تحقیق از معیار کمینه آنتروپی[۸] برای این منظور استفاده شده است و نتایج نشان می‌دهد این معیار در ساختار خاص GIS نتایج بهتری را نسبت به معیار بیشینه میدان به دست می‌دهد.

برای پیاده‌سازی روش پیشنهادی دو زیرساختار هندسی از GIS، یکی ساختار لوله‌ای شکل، و دیگری ساختار T شکل در نظر گرفته شده است و با شبیه‌سازی پدیده تخلیه جزئی و انتشار امواج الکترومغناطیسی ناشی از آن درون هر یک از این دو ساختار در نرم‌افزار CST-MWS ، مکان وقوع تخلیه جزئی با اعمال روش فیلتر معکوس مورد شناسایی قرار گرفته است. همچنین برای کسب اطمینان از صحت عملکرد روش پیشنهادی در وضعیت‌های مختلف و آنالیز حساسیت آن، سناریوهای مختلفی طراحی و شبیه‌سازی شده است.

در ادامه این مقاله و در قسمت دوم، مرور مختصری بر روش‌های مختلف مکان‌یابی تخلیه جزئی ارائه شده است. در قسمت سوم به مبانی ریاضی و الگوریتم اجرایی روش فیلتر معکوس پرداخته شده و در قسمت چهارم مطالعات موردی و نتایج شبیه‌سازی‌های انجام یافته ارائه خواهد گردید و در قسمت پنجم نیز جمع بندی و نتیجه‌گیری مقاله آورده شده است.

۲- مروری بر روش‌های مکان‌یابی تخلیه جزئی

به طور کلی روش‌های مکان‌یابی تخلیه جزئی را می‌توان به چهار دسته شامل روش‌های ابتکاری[۹]، روش اختلاف زمانی، روش معکوس زمانی و روش فیلتر معکوس تقسیم بندی نمود که در این بخش شرح مختصری از شیوه کار هر یک و مزایا و معایب آن‌ها ارائه خواهد شد.

۲-۱- روش‌های ابتکاری

در روش‌های ابتکاری مسئله به طور خاص و برای ساختاری معین حل می‌گردد، اما عموما چنین روش‌هایی قابل تعمیم به همه دستگاه‌ها نبوده یا در نهایت برای تعیین محل وقوع تخلیه جزئی نیاز به دخالت و اظهار نظر انسان داشته و لذا قابل پیاده‌سازی به صورت اتوماتیک نخواهند بود. از جمله این روش‌ها می‌توان به روش اپتوآکوستیک اشاره نمود که در آن از اثرات آکوستیکی پدیده تخلیه جزئی جهت اثرگذاری بر سیگنال‌های عبوری از فیبرهای نوری نصب شده در دستگاه بهره‌گیری می‌شود [۱۱].

در روش ابتکاری دیگر، ابتدا تخلیه‌های جزئی مصنوعی متعددی در داخل دستگاه اعمال شده، سپس مشخصه و اثر انگشت اپتیکی ثبت شده توسط دوربین‌های صنعتی نصب شده در بدنه دستگاه برای هر تخلیه در یک پایگاه داده ثبت می‌گردد. سپس در هنگام وقوع تخلیه

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

[DOI: 10.61186/jiaeee.21.4.167]

جزئی واقعی، محل تخلیه با تطبیق اثر انگشت ثبت شده جدید با مقادیر ذخیره شده در پایگاه داده تعیین می‌گردد [۱۳,۱۲]. این روش کاملا وابسته به ساختار دستگاه بوده و پس از کوچکترین تغییر در ساختار در هندسی دستگاه، کل فرآیند تولید پایگاه داده بایستی مجددا تکرار گردد.

۲-۲- روش اختلاف زمانی

در روش اختلاف زمانی محیط دستگاه بطور دائم توسط تعدادی سنسور برای شناسایی رخداد هرگونه تخلیه جزئی پایش شده و به محض دریافت امواج (آکوستیکی یا الکترومغناطیسی) حاصل از پدیده تخلیه جزئی توسط هر سنسور، زمان دریافت آن در واحد پردازنده ثبت می‌گردد. با معلوم بودن سرعت انتشار امواج در محیط، و داشتن مدت زمان رسیدن امواج از محل وقوع تخلیه جزئی به سنسورهای نصب شده روی دستگاه، فاصله تخلیه جزئی از هر سنسور تخمین زده می‌شود [۱۴].

اما با توجه به سرعت بالای انتشار امواج، بخصوص امواج الکترومغناطیسی، این روش حساسیت بالایی به تعیین دقیق زمان شروع دریافت سیگنال توسط سنسورها (onset time)، داشته و نیز وجود دید مستقیم مابین سنسورها و محل وقوع تخلیه جزئی، برای عملکرد صحیح آن ضروریست. این درحالیست که در عمل در بسیاری از تجهیزات قدرت از قبیل ترانسفورماتورها، GIS، کابل و ...، وجود چنین دید مستقیمی بین منبع تخلیه جزئی و سنسور به دلیل سختار پیچیده تجهیزات قابل تضمین نخواهد بود. از سوی دیگر وجود هرگونه ناهمگنی در محیط، موانع و یا بازتاب امواج از دیوارها و یا حضور نویز، دقت و حتی صحت نتایج را به طرز فاحشی تحت‌الشعاع قرار می‌دهد. علاوه بر این، حتی در شرایط ایده‌آل نیز نصب حداقل چهار عدد سنسور سنکرون شده جهت جایابی سه‌بعدی تخلیه جزئی در دستگاه ضروری خواهد بود، که این امر خود موجب تحمیل هزینه‌های اضافی به بهره‌بردار سیستم خواهد شد[۱۵,۲۳۱]

۲-۳- روش معکوس زمانی

به منظور گریز از مشکلات و ضعف‌های روش اختلاف زمانی، اخیرا در هر دو رژیم آکوستیک و الکترومغناطیس، روش معکوس زمانی جهت جایابی تخلیه جزئی پیشنهاد و بکارگیری شده است [۱۵]. ایده این روش بر مبنای تقارن ذاتی قوانین فیزیکی و انتشار امواج نسبت به زمان در محیط‌های بدون تلف (یا کم‌تلفات) بنا شده است. بدین معنی که با معکوس نمودن پیکان زمان، امواجی که از سوی منبع در محیط منتشر شده‌اند بایستی مسیر انتشار را بصورت معکوس طی نموده و به سوی منبع اولیه خود بازگشته و موجک‌های مختلف در محل مبدا بازتمرکز نمایند [۲۴]. در تحقیقات اخیر این روش جهت مکان‌یابی تخلیه جزئی در ترانسفورماتورها [۲۲,۱۵]، GIS [۲۳]، و کابل‌ها [۲۵] استفاده شده است.

در روش TDoA از کل اطلاعات موجود در سیگنال دریافت شده توسط سنسورها، تنها «زمان عبور از صفر» آن که نشان دهنده زمان رسیدن امواج تخلیه جزئی به سنسورهاست استفاده می‌گردد. لذا نصب حداقل چهار سنسور برای جایابی سه بعدی تخلیه جزئی در دستگاه ضرورت دارد. اما این سیگنال‌ها حامل اطلاعاتی بیشتر، شامل محل انتشار امواج، وضعیت مسیر انتشار مانند جنس مسیر، همگنی و ناهمگنی محیط، وجود موانع و دیواره‌ها و ... نیز هستند. در روش معکوس زمانی، کل شکل موج دریافتی توسط هر سنسور جهت مکان‌یابی مبدا انتشار امواج مورد آنالیز قرار می‌گیرد. لذا حتی با وجود استفاده از تنها یک سنسور و پرداخت هزینه پردازش کمتر نیز می‌توان بطور دقیقی تخلیه جزئی را در دستگاه مکان‌یابی نمود [۲۳].

۲-۳-۱-الگوریتم اجرایی روش معکوس زمانی

برای مکان‌یابی تخلیه جزئی به روش معکوس زمانی می‌بایستی سه گام اساسی طی گردد. در گام نخست همانند روش اختلاف زمانی، با نصب سنسورهایی روی دستگاه، محیط داخلی آن به صورت مستمر جهت تشخیص وقوع پدیده تخلیه جزئی مورد پایش قرار می‌گیرد. با دریافت امواج توسط سنسورها، اطلاعات ارسالی از سوی هر سنسور در پردازنده مرکزی ثبت می‌شود، تا در گام بعدی مورد استفاده قرار گیرد. در گام دوم برای شبیه سازی پس‌انتشار امواج به مبدا، ابتدا سیگنال‌های ثبت شده توسط سنسورها زمان معکوس می‌گردند، یعنی سیگنال‌ها در طول محور زمان معکوس می‌شوند. سپس در گام سوم هر سیگنال زمان معکوس از محل ثبت اولیه خود (محل نصب سنسور مربوطه) به محیط بازتزریق[۱۰] می‌گردد. این امر موجب پس‌انتشار امواج در محیط شده و انتظار می‌رود که پس از طی مدت زمانی برابر با زمان انتشار، امواج در مبدا اولیه انتشار خود بازتمرکز نموده و در یک نقطه تجمیع گردند.

۲-۳-۲- معیار بازتمرکز در روش معکوس زمانی

از آنجایی که زمان انتشار امواج از محل وقوع تخلیه جزئی تا محل سنسور نامعلوم است، در مرحله پس‌انتشار بایستی زمان بازتمرکز با استفاده از یک معیار آماری شناسایی گردد. معمول‌ترین معیارهایی که تاکنون در منابع مختلف برای این منظور مورد استفاده قرار گرفته‌اند، معیارهای کمینه آنتروپی، بیشینه میدان و همبستگی متقاطع[۱۱] بوده‌اند [۲۷,۲۶,۲۲]. در تحقیقات انجام یافته تاکنون، بیشتر از دو معیار اول در مکان‌یابی تخلیه جزئی استفاده گردیده است.

از آنجایی که آنتروپی شاخصی آماری از بی‌نظمی یک محیط است، می‌توان ادعا نمود که در لحظه اولیه انتشار امواج در محیط، بیشترین نظم در آن حاکم است، زیرا شدت میدان در کل محیط، به جز در مبدا انتشار امواج برابر صفر است. لذا بطور مشابه، در فرآیند زمان معکوس نیز محیط بایستی در لحظه‌ی بازتمرکز امواج کمترین میزان آنتروپی را دارا باشد.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

[DOI: 10.61186/jiaeee.21.4.167]

معیار بیشینه میدان با این فرض مورد استفاده قرار می‌گیرد که در زمان بازتمرکز امواج، موجک‌های مختلف موج پس‌انتشار یافته، همگی در محل مبدا اولیه همفاز شده و جمع جبری دامنه آن‌ها بیشینه خواهد شد. بنابراین در صورتی که برای هر نقطه از محیط، میزان بیشینه دامنه میدان ثبت شود، نقطه‌ای که بالاترین مقدار بیشینه را تجربه نموده باشد، می‌تواند به عنوان نقطه‌ی بازتمرکز امواج شناخته شود.

البته بایستی توجه داشت که در مورد هر دو معیار مذکور، فرض می‌شود که تعداد بی‌نهایت سنسور در مرز محیط (روی کل پوسته GIS) نصب شده است، اما در عمل ممکن است تنها یک یا دو سنسور روی دستگاه نصب شده باشد که می‌تواند منجر به تحمیل خطا در مکان‌یابی و یا اعوجاجات دیگر در نتایج گردد. برای مثال در هنگام بکارگیری معیار بیشینه میدان، بایستی یک همسایگی معنادار از محل نصب سنسور (محل بازتزریق امواج) نادیده گرفته شود تا محل واقعی تخلیه جزئی بصورت صحیح تشخیص داده شود. زیرا در این نقطه و همسایگی آن دامنه میدان بطور ناخواسته زیاد و قابل توجه خواهد شد که می‌تواند منجر به ایجاد پاسخ کاذب در آن نقطه گردد.

۲-۴- روش فیلتر معکوس

در این روش که در واقع می‌توان آن را نسخه ارتقا یافته روش معکوس زمانی محسوب نمود، به جای زمان معکوس نمودن سیگنال‌های ذخیره شده، این سیگنال‌ها در حوزه فرکانس به صورت کسری وارون شده و به محیط بازتزریق می‌گردند [۲۰]. در واقع تنها تفاوت الگوریتم اجرایی دو روش، در گام دوم است که در روش معکوس زمانی چینش سیگنال‌های ثبت شده توسط سنسورها بصورت زمانی معکوس می‌شود، اما در روش فیلتر معکوس دامنه مولفه‌های فرکانسی سیگنال ثبت شده توسط سنسورها بصورت کسری وارون می‌شود. این امر سبب می‌شود تمرکز زمانی و مکانی امواج پس انتشار یافته در مبدا اولیه، نسبت به روش معکوس زمانی افزایش یابد [۲۸-۳۱]. در ادامه مقاله مبانی ریاضی و الگوریتم اجرایی مکان‌یابی تخلیه جزئی به روش فیلتر معکوس مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۳- فرمولاسیون و الگوریتم روش فیلتر معکوس

در این بخش پس از ارائه مدل ریاضی و فرمولاسیون روش فیلتر معکوس، فلوچارت و الگوریتم اجرایی آن ارائه خواهد گردید.

۳-۱- فرمولاسیون مسئله

با نگاهی سیستمی همانند شکل (۱) به فرآیند وقوع تخلیه جزئی و ثبت امواج ناشی از، می‌توان مجموعه دستگاه (GIS) و سنسور را به عنوان یک سیستم خطی تغییرناپذیر با زمان (LTI)، ولتاژ ایجاد شده ناشی از تخلیه جزئی را به عنوان ورودی سیستم، و در نهایت سیگنال ثبت شده توسط سنسور را به عنوان خروجی آن در نظر گرفت.

بنابراین با فرض اینکه $s(t)$ سیگنال حاصل از تخلیه جزئی، $r(t)$ سیگنال ثبت شده توسط سنسور و $h(t)$ نشان دهنده تابع انعکاس سیستم باشد، در حوزه زمان خواهیم داشت:

$$r(t) = s(t) * h(t) \quad (۱)$$

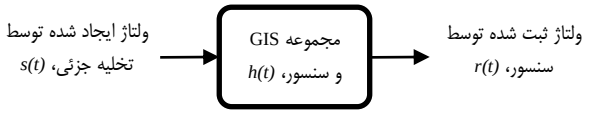
که در رابطه فوق علامت $*$ عملگر کانولوشن را نشان می‌دهد.

تابع انعکاس، $h(t)$، همان پاسخ ضربه سیستم بوده و به عوامل مختلفی از جمله محل وقوع تخلیه جزئی، محل نصب سنسور، جنس و شکل دستگاه و عایق و عوامل متعدد دیگری بستگی دارد. از آنجایی که پدیده تخلیه جزئی بصورت تخلیه‌های متناوب پدیدار می‌شود، می‌توان تحلیل‌های مربوط به آن را با استفاده از تبدیل فوریه به حوزه فرکانس منتقل نمود:

$$R(\omega) = S(\omega)H(\omega) \quad (۲)$$

در معادله فوق حروف بزرگ لاتین نمایشگر مقادیر در حوزه فرکانس و ω فرکانس زاویه‌ای است.

در روش فیلتر معکوس نیز مشابه با روش معکوس زمانی، در گام دوم، سیگنال‌های دریافت شده توسط سنسورها در گام اول تغییر می‌یابند تا در گام سوم از محل نصب همان سنسور به محیط بازتزریق گردد. این دستکاری در روش فیلتر معکوس با وارون سازی کسری سیگنال انتقال یافته به حوزه فرکانس، یعنی تبدیل $R(\omega)$ به $R^{-1}(\omega)$ صورت می‌گیرد.



شکل (۱): فرآیند تخلیه جزئی به مثابه یک سیستم

از آنجایی که جابجایی محل‌های ورود و خروج سیگنال در یک سیستم تابع انعکاس را تغییر نمی‌دهد، سیگنال دریافتی در محل مبدا اولیه تخلیه جزئی ناشی از پس‌انتشار امواج، $Y(\omega)$، را می‌توان از رابطه زیر به دست آورد:

$$Y(\omega) = \frac{1}{R(\omega)}H(\omega) = \frac{1}{S(\omega)H(\omega)}H(\omega) = \frac{1}{S(\omega)} \quad (۳)$$

اما تابع انعکاس برای سایر نقاط، غیر از مبدا اولیه تخلیه جزیی، برابر با $g(t)$ خواهد بود. لذا سیگنال سنجش شده در سایر نقاط از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$Y(\omega) = \frac{1}{R(\omega)}G(\omega) = \frac{1}{S(\omega)H(\omega)}G(\omega) = \frac{1}{S(\omega)}\frac{G(\omega)}{H(\omega)} \quad (۴)$$

از دیگر سو می‌توان سیگنال ناشی از پدیده تخلیه جزئی را به دلیل ماهیت سریع آن، به صورت یک تابع ضربه متصور شد:

$$s(t) = \delta(t) \Rightarrow S(\omega) = 1 \quad (۵)$$

بنابراین:

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

[DOI: 10.61186/jiaeee.21.4.167]

$$Y(\omega)=\begin{cases}1 & \text{در مبدا اولیه تخلیه جزئی}\\ \dfrac{G(\omega)}{H(\omega)} & \text{در سایر نقاط}\end{cases} \quad (۶)$$

با انتقال رابطه (۸) به حوزه زمان خواهیم داشت:

$$y(t)=\begin{cases}\delta(t) & \text{در مبدا اولیه تخلیه جزئی}\\ iFT\left\{\dfrac{G(\omega)}{H(\omega)}\right\} & \text{در سایر نقاط}\end{cases} \quad (۷)$$

که در رابطه فوق $iFT\{\}$ عملگر معکوس تبدیل فوریه است.

بنابراین همانگونه که مشاهده می‌گردد، میدان ناشی از بازتمرکز امواج پس انتشار یافته، در محل وقوع تخلیه جزئی به صورت یک تابع ضربه بازیابی شده و در سایر نقاط رفتار آن به صورتی متفاوت (غیرضربه و گسترده در محور زمان) ظاهر خواهد شد. بنابراین انتظار می‌رود که در فاز پسگرد، بیشینه دامنه در محل اولیه انتشار امواج دیده شود. هر چند که در عمل به دلایل مختلفی اعم از عدم تطابق الگوی تخلیه جزئی با تابع ضربه، LTI نبودن کامل سیستم، شامل وجود تلفات، غیرخطی بودن سنسورها، تغییرات سیستم در طول زمان و ... ممکن است موجب بازسازی سیگنال در محلی به غیر از محل اولیه وقوع تخلیه جزئی و در نتیجه تحمیل خطا در مکان‌یابی آن گردد.

لازم به ذکر است که وارون نمودن کسری سیگنال در حوزه فرکانس اثری مشابه با زمان‌معکوس نمودن آن دارد. زیرا می‌توان نوشت:

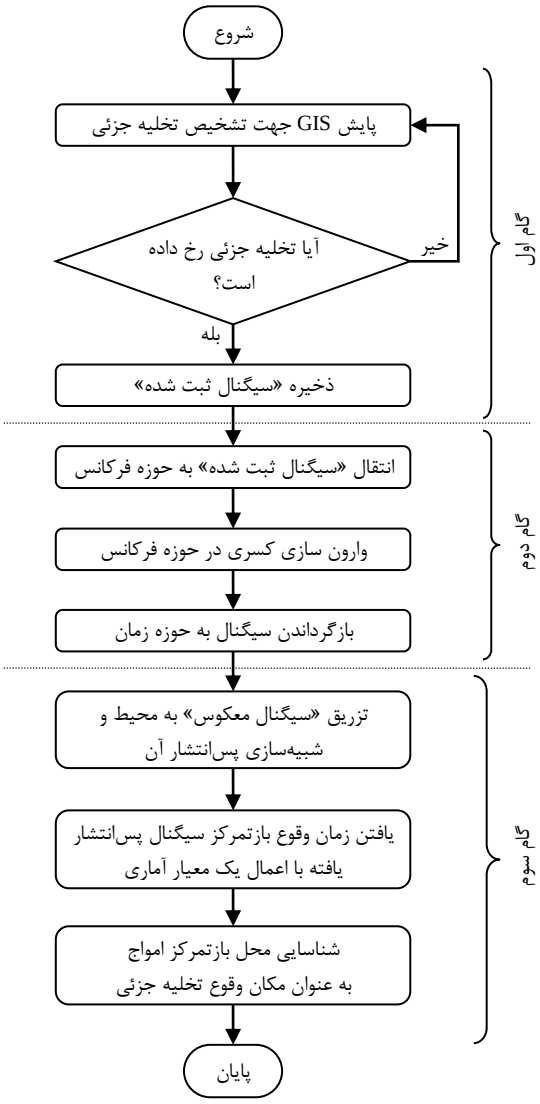
$$\frac{1}{R(\omega)}=\frac{1}{R(\omega)}\times\frac{R^{*}(\omega)}{R^{*}(\omega)}=\frac{R^{*}(\omega)}{\|R(\omega)\|^{2}} \quad (۸)$$

که در رابطه بالا، $R^{*}(\omega)$ مزدوج مختلط عبارت $R(\omega)$ را نشان می‌دهد.

از آنجایی که با اعمال تبدیل فوریه معکوس روی $R^{*}(\omega)$ به $r(-t)$ خواهیم رسید، می‌توان نتیجه گرفت که چینش زمانی «سیگنال معکوس شده» در روش فیلتر معکوس، مشابه با «سیگنال زمان‌معکوس» در روش معکوس زمانی است. البته بایستی خاطرنشان نمود که دامنه‌ی سیگنال معکوس شده در حوزه فرکانس با ضریب غیرثابت (وابسته به فرکانس) $||R(\omega)||^{-2}$ تغییر یافته است.

۳-۲- الگوریتم اجرایی روش پیشنهادی

همانطور که در شکل (۲) قابل مشاهده است پروسه مکان‌یابی تخلیه جزئی به روش فیلتر معکوس شامل سه گام اصلی است.



شکل (۲): فلوچارت مکان‌یابی تخلیه جزئی به روش فیلتر معکوس

در گام اول که آن را «گام پیشرو » می‌نامیم، محیط GIS بصورت مداوم تحت پایش سنسور الکترومغناطیسی نصب شده روی دستگاه از جنس آنتن دوقطبی UHF قرار داشته و به محض مشاهده امواج الکترومغناطیسی حاصل از وقوع تخلیه جزئی، اطلاعات دریافت شده توسط سنسور در حافظه ثبت می‌گردند. سیگنال حاصل در این مرحله را اختصارا «سیگنال ثبت شده» می‌نامیم.

در گام دوم سیگنال ثبت شده با استفاده از تبدیل فوریه به حوزه فرکانس انتقال یافته و پس از وارون سازی آن بصورت کسری، برای استحصال «سیگنال معکوس» به حوزه زمان بازگردانده می‌شود.

در گام سوم یا «گام پسگرد»، سیگنال معکوس حاصل شده‌ی گام قبل، از محل نصب سنسور مربوطه به محیط بازتزریق شده و فرآیند پس‌انتشار امواج الکترومغناطیسی در محیط شبیه‌سازی می‌گردد. سپس با استفاده از یک معیار برای تشخیص لحظه‌ی بازتمرکز امواج پس‌انتشار یافته، محل وقوع تخلیه جزئی تخمین زده خواهد شد.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

[DOI: 10.61186/jiaeee.21.4.167]

۴- شبیه سازی و نتایج

همان‌گونه که پیش از این نیز مورد اشاره قرار گرفت، در این مقاله از دو ساختار لوله‌ای شکل و T شکل جهت ارزیابی قابلیت و توانمندی روش پیشنهادی در مکان‌یابی تخلیه جزئی در GIS استفاده شده است که در این بخش جزئیات هندسی و سایر جزئیات شبیه‌سازی ارائه خواهد گردید. در ادامه نیز چندین سناریو برای ارزیابی روش پیشنهادی شبیه‌سازی، و نتایج حاصل ارائه شده است.

۴-۱- ساختارهای هندسی و جزئیات شبیه‌سازی

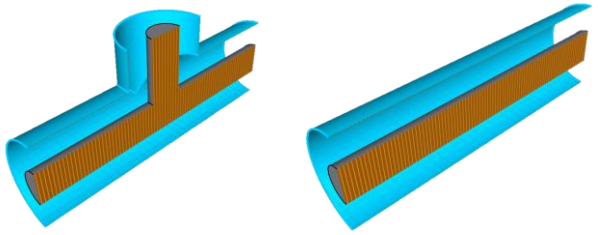
در این مقاله ابتدا یک ساختار لوله‌ای شکل متشکل از دو استوانه فلزی هم محور مانند شکل (۳-الف) به طول ۲ متر در نظر گرفته شده است. استوانه داخلی به صورت توپر، از جنس مس و با قطر خارجی ۲۴ سانتی متر و استوانه توخالی فولادی خارجی با قطر داخلی ۶۲ سانتی متر، به ترتیب الکترود و پوسته‌ی خارجی بخشی از یک بازوی صاف را در یک GIS مدل نموده‌اند. حد فاصل این دو استوانه با گاز SF6 به عنوان عایق پر شده است.

ساختار دیگر T شکل نیز با اضافه کردن یک قطعه ۶۰ سانتی متری مشابه با ساختار قبلی و اتصال الکترود داخلی آن عمود بر نقطه میانی الکترود اصلی و بطور مشابه یکپارچه نمودن پوسته آن با پوسته بخش اصلی همانند شکل (۳-ب) ایجاد شده است.

برای شبیه سازی تخلیه جزئی از یک آنتن دو قطبی به طول ۱ سانتیمتر در نزدیکی الکترود داخلی استفاده شده است. این آنتن توسط یک پالس گوسی در باند UHF، محدوده فرکانسی 300MHz تا 3GHz، تحریک شده و این امر موجب انتشار امواج در فضای داخلی دستگاه می‌گردد. انتشار این امواج با استفاده از نرم افزار CST-MWS شبیه‌سازی شده است. این نرم‌افزار فرم انتگرالی معادلات میدان ماکسول را با تکنیک انتگرال‌گیری محدود (FIT) حل می‌کند.

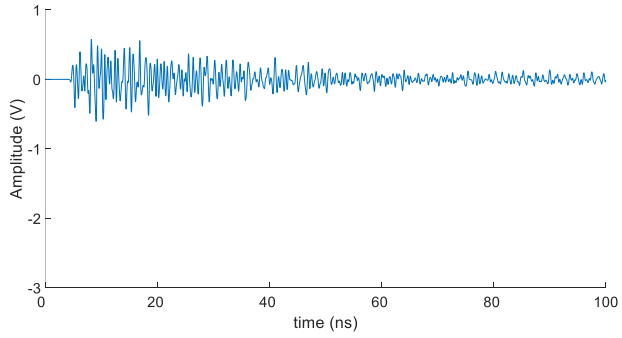
همچنین جهت اندازه‌گیری امواج الکترومغناطیسی ناشی از تخلیه جزئی، آنتن دیگری کاملاً مشابه آنتن قبلی، در داخل ساختار و دقیقا زیر پوسته بیرونی نصب گردیده است که در نقش سنسور عمل کرده و سیگنال‌های اندازه‌گیری شده را به پردازنده سیستم منتقل می‌نماید.

در گام پیشرو با تحریک آنتن شبیه‌ساز تخلیه جزئی و شبیه‌سازی انتشار امواج الکترومغناطیسی در محیط، سنسور سیگنالی مشابه با سیگنال شکل (۴) را اندازه‌گیری خواهد نمود. در گام دوم پس از انتقال سیگنال ثبت شده مرحله قبل، از حوزه زمان به حوزه فرکانس و وارون سازی آن، نتیجه مجدداً به حوزه زمان بازگردانده می‌شود تا از محل نصب سنسور مربوطه به محیط بازتزریق گردد. فرآیند یاد شده شامل انتقال به حوزه فرکانس، وارون سازی کسری سیگنال، و بازگرداندن مجدد آن به حوزه زمان، در نرم افزار MATLAB اجرا شده است. یک نمونه از چنین سیگنال معکوس شده‌ای که این پردازش را پشت سر گذاشته و آماده بازتزریق به سیستم شده است، در شکل (۵) قابل مشاهده است. در نهایت، در گام پسگرد با بازتزریق سیگنال به محیط و شبیه‌سازی فرآیند پس‌انتشار امواج در CST-MWS، تغییرات شدت میدان الکتریکی در طول زمان برای هر نقطه از فضای داخلی دستگاه محاسبه شده و پس از پایان شبیه‌سازی، یکی از معیارهای بازتمرکز برای تعیین موقعیت تخلیه جزئی مورد استفاده قرار گرفته است.

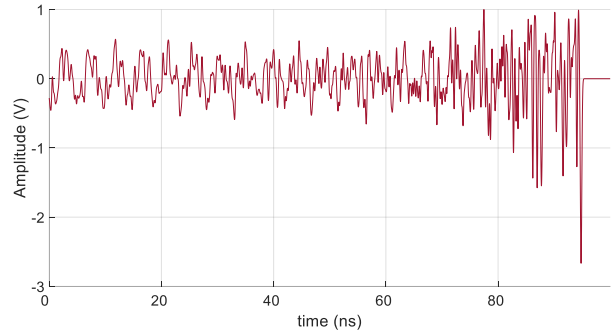


(ب) (الف)

شکل (۳): برش طولی ساختارهای مورد مطالعه الکترود داخلی و پوسته بیرونی؛ (الف): ساختار لوله‌ای شکل؛ (ب): ساختار T شکل



شکل (۴): سیگنال ثبت شده توسط سنسور



شکل (۵): سیگنال معکوس جهت بازتزریق به محیط

۴-۲- سناریوها و نتایج

در این بخش نتایج حاصل از اعمال روش پیشنهادی برای جایابی تخلیه جزئی در سناریوهای مختلف ارائه شده است. در ابتدا سناریوهای ساده با خط دید مستقیم بین سنسور و تخلیه جزئی در هر دو ساختار معرفی شده در شکل (۳) شبیه سازی شده و دقت نتایج هنگام بکارگیری دو معیار کمینه آنتروپی و بیشینه میدان مورد مقایسه شده است. در ادامه وضعیت‌های پیچیده‌تر شامل نبود خط دید مستقیم، وجود تخلیه‌های همزمان و حضور نویز نیز مورد شبیه‌سازی شده است.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

[DOI: 10.61186/jiaeee.21.4.167]

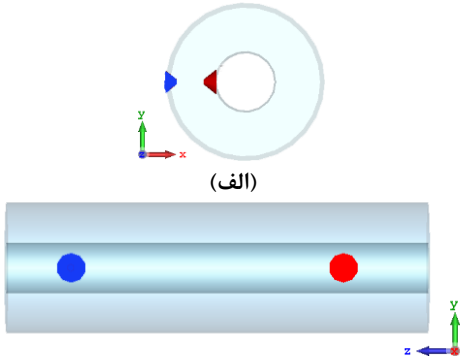
۴-۲-۱- سناریو ۱: تخلیه جزئی منفرد در ساختار لوله‌ای شکل

در اولین سناریو، مسئله‌ای ساده جهت محک زدن توانایی روش فیلتر معکوس در مکان‌یابی تخلیه جزئی در ساختار لوله‌ای شکل در نظر گرفته شده است. ساختار مذکور توسط یک سنسور پایش شده و تنها در یک نقطه از آن تخلیه جزئی رخ داده است. سنسور و تخلیه جزئی همان گونه که در شکل (۶) قابل مشاهده است، نسبت به یکدیگر دید مستقیم دارند. با فرض آنکه مبدا مختصات در مرکز ساختار قرار داشته باشد، مختصات قطبی محل نصب سنسور و وقوع تخلیه جزئی از قرار مندرج در جدول (۱) خواهد بود.

جدول (۱): مختصات سنسور و تخلیه جزئی در سناریو ۱

	R(m)	*φ(degree)*	*Z(m)*
سنسور	۰/۲۸۵	-۱۸۰	۰/۷
تخلیه جزئی	۰/۱۴۵	-۱۸۰	-۰/۶

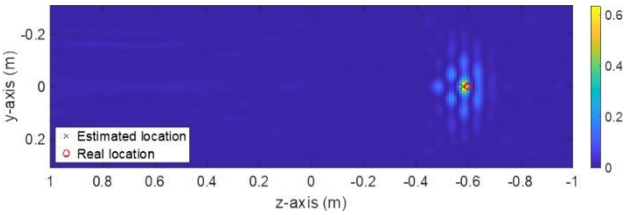
در این سناریو نتایج حاصل از بکارگیری هر دو معیار کمینه آنتروپی و بیشینه میدان به ترتیب در شکل (۷) و شکل (۸) آورده شده است. در این اشکال محل واقعی تخلیه جزئی با دایره و محل تخمینی محاسبه شده برای آن با علامت ضربدر مشخص شده است.



(الف)

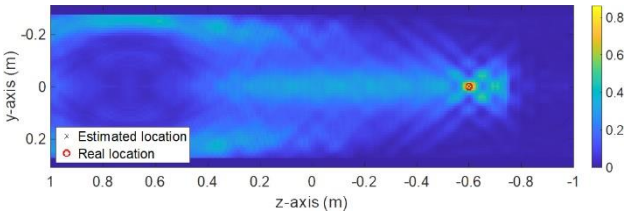
(ب)

شکل (۶): جانمایی سنسور(آبی رنگ) و تخلیه جزئی (قرمز رنگ) در ساختار لوله‌ای شکل؛ (الف): نمای عرضی؛ (ب): نمای طولی



شکل (۷): برش طولی توزیع لحظه‌ای شدت میدان الکتریکی در لحظه بازتمرکز امواج (لحظه دارای کمینه آنتروپی) در سناریو ۱

همان طور که مشاهده می‌شود، کنتراست تصویر در شکل ایجاد شده ناشی از اعمال معیار کمینه آنتروپی بیشتر از شکل حاصل از اعمال معیار بیشینه میدان است. لذا تشخیص محل وقوع تخلیه جزئی از این تصویر چه برای انسان و چه برای ماشین با سهولت بیشتری صورت می‌گیرد و می‌توان گفت معیار کمینه آنتروپی نسبت به معیار بیشینه میدان بهتر عمل می‌نماید.

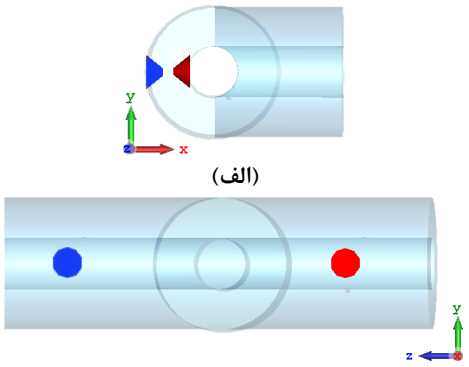


شکل (۸): برش طولی توزیع بیشینه شدت میدان الکتریکی در کل زمان‌ها در هر نقطه از ساختار در سناریو ۱

۴-۲-۲-سناریو ۲: تخلیه جزئی منفرد در ساختار T شکل

در سناریو دوم، به جای ساختار لوله‌ای شکل ساده، از ساختار پیچیده‌تر T شکل که در شکل (۹) دیده می‌شود، استفاده شده است. سایر المان‌های سناریو از جمله جانمایی تخلیه جزئی و سنسور و لذا مسیر دید مستقیم بین این دو، همانند سناریو ۱ است.

شکل (۱۰) نتایج شبیه‌سازی برای این ساختار با بکارگیری معیار کمینه آنتروپی و شکل (۱۱) نتایج را با بکارگیری معیار بیشینه دامنه میدان نمایش می‌دهد. در این سناریو نیز مشاهده می‌شود که روش فیلتر معکوس به خوبی توانسته است نسبت به مکان‌یابی تخلیه جزئی در ساختار T شکل موثر باشد.

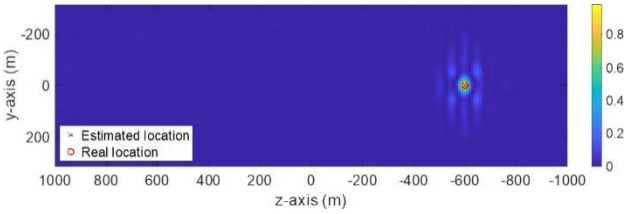


(الف)

(ب)

شکل (۹): جانمایی سنسور(آبی رنگ) و تخلیه جزئی (قرمز رنگ) در ساختار T شکل؛ (الف): نمای عرضی؛ (ب): نمای طولی

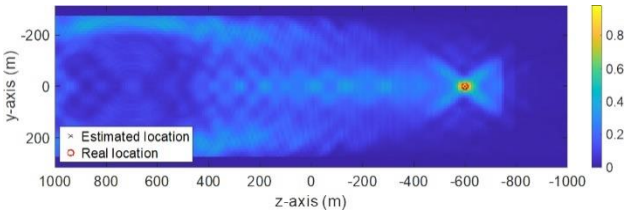
همچنین مقایسه این دو شکل نشان می‌دهد که مانند سناریو قبل، معیار کمینه آنتروپی توزیع فشرده‌تری از میدان در اطراف نقطه جواب را به نمایش می‌گذارد.



شکل (۱۰): برش طولی توزیع لحظه‌ای شدت میدان الکتریکی در لحظه بازتمرکز امواج (لحظه دارای کمینه آنتروپی) در سناریو ۲

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

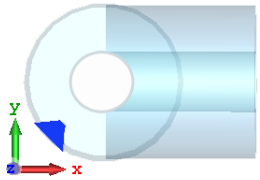
[DOI: 10.61186/jiaeee.21.4.167]



شکل (۱۱): برش طولی توزیع بیشینه شدت میدان الکتریکی در کل زمان‌ها در هر نقطه از ساختار در سناریو ۲

۴-۲-۳- سناریو ۳: تغییرات مکان تخلیه جزئی

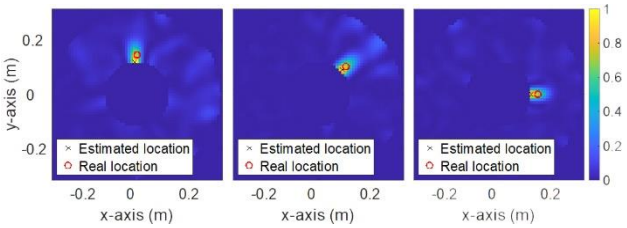
پیش از پرداختن به این سناریو، بایستی خاطرنشان نمود که همان گونه که در [۹] تشریح گردیده است، صورتی که سنسور روی یکی از صفحات تقارن ساختار مورد تست قرار داشته و تخلیه جزئی خارج از آن صفحه رخ دهد، علاوه بر پاسخ اصلی، یک پاسخ کاذب نیز در نتایج مشاهده خواهد شد. این پاسخ کاذب در واقع تصویر پاسخ اصلی نسبت به صفحه تقارن یاد شده بوده و شکل‌گیری آن ناشی از این امر است که در صورت قرارگیری مبدا پس‌انتشار امواج روی صفحه تقارن ساختار، امواج در هر دو طرف صفحه بصورت متقارن منتشر شده و در محل‌های متقارنی نسبت به صفحه موصوف بازتمرکز خواهند داشت. برای احتراز از این مشکل، در سناریوهای بعدی که همگی روی ساختار T شکل انجام شده است، محل سنسور از $\varphi = -180°$ که روی یکی از صفحات تقارن شکل است، مانند شکل (۱۲) به $\varphi = -135°$ منتقل شده است تا روی هیچ یک از صفحات تقارن شکل قرار نداشته باشد. از آنجا که در سناریوهای پیشین محل تخلیه جزئی نیز روی همین صفحه تقارن قرار داشت، پاسخ اصلی و پاسخ کاذب بر یکدیگر منطبق بوده و تنها یک پاسخ در نتایج ظاهر گردیده بود.



شکل (۱۲): جانمایی سنسور در در محلی به غیر از صفحات تقارن

در سناریو سوم، حساسیت روش در مکان‌یابی تخلیه جزئی، به تغییر محل وقوع تخلیه جزئی ($\varphi = 0°, 45°, 90°$) مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی این سناریو که در شکل (۱۳) قابل مشاهده است نشان می‌دهد که روش فیلتر معکوس بخوبی و با دقت قابل قبولی قادر به مکان‌یابی تخلیه جزئی در GIS بوده و تغییر محل وقوع، اثر محسوسی بر دقت مکان‌یابی تخلیه جزئی باقی نمی‌گذارد.

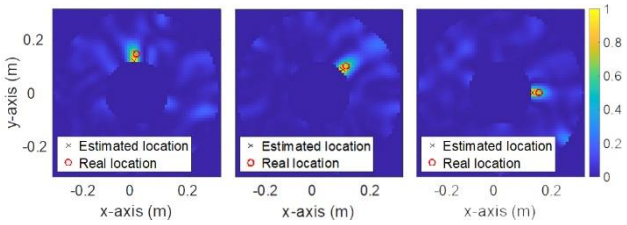
همچنین این سناریو نشان می‌دهد که حتی در صورت وجود موانع در مسیر انتشار امواج از محل تخلیه جزئی به محل نصب سنسور، و نبود دید مستقیم بین این دو، باز هم روش فیلتر معکوس بخوبی می‌تواند محل وقوع تخلیه جزئی را با تخمین قابل قبولی شناسایی نماید. این در حالی است که روش معروف TDoA در چنین وضعیتی دارای خطای بسیار زیادی خواهد بود.



شکل (۱۳): برش عرضی توزیع شدت میدان الکتریکی در لحظه‌های بازتمرکز امواج در سناریو ۳

۴-۲-۴- سناریو ۴: تخلیه‌های جزئی غیرهمزمان

در این سناریو چندین تخلیه جزئی بصورت غیرهمزمان و در مکان‌های مختلف ($\varphi = 0°, 45°, 90°$) به ساختار T شکل اعمال شده است. همان گونه که در شکل (۱۴) قابل مشاهده است، روش پیشنهادی بخوبی توانسته است نسبت به مکان‌یابی هر سه تخلیه جزئی در این ساختار اقدام نماید. لازم به ذکر است که با توجه به غیرهمزمان بودن تخلیه‌های جزئی، آنتروپی چندین بار در طول زمان کمینه خواهد شد که هر بار، لحظه بازتمرکز مرتبط با یکی از تخلیه‌های جزئی را نشان خواهد داد.



شکل (۱۴): برش عرضی توزیع شدت میدان الکتریکی در لحظات بازتمرکز امواج در سناریو ۴ (تخلیه جزئی چندگانه غیرهمزمان در سه مکان مختلف)

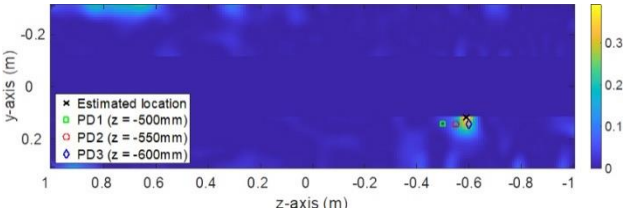
۴-۲-۵- سناریو ۵: تخلیه‌های جزئی همزمان

در این سناریو چندین تخلیه جزئی همزمان در محل‌های مختلف در راستای محور Z درون ساختار T شکل اعمال شده و نتایج کار با بکارگیری معیار کمینه آنتروپی در شکل (۱۵) نمایش داده شده است.همان گونه که در این شکل قابل ملاحظه است، به علت نزدیکی تخلیه‌های جزئی به هم، این معیار تنها موفق به شناسایی یک نقطه شده است که در نزدیکی یکی از تخلیه‌های سه‌گانه قرار دارد.

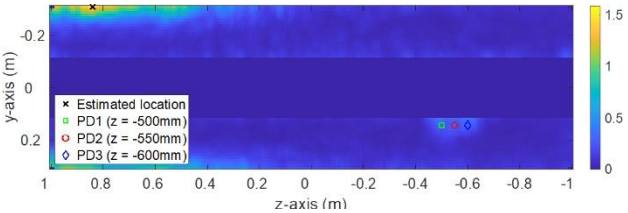
شکل (۱۶) نتیجه حاصل از اعمال معیار بیشینه دامنه میدان در این سناریو به نمایش گذاشته است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، این معیار نتوانسته در این سناریو بخوبی عمل نموده و نقطه‌ی انتخاب شده به عنوان تخمین محل وقوع تخلیه(های) جزئی، با محل واقعی وقوع آن‌ها فاصله بسیار زیادی دارد. این امر نشان می‌دهد که در حالت وجود تخلیه‌های چندگانه همزمان نیز معیار کمینه آنتروپی نتایج به مراتب بهتری را ارائه می‌نماید.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

[DOI: 10.61186/jiaeee.21.4.167]



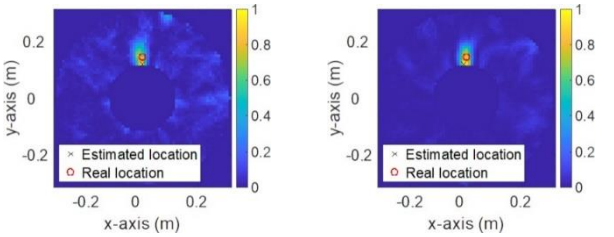
شکل (۱۵): تخلیه‌های جزئی چندگانه همزمان در سه مکان مختلف در طول محور Z (نتایج حاصل از معیار کمینه آنتروپی)



شکل (۱۶): تخلیه‌های جزئی چندگانه همزمان در سه مکان مختلف در طول محور Z (نتایج حاصل از معیار بیشینه دامنه میدان)

۴-۲-۶- سناریو ۶: بررسی اثر نویز

در سناریو نهایی اثر وجود دو سطح مختلف نویز بر عملکرد روش پیشنهادی در مکان‌یابی تخلیه جزئی در ساختار T شکل مورد بررسی قرار گرفته است. برای شبیه سازی وجود نویز، مقداری نویز بصورت دستی به سیگنال ثبت شده اضافه شده است. شکل (۱۷) نتایج کار را با برای دو سطح نویز مختلف $SNR = 10dB$ *SNR=10dB* و *SNR=5dB* نشان می‌دهد.



شکل (۱۷): برش عرضی توزیع شدت میدان الکتریکی در لحظه بازتمرکز امواج در سناریو ۶ با حضور نویز؛ الف) *SNR=10dB*؛ ب) *SNR=5dB*

همان گونه که در تصاویر یاد شده می‌توان مشاهده نمود، روش یاد شده بخوبی توانسته است حتی با حضور نویز قابل توجه، دقت قابل قبولی را در مکان‌یابی تخلیه جزئی ارائه نماید. این درحالیست که مسئله تشخیص دقیق زمان رسیدن امواج به سنسورها در محیط آلوده به نویز در روش TDoA بسیار چالش‌برانگیز بوده و می‌تواند خطاهای فاحشی را بر نتایج کار تحمیل نماید.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله استفاده از روش فیلتر معکوس در رژیم الکترومغناطیسی، برای مکان‌یابی تخلیه جزئی در GIS پیشنهاد و پیاده‌سازی گردیده است. در این راستا سناریوهای مختلفی در دو ساختار لوله‌ای شکل و Tشکل از یک GIS شبیه‌سازی شده و قدرت روش پیشنهادی در زمینه مکان‌یابی تخلیه جزئی در شرایط مختلف مورد محک قرار گرفت.

در سناریو اولیه تخلیه جزئی اعمالی و سنسور نسبت به یکدیگر دید مستقیم داشته و تنها یک تخلیه جزئی در محیط فاقد نویز به سیستم اعمال گردید، و نشان داده شد که روش فیلتر معکوس در مکان‌یابی تخلیه جزئی در شرایط محیطی کنترل شده با وجود استفاده از تنها یک سنسور منفرد می‌تواند کاملا موفق عمل نماید.

در ادامه، سناریوهای دیگری با حذف هر یک از شرایط فوق طراحی شده و شبیه‌سازی‌ها نشان داد که تغییر شرایط محیطی، از جمله حذف دید مستقیم، وقوع همزمان یا غیرهمزمان چند تخلیه جزئی در دستگاه و حتی وجود سطوح مختلف نویز، اثر قابل توجهی بر قابلیت روش پیشنهادی نداشته و لذا این روش بر خلاف روش‌های سنتی مانند روش TDoA، حساسیت چندانی به تغییر شرایط محیطی از خود نشان نمی‌دهد.

همچنین در این تحقیق مشخص گردید که استفاده از معیار کمینه آنتروپی برای تعیین زمان بازتمرکز امواج در فاز پسگرد نتایج بسیار بهتری را در قیاس با بکارگیری معیار بیشینه دامنه میدان ارائه می‌نماید. زیرا تصویر توزیع نهایی میدان با استفاده از معیار کمینه آنتروپی، در اطراف نقطه جواب وضوح بیشتری داشته و لذا این نقطه‌ی برجسته‌تر دیده شده و بهتر قابل تشخیص خواهد بود. ضمن آنکه در برخی موارد خاص، معیار بیشینه دامنه میدان ممکن است خطاهای غیر قابل اغماضی را در نتایج پدیدار سازد.

مراجع

[1] Q. Khan, SS. Refaat, H. Abu-Rub, et al, Partial discharge detection and diagnosis in gas insulated switchgear: state of the art, IEEE Electr. Insul. Mag, vol. 35, no. 5, pp. 16-33, 2019.

[2] Cigré Working Group A3.06. Final report of the 2004 - 2007 international enquiry on reliability of high voltage equipment - part 5 - gas insulated switchgear (GIS), Cigré Broch, vol. 513, 2012.

[3] Xavier GVR, Silva HS, Costa EG da, et al, Detection, Classification and Location of Sources of Partial Discharges Using the Radiometric Method: Trends, Challenges and Open Issues, IEEE Access 2021; vol 9; pp 110787-110810, 2021.

[4] Jahangir H, Akbari Azirani A, Werle P. Investigation of UHF Probe Performance for Partial Discharge Detection in Power Transformers. Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers 2018; 15 (3) :33-43

[5] Mazhab-Jafari A, Akbari-Azirani A. Power Transformer Winding Modelling Using Multi-Conductor Transmission Line Model for Partial Discharge Localization. Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers 2009; 6 (1) :73-83

[6] J. Q. Chan, W J. K. Raymond, H. A. Illias, et al., "Partial Discharge Localization Techniques: A Review of Recent Progress", Energies (Switzerland), vol. 16, no 6, pp. 1-31, 2023.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

[DOI: 10.61186/jiaeee.21.4.167]

[7] J. Liu, M. Yao, C. Huang, et al, "Research of partial discharge localization method in GIS based on UHF technique", WSEAS Trans. Circuits Syst., vol. 8, no. 8, pp. 631–640, 2009.
[8] J. Jiang, K. Wang, C. Zhang, et al, "Improving the Error of Time Differences of Arrival on Partial Discharges Measurement in Gas-Insulated Switchgear", pp. 1–11, 2018.
[9] X. Li, X. Wang, A. Yang, et al, "Partial Discharge Source Localization in GIS Based on Image Edge Detection and Support Vector Machine", IEEE Trans. Power Deliv., vol. PP, p. 1, Jun. 2019.
[10] H. Qiang, Q. Wang, H. Niu, et al, "A Partial Discharge Localization Method Based on the Improved Artificial Fish Swarms Algorithm", Energies, vol. 16, no. 6. 2023.
[11] C. Gao, L. Yu, Y. Xu, et al, Partial discharge localization inside transformer windings via fiber-optic acoustic sensor array, IEEE Transaction on Power Delivery, vol. 34, pp 1251-1260, 2019.
[12] S. Yoshida, H. Kojima, N. Hayakawa, et al, Light emission spectrum depending on propagation of partial discharge in SF6, In Conference Record of IEEE International Symposium on Electrical Insulation, pp. 365-368, 2008.
[13] M. Ren, B. Song, T. Zhuang, et al, Optical partial discharge diagnostic in SF 6 gas insulated system via multi-spectral detection, ISA Trans, vol. 75, pp. 247-257, 2018.
[14] MM. Yaacob, MA. Alsaedi, JR. Rashed, et al, Review on partial discharge detection techniques related to high voltage power equipment using different sensors, Photonic Sensors, vol. 4, pp. 325-337, 2014.
[15] H. Karami, M. Azadifar, A. Mostajabi, et al, Partial discharge localization using time reversal: application to power transformers, Sensors (Switzerland), vol. 20, pp. 1-15, 2020.
[16] N. Stockhausen, C. Werner, J. Streicher, et al, Application of inverse filtering on lidar signals, In Proceedings SPIE, vol 3865, pp. 134-143, 1999.
[17] X. Yu, C. Zou, L. Yang, Improved recursive inverse filtering method for blind image restoration, In 6th International Conference on Signal Processing, 2002, vol 1, pp. 37-40, 2002.
[18] RP. Kumar, SC. Neela, SR. Murikinati, et al, Image restoration by inverse filtering, In 2022 6th International Conference on Computing Methodologies and Communication (ICCMC), pp. 1227-1231, 2022.
[19] ĐT. Grozdić, ST. Jovičić, J. Galić, et al, Application of inverse filtering in enhancement of whisper recognition, In 12th Symposium on Neural Network Applications in Electrical Engineering (NEUREL), pp. 157-162, 2014.
[20] E. Onajite, Chapter 7 – Understanding Deconvolution. In Seismic Data Analysis Techniques in Hydrocarbon Exploration, Elsevier, pp. 93–103, 2014.
[21] H. Karami, F. Askari, F. Rachidi, et al, An inverse-filter-based method to locate partial discharge sources in power transformers, Energies, vol. 15, p. 1988, 2022.
[22] Karami H, Azadifar M, Mostajabi A, et al. Localization of Electromagnetic Interference Sources Using a Time-Reversal Cavity, IEEE Trans. Ind. Electron. 2021; vol 68; pp 654-662, 2021.
[23] J. Zohrevand, H. Karami, M. Rubinstein, et al, Partial discharge localization using time reversal: application to gas insulated switchgear, Electric Power System Research, vol. 212, 2022.
[24] M. Rubinstein, F. Rachidi, Electromagnetic time reversal and its application to electromagnetic compatibility, In 2018 IEEE Symposium on Electromagnetic Compatibility, Signal Integrity and Power Integrity, EMC, SI and PI, 2018.
[25] A. Ragusa, H. Sasse, A. Duffy, et al, Electromagnetic time reversal method to locate partial discharges in power networks using 1D TLM modelling, IEEE Letters on Electromagnetic Compatibility Practice and Applications, vol. 3, pp. 24-28, 2021.
[26] P. Kosmas, CM. Rappaport, FDTD-based time reversal for microwave breast cancer detection-localization in three dimensions, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 53, pp. 2317-2323, 2005.
[27] Z. Wang, R. Razzaghi, M. Paolone, et al, Electromagnetic time reversal similarity characteristics and its application to locating faults in power networks, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 8, pp. 147507-147515, 2020.
[28] G. Montaldo, M. Tanter, Fink M, Real time inverse filter focusing through iterative time reversal, Journal of the Acoustical Society of America, vol. 115, pp. 768-775, 2004.
[29] BE. Anderson, J. Douma, TJ. Ulrich, et al, Improving spatio-temporal focusing and source reconstruction through deconvolution, Wave Motion, vol. 52, pp. 151-159, 2015.
[30] ML. Willardson, BE. Anderson, SM. Young, et al, Time reversal focusing of high amplitude sound in a reverberation chamber, Journal of the Acoustical Society of America, vol. 143, pp. 696-705, 2018.
[31] J. Douma, E. Niederleithinger, R. Snieder, Locating events using time reversal and deconvolution: experimental application and analysis, Journal of Nondestructive Evaluation, vol. 34, p. 2, 2015.

زیرنویس‌ها

[1] Time difference of arrival
[2] Time reversal
[3] Inverse filter
[4] Electromagnetic inverse filter
[5] Maximum field
[6] Refocus
[7] Back-Propagation
[8] Minimum entropy
[9] Heuristic methods
[10] Back-Injection
[11] Cross Correlation

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]
[DOI: 10.61186/jiaeee.21.4.167]