

## تحلیل و اندازه گیری مشخصات الکترومغناطیسی پلیمر هادی بر زیرلایه پی وی سی با استفاده از روش خط انتقال موجبری

مجتبی میقانی<sup>۱\*</sup>، ابراهیم چگینی<sup>۲</sup>

۱. استادیار، گروه مخابرات، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران، ایران.

۲. دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران، ایران.

### چکیده

در این مقاله با استفاده از روش خط انتقالی در موجبر مستطیلی، مشخصات الکترومغناطیسی نظیر ضریب گذردهی الکتریکی و رسانایی برای یک پلیمر هادی لایه نشانی شده بر زیرلایه عایق پی وی سی اندازه گیری و استخراج شده است. ابتدا مقادیر پارامترهای پراکندگی ماده در ساختار موجبر اندازه گیری شده و سپس با تحلیل نتایج از دو روش غیرخطی حداقل مربعات و روش مستقل از دقت کالیبراسیون مشخصات الکترومغناطیسی ماده استخراج گردید. نتایج اندازه گیری با هر دو روش در باند ۵ تا ۱۵ گیگاهرتز از تطابق خوبی برخوردارند. مقادیر بدست آمده برای پلیمر هادی ارایه شده می تواند در ساخت ساختارهای فرامواد منعطف در کاربردهای مختلفی نظیر سطوح غیرمسطح کاهنده سطح مقطع راداری مورد استفاده قرار گیرند. همچنین در این تحقیق روش استفاده شده که می تواند بر مشکل لزوم قرارگیری نمونه دقیقاً در وسط موجبر فایق آید و محل قرارگیری ماده نمونه در هر کجای موجبر مستطیلی که باشد مشکلی ایجاد نکند. این روش می تواند ضمن ساده سازی اندازه گیری درجه آزادی جدیدی برای آزمایش نمونه در نقاط مختلف موجبر ایجاد کند.

واژه های کلیدی: روش خط انتقالی موجبری، ضریب گذردهی الکتریکی، ضریب گذردهی مغناطیسی، پلیمر هادی.

## Analysis and measurement of electromagnetic characteristics of conductive polymer on PVC substrate using the waveguide transmission line method

Mojtaba Mighani<sup>\*1</sup>, Ebrahim Chegini<sup>2</sup>

1. Assistant Prof., Department of Electrical Engineering, Shahid Sattari Aeronautical University of Science and Technology, Tehran, Iran.

2. Department of Electrical Engineering, Shahid Sattari Aeronautical University of Science and Technology, Tehran, Iran.

### Abstract

In this paper, using the rectangular waveguide transmission line method, electromagnetic characteristics such as permittivity and conductivity for a conductive polymer deposited on PVC insulator substrate have been measured and extracted. First, the values of the dispersion parameters of the material in the waveguide structure have been measured and then, by analyzing the results from two nonlinear least square methods and a method independent of the calibration accuracy, the electromagnetic characteristics of the material in question have been extracted. The measurement results in the 5 to 15 GHz band are in good agreement with both methods. The results can be used in the construction of flexible metamaterial structures in various applications such as non-planar surfaces that reduce the radar cross-section of targets.

**Key words:** Waveguide Transmission Line Method, Permittivity, Permeability, Conductive polymer.

طراحی قطعات ریزموجی، مانند خطوط انتقال، فیلتر و آنتن، نیازمند آگاهی از خواص دی‌الکتریکی مواد در فرکانس‌های کاری است. علاوه بر این، مشخصه دی‌الکتریک مواد در بسیاری از رشته‌های علوم و مهندسی دیگر مانند پزشکی [۱-۳] و کشاورزی [۴] نیز مورد نیاز است. در طول سال‌ها، روش‌های متعددی برای اندازه‌گیری خواص دی‌الکتریکی مواد پیشنهاد شده است. بررسی گسترده‌ای از این روش‌ها در [۵-۷] یافت می‌شود. یک روش اندازه‌گیری، روش مبتنی بر تابش موج، بر سطح ماده است. با تابش موج الکترومغناطیسی به یک ماده، دو قطبی‌ها در دی‌الکتریک تحت تاثیر قرار می‌گیرند. این برهم کنش به صورت ماکروسکوپی با خواص دی‌الکتریکی مختلط ماده،  $\epsilon' - j\epsilon''$  توصیف می‌شود. بخش حقیقی و موهومی به ترتیب نشان دهنده توانایی یک ماده برای ذخیره و جذب انرژی الکترومغناطیسی است [۸]. خواص دی‌الکتریک ماده، ذاتی است (یعنی مستقل از روش اندازه‌گیری) و بنابراین می‌توان آن را به روش‌های مختلف اندازه‌گیری کرد [۹]. به طور کلی، روش‌های تعیین مشخصات مواد الکترومغناطیسی را می‌توان به دو دسته تقسیم نمود. دسته اول شامل روش‌های غیرتشدیدی مانند خط انتقال بارگذاری شده [۱۰-۱۲]، خط انتقال با انتهای باز [۱۳-۱۵]، خط انتقال مسطح [۱۶]، فضای آزاد [۱۷]، و موجبر دی‌الکتریک [۱۸] و دسته دوم شامل روش‌های تشدیدی مانند تشدیدکننده حفره‌ای [۱۹]، خط تشدید با انتهای باز [۲۰] و خط انتقال تشدید مسطح [۲۱] می‌شود. هر یک از این روش‌های مشخص بر اساس کاربرد، نیازهای اندازه‌گیری، دقت و محدودیت‌ها (اندازه‌گیری مخرب یا غیرمخرب) انتخاب می‌شوند. به عنوان مثال، اندازه‌گیری مشخصات مواد بسیار کم تلف معمولاً به یک روش تشدید [۲۲] مانند روش حفره تشدید نیاز دارد. با وجود اینکه این روش کاندید خوبی برای مواد کم تلفات است، اما به آماده‌سازی دقیق نمونه (که این روش را به یک روش تهاجمی یا مخرب تبدیل می‌کند) و قرار دادن در حفره برای اندازه‌گیری نیاز دارد.

روش‌های خط انتقال پایان باز، روش‌هایی غیر مخرب هستند که قابلیت توصیف ساختارهای لایه‌ای را دارند [۲۳]. با این حال برای جلوگیری از خطای قابل توجه، به یک سطح اندازه‌گیری صاف برای تماس مناسب بین روزنه (مانند یک موجبر با انتهای باز) و سطح نمونه تحت آزمایش نیاز است [۲۴]. علاوه بر این، زمانی که از یک موجبر با انتهای باز استفاده می‌شود، روال محاسبه مجدد ویژگی دی‌الکتریک تعداد محدودی از مدها را در نظر می‌گیرد که دقت نتیجه را به طور بالقوه کمتر از سایر روش‌های اندازه‌گیری می‌نماید. برعکس، روش موجبر بارگذاری شده (یک روش غیر مخرب) مستلزم این است که نمونه‌ها به طور خاص با توجه به سطح مقطع موجبر آماده شوند. از سوی دیگر، روش موجبر بارگذاری شده برای مشخص کردن مواد جامد

مناسب است و نمی‌تواند برای توصیف مواد دانه‌ای یا مایع استفاده گردد [۹]. امروزه ساخت فرامواد منعطف برای کاربردهای کاهش سطح مقطع راداری، جاذب‌ها، تولید شرایط مرزی جدید، افزایش پهنای باند قطعات ریز موجی و ... یکی از روندهای جدید و پرکاربرد است. این امر اغلب با استفاده از چاپ پلیمرهای هادی روی زیرلایه‌های منعطف محقق می‌گردد. یکی از زیرلایه‌های مناسب برای ساخت فرامواد منعطف با قابلیت چاپ شکل‌های دلخواه رسانا بر روی آن، لایه عایق پی‌وی‌سی یا پلی‌وینیل کلراید<sup>۱</sup> شفاف است [۲۵]. این نوع از پی‌وی‌سی به دلیل اضافه کردن پلاستی‌سایزهایی مانند فتالات<sup>۲</sup> نرم‌تر و قابل انعطاف‌تر از نوع دیگر پی‌وی‌سی (نوع سخت آن<sup>۳</sup>) است. این نوع از پی‌وی‌سی با نام اختصاری پی‌وی‌سی-پی شناخته می‌شود. به دلیل انعطاف‌پذیری بالای این ماده از آن در صنایع مختلف مانند ورق نرم برای پوشش مخازن آب، پشت‌بام برخی از خانه‌ها، کلندرینگ<sup>۴</sup>، شلنگ و لوله‌های نرم و ... بهره‌برداری می‌شود. به دلیل انعطاف‌پذیری، مهم‌ترین کاربرد این لایه ساخت پوشش‌های جاذب برای سامانه‌های پهبادی خواهد بود، چرا که بدنه پهباد دارای انحنای است. از دیگر مزایای این ماده، ارزانی و فراوانی آن می‌باشد.

رنگ‌های رسانای پایه کربن، یک گزینه مناسب برای استفاده روی پی‌وی‌سی هستند. این مواد در عین سیال بودن در طی پروسه ساخت و پس از خشک شدن، مقاومت سطحی نسبتاً کمی دارند. در این مقاله از پلیمرهای رسانای کربنی شرکت پیشگامان فناوری آسیا با نام COIN 15، که مقاومت سطحی حدود  $100 \Omega/cm^2$  دارد، استفاده شده است [۲۶]. این محصول، بطور کلی برای اتصال مدارات الکترونیکی به یکدیگر در حالتی که فاصله آن‌ها بسیار کم می‌باشد، مورد استفاده قرار می‌گیرد. به دلیل آن که رسانایی این ماده (یا مقاومت سطحی آن) به طور دقیق توسط شرکت سازنده اعلام نشده و مقدار آن در فرکانس‌های بالا ممکن است تغییر کند، در این مقاله مقدار دقیق هدایت الکتریکی اندازه‌گیری شده است. نتایج اندازه‌گیری با استفاده از روش حداقل مربعات و روش مستقل از دقت کالیبراسیون [۲۹-۲۷] استخراج گردیده است که نتایج هر دو روش از تطابق خوبی با یکدیگر برخوردارند. هدف نهایی از اندازه‌گیری مشخصات الکتریکی این رنگ رسانای کربنی، استفاده از آن در ساخت یک جاذب الکترومغناطیسی منعطف مبتنی بر فراماده است که می‌تواند کاربردهای فراوانی در کاهش سطح مقطع راداری پهبادها و سایر اهداف داشته باشد. یکی از کاربردهای نتایج این مقاله در [۳۰] گزارش گردیده است.

## ۲- روش خط انتقالی موجبر مستطیلی

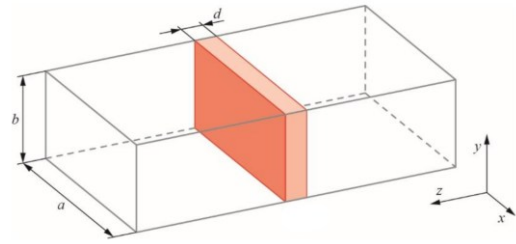
در این مقاله روش خط انتقالی در موجبر مستطیلی برای اندازه‌گیری ضریب عایقی پی‌وی‌سی، مدنظر قرار گرفته است. در این روش، محدوده فرکانسی عمدتاً در بازه بین فرکانس قطع مد انتشاری

<sup>۱</sup> - Polyvinyl Chloride

<sup>۲</sup> - DOP

<sup>۳</sup> - UPVC

موجبر تا فرکانس انتشار مود بالاتر مورد استفاده قرار می‌گیرد. در شکل ۱ نحوه قرارگیری نمونه مورد نظر در موجبر مستطیلی به تصویر کشیده شده است.



شکل ۱- نحوه قرارگیری نمونه در موجبر مستطیلی.

نمونه باید به طور کامل هم اندازه با ابعاد موجبر مستطیلی باشد در غیر این صورت باعث ایجاد خطای قابل ملاحظه‌ای در مقادیر اندازه گرفته شده می‌شود. اگر نمونه مورد نظر با ابعاد موجبر دقیقاً هم اندازه باشد، با انتخاب مناسب بازه فرکانسی اندازه‌گیری به صورت تک مد، می‌توان از بروز خطا تا حد زیادی جلوگیری نمود. این مسئله به این دلیل است که تمرکز میدان الکتریکی در مرکز موجبر خواهد بود و با فاصله گرفتن از میانه به شدت کاهش می‌یابد. قطعه‌ای از عایق پی‌وی‌سی با برش لیزری (که با گاز CO<sub>2</sub> انجام می‌گیرد) با ابعاد دقیق موجبر WR-28 در چند نمونه با ضخامت ۲۰ میلی‌متر برش داده شده است. برش گازی از نظر دقت برش و صافی سطح و ویژگی‌های مطلوبی نسبت به برش‌های معمول دارد. همچنین تشعشعات لیزر باعث آسیب کمی به ماده خواهد شد. پس از برش، نمونه پی‌وی‌سی به ضخامت ۲۰ میلی‌متر در ۴ عدد فلنج WR28 با طول ۵ میلی‌متر به صورت پشت سرهم قرار گرفت. برای اندازه‌گیری خواص الکتریکی این ماده از لایه پی‌وی‌سی برش داده شده و نتورک آنالایزر E8722 استفاده گردید. رنگ رسانا در حین برش عایق بر روی نمونه ریخته و پس از خشک شدن رنگ از قالب خارج می‌شود. در شکل ۲ نمونه با رنگ رسانا داخل فلنج نشان داده شده است.



شکل ۲- رنگ رسانا خشک شده در ابعاد فلنج.

### ۳- تحلیل مقادیر اندازه‌گیری شده

با اندازه‌گیری توسط نتورک آنالایزر، پارامترهای پراکندگی سیستم بدست می‌آید. پس از آن باید از طریق این پارامترها، خواص و پارامترهای الکتریکی (ضریب عایقی یا رسانایی الکتریکی) محاسبه گردد. اگر ضریب نفوذپذیری الکتریکی و ضریب تراوایی مغناطیسی (در مواد مورد نظر ما این مقدار برابر عدد ۱ است) یک ماده معین باشد می‌توان با روابط ساده‌ای پارامترهای پراکندگی آن سیستم را محاسبه کرد. با این حال عکس این روند پیچیده‌تر و محاسبه ضریب نفوذپذیری

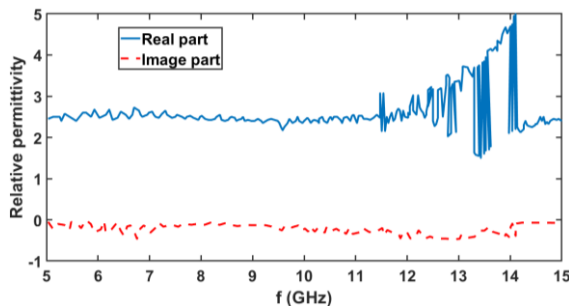
الکتریکی و ضریب تراوایی مغناطیسی نیازمند الگوریتم‌های خاصی است. برای بدست آوردن ضریب نفوذپذیری الکتریکی و ضریب تراوایی مغناطیسی از روی پارامترهای پراکندگی روش‌های مختلفی پیشنهاد شده است که در این قسمت به برخی از مطرح‌ترین‌ها اشاره و در نهایت با پیاده‌سازی این الگوریتم‌ها، نتایج را مقایسه می‌کنیم.

### ۳-۱- روش غیرخطی حداقل مربعات

برای حالتی که یک تابع ریاضی با نام  $Y$  وجود داشته که خود یک تابع غیرخطی از پارامتری با نام  $X$  و یک پارامتر مجهول دیگری با نام  $B$  باشد، می‌توان از این روش استفاده نمود. باید سعی کرد که مقدار  $B$  به گونه‌ای محاسبه گردد که اگر در تابع اصلی یا همان  $Y$  قرار گیرد، نزدیک‌ترین جواب ممکن بدست آید. لازم به ذکر است که  $X$  ها نقاطی هستند (همان پارامتر فرکانس) که اندازه‌گیری‌های تابع  $Y$  در آن انجام شده است. پس در این مسئله مقادیر  $X$  و  $Y$  مشخص و پارامتر مجهول  $B$  است. طبیعتاً با تغییر  $B$  در هر نقطه از  $X$  باید مقدار تابع  $Y$  نیز تغییر کند. یک معیار خوب برای سنجش میزان نزدیک بودن مقدار محاسبه شده به مقدار اندازه‌گیری، استفاده از معیار استاندارد حداقل مربعات است. در این معیار مجموع مربع تفاضل‌های مقدار محاسبه گردیده با احتساب پارامتر  $B$  و مقدار واقعی اندازه‌گیری شده بدست می‌آید و هدف نهایی آن است که این مقدار کمینه گردد.

$$\min (\sum |Y - \hat{Y}|^2) \quad (1)$$

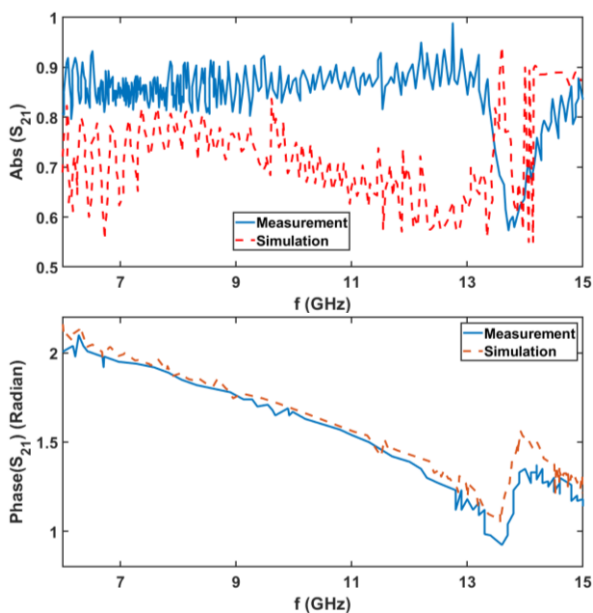
که در رابطه بالا پارامتر  $Y$  مقدار اندازه‌گیری شده تابع و پارامتر  $\hat{Y}$  مقداری می‌باشد که تخمین زده شده است. لازم به ذکر است که در مسئله مورد نظر ما، تابع  $Y$  پارامترهای پراکندگی است که می‌تواند با استفاده از مقادیر تخمینی ضریب نفوذپذیری الکتریکی و ضریب تراوایی مغناطیسی محاسبه شود. در ابتدا فقط پارامتر  $S_{11}$  در نظر گرفته شده است. مقادیر تخمین زده شده برای ضریب نفوذپذیری الکتریکی عایق پی‌وی‌سی در بازه فرکانسی ۵ تا ۱۵ گیگاهرتز در شکل ۳ نمایش داده شده‌اند.



شکل ۳- مقادیر بدست آمده برای قسمت حقیقی و موهومی ضریب نفوذپذیری الکتریکی پی‌وی‌سی با کمک روش حداقل مربعات.

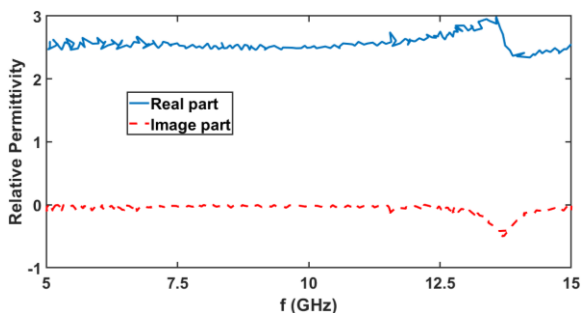
با توجه به شکل بالا، مقادیر محاسبه شده با کمک ضریب نفوذپذیری الکتریکی تخمین زده شده، با مقادیر اندازه‌گیری شده در حالت واقعی همخوانی کافی دارد. در محدوده‌ی ۱۲ تا ۱۵ گیگاهرتز رفتار عجیبی در مقادیر پارامتر  $S$  اندازه‌گیری شده از نتیجه آزمایش واقعی وجود دارد که باعث ایجاد پرش‌هایی در ضریب نفوذپذیری الکتریکی محاسبه

شده، می‌شود. دلیل این پدیده این است که با افزایش فرکانس، یکی از کانکتورها چند موده می‌گردد. پس بهتر است که محاسبات ضریب نفوذپذیری الکتریکی فقط تا ۱۲ گیگاهرتز در نظر گرفته شود. شکل ۴ نتایج محاسبه  $S_{21}$  با استفاده از مقادیر تخمین زده شده و مقدار  $S_{21}$  اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در برخی از فرکانس‌ها تفاوت قابل ملاحظه‌ای وجود دارد.



شکل ۵- مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده از  $S_{11}$  و  $S_{21}$  با نتایج تخمین زده شده با در نظر گرفتن  $S_{11}$  و  $S_{21}$ .

با توجه به شکل ۵، تخمین فاز در پارامترهای  $S$  با دقت خوبی صورت گرفته است اما در محاسبه مقدار اندازه این پارامترها مقداری تفاوت وجود دارد. با این حال مقدار ضریب نفوذپذیری الکتریکی تخمین زده شده با کمک شکل ۵ در شکل ۶ ترسیم شده است.

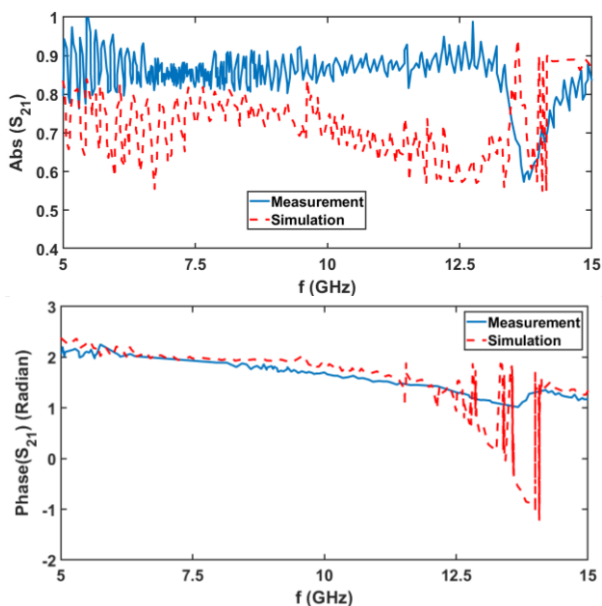


شکل ۶- مقدار ضریب نفوذپذیری الکتریکی محاسبه شده با در نظر گرفتن هر دو پارامتر  $S_{11}$  و  $S_{21}$ .

باتوجه به محاسبات بالا، قسمت حقیقی ضریب نفوذپذیری الکتریکی پی‌وی‌سی در حدود ۲.۵ و مقدار غیرحقیقی آن در حدود ۰.۰۵ است. مراحل بالا برای محاسبه مقدار ضریب رسانایی رنگ رسانا تکرار شده است. مقدار محاسبه شده برای ضریب رسانایی را در دو حالت، مقادیر اندازه‌گیری بدون تغییر و حالتی که ریل‌ها با روابط ریاضی کاهش داده شده‌اند، در شکل ۷ ترسیم گردیده است. مقدار ضریب رسانایی با استفاده از مدل درود محاسبه شده است که می‌تواند ضریب نفوذپذیری الکتریکی یا رسانایی الکتریکی را از ضریب نفوذپذیری الکتریکی با کمک رابطه زیر بدست آورد.

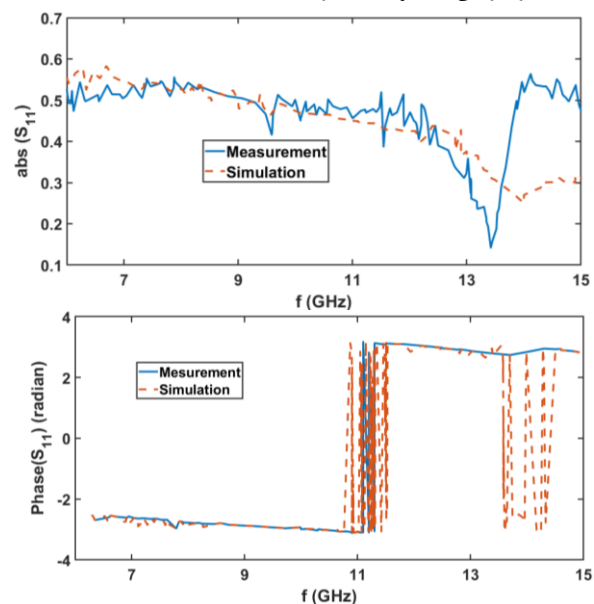
$$\sigma = 2\pi i(\epsilon - 1)\epsilon_0 f \quad (2)$$

که در آن  $\sigma$  رسانایی الکتریکی،  $\mu$  ضریب نفوذپذیری مغناطیسی نسبی ماده،  $\epsilon_0$  ضریب نفوذپذیری الکتریکی هوا یا خلاء و مقدار آن برابر  $8.85 \times 10^{-12}$  (F/m) و  $f$  فرکانس است.



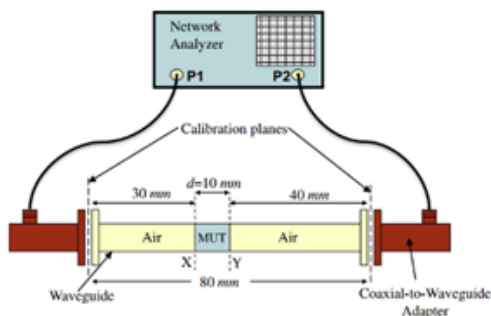
شکل ۷- مقایسه محاسبه پارامتر  $S_{21}$  با کمک مقادیر تخمینی برای ضریب نفوذپذیری الکتریکی و مقدار  $S_{21}$  اندازه‌گیری شده.

این بار ملاک تخمین ضریب نفوذپذیری الکتریکی را نزدیک بودن مقدار پارامتر  $S$  محاسبه شده به کمک آن به نتایج پارامتر  $S_{11}$  و  $S_{21}$  را ملاک می‌گیریم. همانند قبل مقدار خطا را جمع می‌کنیم و مقدار ضریب نفوذپذیری الکتریکی که به ازای آن، خطا کمترین می‌شود را انتخاب خواهیم نمود. در شکل ۵ مراحل قبلی این بار با در نظر گرفتن  $S_{11}$  و  $S_{21}$  تکرار شده است.



### ۳-۲- روش مستقل از دقت کالیبراسیون در اندازه‌گیری

یکی از دلایل ایجاد اختلاف قابل ملاحظه بین پارامترهای S تخمینی با اندازه‌گیری شده در آزمایش واقعی در روش قبلی، نبودن کالیبراسیون دقیق در دستگاه اندازه‌گیری بود. در این قسمت می‌خواهیم تا با استفاده از یک روش پیچیده‌تر و جدیدتر به محاسبه ضریب نفوذپذیری الکتریکی مواد با کمک همان مقادیر اندازه‌گیری شده بپردازیم [۲۹]. شکل ۹ یک شمای کلی از سیستم اندازه‌گیری و همچنین ماده نمونه مورد نیاز برای اندازه‌گیری خواص الکتریکی آن را نشان می‌دهد. مطابق این شکل، نمونه در نقطه وسط موجبر مستطیلی قرار نگرفته و این اتفاق در برخی از روش‌های اندازه‌گیری باعث ایجاد مشکلاتی است. در این بخش روش جدیدی را معرفی کرده که بر این چالش نیز فایده‌آید و محل قرارگیری ماده نمونه در هرکجای موجبر مستطیلی که باشد مشکلی ایجاد نکند.



شکل ۹- شمای کلی سیستم اندازه‌گیری و نمونه ماده مورد آزمایش برای اندازه‌گیری [۲۹].

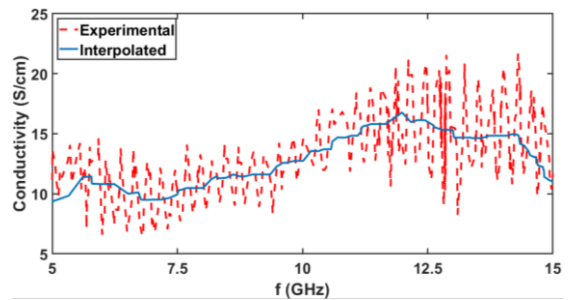
در این روش ابتدا به تعریف ماتریس‌هایی خواهیم پرداخت که محاسبه‌ی آن‌ها مشخص است و سپس با انجام روش محاسباتی تکرار، به پاسخ مناسب دست خواهیم یافت. ماتریس انتقال متقابل<sup>۱</sup> را با کمک روابط زیر تعریف می‌کنیم:

$$M_i = \frac{1}{S_{21i}} \begin{pmatrix} S_{12i}S_{21i} - S_{11i}S_{22i} & S_{11i} \\ -S_{22i} & 1 \end{pmatrix} \quad (۳)$$

$i = 1 \text{ or } 2$

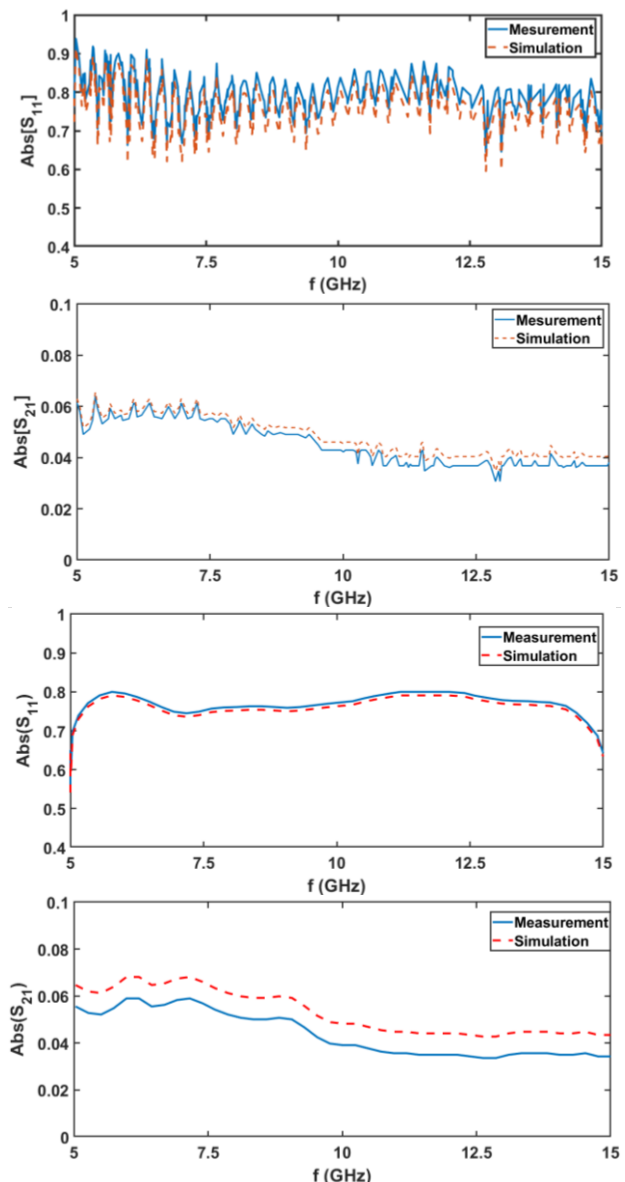
در رابطه بالا پارامتر  $M_1$  به اندازه‌گیری پارامترهای S در حالتی که دستگاه کالیبره نشده باشد مربوط می‌شود. همچنین این پارامتر به بخشی از موجبر مستطیلی که با نمونه ماده پر شده با ضریب نفوذپذیری الکتریکی مشخص، مرتبط است. پارامتر  $M_2$  مرتبط با پارامترهای S در حالتی است که دستگاه اندازه‌گیری بدون کالیبره شدن بدست آمده. همچنین این پارامتر مرتبط با بخشی از موجبر مستطیلی با نمونه ماده‌ای می‌باشد که دارای ضریب نفوذ پذیری الکتریکی نامعین و مختلط باشد، پر شده است.

$$T_{refi} = \begin{pmatrix} 1 & \Gamma_i \\ 1 - \Gamma_i & 1 - \Gamma_i \\ \Gamma_i & 1 \\ 1 - \Gamma_i & 1 - \Gamma_i \end{pmatrix} \quad (۴)$$



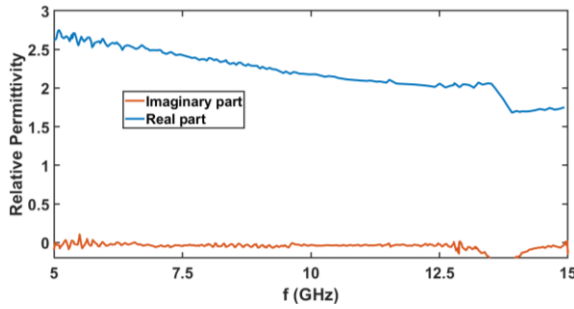
شکل ۷- رسانایی برای مقادیر اندازه‌گیری بدون تغییر و حالتی که ریپل‌ها با روابط ریاضی کاهش داده شده‌اند.

با توجه به شکل ۷، مقدار رسانایی از ۱۰ تا ۱۵ در فرکانس‌های مختلف بین ۵ تا ۱۵ گیگاهرتز تغییر می‌کند. مقادیر  $S_{11}$  و  $S_{21}$  محاسبه و اندازه‌گیری شده در شکل ۸ ترسیم شده است.



شکل ۸- مقایسه پارامترهای S محاسبه شده بر اساس مقادیر ضریب رسانایی تخمین زده شده با مقادیر اندازه‌گیری در آزمایش واقعی (الف) و (ب) با وجود ریپل اندازه‌گیری و (پ) و (ت) بدون ریپل‌های اندازه‌گیری.

<sup>۱</sup> - Corresponding Transmission Matrices



شکل ۱۰- ضریب نفوذ پذیری الکتریکی بدست آمده برای عایق پی‌وی‌سی شفاف با استفاده از روش جدید.

مشاهده می‌شود که مقادیر به‌دست‌آمده برای ضریب نفوذپذیری الکتریکی عایق پی‌وی‌سی شفاف، دارای مقادیری نزدیک به مقادیر به‌دست‌آمده از روش قبلی هستند.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله ضریب گذردهی الکتریکی و رسانایی یک عایق پی‌وی‌سی و ماده رنگی رسانا اندازه‌گیری شده است. این رنگ رسانا بر روی پی‌وی‌سی شفاف لایه نشانی شده و پس از قرار گیری در موجبر مورد آزمون قرار گرفته است. مقادیر اندازه‌گیری، تحلیل شده و از روش غیرخطی حداقل مربعات و روش مستقل از دقت کالیبراسیون استفاده گردیده است. نتایج اندازه‌گیری که در باند ۵ تا ۱۵ گیگاهرتز انجام گردیده با هر دو روش از تطابق خوبی برخوردارند. مقادیر بدست آمده می‌تواند در ساخت ساختارهای فرامواد منعطف در کاربردهای مختلف مورد استفاده قرار گیرد.

#### ۵- مراجع

- [1] A. Calvel, O. Peytral-Rieu, M.-P. Rols, D. Dubuc, and K. Grenier, "Extension to in situ single-cell electroporation of a microwave biosensor," *IEEE Microwave and Wireless Technology Letters*, vol. 34, no. 6, pp. 849-852, June 2024.
- [2] C. Origlia, D. O. Rodriguez-Duarte, J. A. Tobon Vasquez, J.-C. Bolomey, and F. Vipiana, "Review of microwave near-field sensing and imaging devices in medical applications," *Sensors*, vol. 24, no. 14, p. 4515, 2024.
- [3] J. C. Chiao *et al.*, "Applications of microwaves in medicine," *IEEE Journal of Microwaves*, vol. 3, no. 1, pp. 134-169, 2022.
- [4] Y. Li and L. Pan, "Electromagnetic Properties in Foods," in *Advanced Technologies for Physical Properties Measurement of Food and its Processing*: Springer, 2025, pp. 241-319.
- [5] R. Clarke *et al.*, "A guide to the characterization of dielectric materials at RF and microwave frequencies," *Nat. Phys. Lab., U.K., Tech. Rep. PDB: 3657*, 2003.
- [6] V. Komarov, S. Wang, and J. Tang, "Permittivity and measurements," in *Encyclopedia of RF and Microwave Engineering*. New York, NY, USA: Wiley, 2005.
- [7] J. Baker-Jarvis, M. D. Janezic, and D. C. Degroot, "High-frequency dielectric measurements," *IEEE Instrum. Meas. Mag.*, vol. 13, no. 2, pp. 24-31, Apr. 2010.
- [8] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, 3<sup>rd</sup> ed. New York, NY, USA: Wiley, 2012.
- [9] F. Hossein-Babaei and E. Chegini, "The complex permittivity of PEDOT: PSS," *The Journal of Chemical Physics*, vol. 158, no. 19, 2023.
- [10] J. Baker-jarvis, "Transmission /reflection and short-circuit line permittivity measurements," U.S. Dept. Commerce, Technol.

$$\Gamma_i = \frac{\gamma_0 - \gamma_i}{\gamma_0 + \gamma_i} (\mu_r^* = 1) \quad (5)$$

$$T_i = \begin{pmatrix} e^{-\gamma_i d} & 0 \\ 0 & e^{\gamma_i d} \end{pmatrix} \quad (6)$$

و داریم:

$$\gamma_0 = j \frac{2\pi}{\lambda_0} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_c}\right)^2}; \gamma_i = j \frac{2\pi}{\lambda_0} \sqrt{\epsilon_{ri}^* \mu_r^* - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_c}\right)^2} \quad (7)$$

در روابط ریاضی ذکر شده  $\gamma_0$  و  $\gamma_i$  به ترتیب ثابت انتشار موج در موجبر مستطیلی خالی از عایق و در نمونه‌های ۱ و ۲ است.  $\lambda_0$  و  $\lambda_c$  به ترتیب طول موج الکترومغناطیسی در فضای آزاد و طول موج فرکانس قطع موجبر مستطیلی است. حالا که پارامترهای سازنده ماتریس  $T_i$  را داریم، باید ماتریس‌های  $M_i$  را بر اساس ماتریس  $T_i$  بیان کنیم:

$$M_1 = T_x \cdot T_{ref1} \cdot T_1 \cdot T_{ref1}^{-1} \cdot T_Y \quad (8)$$

$$M_2 = T_x \cdot T_{ref2} \cdot T_2 \cdot T_{ref2}^{-1} \cdot T_Y \quad (9)$$

در روابط بالا  $T_x$  و  $T_Y$  دو ماتریس با مقدار نامعلوم اما دارای مقداری ثابت هستند. می‌توان این دو ماتریس را با روشی حذف کرد. برای حذف تاثیر این دو ماتریس باید ضرب زیر را انجام دهیم:

$$M_1 \cdot M_2^{-1} = T_x \cdot T_{ref1} \cdot T_1 \cdot T_{ref1}^{-1} \cdot T_{ref2} \cdot T_2^{-1} \cdot T_{ref2}^{-1} \cdot T_x^{-1} \quad (10)$$

با ضرب بالا می‌توانیم تا تاثیر پارامتر  $T_Y$  را از بین ببریم. حال اگر حالتی را که موجبر با ضریب نفوذپذیری الکتریکی معلوم را برابر ضریب نفوذپذیری الکتریکی فضای آزاد فرض کنیم، ( $\Gamma_1 = 0$ ) پس می‌توان روابط را ساده‌تر نمود. ( $T_{ref1} = 1$ )

$$T_r(M_1 \cdot M_2^{-1}) = T_r(T_1 \cdot T_{ref2} \cdot T_2^{-1} \cdot T_{ref2}^{-1}) = 2 \frac{\Gamma_2^2 \cosh(\Delta_1) - \cosh(\Delta_2)}{\Gamma_2^2 - 1} \quad (11)$$

در رابطه بالا داریم:

$$\Delta_1 = (\gamma_0 + \gamma_2)d \quad (12)$$

$$\Delta_2 = (\gamma_0 - \gamma_2)d \quad (13)$$

اپراتور  $Tr(\cdot)$  ماتریس مربع تریس<sup>۱</sup> است. یعنی مقدار آن برابر مجموع درایه‌های روی قطر اصلی مربع ماتریس مورد نظر است. روابط بالا باید با روش تکرار محاسبه شوند. پس با حدس ضریب نفوذ پذیری الکتریکی اولیه به‌صورت مناسب برای نمونه ماده مورد آزمایش قرار گرفته با کمک روش‌های تکراری (مثلا روش نیتون-رافسون) می‌توان به مقدار نزدیکی برای ضریب نفوذ پذیری الکتریکی رسید. همچنین ضریب نفوذپذیری الکتریکی به‌دست آمده برای عایق پی‌وی‌سی شفاف در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

<sup>۱</sup> - trace of the square matrix

- [20] R. H. Johnson, J. L. Green, M. P. Robinson, A. W. Preece, and R. N. Clarke, "Resonant open ended coaxial line sensor for measuring complex permittivity," *IEE Proc. A-Sci., Meas. Technol.*, vol. 139, no. 5, pp. 261–264, Sep. 1992.
- [21] Swarnpreet Kaur, Surinder Singh, M.M. Sinha, "Design of round corner rectangular planar sensor with DGS for measurement of permittivities", 2023 IEEE Applied Sensing Conference (APSCON), pp.1-3, 2023.
- [22] Bo O. Zhu, Xiao Yu Li, Mei Song Tong, "Rigorous Multi-modal Analysis of Partially Filled Waveguides for Accurate Permittivity and Permeability Retrievals", 2024 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS), pp.1-6, 2024.
- [23] M. T. Ghasr, D. Simms, and R. Zoughi, "Multimodal solution for a waveguide radiating into multilayered structures—Dielectric property and thickness evaluation," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 58, no. 5, pp. 1505–1513, May 2009.
- [24] Anna Case, Mohammad Tayeb Al Qaseer, Reza Zoughi, "Impact of Open-Ended Rectangular Waveguide Flange Properties on Measurements of Dielectric Coatings", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol.74, pp.1-14, 2025.
- [25] D. Ding et al., "Microwave absorbing and mechanical properties of Si–O–C ceramics prepared via preceramic polymer pyrolysis," *Journal of the American Ceramic Society*, Early view, 2025.
- [26] COIN 15 Conductive ink datasheet, Asia Technology Pioneers Co. Ltd.
- [27] "Agilent Solutions for Measuring Permittivity and Permeability with LCR Meters and Impedance", Application Note 1369-1.
- [28] L. F. Chen, C. K. Ong and C. P. Neo, *Microwave Electronics Measurement and Materials Characterization*, John Wiley, 2004.
- [29] N. Jebbor, S. Bri, A. M. Sánchez, and M. Chaibi, "A fast calibration-independent method for complex permittivity determination at microwave frequencies," *Measurement*, vol. 46, no. 7, pp. 2206–2209, Aug. 2013.
- [30] S. Zolfaghary pour, E. Chegini and M. Mighani, "Design of wideband metamaterial absorber using circuit theory for X-band applications", *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, Vol.17, Issue 4, March 2023.
- Administ., Nat. Inst. Standards Technol., Boulder, CO, USA, Tech. Rep. 1341, 1990.
- [11] K. J. Bois, L. F. Handjojo, A. D. Benally, K. Mubarak, and R. Zoughi, "Dielectric plug-loaded two-port transmission line measurement technique for dielectric property characterization of granular and liquid materials," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 48, no. 6, pp. 1141–1148, 1999.
- [12] S. Bakhtiari, S. I. Ganchev, and R. Zoughi, "Analysis of radiation from an open-ended coaxial line into stratified dielectrics," *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. 42, no. 7, pp. 1261–1267, Jul. 1994.
- [13] K. M. Donnell, A. McClanahan, and R. Zoughi, "On the crack characteristic signal from an open-ended coaxial probe," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 63, no. 7, pp. 1877–1879, Jul. 2014.
- [14] J. Hinojosa, "S-parameter broad-band measurements on-microstrip and fast extraction of the substrate intrinsic properties," *IEEE microwave and wireless components letters*, vol. 11, no. 7, pp. 305–307, 2001.
- [15] Y. Zhang, B. Xia, and J. Mao, "A novel design methodology for asymmetric coupled line passive devices and its application in impedance transformers," *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, vol. 38, no. 5, pp. 618–637, 2024.
- [16] M. Bazgir, A. Sheikhi, "High Q-Factor Compact Permittivity Sensor Based on Coupled SRR-ELC Metamaterial Element and Metasurfaces Shield", *IEEE Sensors Journal*, vol.24, no.4, pp. 4424–4431, 2024.
- [17] Megan C. Robinson, Jack A. Molles, Vadim V. Yakovlev, Zoya Popović, "Solid-State Power Combining for Heating Small Volumes of Mixed Waste Materials", *IEEE Journal of Microwaves*, vol.3, no.3, pp.881–893, 2023.
- [18] Bing Xue, Katsuyuki Haneda, Clemens Icheln, Juha Ala-Laurinaho, Juha Tuomela, "Complex Permittivity Characterization of Low-Loss Dielectric Slabs at Sub-THz", *IEEE Access*, vol.12, pp.150693–150701, 2024.
- [19] Donghao Li, Kaibo Zhang, Chong Gao, Jiawei Long, Chengyong Yu, En Li, Xue Niu, "Dielectric Measurement of Irregular Materials Based on Open-Circuit Coaxial Resonant Cavities", 2024 Cross Strait Radio Science and Wireless Technology Conference (CSRSWTC), pp.1-2, 2024.