

Development of a Measurement System for Nondestructive Determination of Dielectric Constant and Magnetic Permeability of Materials, Using an Enhanced Microwave Chamber Disturbance Method

Mohsen Mohammadi^{1*}, Seyed Hossein Hesamedin Sadeghi¹, Morteza Kazerooni², Emad Hamidi²

¹ Department of Electrical Engineering, Amirkabir University of Technology

² Department of Electrical and Computer Engineering, Malek-Ashtar University of Technology

* m.mohammadi91@aut.ac.ir

Abstract

The microwave chamber disturbance method (CDM) is a commonly used procedure for determining the electromagnetic properties of materials in the microwave frequency range. This method is based on the change in the resonance frequency and the quality coefficient of a measurement chamber due to the penetration of the sample at the location of the maximum electric or magnetic field, depending on the nature of the parameter under study. The main limitation of the CDM is the requirement that the sample size must be small so as not to have a negligible effect on the geometry of the fields inside the chamber. In this paper, we propose an enhanced CDM for accurate measurement of dielectric constant and magnetic permeability of materials with very low error rates. The chamber consists of a rectangular waveguide with a cap that fits the location of the sample. This arrangement provides a suitable measuring device that minimizes the measuring errors, including the uncertainty in the perforated plate and use of liquid adhesive for sample-waveguide attachment. To validate the accuracy of the proposed method, the predicted values of dielectric constant and magnetic permeability of several sample materials are compared with their actual values and the error rate of this proposed method has finally reached less than 1.5%.

Keywords: Chamber Perturbation Method, Resonance Frequency, Measurement, Dielectric Constant, Magnetic Permeability

طراحی و ساخت دستگاه اندازه‌گیری غیرمخرب ثابت دی‌الکتریک و ضریب نفوذپذیری مغناطیسی مواد با استفاده از روش بهبود یافته اختلال محفظه میکروویوی

محسن محمدی^{۱*}، سید حسین (حسام‌الدین) صادقی^۱، مرتضی کازرونی^۲، عماد حمیدی^۲

۱- دانشگاه صنعتی امیرکبیر دانشکده برق، تهران، ایران

۲- دانشگاه صنعتی مالک اشتر دانشکده برق و کامپیوتر، تهران، ایران

*m.mohammadi91@aut.ac.ir

چکیده

در این مقاله به بررسی روش اختلال محفظه (CPM) که روشی متداول برای تعیین مشخصات الکترومغناطیسی مواد در بازه‌ی فرکانسی میکروویو می‌باشد، می‌پردازیم. این روش بر تغییر در فرکانس تشدید و ضریب کیفیت محفظه بر اثر دخول نمونه در محل حداکثر میدان الکتریکی یا مغناطیسی، وابسته به طبیعت پارامتری که تحت مطالعه است، استوار می‌باشد. مهمترین محدودیت این روش آن است که حجم نمونه باید کوچک باشد تا اثر قابل اغمازی در هندسه میدان‌های داخل محفظه نداشته باشد. در این مقاله با ارائه روشی جدید مبتنی بر طراحی موج‌بر مستطیلی با درپوش متناسب با آن، که محل قرارگیری نمونه می‌باشد و ساخت دستگاه اندازه‌گیری مناسب، با حداقل کردن انواع خطاهای اندازه‌گیری هم‌چون اندازه‌گیری با صفحه‌های سوراخ‌دار با قطرهای مختلف در ابتدا و انتهای موج‌بر، استفاده از چسب مایع مناسب برای چسباندن نمونه بر روی درپوش موج‌بر و ... بیان شده است. برای طراحی و ساخت دستگاه اندازه‌گیری غیرمخرب در باندهای مختلف، ضرایب دی‌الکتریک و نفوذپذیری مغناطیسی مواد با درصد خطای خیلی پایین ارائه شده است. برای ارزیابی دقت روش پیشنهاد شده، مقادیر ثابت دی‌الکتریک و نفوذپذیری مغناطیسی چند نمونه اندازه‌گیری شده با مقادیر واقعی مقایسه شده و درصد خطای این روش پیشنهادی در نهایت به کمتر از ۱/۵ درصد رسیده است.

واژگان کلیدی: روش اختلال محفظه، فرکانس رزونانس، اندازه‌گیری، ثابت دی‌الکتریک، ضریب نفوذپذیری مغناطیسی

۱- مقدمه

خطاهایی هم‌چون نحوه قرارگیری نمونه و چسباندن آن در داخل موج‌بر، اندازه مناسب نمونه و ... به عنوان چالش‌های اصلی این روش می‌باشد با حذف یا به حداقل رساندن عوامل خطا در اندازه‌گیری‌ها هم‌چون استفاده از چسب‌های کم تلف یا جایگزینی روش مناسب برای استفاده از چسب، استانداردهای اندازه‌گیری حجم نمونه، از بین بردن چربی‌ها و گرد و خاک و ... در داخل موج‌بر که می‌تواند خروجی‌های بسیار خوبی از اندازه‌گیری ثابت دی‌الکتریک و ضریب نفوذپذیری مغناطیسی دهد، در این مقاله بیان شده است [۵]. اندازه‌گیری با حداقل خطای فرکانس رزونانس و ضریب کیفیت برای اندازه‌گیری دقیق در روش اختلال محفظه مهم می‌باشد [۶].

در این مقاله، ابتدا در بخش ۲ به بیان مسئله می‌پردازیم. سپس، در بخش ۳ طراحی و ساخت دستگاه اندازه‌گیری در

تشدیدکننده‌های میکروویو در کاربردهای متنوعی شامل فیلترها، نوسان‌سازها، فرکانس‌سنج‌ها و تقویت‌کننده‌های تنظیم شده مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱]. بسیاری از فاکتورها مانند دقت، راحت بودن روش اندازه‌گیری، شکل و قالب مواد در انتخاب روش اندازه‌گیری مهم هستند [۲]. روش اختلال محفظه در طول سال‌ها به عنوان یکی از آسان‌ترین و دقیق‌ترین روش‌های تعیین مشخصات مواد شناخته شده است [۳]. در نتیجه برای شناسایی مشخصات مواد در تست‌های غیرمخرب که نیازمند بیشترین دقت در اندازه‌گیری ضرایب دی‌الکتریک و نفوذپذیری مغناطیسی هستیم، از این روش استفاده می‌کنیم. این روش اندازه‌گیری بدون تماس به صورت موفقیت‌آمیز در اندازه‌گیری مشخصات الکتریکی و مغناطیسی مواد به کار رفته است [۴]. بنابراین

$$Q = \frac{f_r}{\Delta f} \quad (4)$$

که در آن f_r فرکانس تشدید و Δf پهنای ۳dB در نمودار دامنه S_{21} می‌باشد.

محفظه مستطیلی مطابق شکل ۱ در نظر گرفته شده است. دو دیواره فلزی در ابتدا و انتهای موجبر قرار داده شده که در مرکز آن روزنه دایروی برای تزویج موج الکترومغناطیسی تعبیه شده است. از مدهای TE_{10N} ایجاد شده در محفظه، برای اندازه‌گیری‌های گذردهی مختلط در این ساختار استفاده می‌شود [۶].

عدد N در TE_{10N} برای تعیین ثابت دی‌الکتریک همیشه فرد و برای تعیین ضریب نفوذپذیری مغناطیسی زوج انتخاب می‌گردد چرا که در حالت اول میدان مغناطیسی و در حالت دوم میدان الکتریکی حداقل مقدار را دارد و موقعیت نمونه به سادگی در مرکز حفره تعیین گردد و میدان الکتریکی در آنجا ماکزیمم می‌باشد [۷]. فرمول‌های اصلاح شده ثابت دی‌الکتریک و تانژانت تلفات از روابط زیر بدست می‌آیند [۸]:

$$\varepsilon' = \frac{V_c(f_c - f_s)}{2V_s f_s} + 1 \quad (5)$$

$$\varepsilon'' = \frac{V_c}{4V_s} \left(\frac{1}{Q_s} - \frac{1}{Q_c} \right) \quad (6)$$

$$Q_c = Q_c [1 + (\varepsilon' - 1) \frac{V_s}{V_c}] \quad (7)$$

$$\frac{1}{Q_d} = \tan \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad (8)$$

که در آن f_c و f_s فرکانس‌های تشدید بدون نمونه و با نمونه، Q_c و Q_s ثابت کیفیت اندازه‌گیری شده محفظه بدون نمونه و با نمونه و V_c و V_s حجم‌های محفظه و نمونه می‌باشند. قبل از قرار دادن نمونه در محفظه، ضریب کیفیت محفظه Q_c می‌باشد. Q'_c ضریب کیفیت تئوری در حالتی که نمونه قرار داده شده بدون افت باشد، می‌باشد. در تئوری اختلال محفظه متداول، فرض می‌شود که حضور نمونه در محفظه باعث کاهش ضریب کیفیت به علت وجود تلف در عایق نمونه می‌باشد [۹].

سه باند مخلف S ، X و Ku و هم‌چنین آنالیز حساسیت این روش بیان گردیده است و در نهایت در بخش ۴ نتیجه‌گیری کلی از مقاله ذکر شده است.

۲- بیان مسئله

روش اختلال محفظه به صورت وسیعی در اندازه‌گیری خواص دی‌الکتریک و نفوذپذیری مغناطیسی مواد به کار می‌رود. ثابت دی‌الکتریک و نفوذپذیری مغناطیسی می‌توانند با استفاده از تغییرات فرکانس و ضریب کیفیت محاسبه گردند. در حالتی که نمونه بدون تلف باشد، ضریب کیفیت محفظه افزایش می‌یابد و از این خاصیت برای اصلاح نایقینی در اندازه‌گیری معمول استفاده می‌شود. نحوه تزویج میدان‌های الکترومغناطیس به محفظه فلزی، در تعیین ضریب کیفیت محفظه اثر دارد. در اینجا موجبر مستطیلی و تزویج روزنه دایروی در دیواره موجبر استفاده می‌شود. فرکانس تشدید یک محفظه مستطیلی از فرمول (۲) قابل محاسبه می‌باشد [۵]:

$$\omega_{mnp} = \frac{1}{\sqrt{\mu\varepsilon}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{d}\right)^2} \quad (1)$$

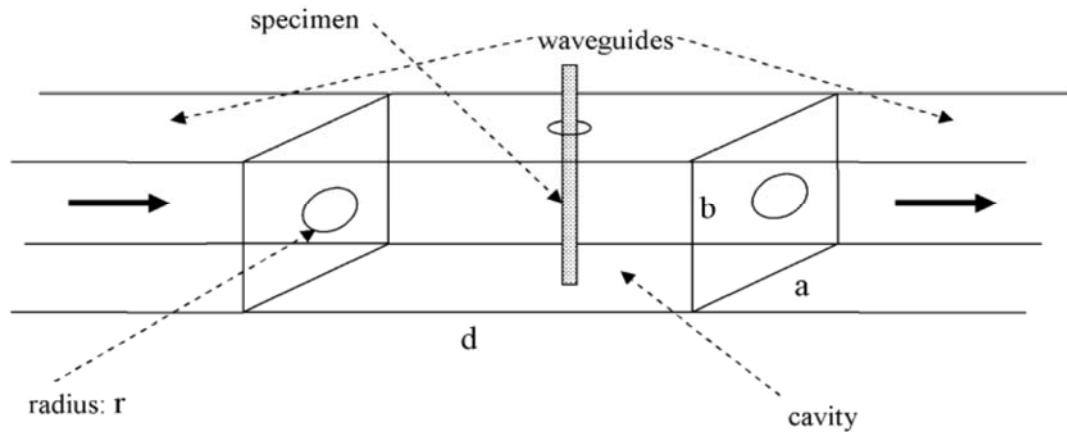
$$f_{mnp} = \frac{u}{2} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{p}{d}\right)^2} \quad (2)$$

که در آن اعداد صحیح m ، n و p تعداد تغییرات نیم‌موج در جهت x ، y و z را نشان می‌دهد. ضریب کیفیت یک تشدیدگر، Q ، با ضریب افت آن مرتبط است و از رابطه (۳) به دست می‌آید [۵]:

$$Q = 2 \times \pi \quad (3)$$

$$\times \frac{\text{انرژی متوسط ذخیره شده در سیستم رزونانس}}{\text{انرژی تلفاتی در سیستم در ثانیه}}$$

ضریب کیفیت یک محفظه تشدید از رابطه (۴) بدست می‌آید:



شکل ۱: روش اغتشاش محفظه TE: a و b ابعاد دهانه موجبر، و d طول موجبر و r شعاع روزنه [۴].

اولین گام، طراحی محفظه موجبر مستطیلی در باند فرکانسی X و در محدوده فرکانسی 8 تا 12.4 گیگاهرتز می‌باشد. بدین منظور از موجبر باند "X"، WR-90 استفاده می‌شود. طول این موجبر طوری انتخاب شده است که فرکانس تشدید مود TE_{107} در وسط باند قرار گیرد. شکل ۲ تشدیدگر موجبری با ابعاد واقعی موجبر موجود را نشان می‌دهد. این محفظه‌ی موجبر باند X با یک موجبر برنجی WR90 با طول $l = 139.8 \text{ mm}$ ساخته شده است. ابعاد سطح مقطع داخلی با عرض $a = 22.8 \text{ mm}$ و ارتفاع $h = 10.16 \text{ mm}$ می‌باشد. صفحات رسانای برنجی با سوراخی به قطر 5.85 mm برای تشکیل محفظه و بستن دو طرف موجبر به کار رفته‌اند. تزویج الکتریکی با دو پروب تحلیل‌گر شبکه‌ی برداری^۱ (VNA) متقارن به وجود آمده است. محفظه به VNA متصل گردیده و آزمایش در دمای اتاق انجام شده است.



شکل ۲: محفظه موجبر مستطیلی ساخته شده با آداپتور:

(الف) درپوش جدا، (ب) درپوش روی موجبر

۱. محفظه موجبری از سه قطعه مجزا تشکیل یافته است:

۲-۱- تزویج محفظه توسط روزنه دایروی

ضریب کیفیت بارگذاری شده اندازه‌گیری شده، Q_l ، از رابطه (۱۰) بدست می‌آید [۱۰]:

$$\frac{1}{Q_l} = \frac{1}{Q_c} + \frac{1}{Q_e} \quad (9)$$

$$Q_l = \frac{f_0}{\Delta f} \quad (10)$$

که در آن Q_e و Q_c ضرایب کیفیت ناشی از افت هادی (ضریب کیفیت بارگذاری نشده) و توان تزویج شده به مدار خارجی می‌باشد [۱۱]. f_0 فرکانس تشدید و Δf پهنای باند نیم توان می‌باشند. برای محفظه تشدید دو پورتی شکل (۱) Q_e و Q_c مد TE_{10N} از روابط زیر بدست می‌آیند [۱۰]:

$$Q_e \approx 1.119 \times 10^{-2} \frac{1}{r^6} \left(b^2 \left(\frac{d}{N} \right)^4 + a^2 b^2 \left(\frac{d}{N} \right)^2 \right) \quad (11)$$

$$Q_c = \frac{(kad)^3 b \eta}{2\pi^2 R_s (2N^2 a^3 b + 2bd^3 + N^2 a^3 d + ad^3)} \quad (12)$$

که در آن a ، b ، d و r به ترتیب، پهنای، عرض، طول و شعاع دایره روزنه می‌باشند.

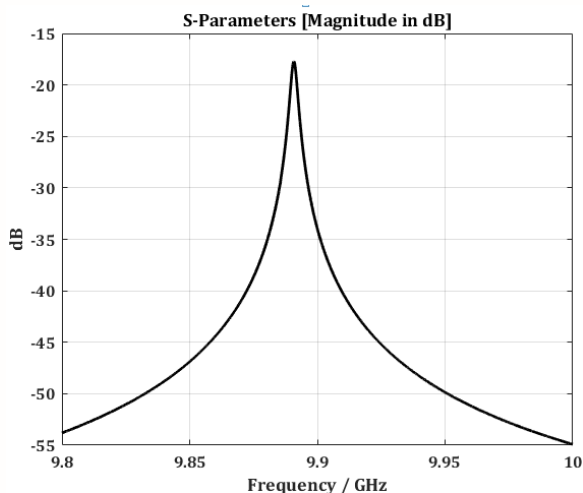
۳- طراحی و ساخت دستگاه اندازه‌گیری

^۱ Vector Network Analyzer

شود. پس مقدار ثابت دی‌الکتریک Rogers Ro4003 با انطباق اختلاف فرکانس تشدید اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی (طبق رابطه ۱۳) برابر با 3.54 می‌باشد. برای راحتی کار، منحنی کالیبراسیون نمونه برای این سائز مشخص (طول $l = 7 \text{ mm}$ ، عرض $w = 4 \text{ mm}$ و عمق $d = 0.8 \text{ mm}$) مطابق شکل ۵ می‌باشد. بدین صورت که در همه اندازه‌گیری‌ها کافی است طول، عرض و عمق نمونه را ثابت در داخل موجبر قرار داده و براساس تغییرات فرکانسی اندازه‌گیری شده طبق نمودار میزان ثابت دی‌الکتریک بدست می‌آید.

$$\begin{aligned} \varepsilon &= 3.54, \mu = 1 \\ \Delta f &= 9.9544 - 9.8895 \\ &= 64.949 \text{ MHz} \end{aligned} \quad (12)$$

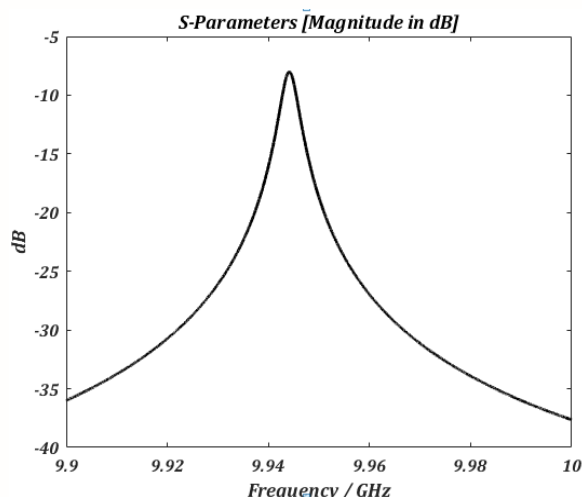
دقت تشخیص نفوذپذیری الکتریکی و مغناطیسی مختلط ماده‌ی تحت اندازه‌گیری کاملاً به دقت تعیین فرکانس رزونانس و ضریب کیفیت وابسته است.



شکل ۴: اندازه‌گیری فرکانس مرکزی محفظه تشدیدگر همراه با نمونه

دقت تشخیص نفوذپذیری الکتریکی و مغناطیسی مختلط ماده‌ی تحت اندازه‌گیری کاملاً به دقت تعیین فرکانس رزونانس و ضریب کیفیت وابسته است. در اینجا دو موجبر باند S و باند Ku نیز برای اندازه‌گیری غیر مخرب ضرایب دی‌الکتریک و نفوذپذیری مغناطیسی مواد با سائزهای مختلف طراحی و ساخته شده است که در شکل ۶ قابل مشاهده می‌باشد.

۲. قطعه موجبری با روزنه دایروی در وسط سطح جانبی بزرگتر آن، نمونه از آنجا وارد موجبر می‌شود. دو flange برای اتصال به آداپتور در ابتدا و انتهای موجبر اتصال داده شده است.
 ۳. پایه نگهدارنده نمونه که از دو استوانه هم‌محور (قطر استوانه کوچکتر پایه با قطر روزنه روی موجبر و ضخامت آن با ضخامت موجبر یکی می‌باشد) یکپارچه تشکیل شده است.
 ۴. دو صفحه فلزی مربعی شکل به ابعاد flange که در مرکز آن رونه دایروی شکل ایجاد شده است. اندازه‌گیری در دو مرحله انجام گرفته است: ابتدا محفظه خالی را به دستگاه تحلیل‌گر شبکه متصل شده و دامنه S_{21} در فرکانس‌های مختلف (شکل ۳) اندازه‌گیری شده و با بررسی نمودار تغییرات آن، فرکانس محفظه تشدیدگر بدون نمونه محاسبه می‌شود.



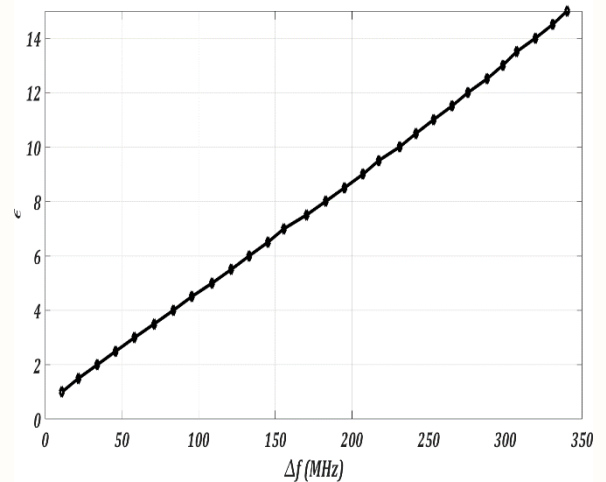
شکل ۳: اندازه‌گیری فرکانس مرکزی محفظه تشدیدگر بدون نمونه

سپس در مرحله دوم نمونه مورد نظر که یک دی‌الکتریک می‌باشد را داخل محفظه قرار داده و تغییرات دامنه S_{21} در فرکانس‌های مختلف (شکل ۴) اندازه‌گیری می‌شود. در اینجا باید با تغییر مقدار ε_r در نرم‌افزار شبیه‌سازی، به اختلاف فرکانس رزونانسی بدون نمونه و با نمونه در اندازه‌گیری رسید. برای تعیین ثابت دی‌الکتریک نمونه مورد آزمایش باید تغییرات فرکانسی برابر با 64.8375 MHz (اندازه‌گیری اختلاف فرکانس تشدید با نمونه و بدون نمونه)

اندازه نمونه، مقدار ثابت دی‌الکتریک واقعی نمونه با اندازه تقریبی ۰,۸ کمتر و بیشتر می‌گردد.



شکل ۶: دستگاه اندازه‌گیری شامل محفظه موجبر مستطیلی و تحلیل‌گر شبکه‌ی برداری: (الف) باند S و (ب) باند X و Ku

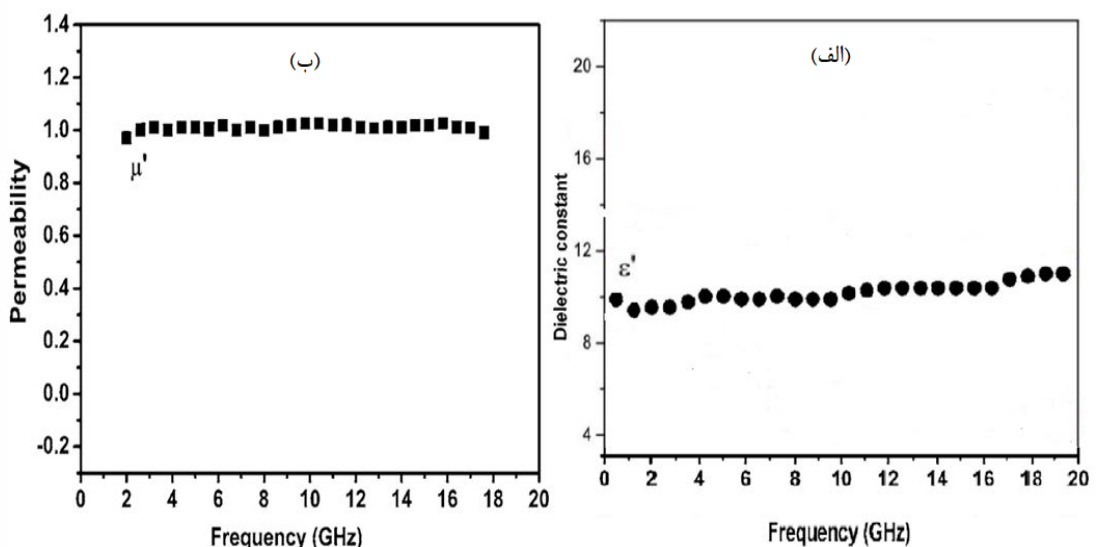


شکل ۵: منحنی کالیبراسیون برای سایز ثابت نمونه: Δf تغییرات فرکانس اندازه‌گیری شده، بر حسب ϵ ثابت دی‌الکتریک.

نکته قابل توجه این است که مطابق شکل ۵ ضرایب دی‌الکتریک و نفوذپذیری مغناطیسی در فرکانس‌های مختلف تقریباً مقادیر ثابتی می‌باشند. بنابراین برای اندازه‌های مختلف نمونه تحت تست با استفاده از موجبرهای ساخته شده می‌توان مشخصات دی‌الکتریک و نفوذپذیری مغناطیسی را اندازه‌گیری نمود.

۳-۱- آنالیز حساسیت

با تغییر ابعاد نمونه در شبیه‌سازی به اندازه دقت کولیس استفاده شده برابر با ۲۵ میکرومتر کمتر و بیشتر از پهنای



شکل ۷: (الف) تغییرات ثابت دی‌الکتریک (ب) تغییرات ضریب نفوذپذیری مغناطیسی نسبی بر حسب فرکانس‌های مختلف

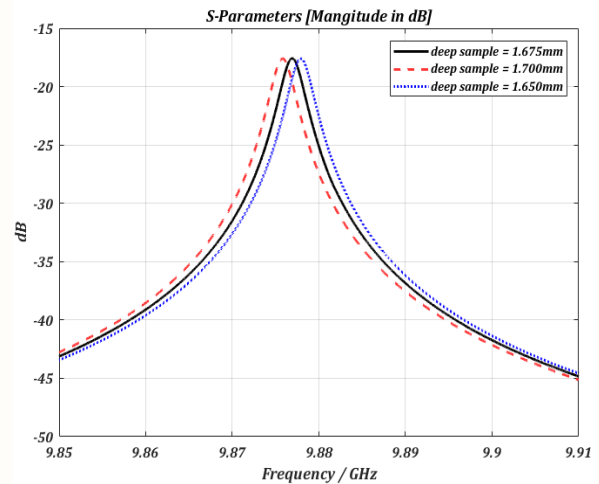
می‌توان نتیجه گرفت که درصد خطای اندازه‌گیری با مقادیر واقعی در این روش قابل قبول می‌باشد [۱۲] و [۱۳].

۴- نتیجه‌گیری

برای اندازه‌گیری غیر مخرب مشخصات الکتریکی و مغناطیسی مواد، روش اختلال محفظه با بیشترین حساسیت به نحوه اندازه‌گیری، در میان تمامی روش‌ها بیشترین دقت را نیز دارد و ممکن است کمترین بی‌توجهی و بی‌دقتی در تعیین دقیق فرکانس تشدید و ضریب کیفیت و همچنین اندازه نمونه و نحوه قرار دادن آن در داخل موجبر باعث ایجاد خطا گردد. در این مقاله یک روش تئوری با استفاده از روش اختلال محفظه با طراحی و ساخت دستگاه اندازه‌گیری در باندهای مختلف، نشان داده شده است که ضرایب دی‌الکتریک و نفوذپذیری مغناطیسی را با خطای کمتر از ۱٫۵ درصد می‌توان اندازه‌گیری نمود که در مقایسه با کارهای انجام شده با درصد خطای بالای ۱۰ درصد، بیانگر کاهش چشمگیر خطای اندازه‌گیری با کمترین هزینه می‌باشد. این روش امکان اندازه‌گیری معقول برای نمونه‌هایی با اندازه کوچک، مناسب برای مواد با تلفات پایین و قابلیت اندازه‌گیری مواد مغناطیسی را فراهم می‌کند.

۵- منابع

- [1]. Pozar, David M. Microwave engineering. John Wiley & Sons, 2009.
- [2]. Abhishek Kumar, Jha, and Akhtar Mohammad Jaleel. "A generalized rectangular cavity approach for determination of complex permittivity of materials." IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement 63.11, 2014.
- [3]. Abhishek Kumar, Jha, and Akhtar Mohammad Jaleel. "An improved rectangular cavity approach for measurement of complex permeability of materials." IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement 64.4, 2014.
- [4]. Koul.S and Bhat.S, Microwave and Millimeter Wave Phase Shifters, Boston, MA Artech House, 1991.
- [5]. Green, Jerome J., and Frank Sandy. "A catalog of low power loss parameters and high power thresholds for partially magnetized ferrites." IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1974.
- [6]. Carter, Richard G. "Accuracy of microwave cavity perturbation measurements." IEEE Transactions on Microwave theory and techniques 49.5, 2001.
- [7]. Kuek, C. "Measurement of Dielectric Material Properties: application note." Rohde-Schwarz, Germany, 2012.



شکل ۸: فرکانس مرکزی با تغییر پهنای نمونه به اندازه $\pm 0.025mm$

برای اندازه‌گیری غیر مخرب ضریب نفوذپذیری مغناطیسی مواد نیز دقیقاً روش اندازه‌گیری ثابت دی‌الکتریک را در پیش گرفته و فقط در هنگام تست برخلاف حالت قبل که نمونه باید به صورت عمودی در داخل وسط موجبر قرار داشته باشد در اینجا نمونه باید به صورت افقی قرار گیرد چرا که در روش اندازه‌گیری ثابت دی‌الکتریک باید میدان مغناطیسی در محل نمونه، حداقل و در روش اندازه‌گیری ضریب نفوذپذیری مغناطیسی باید میدان الکتریکی در محل نمونه، حداقل میزان ممکن باشد.

طبق جدول ۱ می‌توان نتایج اندازه‌گیری و مقادیر واقعی ثابت دی‌الکتریک و ضریب نفوذپذیری مغناطیسی را با هم مقایسه نمود:

جدول ۱: نتایج اندازه‌گیری و واقعی دو ماده دی‌الکتریک و

فریت [۴]

ماده	مقادیر واقعی	مقادیر اندازه‌گیری شده	درصد خطا (%)
دی‌الکتریک اول	۳٫۵۵	۳٫۵۴	۰٫۲۸
دی‌الکتریک دوم	۲٫۱۷	۲٫۲۰	۱٫۳۸
فریت اول	۰٫۹۶۲۰	۰٫۹۵۳۵	۰٫۸۸
فریت دوم	۰٫۹۲۸۸	۰٫۹۳۸۹	۱٫۰۹

همان‌طور که انتظار می‌رود در باند فرکانسی اندازه‌گیری شده مقادیر ضریب نفوذپذیری مغناطیسی نسبی مواد فریتی به عدد کمتر از ۱ می‌رسد [۴]. بنابراین طبق جدول ۱

[11] Mei H, Jiang H, Chen J, Yin F, Wang L, Farzaneh M. Detection of Internal Defects of Full-Size Composite Insulators Based on Microwave Technique. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2021.
[12] Microwave Ferrite & Fda – Exxelia Co.
[13]<https://marketplace.aviationweek.com/company/ferrite-e-domen-co>.

[8]. Note, Agilent Application. "Agilent Basics of Measuring the Dielectric Properties of Materials." Agilent Literature Number, 2006.
[9] Saidi, M. H., Kargar, M., and Ghafourian A. "Investigation of luminous/ nonluminous radiation in a vortex engine", Proceedings of FEDSM-07 Conference, Santiago, California, USA, 2007.
[10] Gorst, Aleksandr, Kseniya Zavyalova, Sergey Shipilov, Vladimir Yakubov, and Aleksandr Mironchev. "Microwave Method for Measuring Electrical Properties of the Materials." Applied Sciences 10, 2020.