

ارائه یک روش کاربردی برای شناسایی پارامترهای الکترومغناطیسی مواد فریتی در باند Ku

مصطفی ملکی^۱، دانشجوی دکتری؛ سید حسین محسنی ارمکی^۲، دانشیار؛ عماد حمیدی^۳، استادیار

1- مجتمع دانشگاهی برق و الکترونیک - دانشگاه صنعتی مالک اشتر - تهران - ایران - mostafa.smp@gmail.com

2- مجتمع دانشگاهی برق و الکترونیک - دانشگاه صنعتی مالک اشتر - تهران - ایران - mohseni@mut.ac.ir

3- مجتمع دانشگاهی برق و الکترونیک - دانشگاه صنعتی مالک اشتر - تهران - ایران - emadhamidi@iran.ir

چکیده: اولین قدم در طراحی و ساخت ادوات مختلف در سیستم‌های مخابراتی در اختیارداشتن اطلاعات مربوط به پارامترهای الکترومغناطیسی مواد مورد استفاده می‌باشد. در بین مواد مختلف فریت‌ها دارای جایگاه خاصی می‌باشند. در نتیجه شناسایی ماده فریتی دارای اهمیت بسزایی می‌باشد. در این مقاله یک روش کاربردی ساده برای شناسایی مواد فریتی ارائه شده است. این روش بر اساس کمینه کردن خطای یک تابع هدف می‌باشد. پارامترهای این تابع ضرایب عبور^۱ و ضرایب انعکاس^۲ ماده فریتی در یک موج‌بر مستطیلی هستند که شامل اطلاعات اندازه‌گیری شده از نمونه و نیز اطلاعات تحلیل نظری نمونه به روش تطبیق مود^۳ هستند. از آنجایی که روش پیاده سازی شده تنها به دامنه ضرایب عبور و انعکاس نمونه نیاز دارد، در مقایسه با سایر روش‌های موجود مشکلات کالیبراسیون فاز و حساسیت شدید به آن را ندارد و می‌تواند روشی کارآمد برای شناسایی مواد فریت با امکانات داخل کشور باشد و نیاز به تجهیزات گران‌قیمت و یا ارسال نمونه به خارج از کشور را برطرف نماید. روش پیشنهادی برای یک فریت نیکلی شبیه‌سازی شده و به صورت تجربی روی نمونه فریت SL-470 آزمایش شده است و نتایج با اطلاعات ارائه شده در کاتالوگ سازنده مقایسه شده است.

واژه‌های کلیدی: فریت، پارامترهای الکترومغناطیسی، ضرایب انعکاس و عبور، آنالیز تطبیق مود.

Presentation of an Applicable Method for Characterization of Electromagnetic Parameters of Ferrite Materials at Ku Band

M. Maleki¹, PhD Student; S. H. Mohseni Armaki², Associate Professor; E. Hamidi³, Assistant Professor

1- Electrical and Electronic Department, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran, Email: mostafa.smp@gmail.com

2- Electrical and Electronic Department, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran, Email: mohseni@mut.ac.ir

3- Electrical and Electronic Department, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran, Email: emadhamidi@iran.ir

Abstract: Since validation of the electromagnetic parameters of manufactured or purchased ferrite materials is the first step in designing and implementation of the different ferrite-based devices in communication systems, ferrite characterization is very important. In this paper an algorithm is simulated and implemented which is based on the minimization of an objective function. The objective function's parameters are the reflection and transmission coefficients of the ferrite in a rectangular wave guide. In comparison with other works proposed method only needs to the amplitude of the reflection and transmission coefficients to estimate the parameters of ferrite materials. This makes the implementation easy and eliminates the problems associated with phase calibration and sensitivity. The proposed method is simulated for a nickel ferrite and experimentally tested on SL-470 ferrite sample and the results have been compared with the manufacturer's catalog.

Key words: ferrite, electromagnetic parameters, the reflection and transmission coefficients, mode matching analysis.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۶/۰۳/۱۸

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۶/۰۶/۱۵، ۱۳۹۶/۰۷/۲۳ و ۱۳۹۶/۰۸/۰۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۱۰/۱۶

نام نویسنده مسئول: سید حسین محسنی ارمکی

نشانی نویسنده مسئول: تهران، لویزان، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی برق و الکترونیک.

۱- مقدمه

مستطیلی ساده تر است بیشتر مورد توجه است. مبنای این روش بر اساس اندازه‌گیری ضرایب انعکاس و عبور نمونه مورد آزمایش در برابر موج فرودی است. در این زمینه نیز کارهای متنوعی بر روی استخراج پارامترهای فریت صورت پذیرفته است [۱۰، ۱۱]. اما پیاده‌سازی اکثر این روش‌ها در داخل کشور نیازمند تجهیزات گران‌قیمت و بسیار دقیق است. از سویی در پیاده‌سازی چالش‌هایی وجود دارد. برای مثال در پیاده‌سازی روش پیشنهادی در [۱۲] ضخامت نمونه تحت آزمایش بایستی به‌صورتی باشد که ضریب انعکاس به‌صورت غیرقابل قبولی افزایش نیابد. در [۱۳] نیز تحلیل نظری صورت پذیرفته بر اساس تانسوری نبودن پارامترهای نمونه است که در بسیاری از روش‌های موج‌بری نیز این محدودیت مشاهده می‌شود. در [۱۴] یک چالش اصلی در اندازه‌گیری نیاز به نمونه‌ایی به شکل خاص است که در بسیاری موارد تهیه آن امکان‌پذیر نیست. در این راستا در این مقاله استخراج پارامترهای فریت در یک سیستم موج‌بر مستطیلی مورد شبیه‌سازی و تست عملیاتی قرار می‌گیرد که به‌دلیل آن که تنها بر اساس کار با دامنه ضرایب انعکاس و عبور از نمونه مورد آزمایش است نسبت به روش‌های دیگر نیاز به تجهیزات بسیار گران‌قیمت با حساسیت بالا و مشکلات ناشی از کالیبراسیون فاز و... را ندارد و این قابلیت را دارد تا به‌عنوان روشی بهینه و کم‌هزینه برای شناسایی فریت‌ها مورد استفاده قرار گیرد. به‌علاوه با استفاده از روش پیشنهادی امکان تحلیل دینامیک پارامترهای فریت در فرکانس‌های مختلف و نیز تحت اعمال میدان‌های مغناطیسی خارجی مختلف به‌عنوان بایاس نمونه امکان‌پذیر است که در تحلیل و طراحی ادوات مختلف مایکروویوی نظیر تغییردهنده‌های فاز فریتی بسیار ارزشمند خواهد بود [۱۵].

۲- مدل‌سازی

اساس روش پیشنهادی در این مقاله بر مبنای تخصیص پارامترهای الکترومغناطیسی نمونه فریتی مورد آزمایش به‌وسیله مهندسی معکوس پارامترهای S اندازه‌گیری‌شده از نمونه فریتی در یک سیستم موج‌بر مستطیلی است. به‌این صورت که در ابتدا ساختار موج‌بر مستطیلی به‌صورت نظری مورد تحلیل قرار می‌گیرد و روابط نظری برای ضرایب عبور و انعکاس ساختار یعنی همان S_{21}, S_{11} به‌دست آمده و در ادامه هدف این خواهد بود که به‌ازای چه مقادیری از پارامترهای الکترومغناطیسی برای نمونه، این ضرایب به مقادیر اندازه‌گیری شده میل خواهند نمود. این موضوع به‌وسیله کمینه‌کردن یک تابع هدف^۹ صورت می‌گیرد. لذا در ابتدا به تحلیل نظری و استخراج روابط نظری برای S_{21}, S_{11} ساختار پرداخته می‌شود.

۲-۱- تحلیل نظری موج‌بر مستطیلی با فریت

مطابق با شکل ۱ فرض می‌شود که نمونه فریتی در موج‌بر مستطیلی به ابعاد a, b قرار داده شده است، مطابق با شکل ۱، دهانه موج‌بر در سمت چپ با مود اصلی TE_{10} تحریک شده و موج در جهت z منتشر می‌شود، در اثر برخورد موج با نمونه، مودهای مرتبه بالاتر تحریک می‌شوند، اما

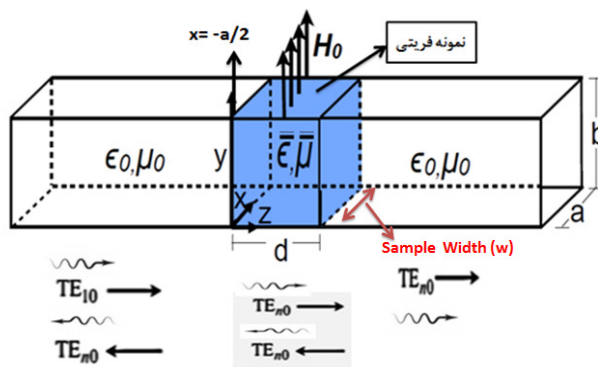
پس از توسعه یافتن روش‌های نظری برای مطالعه انتشار امواج در مواد مختلف و به‌دنبال آن توسعه امکان شبیه‌سازی، طراحی و ساخت ادوات مخابراتی نیز وارد مرحله جدیدی شد. به‌این صورت که این امکان فراهم شده است که پیش از ساخت نمونه، آن را مورد شبیه‌سازی و تحلیل قرار داده و پس از حصول اطمینان از صحت طراحی وارد فاز ساخت نمونه شد. اما از همان ابتدا یک چالش کلیدی که دانشمندان با آن دست و پنجه نرم می‌نمودند وجود دو پارامتر راهبردی بود که در معادلات ماکسول خودنمایی می‌کردند، یعنی ضریب تراوایی مغناطیسی μ و ضریب دی‌الکتریک ϵ . در حقیقت این دو پارامتر که در علم الکترومغناطیس آنها را پارامترهای بنیادین ماده می‌نامند هستند که تاثیر میدان الکتریکی و مغناطیسی را بر مواد مختلف تعیین می‌کنند [۱]. لذا تعیین این پارامترهای بنیادین با حداکثر دقت ممکن تبدیل به یکی از چالش‌های اصلی برای محققین این حوزه شد. در میان مواد مختلف فریت‌ها به‌دلیل کاربردهای بسیار گسترده‌ایی که در مهندسی مایکروویو دارند، بسیار مورد توجه هستند. فریت‌ها در اواخر جنگ جهانی دوم به‌دلیل جریانهای گردابی که در آلیاژهای آهن وجود داشت، به‌عنوان جایگزینی مناسب معرفی شدند اما به سرعت به خواص جالب آنها پی برده شد و ادوات مختلفی بر اساس آن ساخته شدند که از مهم‌ترین آنها می‌توان آنتن‌های آرایه‌فازی را نام برد [۲]. در این میان دانستن اطلاعات پارامترهای الکترومغناطیسی فریت‌ها گام ابتدایی در استفاده از آنها محسوب می‌شود. در این زمینه با این که نخستین بار مشخصات الکترومغناطیسی فریت‌ها و مفهوم فری‌مغناطیس^۴ قبلاً کشف شده بود، اما در سال ۱۹۴۹ برای نخستین بار پارامترهای مواد فریتی به‌صورت تانسور فرمول‌بندی شدند [۳]. در ادامه روش‌های مختلفی برای استخراج پارامترهای فریت‌ها معرفی و توسعه یافتند که به‌طور کلی می‌توان دسته‌بندی زیر را برای آنها در نظر گرفت:

- روش تست فضای آزاد^۵ [۴]
- روش محفظه رزونانسی^۶ [۵]
- روش موج‌بر با انتهای باز و پروب^۷ [۶]
- روش موج‌بر مستطیلی^۸ [۷]

روش تست فضای آزاد که در کارهای بسیاری مورد مطالعه و تست قرار گرفته است دارای یک عیب اساسی است زیرا اندازه نمونه مورد آزمایش بایستی به‌قدر کافی بزرگ باشد تا بتوان از اثرات لبه‌ایی در اندازه‌گیری صرفه‌نظر کرد [۸]. در روش استفاده از پروب و محفظه رزونانسی نیز چالش پهنای باند بسیار باریک، مشکل در تست نمونه تحت بایاس به‌وسیله میدان اعمالی خارجی و حساسیت بسیار زیاد روش اندازه‌گیری وجود دارد [۹]. روش متداولی که برای اندازه‌گیری پارامترهای مواد با پارامترهای الکترومغناطیسی جهتی مورد توجه است روش استفاده از یک سیستم موج‌بر مستطیلی می‌باشد. البته روش اندازه‌گیری بر مبنای موج‌بر دایروی نیز می‌تواند مد نظر قرار گیرد. اما از آنجایی که تحلیل نظری و پیاده‌سازی سیستم بر مبنای موج‌بر

از آن جایی که میدان الکتریکی مد اصلی TE_{10} که به نمونه برخورد می کند حول $x = 0$ به صورت زوج می باشد لذا تنها مدهای مرتبه بالاتر که میدانی به همین صورت دارند تحریک خواهند شد [۷].

به عبارت دیگر، برای مدل کردن میدان در هر ناحیه تنها کافی است که مدهای به صورت $TE_{n0}, n=odd$ در نظر گرفته شوند. مدهای موجود در هر بخش ساختار موجبری نیز در شکل ۱ نشان داده شده اند.



شکل ۱: ساختار موجبر مستطیلی پیشنهادی و مدهای منتشره درون آن، بایاس اعمالی با فریت در جهت y فرض شده است (مگنت های دائم در بالا و پایین نمونه قرار می گیرند).

برای فریت تحت این شرایط روابط تانسوری زیر برقرار هستند (بایاس در جهت y):

$$\bar{\epsilon} = \epsilon_0 \begin{bmatrix} \epsilon_r & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_r & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_r \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\bar{\mu} = \mu_0 \begin{bmatrix} \mu_g & 0 & -jk \\ 0 & \mu_y & 0 \\ jk & 0 & \mu_g \end{bmatrix} \quad (2)$$

در روابط فوق و در صورتی که فریت در ناحیه اشباع در نظر گرفته شود، عناصر تانسوری به صورت زیر هستند [۳]:

$$\kappa = \frac{\omega \omega_m}{\omega_0^2 - \omega^2} \quad (3)$$

$$\mu_g = 1 + \frac{\omega_0 \omega_m}{\omega_0^2 - \omega^2} \quad (4)$$

در روابط (۳،۴):

$$\omega_m = \mu_0 \gamma M_S \text{ و } \omega_0 = \mu_0 \gamma H_0 \text{ و } \omega = 2\pi f$$

که در آن $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ و $\mu_0 = 1.25 \times 10^{-6}$ به ترتیب ضرایب دی الکتریک و نفوذپذیری فضای آزاد هستند و

$$\mu_g = \mu_d + (1 - \mu_d) \left(\frac{M}{M_S} \right)^{3/2} \quad (5)$$

$$\mu_y = \mu_d \left(1 - \left(\frac{M}{M_S} \right)^2 \right)^{5/2} \quad (6)$$

$$\kappa = \frac{\omega_m M}{\omega M_S} \quad (7)$$

$$\mu_d = \frac{1}{3} + \frac{2}{3} \sqrt{1 - \left(\frac{\omega_m}{\omega} \right)^2} \quad (8)$$

از آن جایی که برای مدهای TE_{n0} در موجبر مستطیلی تغییرات به y وجود ندارد یعنی $\partial / \partial y = 0$ با اعمال این رابطه در معادلات مکسول معادله موج در داخل فریت به صورت زیر ساده می شود:

$$\left[\frac{\partial^2}{\partial x^2} + (k_c^s)^2 \right] H_z(x) = 0 \quad (9)$$

در این رابطه $k_c^s = n\pi/w$ (که در آن s بالانویس اشاره به ناحیه ای است که شامل نمونه فریتی می شود) به صورت زیر به پارامترهای فریت مرتبط است:

$$(k_c^s)^2 = k_0^2 \mu_g \epsilon_r \left(1 - \frac{\kappa^2}{\mu_g^2} \right) - (\beta^s)^2 \quad (10)$$

در این حالت و در صورتی که عرض نمونه در حالت کلی w فرض شود، مشابه با روال طی شده در [۷] می توان نشان داد که میدان های درون ناحیه فریت از روابط زیر به دست می آیند:

$$E_y^s(x, z) = -C_n k_{cn}^s \left(1 - \frac{\kappa^2}{\mu_g^2} \right) \sin \left[k_{cn}^s \left(x - \frac{w}{2} \right) \right] e^{\pm j\beta_n^s z} \quad (11)$$

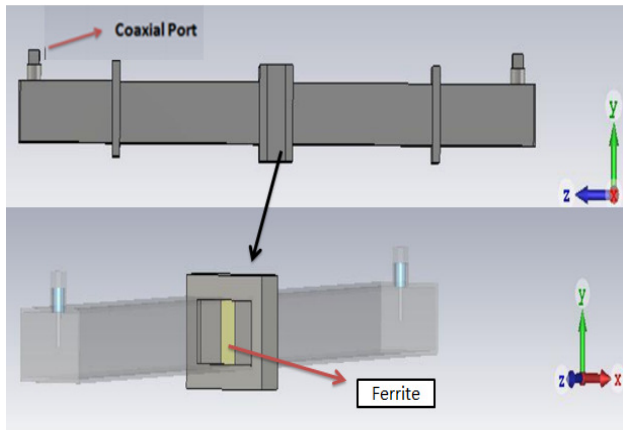
$$H_x^s(x, z) = \mp \frac{C_n k_{cn}^s}{Z_n^s} \left\{ \sin \left[k_{cn}^s \left(x - \frac{w}{2} \right) \right] \mp \frac{\kappa k_{cn}^s}{\beta_n^s \mu_g} \cos \left[k_{cn}^s \left(x - \frac{w}{2} \right) \right] \right\} e^{\pm j\beta_n^s z} \quad (12)$$

به همین صورت و برای نواحی خالی موجبر می توان نوشت:

$$E_y^e(x, z) = -D_n k_{xn}^e \sin \left[k_{xn}^e \left(x - \frac{a}{2} \right) \right] e^{\pm j\beta_n^e z} \quad (13)$$

$$H_x^e(x, z) = \mp \frac{D_n k_{xn}^e}{Z_n^e} \sin \left[k_{xn}^e \left(x - \frac{a}{2} \right) \right] e^{\pm j\beta_n^e z} \quad (14)$$

مقطع $a \times b \times w_1$ و $a \times b \times w_2$ و به ضخامت d در اختیار است که در حالت معمول یکی از فریت‌ها هم‌عرض موجبر مورد اندازه‌گیری (باند x به بالا ابعاد کوچک خواهد بود) لحاظ می‌شود. هر نمونه فریت در داخل نگه‌دارنده نمونه قرار داده می‌شود و پارامترهای S_{21}, S_{11} برای هر نمونه اندازه‌گیری می‌شوند. (شکل ۲).



شکل ۲: ساختار کلی پیشنهادی برای اندازه‌گیری مشخصات فریت در نرم افزار CST (در این شکل نمونه فریت عرض کمتری از موجبر دارد و در طرفین آن PEC قرار دارد).

حال اگر پارامترهای اندازه‌گیری شده با بالانویس 'mes' مشخص شوند، دو دسته اطلاعات پارامترهای S به صورت زیر موجود خواهد بود که برای هر نمونه شامل اطلاعات اندازه‌گیری شده و نظری حاصل از روابط (۱۷-۱۸) به صورت جدول ۱ هستند:

جدول ۱: پارامترهای S مورد استفاده در الگوریتم

برای نمونه به عرض w_1	برای نمونه به عرض w_2
$S_{11}^{numerical-w_1}$	$S_{11}^{numerical-w_2}$
$S_{21}^{numerical-w_1}$	$S_{21}^{numerical-w_2}$
$S_{11}^{mes-w_1}$	$S_{11}^{mes-w_2}$
$S_{21}^{mes-w_1}$	$S_{21}^{mes-w_2}$

حال می‌توان یک تابع هدف به صورت زیر در نظر گرفت و با تخصیص ϵ, μ, k مناسب مقدار آن را کمینه نمود:

$$\begin{aligned} \Delta 1 &= |S_{11}^{mes-w_1} - S_{11}^{numerical-w_1}|^2 \\ \Delta 2 &= |S_{21}^{mes-w_1} - S_{21}^{numerical-w_1}|^2 \\ \Delta 3 &= |S_{11}^{mes-w_2} - S_{11}^{numerical-w_2}|^2 \\ \Delta 4 &= |S_{21}^{mes-w_2} - S_{21}^{numerical-w_2}|^2 \end{aligned}$$

$$f = \sqrt{\Delta 1 + \Delta 2 + \Delta 3 + \Delta 4} \quad (19)$$

بازای مقادیر بهینه‌ایی مقدار f کمینه خواهد شد و بدین صورت پارامترهای فریت تخصیص داده می‌شوند. بهینه سازی غیرخطی برای کمینه کردن تابع f در (۱۹) نیاز به یک حدس اولیه دارد تا حول آن نقطه مساله حل شود. الگوریتمی که به این منظور در این مقاله در نظر

به طوری که در (۱۳) و (۱۴):

$$(k_c^e)^2 = k_0^2 - (\beta^e)^2, \quad k_c^e = \frac{n\pi}{a} \quad (15)$$

در این روابط نیز بالانویس e مختص فضای خالی است. در ادامه با اعمال شرایط مرزی مناسب بر روابط (۱۵-۱۰)، در دو مرز نمونه با فضای آزاد در $z=d$ و $z=0$ معادله ماتریسی به صورت (۱۶) حاصل خواهد شد:

$$\begin{bmatrix} -G & J & JP & 0 \\ K & L^+ & -L^-P & 0 \\ 0 & JP & J & -G \\ 0 & L^+P & -L^- & -K \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A^- \\ B^+ \\ B^- \\ C^+ \end{bmatrix} = a_1^p \begin{bmatrix} g \\ k \\ g \\ 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

در معادله (۱۶)، P ماتریسی قطری با عناصر قطری به صورت $\delta_{mn} e^{-j\beta_n^e d}$ و L, K, J زیرماتریس‌هایی به ابعاد $N \times N$ هستند و g, k بردارهای $N \times 1$ بعدی هستند به طوری که N تعداد مدهای لحاظ شده در آنالیز میدان‌ها به روش تطبیق مود می‌باشد و روابط آنها در ضمیمه آورده شده است. در روش تطبیق مود روابط غیرخطی میدان‌ها خطی می‌شوند که جزییات آن در منابع موجود است. برای نمونه در [۱۱، ۷]. در این روابط a_1^p دامنه میدان تحریک تابشی است و معلوم فرض می‌شود. در نهایت با حل این معادله ماتریسی می‌توان ضرایب انعکاس و عبور ساختار را به صورت زیر نوشت (در تمامی روابط S اشاره به اندازه دامنه دارد):

$$S_{11}^{numerical} = \frac{A_1^-}{a_1^p} \quad (17)$$

$$S_{21}^{numerical} = \frac{C_1^+}{a_1^p} \quad (18)$$

بدین ترتیب، روابط نظری برای پارامترهای S ساختار در اختیار است که به ازای ϵ, μ مناسبی (μ خود تابع مغناطیس شدگی است)، دامنه آن‌ها با اعمال یک بهینه‌سازی غیرخطی به مقادیر اندازه‌گیری شده از نمونه میل داده خواهند شد. چگونگی این موضوع در ادامه همراه شبیه‌سازی برای نمونه TT2-101 بحث می‌شود.

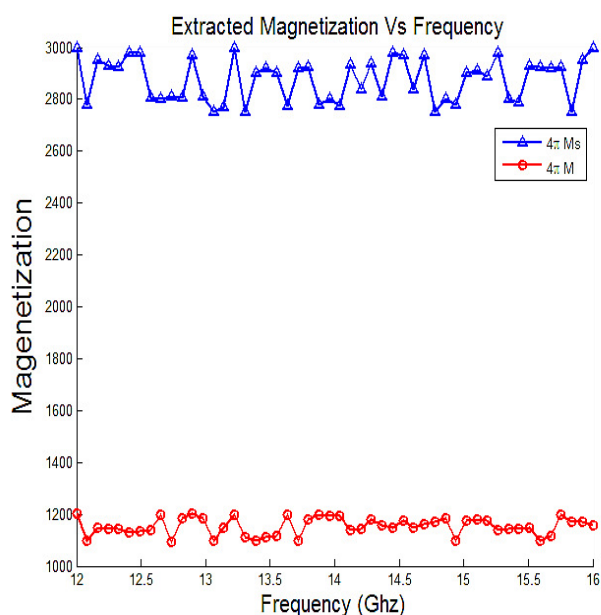
۲-۲- تشریح و شبیه‌سازی روش

در این قسمت، استخراج پارامترهای یک نمونه فریتی نیکی^۱ شرح داده می‌شود. ساختار کلی مورد استفاده در شکل ۲ نشان داده شده است، که در آن نمونه فریتی داخل نگه‌دارنده قرار داده می‌شود و در دو انتهای موجبر نیز دو adapter استاندارد موجبری به همراه coaxial ports قرار دارند که از آن‌ها پارامترهای s اندازه‌گیری می‌شوند. به این منظور فرض می‌شود که دو نمونه از فریت به عرض‌های مختلف (به ابعاد

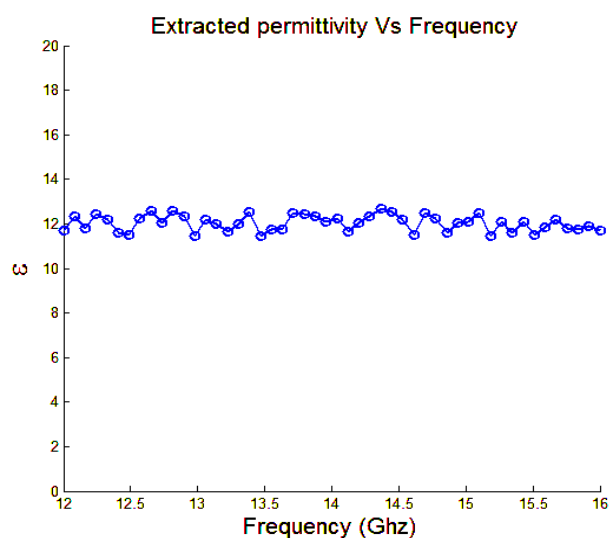
اعمالی از طریق شبیه‌سازی استاتیک فرکانس پایین محاسبه و استفاده شده‌است.

۲-۲-۲- نتایج شبیه‌سازی برای نمونه TT2-101

با اعمال پارامترهای S در الگوریتم و با کمینه‌کردن تابع هدف f در (۱۹) نتایج استخراج شده برای سه مجهول تابع هدف، در ادامه آورده شده‌اند. توجه می‌شود که مقدار $4\pi M$ استخراج شده به نوعی واسط بهینه‌ایی برای دو حالت نمونه تحت بایاس‌های متفاوت است.



شکل ۳: مقادیر خروجی الگوریتم برای $4\pi Ms$ و $4\pi M$ برای نمونه TT2-101، مقدار ذکر شده برای $4\pi Ms$ این نمونه در $3000[G]$ ذکر شده است.



شکل ۴: مقدار ϵ استخراج شده برای نمونه TT2-101، مقدار ذکر شده در [۱] برای این نمونه $12/8$ می‌باشد.

گرفته شده است به این صورت است که ابتدا با توجه به اطلاعات عمومی که برای فریت‌ها وجود دارد یک نقطه بهینه پیدا می‌شود. این اطلاعات کلی در مورد فریت‌های مرسوم بدین گونه است که $500 G < Ms < 5000 G$ و $10 < \epsilon_r < 18$ [۱،۳] با استفاده از این محدوده کلی برای دو پارامتر فریت‌ها می‌توان نقطه اولیه بهینه را مشخص نمود. در الگوریتم مورد استفاده برای این مقاله، در مرحله نخست دو پارامتر Ms و ϵ_r در بازه‌های مذکور تغییر داده شده و جایی که تابع هدف f کمینه شده است به عنوان یک نقطه بهینه آغازین برای حل مساله انتخاب شده است. این قابلیت الگوریتم برای یافتن نقطه بهینه آغازین بدون داشتن اطلاعات خاصی از فریت یک مزیت مهم می‌باشد که برای صحت‌سنجی مواد فریتی خریداری و یا تولیدشده بسیار کاربردی است.

۲-۲-۱- شبیه‌سازی روش برای استخراج نمونه پارامترهای TT2-101

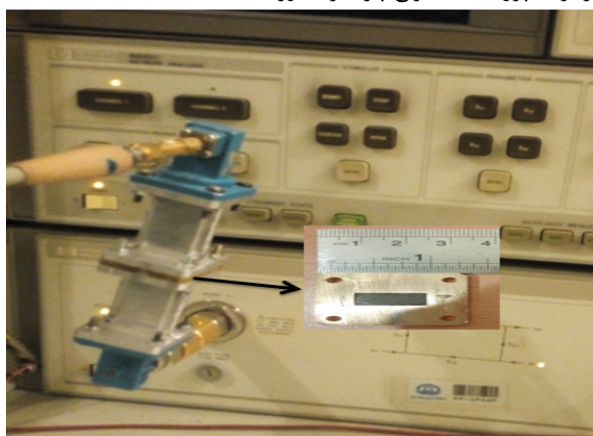
در این قسمت روش پیشنهادی برای یک نمونه TT2-101 شبیه‌سازی و نتایج با روابط نظری مقایسه می‌شوند. در این شبیه‌سازی از دیتاهای S حاصل شده از ساختار شکل (۲) که در نرم افزار CST شبیه‌سازی شده است به جای پارامترهای S تجربی استفاده شده‌است. ابعاد و پارامترهای مورد استفاده در شبیه‌سازی در جدول ۲ آورده شده‌اند:

جدول ۲: پارامترهای مورد استفاده در شبیه‌سازی

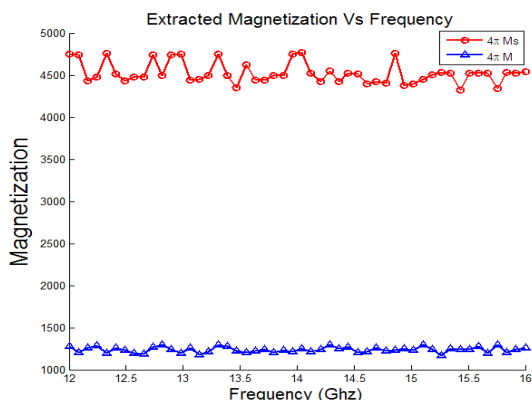
پارامتر	شرح	مقدار
a, b	ابعاد استاندارد موجبر باند Ku	
d	ضخامت نمونه	$4mm$
w_1	عرض نمونه اول	هم عرض مقطع موجبر $w_1 = a$
w_2	عرض نمونه دوم	$w_2 = 6mm$

در شبیه‌سازی فرض شده است که میدان استاتیک خارجی اعمالی برای بایاس در جهت y برای نمونه اول $500G$ و برای نمونه دوم $1500G$ بوده است و پارامترهای S_{21}, S_{11} از دو پرت برای هر نمونه استخراج شده‌اند و به عنوان نمونه‌های اندازه‌گیری شده تجربی فرض شده‌اند. اکنون تابع هدف رابطه (۱۹) تشکیل داده می‌شود و با یک بهینه‌سازی غیرخطی مقادیر نظری به مقادیر تجربی S_{21}, S_{11} (که اینجا دیتاهای خروجی CST فرض شده‌اند) میل داده می‌شوند. در مدل نظری با توجه به مقدار میدان بایاس اعمالی فریت در حالت مغناطیس‌شدگی جزئی^{۱۱} لحاظ شده و روابط تانسوری آن از روابط (۸-۵) به دست می‌آیند. در این بهینه‌سازی سه مجهول M, Ms, ϵ در تابع هدف f وجود دارند که با کمینه‌کردن f در (۱۹) به دست خواهند آمد. لازم به ذکر است که مقادیر مورد استفاده در شبیه‌سازی در CST برای نمونه فریتی از [۱] استخراج شده و مقدار M به ازای بایاس

اندازه‌گیری شده S با مقادیر حاصل از تطبیق‌مود است که به‌دلایلی مثل ناهمواری سطح نمونه و خطای برش زدن نمونه و الگوریتم ایجاد شده‌است. با در اختیار داشتن این دو پارامتر می‌توان μ_r, κ را نیز از معادلات (۵-۸) به‌دست آورد که در شکل ۹ نشان داده شده‌اند. در اختیار داشتن تغییرات عناصر تانسوری فریت نسبت به فرکانس در طراحی ادوات مختلفی از جمله تغییردهنده‌های فاز فریتی بسیار مهم است. لذا اطلاعات استخراج شده می‌تواند در این زمینه بسیار کاربردی باشد. لازم به ذکر است که در این مقاله از تلفات فریت که بسیار ناچیز است صرفه‌نظر شده است و استخراج ϵ_r و $4\pi Ms$ در حالتی که پیاده‌سازی و اندازه‌گیری آن ساده باشد مدنظر قرار داشته است. این مهم از آن‌جا که در روش پیشنهادی تنها به اندازه پارامترهای S نیاز است برآورده شده‌است و نسبت به روش‌های مشابه که نیاز به اندازه‌گیری فاز پارامترهای S دارند و در نتیجه اندازه‌گیری آن‌ها حساسیت بسیار بالایی به فاز دارد بسیار کاربردی‌تر است. در جدول ۳ و ۴ خلاصه‌ای از مقادیر پارامترهای استخراج‌شده برای نمونه SL-470 و مقایسه آنها با مقادیر ارائه شده در مراجع و زمان مورد نیاز برای پروسه استخراج پارامترها آورده شده‌اند.

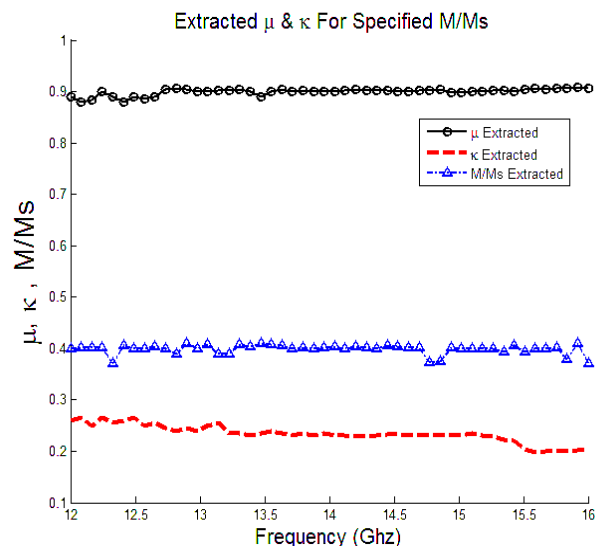


شکل ۶: سیستم مورد استفاده برای اندازه‌گیری، نمونه به عرض $aw_1 =$ در داخل نگه‌دارنده نمونه نشان داده شده است. (مگنت‌های دایم برای بایاس در این شکل نشان داده نشده‌اند)



شکل ۷: مقادیر خروجی الگوریتم برای $4\pi Ms$ و $4\pi M$ برای نمونه SL-470. مقدار ذکر شده برای $4\pi Ms$ این نمونه در $4700G$ ذکر شده است.

بر اساس نتایج شکل ۳ می‌توان مقادیر تانسور معادله (۲) را از روابط (۵-۸) در باند فرکانسی که شبیه‌سازی در آن انجام گرفت ترسیم نمود، نتایج در شکل‌های ۵ و ۴ ترسیم شده‌اند. بر این اساس می‌توان ملاحظه نمود که نتایج با دقت خوبی به مقادیر ذکر شده برای نمونه TT2-102 نزدیک هستند.



شکل ۵: نتایج استخراج شده برای μ و κ به ازای M/Ms استخراج شده برای نمونه TT2-101.

در ادامه روش پیشنهادی به‌صورت تجربی روی یک نمونه دیگر تست شده‌است که به آن پرداخته می‌شود.

۳-۲- تست عملیاتی روی نمونه SL-470

در این قسمت نتیجه تست تجربی روی یک نمونه فریت SL-470 از شرکت Ferrite Domes [۱۷] آورده می‌شود. دو نمونه از این نوع فریت به ابعاد مورد ذکر در جدول (۲) در یک نگه‌دارنده نمونه که با استفاده از فلنج به موج‌بر استاندارد باند Ku متصل شده، قرار داده شده است و پارامترهای S_{21}, S_{11} برای هر نمونه توسط Network Analyzer اندازه‌گیری شده است (شکل ۶). بایاس اعمالی به فریت توسط قراردادن مگنت‌های دایم در بالا و پایین نگه‌دارنده نمونه ایجاد شده‌است. مقدار میدان بایاس در محل نمونه توسط گاوستر متر برای دو نمونه به ترتیب $1200G$ و $1550G$ اندازه‌گیری شده است که در محاسبات لحاظ شده است. در این آزمایش نیز با توجه به مقدار بایاس اعمالی، از روابط تانسوری مغناطیس‌شدگی جزئی، روابط (۵-۸) استفاده شده است که نتایج آن در ادامه آورده شده‌اند.

نتایج استخراج‌شده برای نمونه SL-470 در باند Ku در شکل‌های ۷ و ۸ و ۹ نشان داده شده‌اند. از مقایسه نتایج به‌دست‌آمده در شکل ۷ و ۸ با مقادیر ذکر شده برای نمونه SL-470 توسط شرکت سازنده [۱۷] ملاحظه می‌شود که نتایج استخراج‌شده برای ϵ_r و $4\pi Ms$ با خطای حدود ۱۰٪ بهم نزدیک هستند. این خطا حاصل از اختلاف مقادیر

۳- نتیجه گیری

در این مقاله، یک روش و سیستم اندازه‌گیری برای شناسایی فریت‌ها در باند Ku پیشنهاد شد. مبنای این روش تخصیص پارامترهای الکترومغناطیسی فریت، کمینه کردن یک تابع هدف است که مجهولات آن عناصر سوری فریت هستند. روش پیشنهادی نسبت به سایر روش‌های موجود، به دلیل مکانیزم پیشنهاد شده برای تخصیص پارامترها، مشکلات ناشی از کالیبراسیون فاز و مشکلات ثانویه ناشی از آن از جمله نیاز به تجهیزات گران قیمت را برطرف می‌سازد. روش پیشنهادی با شبیه‌سازی یک نمونه TT2-102 تست شده و در نهایت به صورت عملیاتی روی یک نمونه SL-470 که در ادوات میکروویوی توان بالا نظیر تغییردهنده فاز فریتی مورد استفاده است پیاده سازی و نتایج با دقت حدود ۱۰٪ به مقادیر موجود در کاتالوگ محصول نزدیک بودند. لازم به ذکر است که در این مقاله از تلف فریت که مقداری ناچیز است صرفه نظر شده است این موضوع در بسط و توسعه روش پیشنهادی در کارهای آتی مرتفع خواهد شد.

پیوست

زیرماتریس‌های رابطه (۱۶) از محاسبه انتگرال‌های زیر بدست می‌آیند:

$$G_{mn} = k_{xn}^e \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} \sin[k_{xm}^e(x - \frac{a}{2})] \sin[k_{xn}^e(x - \frac{a}{2})] dx$$

$$J_{mn} = k_{cn}^s (1 - \frac{\kappa^2}{\mu g^2}) \int_{-\frac{w}{2}}^{\frac{w}{2}} \sin[k_{xm}^e(x - \frac{a}{2})] \sin[k_{xn}^e(x - \frac{a}{2}) - \frac{w}{2}] dx$$

$$K_{mn} = \frac{k_{xn}^e}{Z_n^e} \int_{-\frac{w}{2}}^{\frac{w}{2}} \sin[k_{cm}^s(x - \frac{w}{2})] \sin[k_{xn}^e(x - \frac{a}{2})] dx$$

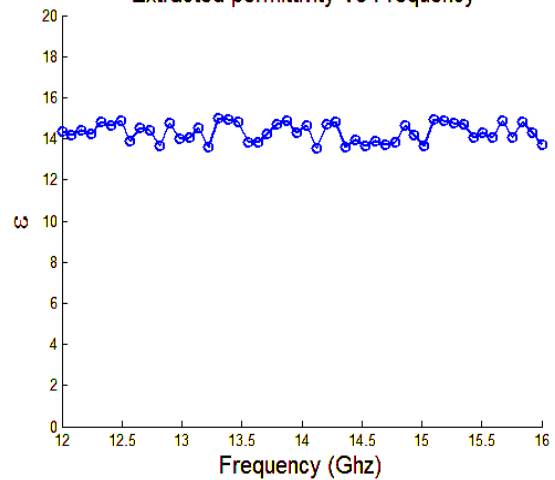
$$L_{mn}^{\pm} = \frac{k_{cn}^s}{Z_n^s} \int_{-\frac{w}{2}}^{\frac{w}{2}} \sin[k_{cm}^s(x - \frac{w}{2})] \{ \sin[k_{cn}^s(x - \frac{w}{2})] \pm \frac{\kappa k_{cn}^s}{\mu g \beta_n^s} \cos[k_{cn}^s(x - \frac{w}{2})] \} dx$$

$$gm = \frac{K_{m1}}{km} = \frac{gm}{K_{m1}}$$

مراجع

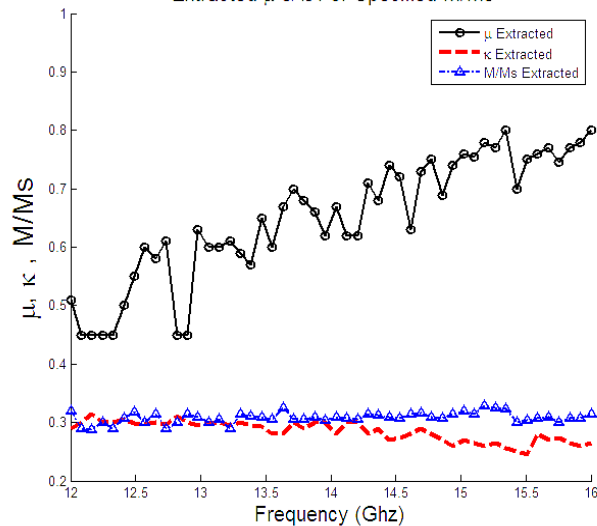
- [1] D. M. Pozar, *Microwave Engineering: Third Edition*, John Wiley & Sons Inc, Hoboken, NJ, 2005.
- [2] زهرا حبیبی، مرتضی کازرونی، سید حسین محسنی ارمکی و عماد حمیدی، «ارائه یک روش کاربردی جهت کالیبراسیون آنتنهای آرایه فازی»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، دوره ۴۵، شماره ۴، صفحات ۸۴-۷۹، زمستان ۱۳۹۴.
- [3] Shiban, K, and Bharathi Bhat, *Microwave and millimeter wave phase shifters*. Vol. 1. Boston and London: Artech House, 1991.

Extracted permittivity Vs Frequency



شکل ۸: مقدار ϵ استخراج شده برای نمونه SL-470، مقدار موجود در [۱۷] برای این نمونه ۱۴/۷ می‌باشد.

Extracted μ & κ For Specified M/Ms



شکل ۹: نتایج استخراج شده برای μ و κ به ازای M/Ms استخراج شده برای نمونه SL-470

جدول ۳: مقایسه نتایج استخراج شده برای نمونه SL-470

پارامتر	مقدار ذکر شده توسط سازنده در [۱۷]	مقدار استخراج شده (متوسط) در این مقاله
$4\pi Ms$	24.0 ± 47.0	20.0 ± 46.0
ϵ_r	14.0 ± 7.7	14.0 ± 4.8

جدول ۴: زمان تقریبی پروسه استخراج پارامترها برای نمونه SL-470

تعداد نمونه های فرکانس در باند ku	زمان نسبی برای استخراج پارامترهای نمونه
۱۰۰۱	حدود ۵۰ دقیقه

- Transformers”, *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. MTT-35, no. 6, pp. 552-560, June 1987.
- [11] Dorey, S. P., M. J. Havrilla, L. L. Frasch, C. Choi, and E. J. Rothwell, “Stepped-waveguide material characterization technique,” *IEEE Antennas Propag. Mag.*, Vol. 46, No. 1, 170–175, 2004.
- [12] N. Belhadj-Tahar, A. Fourier-Lamer, and H. de Chanterac, “Broadband simultaneous measurement of complex permittivity and permeability using a coaxial discontinuity,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 38, no. 1, pp. 1–7, Jan 1990.
- [13] W. B. Weir, “Automatic measurement of complex dielectric constant and permeability at microwave frequencies,” *Proc. IEEE*, vol. 62, no. 1, pp. 33–36, Jan 1974.
- [14] Tae-Wan Kim, Byeong-Yong Park, Seung-Young Park, “Calculation of Magnetization and Permeability Tensor of a Partially Magnetized Cylindrical Ferrite Resonator”, *IEEE Magnetics Letters*, Volume: 7, Feb 2016.
- [15] J.R.Bray and L.Roy, "Development of a millimeter wave ferrite filled antisymmetrically biased rectangular waveguide phase shifter embedded in low-temperature cofired ceramic," *IEEE Trans.Microw.Theory Tech.*, vol. 52, no. 7, pp.1732-1739, July 2004.
- [16] M R. A. Fenner, E. J. Rothwell, and L. Frasch, “A comprehensive analysis of freespace and guidedwave techniques for extracting the permeability and permittivity of materials using reflection-only measurements,” *Radio Science*, vol. 47, pp. 1004–1016, Jan 2013.
- [17] ferrite-domen.com/images/pr8/pr8.pdf.
- [4] D. K. Ghodgaonkar, V. Varadan, and V. K. Varadan, “Free space measurement of complex permittivity and complex permeability of magnetic materials at microwave frequencies,” *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 39, no. 2, pp. 387–394, Apr 1990.
- [5] L. Chen, C. K. Ong, and B. T. G. Tan, “Cavity perturbation technique for the measurement of permittivity tensor of uniaxially anisotropic dielectrics,” *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 48, no. 6, pp.1023–1030, Dec 1999
- [6] N. Maode, S. Yong, U. Jinkui, F. Chenpeng, and X. Deming, “An improved open-ended waveguide measurement technique on parameters ϵ_r and μ_r of high-loss materials,” *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 47, no. 2, Apr 1999.
- [7] B. Crowgey, O. Tuncer, J. Tang, E. J. Rothwell, B. Shanker, L. C. Kempel, and M. J. Havrilla, “Characterization of biaxial anisotropic material using a reduced aperture waveguide,” *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, Vol. 62, No. 10, 2739–2750, 2013.
- [8] J. Baker-Jarvis, E. J. Vanzura, and W. A. Kissick, “Improved technique for determining complex permittivity with the transmission/reflection method,” *IEEE Trans Microw. Theory Tech.*, vol. 38, no. 8, Aug 1990.
- [9] W. Barry, “A broad-band, automated, stripline technique for the simultaneous measurement of complex permittivity and permeability,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. MTT-34, no. 1, pp. 80–84, Jan 1986.
- [10] J. Uhfer and F. Arndt, “Field Theory Design of Ferrite Loaded Waveguide Nonreciprocal Phase Shifters with Multisection Ferrite or Dielectric Slab Impedance

زیر نویس ها

- ¹ Transmission Coefficient
- ² Reflection Coefficient
- ³ Mode Matching
- ⁴ Ferrimagnetism
- ⁵ Free Space
- ⁶ Cavity Resonator
- ⁷ Open Ended Probe
- ⁸ Rectangular Wave Guide
- ⁹ Objective Function
- ¹⁰ Nickel Ferrite
- ¹¹ Partial Magnetize