



مدل سازی تجربی اتلاف ناشی از پسماند مغناطیسی ترفنل-دی در مقادیر مختلف فرکانس و پیش تنش مکانیکی

سهیل طالبیان^{الف*}

^{الف} استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران، s.talebian@razi.ac.ir

واژگان کلیدی	چکیده
ترفنل-دی، اتلاف ناشی از پسماند مغناطیسی، چرخه‌های پسماند مغناطیسی	یکی از محدودیت‌های مهم استفاده از ترفنل-دی در محرکه‌ها و حسگرها، اتلاف ناشی از پسماند مغناطیسی آن است که منجر به کاهش بازده مکانیکی در محرکه‌ها و کاهش دقت و کوچک‌تر شدن محدوده اندازه‌گیری خطی در حسگرها می‌شود. در مقاله حاضر، افت توان ناشی از پسماند مغناطیسی در ترفنل-دی و عوامل مؤثر بر آن مورد مطالعه و مدل سازی تجربی قرار گرفته است. با استفاده از یک مجموعه آزمایشگاهی ابتکاری، رفتار مغناطیسی ترفنل-دی شامل منحنی‌های پسماند آن در چرخه‌های بزرگ و کوچک و در مقادیر مختلف فرکانس، شدت میدان مغناطیسی و پیش تنش مکانیکی به دست آورده شده است. از منحنی‌های پسماند به دست آمده به عنوان اطلاعات ورودی در رابطه تحلیلی افت توان ناشی از پسماند استفاده شده است. نتایج نشان‌دهنده آن است که افت توان ناشی از پسماند با افزایش فرکانس میدان مغناطیسی، افزایش مقدار ماکزیمم شدت میدان مغناطیسی در هر چرخه پسماند و کاهش پیش تنش مکانیکی، افزایش می‌یابد. سپس یک مدل تجربی مبتنی بر پارامترهای توانی با در نظر گرفتن سه عامل فرکانس، شدت میدان مغناطیسی و پیش تنش مکانیکی به منظور پیش‌بینی افت توان ناشی از پسماند مغناطیسی ارائه شده است که اعتبار سنجی این مدل در شرایط متفاوت و جدید، نشان‌دهنده دقت قابل قبول آن می‌باشد. مزیت اصلی مدل تجربی ارائه شده نسبت به مدل تحلیلی این است که تنها با تعیین پارامترهای مربوط به شرایط کاری ترفنل-دی، امکان پیش‌بینی افت توان فراهم می‌گردد و به منحنی‌های پسماند مغناطیسی ترفنل-دی به عنوان ورودی مدل نیاز ندارد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۰۴	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۰۷/۰۴	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۱۱	

Experimental modeling of Magnetic Hysteresis Power Loss of Terfenol-D at Different Values of Frequency and Mechanical Pre-stress

Soheil Talebian^{a*}

^aDepartment of Mechanical Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran

KEYWORDS

Terfenol-D
Magnetic Hysteresis Loss
Magnetic Hysteresis Loops

Received: August 26, 2021

Revised: September 26, 2021

Accepted: October 03, 2021

ABSTRACT

One of the major limitations of using Terfenol-D in actuators and sensors is its magnetic hysteresis power loss which leads to reduction of mechanical power loss, precision and linear measuring range in actuators and sensors, respectively. In this paper, magnetic hysteresis power loss of Terfenol-D and its affecting parameters are studied and modeled experimentally. To this end a fabricated experimental setup is used to obtain magnetic behavior of Terfenol-D consisting of major and minor hysteresis loops at different values of frequency, magnetic field intensity and mechanical pre-stress. Data of these loops are used as an input to analytical equation of magnetic hysteresis loss. The results show that the magnetic hysteresis loss increases with increasing in frequency and peak value of magnetic field intensity and decreasing in mechanical pre-stress. Then, an explicit model based on power relations for frequency, peak value of magnetic field intensity and mechanical pre-stress is presented to predict magnetic hysteresis power loss. This model is validated under new different conditions and the results show very good agreement with analytical model. The main advantage of the explicit model is that it does not need hysteresis loops as input data and it can predict the magnetic hysteresis power loss only by determining the values of conditional parameters.

۱- مقدمه

تغییر شکل ماده فرومغناطیس در اثر مغناطیس‌شدگی را که بر اثر اعمال میدان مغناطیسی خارجی صورت می‌گیرد، دگرسانی مغناطیسی می‌گویند. این پدیده در بعضی از مواد و آلیاژهای فرومغناطیس مثل ترفنل-دی قوی‌تر است. ترفنل-دی آلیاژ آهن، تریبیوم^۱ و دسپرسیوم^۲ است که هر سه عنصر پایه این آلیاژ، خودشان نیز فرومغناطیس هستند. درصد عناصر در این آلیاژ متغیر است. یک مورد متداول آن $Tb_{0.3}D_{0.7}Fe_{1.9}$ می‌باشد. ترفنل-دی^۳ به‌عنوان یک ماده دگرسان مغناطیسی^۴، به‌واسطه ویژگی‌هایی همچون توانایی تغییر طول و اعمال نیروی زیاد (در مقایسه با سایر مواد هوشمند)، دمای کوری^۵ بالا، ضریب کوپلینگ^۶ بزرگ و قابلیت استفاده در فرکانس‌های بالا کاربرد بسیاری در ساخت انواع محرکه‌ها دارد [۱]. این محرکه‌ها، کاربردهای فراوانی در کنترل فعال ارتعاشات از طریق اعمال نیروی مناسب در فرکانسی مشخص [۲]، شیرهای مغناطیسی از طریق افزایش پهنای باند فرکانسی [۳]، سوخت‌پاش‌ها به‌وسیله ایجاد جابجایی کنترل‌شده [۴] و غیره دارند. در کاربردهای فوق برای کارکرد مناسب‌تر، دقت بالاتر، کنترل‌پذیری بهتر و چگالی انرژی بیشتر عموماً از ایجاد میدان مغناطیسی بایاس^۷ و اعمال پیش‌تنش مکانیکی استفاده می‌کنند. عموماً سطح میدان مغناطیس بایاس، وابسته به طراحی محرکه عددی بین ۲۰ تا ۱۰۰ کیلو آمپر بر متر دارد [۵]. بایاس مغناطیسی با مغناطیس دائم علاوه بر خصوصیت بردن به ناحیه خطی، این امکان را می‌دهد تا کرنش بیشتری از ترفنل-دی انتظار داشت. اعمال پیش بار مکانیکی نیز می‌تواند موجب افزایش فاکتور کوپلینگ و ضریب دگرسانی مغناطیسی و بهبود عملکرد ترفنل-دی شود.

باید توجه داشت که حین تبدیل انرژی الکتریکی به انرژی مکانیکی در این محرکه‌ها، مقداری افت انرژی مغناطیسی به وجود می‌آید که این موضوع باید در طراحی یک محرکه ملاحظه شود تا با انتخاب صحیح عوامل مؤثر بر افت مغناطیسی، بتوان بیشترین بازده را از محرکه انتظار داشت. همانند سایر مواد فرومغناطیس می‌توان افت توان مغناطیسی را در ترفنل-دی ناشی از توان اتلافی پسماند^۸ (در فرکانس‌های پایین) و توان اتلافی جریان گردابه‌ای^۹ و توان اتلافی اضافی^{۱۰} (در فرکانس‌های بالا) دانست [۶]. ترفنل-دی همانند همه مواد فرومغناطیس دارای پسماند مغناطیسی است. بدین معنی که ارتباط بین شدت میدان مغناطیسی اعمال‌شده بر آن و شار مغناطیسی گذرنده از آن چندشاخه‌ای و غیرخطی است. افت توان ناشی از پسماند به علت حرکت و چرخش حوزه‌های مغناطیسی میکروسکوپی ماده رخ می‌دهد، هنگامی که ماده فرومغناطیس چرخه‌های مغناطیس شونده را طی می‌کند. مقدار افت توان پسماند بیشتر به عناصر سازنده آن ماده و همچنین اندازه دانه‌ها در ساختار کریستالی مربوط است. با افزایش فرکانس میدان مغناطیسی خارجی، افت ناشی از پسماند مغناطیسی نیز افزایش می‌یابد. در هر فرکانس می‌توان افت ناشی از پسماند مغناطیسی را مجموع افت پسماند استاتیکی^{۱۱} و افت پسماند دینامیکی^{۱۲} دانست؛ که اولی ناشی از افزایش فرکانس میدان مغناطیسی (کم شدن زمان هر چرخه و بالطبع افزایش توان اتلافی) و دومی ناشی از عریض‌تر شدن چرخه پسماند با افزایش فرکانس می‌باشد. عموماً در فرکانس‌های پایین، پسماند استاتیکی و در فرکانس‌های بالاتر پسماند دینامیکی عوامل تعیین‌کننده در مقدار کلی افت توان ناشی از پسماند می‌باشند.

تاکنون مطالعات زیادی در مورد ارتباط بین عواملی نظیر فرکانس میدان مغناطیسی و پیک چگالی شار مغناطیسی گذرنده با افت توان ناشی از پسماند در مواد فرومغناطیس مختلف انجام گرفته است. مطالعات انجام‌شده در این مورد نشان می‌دهد که مقدار افت پسماند استاتیکی با فرکانس ارتباط خطی دارد، اما مقدار افت توان ناشی از پسماند دینامیکی با فرکانس ارتباط خطی نداشته و درجه تأثیر فرکانس بر مقدار افت مذکور، به جنس ماده فرومغناطیس هم بستگی دارد. به‌عنوان نمونه، مطالعات

¹ Terbium

² Dysprosium

³ Terfenol-D

⁴ Magnetostrictive

⁵ Curie temperature

⁶ Coupling coefficient

⁷ Bias

⁸ Hysteresis power loss

⁹ Eddy currents power loss

¹⁰ Excess power loss

¹¹ Static hysteresis power loss

¹² Dynamic hysteresis power loss

تجربی نشان می‌دهند که افت توان ناشی از پسماند دینامیکی در فیلم $[۷] \text{Fe/Au}$ ، فیلم $[۸] \text{Co/Cu}$ و فیلم $[۹] \text{Fe/W}$ به ترتیب با توان $۱/۳۱$ ، $۱/۶۶$ و $۱/۰۳$ از فرکانس متناسب هستند. همچنین مدل‌سازی‌های تجربی-عددی انجام گرفته با مدل آیزینگ^{۱۳} که عموماً برای آهن انجام شده است، نشان می‌دهد افت توان ناشی از پسماند دینامیکی با توان $(۱/۳۶)$ [۱۰]، $(۱/۴۵)$ [۱۱]، $(۱/۶۶)$ [۱۲] و $۱/۷$ [۱۳] از فرکانس ارتباط دارد. از سوی دیگر مقدار افت پسماند مغناطیسی یک ماده بستگی به مقدار ماکزیمم شدت میدان مغناطیسی و بالطبع ماکزیمم چگالی شار مغناطیسی هر چرخه دارد. مطالعات انجام گرفته در این مورد نشان‌دهنده آن است که این ارتباط عموماً غیرخطی است. به‌عنوان مثال توان اتلافی پسماند در مواد فرومغناطیس نرم که در ماشین‌های الکتریکی مورد استفاده قرار می‌گیرند متناسب است با B_{\max}^n که $n < ۲/۵$ [۱۴]. همچنین توان اتلافی پسماند در آهن [۱۵]، فیلم $[۷] \text{Fe/Au}$ ، فیلم $[۸] \text{Co/Cu}$ و فیلم $[۹] \text{Fe/W}$ به ترتیب با توان‌های $۰/۶۷$ ، $۰/۵۹$ ، $۱/۶$ و $۰/۲۵$ از شدت میدان مغناطیسی متناسب است.

اگرچه مطالعات بسیار متعددی در مورد مدل‌سازی پسماند مغناطیسی ترفنل-دی و نیز بررسی تجربی آن صورت پذیرفته است، اما تاکنون تحقیقات کمی درباره افت توان ناشی از پسماند مغناطیسی در ترفنل-دی و عوامل مؤثر بر آن انجام گرفته است. یاماموتو^{۱۴} و همکارانش تأثیر پیش‌تنش مکانیکی بر افت توان ناشی از پسماند ترفنل-دی را در فرکانس‌های پایین مورد بررسی قرار داده‌اند و به این نتیجه رسیده‌اند که با افزایش پیش‌تنش مکانیکی افت توان ناشی از پسماند مغناطیسی کاهش می‌یابد اما این تحقیق صرفاً جنبه تجربی داشته و مدلی برای تخمین مقدار توان افت شده پیشنهاد نشده است [۱۶]. جیانبن^{۱۵} و همکارانش افت توان ناشی از پسماند را در محرکه ساخته شده با ترفنل-دی مطالعه نموده‌اند و با استفاده از مدل جایلز-ترتون^{۱۶} و روش حل اجزا محدود مقدار توان افت شده ناشی از پسماند را به دست آورده‌اند. از آنجاکه ورودی مدل جایلز-ترتون داده‌های کامل مربوط به چرخه مغناطیسی است، استفاده از مدل آن‌ها در فرکانس‌های بالاتر منوط به دست داشتن این داده‌ها در هر فرکانس است [۱۷]. هوآنگ و همکاران نیز انواع افت‌های توان در ترفنل-دی شامل پسماند و جریان گردابه-ای را به‌صورت تجربی مورد مطالعه قرار داده‌اند و در نهایت با استفاده از برازش خطی بر روی نتایج تجربی، مدل تجربی خود را ارائه داده‌اند [۱۸]. در مدل مربوطه اثرات پیش‌تنش مکانیکی مورد بررسی قرار نگرفته است. با جمع‌بندی مطالعات فوق می‌توان به این نتیجه رسید که مدل‌های پیشنهاد شده شامل تمامی متغیرهای اثرگذار از قبیل فرکانس میدان مغناطیسی، شدت میدان مغناطیسی و پیش‌تنش مکانیکی نیستند و بالطبع محدوده کاربرد مشخص و تعریف شده‌ای دارند. همچنین در این مطالعات همواره نیاز به داده‌های کامل مربوط به چرخه مغناطیسی وجود دارد و بدون وجود این داده‌ها (صرف‌نظر از این‌که به‌صورت تجربی یا ریاضی به‌دست آمده‌اند) امکان استفاده از مدل و محاسبه مقدار افت توان وجود ندارد.

در تحقیق حاضر، ابتدا از یک مجموعه آزمایشگاهی مناسب به‌منظور به دست آوردن منحنی‌های پسماند مغناطیسی ترفنل-دی شامل چرخه‌های بزرگ و کوچک در مقادیر مختلف فرکانس، شدت میدان مغناطیسی و پیش‌تنش مکانیکی استفاده شده و مقادیر افت توان ناشی از پسماند به‌صورت تحلیلی محاسبه شده‌اند. مجموعه مذکور به نحوی طراحی و ساخته شده است که کمترین میزان افت مغناطیسی و توانایی به اشباع رساندن نمونه ترفنل-دی را در شرایط مختلف کاری دارد. سپس مدل تجربی مبتنی بر روابط توانی با در نظر گرفتن سه متغیر فرکانس، شدت میدان مغناطیسی و پیش‌تنش مکانیکی پیشنهاد شده است که پیش‌بینی مقدار افت توان ناشی از پسماند را بدون نیاز به چرخه‌های پسماند مغناطیسی فراهم می‌سازد. با استفاده از مدل پیشنهاد شده می‌توان افت توان استاتیکی و دینامیکی را از هم تفکیک نمود و تأثیر فرکانس میدان مغناطیسی را بر هریک مشاهده کرد. نتایج حاصل از مدل تجربی مذکور در شرایط کاری جدید با نتایج حاصل از مدل تحلیلی مورد مقایسه و صحت‌سنجی قرار گرفته و خطای اندک محاسبه شده نشان‌دهنده دقت قابل قبول مدل تجربی می‌باشد.

۲- آزمایش‌های تجربی

هدف از انجام آزمایش‌های تجربی، مطالعه رفتار مغناطیسی ترفنل-دی از طریق به دست آوردن منحنی‌های پسماند آن

¹³ Ising model

¹⁴ Yamamoto

¹⁵ Jianbin

¹⁶ Jiles Atherton

شامل چرخه‌های بزرگ و کوچک در مقادیر مختلف فرکانس، شدت میدان مغناطیسی و پیش‌تنش مکانیکی می‌باشد. از آنجاکه هیچ‌یک از دستگاه‌های موجود و در دسترس، توانایی اندازه‌گیری و آزمایش بر نمونه مورد نظر ترفنل-دی را نداشتند، باید یک مجموعه آزمایشگاهی مناسب و دقیق طراحی می‌شد تا امکان انجام تست‌های مختلف در شرایط کاری شامل فرکانس و پیش‌تنش مکانیکی متفاوت را فراهم نماید. مهم‌ترین موضوع در طراحی مجموعه آزمایشگاهی، ساخت یک مدار مغناطیسی مناسب می‌باشد که دارای کمترین میزان افت مغناطیسی باشد و توانایی به اشباع رساندن ترفنل-دی را در فرکانس‌های مختلف داشته باشد. به همین دلیل ماده‌ای که برای بستن مدار مغناطیسی به کار برده می‌شود باید دارای خصوصیتی از جمله چگالی شار مغناطیسی اشباع بزرگ‌تر از ترفنل-دی، تراوایی مغناطیسی بسیار بزرگ‌تر از ترفنل-دی (کم کردن مقاومت مغناطیسی مدار)، سطح مقطع بزرگ‌تر از ترفنل-دی مورد آزمایش و دارا بودن خاصیت نرم مغناطیسی با کمترین مقدار افت هیستریزس باشد. برای این هدف، پرمالوی^{۱۷} به دلیل دارا بودن کمترین افت مغناطیسی، بیشترین تراوایی مغناطیسی در میان مواد در دسترس، انتخاب و به کار گرفته شد. بر اساس استاندارد ASTM A596/A596-M-96 و برای آزمایش هیستریزس مغناطیسی پرمالوی، دو نمونه شاهد حلقه‌ای با ابعاد قطر بیرونی ۲۶، قطر درونی ۲۲ و ضخامت ۲ میلی‌متر ساخته شده است. یکی از نمونه‌های شاهد به منظور آزمایش منحنی هیستریزس بدون عملیات حرارتی و دیگری بعد از عملیات حرارتی در نظر گرفته شده است. عملیات حرارتی به منظور افزایش تراوایی مغناطیسی پرمالوی، انجام می‌شود و از این قرار است [۱۹]: نمونه شاهد حلقه‌ای در کوره قرار گرفته و دمای کوره طی ۲۴ دقیقه با نرخ ۴۸/۹۵ °C/min به دمای ۱۲۰۰ °C رسیده و در همان دما به مدت چهار ساعت نگه داشته شده و سپس از همان دما به مدت ۱۶ ساعت با نرخ ۱/۲۲ °C/min به دمای اتاق می‌رسد.

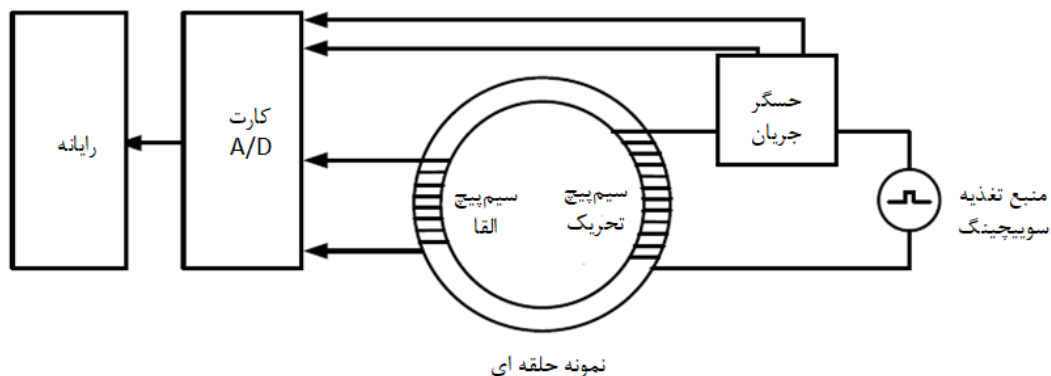
شماتیک آزمایش منحنی هیستریزس مغناطیسی در شکل ۱ نشان داده شده است. نمونه شاهد حلقه‌ای به دو سیم‌پیچ تحریک و القا نیاز دارد. مشخصات سیم‌پیچ تحریک و سیم‌پیچ القا در جدول ۱ ارائه شده است. در این آزمایش، از حسگر جریان الکتریکی ACS712ELCTR-05B-T با حساسیت ۱۸۵ mV/A با بازه اندازه‌گیری ± 5 A و خطی پذیری ۱/۵٪ در کل بازه استفاده شده است. شدت میدان مغناطیسی با جایگذاری جریان الکتریکی در رابطه ۱ به دست می‌آید:

$$H = NI/L \quad (1)$$

در رابطه ۱، (H) شدت میدان مغناطیسی، (N) تعداد دور سیم‌پیچ تحریک، (I) جریان گذرنده از سیم‌پیچ تحریک و (L) طول مسیر مغناطیسی یا همان محیط میانگین نمونه شاهد رینگی می‌باشد. چگالی شار مغناطیسی با استفاده از القای صورت گرفته در سیم‌پیچ القا و طبق قانون القای فارادی اندازه‌گیری می‌شود:

$$V = -N \frac{d\Phi}{dt} = -NA \frac{dB}{dt} \quad (2)$$

بایستی از ولتاژ القاشده به سیم‌پیچ نسبت به زمان انتگرال‌گیری شود تا چگالی شار مغناطیسی به دست آید. در رابطه ۲، (V) ولتاژ القاشده به سیم‌پیچ القا، (N) تعداد دور سیم‌پیچ القا و (A) مساحت بسته‌شده توسط سیم‌پیچ القا می‌باشد.



شکل ۱ شماتیک مجموعه آزمایشگاهی اندازه‌گیری پسماند پرمالوی

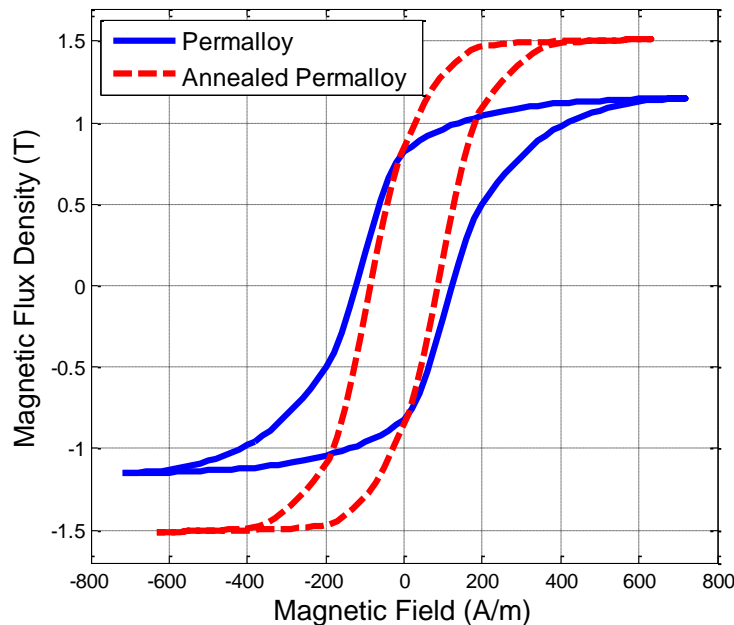
¹⁷ Permalloy

جدول ۱ مشخصات سیم‌پیچ تحریک و سیم‌پیچ القا

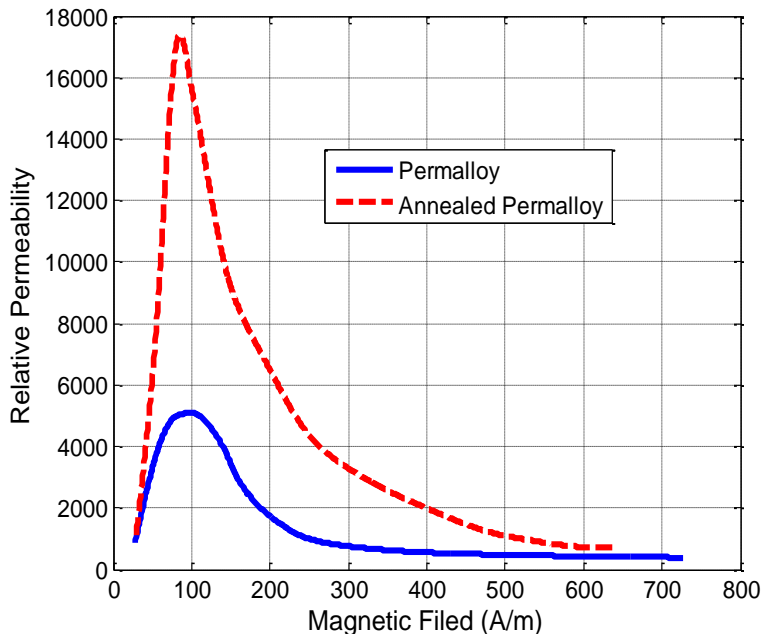
سیم‌پیچ تحریک	تعداد دور نوع سیم	۱۵ لاکی به قطر ۰/۴ میلی‌متر
سیم‌پیچ القا	تعداد دور نوع سیم مساحت بسته‌شده	۱۰ لاکی به قطر ۰/۲۵ میلی‌متر ۴/۵ میلی‌متر مربع

شکل ۲، چرخه هیستریزیس مغناطیسی اصلی دو نمونه شاهد را نمایش می‌دهد. همچنین شکل ۳، نفوذپذیری مغناطیسی نسبی این دو نمونه را در مقادیر مختلف میدان مغناطیسی اعمالی نمایش می‌دهد. همان‌گونه که گفته شد، در این نمودارها شدت میدان مغناطیسی با رابطه ۱ محاسبه شده است که در آن (I) شدت جریان گذرنده از سیم‌پیچ تحریک است و توسط حسگر جریان اندازه‌گیری می‌شود که دارای خطای حداکثر $\pm 1/5\%$ می‌باشد. خروجی این حسگر توسط کارت به رایانه انتقال می‌یابد و نویزهای آن در نرم‌افزار متلب فیلتر می‌شود. حداکثر نسبت دامنه نویز به دامنه سیگنال $\pm 1\%$ می‌باشد؛ بنابراین می‌توان گفت که مقادیر محاسبه شده برای شدت میدان مغناطیسی دارای حداکثر عدم قطعیتی برابر $\pm 2/5\%$ می‌باشد. همچنین چگالی شار مغناطیسی با انتگرال‌گیری از ولتاژ القایی بر روی سیم‌پیچ القا (رابطه ۲) محاسبه شده است. در این حالت حداکثر نسبت دامنه نویز به دامنه سیگنال $\pm 2\%$ و خطای انتگرال‌گیری عددی هم با توجه به فرکانس نمونه‌برداری کارت $\pm 1\%$ می‌باشد؛ بنابراین مقادیر محاسبه شده برای چگالی شار مغناطیسی دارای حداکثر عدم قطعیتی برابر $\pm 3\%$ می‌باشد.

با توجه به این دو نمودار، مشاهده می‌شود که پس از عملیات حرارتی پرمالوی، پهنای چرخه هیستریزیس کاهش و چگالی شار مغناطیسی اشباع گذرنده از آن حدود 59% افزایش داشته است. همچنین تراوایی مغناطیسی بیشینه پرمالوی عملیات حرارتی شده در مقایسه با پرمالوی اولیه بیش از $3/5$ برابر شده است؛ بنابراین استفاده از پرمالوی عملیات حرارتی شده موجب بهینه شدن خواص مغناطیسی مدار و در نتیجه اشباع کامل میله ترفنل-دی می‌شود. به همین دلیل قطعات پرمالوی به‌کاررفته در مجموعه آزمایشگاهی خواص مغناطیسی ترفنل-دی همگی عملیات حرارتی شده‌اند.



شکل ۲ چرخه‌های پسماند بزرگ پرمالوی



شکل ۳ نفوذپذیری مغناطیسی پرمالوی در میدان‌های مغناطیسی مختلف

۲-۱- مجموعه آزمایشگاهی بررسی پسماند مغناطیسی ترفنل-دی

از مدار مغناطیسی ساخته‌شده با پرمالوی به‌منظور به دست آوردن منحنی‌های پسماند مغناطیسی ترفنل-دی در شرایط مختلف استفاده شده است. به همین منظور از یک مجموعه آزمایشگاهی همانند آنچه در شکل ۴ نمایش داده شده، بهره‌برده شده است.

این مجموعه آزمایشگاهی علاوه بر مدار مغناطیسی ساخته‌شده، دارای اجزای زیر نیز می‌باشند:

- ۱- لودسل^{۱۸}: به دلیل این‌که آزمایش پسماند مغناطیسی ترفنل-دی بایستی تحت پیش‌بارهای مکانیکی مختلف انجام شود، نیاز به یک لودسل مرجع و دقیق می‌باشد. در این مقاله لودسل یو اس یونیورسال ایمپکس^{۱۹} مورد استفاده قرار گرفته است. لودسل فوق دارای پسماند و خطی‌پذیری ۰/۰۲٪ کل بازه، حساسیت ۳۳/۲۹۸ mV و بازه اندازه‌گیری ۱۰۰ kgf می‌باشد.
- ۲- منبع تغذیه AC (Gwinstek APA-9201): این منبع قادر به تولید ولتاژ سینوسی تا فرکانس ۵۰۰ هرتز و توان ۱ کیلووات می‌باشد.
- ۳- سیم‌پیچ تحریک: برای ایجاد میدان مغناطیسی محوری لازم از یک سیم‌پیچ استفاده شده است. این سیم‌پیچ از ۶۰۰ دور سیم به ضخامت ۱ میلی‌متر ساخته شده است و توانایی عبور ۱۰ آمپر را دارا می‌باشد.
- ۴- سنسور اثر هال^{۲۰}: جهت اندازه‌گیری شدت میدان مغناطیسی اعمالی از سنسور هال CYSJ119 استفاده شده است. این سنسور قابلیت اندازه‌گیری خطی در محدوده ۰-۳۰۰ mT دارد و حساسیت آن در دمای محیط ۱/۳۳ V/T می‌باشد. با توجه به استاندارد، این حسگر باید در محدوده‌ای نزدیک به وسط ارتفاع ترفنل-دی نصب شود. خروجی این حسگر توسط کارت به رایانه انتقال می‌یابد و نویزهای آن در نرم‌افزار متلب فیلتر می‌شود. حداکثر نسبت دامنه نویز به دامنه سیگنال ۱/۵٪± می‌باشد.

¹⁸ Loadcell

¹⁹ US Universal Impex

²⁰ Hall effect sensor

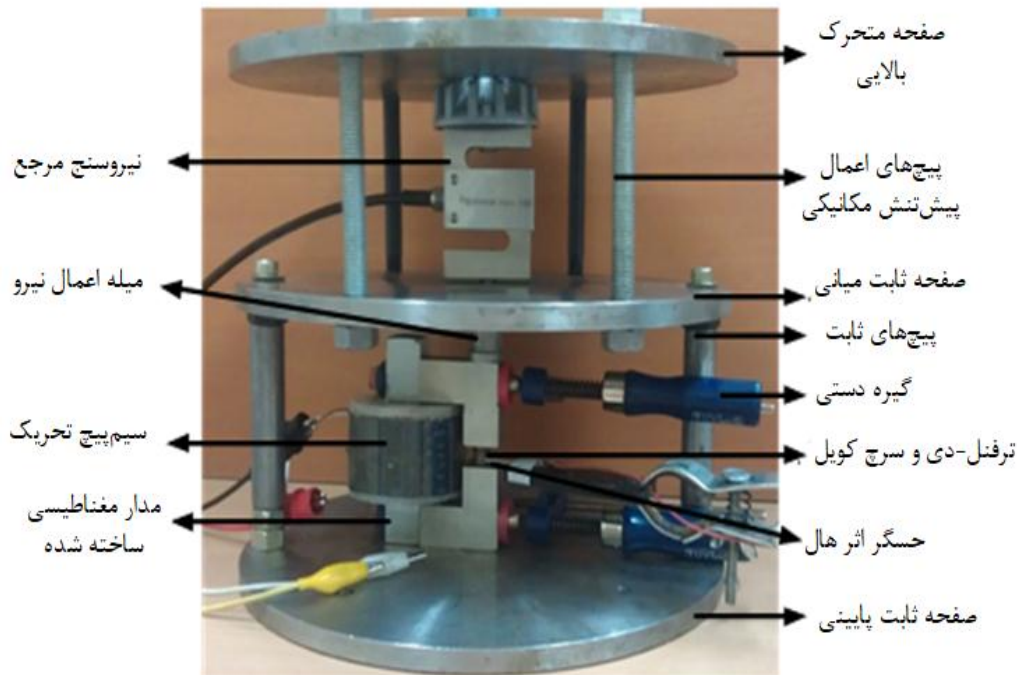
۵- سیم پیچ القا: چگالی شار مغناطیسی گذرنده از ترفنل-دی به وسیله سیم پیچ پیچیده شده به دور ترفنل-دی اندازه گیری می شود. برای بالا بردن پاسخ زمانی این سیم پیچ از سیم با قطر ۰/۱۵ میلی متر و تعداد ۵ دور استفاده شده است. با توجه به قانون فارادی و مشابه رابطه ۲، می توان با انتگرال گیری از ولتاژ القا شده بر روی سیم پیچ القا، شار مغناطیسی گذرنده را محاسبه نمود.

۶- کارت A/D: برای ارسال سیگنال های خروجی سیم پیچ القا و سنسور هال به کامپیوتر از کارت A/D استفاده شده است.

آزمایش ها به منظور به دست آوردن منحنی های پسماند مغناطیسی ترفنل-دی در پنج مقدار فرکانس (۷، ۴۵، ۷۵، ۱۵۰ و ۲۰۰ هرتز)، سه مقدار از پیک شدت میدان مغناطیسی (۲۰، ۵۰ و ۹۳ کیلو آمپر بر متر) و چهار مقدار از پیش تنش مکانیکی (۰، ۳/۱۲، ۶/۲۴ و ۹/۳۶ مگا پاسکال) انجام گرفته است. به بیان دیگر تعداد آزمایش ها شصت عدد بوده است. با محاسبه مقدار شدت میدان مغناطیسی و چگالی شار مغناطیسی از روی مقادیر خروجی هال سنسور و سیم پیچ القا، می توان نمودارهای پسماند مغناطیسی ترفنل-دی را رسم نمود.

۲-۲- چرخه های پسماند بزرگ و کوچک

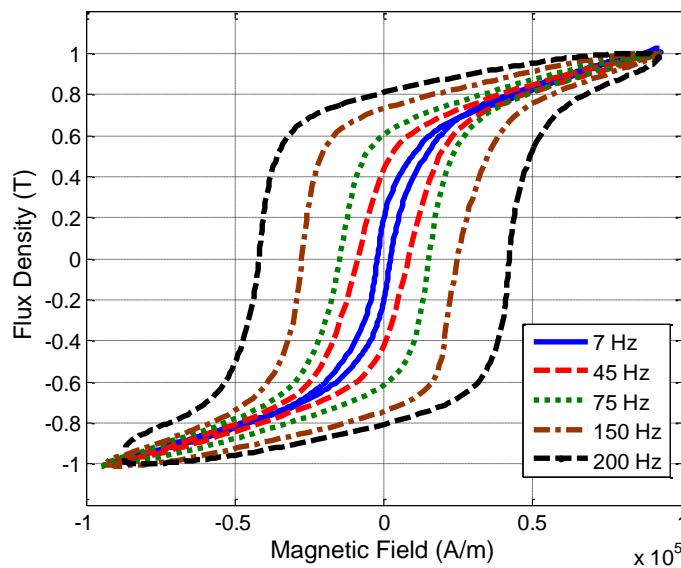
نمودارهای نشان داده شده در شکل ۵ چرخه های بزرگ پسماند مغناطیسی ترفنل-دی را در پنج فرکانس مختلف و در پیش تنش مکانیکی صفر نمایش می دهد. همان طور که مشاهده می شود در این نمودارها با افزایش فرکانس، چگالی شار مغناطیسی گذرنده از ترفنل-دی به ازای یک مقدار مشخص از شدت میدان مغناطیسی کاهش می یابد. همچنین نمودارها پهن تر شده و سطح محصور داخل این نمودارها افزایش می یابد. این اتفاق به علت افزایش تأخیر بین شدت میدان مغناطیسی و شار مغناطیسی گذرنده از ترفنل-دی در فرکانس های بالاتر رخ می دهد. وابستگی پسماند مغناطیسی ترفنل-دی به فرکانس و پیک میدان مغناطیسی گذرنده از آن، موجب غیرخطی شدن رفتار مکانیکی محرکه ها و حسگرها و دشواری پیش بینی و کنترل این رفتار می شود. در محرکه های ترفنل-دی، پسماند مغناطیسی بر خروجی این محرکه ها شامل جابجایی و نیرو تأثیر می گذارند و بازده مکانیکی محرکه را کاهش می دهند. در حسگرها، پسماند مغناطیسی موجب ایجاد خطا و کاهش دقت حسگر می شود و محدوده اندازه گیری خطی حسگر را کوچک تر می کند.



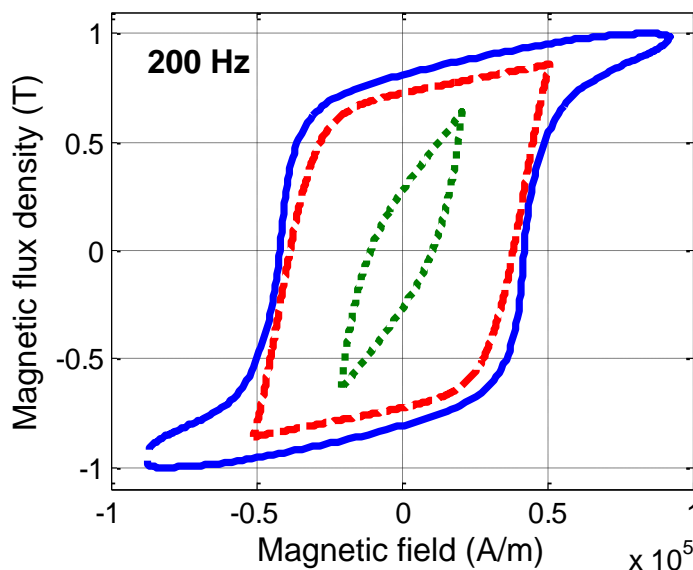
شکل ۴ مجموعه آزمایشگاهی جهت مطالعه پسماند مغناطیسی ترفنل-دی

در هر فرکانس، علاوه بر چرخه های پسماند مغناطیسی بزرگ، چرخه های پسماند کوچک نیز به ازای دو مقدار چگالی شار

مغناطیسی ماکزیمم (کوچک‌تر از ۱ تسلا) به دست آورده شده است. شکل ۶ این نمودارها را در فرکانس ۲۰۰ هرتز و در پیش‌تنش مکانیکی صفر نمایش می‌دهد.



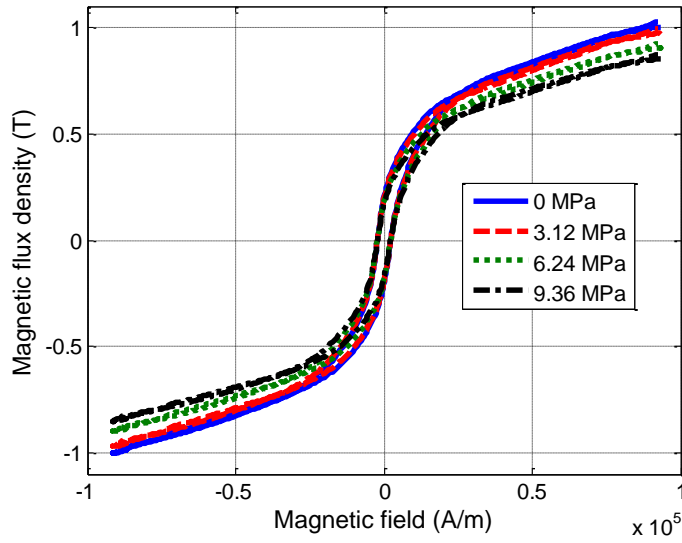
شکل ۵ چرخه‌های پسماند بزرگ تر فنل-دی در فرکانس‌های مختلف و پیش‌تنش مکانیکی صفر



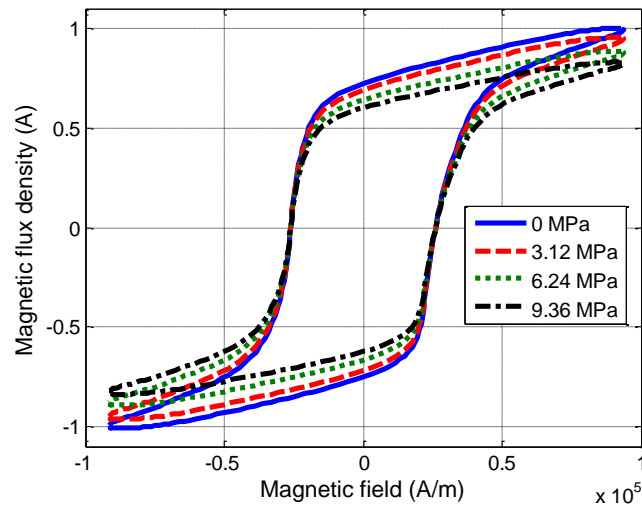
شکل ۶ چرخه‌های هیستریزس بزرگ و کوچک تر فنل-دی در فرکانس ۲۰۰ هرتز و پیش‌تنش صفر مگاپاسکال

۲-۳- تأثیر پیش‌تنش فشاری بر پسماند مغناطیسی تر فنل-دی

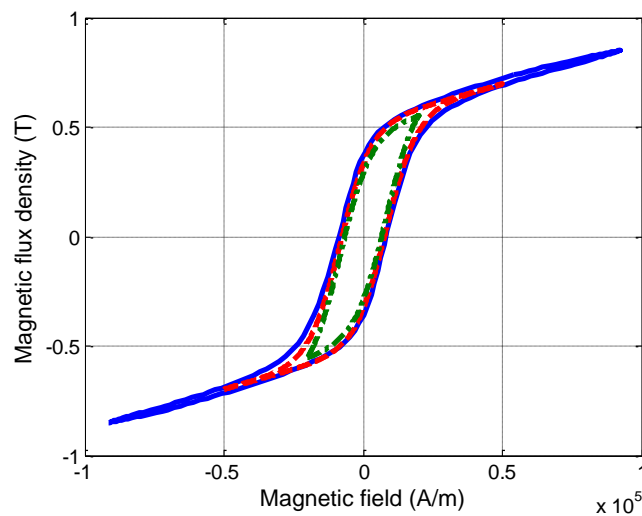
تأثیر اعمال پیش‌تنش فشاری بر منحنی‌های پسماند تر فنل-دی در شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده شده است. در این نمودارها، چرخه‌های پسماند بزرگ تر فنل-دی در دو فرکانس ۷ و ۱۵۰ هرتز و تحت مقادیر متفاوت پیش‌تنش فشاری نمایش داده شده‌اند. با افزایش پیش‌تنش فشاری، شیب منحنی پسماند و مقدار اشباع چگالی شار مغناطیسی کاهش می‌یابد. علاوه بر چرخه‌های بزرگ پسماند، چرخه‌های کوچک نیز در هر فرکانس و پیش‌تنش فشاری به دست آمده‌اند. شکل‌های ۹ و ۱۰ چرخه‌های کوچک و بزرگ تر فنل-دی را در (۴۵ هرتز و ۹/۳۶ مگاپاسکال) و (۷۵ هرتز و ۶/۲۴ مگاپاسکال) نشان می‌دهند.



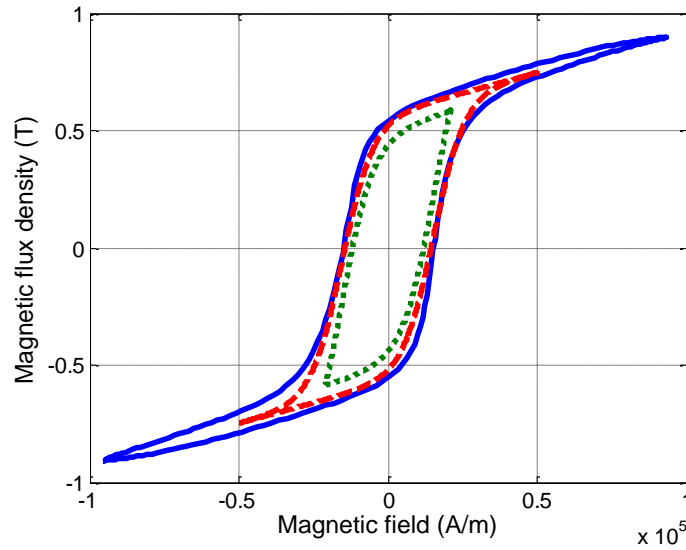
شکل ۷. چرخه‌های بزرگ پسماند ترنفل-دی در فرکانس ۷ هرتز به ازای مقادیر مختلف پیش‌تنش مکانیکی



شکل ۸. چرخه‌های بزرگ پسماند ترنفل-دی در فرکانس ۱۵۰ هرتز به ازای مقادیر مختلف پیش‌تنش مکانیکی



شکل ۹. چرخه‌های بزرگ و کوچک هیستریزیس ترنفل-دی در فرکانس ۴۵ هرتز و پیش‌تنش ۹/۳۶ مگاپاسکال



شکل ۱۰ چرخه‌های بزرگ و کوچک هیستریزس ترفنل-دی در فرکانس ۷۵ هرتز و پیش‌تنش ۶/۲۴ مگاپاسکال

۳- نتایج

مساحت محصورشده توسط نمودار B-H در هر فرکانس نشان‌دهنده انرژی اتلافی ناشی از پسماند در واحد حجم ماده مغناطیسی می‌باشد؛ بنابراین توان اتلافی ناشی از پسماند مغناطیسی را در نمونه ترفنل-دی مورد آزمایش می‌توان از رابطه زیر به دست آورد:

$$P_{hys} = Vf \int H \cdot dB \quad (3)$$

در این رابطه V حجم نمونه مورد آزمایش و f فرکانس میدان مغناطیسی است. با استفاده از رابطه ۳، افت توان پسماند در مقادیر مختلف فرکانس، پیش‌تنش مکانیکی و ماکزیمم میدان مغناطیسی در هر چرخه پسماند، آورده شده است که در شکل‌های ۱۱ تا ۱۳ نمایش داده شده است. شکل ۱۱ نشان می‌دهد که با افزایش فرکانس در یک مقدار ثابت از شدت میدان مغناطیسی، توان اتلافی ناشی از پسماند افزایش می‌یابد و همان‌گونه که مشخص است در هر مقدار مشخص از فرکانس، افزایش پیش‌تنش مکانیکی منجر به کاهش توان اتلافی ناشی از پسماند می‌شود. همچنین همان‌گونه که از شکل ۱۲ برمی‌آید، افزایش فرکانس میدان مغناطیسی و مقدار ماکزیمم شدت میدان مغناطیسی در یک پیش‌تنش مشخص (صفر مگاپاسکال) منجر به افزایش توان اتلافی ناشی از پسماند می‌شود. شکل ۱۳ نیز نشان می‌دهد که افزایش پیش‌تنش مکانیکی در یک فرکانس مشخص، موجب کاهش توان اتلافی می‌شود. به‌صورت کلی، افت ناشی از پسماند مغناطیسی را می‌توان مجموع افت پسماند استاتیکی و افت پسماند دینامیکی دانست؛ که اولی ناشی از افزایش فرکانس میدان تحریک (کم شدن زمان هر چرخه و بالطبع افزایش توان اتلافی) و دومی ناشی از عریض‌تر شدن چرخه پسماند با افزایش فرکانس می‌باشد.

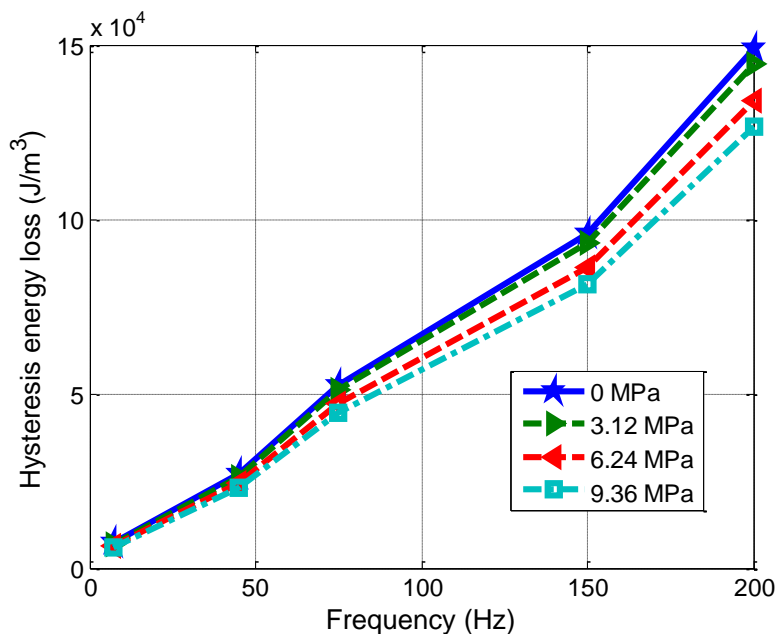
با توجه به این‌که چرخه‌های پسماند ترفنل-دی تا فرکانس ۱۰ هرتز دچار تغییر چندانی نمی‌شود، بنابراین می‌توان اتلاف توان ناشی از پسماند را در این فرکانس‌ها فقط ناشی از اتلاف استاتیکی پسماند دانست. در فرکانس‌های بزرگ‌تر از ده هرتز، اتلاف دینامیکی پسماند مغناطیسی نیز به وجود می‌آید که سهم بسیار بزرگ‌تری از کل اتلاف پسماند را در اختیار می‌گیرد. با توجه به مطالب گفته‌شده و در نظر گرفتن این‌که اتلاف استاتیکی با فرکانس رابطه خطی دارد، می‌توان نتایج به‌دست‌آمده را با تقریب بسیار خوبی با رابطه ۴ بیان کرد:

$$P_{hys} = P_{static} + P_{dynamic} \\ = (20.131)f^{1.031}H_p^{1.331}P^{-0.0696} + (0.2235)f^{2.264}H_p^{1.317}P^{-0.0687} \text{ W/m}^3 \quad (4)$$

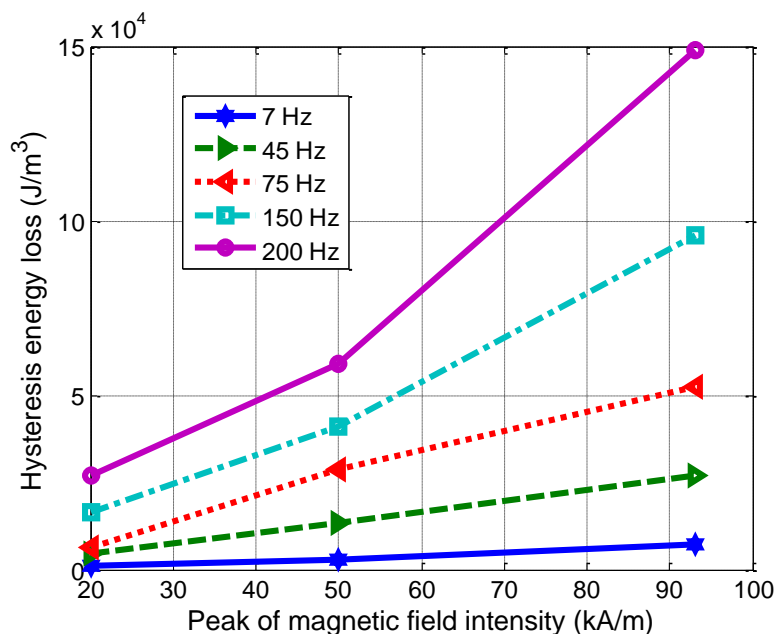
رابطه ۴ نشان‌دهنده آن است که توان اتلافی استاتیکی و دینامیکی پسماند با توان ۱/۰۳۱ و ۲/۲۶۴ از فرکانس، توان ۰/۰۶۹۶ و ۰/۰۶۸۷ از پیش‌تنش و توان ۱/۳۳۱ و ۱/۳۱۷ از ماکزیمم شدت میدان مغناطیسی، متناسب هستند. همچنین می‌توان توان اتلاف کلی را به صورت مستقیم به صورت تابعی از فرکانس، پیش‌تنش و ماکزیمم شدت میدان مغناطیسی بیان کرد:

$$P_{hys} = (0.448)f^{2.275}H_p^{1.313}P^{-0.0684} \quad W/m^3 \quad (۵)$$

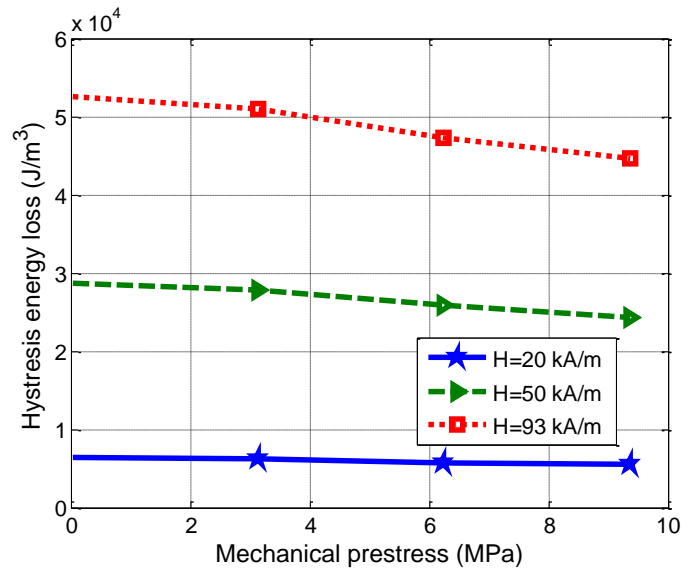
با مقایسه دو رابطه ۴ و ۵ می‌توان دریافت که افت کلی پسماند عمدتاً ناشی از افت دینامیکی پسماند می‌باشد، چراکه توان فرکانس در دو رابطه تقریباً برابر هستند.



شکل ۱۱ چگالی انرژی اتلافی هیستریزس به ازای فرکانس در شدت میدان مغناطیسی ۹۳ کیلوآمپر بر متر



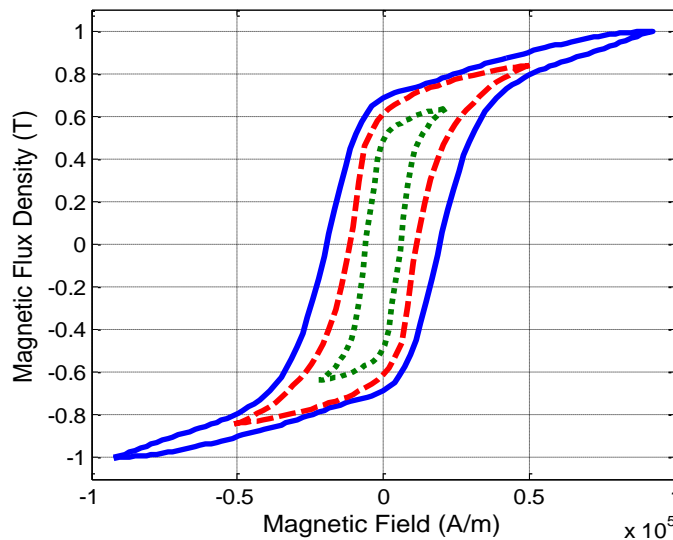
شکل ۱۲ چگالی انرژی اتلافی هیستریزس به ازای شدت میدان مغناطیسی ماکزیمم در پیش‌تنش صفر مگاپاسکال



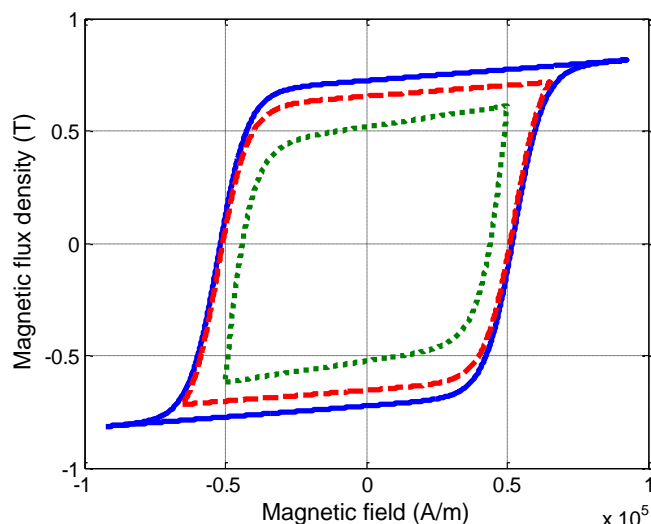
شکل ۱۳ چگالی انرژی اتلاfi هیستریزیس به ازای پیش‌تنش فشاری در فرکانس ۷۵ هرتز

۴- اعتبارسنجی مدل

برای اعتبارسنجی رابطه تجربی ۵ در شرایط کاری متفاوت و جدید، ابتدا نمودارهای پسماند ترفنل-دی برای دو حالت (فرکانس ۱۰۰ هرتز و پیش‌تنش صفر) و (۳۰۰ هرتز و پیش‌تنش ۱۲/۴۸ مگاپاسکال) مشابه شکل ۱۴ و ۱۵ به صورت تجربی به دست آورده شده‌اند. در حالت اول، فرکانس میدان مغناطیسی در بازه آزمایش‌های اولیه (۰-۲۰۰ هرتز) می‌باشد و پیش‌تنش مکانیکی انتخاب شده برای این حالت نیز در محدوده آزمایش‌های اولیه در نظر گرفته شده است؛ اما مشخصات آزمایش‌های حالت دوم (فرکانس ۳۰۰ هرتز و پیش‌تنش ۱۲/۴۸ مگاپاسکال) خارج از بازه فرکانسی و پیش‌تنش مکانیکی آزمایش‌های اولیه انتخاب شده است. سپس با استفاده از رابطه تحلیلی ۳ و جایگذاری اطلاعات مربوط به نمودارهای پسماند، مقادیر توان اتلاfi پسماند محاسبه شدند. توان‌های اتلاfi نام‌برده همچنین با استفاده از رابطه تجربی ۵ محاسبه شدند. جدول ۲، مقادیر فوق‌الذکر و مقدار خطای موجود در رابطه تجربی به دست آمده را نشان می‌دهد. میانگین خطا برای حالت اول ۳/۹٪ و برای حالت دوم ۵٪ می‌باشد.



شکل ۱۴ چرخه‌های پسماند بزرگ و کوچک ترفنل-دی در فرکانس ۱۰۰ هرتز و پیش‌تنش صفر



شکل ۱۵ چرخه‌های پسماند بزرگ و کوچک ترفنل-دی در فرکانس ۳۰۰ هرتز و پیش‌تنش ۱۲/۴۸ مگاپاسکال

جدول ۲ نتایج تحلیلی و تجربی توان اتلافی پسماند مغناطیسی ترفنل-دی

توان اتلافی پسماند (وات)		ماکزیمم شدت میدان مغناطیسی		فرکانس
خطا (%)	رابطه تجربی	رابطه تحلیلی	میدان مغناطیسی	
۴/۲	۱/۱۵۱	۱/۲۰۲	۲۱	فرکانس ۱۰۰ هرتز و پیش‌تنش صفر
۳/۱	۳/۳۵۹	۳/۳۶۱	۵۰	
۴/۵	۶/۹۱۵	۶/۶۱۴	۹۳	
۷/۱	۳۱/۳۵۶	۳۳/۷۶۱	۵۰	فرکانس ۳۰۰ هرتز و پیش‌تنش ۱۲/۴۸ مگاپاسکال
۳/۲	۴۴/۲۵۵	۴۲/۸۹۵	۶۵	
۴/۸	۷۰/۸۳۸	۶۷/۶۱۴	۹۳	

۵- نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر، افت ناشی از پسماند مغناطیسی در ماده دگررسان مغناطیسی ترفنل-دی مورد مطالعه تجربی و مدل‌سازی قرار گرفت. در ابتدا یک مجموعه آزمایشگاهی مناسب طراحی گردید تا امکان مطالعه تجربی نمودارهای بزرگ و کوچک پسماند مغناطیسی ترفنل-دی در شرایط کاری مختلف از قبیل فرکانس و شدت میدان مغناطیسی و پیش‌تنش مکانیکی (۶۰ حالت مختلف) فراهم شود. مزیت اصلی مجموعه آزمایشگاهی مذکور، دقت آن در اندازه‌گیری پارامترهای اصلی آزمایش‌هاست به نحوی که بیشترین خطا در مقادیر اندازه‌گیری شده شدت میدان مغناطیسی $\pm 2/5\%$ و چگالی شار مغناطیسی $\pm 2\%$ می‌باشد. سپس مقدار افت توان ناشی از هیستریزیس با توجه به نمودارهای پسماند به‌دست‌آمده، محاسبه گردیدند. نتایج نشان‌دهنده آن است که افزایش ماکزیمم شدت میدان مغناطیسی، افزایش فرکانس میدان مغناطیسی و کاهش پیش‌تنش مکانیکی منجر به افزایش افت توان پسماند می‌گردد. به‌منظور تعیین سهم هر یک از پارامترهای فوق‌الذکر، یک مدل تجربی مبتنی بر پارامترهای توانی بر روی نتایج اعمال گردید که نشان‌دهنده آن است که توان اتلافی استاتیکی و دینامیکی پسماند به ترتیب با توان $1/031$ و $2/264$ از فرکانس، $-0/0696$ و $-0/0687$ از پیش‌تنش و $1/331$ و $1/317$ از ماکزیمم شدت میدان مغناطیسی، متناسب هستند. به‌منظور صحت سنجی مدل ارائه‌شده، دقت آن در پیش‌بینی مقدار افت توان در شرایط کاری جدید مورد ارزیابی قرار گرفت و خطای مدل در مقایسه با مدل تحلیلی افت توان محاسبه گردید. نتایج نشان‌دهنده آن است که مدل تجربی می‌تواند با دقت قابل قبولی (حداکثر خطای $0/5\%$) مقدار افت توان ناشی از پسماند را در بازه فرکانسی $0-300$ هرتز، پیش‌تنش مکانیکی $0-12/48$ مگاپاسکال و برای منحنی‌های بزرگ و کوچک پسماند پیش‌بینی نماید. علاوه بر این، مزیت مهم این مدل آن است که به داده‌های تجربی (منحنی‌های پسماند مغناطیسی) برای محاسبه افت توان نیازی ندارد و تنها با دانستن مقادیر فرکانس، ماکزیمم شدت میدان مغناطیسی و پیش‌تنش مکانیکی اعمالی، پیش‌بینی افت توان پسماند میسر می‌گردد.

۶- مراجع

- [1] Bhattacharya B. Terfenol and Galfenols: Smart magnetostrictive metals for intelligent transduction. *Dir Mag (Indian Inst od Technol Kanpur)*. 2005;7:35-40.
- [2] Goodfriend M J, Shoop K M. Adaptive characteristics of the magnetostrictive alloy, Terfenol-D, for active vibration control. *Journal of intelligent material systems and structures*. 1992;3:245-254.
- [3] Karunanidhi S, Singaperumal M. Design, analysis and simulation of magnetostrictive actuator and its application to high dynamic servo valve. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2010;157:185-197.
- [4] Ghodsi M, Hosseinzadeh N, Özer A, Dizaj H R, Hojjat Y, Varzeghani N G, Sheykhosslami M R, Talebian S, Ghodsi M H, Al-Yahmadi A. Development of gasoline direct injector using giant magnetostrictive materials. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2016;53:521-529.
- [5] Kellogg R A, Flatau A B. Blocked force investigation of a Terfenol-D transducer. In 1999 Symposium on Smart Structures and Materials. 1999;3668;184-195.
- [6] Bertotti G. General properties of power losses in soft ferromagnetic materials. *IEEE Transactions on magnetics*. 1988;24:621-630.
- [7] He Y L, Wang G C. Observation of dynamic scaling of magnetic hysteresis in ultrathin ferromagnetic Fe/Au (001) films. *Physical review letters*. 1993;70:2336-2339.
- [8] Jiang Q, Yang H N, Wang G C. Scaling and dynamics of low-frequency hysteresis loops in ultrathin Co films on a Cu (001) surface. *Physical Review B*. 1995;52:14911.
- [9] Suen J-S, Erskine J L. Magnetic hysteresis dynamics: thin p (1× 1) Fe films on flat and stepped W (110). *Physical review letters*. 1997;78:3567.
- [10] Fan Z, Jinxiu Z, Xiao L. Scaling of hysteresis in the Ising model and cell-dynamical systems in a linearly varying external field. *Physical Review E*. 1995;52:1399.
- [11] Acharyya M, Chakrabarti B K. Monte Carlo study of hysteretic response and relaxation in Ising models. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 1993;192:471-485.
- [12] Luse C N, Zangwill A. Discontinuous scaling of hysteresis losses. *Physical Review E*. 1994;50:224.
- [13] Zhong F, Zhang J X, Siu G G. Dynamic scaling of hysteresis in a linearly driven system. *Journal of Physics: Condensed Matter*. 1994;6:7785.
- [14] Pluta W A. Some properties of factors of specific total loss components in electrical steel. *IEEE Transactions on magnetics*. 2010;46:322-325.
- [15] Chen Y, Pillay P. An improved formula for lamination core loss calculations in machines operating with high frequency and high flux density excitation. In 37th IAS Annual Meeting (Cat No02CH37344). 2002;2;759-766.
- [16] Yamamoto K-i, Nakano H, Yamashiro Y. Effect of compressive stress on hysteresis loss of Terfenol-D. *Journal of magnetism and magnetic materials*. 2003;254:222-224.
- [17] Zeng J, Zeng H, Bai B, Yan M. Calculation of hysteresis losses for Terfenol-D ultrasonic transducer. In Second International Conference on Smart Materials and Nanotechnology in Engineering. 2009;7493;749369.
- [18] Huang W, Gao C, Li Y, Wang B. Experimental and calculating analysis of high-frequency magnetic energy losses for Terfenol-D magnetostrictive material. *IEEE Transactions on magnetics*. 2018;54:1-4.
- [19] Bozorth R M. *Ferromagnetism*. 1993.