



مطالعه آزمایشگاهی و مدل‌سازی نیروی مسدود عملگر ترفنل-دی

سهیل طالبیان^{۱*}

استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۰۳؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۱۲/۰۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۲۵

چکیده

ترفنل-دی به دلیل توانایی اعمال نیروهای بزرگ در دامنه فرکانسی وسیع، کاربرد بسیاری در عملگرهای دگرسان مغناطیسی دارد. وابستگی ضرایب ساختاری ماده به میدان مغناطیسی و افت انرژی مغناطیسی، پیش‌بینی نیروی خروجی عملگر را پیچیده می‌سازد. در این مقاله، یک مدل تجربی-تئوری جهت پیش‌بینی نیروی مسدود عملگر ترفنل-دی در شرایط مختلف کاری پیشنهاد شده است. در ابتدا یک مدل خطی در میدان مغناطیسی مستقیم و سپس یک مدل بهبودیافته با معرفی ضریب بازده انرژی در میدان مغناطیسی متناوب ارائه شده است. ضریب مذکور با استفاده از روابط تجربی مربوط به توان‌های اتلافی پسماند، جریان‌های گردابه‌ای و اضافی به دست آمده است. به منظور استخراج ضرایب عملکردی در مدل پیشنهادی، رفتار تنش-کرنش ترفنل-دی با استفاده از یک مجموعه آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار گرفته و یک رابطه تجربی جهت پیش‌بینی این ضرایب در مقادیر مختلف میدان مغناطیسی به دست آورده شده است. مدل پیشنهادی شامل روابط توانی از دو کمیت شدت و فرکانس جریان الکتریکی عملگر است که محاسبه نیروی مسدود آن را در بازه فرکانسی ۰-۴۰۰ هرتز مقدور می‌سازد. نتایج مدل‌سازی با نتایج تجربی مورد مقایسه قرار گرفته و خطاهای کم مشاهده شده، صحت مدل را نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی: دگرسانی مغناطیسی، عملگر ترفنل-دی، نیروی مسدود عملگر، توان اتلافی هیستریزس، توان اتلافی جریان‌های گردابه‌ای، توان اتلافی اضافی

Experimental Study and Modelling of the Blocked Force of Terfenol-D Actuator

Soheil Talebian^{1*}¹Assistance Professor, Mechanical Engineering Department, Razi University, Kermanshah, Iran

Abstract

Terfenol-D is widely used in magnetostrictive actuators due to capability of applying mechanical forces in large values of magnitude and frequency. Dependency of structural coefficients of Terfenol-D on magnetic field intensity and losses of magnetic energy make it complicated to predict the value of actuator's output force. In this paper, an experimental-theoretical model is presented to predict blocked force of the actuator at different operational conditions. Initially, a linear model for DC magnetic field and an improved model introducing an energy efficiency coefficient for AC magnetic field are proposed. The energy efficiency coefficient is obtained based on experimental power relations for hysteresis, eddy currents and excess power losses. An experimental setup is used to obtain stress-strain behavior of the actuator to extract the structural coefficients of the proposed model and an experimental relation is governed to predict the coefficients at different values of magnetic field. The proposed model contains power relations of amplitude and frequency of electrical current passing through the actuator which makes it possible to calculate blocked force at frequency range of 0-400 Hz. Obtained results of the model are validated by comparing to experimental results and the small values of errors show the model's precision.

Keywords: magnetostriction, Terfenol-D actuator, blocked force of actuator, hysteresis power loss, eddy currents power loss, excess power loss

۱- مقدمه

به تغییر شکل ماده فرومغناطیس در اثر مغناطیس‌شدگی آن که عمدتاً بر اثر اعمال میدان مغناطیسی خارجی صورت می‌گیرد، دگرسانی مغناطیسی^۱ می‌گویند. این پدیده مرتبط با اثرات فیزیکی مختلفی است که از بین این اثرات، اثر ژول^۲ از همه پرکاربردتر است [۱]. اثر ژول، تغییر طول ماده دگرسان مغناطیسی در پاسخ به میدان مغناطیسی خارجی است و نتیجه آن، یک کرنش الاستیک است که در ساخت انواع عملگرها کاربرد دارد. ترفنل-دی^۳ آلیاژ آهن، تریبیوم و دسپرسیوم می‌باشد و نام آن از اول نام این عناصر و آزمایشگاه سازنده آن (ناوال اوردنانس)، گرفته شده است. هر سه عنصر پایه این آلیاژ، فرومغناطیس هستند و درصد آن‌ها در آلیاژ متفاوت است. یک مورد متداول آن $Tb_{0.3}D_{0.7}Fe_{1.9}$ است [۲]. ترفنل-دی، به دلیل ویژگی‌هایی همچون توانایی تغییر طول و اعمال نیروی زیاد (در مقایسه با سایر مواد هوشمند)، دمای کوری بالا، ضریب جفت‌شدگی بزرگ و نیز قابلیت استفاده در دامنه فرکانسی وسیع، کاربرد بسیاری در ساخت انواع عملگرها دارد. از این عملگرها در کنترل فعال ارتعاشات [۳]، شیرهای مغناطیسی [۴]، سوخت‌پاش‌ها [۵] و غیره استفاده می‌شود.

عملگرهایی که از ترفنل-دی استفاده می‌کنند، به دو دسته نیمه‌ایستا و دینامیک تقسیم بندی می‌شوند. از عملگرهای نیمه‌ایستا در فرکانس‌های پایین و متوسط (کمتر از ۲ کیلوهرتز) و به عنوان منبع اعمال نیرو یا جابجایی کنترل شده، استفاده می‌شود. به منظور مدل‌سازی رفتار این عملگرها از مدل‌های خطی یا غیر خطی مکانیکی-مغناطیسی استفاده می‌شود [۶]. عملگرهای دینامیک در فرکانس‌های شدید کار می‌کنند و دارای کرنش دینامیکی بالایی هستند و استفاده اصلی آن‌ها در عملگرهای توان بالاست. مدل‌سازی آنها عمدتاً شامل حل معادلات مربوط به انتشار موج است [۷]. در عملگرهای ترفنل-دی^۴ از دو مفهوم برای بررسی

خروجی یا بازده عملگر استفاده می‌شود. مفهوم اول نیرو یا تنش مسدود است که به بیشترین نیروی قابل حصول از ماده دگرسان مغناطیسی اطلاق می‌شود. نیرو یا تنش مسدود در حالتی رخ می‌دهد که ماده در حالت کاملاً محصور قرار گرفته باشد، به نحوی که امکان افزایش طول نداشته باشد. مفهوم دوم جابجایی آزاد یا کرنش اشباع است و عبارت از افزایش طول ماده بدون هیچ محدودیتی است [۸].

مدل‌سازی و پیش‌بینی نیروی مسدود عملگرهای ترفنل-دی با محدودیت‌هایی همراه است. مهم‌ترین عامل محدودکننده در فرکانس‌های کمتر از ۱۰ هرتز (که رفتار ماده مستقل از فرکانس میدان مغناطیسی است) [۹]، وابستگی ضرایب مکانیکی-مغناطیسی ماده به شدت میدان مغناطیسی و پیش‌تنش مکانیکی است. مطالعات انجام شده، نشان می‌دهد که ضرایب دگرسانی مغناطیسی، انطباق الاستیکی و تراوایی مغناطیسی ترفنل-دی، مقادیر ثابتی ندارند و تابع شدت میدان مغناطیسی و پیش‌تنش مکانیکی اعمالی هستند. ضریب دگرسانی مغناطیسی^۵ معیاری است که می‌توان با آن در مورد کارایی ماده قضاوت کرد و بیانگر ارتباط بین کرنش خروجی با شدت میدان مغناطیسی اعمالی است. همچنین ضریب انطباق الاستیکی میزان نرمی یا سختی ترفنل-دی را در هنگام اعمال تنش‌های مکانیکی نشان می‌دهد و تراوایی مغناطیسی نیز بیانگر توانایی عبوردهی مغناطیسی در ماده است که در دو حالت آزاد و محصور اندازه‌گیری می‌شود. سان و همکاران، مدلی برای رفتار ترفنل-دی و علی‌الخصوص پیش‌بینی کرنش آزاد آن در مقادیر مختلف پیش‌تنش مکانیکی و میدان مغناطیسی اولیه^۶ پیشنهاد داده‌اند که در این مدل‌سازی تنها از ضریب دگرسانی مغناطیسی استفاده شده و سایر ضرایب در نظر گرفته نشده‌اند [۱۰]. فلاتو و همکاران با انجام آزمایش‌های تجربی، به بررسی آماری ضرایب ساختاری ترفنل-دی در ۵۰ نمونه با ترکیبات شیمیایی متفاوت پرداخته‌اند. این مطالعه ماهیت تجربی-آماری داشته و به ارائه مدلی جهت پیش‌بینی ضرایب مذکور در مقادیر مختلف شدت میدان مغناطیسی نمی‌پردازد [۱۱]. ژانگ و همکاران، یک مدل غیرخطی مبتنی بر معادلات جفت

^۱ Magnetostriction^۲ Jule Effect^۳ Terfenol-D^۴ Naval Ordnance^۵ Currie Temperature^۶ Coupling Factor^۷ Magnetostrictive Actuators^۸ Magnetostriction Coefficient^۹ Bias magnetic field

فرکانس‌های پایین مورد بررسی قرار داده‌اند و به این نتیجه رسیده‌اند که با افزایش پیش‌تنش مکانیکی، افت توان ناشی از پسماند مغناطیسی کاهش می‌یابد [۱۴]. این تحقیق صرفاً جنبه تجربی داشته و مدلی برای تخمین مقدار افت توان شده پیشنهاد نشده‌است. جیانبین و همکارانش افت توان ناشی از پسماند را در یک عملگر ترنفل-دی مطالعه نموده‌اند و با استفاده از مدل جایلز-ترتون و روش حل اجزا محدود، مقدار افت توان را به دست آورده‌اند. از آنجا که ورودی مدل جایلز-ترتون، داده‌های کامل مربوط به هر چرخه مغناطیسی است، استفاده از این مدل در فرکانس‌های بالاتر منوط به در دست داشتن این داده‌ها در آن فرکانس است [۱۵]. هوآنگ و همکاران نیز انواع افت‌های توان در ترنفل-دی (پسماند و جریان گردابه‌ای) را به صورت تجربی مورد مطالعه قرار داده‌اند و در نهایت با استفاده از برازش خطی بر روی نتایج تجربی، مدل تجربی خود را ارائه داده‌اند [۱۶]. در مدل مربوطه اثرات پیش‌تنش مکانیکی مورد بررسی قرار نگرفته‌است. طالبیان و همکاران افت توان ناشی از پسماند در ترنفل-دی را به صورت تجربی در مقادیر مختلف فرکانس و شدت میدان مغناطیسی مطالعه کرده‌اند و روابط تجربی شامل عبارات توانی از کمیت‌های موثر بر اتلاف توان را ارائه داده‌اند [۱۷].

هنگامی که ترنفل-دی در معرض میدان مغناطیسی متغیر با زمان قرار می‌گیرد، در آن جریان‌های گردابه‌ای ایجاد می‌شود. جریان‌های گردابه‌ای با ایجاد یک میدان مغناطیسی در جهت مخالف با میدان تحریک، مانع عبور شار مغناطیسی شوند. جریان‌های گردابه‌ای باعث افت توان به صورت گرما می‌شوند که عامل مهمی در کاهش بازده عملگرهای دگرسان مغناطیسی خصوصاً در فرکانس‌های بالا است. روش تجربی برای اندازه‌گیری اتلاف توان ناشی از جریان‌های گردابه‌ای وجود ندارد و بدین منظور از معادلات الکترومغناطیس استفاده می‌شود [۱۸]. صرف‌نظر از روش به دست آوردن معادلات حاکم، فرضیاتی همچون همگن بودن ضریب تراوایی مغناطیسی، بسته شدن شار مغناطیسی در مسیرهای دایروی و یکنواخت بودن خطوط میدان داخل ماده، در تمامی روش‌ها وجود داشته‌اند [۱۹]. در بیشتر مطالعات انجام‌شده در عملگرهای دگرسان مغناطیسی، اثر جریان‌های گردابه‌ای با افزودن یک مقاومت معادل به مدار

شده مکانیکی-مغناطیسی جهت پیش‌بینی منحنی‌های پسماند^۱ مکانیکی و مغناطیسی ماده در شرایط کاری مختلف پیشنهاد داده‌اند. آن‌ها یک رابطه تحلیلی برای تراوایی مغناطیسی ماده به دست آورده و به صورت تجربی مورد صحت سنجی قرار داده‌اند، اگر چه راجع به ضرایب دیگر ماده تحلیلی انجام نشده‌است [۱۲]. دامنجود و همکاران یک مجموعه آزمایشگاهی ابتکاری جهت بررسی خواص ترنفل-دی تحت پیش‌تنش مکانیکی ساخته و کرنش خروجی ماده را به دست آورده‌اند. آزمایش‌ها به گونه‌ای طراحی شده‌اند که مقادیر تنش و میدان مغناطیسی در حین آزمایش تغییر نکنند. در این پژوهش، مدلی جهت تبیین رفتار ماده و وابستگی کمیت‌های خروجی به کمیت‌های ورودی ارائه نشده‌است [۱۳]. با این که در تحقیقات فوق به وابستگی خصوصیات ذاتی ترنفل-دی (از قبیل ضریب دگرسان مغناطیسی و ضریب انطباق الاستیکی) به مقادیر تنش و شدت میدان مغناطیسی اشاره شده‌است، اما این تحقیقات صرفاً جنبه کیفی داشته و به چگونگی این تغییرات، کمی‌سازی و ارائه مدلی جهت پیش‌بینی مقدار این ضرایب اشاره نشده‌است.

در فرکانس‌های بالاتر از ۱۰ هرتز که رفتار مغناطیسی ماده وابسته به فرکانس است، مهمترین عامل موثر بر مدل‌سازی رفتار عملگر، افت‌های ایجاد شده در انرژی مغناطیسی منتقل شده به ترنفل-دی است. افت توان مغناطیسی در ترنفل-دی را می‌توان ناشی از توان اتلافی پسماند^۲، توان اتلافی جریان گردابه‌ای^۳ و توان اتلافی اضافی^۴ دانست. ترنفل-دی همانند همه مواد فرومغناطیس دارای پسماند مغناطیسی است که به علت حرکت و چرخش حوزه‌های مغناطیسی میکروسکوپی ماده حین فرایند مغناطیس‌شوندگی رخ می‌دهد. با افزایش فرکانس میدان مغناطیسی خارجی، افت ناشی از پسماند مغناطیسی به علت کم شدن زمان هر چرخه و نیز عریض‌تر شدن چرخه پسماند افزایش می‌یابد. یاماموتو و همکارانش تاثیر پیش‌تنش مکانیکی بر افت توان ناشی از پسماند ترنفل-دی را در

^۱ Hysteresis

^۲ Hysteresis power loss

^۳ Eddy currents power loss

^۴ Excess power loss

در فرکانس‌ها و پیک‌های چگالی شار مغناطیسی مختلف مورد محاسبه قرار داده‌اند.

با توجه به تحقیقات فوق، به نظر می‌رسد که تا کنون مدلی که شامل محدودیت‌های اشاره‌شده از قبیل وابستگی ضرایب ساختاری ماده به شدت میدان مغناطیسی و اتلاف‌های توانی رخ داده در فرکانس‌های بالا باشد، پیشنهاد نشده‌است. در این مقاله و با ملاحظه دو عامل مذکور، یک مدل تجربی-تحلیلی جهت پیش‌بینی نیروی مسدود عملگر در مقادیر مختلف فرکانس و شدت میدان مغناطیسی ارائه شده‌است. در ابتدا مدل مذکور به صورت تئوری بیان شده و سپس رفتار نیرو-جابجایی عملگر ترفنل-دی، با استفاده از یک مجموعه آزمایشگاهی به دست آورده شده‌است. با تحلیل نحوه تغییرات ضرایب ساختاری و نیز استفاده از روابط تجربی ارائه شده در مرجع [۲۱] جهت پیش‌بینی اتلاف‌های توانی در فرکانس‌های بالا، مدل تجربی-تئوری نهایی معرفی شده‌است. صحت مدل مذکور نیز با مقایسه نتایج حاصل از آن با نتایج تجربی مورد ارزیابی قرار گرفته‌است.

۲- مدل‌سازی تئوری

به دلیل جفت‌شدگی مکانیکی-مغناطیسی، کرنش ترفنل-دی و شار مغناطیسی گذرنده از آن، هم بر اثر اعمال میدان مغناطیسی و هم بر اثر اعمال تنش‌های مکانیکی تغییر می‌کنند. در حالتی که میدان مغناطیسی و تنش اعمالی فقط در راستای محور ماده باشند، کرنش و چگالی شار مغناطیسی عبوری را با استفاده از روابط زیر نمایش می‌دهند [۲۸]:

$$S = s^H T + dH \quad (۱)$$

$$B = dT + \mu^T H \quad (۲)$$

در روابط فوق S نشان دهنده کرنش، T تنش، B چگالی شار مغناطیسی و H شدت میدان مغناطیسی، d ضریب دگرسانی مغناطیسی، s^H ضریب انطباق الاستیکی در میدان مغناطیسی ثابت و μ^T ضریب تراوایی مغناطیسی در تنش مکانیکی ثابت می‌باشد. می‌توان پارامترهای T و H را بر حسب B و S به دست آورد:

$$T = \frac{1}{s^B} S - \lambda B \quad (۳)$$

$$H = -\lambda S + \nu^S B \quad (۴)$$

الکترومکانیکی عملگر لحاظ شده‌است که تنها می‌تواند تخمینی از اتلاف توان را به دست دهد [۲۰]. طالبیان و همکاران با حل همزمان معادلات ماکسول، میدان الکتریکی داخلی ترفنل-دی را به دست آورده و توان اتلاfi ناشی از جریان‌های گردابه‌ای را محاسبه کرده‌اند. آنها از داده‌های تجربی به عنوان ورودی مدل استفاده کرده و در نهایت روابط تجربی شامل عبارات توانی از فرکانس و پیک چگالی شار مغناطیسی، برای محاسبه توان اتلاfi مذکور پیشنهاد داده‌اند [۲۱].

مطالعات انجام شده بر روی مواد فرومغناطیس مختلف نشان می‌دهد که مقدار واقعی اتلاف توان از مجموع توان اتلاfi ناشی از پسماند و جریان‌های گردابه‌ای بیشتر است. به مقدار اختلاف موجود بین این مقادیر، توان اتلاfi اضافی گفته می‌شود که عمدتاً ناشی از عیوب شبکه‌ای و یکسان نبودن حوزه‌های مغناطیسی موجود در ماده، عدم نفوذ کامل شار مغناطیسی و غیریکنواخت بودن چگالی شار گذرنده از ماده است [۲۲-۲۳]. مجموع این عوامل، مدل‌سازی توان اتلاfi اضافی را مشکل نموده‌است، با این حال تحقیقاتی بدین منظور صورت پذیرفته‌است. برتوتی بر مبنای حرکت دیواره‌های حوزه‌های مغناطیسی، مدلی برای توان اتلاfi اضافی در مواد فرومغناطیس نرم ارائه کرده‌است. در این مدل، مقدار توان اضافی با توان ۲ و ۱/۵ از فرکانس و پیک چگالی شار مغناطیسی متناسب است [۲۴]. روابط تحلیلی یا تجربی مشابهی نیز برای محاسبه توان اتلاfi اضافی در فریتها^۱ به دست آورده شده که نشان می‌دهد، مقدار توان اتلاfi اضافی در این مواد با توان ۲ از فرکانس و پیک چگالی شار مغناطیسی مرتبط است [۲۵ و ۲۶]؛ همچنین مایرگویز و همکارانش بر مبنای نفوذ غیریکنواخت شار مغناطیسی، مدلی جهت محاسبه توان اتلاfi اضافی ارائه داده‌اند که به خوبی با نتایج تجربی مطابقت دارد [۲۷]. تنها تحقیق انجام شده بر روی افت توان اضافی در ترفنل-دی، توسط طالبیان و همکاران انجام شده‌است [۲۱]. آنها بر مبنای نفوذ غیریکنواخت شار مغناطیسی و با در نظر گرفتن داده‌های تجربی حاصل از آزمایش، توان اتلاfi اضافی در ترفنل-دی را

^۱ Ferrite

$$I = -\frac{d}{j\omega N s^B \mu^T} (v_2 - v_1) + \frac{s^H l_r}{j\omega (\mu^T s^H - d^2) N^2 A_r} \quad (12)$$

هنگامی که عملگر در حالت کاملاً بسته باشد ($v_2 - v_1 = 0$) خواهیم داشت:

$$F = \frac{d}{j\omega N s^B \mu^T} U \quad (13)$$

$$I = \frac{U}{j\omega L^S} \quad (14)$$

با ترکیب دو رابطه ۱۳ و ۱۴، به ارتباط بین نیروی مسدود عملگر و جریان اعمالی به سیم پیچ تحریک می‌رسیم:

$$F = \frac{NdA_r}{s^H l_r} I \quad (15)$$

همان گونه که در مقدمه اشاره شد، با افزایش فرکانس میدان مغناطیسی اعمالی، توان مغناطیسی منتقل شده به ترنفل-دی به علت اتلاف‌های رخ داده کاهش می‌یابد که باید در مدل‌سازی نیروی مسدود عملگر مورد ملاحظه قرار گیرد. اتلاف‌های مذکور با استفاده از روابط تحلیلی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند و در نهایت روابطی تجربی شامل عبارات توانی از فرکانس و دامنه جریان الکتریکی ارائه شده‌اند که امکان محاسبه توان‌های اتلافی مذکور را بدون نیاز به چرخه‌های پسماند فراهم می‌کند [۲۱]. با توجه به ابعاد ترنفل-دی در عملگر مقاله حاضر، روابط توانی مذکور به صورت زیر در می‌آیند:

$$P_{hys} = (1.1417 \times 10^{-4}) f^{2.275} I^{1.313} \quad (16)$$

$$P_{eddy} = (8.9002 \times 10^{-4}) f^{1.948} I^{0.651} \quad (17)$$

$$P_{excess} = (2.309 \times 10^{-3}) \times (24)^{(2.05-0.311f^{0.1826})} \times (0.9856)^{(-0.9604f^{0.1826})} \times (0.005)^{(0.9604f^{0.1826}-2)} \times f^{(0.6838f^{0.1826}-0.322)} \times I^{(2.05-0.311f^{0.1826})} \quad (18)$$

در روابط ۱۶ تا ۱۸، P_{hys} ، P_{eddy} و P_{excess} به ترتیب بیانگر توان اتلافی ناشی از پسماند، جریان‌های گردابه‌ای و اضافی بر حسب وات است؛ همچنین I دامنه جریان متناوب اعمالی به سیم پیچ تحریک بر حسب آمپر و f فرکانس جریان متناوب بر حسب هرتز می‌باشند. هم اکنون می‌توان ضریب بازده انرژی χ را به صورت زیر تعریف کرد:

$$\chi = \frac{P_{electrical} - (P_{hysteresis} + P_{eddy} + P_{excess})}{P_{electrical}} \quad (19)$$

$P_{electrical}$ توان الکتریکی سیم پیچ تحریک می‌باشد و برابر است با:

$$P_{electrical} = \frac{1}{2} Z I^2 = \frac{1}{2} \sqrt{R^2 + (L\omega)^2} I^2 \quad (20)$$

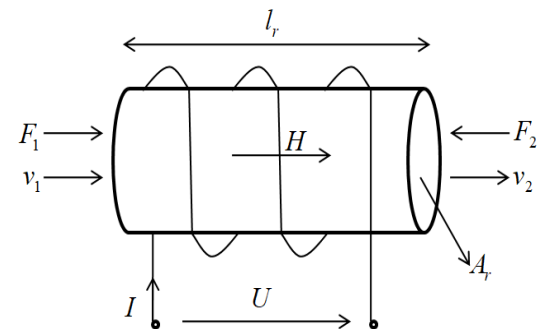
که در این روابط s^B ضریب انطباق الاستیکی در شار مغناطیسی ثابت، λ ضریب دگرسانی مغناطیسی کلاسیک و v^s ضریب رلاکتیویته در کرنش ثابت است و به ترتیب از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$s^B = s^H \left(1 - \frac{d^2}{\mu^T s^H}\right) \quad (5)$$

$$\lambda = \frac{d}{\mu^T s^B} \quad (6)$$

$$v^s = \frac{1}{\mu^T \left(1 - \frac{d^2}{\mu^T s^H}\right)} \quad (7)$$

شکل ۱، مدار معادل الکتریکی-مکانیکی ترنفل-دی را با طول l_r ، سطح مقطع A_r و تعداد دور سیم پیچ N نمایش می‌دهد. در این شکل، U (ولتاژ دو سر سیم پیچ) و I (جریان گذرنده از سیم پیچ) به عنوان کمیت‌های ورودی مدار معادل و F (نیروی ترنفل-دی) و v_1 و v_2 (سرعت نقاط ابتدایی و انتهایی ماده) به عنوان کمیت‌های خروجی مدار معادل در نظر گرفته می‌شوند.



شکل ۱- مدار معادل الکتریکی-مکانیکی ترنفل-دی

هنگام اعمال میدان مغناطیسی متناوب با فرکانس زاویه‌ای ω ، کمیت‌های کرنش، چگالی شار مغناطیسی و شدت میدان مغناطیسی به ترتیب از روابط ۸ تا ۱۰ محاسبه می‌شوند:

$$S = \frac{v_2 - v_1}{j\omega l_r} \quad (8)$$

$$B = \frac{U}{j\omega N A_r} \quad (9)$$

$$H = \frac{NI}{l_r} \quad (10)$$

با جایگذاری روابط ۸ تا ۱۰ در روابط ۳ و ۴ و با توجه به این که $F = -TA_r$ خواهیم داشت:

$$F = -\frac{A_r}{j\omega s^B l_r} (v_2 - v_1) + \frac{d}{j\omega N s^B \mu^T} U \quad (11)$$

انجام آزمایش‌ها استفاده شده است. این مجموعه آزمایشگاهی دارای اجزای زیر است:

۱- دستگاه تست کشش و نیروسنج موجود در آن: به منظور اعمال تنش بر عملگر مورد استفاده قرار می‌گیرد.

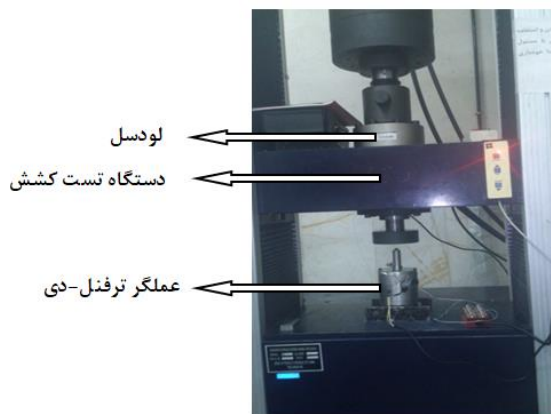
۲- عملگر ترفنل-دی: از سوخت پاش نشان داده شده در شکل ۲، استفاده شده است.

۳- منبع تغذیه جریان مستقیم: جهت عبور جریان از سیم پیچ تحریک عملگر و ایجاد میدان مغناطیسی به کار گرفته شده است.

۴- کرنش سنج طولی چسبیده به ترفنل-دی به همراه دیتا لاگر مربوطه (مدل DC-97A محصول شرکت TML): برای اندازه‌گیری کرنش ایجاد شده در ترفنل-دی به هنگام اعمال میدان مغناطیسی و تنش مکانیکی استفاده شده است.

۵- کارت A/D: به منظور تبدیل داده‌های آنالوگ دیتا لاگر کرنش سنج و نیروسنج به داده‌های دیجیتال و ارسال به رایانه استفاده شده است.

۶- رایانه: به منظور ذخیره سازی داده‌های دیجیتال، کاهش نرم افزاری نویز و تبدیل داده‌های خام به کمیت‌های هدف استفاده می‌شود.



شکل ۳- مجموعه آزمایشگاهی شامل دستگاه تست کشش و سوخت پاش ترفنل-دی

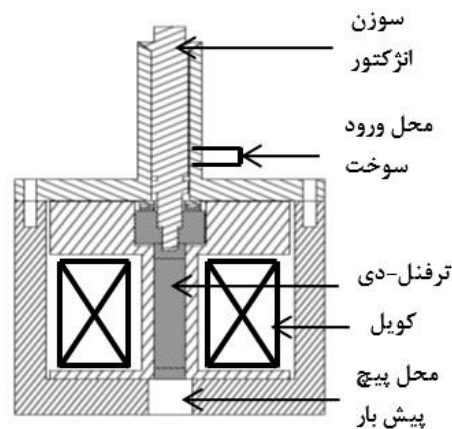
در هر آزمایش با استفاده از منبع تغذیه، یک جریان مشخص به سیم پیچ تحریک عملگر اعمال می‌شود که موجب ایجاد یک میدان مغناطیسی ثابت می‌شود. این میدان

در رابطه ۲۰، Z امپدانس ظاهری سیم پیچ، I دامنه جریان متناوب گذرنده از سیم پیچ، R مقاومت و L اندوکتانس سیم پیچ می‌باشد. اکنون می‌توان رابطه ۱۵ را با در نظر گرفتن رابطه ۱۹ به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$F = \chi \frac{NdAr}{sHl_r} I \quad (21)$$

۳- آزمایش‌های تجربی

در این مقاله از یک سوخت پاش ترفنل-دی [۵]، جهت انجام آزمایش‌های عملکردی استفاده شده است. شکل ۲ شماتیک سوخت پاش مذکور و قطعات به کار رفته در آن را نمایش می‌دهد. میله ترفنل-دی به کار رفته در این عملگر دارای طول ۵۰ میلی‌متر و قطر ۱۰ میلی‌متر می‌باشد و سیم پیچ تحریک از ۱۲۰۰ دور سیم با قطر ۱ میلی‌متر ساخته شده است. سیم پیچ تحریک توانایی عبور ۷ آمپر جریان را دارد تا انجام آزمایش‌های مختلف در مقادیر مختلف شدت میدان مغناطیسی (از صفر تا اشباع) ممکن باشد. همچنین برای بهینه سازی رفتار مغناطیسی-مکانیکی ترفنل-دی از پیچ پیش‌بار جهت اعمال پیش‌تنش مکانیکی استفاده شده است.

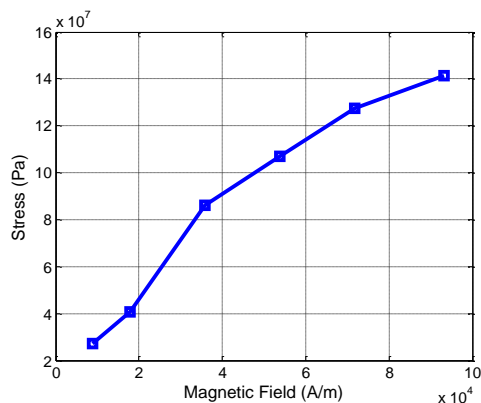


شکل ۲- شماتیک سوخت پاش ترفنل-دی

برای بررسی رفتار نیرو-جابجایی عملگر ترفنل-دی باید مجموعه‌ای به کار گرفته شود که امکان آزمایش در مقادیر مختلف شدت میدان مغناطیسی و تنش مکانیکی را فراهم کند. علاوه بر این، مجموعه ساخته شده باید دارای حسگرهایی باشد که بتواند به صورت همزمان نیروی وارد بر ترفنل-دی و تغییر طول آن را اندازه‌گیری نماید. با توجه به ملاحظات فوق، از دستگاه تست کشش مطابق شکل ۳، جهت

غیر خطی بودن این رابطه از آنجا ناشی می‌شود که ضریب دگرسانی مغناطیسی و همچنین ضریب انطباق الاستیکی ترفنل-دی ثابت نبوده و تابع شدت میدان مغناطیسی و تنش اعمالی است.

شکل ۵ تنش مسدود عملگر ترفنل-دی را در مقادیر مختلف شدت میدان مغناطیسی نشان می‌دهد. نحوه افزایش این کمیت نیز با شدت میدان مغناطیسی خطی نیست. غیرخطی بودن به دلیل ثابت نبودن مقادیر ضریب دگرسانی مغناطیسی و انطباق الاستیکی و نیز وابستگی تراوایی مغناطیسی به شدت میدان مغناطیسی می‌باشد. با تغییر مقدار تراوایی مغناطیسی، سطح مغناطیس‌شوندگی ترفنل-دی نیز تغییر می‌کند و موجب غیرخطی شدن کرنش و تنش می‌شود.



شکل ۵- تنش مسدود عملگر ترفنل-دی

۴- نتایج و صحت سنجی

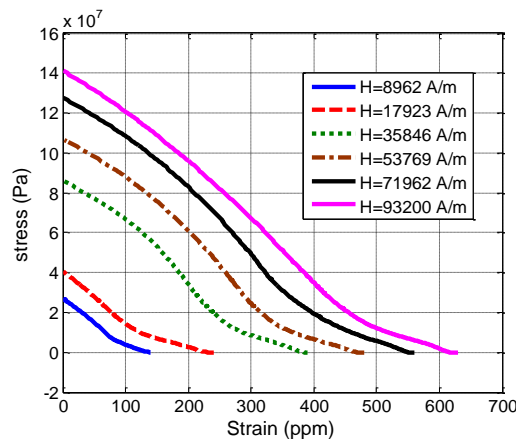
در قسمت قبل تنش مسدود عملگر ترفنل-دی در مقادیر مختلف شدت میدان مغناطیسی به دست آورده شد. با توجه به رابطه ۱ و از آنجا که در تنش مسدود، کرنش ماده برابر صفر است، می‌توان نوشت:

$$\frac{d}{sH} = -\frac{T}{H} \quad (22)$$

بنابراین نسبت ضریب دگرسانی مغناطیسی به ضریب انطباق الاستیکی را می‌توان از روی نتایج تجربی به دست آورد. شکل ۶ نسبت مذکور را در مقادیر مختلف میدان مغناطیسی نمایش می‌دهد.

مغناطیسی باعث افزایش طول ترفنل-دی می‌شود و افزایش طول، توسط کرنش-سنج طولی متصل به ترفنل-دی اندازه‌گیری می‌شود. سپس کنگی دستگاه کشش به حرکت در آمده و در مدت زمان مشخصی نیروی وارده به عملگر از صفر تا مقدار نهایی افزایش می‌یابد. در حین افزایش نیروی فشاری وارده به عملگر، طول ترفنل-دی کاهش می‌یابد. با ذخیره همزمان مقدار نیرو (اندازه‌گیری شده توسط نیروسنج دستگاه کشش) و تغییر طول ترفنل-دی (اندازه‌گیری شده توسط کرنش-سنج) می‌توان رفتار تنش-کرنش عملگر ترفنل-دی را به دست آورد.

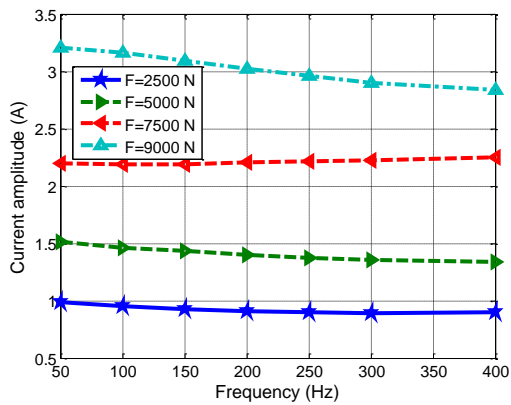
شکل ۴ تنش-کرنش عملگر مورد استفاده را در مقادیر مختلف میدان مغناطیسی نشان می‌دهد. در هر مقدار از شدت میدان مغناطیسی، ابتدا نیرویی به عملگر وارد نمی‌شود و در نتیجه عملگر دارای بیشترین مقدار کرنش در آن شدت میدان مغناطیسی است. با افزایش تنش فشاری بر روی عملگر و بالطبع میله ترفنل-دی، کرنش آن کاهش می‌یابد و در یک مقدار از تنش اعمالی، به صفر می‌رسد که همان تنش مسدود است. تنش مسدود، بیشترین مقدار تنش است که عملگر ترفنل-دی در هر مقدار از شدت میدان مغناطیسی قادر به ایجاد آن است. به عبارت دیگر در این نقطه از نمودارها، سختی عوامل محصور کننده عملگر به بی‌نهایت رسیده و کرنش ترفنل-دی صفر می‌شود.



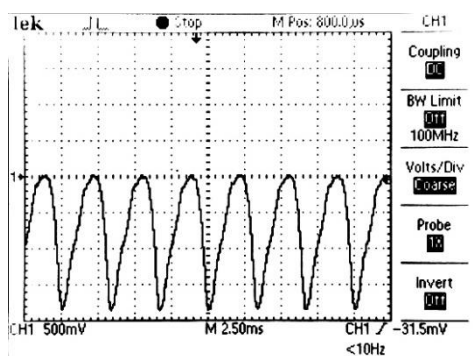
شکل ۴- رفتار تنش-کرنش عملگر ترفنل-دی در مقادیر مختلف شدت میدان مغناطیسی

همان‌گونه که از شکل ۴ برمی‌آید، در هر مقدار از شدت میدان مغناطیسی، رابطه تنش و کرنش عملگر خطی نیست.

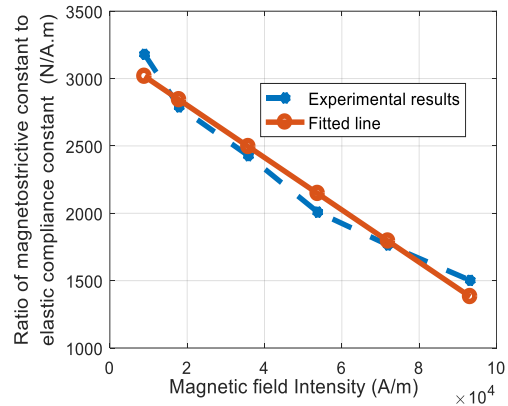
کلگی دستگاه به سمت پایین حرکت کرده تا نیروی مسدود مشخصی را به عملگر وارد نماید (نیروی وارد شده توسط نیرو سنج دستگاه اندازه‌گیری می‌شود). در اینصورت ترفنل-دی تحت تنش فشاری قرار گرفته و دارای کرنش منفی خواهد بود که توسط کرنش سنج اندازه‌گیری شده و در اسیلوسکوپ نشان داده می‌شود. سپس با استفاده از منبع تغذیه جریان متناوب، جریان مشخصی در فرکانس مورد آزمایش به سیم پیچ تحریک اعمال می‌شود، به نحوی که حداکثر کرنش اندازه‌گیری شده توسط کرنش سنج متصل به ترفنل-دی برابر با صفر شود. در این صورت، جریان اعمال شده هم ارز با جریان لازم برای ایجاد نیروی مسدود مورد نظر می‌باشد. شکل‌های ۸ تا ۱۱، مقادیر کرنش نشان داده شده توسط اسیلوسکوپ را بعد از اعمال جریان متناوب، در چند فرکانس مختلف نشان می‌دهد.



شکل ۷- دامنه جریان الکتریکی لازم برای ایجاد نیروهای مسدود مشخص در فرکانس‌های مختلف



شکل ۸- کرنش اندازه‌گیری شده در نیروی مسدود ۷۵۰۰ نیوتن و فرکانس ۵۰ هرتز



شکل ۶- نسبت ضریب دگرگرسانی مغناطیسی به ضریب انطباق الاستیکی در تنش مسدود به ازای مقادیر مختلف میدان مغناطیسی

با افزایش شدت میدان مغناطیسی، نسبت ضریب دگرگرسانی مغناطیسی به ضریب انطباق الاستیکی در تنش مسدود کاهش می‌یابد. به منظور پیش‌بینی مقدار نسبت فوق در هر مقدار دلخواه از میدان مغناطیسی، یک خط بر مبنای کمینه‌سازی مجموع مربعات خطاها به دست آورده شده که در شکل ۶ نشان داده شده‌است. معادله خط عبارتست از:

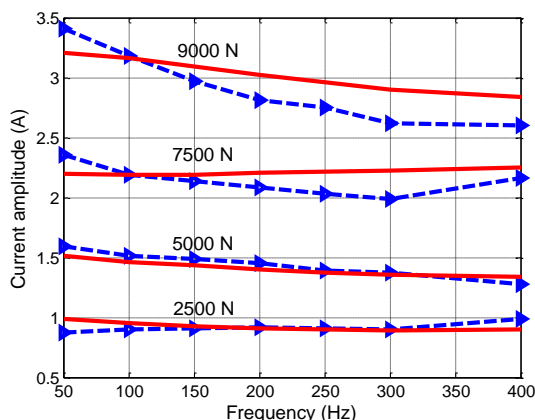
$$\frac{d}{sH} = -0.01941H + 3190 \quad (23)$$

با توجه به این که R-Square خط مذکور ۰/۹۶۶۳ می‌باشد، برازش انجام شده از دقت مطلوبی برخوردار است. با جایگذاری رابطه ۱۰ در رابطه ۲۳ خواهیم داشت:

$$\frac{d}{sH} = -465.84I + 3190 \quad (24)$$

بدین ترتیب با جایگذاری روابط ۲۴ و ۱۹ در رابطه ۲۱ می‌توان دامنه جریان متناوب گذرنده از سیم‌پیچ را جهت ایجاد نیروی مسدود مورد نظر در هر فرکانس محاسبه نمود. شکل ۷ مقادیر به دست آمده برای دامنه جریان الکتریکی را به منظور ایجاد چهار مقدار از نیروی مسدود در هشت فرکانس مختلف نشان می‌دهد.

برای اطمینان از صحت مقادیر به دست آمده، دامنه جریان لازم برای ایجاد نیروی مسدود مورد نظر در هر فرکانس به صورت تجربی هم به دست آمده‌است. بدین منظور از مجموعه آزمایشگاهی قسمت قبلی (شکل ۳) استفاده شده‌است. روند کار بدین صورت بوده‌است که ابتدا، عملگر ترفنل-دی روی دستگاه کشش قرار گرفته، سپس



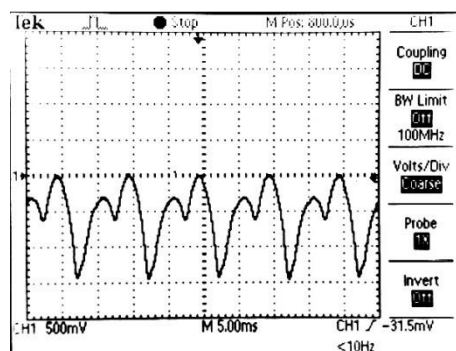
شکل ۱۲- مقادیر تجربی (خط چین) و تئوری (پیوسته) به دست آمده برای دامنه جریان الکتریکی سیم پیچ تحریک به منظور ایجاد نیروی مسدود مشخص

میانگین خطای مقادیر محاسبه شده برای دامنه جریان در مقایسه با مقادیر تجربی به ازای چند مقدار مختلف نیروی مسدود در جدول ۱ آمده است. با توجه به جدول ۱ مشاهده می شود که مدل به دست آمده دارای کمترین مقدار خطا (۱/۱۶٪) در پیش بینی دامنه جریان برای ایجاد نیروی ۲۵۰۰ نیوتن و بیشترین مقدار خطا (۵/۱۸٪) در پیش بینی دامنه جریان برای ایجاد نیروی ۹۰۰۰ نیوتن می باشد.

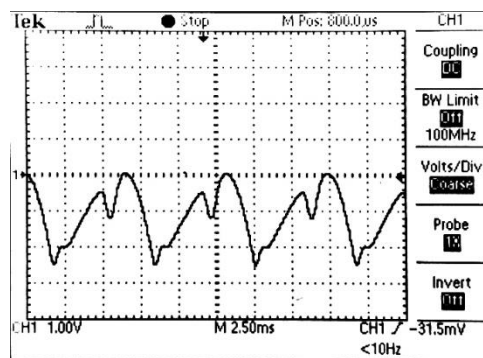
جدول ۱- میانگین خطای مقادیر محاسبه شده برای دامنه جریان در مقایسه با مقادیر تجربی به ازای مقادیر مختلف

نیروی مسدود				
۹۰۰۰	۷۵۰۰	۵۰۰۰	۲۵۰۰	نیروی مسدود (نیوتن)
۵/۸	۵/۷	۱/۹	۱/۶	میانگین خطای مدل نسبت به آزمایش (٪)

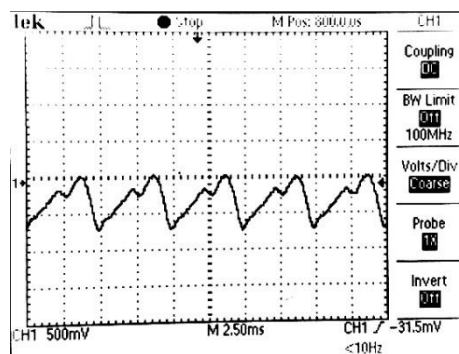
همچنین میانگین خطای مقادیر محاسبه شده برای دامنه جریان در مقایسه با مقادیر تجربی در فرکانس های مختلف در جدول ۲ آمده است. با توجه به جدول ۲، مدل ارائه شده در فرکانس ۱۰۰ هرتز دارای کمترین خطا (۲/۵٪) و در فرکانس ۵۰ هرتز دارای بیشترین خطا (۷/۵٪) است. با توجه به این که فرکانس های ۲۵۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ هرتز خارج از محدوده آزمایش های اولیه برای به دست آوردن مقادیر اتلاف توان



شکل ۹- کرنش اندازه گیری شده در نیروی مسدود ۵۰۰۰ نیوتن و فرکانس ۱۰۰ هرتز



شکل ۱۰- کرنش اندازه گیری شده در نیروی ۹۰۰۰ نیوتن و فرکانس ۱۵۰ هرتز



شکل ۱۱- کرنش اندازه گیری شده در نیروی مسدود ۲۵۰۰ نیوتن و فرکانس ۲۰۰ هرتز

شکل ۱۲ مقادیر به دست آمده برای دامنه جریان متناوب در آزمایش های فوق را در مقایسه با نتایج حاصل از مدل سازی نشان می دهد.

می‌باشد [۲۱]، مقدار خطا در این فرکانس‌ها نسبت به فرکانس‌های کوچک‌تر افزایش یافته‌است.

جدول ۲- میانگین خطای مقادیر محاسبه شده برای دامنه جریان سیم‌پیچ تحریک در مقایسه با مقادیر تجربی در فرکانس‌های مختلف

فرکانس (هرتز)	۵۰	۱۰۰	۱۵۰	۲۰۰	۲۵۰	۳۰۰	۴۰۰
خطا (درصد)	۷/۵	۲/۵	۳/۲	۴/۷	۵	۶/۴	۶/۵

اختلاف میان نتایج مدل‌سازی با نتایج تجربی را می‌توان ناشی از دو عامل اصلی دانست: عامل اول به ماهیت روابط تجربی ۱۹ و ۲۴ بر می‌گردد، چرا که این روابط از برآزش بر روی نتایج تجربی به دست آمده‌اند و دارای خطای ذاتی هستند. عامل دوم مربوط به ماهیت غیر خطی رفتار ترفنل-دی است که با افزایش فرکانس نمود بیشتری می‌یابد و بالطبع خطای مدل تجربی را افزایش می‌دهد. با این حال به نظر می‌رسد که مدل ارائه شده دارای دقت مناسبی در پیش‌بینی میدان مغناطیسی لازم برای ایجاد نیروی مسدود دلخواه در دامنه فرکانسی ۰-۴۰۰ هرتز باشد.

۱- مزیت اصلی مدل پیشنهادی این است که برای محاسبه نیروی خروجی عملگر تنها از دو متغیر ورودی شامل شدت و فرکانس جریان الکتریکی استفاده می‌کند و نیازی به نمودارهای پسماند مغناطیسی ماده ندارد. این موضوع از آنجا حائز اهمیت است که استخراج این نمودارها علی‌الخصوص در کاربردهای صنعتی و عملی در فرکانس‌های بالا نیاز به آزمایش‌های متعدد و تجهیزات اندازه‌گیری خاصی دارد که لزوماً در دسترس نیستند.

۲- مقایسه نتایج حاصل از این مدل با نتایج تجربی نشان‌دهنده آن است که مدل مذکور علاوه بر سهولت در کاربرد، از دقت مناسبی نیز برخوردار است، به نحوی که میانگین خطای اندازه‌گیری شده بین نتایج مدل و نتایج تجربی در هفت فرکانس مختلف، ۵٪ به دست آمده‌است.

۳- مدل پیشنهادی قابلیت پیش‌بینی نیروی مسدود را برای هر نمونه ترفنل-دی با طول و سطح مقطع دلخواه دارد، چرا که روابط تجربی استفاده شده از تحلیل تنش-کرنش ماده استخراج شده‌اند و برای همه عملگرهایی که بر مبنای تحریک طولی ماده طراحی و ساخته می‌شوند، معتبر می‌باشند.

مراجع

- [1] Kellogg R, Flatau A (1999) Blocked force investigation of a Terfenol-D transducer. Proc. SPIE's 6th Annual International Symposium on Smart Structure and Materials, Newport Beach, CA, United States.
- [2] Bhattocharya B (2005) Terfenol and Galfenol smart magnetostrictive metals for intelligent transducer. J. Ind. Inst Tech Kanpur 7: 33 – 41.
- [3] Goodfriend M, Shoop K (1992) Adaptive characteristics of the magnetostrictive alloy, Terfenol-D, for active vibration control. J. Intell. Mater. Sys. Stru. 3: 245–54.
- [4] Karunanidhi S, Singaperumal M (2010) Design, analysis and simulation of magnetostrictive actuator and its application to high dynamic servo valve. Sen. Act. A: Phys. 157(2): 185-197.
- [5] Ghodsi M, Hosseinzadeh N, Özer A, Rajabzadeh Dizaj H, Garjasi Varzeghani N (2017) Development of Gasoline Direct Injector Using Giant Magnetostrictive Materials. IEEE Trans. Ind. App. 53(1): 521-529.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله، یک مدل بهبودیافته بر اساس ترکیب مدل مکانیکی-مغناطیسی خطی و ضریب بازده انرژی ارائه شد که امکان محاسبه و پیش‌بینی نیروی مسدود عملگر ترفنل-دی را فراهم می‌کند. در ابتدا و به منظور استخراج ضرایب عملکردی ماده، یک مجموعه آزمایشگاهی مورد استفاده قرار گرفت و منحنی‌های تنش-کرنش عملگر در هنگام اعمال میدان مغناطیسی مستقیم به دست آورده شدند. نحوه تغییرات این ضرایب، با یک رابطه تجربی خطی با دقت مناسب تخمین زده شد تا امکان برآورد ضرایب مذکور در هر مقدار دلخواه از شدت میدان مغناطیسی فراهم شود. سپس و به منظور توسعه مدل در هنگام اعمال جریان مغناطیسی متناوب، ضریب بازده انرژی عملگر تعریف شد که شامل تمام اتلاف‌های رخ داده در انرژی مغناطیسی است. با توجه به نتایج حاصل، می‌توان دریافت که:

- D Magnetostrictive Material. IEEE Trans. Mags. 54: 1-4.
- [17] Talebian S (2018) Theoretical and experimental study on magnetic hysteresis loss of Terfenol-D. Proc. ISME2018, Iran, Tehran.
- [18] Goodenough J (2002) Summary of Losses in Magnetic Materials. IEEE Trans. Mags, 38: 234-240.
- [19] Bozorth R (2003) Ferromagnetism. IEEE Press.
- [20] Yan R, Yang Q, Yang W, Hou S, Yan W (2010) Dynamic Model of Giant Magnetostrictive Acceleration Sensors Including Eddy-Current Effects. IEEE Trans. App. Supercond. 20(3): 1874-1877.
- [21] Talebian S, Hojjat Y, Ghodsi M, Karafi M R (2015) Study on classical and excess eddy currents losses of Terfenol-D. J. Mag. Magc. Mates. 388: 150-159.
- [22] Overshott K J (2012) The use of domain observations in understanding and improving the magnetic properties of transformer steels. IEEE Trans. Mags. 12: 840-846.
- [23] Overshott K J (1981) The Causes of the Anomalous Loss in Amorphous Ribbon Materials. IEEE Trans. Mags. 17(6): 341-347.
- [24] Bertotti G (1988) General Properties of Power Losses in Soft Ferromagnetic Materials. IEEE Trans. Mags. 24(1): 621-630.
- [25] Tenant P, Rousseau J J (1998) Dynamic model of magnetic materials applied on soft ferrites. IEEE Trans. Pow. Elects. 13(2): 372-9.
- [26] Mayergoyz I D, Serpico C (2000) Frequency scaling of excess hysteresis loss. IEEE Trans. Mags 36(5): 3192-3194.
- [27] Serpico C, Visone C, Mayergoyz I D, Basso V, Miano G (2000) Eddy current losses in ferromagnetic laminations. J. App. Phys. 87(9): 6923-6925.
- [28] Engdahl G (2000) Handbook of Giant Magnetostrictive Materials. Royal Institute of Technology Press, Stockholm, Sweden.
- [6] Olabi A G, Grunwald A (2008) Design and application of magnetostrictive materials, J. Mats. Des. 29(2): 469-483.
- [7] Claeysen F, Lhermet N, Maillard T (2003) Magnetostrictive actuators compared to piezoelectric actuators, Proc. SPIE 4763, European Workshop on Smart Structures in Engineering and Technology, Giens, France, March.
- [8] Honda T, Hayashi Y, Yamaguchi M, Arai K I (1994) Fabrication of thin-film actuators using magnetostriction. IEEE Trans. J. Mag. 9: 27-32 .
- [9] Tan X, Baras J S (2004) Modeling and control of hysteresis in magnetostrictive actuators. Automatica 40(9): 1469-1480.
- [10] Sun L, Zheng X (2006) Numerical simulation on coupling behavior of Terfenol-D rods. Int. J. Sol. Struc. 43(6): 1613-1623.
- [11] Dapino M J, Flatau A B, Calkins F T (2006) Statistical Analysis of Terfenol-D Material Properties. J. Intell. Mater. Sys. Stru. 17: 587-599.
- [12] Zhang D, Li M, Zhou H (2015) A general one-dimension nonlinear magneto-elastic coupled constitutive model for magnetostrictive materials. AIP Adv. 5 (10).
- [13] Domenjoud M, Berthelot E, Galopin N, Corcolle R, Bernard Y, Daniel L (2009) Characterization of giant magnetostrictive materials under static stress: influence of loading boundary conditions. Smart Mats. Stru. 28(9).
- [14] Yamamoto K, Nakano H, Yamashiro Y (2003) Effect of compressive stress on hysteresis loss of Terfenol-D. J. Magn. Magc. Mats. 254: 222-224.
- [15] Jianbin Z, Haiquan Z, Baodong B, Ming Y (2009) Calculation of hysteresis losses for Terfenol-D ultrasonic transducer. Proc. Second International Conference on Smart Materials and Nanotechnology in Engineering, Weihai, China.
- [16] Huang W, Gao C, Li Y, Wang B (2018) Experimental and Calculating Analysis of High-Frequency Magnetic Energy Losses for Terfenol-