



مطالعه تجربی و تئوری تأثیر میدان مغناطیسی و تنش مکانیکی بر ضرایب ساختاری و رفتار مکانیکی-مغناطیسی ترفنل-دی

سهیل طالبیان

استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه رازی، کرمانشاه
کرمانشاه، کد پستی ۶۷۱۴۴۱۴۹۷۱، s.talebian@razi.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

ترفنل-دی به عنوان یک ماده دگررسان مغناطیسی، به دلیل قابلیت اعمال نیرو و جابجایی بزرگ، کاربرد زیادی در انواع عملگرها دارد. یکی از محدودیت‌های اصلی ترفنل-دی، وابستگی ضرایب ساختاری آن از قبیل انطباق الاستیکی و دگرسانی مغناطیسی به تنش مکانیکی و شدت میدان مغناطیسی اعمالی است که پیش‌بینی رفتار عملگرها را دشوار می‌سازد. در مقاله حاضر، یک مدل تجربی-تحلیلی شامل تقریب‌های خطی جهت پیش‌بینی ضرایب ساختاری مذکور ارائه شده‌است. در ابتدا با استفاده از یک مجموعه آزمایشگاهی، نمودارهای غیرخطی تنش-کرنش ترفنل-دی در مقادیر مختلف میدان مغناطیسی به دست آمده‌اند و با تحلیل نتایج به دست آمده و نیز اعمال مدل خطی مغناطیسی-مکانیکی، ضرایب انطباق الاستیکی، دگرسانی مغناطیسی، تراوایی مغناطیسی و جفت‌شدگی محاسبه شده‌اند. سپس، تقریب‌های خطی ارائه شده‌اند که می‌توانند در هر شدت میدان مغناطیسی و تنها با در اختیار داشتن اطلاعات مربوط به سه مقدار تنش، ضرایب عملکردی ترفنل-دی را پیش‌بینی نمایند. محاسبه مقادیر تنش-کرنش با استفاده از تقریب‌های خطی مذکور و مقایسه با نتایج تجربی اولیه، نشان‌دهنده دقت قابل قبول مدل ارائه شده‌است. در انتها نیز مدل پیشنهادی در شرایط کاری جدید و به منظور پیش‌بینی رفتار مکانیکی-مغناطیسی ماده مورد استفاده قرار گرفته و صحت سنجی شده‌است. مقایسه نتایج حاصل با نتایج تجربی نشان‌دهنده دقت بسیار خوب مدل ارائه شده می‌باشد، به نحوی که بیشترین خطا در محاسبه کرنش و شار مغناطیسی به ترتیب ۳/۴٪ و ۳/۴٪ به دست آمده‌اند.

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: ۶ مهر ۱۴۰۰
داوری اولیه: ۴ بهمن ۱۴۰۰
پذیرش: ۲۱ اسفند ۱۴۰۰

کلیدواژه‌ها:

ترفنل-دی
عملگر دگررسان مغناطیسی
ضریب انطباق الاستیکی
ضریب دگرسانی مغناطیسی

Experimental and theoretical study on effects of magnetic field and mechanical stress on structural coefficients and magnetomechanical behavior of terfenol-D

Soheil Talebian

Mechanical Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran
P.O.B. 671441497, Kermanshah, Iran, s.talebian@razi.ac.ir

Article Information

Original Research Paper
Received: 28 September 2021
First Decision: 24 January 2022
Accepted: 12 March 2022

Keywords:

Terfenol-D
Magnetostrictive actuator
Elastic compliance coefficient
Magnetostrictive coefficient

Abstract

Terfenol-D as a magnetostrictive material is widely used in actuators because of its high force and displacement. One of the main limitations of Terfenol-D is dependency of its structural coefficients like elastic compliance and magnetostrictive coefficients to applied mechanical stress and magnetic field which makes it difficult to predict the actuator's behavior. In the present paper, an analytical-experimental model is presented to predict the mentioned coefficients at different operating conditions. Initially, by using an experimental fabricated setup and tension test equipment, the nonlinear stress-strain behavior of the Terfenol-D actuator is studied at different conditions and by analyzing the obtained results and applying the linear magnetomechanical model, elastic compliance, magnetostrictive, magnetic permeability and magnetomechanical coupling coefficients are calculated. Then, a model based on linear approximating relations is presented which can predict the coefficients at determined magnetic field intensity only by importing three values of stress. Calculating values of stress and strain by using the model and comparing the results to the experimental results shows acceptable precision of the model. Finally, the proposed model is applied to predict magnetomechanical behavior of Terfenol-D and being validated. Comparing the results to experimental ones shows capability of the model at predicting magnetomechanical behavior of Terfenol-D at different operational conditions, as the maximum errors of calculated strains and magnetic fluxes are 3% and 3.4%, respectively.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Soheil Talebian, Experimental and theoretical study on effects of magnetic field and mechanical stress on structural coefficients and magnetomechanical behavior of terfenol-D, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 9, No. 1, pp. 19- 30, 2022 (in Persian). <https://www.doi.org/10.22034/IJME.2022.155983>

۱- مقدمه

تغییر شکل ماده فرومغناطیس در اثر مغناطیس‌شدگی آن که عمدتاً بر اثر اعمال میدان مغناطیسی خارجی صورت می‌گیرد را دگرسانی مغناطیسی^۱ می‌گویند. این پدیده مرتبط با اثرات فیزیکی گوناگونی است. 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. نتیجه اثر ژول یک کرنش الاستیک بوده که در ساخت انواع عملگرها کاربرد دارد. علت این پدیده را چرخش حوزه‌های مغناطیسی درون ماده در جهت میدان مغناطیسی عنوان کرده‌اند که این چرخش باعث افزایش طول ماده فرومغناطیس با اعمال میدان مغناطیسی خارجی می‌شود [۲]. در عملگرهای دگرسان مغناطیسی^۳ از دو مفهوم برای بررسی خروجی یا بازده استفاده می‌شود. مفهوم اول نیرو یا تنش مسدود یا محصور است و منظور از آن بیشترین نیروی قابل دسترسی از ماده دگرسان مغناطیسی است و در حالتی رخ میدهد که ماده در حالت محصور قرار گرفته و اجازه هیچ‌گونه جابجایی به آن داده نشود. مفهوم دوم جابجایی آزاد یا کرنش اشباع است و عبارت از جابجایی ماده بدون هیچ محدودیتی می‌باشد [۲].

ترفنل-دی^۴ آلیاژ آهن، تریبیوم و دسپرسیوم است و نام آن از اول نام این عناصر و آزمایشگاهی که اولین بار موفق به ساخت آن گردید (اوردانس ناول) گرفته شده است. هر سه عنصر پایه ترفنل-دی، فرومغناطیس هستند و درصد آن‌ها در این آلیاژ متفاوت است. یک مورد متداول آن $Tb_{0.3}D_{0.7}Fe_{1.9}$ می‌باشد [۳]. ترفنل-دی، به واسطه ویژگی‌هایی همچون توانایی تغییر طول و اعمال نیروی زیاد (در مقایسه با سایر مواد هوشمند)، دمای کوری بالا^۵، ضریب جفت‌شدگی^۶ بزرگ و قابلیت استفاده در فرکانس‌های کم و زیاد میدان مغناطیسی کاربرد بسیاری در ساخت انواع عملگرها دارد [۴]. عموماً عملگرهایی که از ترفنل-دی استفاده می‌کنند، به دو دسته نیمه‌ایستا و دینامیک (رزونانسی) تقسیم‌بندی می‌شوند. عملگرهای نیمه‌ایستا در فرکانس‌های پایین و متوسط (کمتر از ۲ کیلوهرتز) کاربرد دارند. اغلب تمایل به استفاده از این عملگرها، به عنوان منبع نیرو و حرکت قابل کنترل با دامنه بلند است. به منظور مدل‌سازی رفتار این عملگرها از مدل‌های خطی یا غیر خطی جفت‌شدگی

مکانیکی-مغناطیسی استفاده می‌شود [۵]. عملگرهای دینامیک در فرکانس‌های تشدید کار می‌کنند، دارای کرنش دینامیکی بالایی هستند و استفاده اصلی آن‌ها در عملگرهای توان بالا می‌باشد. مدل‌سازی آن‌ها عمدتاً شامل حل معادلات مربوط به انتشار موج می‌باشد [۶]. برای بهینه‌سازی عملکرد عملگرها که شامل افزایش کرنش خروجی و ناحیه خطی است، از ایجاد میدان مغناطیسی اولیه^۷ با استفاده از یک مغناطیس دائم یا جریان مستقیم اعمالی به سیم‌پیچ تحریک و اعمال پیش‌تنش مکانیکی به هسته ترفنل-دی بهره می‌برند [۷]. سطح پیش‌مغناطیس استفاده‌شده وابسته به طراحی عملگر عددی بین ۲۰ تا ۱۰۰ کیلوآمپر بر متر دارد و مقدار پیش‌تنش نیز تا ۵۰ مگاپاسکال گزارش شده است.

برای مدل‌سازی ریاضی رفتار مکانیکی-مغناطیسی ترفنل-دی در عملگرهای نیمه‌ایستا از ضرایبی بهره برده می‌شود که در ادامه به آن‌ها پرداخته می‌شود: ۱- ضریب دگرسانی مغناطیسی^۸: معیاری است که می‌توان با آن در مورد کیفیت ماده ترفنل-دی از حیث کارایی قضاوت کرد و بیانگر ارتباط بین کرنش خروجی با شدت میدان مغناطیسی اعمالی است. ضریب دگرسانی مغناطیسی مقدار ثابتی ندارد و تابع شدت میدان مغناطیسی و تنش مکانیکی اعمالی به ترفنل-دی می‌باشد. ۲- ضریب انطباق الاستیکی^۹: میزان نرمی یا سختی ترفنل-دی را در هنگام اعمال تنش‌های مکانیکی نشان می‌دهد که این ضریب نیز ثابت نبوده و تابع شرایط کاری است. ۳- تراوایی یا تراگذری مغناطیسی^{۱۰}: نشان‌دهنده میزان عبوردهی مغناطیسی در ماده است و در دو حالت آزاد و محصور اندازه‌گیری می‌شود و مقدار آن در هر دو حالت تابع میدان مغناطیسی و تنش اعمالی می‌باشد. ۴- ضریب جفت‌شدگی مغناطیسی-مکانیکی: به عنوان معیاری برای مقایسه بازده عملگرهایی که از مواد دگرسان مغناطیسی استفاده می‌کنند، به کار می‌رود. مقدار آن از جذر نسبت انرژی مکانیکی خروجی عملگر به انرژی مغناطیسی داده‌شده به ترفنل-دی محاسبه می‌شود و همانند دیگر ضرایب عملکردی ترفنل-دی مقدار ثابتی ندارد و تابع شرایط عملکردی است.

یکی از کاربردهای عملگرهای ترفنل-دی، کنترل فعال نویز و ارتعاشات در سازه‌های مکانیکی می‌باشد. عملگرهای دگرسان مغناطیسی به دلیل قابلیت اعمال نیروی زیاد در دامنه فرکانسی

¹ Magnetostriction

² Jule Effect

³ Magnetostrictive Actuators

⁴ Terfenol-D

⁵ Currie Temperature

⁶ Coupling Factor

⁷ Bias Magnetic Field

⁸ Magnetostrictive Coefficient

⁹ Elastic compliance coefficient

¹⁰ Magnetic permeability

وسیع، گزینه مناسبی برای کنترل ارتعاشات به شمار می‌روند. در این گونه کاربردها، عملگر دگرسان مغناطیسی نیرویی به سازه اعمال می‌کند که باعث کاهش دامنه ارتعاشی و نوسانی آن در فرکانس‌های مشخص (فرکانس‌های طبیعی) آن سازه می‌شود [۸]. با توجه به این که سازه مورد مطالعه دارای فرکانس‌های طبیعی مشخصی می‌باشد، باید نیروی کافی توسط عملگر ایجاد و به سازه اعمال گردد. به همین دلیل پیش‌بینی نیروی خروجی عملگر جهت حصول اطمینان از عملکرد صحیح سیستم حائز اهمیت می‌باشد. یکی دیگر از کاربردهای عملگرهای ترافل-دی، استفاده از آن‌ها در سرووشیرها^۱ می‌باشد. در سرووشیرهای معمولی که در واقع یک ابزار الکتریکی محسوب می‌شوند، جریان خروجی سیال متناسب با جریان الکتریکی ورودی است. این گونه شیرها برای کاربردهای با سرعت بالا مناسب نیستند، چون که محدوده باند فرکانسی آن‌ها در حدود ۵۰ هرتز می‌باشد. با به کارگیری یک عملگر دگرسان مغناطیسی به جای موتور گشتاور، می‌توان پهنای فرکانسی را تا حدود ۱ کیلوهرتز نیز افزایش داد [۹]. در این عملگرها نیز پیش‌بینی و مدل‌سازی کرنش خروجی دارای اهمیت می‌باشد. از عملگرهای ترافل-دی به عنوان سوخت‌پاش^۲ در موتورهای احتراق داخلی هم استفاده شده است. مهمترین مزیت آن‌ها، کاهش مصرف سوخت، کاهش گازهای سمی، افزایش نیرو در فرکانس‌های بالا و بهینه‌سازی پارامترهای پاشش بیان شده است [۱۰]. با مدل‌سازی ضرایب عملکردی ترافل-دی مورد استفاده در سوخت‌پاش می‌توان خروجی آن را کنترل نموده و به پارامترهای پاشش بهینه دسترسی پیدا کرد. در کاربردهای فوق، ارائه مدلی جهت پیش‌بینی نیروی خروجی و جابجایی عملگر در شرایط مختلف کاری از قبیل فرکانس و شدت میدان مغناطیسی ضروری می‌باشد که این مهم به دلیل وابستگی خصوصیات ذاتی ترافل-دی (از قبیل ضریب دگرسان مغناطیسی و ضریب انطباق الاستیکی) به مقادیر تنش و شدت میدان مغناطیسی با مشکلات و پیچیدگی‌هایی همراه است.

سان و همکاران به ارائه مدلی جهت شبیه‌سازی رفتار دینامیکی ترافل-دی در مقادیر مختلف پیش‌تنش مکانیکی و میدان مغناطیسی اولیه پرداخته‌اند. هدف آن‌ها پیش‌بینی بیشترین کرنش یا همان کرنش آزاد بوده است و در سایر مقادیر تنش مکانیکی، مدلی ارائه نداده‌اند. همچنین در مدل‌سازی انجام شده تنها ضریب دگرسانی مغناطیسی لحاظ شده و سایر

ضرایب در نظر گرفته نشده‌اند [۱۱]. فلاتو و همکاران به بررسی آماری خواص و ضرایب ترافل-دی پرداخته‌اند. در مطالعه انجام شده، آزمایش‌های تجربی بر روی ۵۰ نمونه مختلف از ترافل-دی با ترکیبات شیمیایی متفاوت انجام شده و ضرایب دگرسانی مغناطیسی، انطباق الاستیکی و تراوایی مغناطیسی به دست آورده شده‌اند و سپس تحلیل آماری شامل میانگین و انحراف معیار داده‌ها انجام شده است تا ارتباط بین این ضرایب با ترکیب شیمیایی ماده مشخص شود. این مطالعه ماهیت تجربی-آماری داشته و به ارائه مدلی جهت پیش‌بینی ضرایب مذکور نمی‌پردازد [۱۲]. ژانگ و همکاران یک مدل غیرخطی بر مبنای معادلات مکانیکی-مغناطیسی ارائه داده‌اند و رفتار غیرخطی ترافل-دی شامل منحنی‌های پسماند مکانیکی و مغناطیسی را در شرایط کاری مختلف پیش‌بینی کرده‌اند. همچنین یک رابطه تحلیلی برای تراوایی مغناطیسی ماده به دست آورده‌اند و به صورت تجربی مورد صحت‌سنجی قرار داده‌اند. اگر چه راجع به ضرایب دیگر ماده بررسی انجام نشده است [۱۳]. بوتاسیو و همکاران مدل جفت‌شدگی مگنتوالاستیک بر اساس تئوری پسماند پریساج و با روش حل عددی اجزا محدود میدان الکترومغناطیسی ارائه داده‌اند. در مدل مذکور تأثیرات عوامل دینامیکی از قبیل جریان گردابه‌ای نیز دیده شده است و نتایج مدل‌سازی با نتایج تجربی نیز مقایسه و صحت‌سنجی شده است، اگر چه مقادیر عددی ضرایب عملکردی ترافل-دی به صورت ثابت و با استفاده از مراجع دیگر در نظر گرفته شده است [۱۴]. دامنجود و همکاران یک مجموعه آزمایشگاهی ابتکاری جهت بررسی خواص ترافل-دی تحت اعمال پیش‌تنش مکانیکی ساخته و کرنش خروجی ماده را به دست آورده‌اند. آن‌ها با اطلاع از وابستگی خواص مکانیکی-مغناطیسی به مقادیر تنش و میدان مغناطیسی، آزمایش‌ها را به گونه‌ای طراحی کرده‌اند که تأثیر این عوامل به حداقل ممکن برسد، به عبارت دیگر مقادیر تنش و میدان مغناطیسی در حین آزمایش تغییر نکند. در این پژوهش، مدلی جهت تبیین رفتار ماده و پارامترهای خروجی ارائه نشده است [۱۵]. دانیل و همکاران با به کارگیری روش انرژی و تلفیق معادلات مغناطیسی، مکانیکی و ترمودینامیکی موفق به مدل‌سازی و پیش‌بینی منحنی‌های پسماند مغناطیسی و دگرسانی مغناطیسی ترافل-دی شده‌اند. آن‌ها ضرایب مورد نیاز از قبیل ضریب دگرسانی مغناطیسی و تراوایی مغناطیسی را مستقیماً از روی نتایج تجربی استخراج کرده و در مدل معرفی شده جایگذاری نموده‌اند و از مدلی جهت محاسبه این ضرایب استفاده نکرده‌اند [۱۶]. مشابه این تحقیق توسط ژان و همکاران

¹ Servo valves

² Injector

$$B = B(T, H) \quad (2)$$

که در این روابط S نشان دهنده کرنش، T تنش، B چگالی شار مغناطیسی و H شدت میدان مغناطیسی می‌باشد. با مشتق‌گیری از این روابط، روابط (۳) و (۴) بدست می‌آیند:

$$dS_i = \frac{\partial S_i}{\partial T_j} \Big|_H dT_j + \frac{\partial S_i}{\partial H_k} \Big|_T dH_k, \quad i = 1, \dots, 6 \quad (3)$$

$$dB_m = \frac{\partial B_m}{\partial T_j} \Big|_H dT_j + \frac{\partial B_m}{\partial H_k} \Big|_T dH_k, \quad m = 1, 2, 3 \quad (4)$$

اندیس i با مقادیر ۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶ در حالت برداری به ترتیب هم ارز اندیس‌های ۱۱، ۲۲، ۳۳، ۲۳، ۳۲، (۳۱ و ۱۳) و (۱۲ و ۲۱) در حالت تانسوری می‌باشد. همچنین اندیس m با مقادیر ۱، ۲ و ۳ بیانگر سه جهت اصلی در دستگاه مختصات کارتزین می‌باشد. ضرایب ایجاد شده در این روابط را به صورت زیر نام‌گذاری می‌کنند:

$$\begin{aligned} \frac{\partial S_i}{\partial H_k} \Big|_T &= \frac{\partial B_m}{\partial T_j} \Big|_H = d_{ki} = d_{mj} \\ \frac{\partial S_i}{\partial T_j} \Big|_H &= s_{ij}^H \\ \frac{\partial B_m}{\partial H_k} \Big|_T &= \mu_{mk}^T \end{aligned} \quad (5)$$

ضرایب معرفی شده در روابط بالا را به ترتیب، ضریب دگرسانی مغناطیسی، ضریب انطباق الاستیکی در میدان مغناطیسی ثابت و ضریب تراوایی مغناطیسی در تنش مکانیکی ثابت می‌نامند. در نتیجه می‌توان روابط (۳) و (۴) را به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$S_i = s_{ij}^H T_j + d_{ki} H_k, \quad i = 1, \dots, 6 \quad (6)$$

$$B_m = d_{mj} T_j + \mu_{mk}^T H_k, \quad m = 1, 2, 3 \quad (7)$$

بعضی از ضرایب موجود در روابط (۶) و (۷) صفر هستند و بعضی هم به علت تقارن، مقدار یکسانی دارند. برای یک ماده فرومغناطیس که راستای x_3 (راستای طولی ماده) جهت اصلی قطبیت مغناطیسی و تنش مکانیکی است، می‌توان نوشت:

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11}^H & s_{12}^H & s_{13}^H & 0 & 0 & 0 \\ s_{12}^H & s_{11}^H & s_{13}^H & 0 & 0 & 0 \\ s_{13}^H & s_{13}^H & s_{33}^H & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{44}^H & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{44}^H & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{66}^H \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & d_{15} & 0 \\ d_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} H_1 \\ H_2 \\ H_3 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mu_{11}^T & 0 & 0 \\ 0 & \mu_{22}^T & 0 \\ 0 & 0 & \mu_{33}^T \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} H_1 \\ H_2 \\ H_3 \end{bmatrix} \quad (9)$$

انجام شده است. آن‌ها نیز با استفاده از ترکیب روش انرژی و روش پسماند جایلز-اترتون و ملاحظات مغناطیسی، مکانیکی و ترمودینامیکی، منحنی‌های غیرخطی پسماند و دگرسانی مغناطیسی ترفنل-دی را مدل‌سازی نموده و تأثیر کمیت‌های شدت میدان مغناطیسی، تنش وارده و دما را بررسی کرده‌اند [۱۷]. شی به ارائه یک مدل غیرخطی جهت پیش‌بینی مغناطیس شونده‌گی و کرنش مواد دگرسان مغناطیسی پرداخته و با مطالعه آماری نتایج، اثر میدان مغناطیسی و تنش وارده را بر کمیت‌های فوق بررسی کرده‌است. در این تحقیق، ضرایب مورد نیاز برای مدل معرفی شده از مطالعات تجربی منابع دیگر اخذ شده است [۱۸].

با اینکه در تحقیقات فوق به وابستگی خصوصیات ذاتی ترفنل-دی (از قبیل ضریب دگرسان مغناطیسی و ضریب انطباق الاستیکی) به مقادیر تنش و شدت میدان مغناطیسی اشاره شده‌است، اما این تحقیقات جنبه کیفی داشته و به چگونگی این تغییرات، کمی‌سازی و ارائه مدلی جهت پیش‌بینی مقدار این ضرایب اشاره نشده‌است. این موضوع از آنجا حائز اهمیت است که می‌تواند منجر به پیش‌بینی مقادیر تنش-کرنش (نیرو-جابجایی) عملگر ترفنل-دی در تمام محدوده عملکردی (از حالت آزاد تا محصور) شود و به عنوان یک معیار، جهت انتخاب شرایط کاری مناسب عملگر (تعیین پیش تنش مکانیکی و میدان مغناطیسی اولیه) و یا محاسبه شدت میدان مغناطیسی با توجه به تنش-کرنش مورد نیاز، به کار گرفته شود. به همین دلیل در این مقاله به چگونگی تغییرات ضرایب مذکور و ارائه مدلی جهت پیش‌بینی مقادیر آن‌ها در شرایط مختلف و نیز پیش‌بینی رفتار مکانیکی-مغناطیسی ماده بر اساس این مدل پرداخته می‌شود.

۲- مدل‌سازی رفتار مکانیکی-مغناطیسی

کرنش ترفنل-دی هم بر اثر اعمال میدان مغناطیسی و هم بر اثر اعمال تنش‌های مکانیکی ایجاد می‌شود. همچنین مغناطیس شونده‌گی آن (شار مغناطیسی گذرنده) علاوه بر میدان مغناطیسی، با اعمال تنش مکانیکی نیز تغییر می‌کند. در فرکانس‌های کمتر از ۵۰ هرتز که می‌توان از پسماند و افت‌های مغناطیسی و نیز انتشار موج در راستای طولی ماده صرف‌نظر کرد، وابستگی کرنش و شار مغناطیسی عبوری به میدان مغناطیسی و تنش مکانیکی با استفاده از روابط زیر نشان داده می‌شود [۱۹]:

$$S = S(T, H) \quad (1)$$

بنابراین امکان انجام آزمایش‌های مختلف بر روی عملگر در مقادیر مختلف شدت میدان مغناطیسی (از صفر تا اشباع) وجود دارد.
 ۳- پیچ پیش‌بار: به منظور اعمال پیش‌تنش مکانیکی و بهینه‌سازی رفتار مغناطیسی-مکانیکی ترفنل-دی استفاده می‌شود.

افزایش طول ترفنل-دی به عنوان یک ماده دگرگرسان مغناطیسی، هم تابع نیروی مکانیکی وارد بر آن و هم تابع شدت میدان مغناطیسی تحریک می‌باشد. برای بررسی رفتار نیرو-جابجایی عملگر ترفنل-دی، باید مجموعه آزمایشگاهی ساخته شود که امکان آزمایش در مقادیر مختلف شدت میدان مغناطیسی را داشته باشد. 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 جهت انجام آزمایش استفاده شده‌است (مطابق شکل ۱-ب).

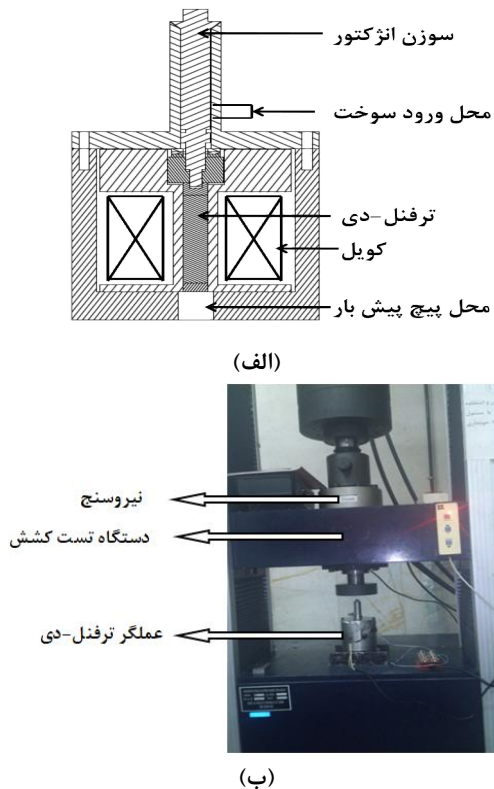


Fig. 1 Schematic view of Terfenol-D actuator (a) and experimental setup containing of tension test device and Terfenol-D actuator (b)
 شکل ۱ شماتیک عملگر ترفنل-دی (الف) و مجموعه آزمایشگاهی شامل دستگاه تست کشش و عملگر ترفنل-دی (ب)

این مجموعه آزمایشگاهی دارای اجزای زیر می‌باشد:

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

در حالتی که میدان مغناطیسی و تنش اعمالی فقط در راستای x_3 مؤلفه داشته باشند، خواهیم داشت: $T_1 = T_2 = 0$ و $H_1 = H_2 = 0, H_3 \neq 0, T_3 \neq 0$ (۸) و (۹)، نتایج زیر به دست می‌آیند:

$$B_1 = B_2 = 0, B_3 \neq 0 \quad (10)$$

$$S_4 = S_5 = S_6 = 0, S_1 \neq S_2 \neq 0, S_3 \neq 0 \quad (11)$$

از آنجا که $T_1 = T_2 = 0$ ، مقادیر S_1 و S_2 تأثیری بر روی انرژی سیستم نمی‌گذارند. در این حالت ضریب جفت‌شدگی مغناطیسی-مکانیکی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$k_{33}^2 = \frac{d_{33}^2}{\mu_{33} T_{33} S_{33}} \quad (12)$$

به این دلیل که عملگر ترفنل-دی در این مقاله، در حالت طولی مورد استفاده قرار گرفته‌است، کمیت‌های کرنش، تنش و میدان مغناطیسی همگی موازی با این جهت خواهند بود. بنابراین می‌توان اندیس ۳ را از معادلات (۸) و (۹) حذف کرد:

$$S = s^H T + dH \quad (13)$$

$$B = dT + \mu^T H \quad (14)$$

با حذف پارامتر H از رابطه اول و T را از رابطه دوم، روابط زیر به دست آورده می‌شوند:

$$S = s^B T + \frac{d}{\mu^T} B \quad (15)$$

$$B = \frac{d}{s^H} S + \mu^S H \quad (16)$$

که در این روابط s^B ضریب نرمی در شار مغناطیسی ثابت و μ^S ضریب تراوایی مغناطیسی در کرنش ثابت می‌باشند:

$$s^B = \frac{dS}{dT} \Big|_B = s^H \left(1 - \frac{d^2}{\mu^T S^H} \right) = s^H (1 - k^2) \quad (17)$$

$$\mu^S = \frac{dB}{dH} \Big|_S = \mu^T \left(1 - \frac{d^2}{\mu^T S^H} \right) = \mu^T (1 - k^2) \quad (18)$$

k همان ضریب جفت‌شدگی است که در رابطه (۱۲) تعریف شده و در محاسبه آن تمام اندیس‌های ۳ حذف شده‌اند.

۳- آزمایش‌های تجربی

در این مقاله از یک عملگر ترفنل-دی که به عنوان سوخت‌پاش ساخته شده‌است، استفاده شده تا آزمایش‌های مرتبط با عملگر (تنش و کرنش) انجام شوند [۱۰]. شکل ۱-الف شماتیک این سوخت‌پاش و قطعات به کاررفته در این عملگر را به صورت مجزا نشان می‌دهد. اجزای اصلی عملگر عبارتند از:

۱- میله ترفنل-دی: میله ترفنل-دی به کاررفته در این عملگر دارای طول ۵۰ میلی‌متر و قطر ۱۰ میلی‌متر می‌باشد.

۲- سیم‌پیچ تحریک: این سیم‌پیچ از ۱۲۰۰ دور سیم با قطر ۱ میلی‌متر ساخته شده‌است و توانایی عبور ۷ آمپر جریان را دارد.

هر ppm ۱۰۰ کرنش معادل $5 \mu\text{m}$ افزایش طول ماده می‌باشد. همانگونه که قبلاً اشاره شد، مقدار تنش در کرنش صفر را تنش محصور یا تنش مسدود می‌نامند. این مقدار، بیشترین تنشی است که توسط عملگر ترفنل-دی در هر میدان مغناطیسی معین تولید می‌شود. به عبارت دیگر در این نقطه از نمودارها می‌توان گفت که سختی عوامل محصورکننده عملگر به بی‌نهایت رسیده و کرنش ترفنل-دی صفر می‌شود. همان‌گونه که از شکل ۲ برمی‌آید، رابطه تنش و کرنش عملگر خطی نیست. غیرخطی بودن این رابطه از آنجا ناشی می‌شود که ضرایب دگرسانی مغناطیسی و انطباق الاستیکی ترفنل-دی ثابت نبوده و تابع شدت میدان مغناطیسی و تنش اعمالی است.

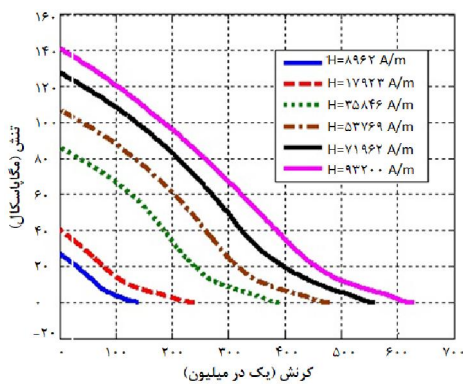


Fig. 2 Stress-strain behavior of Terfenol-D actuator

شکل ۲ رفتار تنش-کرنش عملگر ترفنل-دی

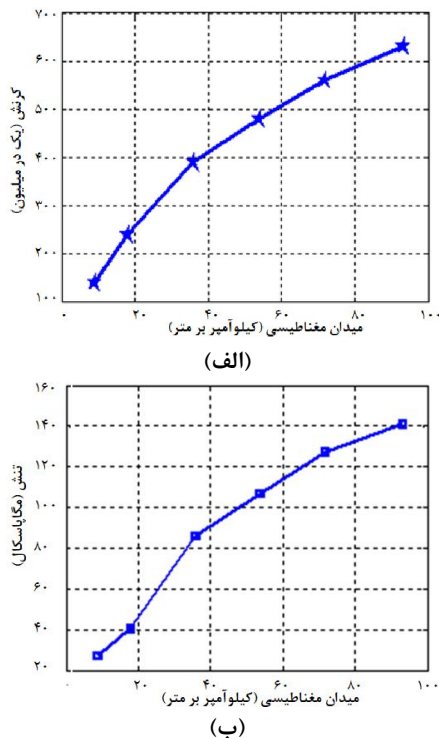


Fig. 3 Free strain (a) and blocked stress (b) of Terfenol-D actuator

شکل ۳ کرنش آزاد (الف) و تنش مسدود (ب) عملگر ترفنل-دی

۲- عملگر ترفنل-دی: از سوخت‌پاش اشاره شده در بالا استفاده شده است.

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

۴- کرنش‌سنج طولی متصل به ترفنل-دی به همراه مبدل اطلاعات^۱ مربوطه (مدل DC-97A محصول شرکت TML): برای اندازه‌گیری کرنش ایجاد شده در ترفنل-دی به هنگام اعمال میدان مغناطیسی طولی و تنش مکانیکی استفاده شده است.

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

۶- رایانه: جهت ذخیره نمودن داده‌های دیجیتال، کاهش نرم‌افزاری نویز و تبدیل داده‌های خام به کمیت‌های هدف استفاده می‌شود.

در هر آزمایش، ابتدا با استفاده از یک منبع تغذیه، یک جریان مشخص به سیم‌پیچ تحریک عملگر اعمال می‌شود که موجب ایجاد یک میدان مغناطیسی ثابت و افزایش طول ترفنل-دی می‌شود. این افزایش طول، توسط کرنش‌سنج طولی متصل به ترفنل-دی اندازه‌گیری می‌شود. سپس کنگی دستگاه کشش به حرکت درآمده و در مدت زمان مشخصی نیروی وارده به عملگر از صفر تا مقدار مسدود 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 کرنش‌سنج) می‌توان رفتار تنش-کرنش عملگر ترفنل-دی را به دست آورد.

۴- نتایج

۴-۱- رفتار تنش-کرنش عملگر

شکل ۲ رفتار تنش-کرنش عملگر را در مقادیر مختلف میدان مغناطیسی نشان می‌دهد. در یک مقدار مشخص شدت میدان مغناطیسی، ابتدا نیرویی به عملگر وارد نمی‌شود و در نتیجه عملگر دارای بیشترین مقدار کرنش در آن مقدار از 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. با توجه به ابعاد ترفنل-دی به کار رفته در این عملگر، هر 10 MPa تنش معادل $785/4 \text{ N}$ نیرو و

¹ Data logger

مثبت در نظر گرفته شده‌اند. به بیان دیگر در هر میدان مغناطیسی مشخص، با محاسبه تنش‌های اولیه، میانی و نهایی از روابط جدول ۱ و سپس محاسبه مقادیر s^H و d در تنش‌های به دست آمده از روابط جداول ۲ و ۳، می‌توان در هر تنش دیگری و با تقریب قابل قبول خطی، مقادیر s^H و d را محاسبه نمود.

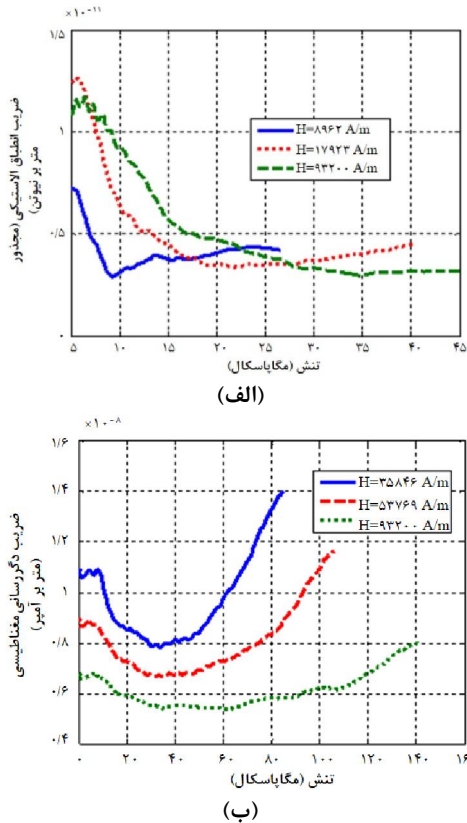


Fig. 4 Elastic compliance (a) and magnetostriction (b) coefficients for different values of magnetic field intensity

شکل ۴ ضریب انطباق الاستیکی (الف) و ضریب دگرسانی مغناطیسی (ب) به ازای چند میدان مغناطیسی مختلف

Tab. 1 The linear fitted relations to determine values of stress at initial, middle and final points

جدول ۱ روابط خطی برازش شده بر نتایج تجربی جهت تعیین مقادیر تنش اولیه، میانی و نهایی بر حسب شدت میدان مغناطیسی

| | تنش اولیه (MPa) | تنش میانی (MPa) | تنش نهایی (MPa) |
|-----------|-----------------|----------------------|---------------------|
| رابطه خطی | 0 | $0.0005161H + 9.607$ | $0.001407H + 21.93$ |
| R-squared | 1 | 0.9023 | 0.9545 |

Tab. 2 The linear fitted relations to determine elastic compliance coefficient at at initial, middle and final values of stress

جدول ۲ روابط خطی برازش شده بر نتایج تجربی جهت تعیین مقادیر ضریب انطباق الاستیکی در تنش اولیه، میانی و نهایی بر حسب میدان مغناطیسی

ضریب انطباق الاستیکی (m^2/N) در:

| | تنش اولیه | تنش میانی | تنش نهایی |
|-----------|---|--|---|
| رابطه خطی | $(-6.334 \times 10^{-17})H + (1.227 \times 10^{-11})$ | $(-3.442 \times 10^{-18})H + (2.47 \times 10^{-12})$ | $(-1.018 \times 10^{-17})H + (6.348 \times 10^{-12})$ |
| R-squared | 0.8669 | 0.8579 | 0.8342 |

شکل ۳- الف، کرنش آزاد عملگر ترفنل-دی را در مقادیر مختلف شدت میدان مغناطیسی و شکل ۳- ب، تنش مسدود عملگر ترفنل-دی را در مقادیر مختلف شدت میدان مغناطیسی نشان می‌دهد. نحوه تغییرات این دو کمیت با شدت میدان مغناطیسی خطی نیست. غیرخطی بودن، هم به خاطر ثابت نبودن مقادیر ضرایب دگرسانی مغناطیسی و انطباق الاستیکی و هم به خاطر تغییر مقدار تراوایی مغناطیسی با افزایش شدت میدان مغناطیسی می‌باشد. با تغییر مقدار تراوایی مغناطیسی، چگالی شار عبوری گذرنده از ترفنل-دی و در نتیجه سطح مغناطیس‌شوندگی آن تغییر نموده و موجب غیرخطی شدن کرنش و تنش می‌شود.

۴-۲- ضرایب انطباق الاستیکی و دگرسانی مغناطیسی

در قسمت قبل رفتار تنش-کرنش ترفنل-دی در مقادیر مختلف میدان مغناطیسی به صورت تجربی به دست آمد و در شکل ۲ نمایش داده شد. با توجه به رابطه (۵-۲) می‌توان ضریب انطباق الاستیکی (s^H) را از طریق مشتق‌گیری عددی کرنش نسبت به تنش به دست آورد و سپس ضریب دگرسان مغناطیسی (d) را با توجه به رابطه (۱۳) محاسبه نمود. مقادیر محاسبه شده s^H و d در چند میدان مغناطیسی مختلف در شکل‌های ۴- الف و ۴- ب نمایش داده شده‌اند. با توجه به این نمودارها می‌توان دریافت که در یک میدان مغناطیسی ثابت، s^H و d مقدار ثابتی ندارند و با توجه به مقدار تنش وارده به عملگر تغییر می‌کنند. روند تغییرات این دو ضریب این گونه است که در ابتدا با افزایش تنش از صفر تا یک نقطه مشخص کاهش می‌یابند و سپس با افزایش تنش تا رسیدن به مقدار نهایی (تنش در حالت کاملاً بسته) افزایش می‌یابند.

با انجام برازش خطی، مقادیر تنش‌های مذکور در نقاط اولیه، میانی و صفر بر حسب شدت میدان مغناطیسی به دست آورده شده و در جدول ۱ نشان داده شده‌اند. در هر مقدار از این تنش‌ها و با انجام برازش خطی بر روی نتایج تجربی نشان داده شده در اشکال ۴- الف و ۴- ب، روابط خطی بر حسب شدت میدان مغناطیسی به منظور محاسبه ضرایب انطباق الاستیکی و دگرسان مغناطیسی به دست آورده شده‌اند که به ترتیب در جداول ۲ و ۳ نمایش داده شده‌اند. لازم به ذکر است که در همه روابط خطی نشان داده شده در جداول ۱ تا ۳، شدت میدان مغناطیسی (H) باید بر حسب آمپر بر متر جایگذاری شود.

در این تحقیق، تغییرات s^H و d با تنش اعمالی در یک میدان مغناطیسی ثابت، به صورت خط‌هایی با شیب منفی و

می‌دهد. مقدار میانگین خطاها در میدان مغناطیسی ۱۷۹۲۳، ۵۳۷۶۹ و ۹۳۲۰۰ آمپر بر متر به ترتیب برابر با ۱/۴۲٪، ۳/۱۱٪ و ۳/۲۳٪ می‌باشد. با توجه به مقدار کم خطاها به نظر می‌رسد که تقریب خطی استفاده‌شده برای s^H و d دقت قابل قبولی دارد.

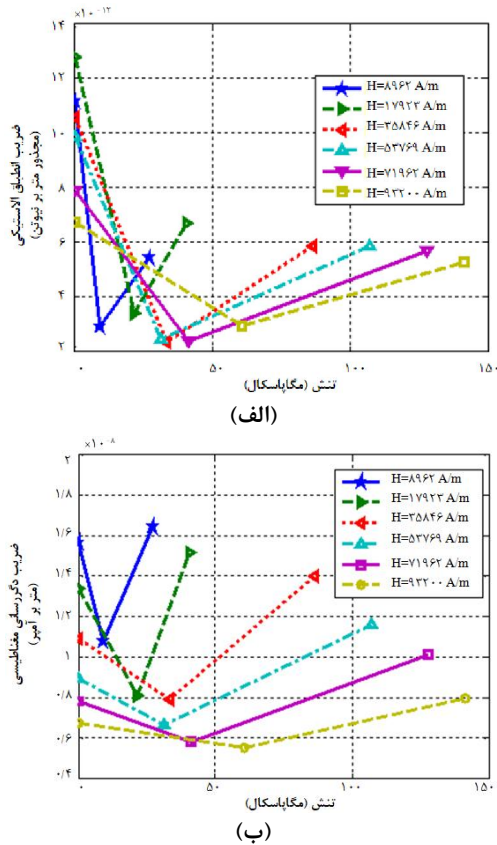


Fig. 6 Linear approximations for Elastic compliance (a) and magnetostriction (b) coefficients

شکل ۶ تقریب‌های خطی برای ضریب انطباق الاستیکی (الف) و ضریب دگرسانی مغناطیسی (ب)

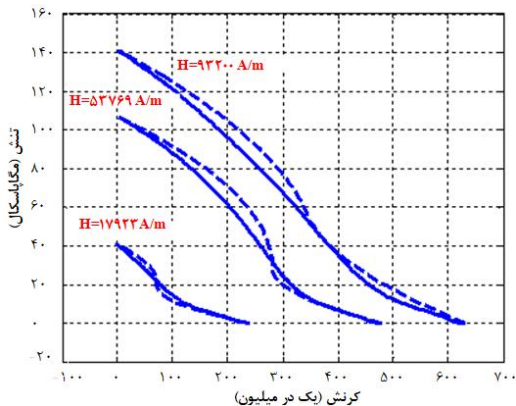


Fig. 7 Stress-strain behavior of Terfenol-D actuator (continuous lines are experimental results and dashed lines are theoretical results obtained using linear approximations for Terfenol-D coefficients)

شکل ۷ رفتار تنش-کرنش ترفنل-دی (نمودارهای پیوسته نتایج تجربی هستند و نمودارهای خط چین نتایج حاصل از مدل‌سازی با تقریب‌های خطی برای ضرایب معادلات هستند)

Tab. 3 The linear fitted relations to determine magnetostrictive coefficient at at initial, middle and final values of stress

جدول ۳ روابط خطی برآزش شده بر نتایج تجربی جهت تعیین مقادیر ضریب دگرسانی مغناطیسی در تنش اولیه، میانی و نهایی بر حسب میدان مغناطیسی

| ضریب دگرسانی مغناطیسی (m/A) در: | | |
|--|--|--|
| تنش اولیه | تنش میانی | تنش نهایی |
| $(-1.009 \times 10^{-13})H + (1.535 \times 10^{-8})$ | $(-5.443 \times 10^{-14})H + (1.002 \times 10^{-8})$ | $(-1.013 \times 10^{-13})H + (1.736 \times 10^{-8})$ |
| R-squared 0.9253 | 0.8281 | 0.9933 |

مقادیر s^H و d در سه مقدار تنش (مقدار صفر، مقدار میانی و مقدار نهایی) در شکل‌های ۵-الف و ۵-ب نشان داده شده‌اند. همچنین تقریب‌های خطی به کار رفته در شکل‌های ۶-الف و ۶-ب نمایش داده شده‌اند.

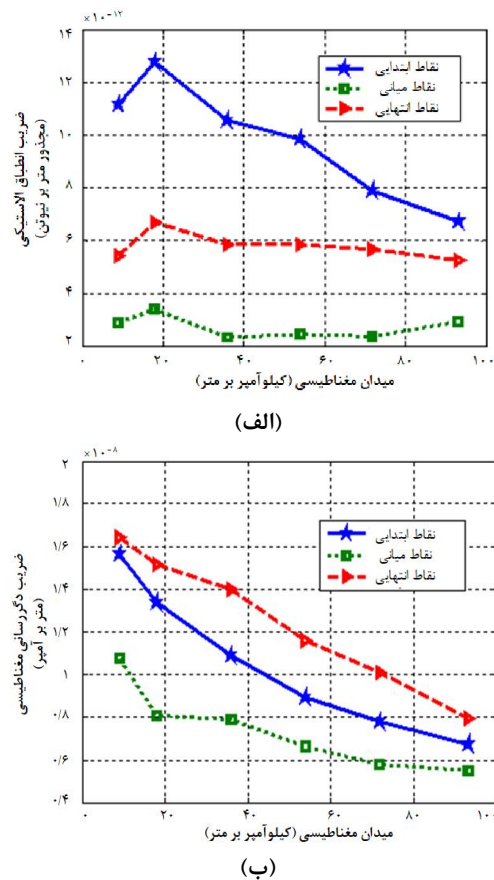


Fig. 5 Elastic compliance (a) and magnetostriction (b) coefficients in initial, middle and final values of stress

شکل ۵ ضریب انطباق الاستیکی (الف) و ضریب دگرسانی مغناطیسی (ب) در تنش صفر، تنش میانی و تنش حداکثر

برای اطمینان از صحت تقریب‌های خطی، از آن‌ها به منظور پیش‌بینی کرنش ایجاد شده در تنش‌های مکانیکی مختلف به ازای یک میدان مغناطیسی ثابت استفاده شده‌است و کرنش‌های محاسبه‌شده با مقادیر تجربی مقایسه شده‌اند. شکل ۹ این نمودارها را در سه مقدار مختلف میدان مغناطیسی نمایش

۳-۴- ضرایب تراوایی مغناطیسی و جفت‌شدگی

برای محاسبه مقادیر تراوایی مغناطیسی در تنش ثابت μ^T ، تراوایی مغناطیسی در کرنش ثابت μ^S و ضریب جفت‌شدگی k در هر مقدار میدان مغناطیسی، از روابط (۱۵) و (۱۶) استفاده می‌شود. به منظور محاسبه μ^T در هر میدان مغناطیسی مشخص، کافی است که مقادیر کرنش، چگالی شار مغناطیسی و ضریب دگرسانی مغناطیسی در آن میدان مغناطیسی و تنش صفر به دست آورده شوند. در میدان مغناطیسی مشخص و تنش صفر، مقدار کرنش از نمودار ۳-الف و ضریب دگرسانی مغناطیسی از نمودار ۳-ب به دست می‌آید. هنگامیکه مقدار μ^T محاسبه شود، میتوان μ^S را نیز از رابطه (۱۶) به دست آورد. مقادیر محاسبه شده μ^T و μ^S در میدان‌های مغناطیسی مختلف در شکل ۸-الف نشان داده شده‌است. با توجه به رابطه (۱۸) می‌توان مقادیر ضریب جفت‌شدگی مغناطیسی-مکانیکی (k) را در میدان‌های مغناطیسی مختلف محاسبه کرد که نتایج در شکل ۸-ب نشان داده شده‌اند. مقدار k در ابتدا با افزایش میدان مغناطیسی کاهش و سپس افزایش می‌یابد.

۵- صحت‌سنجی مدل پیشنهادی

هم‌اکنون می‌توان از روابط (۱۵) و (۱۶) استفاده کرد تا کرنش و شار مغناطیسی گذرنده از ترفنل-دی را در پیش‌بارهای مکانیکی و میدان‌های مغناطیسی مختلف محاسبه کرد. برای این منظور در ابتدا باید با توجه به تقریب‌های خطی گفته شده در بالا مقادیر d و s^H در پیش‌بار مکانیکی و میدان مغناطیسی مورد نظر محاسبه شود. سپس با توجه به رابطه (۱۲) و این که مقدار μ^T در میدان‌های مغناطیسی مختلف محاسبه شده‌اند (در شکل ۸-الف نمایش داده شده‌اند)، مقدار k را محاسبه نموده و در روابط زیر قرار داد:

$$S = (1 - k^2)s^HT + \frac{d}{\mu^T}B \quad (19)$$

$$B = \frac{d}{s^H}S + (1 - k^2)\mu^TH \quad (20)$$

با توجه به روال گفته شده در بالا، کرنش و شار مغناطیسی گذرنده از ترفنل-دی در سه مقدار پیش‌بار مکانیکی ۳/۱۲، ۶/۲۴ و ۹/۳۶ مگاپاسکال و مقادیر مختلف میدان مغناطیسی محاسبه شده‌اند و با نتایج تجربی مقایسه شده‌اند. شکل ۹-الف مقادیر کرنش‌های تجربی و تئوری و شکل ۹-ب مقادیر چگالی شار مغناطیسی تجربی و تئوری را نشان می‌دهند. جدول ۴ مقادیر میانگین خطاها بین داده‌های تجربی و تئوری را نشان می‌دهد.

Tab. 4 Mean error between experimental and theoretical results at different values of mechanical pre-stress

جدول ۴ خطای میانگین بین نتایج تجربی و تئوری در پیش‌بینی کرنش و چگالی شار مغناطیسی ترفنل-دی در مقادیر مختلف پیش‌تنش مکانیکی

| | | | |
|-----------------------------|------|------|------|
| پیش‌تنش مکانیکی (مگاپاسکال) | ۳/۱۲ | ۶/۲۴ | ۹/۳۶ |
| درصد خطای میانگین در محاسبه | ۲/۷ | ۲/۱ | ۳/۴ |
| چگالی شار مغناطیسی | | | |
| درصد خطای میانگین در محاسبه | ۱/۴ | ۲/۲ | ۳ |
| کرنش | | | |

با توجه به این که روابط خطی تقریب زده شده برای ضرایب ماده از اطلاعات تجربی موجود در شکل ۲ (که رفتار تنش-کرنش ترفنل-دی را در شش میدان مغناطیسی مختلف نشان می‌دهد) به دست آورده شده‌اند، برای صحت‌سنجی این روابط از آنها برای پیش‌بینی رفتار تنش-کرنش در سه میدان مغناطیسی جدید استفاده شده است. بدین منظور ابتدا در هر مقدار میدان مغناطیسی جدید، مقدار تنش میانی و تنش نهایی با به کارگیری روابط جدول ۱ محاسبه می‌شود، سپس با توجه به روابط جداول ۲ و ۳، مقادیر s^H و d در تنش صفر، تنش میانی و تنش نهایی محاسبه می‌شود. در نتیجه روند تغییرات خطی

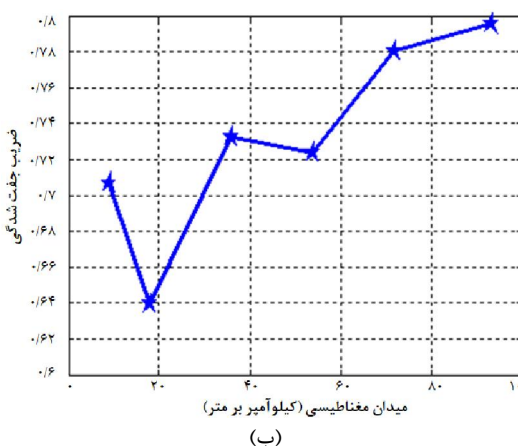
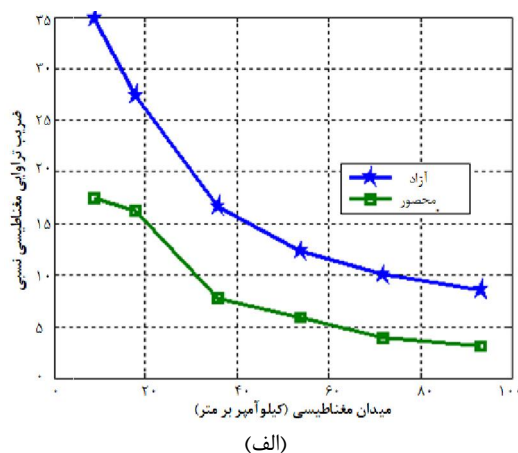


Fig. 8 Relative magnetic permeability at free and blocked states (a) and coupling factor at different values of magnetic flux intensity (b)

شکل ۸ تراوایی مغناطیسی نسبی در حالت آزاد و بسته (الف) و ضریب جفت‌شدگی (ب) در مقادیر مختلف میدان مغناطیسی

جفت‌شدگی ترفنل دی و پیش‌بینی رفتار مکانیکی (منحنی تنش-کرنش) و مغناطیسی (منحنی شدت میدان مغناطیسی-شار مغناطیسی) ماده در شرایط کاری مختلف ارائه شد. با توجه به نتایج می‌توان دریافت که:

- در یک میدان مغناطیسی ثابت، ضرایب دگرسانی مغناطیسی و انطباق الاستیکی مقدار ثابتی ندارند و با توجه به مقدار تنش وارده به عملگر تغییر می‌کنند. روند تغییرات این دو ضریب بدین گونه‌است که در ابتدا با افزایش تنش از صفر تا یک نقطه مشخص کاهش می‌یابند و سپس با افزایش تنش تا رسیدن به مقدار مسدود افزایش می‌یابند.

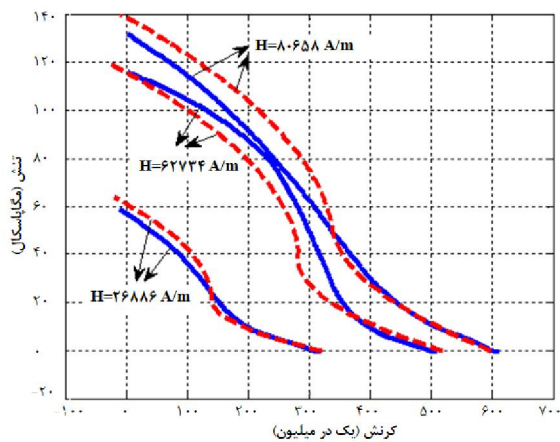


Fig. 10 Stress-strain behavior of Terfenol-D actuator (continuous lines are experimental results and dashed lines are theoretical results obtained by using linear approximations for Terfenol-D coefficients)

شکل ۱۰ رفتار تنش-کرنش ترفنل دی (نمودارهای پیوسته نتایج تجربی هستند و نمودارهای خط‌چین نتایج حاصل از مدل‌سازی با تقریب‌های خطی برای ضرایب معادلات هستند)

- با افزایش شدت میدان مغناطیسی چه در حالت آزاد و چه در حالت محصور، ضریب تراوایی مغناطیسی ترفنل-دی کاهش می‌یابد، اگر چه در یک میدان مغناطیسی ثابت، ضریب تراوایی مغناطیسی در حالت آزاد همواره بزرگتر از همان ضریب در حالت محصور می‌باشد. ضریب جفت‌شدگی نیز ابتدا تا شدت میدان مغناطیسی ۲۰ kA/m کاهش می‌یابد و سپس با افزایش شدت میدان مغناطیسی تا حالت اشباع (۹۳ kA/m) افزایش می‌یابد.

- در این مقاله از تقریب‌های خطی جهت پیش‌بینی تغییرات ضرایب دگرسانی مغناطیسی و انطباق الاستیکی استفاده شد. در هر میدان مغناطیسی مشخص، با استخراج مقادیر d و S^H سه مقدار تنش (مقدار صفر، مقدار میانی و مقدار نهایی) از روی نتایج تجربی، مقادیر این ضرایب در تنش‌های دیگر به دست آورده شد و صحت اولیه این مدل‌سازی با مقایسه با منحنی‌های

این ضرایب با مقدار تنش در آن میدان مغناطیسی مشخص به دست می‌آید. در مرحله بعد با استفاده از رابطه (۱۳) مقدار کرنش به ازای تغییرات تنش به دست می‌آید. نتایج حاصل از مدل‌سازی در سه میدان مغناطیسی جدید ۲۶۸۸۶، ۶۲۷۳۴ و ۸۰۶۵۸ آمپر بر متر در شکل ۱۰ نشان داده شده‌اند. برای ارزیابی دقت نتایج به دست‌آمده، آن‌ها با نتایج تجربی در همان مقادیر میدان مغناطیسی مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. میانگین خطاها در مدل ارائه شده در میدان‌های مغناطیسی ۲۶۸۸۶، ۶۲۷۳۴ و ۸۰۶۵۸ آمپر بر متر به ترتیب برابر با ۰/۲/۸، ۰/۴/۷ و ۰/۴/۵ است.

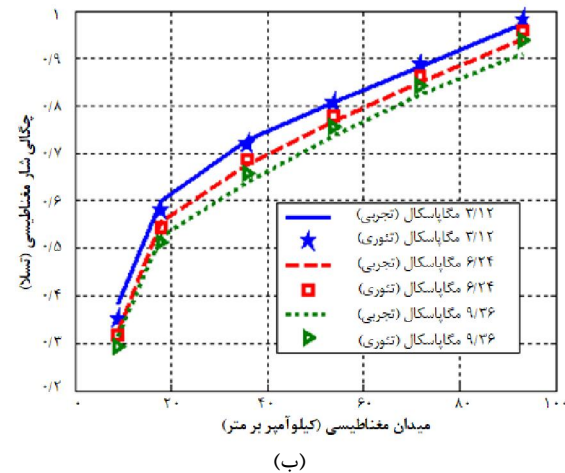
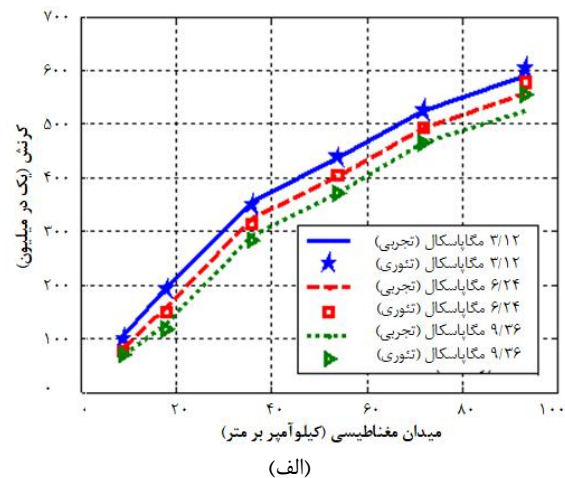


Fig. 9 Strain (a) and magnetic flux density (b) of Terfenol-D at different values of Mechanical pre-stress

شکل ۹ کرنش ترفنل-دی (الف) و چکالی شار مغناطیسی گذرنده از ترفنل-دی (ب) در میدان‌های مغناطیسی مختلف به ازای چند مقدار پیش‌تنش مکانیکی

۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق یک مدل تجربی-تحلیلی جهت محاسبه ضرایب انطباق الاستیکی، دگرسانی مغناطیسی، تراوایی مغناطیسی و

- investigation of a Terfenol-D transducer, *Proceedings of SPIE's 6th Annual International Symposium on Smart Structure and Materials*, Newport Beach, CA, United States, June 9-11, 1999.
- [2] T. Honda, Y. Hayashi, M. Yamaguchi and K. I. Arai, Fabrication of thin-film actuators using magnetostriction, *IEEE Translation Journal on Magnetism*, Vol. 9, pp. 27-32, 1994 .
- [3] B. Bhattacharya, Terfenol and Galfenol smart magnetostrictive metals for intelligent transducer, *Journal of Indian Institute of Technology Kanpur*, Vol. 7, pp. 33 – 41, 2005.
- [4] A. Grunwald and A. G. Olabi., Design of a Magnetostrictive (MS) actuator, *Journal of Sensors and Actuators: A Physical*, Vol. 144, pp. 161-175, 2008.
- [5] A. G. Olabi and A. Grunwald, Design and application of magnetostrictive materials, *Journal of Materials & Design*, Vol. 29, Issue 2, pp. 469-483, 2008.
- [6] F. Claeysen, N. Lhermet and T. Maillard, Magnetostrictive actuators compared to piezoelectric actuators, *Proceedings of SPIE 4763, European Workshop on Smart Structures in Engineering and Technology*, Giens, France, March 13-15, 2003.
- [7] Ken-ichi Yamamoto, Hironobu Nakano and Yasumasa Yamashiro, Effect of compressive stress on hysteresis loss of Terfenol-D, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 254, pp. 222–224, 2003.
- [8] M. Goodfriend and K. Shoop, Adaptive characteristics of the magnetostrictive alloy, Terfenol-D, for active vibration control, *Journal of Intelligent Materials Systems and Structures*, Vol. 3, pp. 245–54, 1992.
- [9] S. Karunanidhi, M. Singaperumal, Design, analysis and simulation of magnetostrictive actuator and its application to high dynamic servo valve, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 157, Issue 2, pp. 185-197, 2010.
- [10] Mojtaba Ghodsi, Nasser Hosseinzadeh, Abdullah Özer, Hamid Rajabzadeh Dizaj, Nader Garjasi Varzeghani, Development of Gasoline Direct Injector Using Giant Magnetostrictive Materials, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 53, Issue 1, pp. 521-529, 2017.
- [11] Le Sun, Xiaojing Zheng, Numerical simulation on coupling behavior of Terfenol-D rods, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 43, Issue 6, pp. 1613-1623, 2006.
- [12] M. J. Dapino, A. B. Flatau, F. T. Calkins, Statistical Analysis of Terfenol-D Material Properties, *Journal of Intelligent Materials Systems and Structures*, Vol. 17, Issue 7, pp. 587-599, 2006.
- [13] Da-Guang Zhang, Meng-Han Li, and Hao-Miao Zhou, A general one-dimension nonlinear magneto-elastic coupled constitutive model for magnetostrictive materials, *AIP Advances*, Vol. 5, Issue 10, 2015.
- [14] O. Bottauscio, M. Chiampi, A. Lovisolo, P. E. تجربی اولیه تایید شد. بیشترین خطای مشاهده شده در این مرحله، کمتر از ۴٪ و مربوط به میدان مغناطیسی ۹۳ kA/m می باشد. در مرحله بعد، از تقریب های خطی به منظور محاسبه تنش- کرنش در سه مقدار جدید از شدت میدان مغناطیسی استفاده شد و بیشترین میانگین خطا ۴/۷٪ و در شدت میدان ۶۲ kA/m به دست آمد. با توجه به مقدار کم خطاها می توان از صحت تقریب های خطی اطمینان حاصل کرد و از مدل ارائه شده جهت محاسبه ضرایب عملکردی ترفنل-دی به منظور پیش بینی رفتار تنش-کرنش ماده بهره جست.
- صحت سنجی نهایی مدل ارائه شده، با پیش بینی کرنش و شار مغناطیسی گذرنده از ترفنل-دی به ازای تغییر شدت میدان مغناطیسی در سه مقدار متفاوت از پیش تنش مکانیکی و مقایسه نتایج حاصل با نتایج تجربی صورت پذیرفت. مقایسه نتایج نشان دهنده دقت بسیار خوب مدل است به نحوی که بیشترین خطای میانگین در محاسبه کرنش و شار مغناطیسی در پیش تنش ۹/۳۶ مگاپاسکال و به ترتیب ۳٪ و ۳/۴٪ مشاهده شد.
- در مدل مکانیکی-مغناطیسی ارائه شده و نیز آزمایش های تجربی انجام شده و به منظور حذف اثرات ناشی از پسماند مغناطیسی، شدت میدان مغناطیسی با فرکانسی کمتر از ۱۰ هرتز تغییر کرده است. بنابراین مدل ارائه شده در این بازه فرکانسی معتبر است. در فرکانس های بزرگتر، باید اثرات ناشی از افت های مغناطیسی و انتشار موج مکانیکی را نیز در نظر گرفت که می تواند موضوع پژوهش های آینده قرار بگیرد.

۷- فهرست علائم

| | |
|-------------|--|
| T | تنش |
| B | چگالی شار مغناطیسی |
| \emptyset | شار مغناطیسی |
| H | شدت میدان مغناطیسی |
| S^B | ضریب انطباق مکانیکی در شار مغناطیسی ثابت |
| S^H | ضریب انطباق مکانیکی در میدان مغناطیسی ثابت |
| μ_0 | ضریب تراوایی مغناطیسی خلا |
| μ^T | ضریب تراوایی مغناطیسی در تنش ثابت |
| μ^S | ضریب تراوایی مغناطیسی در کرنش ثابت |
| d | ضریب دگرسانی مغناطیسی |
| k | ضریب جفت شدگی مغناطیسی-مکانیکی |
| S | کرنش |

۸- مراجع

- [1] Rick Kellogg and Alison Flatau, Blocked force

- Analytical Formulas, *Materials (Basel)*, Vol. 4, No. 18, 2021.
- [17] Zhan Y.S and Lin C.H., A constitutive model of coupled magneto-thermo-mechanical hysteresis behavior for Giant Magnetostrictive Materials. *Mechanics of Materials.*, Vol. 148, 2020.
- [18] Pengpeng Shi, A Nonlinear Theoretical Model of Magnetization and Magnetostriction for Ferromagnetic Materials under Applied Stress and Magnetic Fields, *Chinese Physics Letters*, Vol. 37, No. 8, 2020.
- [19] G. Engdahl, Handbook of Giant Magnetostrictive Materials, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2000.
- Roccatto, and M. Zucca , Dynamic modeling and experimental analysis of Terfenol-D rods for magnetostrictive actuators, *Journal of Applied Physics*, Vol. 103, Issue 7, 2008.
- [15] M. Domenjoud, E. Berthelot, N. Galopin, R. Corcolle, Y. Bernard and L. Daniel, Characterization of giant magnetostrictive materials under static stress: influence of loading boundary conditions, *Smart Materials and Structures*, Vol. 28, No. 9, 2019.
- [16] Laurent Daniel and Mathieu Domenjoud, An hysteretic Magneto-Elastic Behavior of Terfenol-D: Experiments, Multiscale Modelling and