http://mme.modares.ac.ir

مجله علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

فوق‌العاده اسفند ۱۳۹۲، دوره ۱۳ شماره ۱۵ ص‌ص ۱۴۷-۱۵۸

مقاله پژوهشی کامل
تاریخ دریافت ۹۱/۱۲/۱۲
تاریخ پذیرش ۹۲/۵/۲
ارائه در سایت ۹۲/۱۱/۳۰

مطالعه عددی و تجربی بر روی حساسیت حسگر نیروی استاتیکی با استفاده از ماده اَبَرمگنتواستریکتیو ترفنل-دی

شاهد میرزامحمدی[۱]، مجتبی قدسی[۲*]، یوسف حجت[۳]، سهیل طالبیان[۴]

۱- دانشجوی دکترای مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید رجایی، تهران
۲- استادیار مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
۳- دانشیار مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
۴- دانشجوی دکترای مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
* تهران، صندوق پستی ۱۴۳- ۱۴۱۱۵، m.ghodsi@modares.ac.ir

چکیده- در این پژوهش پارامترهای مؤثر بر حساسیت حسگر نیروی مگنتواستریکتیو مورد بررسی قرار گرفته‌اند و یک حسگر نیروی مگنتواستریکتیو با حساسیت بسیار بالا طراحی و ساخته شده است. در ابتدا، مبانی عملکردی حسگرهای نیروی مگنتواستریکتیو ارائه شده است. سپس به طراحی مفهومی حسگر پرداخته شده و در خلال آن هندسه حسگر و مواد مورد نیاز در ساخت حسگر تعیین شدند. در قدم بعدی به اندازه‌گیری مشخصات هیسترزیس مغناطیسی مواد مورد استفاده و بهینه‌سازی این خواص مغناطیسی پرداخته شده است. بدین منظور منحنی هیسترزیس مغناطیسی آهن کم کربن آنیل نشده و آهن کم کربن آنیل شده تحت شدت جریان‌های مختلف و همچنین منحنی هیسترزیس مغناطیسی میله ترفنل-دی نوع یک‌پارچه تحت شدت جریان‌ها و پیش‌بارهای مختلف اندازه‌گیری شده است. سپس، با استفاده از نتایج تجربی به دست آمده، شبیه‌سازی عددی با نرم‌افزار المان محدود انجام گرفته و پارامترهای هندسی مؤثر بر حساسیت حسگر بهینه‌سازی شدند. در انتها حسگر نیروی مگنتواستریکتیو ساخته شد و حساسیت و مشخصات عملکردی آن در شرایط مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت. حسگر ساخته شده دارای خطای خطی‌پذیری ٪۲/۸ کل بازه و حساسیت ۰/۵۱ mV/N می‌باشد که در مقایسه با حسگرهای مگنتواستریکتیو مشابه مقدار بالاتری به شمار می رود.

کلیدواژگان: حسگر نیرو، مگنتواستریکتیو، مگنتوالاستیسیته، ترفنل-دی، هیسترزیس مغناطیسی.

Numerical and experimental study on sensitivity of static force sensor using giant magnetostrictive material

Sh. Mirzamohammadi[1], M. Ghodsi[2*], Y. Hojjat[3], S.Talebian[4]

1- PhD Student, Mech. Eng., Shahid Rajaei Univ., Tehran, Iran
2- Assist. Prof., Mech. Eng., Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran
3- Assoc. Prof., Mech. Eng., Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran
4- PhD Student, Mech. Eng., Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran
* P. O.B. 14115-143 Tehran, Iran. m.ghodsi@modares.ac.ir

Abstract- In this article, effective parameters on sensitivity of magnetostrictive force sensor are investigated and then a high sensitive magnetostrictive force sensor is designed and fabricated. Initially, the operational principles related to magnetostrictive force sensors are presented. Then, conceptual design of the sensor is illustrated and sensors geometry and applied materials are determined. In the next step, measurement of magnetic hysteresis and optimization of the magnetic properties through heat treatment are presented. To this end, magnetic hysteresis curves of not-annealed low carbon iron and annealed low carbon iron under different currents and magnetic hysteresis curve of bulk TERFENOL-D under different preloads and currents are obtained. Then, through numerical simulations using finite element method software, parameters affecting sensor sensitivity were identified and designed. Finally magnetostrictive force sensor is fabricated and its sensitivity and functional specifications are tested under different conditions. Linearity error of Magnetostrictive force sensor is 2.8% FSO and its sensitivity is 0.51mV/N, which is a higher value compared to similar magnetostrictive force sensors.

Keywords: Force Sensor, Magnetostrictive, Magnetoelasticity, Terfenol-D, Magnetic Hysteresis.

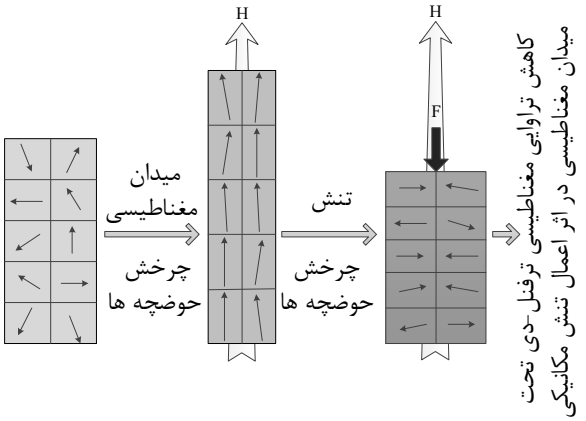
۱- مقدمه

مگنتواستریکشن به تغییر طول ماده فرومغناطیس هنگام قرارگیری در میدان مغناطیسی گفته می‌شود. تمام مواد فرومغناطیس کمابیش دارای خاصیت مگنتواستریکشن می‌باشند. مواد مگنتواستریکتیو قابلیت تبدیل انرژی مغناطیسی به انرژی مکانیکی (اثر ژول[1]) و بالعکس (اثر ویلاری[2]) را دارند. به همین دلیل یعنی کوپلینگ[3] بین حالت‌های مغناطیسی و مکانیکی، این مواد می توانند هم در عملگرها و هم در حسگرها به کار گرفته شوند.

حسگرهای نیروی مگنتواستریکتیو در مقایسه با سایر حسگرهای نیرو، مزایای متعددی دارند که می‌توان به ضریب کوپلینگ بالا میان حالت‌های الاستیک و مغناطیس (حدود ۰/۷)، توانایی تحمل بارهای سنگین، پاسخ زمانی کوتاه (در حدود چند میکروثانیه)، توانایی سازگاری با محیط‌های خشن، بدون مصرف انرژی و تولید حرارت کم اشاره کرد [۱]. موادی که در سنسورهای مگنتواستریکشن به‌کار برده می‌شوند معمولاً از جنس ورقه استیل سیلیکون، پرمالوی و آهن خالص الکتریکی و سایر مواد دیگر نرم مغناطیس هستند. کلینکه و همکارش حسگر نیروی استاتیکی مگنتواستریکتیو که در آن از استیل SAE ۱۰۱۸ استفاده شده بود را ارائه دادند [۲]. فیتزجرالد و همکارانش از یک سیستم سیم پیچ منفرد "خود اندوکتانس[4]" برای اندازه‌گیری تراوایی مغناطیسی ماده فرومغناطیسی استفاده کردند. اندوکتانس مدار تابعی از تراوایی مغناطیسی فلز می‌باشد که برای اندازه‌گیری نیرو استفاده می‌شد [۳]. باودِندیستِل در پایان‌نامه دکتری، پژوهشی بر روی حسگر نیروی مگنتواستریکتیو جهت استفاده در سیستم ترمز خودرو انجام داده که در آن از آلیاژهای مختلف آهن-نیکل استفاده شده است که برای اندازه‌گیری نیرو، اندوکتانس حسگر اندازه‌گیری می‌شد [۴].

ضریب مگنتواستریکشن این مواد که در حسگرهای فوق استفاده می شوند، بسیار اندک و به همین دلیل حساسیت این سنسورها بسیار پایین است. به همین دلیل در سال‌های اخیر برای ساخت نیروسنج‌ها، گرایش به استفاده از مواد ابرمگنتواستریکتیو مانند ترفنل-دی افزایش یافته است. ترفنل-دی[5] آلیاژ آهن، تریبیوم و دسپرسیوم است و اولین بار در سال ۱۹۷۵ به سفارش نیروی دریایی ایالات متحده در کمپانی کلارک ساخته شده است. هر سه عنصر پایه این آلیاژ، خودشان نیز فرومغناطیس هستند. فرمول کلی این آلیاژ به صورت $Tb_xD_{1-x}Fe_y$ در مراجع ذکر شده است ($1/9<y<1/95$، $0/27<x<0/3$) [۵]. در دو دهه اخیر استفاده از نیروسنج‌های دارای ترفنل-دی مورد توجه قرار گرفته است.

ترفنل-دی دارای مگنتواستریکشن مثبت می‌باشد. همان طور که در شکل ۱ به طور شماتیک نشان داده شده، هنگامی که میله ترفنل-دی در حالت آزاد است، حوضچه‌های مغناطیسی به صورت کاتوره‌ای[6] در سراسر ماده وجود دارند (شکل سمت چپ). اگر میله ترفنل-دی تحت میدان مغناطیسی قرار گیرد، دچار مغناطیس شدگی می‌شود و پدیده ژول (مگنتواستریکشن) رخ می‌دهد که در آن حوضچه‌های مغناطیسی در راستای میدان مغناطیسی چرخش می‌کنند و طول ماده افزایش می‌یابد (شکل میانی). حال اگر میله ترفنل-دی در معرض نیروی مکانیکی قرار گیرد، به دلیل به‌وجود آمدن تنش مکانیکی در ماده ترفنل-دی، پدیده ویلاری (عکس مگنتواستریکشن) رخ می‌دهد که در آن حوضچه‌های مغناطیسی به جهت عمود بر میدان مغناطیسی چرخش می‌کنند و تراوایی مغناطیسی نسبی میله ترفنل-دی کاهش می‌یابد (شکل راست).



شکل ۱ شماتیک وقوع پدیده ژول و ویلاری در میله ترفنل-دی

1. Joule Effect
2. Villari Effect
3. Coupling
4. Self-Inductance

5. Terfenol-D
6. Random

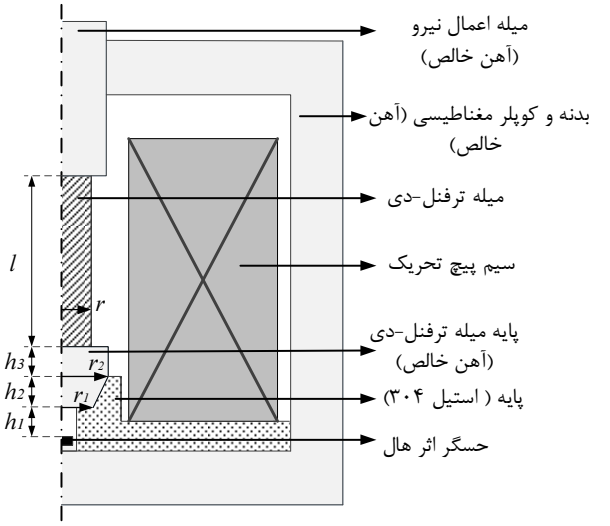
بنابراین شار مغناطیسی گذرنده از میله ترفنل-دی کاهش یافته و با اندازه‌گیری چگالی شار مغناطیسی می‌توان به نیروی اولیه پی برد.

پژوهش بر روی نیروسنج ترفنل-دی از اواسط دهه ۹۰ میلادی آغاز شده است. چاک‌رابورتی و همکارش مطالعه تجربی بر روی القای مغناطیسی ناشی از اعمال نیروی دینامیکی خارجی به میله ترفنل-دی انجام داده‌اند [۶]. یانگ و همکارانش حسگر نیروی مگنتواستریکتیو با استفاده از ترفنل-دی را گسترش داده و مدل کوپل قوی المان محدود مگنتومکانیکی را ارائه دادند [۷]. جیا و همکارانش در مورد یک حسگر نیروی دینامیکی مگنتواستریکتیو با استفاده از ماده ترفنل-دی گزارشی را ارائه داده‌اند. بین رفتار خروجی حسگر و پیش بینی مدل $\pi/9$ اختلاف فاز وجود داشت که دلیل آن، افت جریان گردابه‌ای ذکر شده است [۸]. همچنین گزارشی از هیسترزیس و تأثیر آن و همچنین تأثیر پیش تنش مکانیکی و نیز میزان خطا و خطی‌پذیری حسگر ارائه نشده است. در پژوهش دیگر، آقای جیا و همکارانش حسگر نیروی استاتیکی مگنتواستریکتیو با استفاده از ماده ترفنل-دی را ارائه داده‌اند. که حساسیت حسگر آن‌ها به میزان ۰/۴mV/N بود که بیشتر از پژوهش‌های پیشین بوده است [۱].

آنچه که از بررسی تحقیقات انجام شده در این زمینه استنباط می‌شود این است که تاکنون در زمینه ساخت نیروسنج استاتیکی ترفنل-دی مطالعه جامعی صورت نپذیرفته است و تأثیر شرایط کارکردی حسگر از قبیل پیش تنش مکانیکی بر روی حساسیت حسگر بررسی نشده است. از سوی دیگر اثرات مشخصات هندسی حسگر و مواد به کار رفته در ساخت حسگر نیز مطالعه نشده است. به همین دلیل در مقاله حاضر، تأثیر شرایط کارکردی حسگر، مواد به کار رفته و مشخصات هندسی حسگر بر روی حساسیت و خطی پذیری آن مورد بررسی قرار گرفته است و مقادیر بهینه این پارامترها معرفی شده‌اند.

۲- طراحی حسگر نیروی مگنتواستریکتیو

همان‌طور که در شکل ۲ به طور شماتیک نشان داده شده است، ساختار کلی حسگر مگنتواستریکتیو بایستی شامل مواردی باشد که در ادامه به تشریح هرکدام پرداخته می‌شود.



شکل ۲ هندسه پیشنهادی حسگر نیروی مگنتواستریکتیو

میله ترفنل-دی که در محور مرکزی حسگر قرار دارد، هنگامی که در معرض تنش فشاری قرار می‌گیرد، با تغییر در تراوایی مغناطیسی (پدیده ویلاری) باعث تغییر در عبور چگالی شار مغناطیسی می‌شود که این تغییرات توسط حسگر اثر هال که در مدار مغناطیسی به‌طور سری قرار دارد اندازه‌گیری می‌شود. تراوایی نسبی مغناطیسی ماده ترفنل-دی بسیار کم و در حدود ۲۰ تا ۳ می‌باشد [۹،۱]. به دلیل این‌که تراوایی نسبی مغناطیسی این ماده پایین است، کوپلر مغناطیسی و به خصوص اجزای بالایی و پایینی در تماس با میله ترفنل-دی بایستی از ماده‌ای با تراوایی مغناطیسی بالا و همچنین افت مغناطیسی کم انتخاب شود تا اینکه بیشترین شار مغناطیسی از میله ترفنل-دی عبور داده شود تا تغییراتی که در اثر اعمال تنش هنگام عبور شار مغناطیسی از میله ترفنل-دی و همچنین حسگر اثر هال ایجاد می‌شود در بیشترین مقدار ممکن باشد. با توجه به خواص مورد نیاز، آهن کم کربن که دارای تراوایی مغناطیسی نسبتاً بالایی است، کاندیدای مناسبی می‌باشد [۱۰]. سیم‌پیچ تحریک حول محور مرکزی ترفنل-دی پیچیده می‌شود که باعث ایجاد میدان مغناطیسی می‌شود. رینگ پایینی که به صورت محیطی حسگر اثر هال را در بر می‌گیرد، برای ایجاد فضای خالی جهت قرارگیری حسگر اثر هال لازم می‌باشد. برای گذر دادن بیشترین شار مغناطیسی از درون حسگر اثر هال، جنس پولاد ضدزنگ سری ۳۰۴ که تراوایی مغناطیسی نسبی آن نزدیک به ۱ است [۱]، برای آن پیشنهاد می‌شود. اگر از جنس آهن کم کربن برای ساخت آن استفاده

شود، تمام شار مغناطیسی از درون رینگ عبور می‌کند و از حساسیت حسگر کاسته می‌شود. تمامی پارامترهای قابل تغییر در هندسه حسگر نیروی مگنتواستریکتیو در شکل ۲ نشان داده شده است. این پارامترها بایستی جهت دست‌یابی به بیشترین حساسیت حسگر طراحی و انتخاب شوند که در بخش شبیه-سازی عددی بررسی خواهند شد.

برای طراحی هندسه مدار مغناطیسی با هدف بیشینه سازی حساسیت حسگر، نیاز است که خواص مغناطیسی آهن کم کربن و میله ترفنل-دی از طریق آزمایش‌های تجربی شناخته شود تا هندسه بهینه حسگر توسط شبیه‌سازی عددی به‌دست آید. در برخی موارد نیز به جهت ارتقای خواص مغناطیسی نیاز است که توسط عملیات حرارتی به این هدف دست یافت.

۳- بهبود و شناخت خواص مواد

۳-۱- بهبود و شناخت خواص آهن کم کربن

آهن موجود با ۰/۰۱۳۰۸ درصد کربن، از درجه خلوص بالایی برخوردار است و بر اساس استاندارد ASTM A 848/M-96 به عنوان آهن کم کربن شناخته می‌شود. برای آزمایش هیسترزیس مغناطیسی، بر اساس استاندارد / ASTM A596 A596M-96، اگر نمونه حلقه‌ای ساخته شده از ماده فرومغناطیس یکی از شرایط روابط (۱) یا (۲) را داشته باشد می‌تواند نماینده خواص مغناطیسی کل ماده باشد.

$$\frac{D_i}{D_o}>0.82 \qquad (۱)$$

$$\frac{D_m}{t}>10 \qquad (۲)$$

که در فرمول‌های فوق، D_i قطر داخلی، D_o قطر بیرونی، D_m قطر میانگین و t ضخامت شعاعی مربوط به نمونه‌های شاهد مغناطیسی می‌باشند. برای آزمایش هیسترزیس مغناطیسی، دو نمونه شاهد حلقه‌ای با ابعاد موجود در جدول ۱ ساخته شده است.

جدول ۱ ابعاد حلقه‌های شاهد آزمایش منحنی هیسترزیس مغناطیسی آهن کم کربن

قطر بیرونی	۲۶ mm
قطر درونی	۲۲ mm
ضخامت طولی	۲ mm

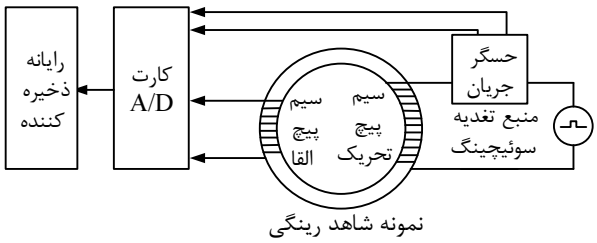
آهن کم کربن در فرایند تولید خود تحت عملیات آهنگری داغ قرار می‌گیرد و از نقطه نظر مغناطیسی سخت می‌شود. به همین منظور، خواص مغناطیسی آنها را بایستی توسط فرایند عملیات حرارتی آنیل ارتقا داد. یکی از نمونه‌های شاهد به منظور اندازه‌گیری منحنی هیسترزیس قبل از عملیات حرارتی (بعد از فرایند آهنگری) و دیگری به هدف اندازه‌گیری منحنی هیسترزیس بعد از عملیات حرارتی در نظر گرفته شده است تا تأثیر عملیات حرارتی بر روی خواص مغناطیسی و منحنی هیسترزیس آهن کم کربن و همچنین خواص مغناطیسی بعد از عملیات حرارتی مشخص شود. به‌منظور افزایش تراوایی مغناطیسی یک نمونه شاهد آهن کم کربن، نمونه فوق تحت عملیات حرارتی آنیل کامل قرار گرفت [۱].

شماتیک آزمایش هیسترزیس نمونه‌های شاهد آهن کم کربن در شکل ۳ نشان داده شده است.

در آزمایش فوق از حسگر جریان الکتریکی ACS712ELCTR-05B-T با حساسیت ۱۸۵ mV/A با بازه اندازه‌گیری ۵A± و خطی‌پذیری ٪۱/۵ در کل بازه استفاده شده است. جریان الکتریکی متناوب مستقیماً در فرمول آمپر قرار داده می‌شود:

$$H=\frac{NI}{L} \qquad (۳)$$

که در فرمول فوق H شدت میدان مغناطیسی (A/m)، N تعداد دور سیم‌پیچ تحریک، I جریان الکتریکی گذرنده از سیم-پیچ تحریک که توسط حسگر جریان اندازه‌گیری می‌شود (A) و L طول مسیر مغناطیسی یعنی همان محیط میانگین نمونه شاهد رینگی (m) می‌باشد.



شکل ۳ شماتیک آزمایش هیسترزیس مغناطیسی نمونه‌های شاهد حلقه‌ای

چگالی شار مغناطیسی (B) با استفاده از القای صورت گرفته در سیم‌پیچ القا اندازه‌گیری می‌شود. با انتگرال‌گیری از

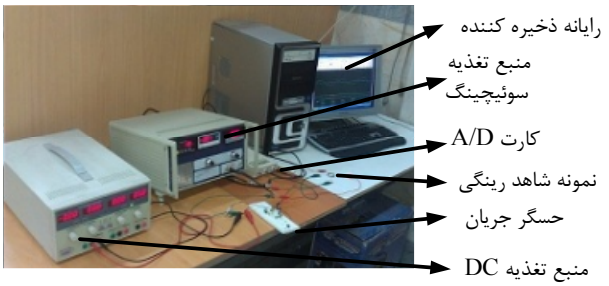
قانون القای فارادی می‌شود:

$$B = \frac{1}{NA}\int V \, dt \qquad (۴)$$

در فرمول فوق V ولتاژ القا شده به سیم‌پیچ القا (V)، N تعداد دور سیم‌پیچ القا و A مساحت بسته شده توسط سیم‌پیچ القا (m^2) می‌باشد. برای ذخیره‌سازی هم‌زمان جریان گذرنده از سیم‌پیچ تحریک (جهت دست‌یابی به شدت میدان مغناطیسی) و ولتاژ القا شده بر سیم‌پیچ القا (جهت دست‌یابی به چگالی شار مغناطیسی) ، از کارت A/D دو کاناله مدل DSLR800B محصول شرکت تی ان ام الکترونیکس[1] با توانایی نمونه‌برداری ۵۰Hz - ۸۰۰Msps استفاده شده است.

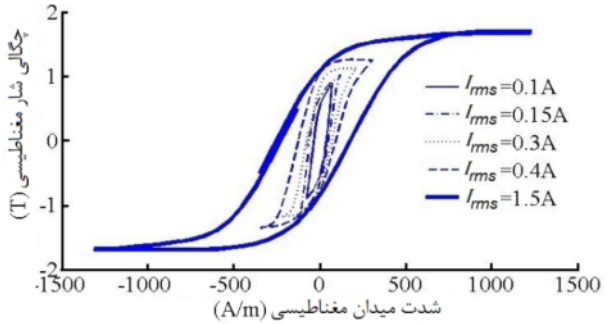
برای تحریک سیم‌پیچ تحریک، از منبع تغذیه سوئیچینگ استفاده شده است. برای انجام آزمایش منحنی هیسترزیس مغناطیسی نمونه‌های رینگی از موج مربعی استفاده شده است. به دلیل وابستگی منحنی هیسترزیس مغناطیسی به فرکانس، از کمترین فرکانس ممکن دستگاه یعنی ۱۰Hz استفاده شده است. مجموعه آزمایش منحنی هیسترزیس مغناطیسی نمونه‌های شاهد حلقه‌ای در شکل ۴ نشان داده شده است.

نتایج آزمایش نمونه‌های شاهد رینگی آنیل نشده و آنیل شده تحت شدت جریان‌های میانگین مختلف به ترتیب در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده است. با اتصال نوک حلقه‌های هیسترزیس، نمودار مغناطیس شوندگی به دست می‌آید که با مشتق‌گیری عددی از آن به کمک نرم‌افزار متلب، منحنی تراوایی مغناطیسی نسبی به دست خواهد آمد که در شکل ۷ نشان داده شده است. با توجه به شکلهای ۵ و ۶ مشاهده می‌شود که پس از عملیات حرارتی آهن کم کربن، هیسترزیس موجود در ماده کاهش و چگالی شار مغناطیسی اشباع آن از ۱/۳۸۸T به ۱/۶۹۶T افزایش یافته است.

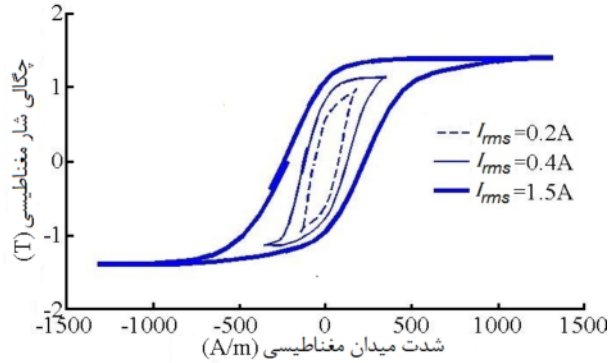


شکل ۴ مجموعه آزمایش هیسترزیس نمونه‌های شاهد حلقه‌ای

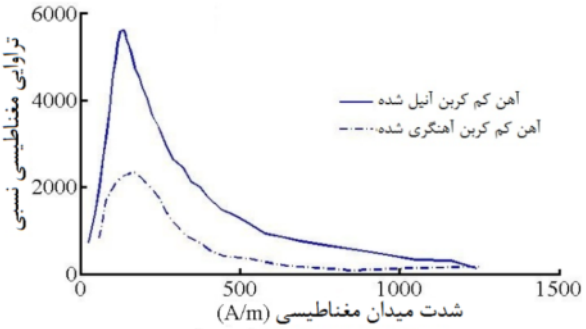
1. TNM Electronics



شکل ۵ منحنی هیسترزیس مغناطیسی آهن کم کربن آهنگری شده تحت شدت جریان های میانگین مختلف



شکل ۶ منحنی هیسترزیس مغناطیسی آهن کم کربن آنیل شده تحت شدت جریان های میانگین مختلف



شکل ۷ تراوایی مغناطیسی نسبی آهن کم کربن آهنگری شده و آنیل شده

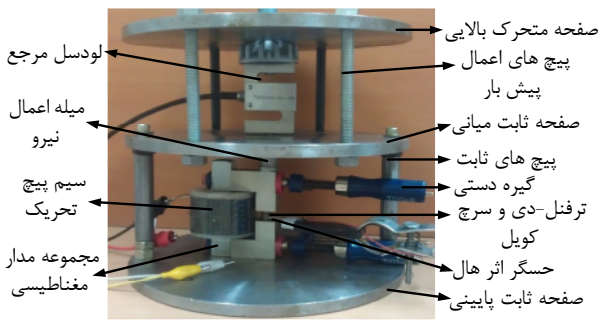
با توجه به شکل ۷ بیشینه تراوایی مغناطیسی نسبی آهن کم کربن به دلیل عملیات حرارتی، از مقدار ۲۳۳۶ به مقدار ۵۶۱۷ رسیده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که عملیات حرارتی مورد استفاده مناسب می‌باشد و می‌توان آن را برای بهبود خواص مغناطیسی آهن کم کربن موجود در بدنه حسگر مگنتواستریکتیو به‌کار برد.

۳-۲- شناخت خواص میله ترفنل-دی

به منظور اندازه‌گیری منحنی هیسترزیس مغناطیسی میله ترفنل-دی، مجموعه آزمایش نشان داده شده در شکل ۸ طراحی و ساخته شده است.

همان‌طور که در شکل ۸ دیده می‌شود، میدان مغناطیسی توسط حسگر اثر هال در محدوده ماده تحت آزمایش اندازه-گیری می‌شود و چگالی شار مغناطیسی توسط سیم‌پیچ القا اندازه‌گیری می‌شود [۱۰،۳]. جریان تحریک حتما بایستی متناوب باشد تا سیم پیچ القا بتواند چگالی شار مغناطیسی را اندازه بگیرد. همچنین کوپلر مغناطیسی بایستی از ماده‌ای با خاصیت نرم مغناطیسی با کمترین مقدار هیسترزیس و بیشترین مقدار تراوایی مغناطیسی ممکن انتخاب شود. برای این هدف، جنس پرمالوی به دلیل دارا بودن کمترین افت مغناطیسی، بیشترین تراوایی مغناطیسی در میان مواد در دسترس، کاندیدای مناسبی می‌باشد [۱۱،۱۰].

در مورد میله ترفنل-دی نوع یک‌پارچه به قطر ۱۰mm آزمایش منحنی هیسترزیس مغناطیسی تحت نیروی اعمالی از حدود صفر تا ۹۸۱N در هشت مرحله انجام می‌شود. در هر آزمایش با نیروی تقریباً ثابت، ولتاژ میانگین اعمالی به سیم‌پیچ تحریک از ۳۰ تا ۱۱۰ ولت در هشت مرحله تغییر می‌کند تا نمودار مغناطیس شوندگی حاصل شود. در مجموعه آزمایش فوق برای اعمال شدت میدان مغناطیسی، از سیم‌پیچ تحریک با ۶۰۰ دور از سیم لاکی به قطر ۱mm استفاده شده است که توانایی عبور شدت جریان حدود ۴A را دارد. در این آزمایش، از جریان متناوب از نوع سینوسی استفاده شده است. برای تحریک سیم‌پیچ تحریک، از اتوترانس گلد استار[1] TDGC2-2KVA با فرکانس کاری ۵۰Hz استفاده شده است.

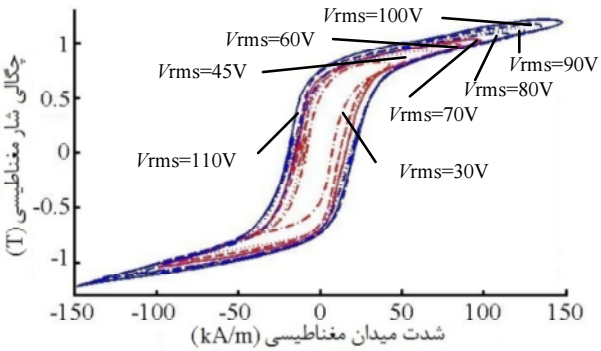


شکل ۸ مجموعه آزمایش هیسترزیس مغناطیسی ترفنل-دی

برای اندازه‌گیری شدت میدان مغناطیسی، از حسگر اثر هال UGN3503 با حساسیت ۱/۷۵ mV/G استفاده شده است که مماس به میله قرار گرفته است. برای اندازه‌گیری چگالی شار مغناطیسی، از سیم‌پیچ القا با ۵ دور از سیم لاکی به قطر ۰/۲۵mm استفاده شده است که به طور دقیق و منظم به دور میله ترفنل-دی پیچیده شده است.

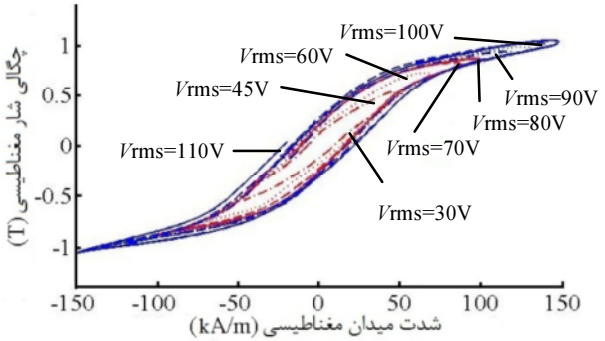
برای ذخیره‌سازی هم‌زمان ولتاژ خروجی حسگر اثر هال (برای دست‌یابی به شدت میدان مغناطیسی) و ولتاژ القا شده بر سیم‌پیچ القا (جهت دست‌یابی به چگالی شار مغناطیسی)، از همان کارت معرفی شده در قسمت قبلی استفاده شده است.

در مجموع ۶۴ آزمایش تجربی هیسترزیس مغناطیسی میله ترفنل-دی نوع یک‌پارچه در پیش‌بارها و میدان‌های مغناطیسی مختلف برای به دست آوردن لوپ‌های هیسترزیس انجام شده است که به عنوان نمونه نتایج حاصل تحت نیروی ۰N و ۹۸۱N در شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان داده شده است. تمامی آزمایش‌ها به طور پیوسته انجام شده است تا شرایط آزمایش در تمامی موارد یکسان باشد. اگر نوک لوپ‌های کوچک مربوط به هر نمودار به یکدیگر متصل شود، نمودار مغناطیس شوندگی آن به دست می‌آید که در شکل ۱۱ نشان داده شده است. اگر از نمودار مغناطیس شوندگی ارائه شده در شکل ۱۱ به کمک نرم‌افزار متلب مشتق عددی گرفته شود، نمودار تراوایی نسبی مغناطیسی میله ترفنل-دی یک‌پارچه به دست خواهد آمد که در شکل ۱۲ نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل ۱۲ نتیجه می‌شود، بیشینه تراوایی مغناطیسی نسبی ترفنل-دی نوع یک‌پارچه از مقدار ۱۹/۷۷ در نیروی تقریبی صفر تا مقدار ۸/۲۹۷ در نیروی ۹۸۱N تغییر می‌کند که معادل ۱۱/۴۳۷ واحد تغییرات تراوایی مغناطیسی نسبی است.

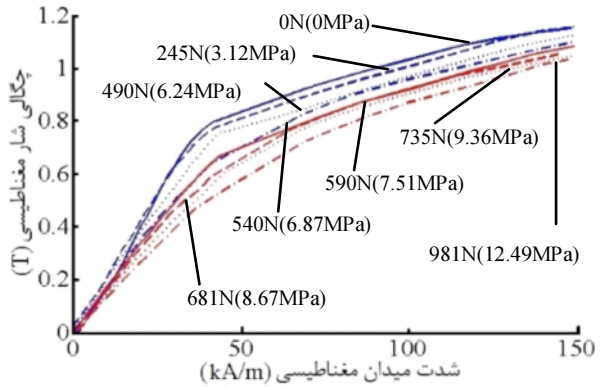


شکل ۹ منحنی هیسترزیس مغناطیسی میله ترفنل-دی یک‌پارچه تحت نیروی حدود ۰N در سطح ولتاژهای میانگین مختلف

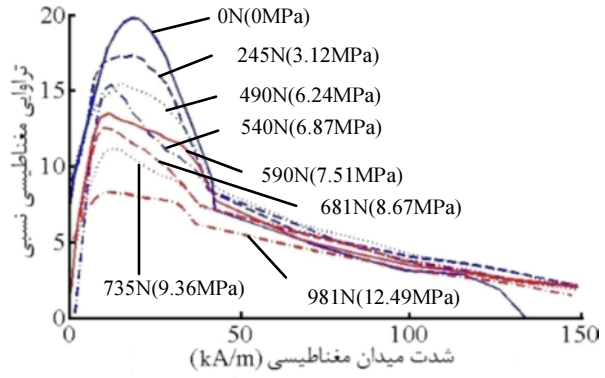
1. Gold Star



شکل ۱۰ منحنی هیسترزیس مغناطیسی میله ترفنل-دی یک‌پارچه تحت نیروی ۹۸۱N در سطح ولتاژهای میانگین مختلف



شکل ۱۱ نمودار مغناطیس شوندگی میله ترفنل-دی یک‌پارچه تحت پیش بارهای مختلف



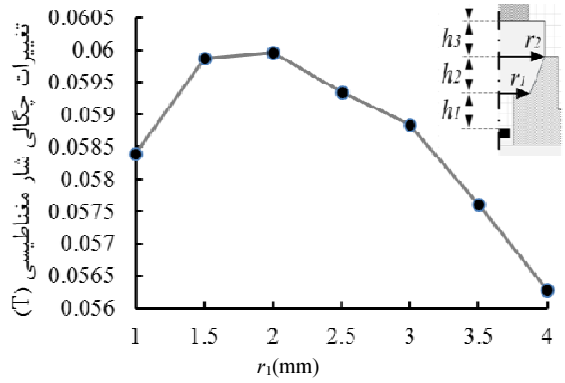
شکل ۱۲ تراوایی نسبی مغناطیسی میله ترفنل-دی یک‌پارچه ترفنل-دی یک‌پارچه تحت پیش بارهای مختلف

۴- شبیه‌سازی و بهینه‌سازی هندسه حسگر نیروی مگنتواستریکتیو

هدف از شبیه‌سازی، طراحی حسگر نیرو با بیشترین حساسیت ممکن می‌باشد. برای انجام شبیه‌سازی عددی از نرم‌افزار سی‌اس‌تی استودیو سوئیت ۲۰۱۱[1] و محیط مگنتواستاتیک[2] استفاده شده است. آزمایش‌های تجربی شناخت خواص مغناطیسی مواد که در بخش پیش ارائه شد، به عنوان ورودی به نرم‌افزار به جهت طراحی هندسه حسگر نیروی مگنتواستریکتیو می‌باشد.

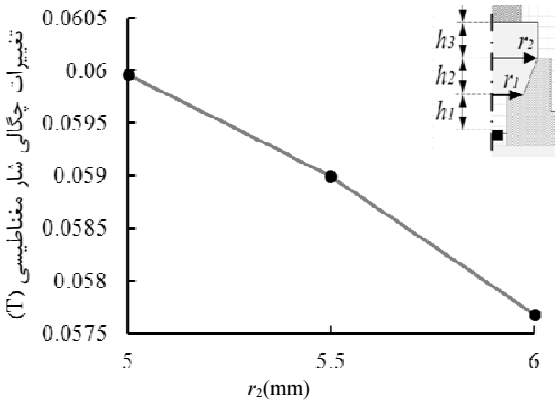
همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، پارامترهای r_1، r_2 ، h_2 و h_3 برای افزایش حساسیت حسگر بایستی بهینه شوند و سایر پارامترها به دلیل ثبوت هندسه ثابت هستند. برای بهینه‌سازی پارامترهای مذکور، مختصات نقطه حساس حسگر اثرهال در نرم‌افزار تعریف شده و چگالی شار مغناطیسی در آن نقطه بر روی نمودار عمودی گزارش می‌شود. حال با تغییر در تراوایی مغناطیسی ترفنل-دی بین مقادیر ۱۰ تا ۲۰، مقدار چگالی شار مغناطیسی در آن نقطه گزارش شده است. بنابراین می‌توان شرایط بیشینه تغییرات چگالی شار مغناطیسی به ازای تغییرات ثابت تراوایی مغناطیسی نسبی میله ترفنل-دی را به‌دست آورد. شبیه‌سازی برای تمامی پارامترهای r_1 ، r_2 و h_3 به صورت فول فاکتوریل انجام شده است و در مقادیر بهینه شده برای پارامترهای فوق، مقدار بهینه h_2 به‌دست خواهد آمد.

خلاصه نمودارهای شبیه‌سازی در حالت هندسه بهینه حسگر، به‌صورت دوبعدی در شکل‌های ۱۳ تا ۱۶ نشان داده شده است. با بررسی عددی نمودارهای شبیه‌سازی مشاهده می‌شود که در سه مقادیر r_1=۲mm ، r_2=۵mm و h_3=۰mm حسگر بیشینه حساسیت را خواهد داشت. سپس در همین مقادیر بهینه شده، مقدار بهینه برای پارامتر h_2=۴mm می‌باشد.

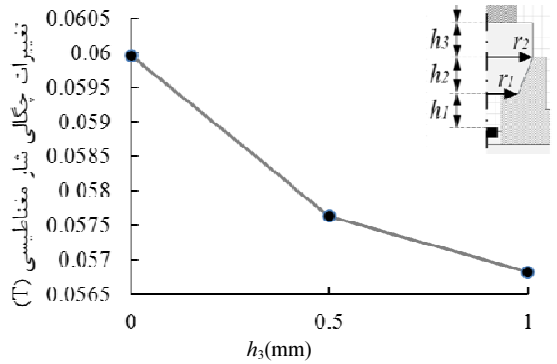


شکل ۱۳ حالت بهینه r_1 هنگامی که h_3=۰mm و r_2=۵mm

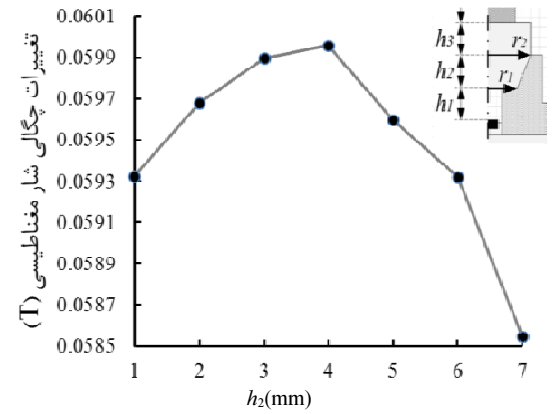
1. CST Studio Suite 2011
2. Magnetostatic



شکل ۱۴ حالت بهینه r_2، هنگامی که h_1=۰mm و r_1=۲mm



شکل ۱۵ حالت بهینه h_2، هنگامی که r_1=۲mm و r_2=۵mm

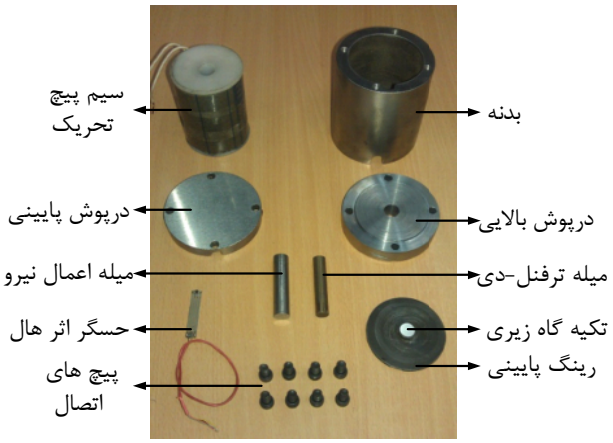


شکل ۱۶ حالت بهینه h_2، هنگامی که r_1=۲mm، r_2=۵mm و h_1=۰mm

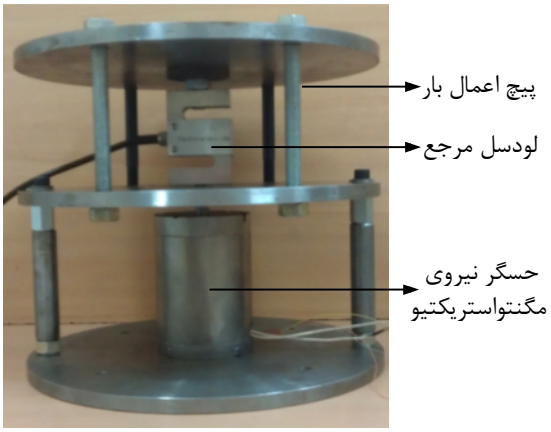
۵- ساخت، آزمایش و کالیبراسیون حسگر مگنتواستریکتیو

اجزای حسگر مگنتواستریکتیو ساخته شده در شکل ۱۷ مشاهده می‌شود. به منظور تست و کالیبراسیون حسگر مگنتواستریکتیو، مجموعه آزمایشگاهی مطابق با شکل ۱۸ طراحی و ساخته شده است. مجموعه فوق شامل سه صفحه گرد فلزی است که دو صفحه پایینی نسبت به هم ثابت و صفحه بالایی توسط پیچ‌های اعمال بار نیروی قابل اندازه‌گیری توسط لودسل مرجع را به حسگر نیروی مگنتواستریکتیو که با لودسل مرجع سری است منتقل می‌کند.

با استناد به استاندارد ASTM E 74 – 00a طراحی آزماش جهت تست و کالیبراسیون حسگر انجام شده است. متغیر اول مربوط به افزایش نیرو است که طی ۱۱ مرحله مساوی در هر آزمایش افزایش می‌یابد و به همان ترتیب باربرداری می‌شود. متغیر دوم جریان عبوری از سیم‌پیچ حسگر است که طی پله‌هایی به اندازه ۰/۱A از مقدار ۰/۱A افزایش می‌یابد. هر آزمایش (یعنی هر باربرداری و بارگذاری) سه بار تکرار می‌شود.



شکل ۱۷ اجزای حسگر نیروی مگنتواستریکتیو

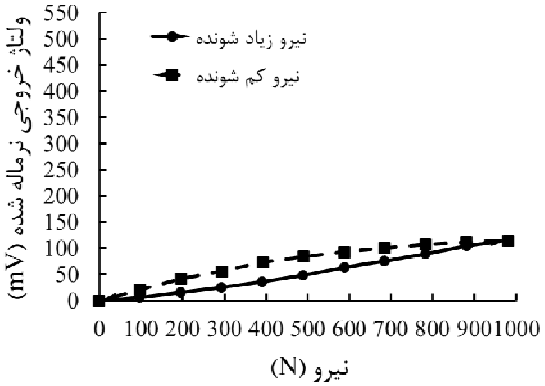


شکل ۱۸ مجموعه آزمایش حسگر نیروی مگنتواستریکتیو

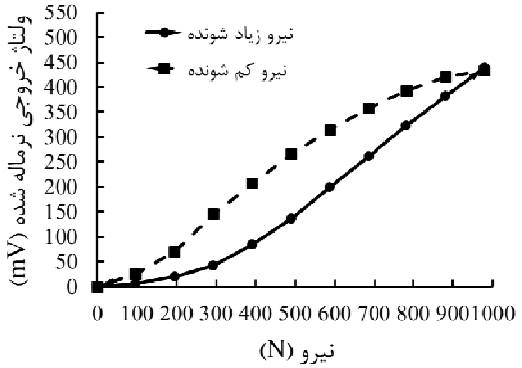
جریان ورودی حسگر مگنتواستریکتیو و حسگر اثر هال توسط منبع تغذیه اسکورت[1] 6030TD و جریان ورودی لودسل از طریق منبع تغذیه ماتریکس[2] MPS3005L-3 تامین شده است. اندازه‌گیری ولتاژهای خروجی حسگر اثر هال و لودسل توسط اسیلوسکوپ تِکتِرونیک س[3] TDS1012 100MHz 1GS/s و مولتی متر ویکتور[4] 88C اندازه‌گیری شده است. به عنوان نمونه نمودارهای عملکردی حسگر نیروی مگنتواستریکتیو در دو شدت جریان ۰/۱A و ۰۱A ارائه شده است (شکل‌های ۱۹ و ۲۰). در محور عمودی ولتاژ خروجی نرماله شده[5] حسگر نیروی مگنتواستریکتیو و در محور افقی نیروی اعمال شده گزارش شده است.

همان‌طور که در شکل ۲۱ مشاهده می‌شود، با افزایش شدت جریان عبوری از سیم پیچ تحریک، تغییرات ولتاژ خروجی حسگر مگنتواستریکتیو به ازای تغییرات یکسان نیرو افزایش می‌یابد و با افزایش بیشتر شدت جریان، تغییرات ولتاژ خروجی کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر، حساسیت حسگر با توجه به شدت جریان عبوری از سیم‌پیچ یک مقدار بیشینه‌ای دارد که در حسگر ساخته شده در شدت جریان ۰/۸A و به اندازه ۰/۵۱mV/N می‌باشد که بیشترین حساسیت گزارش شده در سطح گزارش‌های علمی بین‌المللی مربوط به حسگرهای مگنتواستریکتیو تاکنون می‌باشد. اما همان‌طور که در نمودارهای عملکردی مشاهده می‌شود، از معایب این حسگر هیسترزیس موجود در پاسخ حسگر می‌باشد که از هیسترزیس موجود در ماده ترفنل-دی نتیجه می‌شود. طبق نتایج تجربی، تکرارپذیری هیسترزیس این حسگر مناسب ارزیابی می‌شود که قابلیت کنترل آن را فراهم می‌سازد.

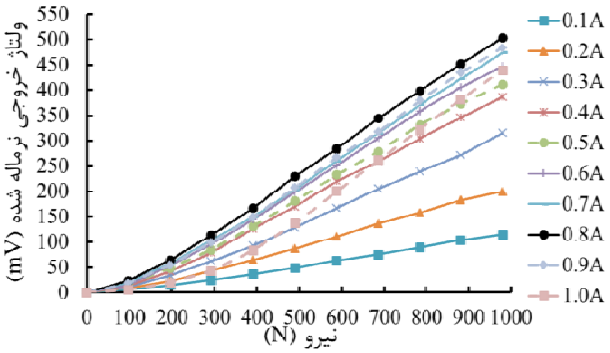
دلیل وقوع حالت بیشینه حساسیت می‌تواند این‌طور تعبیر شود که با افزایش شدت میدان مغناطیسی، تعداد حوضچه‌های مغناطیسی که در راستای میدان مغناطیسی قرار می‌گیرند افزایش می‌یابد . به همین دلیل هنگام اعمال تنش مکانیکی یکسان، با افزایش شدت مغناطیسی، تعداد حوضچه‌های مغناطیسی و همچنین مقدار زاویه چرخش آن‌ها به سمت راستای عمود بر تنش نرمال مکانیکی افزایش می‌یابد و به همین ترتیب تغییرات چگالی شار مغناطیسی بیشتر می‌شود.



شکل ۱۹ منحنی آزمایش حسگر نیروی مگنتواستریکتیو تحت شدت جریان ۰/۱A



شکل ۲۰ منحنی آزمایش حسگر نیروی مگنتواستریکتیو تحت شدت جریان ۱A



شکل ۲۱ منحنی عملکردی حسگر نیروی مگنتواستریکتیو تحت نیروی زیاد شونده و شدت جریان‌های مختلف

این روند ادامه دارد تا تعداد حوضچه های مغناطیسی و زاویه چرخش آن‌ها به بیشینه مقدار خود برسد، در این حالت،

1. ESCORT
2. MATRIX
3. Tektronix
4. VICTOR

۵- ولتاژ نرماله شده یعنی آفست موجود در هر آزمایش صفر شده و ولتاژ به صورت زیاد شونده مرتب شده است.

بیشترین تغییرات چگالی شار مغناطیسی و به تبع آن بیشینه حساسیت حسگر به دست آمده است. حال اگر شدت میدان مغناطیسی افزایش یابد، از قابلیت چرخش حوضچه‌ها کاسته شده و به عبارت دیگر پدیده مگنتواستریکشن بر پدیده ویلاری غلبه می‌کند و از تغییرات چگالی شار مغناطیسی و حساسیت حسگر کاسته می‌شود. در حسگر فوق، بیشینه حساسیت در ۰/۸ آمپر اتفاق می‌افتد. نقطه بهینه کارکرد حسگر مگنتواستریکتیو در منحنی هیسترزیس مغناطیسی در همان حوالی منطقه خطی و بیشینه تراوایی مغناطیسی میله ترفنل-دی قرار دارد.

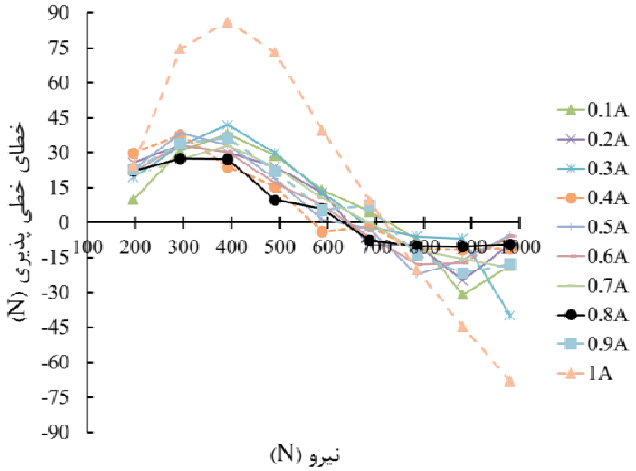
همچنین می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش شدت جریان سیم‌پیچ حسگر، منطقه خطی به سمت راست، یعنی نیروهای بیشتر جابجا می‌شود که با دلیل بیان شده برای حالت بهینه عملکرد حسگر هم‌خوانی دارد. بنابراین می‌توان گفت که حسگر نیروی مگنتواستریکتیو قابلیت جاروب منطقه عملکردی خطی را دارد.

اگر از طریق روش کمترین مربعات[1]، منحنی‌های عملکردی در حالت رفت (افزایش نیرو) با یک معادله خطی درجه اول برازش شود، می‌توان حالت انحراف از خط را بررسی کرد. همان‌طور که در نمودارهای عملکردی مشاهده می‌شود، حسگر مگنتواستریکتیو، در ابتدا بازه (۰N تا ۹۸/۱N)، رفتار غیرخطی را از خود نشان می‌دهد. با قبول این‌که بازه اندازه‌گیری از یک دهم ظرفیت حسگر تعریف شود، می‌توان اعداد ۰N و ۹۸/۱N را از اطلاعات ورودی به برازش حذف کرد. در جدول ۲ حساسیت حسگر و مقادیر R-Square حاصل برازش منحنی خطی به روش کمترین مربعات بر روی نتایج تجربی ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در شدت جریان ۰/۸A، حسگر ساخته شده دارای بیشترین حساسیت و البته بیشترین خطی‌پذیری است که می‌توان به آن شرایط بهینه عملکردی اطلاق کرد. خطای خطی پذیری حسگر در شدت جریان‌های مختلف در شکل ۲۲ مشاهده می‌شود. در شرایط بهینه، بیشترین خطای خطی پذیری، در نیروی ۲۹۴/۲N رخ می‌دهد و مقدار خطا به اندازه ۲۷/۵N می‌باشد که به اندازه ۲/۸٪ کل بازه می‌باشد و در مقادیر نیرویی بالاتر به اندازه ۹N- یعنی ۰/۹٪ کل بازه همگرا شده است.

1. Least Squares

جدول ۲ حساسیت حسگر و مقادیر R-Square

شدت جریان سیم‌پیچ (A)	حساسیت حسگر (mV/N)	R-Square
۰/۱	۰/۱۲	۰/۹۹۱۹
۰/۲	۰/۲	۰/۹۹۲۲
۰/۳	۰/۳۲	۰/۹۸۹۳
۰/۴	۰/۳۹	۰/۹۹۲۶
۰/۵	۰/۴۲	۰/۹۹۲
۰/۶	۰/۴۶	۰/۹۹۲۸
۰/۷	۰/۴۸	۰/۹۹۲۹
۰/۸	۰/۵۱	۰/۹۹۴۹
۰/۹	۰/۴۹	۰/۹۹۱۴
۱	۰/۴۵	۰/۹۵۷۷

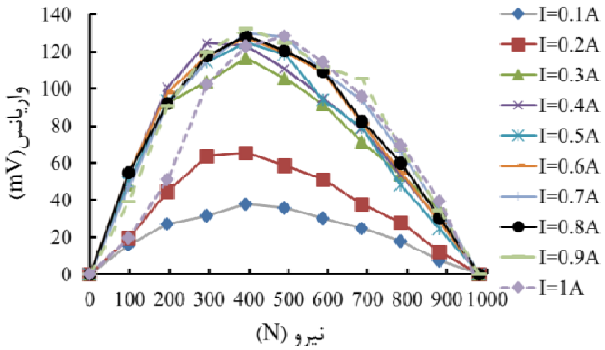


شکل ۲۲ خطای خطی پذیری حسگر مگنتواستریکتیو در شدت جریان های مختلف

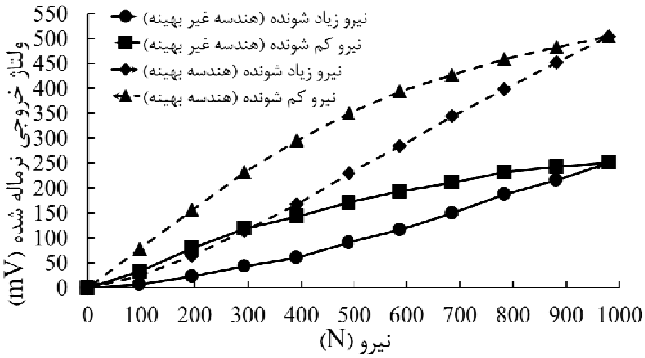
واریانس[2] عملکرد حسگر در جریان‌های مختلف نیز در شکل ۲۳ نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است، با افزایش شدت جریان، واریانس افزایش یافته و با همین روند، افزایش آن با شیب کندی صورت می‌گیرد که طبق نمودار مذکور، بیشترین واریانس در شدت جریان ۰/۹A و نیروی ۳۹۲/۳N رخ می‌دهد. بیشترین واریانس در شرایط بهینه به میزان ۱۲۸/۳mV می‌باشد. پدیده هیسترزیس و اختلاف شیب میان منحنی رفت و برگشت می‌تواند این‌طور تعبیر شود که هنگام افزایش نیرو، پدیده مگنتواستریکشن در جهت خلاف اعمال نیرو عمل می‌کند ولی هنگام کاهش نیرو، پدیده

۲. واریانس به معنی اختلاف میان منحنی رفت و برگشت است.

مگنتواستریکشن موافق با برداشت نیرو عمل می‌کند که باعث می‌شود شیب خط (از لحاظ قدرمطلقی) بیشتر از حالت افزایش نیرو باشد.



شکل ۲۳ واریانس عملکرد حسگر در جریان های مختلف

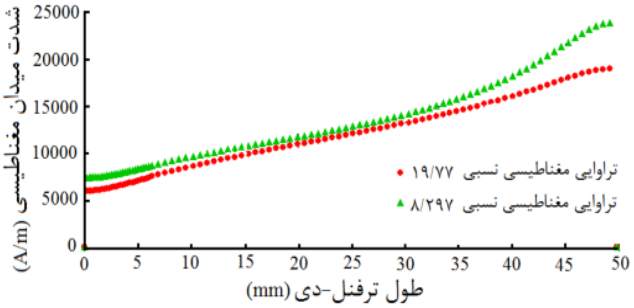


شکل ۲۴ مقایسه منحنی عملکردی حسگر مگنتواستریکتیو در حالت بهینه و غیر بهینه

برای راستی‌آزمایی نتایج شبیه‌سازی مبنی بر بهینه بودن هندسه حسگر مگنتواستریکتیو، اگر تکیه‌گاه زیرین ترفنل-دی برداشته شود و در شدت جریان ۰/۸A، منحنی عملکرد حسگر همانند بخش متناظر آزمایش شود، شکل ۲۴ به دست می‌آید که در آن مشاهده می‌شود که حساسیت حسگر از مقدار ۰/۵۱mV/N به مقدار ۰/۲۵۵mV/N کاهش یافته که این افت ۵۰ درصدی نشان دهنده بهینه بودن هندسه حسگر مگنتواستریکتیو از نقطه نظر بیشینه حساسیت می‌باشد.

۶- شرایط میله ترفنل-دی در حالت بهینه عملکردی حسگر مگنتواستریکتیو

اگر منحنی چگالی شار مغناطیسی درون محور مرکزی میله ترفنل-دی هنگامی که تراوایی نسبی مغناطیسی بین مقدارهای ۱۹/۷۷ و ۸/۲۹۷ تغییر کند توسط نرم‌افزار گزارش شود، شکل ۲۵ به‌دست می‌آید. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که اگر میانگین شدت میدان مغناطیسی موجود در میله ترفنل-دی در حالت آزاد به اندازه ۱۳۵۰۷/۲۳A/m یا در حالتی که تحت تنش تحت نیروی ۹۸۱N است، به اندازه ۱۱۹۵۶/۵۱A/m باشد، حسگر در شرایط بهینه از نقطه نظر حساسیت و خطی‌پذیری کار می‌کند. این دست‌آورد می‌تواند به عنوان معیار طراحی حسگرهای مگنتواستریکتیو معرفی شود. مشخصات عملکردی حسگر در جدول ۳ مشاهده می‌شود.



شکل ۲۵ توزیع شدت میدان مغناطیسی در محور مرکزی میله ترفنل-دی با تغییر در تراوایی مغناطیسی میله ترفنل-دی در شرایط بهینه

جدول ۳ مشخصات عملکردی حسگر مگنتواستریکتیو ساخته شده در شرایط بهینه عملکردی

مشخصات	مقدار
بازه عملکردی پیشنهاد شده (N)	۹۸/۱ - ۹۸۱
حساسیت (mV/N)	۰/۵۱
بیشترین خطای خطی‌پذیری (٪ کل بازه)	۲/۸ (در نیروی ۲۹۴/۲N)
بازه دارای کمترین خطای خطی‌پذیری(N)	۴۹۰ - ۹۸۱
خطای خطی پذیری در بازه دارای کمترین خطای خطی‌پذیری (٪ کل بازه)	۰/۹
بیشترین واریانس (mV)	۱۲۸/۳ (در نیروی ۳۹۲/۳N)
میانگین شدت میدان مغناطیسی در محور مرکزی میله ترفنل-دی (A/m)	۱۳۵۰۷/۲۳

۷- نتیجه‌گیری

در این پژوهش پارامترهای مؤثر بر حساسیت حسگر نیروی استاتیکی با استفاده از ماده مگنتواستریکتیو ترفنل-دی بررسی شده است. نتایجی که از این پژوهش حاصل شده است عبارتند از:

- حساسیت حسگر نیروی مگنتواستریکتیو به پارامترهای هندسی وابسته است که توسط نرم‌افزار شبیه‌سازی عددی سی‌اس‌تی استودیو سوئیت قابل طراحی می‌باشد و مشاهده شد که حساسیت حسگر در حالت هندسه بهینه به مقدار ۰/۵۱mV/N رسید که در حالت هندسه غیر بهینه به مقدار ۰/۲۵۵mV/N کاهش یافته که این افت ۵۰ درصدی نشان دهنده بهینه بودن هندسه حسگر مگنتواستریکتیو از نقطه نظر بیشینه حساسیت می‌باشد.

- حساسیت حسگر نیروی مگنتواستریکتیو با افزایش جریان سیم‌پیچ تحریک تا ۰/۸A افزایش می‌یابد و با افزایش بیشتر کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر، حساسیت حسگر با توجه به شدت جریان عبوری از سیم‌پیچ یک مقدار بیشینه‌ای دارد که در حسگر ساخته شده در شدت جریان ۰/۸A و به اندازه ۰/۵۱mV/N می‌باشد.

- در شدت جریان ۰/۸A، حسگر ساخته شده دارای بیشترین حساسیت و البته بیشترین خطی‌پذیری است که می‌توان از آن به عنوان شرایط بهینه عملکردی نام برد.

- با استفاده از شبیه‌سازی، این معیار طراحی نتیجه شد که اگر میانگین چگالی شار مغناطیسی موجود در میله ترفنل-دی در حالت آزاد به اندازه ۱۳۵۰۷/۲۳A/m باشد، که در حوالی نقطه‌ای است که بیشینه تراوایی مغناطیسی ترفنل-دی یا همان منطقه خطی منحنی مغناطیس شوندگی رخ می‌دهد، حسگر در شرایط بهینه از نقطه نظر حساسیت و خطی‌پذیری کار می‌کند.

- در شرایط بهینه حسگر (شدت جریان ۰/۸A)، بیشترین خطای خطی پذیری در نیروی ۲۹۴/۲N رخ می‌دهد و مقدار خطا به اندازه ۲۷/۵N می‌باشد که به اندازه ۲/۸٪ کل بازه می‌باشد و در مقادیر نیرویی بالاتر به اندازه ۹N- یعنی ۰/۹٪ کل بازه همگرا شده است. همچنین واریانس حسگر با افزایش جریان حسگر افزایش یافته و در ادامه با شیب کندی افزایش می‌یابد و در ۰/۸A و نیروی ۳۹۲N به بیشترین حالت خود یعنی ۱۲۸/۳mV می‌رسد.

- با افزایش شدت جریان سیم‌پیچ، منطقه خطی حسگر قابل جاروب به سمت نیروهای بیشتر است.

۸- مراجع

[1] Z. Y. Jia, H. F. Liu, F. J. Wang, W. Liu, C.Y. Ge, A novel magnetostrictive static force sensor based on the giant magnetostrictive material, *Measurement* , Vol. 44, 2011, pp. 88–95.

[2] D. K. Kleinke , H. M. Uras, A magnetostrictive force sensor, *Review of Scientific Instruments*, Vol. 65, No. 5, 1994, pp. 1699–1710.

[3] A. E. Fitzgerald, D. E. Higginbotham, A. Grabel, *Basic Electrical Engineering*, New York: McGraw-Hill, pp. 568-623, 1975.

[4] T. A. Baudendistel, Development of a novel Magnetostrictive force sensor, PhD Thesis, Department of Mechanical Engineering, University of Dayton, Ohio, 2005.

[5] S.talebian, Y. hojjat, M. Ghodsi, Sh. Mirzamohammadi, M. Sheikholeslami, Study on effects of bias magnetic field and mechanical pre-stress on sensitivity and linear measurement range of Terfenol-D force sensor, *Modares Mechanical Engineering,* Vol. 13, No. 2, pp. 46-55, 2013. (In Persian)

[6] S. Chakraborty, G. R. Tomlinson, An initial experimental investigation into the change in magnetic induction of a Terfenol-D rod due to external stress, *Smart Mater. Struct.*, Vol. 12, pp. 763–768, 2003.

[7] Q. Yang, R. Yan, Ch. Fan, H. Chen, F. Liu, S. Liu, A magneto-mechanical strongly coupled model for giant magnetostrictive force sensor, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 43, No. 4, pp. 1437–1440, 2007.

[8] Z. Y. Jia, H. F. Liu, F. J. Wang, Ch. Y. Ge, Research on a novel force sensor based on giant magnetostrictive material and its model, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 509, pp. 1760-1767, 2011.

[9] A. G. Olabi, A. Grunwald, Design and application of magnetostrictive materials, *Materials and Design*, Vol. 29, pp. 469–483, 2008.

[10] R. M. Bozorth, D. V. Nostrand, *Ferromagnetism*, Forth Printing, New York, 1956.

[11] Sh. Mirzamohammadi, M. Ghodsi, Y. hojjat, H. Sadeghian, S. Talebian, Effects of magnetic bias and pre-stress on the sensitivity of a force Sensor using TERFENOL-D , In *12th National and 3rd International Conference on Manufacturing Engineering,* Tehran, Iran, 2011.