



## طراحی و ساخت سنسور استاتیکی هیبریدی نیرو-گشتاور مگنتواستریکتیو بدون تماس با استفاده از گالفنل

شاهد میرزامحمدی<sup>1</sup>، محمد مراد شیخی<sup>2\*</sup>، محمدرضا کرفی<sup>3</sup>، مجتبی قدسی<sup>4</sup>

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

4- استادیار، دانشکده انرژی و الکترونیک، دانشکده پورتموث، انگلستان

\* تهران، صندوق پستی 163-16785، m.sheikhi@sru.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 17 مهر 1400

داوری اولیه: 9 آبان 1400

پذیرش: 27 آبان 1400

کلیدواژه‌گان:

مگنتوالاستیسیته

سنسور

نیرو

گشتاور

گالفنل

در این تحقیق یک سنسور هیبریدی نوین بدون تماس استاتیکی مگنتواستریکتیو نیرو-گشتاور با استفاده از ماده گالفنل ارائه شده است. در ابتدا، روش طراحی سنسور در حالت‌های نیروی محوری و گشتاور پیچشی شرح داده شده است. خواص مغناطیسی-مکانیکی مواد مورد استفاده مانند نمودارهای B-H و نفوذپذیری مغناطیسی تحت پیش‌بارهای مکانیکی و میدان‌های مغناطیسی مختلف اندازه‌گیری شده و در برخی موارد بهبود یافته است که در شبیه‌سازی‌های المان محدود استفاده می‌شود. با استفاده از نتایج بدست آمده، سنسور توسط نرم افزار کامسول به صورت عددی شبیه‌سازی شده است. پس از آن، مجموعه سنسور با استفاده از نتایج شبیه‌سازی المان محدود ساخته شده و عملکرد آن به صورت تجربی در بارگذاری‌ها، جریان‌های الکتریکی و فرکانس‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته است. حساسیت، تکرارپذیری و خطای خطی بودن در دو حالت نیرو و گشتاور پیچشی به طور جداگانه ارائه و شرایط مطلوب عملکرد سنسور گزارش شده است. سپس، صحت نتایج شبیه‌سازی عددی در مقایسه با نتایج تجربی سنجیده شده است. در نهایت، مشخصات عملکردی سنسور در شرایط بهینه گزارش شده و مشاهده شد که حساسیت سنسور با افزایش جریان الکتریکی و فرکانس جریان افزایش می‌یابد. حداکثر حساسیت در حالت بار محوری و بار پیچشی به ترتیب  $0/7349 \text{ mV/kgf}$  و  $2/24 \text{ mV/N.m}$  می‌باشد.

## Design and Fabrication of a Contactless Hybrid Static Magnetostrictive Force-Torque Sensor Using Galfenol

Shahed Mirzamohamadi<sup>1</sup>, Mohamad Morad Sheikhi<sup>1\*</sup>, Mohamad Reza Karafi<sup>2</sup>, Mojtaba Ghodsi<sup>3</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, Shahid Rajaei Teacher training University, Tehran, Iran.

2- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

3- Energy & Electronic Engineering, Portsmouth University, Portsmouth, UK.

\* P.O.B. 16785-163 Tehran, Iran, m.sheikhi@sru.ac.ir

### Article Information

Original Research Paper

Received: 9 October 2021

First Decision: 31 October 2021

Accepted: 18 November 2021

### Keywords:

Magnetoelasticity

Sensor

Force

Torque

Galfenol

### Abstract

This paper presents a novel Contactless Hybrid Static Magnetostrictive Force-Torque sensor using Galfenol. Initially, the sensor's design principles in axial force and torque measurements are described. The magneto-mechanical properties of used materials, such as B-H curves and magnetic permeabilities are measured under various mechanical preloads and magnetic fields and improved in some cases. These properties are used in finite element method. The sensor is evaluated numerically using COMSOL Multiphysics<sup>®</sup> software based on the obtained experimental results. Afterward, the sensor is fabricated based on finite element method results and experimentally tested in different electrical currents and excitation frequencies. Sensitivity, repeatability and linearity errors are presented separately in force and torque measurements in optimal operating condition of the sensor. Then, the finite element method results are verified with the experimental results. Finally, the performance characteristics of the sensor in optimal conditions are presented and it is found that the sensitivity increases while increasing the electrical current (or magnetic field) and frequency. The maximum sensitivities for axial load and torque measurements are obtained at  $0.7349 \text{ mV/kgf}$  and  $2.24 \text{ mV/N.m}$ , respectively.

### 1- مقدمه

است [1]. تکنولوژی مگنتواستریکتیو مزایای متعددی از جمله

اندازه‌گیری نیرو و گشتاور با استفاده از مواد مگنتواستریکتیو در تحقیقات اخیر مورد توجه محققان این حوزه قرار گرفته استحکام کششی مطلوب (حدود  $350 \text{ MPa}$  برای گالفنل)،

اندازه‌گیری نیرو و گشتاور با استفاده از مواد مگنتواستریکتیو در تحقیقات اخیر مورد توجه محققان این حوزه قرار گرفته

Please cite this article using:

Sh. Mirzamohamadi, M. M. Sheikhi, M. R. Karafi, M. Ghodsi, Investigation Design and Fabrication of a Contactless Hybrid Static Magnetostrictive Force-Torque Sensor Using Galfenol, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 8, No. 9, pp. 50- 59, 2021 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

کششی خود اندوکتانس را برای تشخیص تنش کششی ارائه کردند [17]. قدسی و همکارانش پژوهشی در مورد یک نیروسنج استاتیکی مگنتواستریکتیو با حساسیت بسیار بالا را به کمک اثر ویلاری با استفاده از ماده ترفنل-دی ارائه کردند که بیشترین حساسیت مربوط به سنسورهای مشابه را داشت [2]. ونگ و همکارانش یک سنسور تماسی با استفاده از سیم‌های گالفنل برای تشخیص نیروهای استاتیکی و دینامیکی و صلبیت را معرفی کردند [4].

حال به بررسی تحقیقات انجام شده در حوزه سنسورهای گشتاور و نیرو-گشتاور مگنتواستریکتیو پرداخته می‌شود. کالتون و همکارانش با استفاده از آلیاژهای نیکل-آهن، سنسور نیرو و گشتاور مگنتواستریکتیو ساختند [18]. هاردکستل و همکارش یک سنسور گشتاور استاتیکی مگنتواستریکتیو با استفاده از نوارهای  $Fe_{81}B_{13.5}C_2$  به ابعاد  $30 \times 4 \times 0.025$  mm در راستای 45 درجه نسبت به محور میله بر روی میله برنجی را ارائه کردند [19]. واکی واکا و همکارش توسط لوله فولاد کربنی ساختمانی STKM13B سنسور گشتاور استاتیکی مگنتواستریکتیو را ارائه کردند [20]. کتنا و همکارانش با استفاده از نوار نیکل-آهن الکتروپلیت شده بر روی میله غیر مغناطیسی استیل 316 سنسور گشتاور استاتیکی مگنتواستریکتیو را ارائه کردند [21]. لیمنز و همکارانش به کمک نوارهای آلیاژی آهن-آلومینیوم سنسور گشتاور استاتیکی مگنتواستریکتیو را ارائه کردند [22]. راثو و همکارانش خواص مگنتواستریکتیو فریت‌های کبالت-منگنز را برای کاربردهای سنسور گشتاوری ارتقا دادند [23]. کرفی و همکارش یک سنسور هیبریدی نیرو-گشتاور به کمک ماده پرمندور را توسعه دادند که در آن از ماده پرمندور به عنوان المان حسگر استفاده شد که در قیاس با تحقیقات گذشته از حساسیت بالاتری برخوردار بود، اما به دلیل ساختار هندسی سنسور، قابلیت اندازه‌گیری بدون تماس فراهم نشده بود [1].

به طور کلی روند تحقیقات این حوزه به سوی اندازه‌گیری همزمان نیرو و گشتاور، افزایش حساسیت، اندازه‌گیری بدون تماس و نیز اندازه‌گیری بارهای استاتیکی توسط یک سنسور کوچک معطوف شده است. با توجه به خصوصیات گفته شده، این نوع سنسورها را می‌توان در عملیات حفاری، دریل، ماشینکاری و انتقال قدرت استفاده نمود. در پژوهش‌های قدیمی‌تر ضریب مگنتوالاستیک ماده مگنتواستریکتیو پایین بوده که به همین دلیل حساسیت سنسورهای مورد تحقیق نیز بسیار کم بوده است. در این تحقیق، هدف اصلی توسعه سنسور

سازگار با شرایط محیطی سخت، پاسخ زمانی بسیار کوتاه (چند میکرو ثانیه)، کنترل‌پذیری رفتار خروجی و طراحی در شرایط بدون مصرف انرژی را دارد [2]. سنسورهای مگنتواستریکتیو به دو دسته استاتیکی و دینامیکی طبقه‌بندی می‌شوند که روند تحقیقات به سمت اندازه‌گیری‌های استاتیکی می‌باشد [3]. در میان مواد مگنتواستریکتیو، گالفنل به دلیل اثر ویلاری قابل توجه آن، پتانسیل فراوانی برای استفاده در کاربردهای سنسوری دارد [4]. آلیاژهای گالفنل توسط کلارک و همکاران توسعه یافت و به دلیل خاصیت بارز مگنتواستریکتیو (200-250ppm)، اشباع توسط چگالی شار مغناطیسی پایین (1/1-5/6T)، خاصیت تردی پایین (کرنش لحظه شکست<sup>1</sup> 1%)، استحکام کششی بالا (350MPa) و قابلیت ماشینکاری و جوش پذیری مورد توجه فراوان قرار گرفته است [5]. این مشخصات ویژه اجازه تشخیص تنش‌های کششی و برشی بدون تماس در کاربردهای سنسوری را می‌دهد [6].

در ابتدا به بررسی تحقیقات انجام شده در حوزه سنسورهای نیرویی مگنتواستریکتیو پرداخته می‌شود. کلنکه و همکارش نیروسنج استاتیکی مگنتواستریکتیو متشکل از فولاد 1018 را معرفی کردند [7]. فیتزجرالد و همکارانش از یک کوپل خود القا جهت ثبت تغییرات اندوکتانس مغناطیسی و ضریب نفوذپذیری مغناطیسی المان مگنتواستریکتیو استفاده کردند [8]. چاکرابورتی و همکارش بر روی تاثیر بار محوری متغیر در القای مغناطیسی ماده مگنتواستریکتیو (ترفنل-دی) پژوهش انجام دادند [9]. بنکوسکی و همکارش از ویژگی ترکیب منگنز-روی در حالت فریتی برای طراحی سنسور نیرو استفاده کردند که این ترکیب دارای خاصیت نفوذپذیری مغناطیسی بسیار مناسبی بود [10]. باوئندیسیتل و همکارانش در تحقیق اول به معرفی سنسور کرنش مگنتواستریکتیو با استفاده از اثر هال [11] و در تحقیق دیگر از ترکیب نیکل-آهن برای ساخت نیروسنج مگنتواستریکتیو بهره بردند تا در ترمز وسایل نقلیه مورد استفاده قرار گیرد [12]. یانگ و همکارانش نیروسنج مگنتواستریکتیو با استفاده از ماده ترفنل-دی را به همراه مدل کوپله تحلیل عددی معرفی کردند [13]. آپرمن و همکارش هدف اصلی پژوهش را بر شناسایی ویژگی‌های رفتاری ماده آبر مگنتواستریکتیو ترفنل-دی و ساخت سنسور نیرو قرار دادند [14]. جیا و همکارانش تحقیقی در حیطه نیروسنج استاتیکی [15] و دینامیکی [16] با استفاده از ماده ترفنل-دی با هدف افزایش حداکثری حساسیت سنسور ارائه نمودند. شیو و همکارانش یک سنسور جریان گردابی

<sup>1</sup> Elongation

اندازه‌گیری می‌کنند.

سنسور در دو حالت اندازه‌گیری نیرو و گشتاور کار می‌کند. همان‌طور که در شکل 2 نشان داده شده است، در حالت نیرویی، شار مغناطیسی در راستای محور ماده مگنتواستریکتیو با تحریک سیم‌پیچ‌های روبرو عبور می‌کند. در حالت پیچشی، همان‌طور که در شکل 3 نشان داده شده است، سیم‌پیچ‌ها باید طوری تحریک شوند تا شار مغناطیسی در جهت 45 درجه نسبت به محور ماده عبور کند. چراکه تنش برشی باعث به وجود آمدن تنش‌های اصلی کششی و فشاری در راستای 45 درجه خواهد شد. هرگونه تغییر در شار مغناطیسی مدار معادل به معنای تغییر در بارهای محوری و پیچشی است که باعث اندازه‌گیری بارگذاری‌های اعمالی می‌شود.

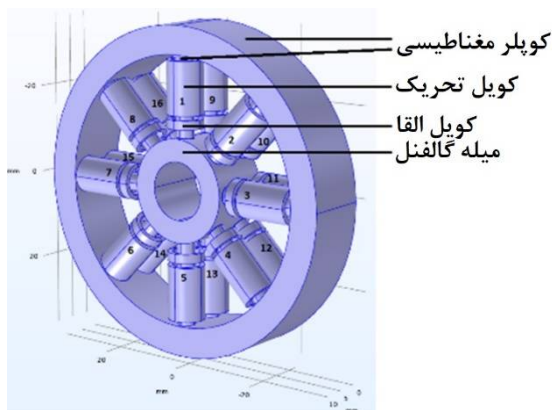


Fig. 1 The sensor's components

شکل 1 ساختار سنسور

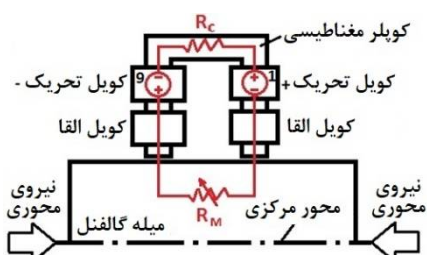


Fig. 2 Axial load measuring principle

شکل 2 حالت عملکردی نیرویی سنسور

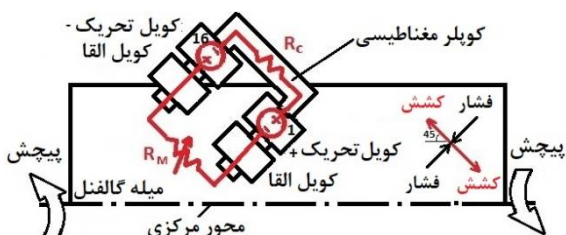


Fig. 3 Torque load measuring principle

شکل 3 حالت عملکردی گشتاوری سنسور

مگنتواستریکتیو استاتیکی با حساسیت بالاتر و خطای کمتر نسبت به تحقیقات گذشته جهت اندازه‌گیری بدون تماس و هم‌زمان نیرو و گشتاور می‌باشد.

## 2- طراحی سنسور

نوع و هندسه ماده مگنتواستریکتیو، تحریک مغناطیسی، هندسه سنسور و مواد مورد استفاده هنگام طراحی سنسورهای مگنتواستریکتیو مشخص می‌شود. شکل 1 ساختار سنسور را نشان می‌دهد. القای مغناطیسی با تغییر نفوذپذیری گالفنل تغییر می‌کند. گالفنل خاصیت مگنتواستریکشن مثبت دارد که به معنی افزایش طول آن در حین مواجه شدن با میدان مغناطیسی می‌باشد. در غیاب میدان مغناطیسی، راستای حوضچه‌های مغناطیسی<sup>1</sup> ماده گالفنل به صورت کاتوره‌ای قرار دارند. حین اعمال میدان مغناطیسی خارجی به میله گالفنل، حوضچه‌های مغناطیسی به سمت میدان مغناطیسی چرخش خواهند کرد که بر مبنای اثر ژول (مگنتواستریکشن)، طول میله افزایش خواهد یافت. حال اگر در این شرایط (حضور میدان مغناطیسی) به میله گالفنل نیروی فشاری وارد شود، حوضچه‌های مغناطیسی این‌بار به سمت عمود بر راستای میدان مغناطیسی (عمود بر راستای نیرو) چرخش خواهند کرد که بر مبنای اثر ویلاری (مگنتواستریکشن معکوس)، ضریب نفوذپذیری مغناطیسی ماده کاهش می‌یابد؛ به دلیل کاهش ضریب نفوذپذیری مغناطیسی ماده، چگالی شار مغناطیسی گذرنده از ماده کاهش خواهد یافت که با اندازه‌گیری آن می‌توان به بارگذاری مکانیکی پی‌برد. طبق شکل 1، مسیر شار مغناطیسی شامل میله‌های مرکزی (محل استقرار سیم پیچ‌ها) و بدنه خارجی سنسور است که از فولاد فوق کم کربن ساخته خواهد شد. با توجه به ابعاد جانمایی کوچک، 16 عدد سیم پیچ تحریک از سیم لاکه به قطر 1 میلی‌متر هرکدام با 40 دور پیچ بر روی میله‌ها باعث ایجاد میدان مغناطیسی می‌شود. با توجه به چگالی شار مغناطیسی مجاز گذرنده از سیم‌های لاکه، جریان الکتریکی با مقادیر 0/7، 1/4 و 2 آمپر تغییر می‌یابد. با توجه به محدودیت دستگاه سیگنال ساز، فرکانس تحریک نیز طی مقادیر 50، 150 و 500 هرتز تغییر می‌کند تا رفتار خروجی سنسور بررسی شود. بر مبنای قانون القای فارادی، 16 عدد سیم پیچ القایی از سیم لاکه به قطر 0/1 میلی‌متر هرکدام با 10 دور پیچ بر روی میله‌ها به صورت سری با سیم‌پیچ‌های تحریک استقرار دارند که شار مغناطیسی گذرنده از مدار که خروجی سنسور است را

<sup>1</sup> Magnetic domains

### 3- اندازه‌گیری مشخصات موادی

اندازه‌گیری تجربی خواص مغناطیسی-مکانیکی فولاد فوق کم کربن و گالفنل برای استفاده در شبیه‌سازی عددی سنسور در این بخش ارائه شده است. همان‌طور که گفته شد، فولاد فوق کم کربن به عنوان کوپلر مغناطیسی و گالفنل به عنوان المان متغیر در هندسه سنسور استفاده می‌شود.

#### 3-1- فولاد فوق کم کربن

فولاد مورد استفاده حاوی 0/013% کربن است و طبق استاندارد ASTM A848/M-96 به عنوان فولاد فوق کم کربن شناخته می‌شود. فولاد فوق کم کربن از طریق فرایند فورج تولید شده و طبق پیشنهاد مرجع [1] به منظور ارتقای خواص مغناطیسی، آنیل می‌شود. عملیات حرارتی به صورت افزایش درجه حرارت قطعات تا  $950^{\circ}\text{C}$  طی مدت حدود 2/5 ساعت و ماندگاری در آن درجه حرارت به اندازه 4 ساعت و کاهش درجه حرارت طی مدت 12 ساعت (با نرخ  $6/6^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ) می‌باشد. برای اندازه‌گیری خصوصیات مغناطیسی فولاد فوق کم کربن از استاندارد ASTM A596/A596M-96 استفاده شده است. بر اساس پژوهش قبلی مولفین طی این عملیات حرارتی، هیستریزیس مغناطیسی کاهش چشمگیری یافته و چگالی شار مغناطیسی اشباع ماده از مقدار  $1/4T$  به مقدار  $1/7T$  و حداکثر نفوذپذیری مغناطیسی نسبی از مقدار 2336 به مقدار 5617 ارتقا یافته است [3]. با توجه به زمان بسیار طولانی فرایند عملیات حرارتی و خلوص بسیار بالای فولاد فوق کم کربن و استعداد بسیار بالای این ماده برای اکسید شدن از یک سو و نیز ابعاد بزرگ قطعات و عدم وجود کوره با محیط خنثی (با درجه خلوص بسیار بالا) جهت جلوگیری از اکسیداسیون از سوی دیگر، این قطعات درون یک محفظه کاملاً گازبند از جنس فولاد ساختمانی قرار می‌گیرند که توسط جوشکاری گازبند می‌شود. در مجاورت نمونه‌های آهنی (درون محفظه گازبند) از برگ خشک و یک فلز فعال (مانند مس) استفاده شده است. با افزایش درجه حرارت، در ابتدا برگ‌های خشک می‌سوزد و با مصرف اکسیژن موجود در محفظه، تولید گازهای  $H$  و  $CO_2$  می‌کند که بر روی عدم اکسیداسیون آهن فوق کم کربن تاثیرگذار است. با افزایش بیشتر درجه حرارت، ماده فعال مس نیز دچار اکسیداسیون می‌شود که این دو عامل قبل از اکسیداسیون آهن فوق کم کربن باعث مصرف شدن اکسیژن موجود در محفظه و عدم اکسیداسیون ماده فولاد فوق کم کربن حین فرایند آنیل می‌شود. مس در درجه حرارت بالا و پایین دو واکنش متفاوت با اکسیژن می‌دهد. در درجه

حرارت‌های پایین تولید کوپریک اکسید مشکی و در درجه حرارت‌های بالا تولید کوپروس اکسید سرخ می‌کند.

#### 3-2- گالفنل

خواص مغناطیسی-مکانیکی گالفنل تحت تأثیر شرایط مکانیکی و مغناطیسی بر اساس اثر ویلاری تغییر می‌کنند. همان‌طور که مجموعه آزمایش در شکل 4 نشان داده شده است، یک سیم‌پیچ تحریک با 600 دور، میدان مغناطیسی با فرکانس 50 هرتز ایجاد می‌کند که با توجه به استفاده از سیم با قطر 1mm، این کویل قادر به تحمل جریان 4A مطابق با چگالی جریان  $J=5A/\text{mm}^2$  می‌باشد. حال با توجه به اینکه از جریان متغیر برای انجام تست استفاده می‌شود و پیک جریان مهم است، می‌توان به صورت لحظه‌ای جریان بیشتری را از کویل عبور داد تا گالفنل در حین آزمایش دچار اشباع مغناطیسی شود. بر اساس محدودیت‌های ارائه شده و به جهت داشتن هشت نقطه برای برازش منحنی‌های بکر<sup>1</sup>، در هشت مرحله ولتاژ تغییر کرده است. یک سیم‌پیچ القا با 5 دور، چگالی شار مغناطیسی در گالفنل را بر اساس قانون القای فارادی اندازه‌گیری می‌کند [1]. به منظور جلوگیری از القای ولتاژ اضافی و نیز جلوگیری از ایجاد نویز، پیچیدن سیم به دور خود به سمت محیط بیرونی توصیه می‌شود [1]. یک سنسور اثر هال در نزدیکی گالفنل قرار داده شده است تا شدت میدان مغناطیسی (H) را با استفاده از ضریب نفوذپذیری مغناطیسی هوا اندازه‌گیری کند. برای ساختن کوپلر مغناطیسی مجموعه آزمایش، از پرمالوی استفاده شده است؛ چراکه برای اندازه‌گیری بدون خطا، کوپلر مغناطیسی بایستی نفوذپذیری مغناطیسی بالاتر و حداقل تلفات مغناطیسی در قیاس با گالفنل را دارا باشد. برای ارتقای خواص مغناطیسی قطعات مجموعه آزمایش از جنس پرمالوی، این قطعات تحت عملیات حرارتی قرار گرفته‌اند.

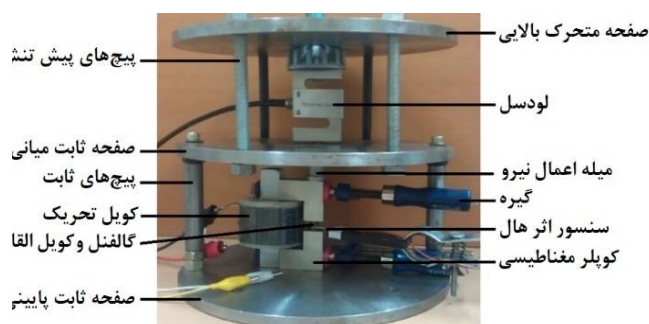


Fig. 4 Magneto-mechanical experimental setup of Galfenol

شکل 4 مجموعه آزمایش مگنتو-مکانیکی گالفنل

<sup>1</sup> Virgin Curves

منحنی‌های بکر نیز در شکل 8 نشان داده شده است. با دیفرانسیل‌گیری از منحنی‌های بکر و نرمال‌سازی آن‌ها با استفاده از ضریب نفوذپذیری مغناطیسی هوا، نمودار نفوذپذیری مغناطیسی نسبی گالفنل بدست می‌آید (شکل 9). حداکثر نفوذپذیری مغناطیسی نسبی گالفنل از 118 تحت نیروی 16kgf به میزان 88 تحت نیروی محوری 100kgf تغییر می‌کند. بیشینه مقدار نفوذپذیری مغناطیسی نسبی گالفنل در شرایط بی‌باری به میزان 123 می‌باشد.

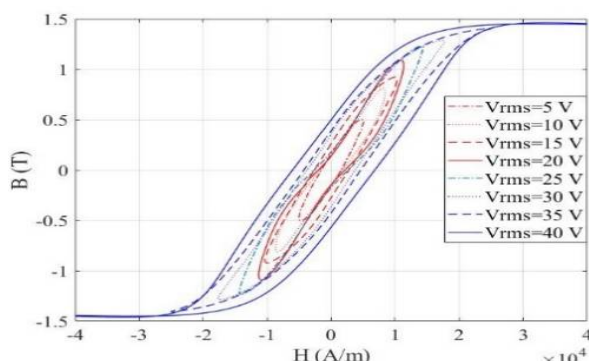


Fig. 6 Magnetic behavior of Galfenol under Axial load of 100 kgf (stress of 12.49 MPa)

شکل 6 رفتار مغناطیسی گالفنل تحت نیروی 100kgf (تنش 12/49MPa)

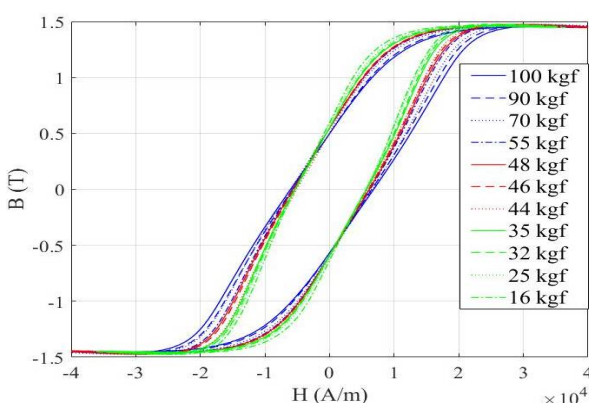


Fig. 7 Major loops of magnetic hysteresis of Galfenol under different preloads ( $V_{rms} = 40$  V)

شکل 7 حلقه‌های اصلی هیستریز مغناطیسی تحت پیش‌بارهای مختلف ( $V_{rms}=40$  V)

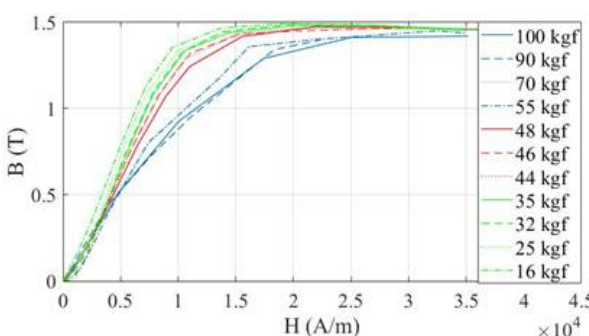


Fig. 8 Virgin curves of Galfenol

شکل 8 منحنی‌های بکر گالفنل

قطعات پرمالوی در مدت زمان بیست و پنج دقیقه به درجه حرارت  $1200^{\circ}\text{C}$  رسیده و در آن درجه حرارت به میزان 4 ساعت نگهداری شده که از همان درجه حرارت به مدت 16 ساعت با نرخ  $1/22^{\circ}\text{C}/\text{min}$  خنک می‌شود. در نتیجه این فرایند، ضمن کاهش هیستریز مغناطیسی، ضریب نفوذپذیری مغناطیسی نسبی آن از حدود 5000 به 18000 و چگالی شار مغناطیسی آن از مقدار  $1/1\text{T}$  به  $1/6\text{T}$  می‌رسد. اجزای مکعبی مجموعه آزمایشی برای داشتن یک سطح صاف سنگ‌زنی شده‌اند تا تلفات گپ‌های هوایی حذف شوند. برای بررسی میزان تاثیر منفی فرایند سنگ‌زنی بر روی بازسختی قطعات، آزمایش سختی سنجی بر روی قطعات انجام شده است. سختی قطعات پرمالوی آنبیل نشده 102 برینل، پرمالوی عملیات حرارتی شده 81 برینل و پرمالوی آنبیل شده و سنگ‌زنی شده 88 برینل اندازه‌گیری شده است. نتایج نشان می‌دهد که عملیات حرارتی پرمالوی، سختی آن را به میزان  $20/58\%$  کاهش داده است و فرایند سنگ‌زنی، سختی آن را به میزان  $8/64\%$  افزایش داده است که البته این افزایش در سطح جسم رخ داده است و سختی عمق جسم تغییری نخواهد کرد. بنابراین سنگ‌زنی پرمالوی تاثیر منفی بر روی سخت شوندگی آن دارد که البته قابل چشم‌پوشی است. سطح مقطع اجزای کوپلر مغناطیسی به گونه ای طراحی شده‌اند که ماده تحت آزمایش زودتر از کوپلر مغناطیسی اشباع شود.

بر اساس پیشنهاد استاندارد ASTM E74-00a، نیرو در 11 مرحله از مقدار 0kgf تا 100kgf تغییر کرده است. در مجموع 96 آزمایش حلقه هیستریز مغناطیسی برای به دست آمدن منحنی‌های B-H گالفنل انجام شده است، دو مورد از آنها در شکل‌های 5 و 6 گزارش شده است. حلقه‌های اصلی<sup>1</sup> منحنی‌های B-H تحت بارهای مختلف در شکل 7 ارائه شده است.

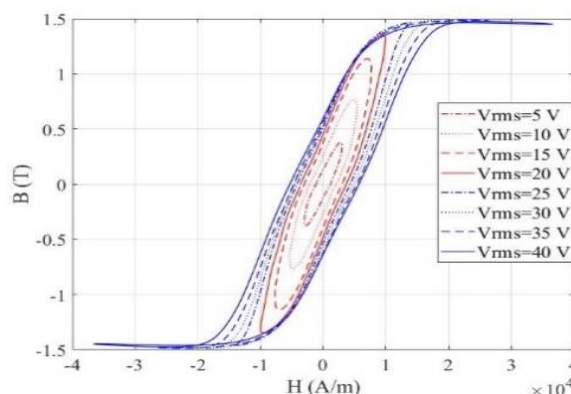


Fig. 5 Magnetic behavior of Galfenol under Axial load of 16 kgf (stress of 1.99 MPa)

شکل 5 رفتار مغناطیسی گالفنل تحت نیروی 16kgf (تنش 1/99MPa)

<sup>1</sup> Major loops



حداقل دوبار تکرار شود؛ ولی با توجه به پیشنهاد استاندارد، سه تکرار انجام شده است.

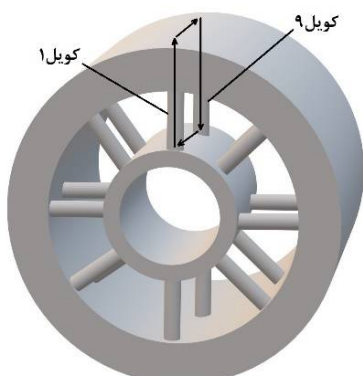


Fig. 10 The direction of magnetic flux path in axial load measuring  
شکل 10 مسیر شار مغناطیسی در حالت نیرویی

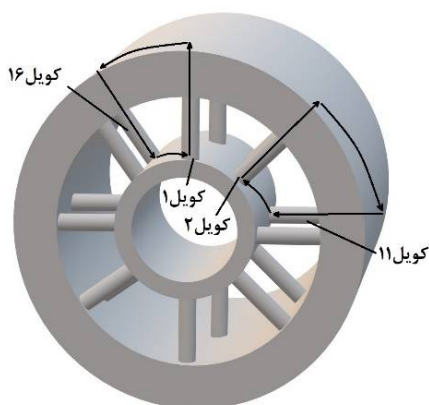


Fig. 11 The direction of magnetic flux path in torque load measuring  
شکل 11 مسیر شار مغناطیسی در حالت گشتاوری

متغیر دوم و سوم مربوط به جریان و فرکانس عبوری از سیم‌پیچ تحریک سنسور است که جریان توسط قطر سیم‌های لاکه و چگالی جریان الکتریکی مجاز آن و فرکانس عبوری توسط محدودیت سیگنال ساز محدود می‌شود و هر کدام طی سه مرحله تغییر می‌کند که نتایج آن گزارش شده است. طراحی آزمایش به کار گرفته شده به صورت فول فاکتوریل است که نسبت به استاندارد مذکور به صورت محافظه کارانه‌تر می‌باشد. در اندازه‌گیری گشتاوری نیز مشابه حالت نیرویی رفتار شده است. مغناطیس زدایی مدار مغناطیسی سنسور با استفاده از جریان سینوسی به طور خودکار انجام می‌شود. منبع تغذیه ESCORT 6030TD جریان الکتریکی ورودی لودسل را تأمین می‌کند. اسیلوسکوپ Tektronix TDS1012 100MHz 1GS/s و مولتی متر VICTOR 88C به ترتیب برای اندازه‌گیری ولتاژهای خروجی کویل‌های القا و لودسل استفاده شده است. پاسخ خروجی سنسور در شرایط بالاترین مقادیر فرکانسی و

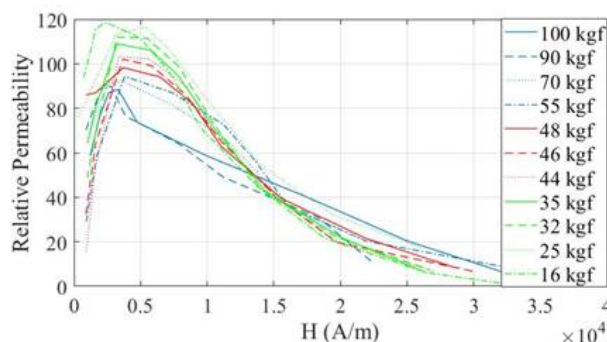


Fig. 9 Relative permeability of Galfenol

شکل 9 نفوذپذیری مغناطیسی نسبی گالفنل

#### 4- شبیه‌سازی المان محدود

هندسه ساده شده با استفاده از نرم‌افزار کامسول مدل‌سازی شده است. نفوذپذیری مغناطیسی گالفنل طی 13 مرحله از 123 به 84/5 تحت صفر نیوتن تا 350 نیوتن در حالت نیرویی سنسور تغییر می‌کند. از مش‌های تتراهدرال و سوئیپ در این شبیه‌سازی استفاده شده و بررسی استقلال نتایج از مش‌بندی نیز انجام است. شکل 10 مسیر شار مغناطیسی را در حالت نیرویی و شکل 11 مسیر شار مغناطیسی را در حالت گشتاوری نشان می‌دهد. نتایج شبیه‌سازی المان محدود در بخش صحت سنجی ارائه شده است. پس از صحت سنجی نتایج در حالت نیرویی، سنسور در حالت گشتاوری شبیه‌سازی شده است که مشاهده شد فقط 34% تغییرات نفوذپذیری مغناطیسی مورد انتظار در حالت پیچشی اتفاق افتاده است. بین بارگذاری‌های 0N.m و 20N.m، انتظار می‌رود که ضریب نفوذپذیری مغناطیسی بین 123 تا 77/44 تغییر کند، اما نتایج عددی نشان می‌دهد که این مقدار بین 123 الی 107/5 تغییر کرده است که به دلیل تفاوت جهت بارگذاری با محور آسان<sup>1</sup> گالفنل می‌باشد؛ بنابراین، تغییرات نفوذپذیری مغناطیسی گالفنل به صورت دقیق از معادلات الاستیک پیروی نمی‌کند.

#### 5- مطالعه تجربی

سنسور هیبریدی نیرو-گشتاور مگنتواستریکتیو با استفاده از نتایج شبیه‌سازی المان محدود، مطابق شکل 12 و 13 به ترتیب برای اندازه‌گیری بارهای محوری و گشتاور پیچشی طراحی و ساخته شد و مطابق با استاندارد ASTM E74-00a آزمایش شده است. با استناد به استاندارد مذکور، متغیر اول مربوط به افزایش بارگذاری است که نیروی محوری در بازه 20N تا 350N، طی 10 مرحله در هر آزمایش افزایش می‌یابد که لازم است هر نقطه

<sup>1</sup> Easy axis

بر اساس نتایج آزمون‌های تجربی، گشتاور در پاسخ سنسور در حالت نیرویی تأثیر نمی‌گذارد. با این حال، بار محوری تأثیر ناچیزی (در حدود 12mV در کل بازه) بر پاسخ سنسور در حالت گشتاوری دارد. این یافته‌ها با معادلات الاستیک مطابقت دارد.

همان‌طور که در شکل‌های 14 و 15 نشان داده شده است، حساسیت سنسور با افزایش جریان الکتریکی و فرکانس افزایش می‌یابد. حساسیت در حالات نیرویی و گشتاوری در شرایط 2A و 500Hz به ترتیب 0/74 mV/N و 2/24 mV/N است. افزایش حساسیت بیان می‌کند که با افزایش شدت میدان مغناطیسی یا فرکانس، تعداد و زاویه چرخش حوضچه‌های مغناطیسی با اعمال تنش مکانیکی افزایش می‌یابد. منطقه خطی و حساسیت سنسور نیز توسط تغییر جریان الکتریکی قابل جابه‌جا کردن است، به طوری که بسته به هدف کاربری سنسور، با کاستن از حساسیت سنسور در قالب تغییر فرکانس یا جریان الکتریکی می‌توان به شرایط مطلوب‌تر خطی بودن سنسور رسید و بالعکس.

بر اساس استاندارد ASTM E74-00a، جهت گزارش منحنی عملکردی سنسور، پیشنهاد شده که از منحنی با درجات دو یا بیشتر و روش حداقل مربعات استفاده شود که در این پژوهش از منحنی‌های درجه 2 استفاده شده است. در این روش معادله درجه دو برازش خواهد شد و ثابت سه‌گانه معادله به نحوی محاسبه می‌شود که مقدار  $\sum(y_i - y(x_i))^2$  کمینه شود که به عنوان پارامتر R-Square شناخته می‌شود.

با استفاده از روش حداقل مربعات، مشخص شد که انحراف استاندارد با افزایش بار افزایش می‌یابد. سنسور در حالت نیرویی در نیروهای 16 kgf و 350 kgf به صورت غیر خطی رفتار می‌کند. هنگامی که محدوده اندازه‌گیری از 10 تا 90 درصد ظرفیت سنسور تعریف شود، می‌توان نیروی 350kgf را حذف کرد. حساسیت و نتایج مربوط به R-Square در جداول 1 و 2 گزارش شده و خطای خطی بودن در شکل‌های 16 و 17 نشان داده شده است. با افزایش جریان الکتریکی و فرکانس، حساسیت و همچنین خطای سنسور افزایش می‌یابد. خطای خطی بودن در حالت نیرویی در شرایط شدت جریان 0/7A و فرکانس 50 Hz کمینه و در شرایط شدت جریان 0/7A و فرکانس 150Hz بیشینه است. همچنین، خطای خطی بودن در حالت گشتاوری در شرایط شدت جریان 0/7A و فرکانس 50Hz و 150Hz کمینه و در شرایط شدت جریان 2A و فرکانس 150Hz بیشینه است.

جریانی در دو حالت نیرویی و گشتاوری در شکل‌های 14 و 15 ارائه شده است.

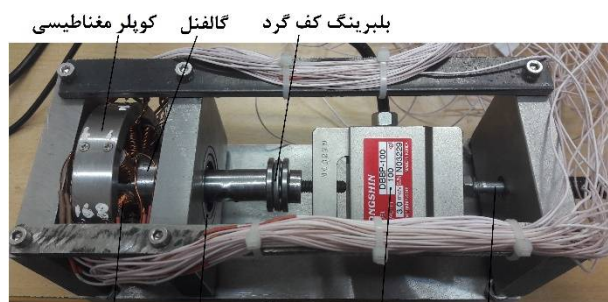


Fig. 12 The sensor in axial load measuring

شکل 12 سنسور در حالت نیرویی

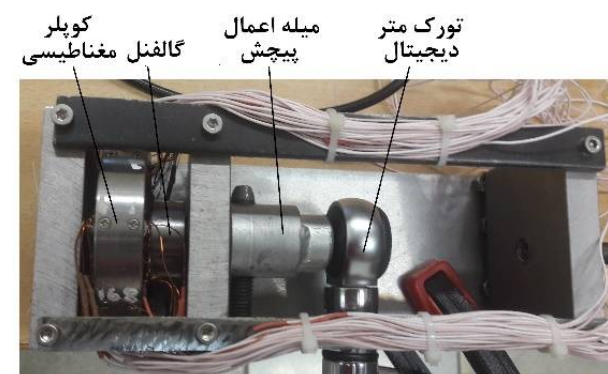


Fig. 13 The sensor in torque load measuring

شکل 13 سنسور در حالت گشتاوری

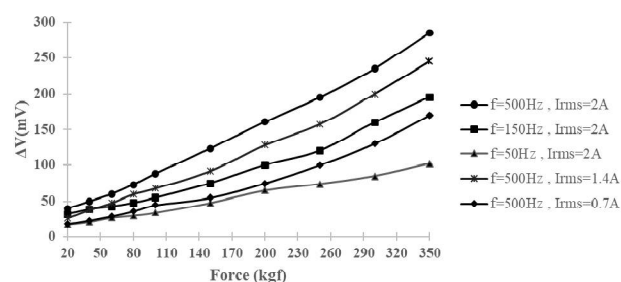


Fig. 14 The sensor's response in axial load measuring

شکل 14 پاسخ سنسور در حالت نیرویی

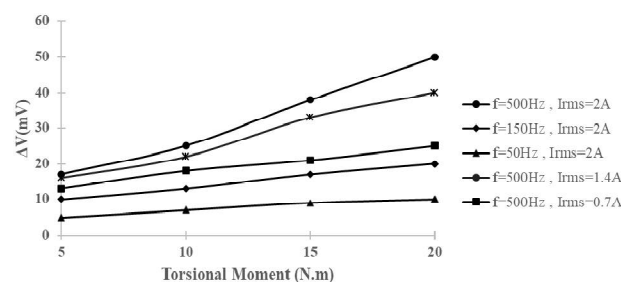


Fig. 15 The sensor's response in torque load measuring

شکل 15 پاسخ سنسور در حالت گشتاوری

## 6- صحت سنجی نتایج

همان‌طور که در شکل‌های 18 و 19 مشاهده می‌شود، نتایج شبیه‌سازی المان محدود سنسور با نتایج آزمایش تجربی آن در حالات نیرویی و گشتاوری مقایسه شده است. این صحت سنجی در شدت جریان 2A و فرکانس 500 هرتز (شرایط حداکثر حساسیت) برای بررسی عملکرد سنسور انجام شده است. با توجه به این قیاس، خطای شبیه‌سازی عددی حدود 8/3% می‌باشد.

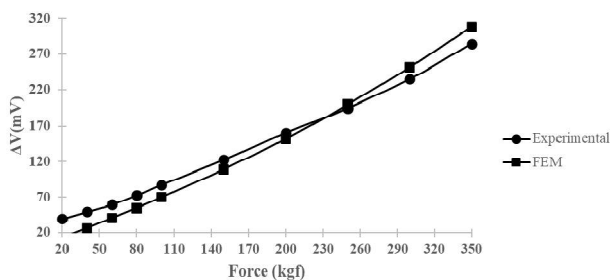


Fig. 18 Verification of the results at 2 A and 500 Hz in axial load measuring

شکل 18 صحت سنجی نتایج در شدت جریان 2 آمپر و فرکانس 500 هرتز در حالت نیرویی

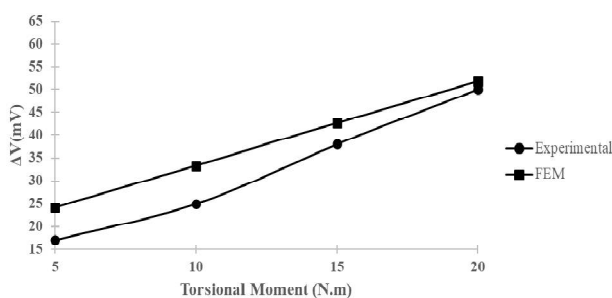


Fig. 18 Verification of the results at 2 A and 500 Hz in torque load measuring

شکل 19 صحت سنجی نتایج در شدت جریان 2 آمپر و فرکانس 500 هرتز در حالت گشتاوری

## 7- نتایج و بحث

بیشینه نفوذپذیری مغناطیسی نسبی میله گالفنل از مقدار 123 تحت شرایط بی‌باری، به مقدار 88 تحت 100kgf تغییر می‌کند که این تغییرات برای کاربردهای سنسوری مناسب است. منطقه خطی سنسور را می‌توان با تغییر جریان الکتریکی جابجا کرد. حساسیت و خطای خطی بودن سنسور با افزایش جریان و فرکانس جریان الکتریکی افزایش می‌یابد. حداکثر حساسیت سنسور 0/7349 mV/kgf و 2/24 mV/N.m به ترتیب در حالات نیرویی و گشتاوری است. در شرایط حداکثر حساسیت، حداکثر خطای خطی بودن در حالت نیرویی در 350 kgf رخ می‌دهد و خطای مذکور 3/75% FSO است و خطای خطی بودن حداکثر در حالت گشتاوری در 10 N.m و خطای مذکور

## جدول 1 حساسیت و مقدار R-Square در حالت نیرویی

Table 1 Sensitivity and R-Square in axial load measuring

R-Square	حساسیت (mV/N)	فرکانس (Hz)	شدت جریان (A)
0/9910	0/0687	50	0/7
0/9907	0/1244	50	1/4
0/9965	0/2561	50	2
0/9535	0/2849	150	0/7
0/9962	0/3919	150	1/4
0/9984	0/48	150	2
0/9964	0/4611	500	0/7
0/9989	0/6407	500	1/4
0/9993	0/7349	500	2

## جدول 2 حساسیت و مقدار R-Square در حالت گشتاوری

Table 2 Sensitivity and R-Square in torque load measuring

R-Square	حساسیت (mV/N)	فرکانس (Hz)	شدت جریان (A)
1	0/2	50	0/7
0/98	0/28	50	1/4
0/9966	0/34	50	2
1	0/4	150	0/7
0/9802	0/42	150	1/4
0/9966	0/68	150	2
0/9941	0/78	500	0/7
0/9884	1/66	500	1/4
0/9972	2/24	500	2

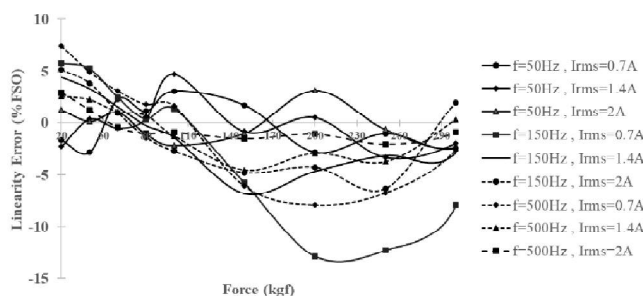


Fig. 16 Linearity errors in axial load measuring

شکل 16 خطای خطی بودن در حالت نیرویی

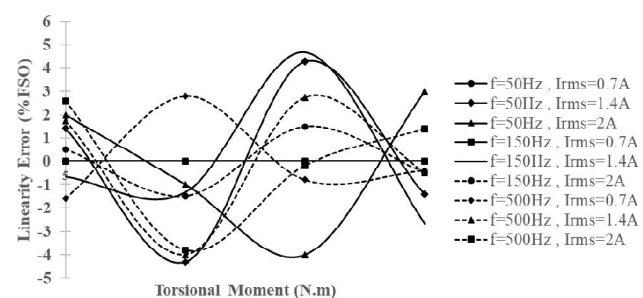


Fig. 17 Linearity errors in torque load measuring

شکل 17 خطای خطی بودن در حالت گشتاوری



گشتاوری گزارش شده است. بازه‌های دارای کمترین خطای خطی بودن در اندازه‌گیری‌های نیرویی و گشتاوری به ترتیب  $300-40\text{kgf}$  و  $20-5\text{N.m}$  می‌باشد. حساسیت سنسور و خطای خطی بودن با افزایش جریان الکتریکی و فرکانس جریان افزایش می‌یابد. مقادیر حساسیت و خطای خطی بودن سنسور هیبریدی نیرو-گشتاور مگنتواستریکتیو که در این پژوهش ارائه شد، بهبود بسیار مناسبی را نسبت به پژوهش‌های قبلی تجربه کرده است. به دلیل تفاوت جهت بارگذاری پیچشی با محور آسان گالفنل، فقط 34% تغییرات نفوذپذیری مغناطیسی مورد انتظار در حالت پیچشی به وقوع می‌پیوندد؛ بنابراین، تغییرات نفوذپذیری مغناطیسی گالفنل به صورت دقیق همانند معادلات الاستیک رفتار نمی‌کند. همچنین مشاهده شد که بار پیچشی در اندازه‌گیری نیرویی سنسور تغییری حاصل نمی‌کند و بار محوری تغییر ناچیزی (حدود  $12\text{mV}$  در کل بازه) در اندازه‌گیری گشتاوری سنسور ایجاد می‌کند که این مورد موافق با معادلات الاستیک ماده می‌باشد. خطای شبیه‌سازی عددی نیز 8/3% بوده است.

## 9- مراجع

- [1] M. Karafi and S. Ehteshami, "Introduction of a hybrid sensor to measure the torque and axial force using a magnetostrictive hollow rod," *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 276, pp. 91-102, 2018.
- [2] M. Ghodsi, S. Mirzamohamadi, S. Talebian, Y. Hojjat, M. Sheikhi, A. Al-Yahmedi and A. Özer, "Analytical, numerical and experimental investigation of a giant magnetostrictive (GM) force sensor," *Sensor Review*, Vol. 35, pp. 357-365, 2015.
- [3] S. mirzamohammadi, M. ghodsi, Y. hojjat and S. talebian, "Numerical and Experimental Study on Sensitivity of Static Force Sensor Using Giant Magnetostrictive Material," *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 15, pp. 147-158, 2014. (in Persian)
- [4] L. Weng, G. Xie, B. Zhang, W. Huang, B. Wang and Z. Deng, "Magnetostrictive tactile sensor array for force and stiffness detection," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 513, p. 167068, 2020.
- [5] C. Gao, Z. Zeng, S. Peng and C. Shuai, "Magnetostrictive alloys: Promising materials for biomedical applications," *Bioactive Materials*, No. <https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2021.06.025>, 2021.
- [6] K. Nakajima, H. Kurita and F. Narita, "Performance boost of co-rich fe-co based alloy magnetostrictive sensors via nitrogen treatment," *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 295, pp. 75-83, 2019.
- [7] D. K. Kleinke and H. M. Uras, "A magnetostrictive force sensor," *Review of Scientific Instruments*, Vol. 65, No. 5, pp. 1699-1710, 1994.
- [8] A. E. Fitzgerald, D. E. Higginbotham and A. Grabel,

3/8%FSO است. مقادیر حساسیت و خطای خطی بودن سنسور هیبریدی نیرو-گشتاور مگنتواستریکتیو که در این پژوهش ارائه شد، بهبود بسیار مناسبی را نسبت به پژوهش‌های قبلی تجربه کرده است. ویژگی‌های عملکردی سنسور در شرایط بهینه در جدول 3 ارائه شده است.

جدول 3 مشخصات عملکردی سنسور در شرایط بهینه

Table 3 Performance characteristics of the fabricated sensor in optimal conditions

مقدار	مشخصه
20 - 350	بازه اندازه‌گیری پیشنهادی در حالت نیرویی (kgf)
20-5	بازه اندازه‌گیری پیشنهادی در حالت گشتاوری (N.m)
0/7349	بیشترین حساسیت در حالت نیرویی (mV/kgf)
2/24	بیشترین حساسیت در حالت گشتاوری (mV/N.m)
3/75	بیشترین خطای خطی بودن در حالت نیرویی (%FSO)
3/8	بیشترین خطای خطی بودن در حالت گشتاوری (%FSO)
2/11	صحت (خطای تکرارپذیری) در حالت نیرویی (%FSO)
2/2	صحت (خطای تکرارپذیری) در حالت گشتاوری (%FSO)
40 - 300	بازه با کمترین خطای خطی بودن در حالت نیرویی (kgf)
20-5	بازه با کمترین خطای خطی بودن در حالت گشتاوری (N.m)

## 8- نتیجه‌گیری

در این تحقیق یک سنسور جدید هیبریدی نیرو-گشتاور مگنتواستریکتیو بدون تماس با استفاده از ماده گالفنل طراحی و ساخته شد که در شرایط مختلف تحت آزمایش قرار گرفت. سنسور دارای حداکثر حساسیت  $0/7349\text{ mV/kgf}$  و گشتاوری در شرایط جریان الکتریکی  $2\text{A}$  و فرکانس  $500\text{Hz}$  است. حین اندازه‌گیری نیرو، سنسور در مقادیر  $20\text{kgf}$  و  $350\text{kgf}$  به صورت غیرخطی رفتار می‌کند. در حالت نیرویی، خطای خطی بودن در شرایط شدت جریان  $0/7\text{A}$  و فرکانس  $50\text{Hz}$  کمینه و در شرایط شدت جریان  $0/7\text{A}$  و فرکانس  $150\text{Hz}$  بیشینه است. همچنین، خطای خطی بودن در حالت گشتاوری در شرایط شدت جریان  $0/7\text{A}$  و فرکانس  $50\text{Hz}$  و  $150\text{Hz}$  کمینه و در شرایط شدت جریان  $2\text{A}$  و فرکانس  $150\text{Hz}$  بیشینه است. در شرایط حداکثر حساسیت، حداکثر خطای خطی بودن در حالت نیرویی در  $350\text{kgf}$  رخ می‌دهد و خطای مذکور  $3/75\% \text{FSO}$  است و حداکثر خطای خطی بودن در حالت گشتاوری در  $10\text{N.m}$  و خطای مذکور  $3/8\% \text{FSO}$  است. خطای تکرارپذیری سنسور نیز با توجه به تکرار اندازه‌گیری‌های مشابه به میزان  $2/11\% \text{FSO}$  در حالت نیرویی و به میزان  $2/2\% \text{FSO}$  در حالت

- magnetostrictive material and its model," *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 509, pp. 1760-1767, 2011.
- [17] C. Xiu, L. Ren, H. Li and Z. Jia, "Study on an innovative self-inductance tension eddy current sensor based on the inverse magnetostrictive effect," *Sensor Review*, Vol. 37, pp. 43-53, 2017.
- [18] O. Caltun, L. Spinu and A. Stancu, "Tension and torsion magnetic sensors based on frequency harmonic content analysis of the induced signal in perpendicular fields," *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 59, pp. 142-148, 1997.
- [19] M. Hardcastle and T. Meydan, "Magnetic domain behavior in magnetostrictive torque sensors," *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 81, pp. 121-125, 2000.
- [20] H. Wakiwaka and M. Mitamura, "New magnetostrictive type torque sensor for steering shaft," *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 91, pp. 103-106, 2001.
- [21] A. Ktena, C. Manasis, C. Papadopoulos, D. Bargiotas, O. Ladoukakis, K. Ziatakis, I. Valsamis and F. Magkafas, "Measurement system for a magnetostrictive torque sensor," in *16th International Conference on Systems, Signals, and Image Processing*, 2009.
- [22] P. B. Limenes, J. A. García, J. Carrizo and M. M.-G. J. C. Rivas, "Inverse Wiedemann effect in Fe-Al alloys for torque sensing applications," *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 180, pp. 45-48, 2012.
- [23] G. Rao, O. Caltun, K. Rao, P. Subba Rao and B. Parvatheeswara Rao, "Improved magnetostrictive properties of Co-Mn ferrites for automobile torque sensor applications," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 341, pp. 60-64, 2013.
- in *Basic Electrical Engineering*, New York, McGraw-Hill, 1975, pp. 568-623.
- [9] S. Chakraborty and G. R. Tomlinson, "An initial experimental investigation into the change in the magnetic induction of a Terfenol-D rod due to external stress," *Smart Mater. Struct.*, Vol. 12, pp. 763-768, 2003.
- [10] A. Bieńkowski and R. Szewczyk, "The possibility of utilizing the high permeability magnetic materials in the construction of magnetoelastic stress and force sensors," *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 113, pp. 270-276, 2004.
- [11] T. Baudendistel, "Magnetostrictive strain sensor with hall effect". United States Patent 6931940, 2005.
- [12] T. A. Baudendistel, "Development of a novel Magnetostrictive force sensor," *A dissertation submitted to the graduate faculty in partial fulfillment of the requirements for the degree of doctor of philosophy, University of Dayton, Dayton, Ohio*, 2005.
- [13] Q. Yang, Y. R. C. Fan, H. Chen, F. Liu and 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.
- [14] K. Oppermann and B. G. Zagar, "Material characterization for a TERFENOL-D based force sensor," in *Fundamental and Applied Metrology*, Lisbon, Portugal, XIX IMEKO, 2009.
- [15] Z. Y. Jia, H. F. Liu, F. J. Wang, W. Liu and C. Y. Ge, "A novel magnetostrictive static force sensor based on the giant magnetostrictive material," *Measurement*, vol. 44, pp. 88-95, 2010.
- [16] Z. Y. Jia, H. F. Liu, F. J. Wang and C. Y. Ge, "Research on a novel force sensor based on giant