



مطالعه تاثیر میدان مغناطیسی بایاس و پیش تنش مکانیکی بر حساسیت و محدوده اندازه گیری خطی نیروسنج ترفنل-دی

سهیل طالبیان^۱، یوسف حجت^{۲*}، مجتبی قدسی^۳، شاهد میرزامحمدی^۴، محمدرضا شیخ الاسلامی^۱

۱- دانشجوی دکترای مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۲- دانشیار مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۳- استادیار مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۴- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

* تهران، صندوق پستی ۱۴۳-۱۴۱۱۵، yhojjat@modares.ac.ir

چکیده - ترفنل-دی به عنوان یک ماده ابردگرسان مغناطیسی در ساخت بسیاری از حسگرها از قبیل نیروسنج کاربرد دارد. در این حسگرها نیروی خارجی به واسطه تغییر در شار مغناطیسی گذرنده از ترفنل-دی اندازه گیری می شود. به منظور بهبود عملکرد این حسگرها، ترفنل-دی تحت تاثیر میدان مغناطیسی بایاس و پیش تنش مکانیکی قرار می گیرد. در این مقاله، اثرات میدان مغناطیسی بایاس و پیش تنش مکانیکی بر حساسیت و محدوده اندازه گیری خطی حسگر مورد بررسی قرار می گیرد و مقادیر بهینه آنها شناسایی می شوند. در ابتدا با استفاده از معادلات ترکیبی کوپل مگنتومکانیکی، مدل تئوری که شامل پارامترهای موثر بر حساسیت حسگر می باشد، ارائه می شود. سپس با استفاده از یک مجموعه آزمایشگاهی، خواص مغناطیسی-مکانیکی ترفنل-دی مطالعه شده و مقادیر پارامترهای مورد نیاز مدل تئوری استخراج می گردد. در انتها با استفاده از مدل تئوری و نتایج تجربی، پاسخ حسگر در مقابل نیروهای دینامیکی شبیه سازی شده و تاثیرات میدان مغناطیسی بایاس و پیش تنش مکانیکی بر فاکتور حساسیت و محدوده اندازه گیری خطی حسگر مطالعه می شوند. نتایج به دست آمده نشان دهنده آن است که مقادیر میدان مغناطیسی بایاس و پیش تنش مکانیکی باید در ارتباط با همدیگر و با توجه به دامنه نیروی اعمالی تعیین شوند تا حسگر ترفنل-دی بیشترین حساسیت را داشته باشد.

کلیدواژگان: حسگر نیرو، ترفنل-دی، میدان مغناطیسی بایاس، پیش تنش مکانیکی، حساسیت

Study on the effects of bias magnetic field and mechanical pre-stress on sensitivity and linear measurement range of Terfenol-D force sensor

S. Talebian¹, Y. Hojjat^{2*}, M. Ghodsi³, SH. Mirzamohammadi⁴, M. Sheikholeslami¹

1- PhD Student, Mech. Eng., Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran.

2- Assoc. Prof., Mech. Eng., Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran.

3- Assist. Prof., Mech. Eng., Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran.

4- MSc. Student, Mech. Eng., Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran.

*P.O.B. 14115-143 Tehran, yhojjat@modares.ac.ir

Abstract- Terfenol-D, known as a giant magnetostrictive material, is used in many sensors such as force sensor. In these sensors, external force is measured due to variation of magnetic flux density passing through Terfenol-D. To improve the performance, Terfenol-D is exposed to bias magnetic field and mechanical pre-stress. In this paper, Effects of bias magnetic field and mechanical pre-stress on sensitivity and linear measurement range of a force sensor are studied and optimum values of them are recognized. Initially based on magnetomechanical coupling equations, theoretical model of sensor that includes effective parameters on sensitivity and linear measurement range is developed. Then using experimental set-up, magnetomechanical properties of Terfenol-D are investigated and values of essential parameters for theoretical model are extracted. Finally, employing theoretical model and experimental results, the response of sensor under dynamic external forces is simulated and effects of bias magnetic field and mechanical pre-stress on sensitivity and linear measurement range of the sensor are studied. Based on the obtained results, to increase sensitivity and linear measurement range of sensor, values of bias magnetic field and mechanical pre-stress should be relatively determined considering the amplitude of external force.

Keywords: Force sensor, Terfenol-D, Bias magnetic field, Mechanical pre-stress, Sensitivity

۱- مقدمه

دگرسانی مغناطیسی^۱ به تغییر طول ماده فرومغناطیس هنگام قرارگیری در میدان مغناطیسی گفته می‌شود. تمام مواد فرومغناطیس کمابیش دارای خاصیت دگرسانی مغناطیسی می‌باشند. مواد دگرسان مغناطیسی قابلیت تبدیل انرژی مغناطیسی به انرژی مکانیکی (اثر ژول^۲) و بالعکس (اثر ویلاری^۳) را دارند [۱]. به همین دلیل، یعنی کوپلینگ^۴ بین حالت‌های مغناطیسی و مکانیکی، این مواد می‌توانند هم در عملگرها و هم در حسگرها به کار گرفته شوند [۲].

موادی که در سنسورهای دگرسان مغناطیسی به کار برده می‌شوند معمولاً از جنس ورقه استیل سیلیکون، پرمالوی و آهن خالص الکتریکی و سایر مواد دیگر نرم مغناطیس هستند [۳، ۴]. ضریب دگرسان مغناطیسی این مواد که در حسگرهای فوق استفاده می‌شوند، بسیار اندک است و به همین دلیل حساسیت این سنسورها بسیار پایین است. به همین دلیل، در سال‌های اخیر برای ساخت حسگرهایی مانند نیروسنج و شتاب‌سنج، گرایش به استفاده از مواد ابردگرسان مغناطیسی مانند ترفنل-دی افزایش یافته است. ترفنل-دی^۵ 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 ($0/۲۷ < x < ۰/۳$ ، $۱/۹ < y < ۱/۹۵$) [۲]. ترفنل-دی به علت کرنش اشباع بسیار زیاد و دمای کوری بالا، بیشتر در عملگرها مورد استفاده قرار می‌گیرد. با این حال در دو دهه اخیر استفاده از حسگرهای دارای ترفنل-دی مورد توجه قرار گرفته است چرا که این حسگرها در مقایسه با سایر حسگرهای رایج مزایای متعددی دارند که از آن جمله می‌توان به ضریب کوپلینگ بالای مگنتومکانیکی، زمان پاسخ سریع، تلفات انرژی ناچیز و قابل استفاده بودن در محیط‌های خشن اشاره کرد [۵]. در این حسگرها، با اعمال نیروی خارجی به حسگر، شار مغناطیسی عبوری از ترفنل-دی تغییر می‌کند. برای بهینه‌سازی

عملکرد این حسگرها از میدان مغناطیسی بایاس^۶ و پیش‌تنش مکانیکی استفاده می‌کنند. میدان مغناطیسی بایاس می‌تواند باعث افزایش منطقه کارکرد خطی حسگر و ولتاژ خروجی آن شود. استفاده از پیش‌تنش مکانیکی فشاری نیز برای جلوگیری از شکست ترفنل-دی به دلیل کم بودن استحکام کشش ترفنل-دی (30 MPa) توصیه می‌شود.

پژوهش بر روی نیروسنج ترفنل-دی از اواسط دهه ۹۰ میلادی آغاز شده است. یانگ و همکارانش با استفاده از تحلیل المان محدود کوپلینگ مغناطیسی مکانیکی، رفتار حسگر نیروسنج ساخته شده با ترفنل-دی را شبیه‌سازی کرده‌اند [۵]. آنها به این نتیجه رسیده‌اند که تحلیل المان محدود انجام شده قابلیت استفاده در طراحی و شبیه‌سازی این گونه حسگرها را دارد. آنها همچنین، اثرات ناشی از جریان گردابه‌ای^۷ را در مدل المان محدود ایجاد شده در نظر گرفته و در نتیجه تطابق بهتری با نتایج تجربی به‌دست آورده‌اند [۶]. جیا و همکارانش با استفاده از یک نیروسنج ترفنل-دی، موفق به اندازه‌گیری نیروهای استاتیکی و دینامیکی شده‌اند. آنها به منظور افزایش حساسیت، از یک حسگر هال^۸ درون ساختمان نیروسنج ساخته شده استفاده کرده‌اند [۷]. ونگ و همکارانش از یک نیروسنج ترفنل-دی به منظور اندازه‌گیری دامنه ارتعاشات بهره برده‌اند. آنها به این نتیجه رسیده‌اند که ولتاژ خروجی حسگر به فرکانس و دامنه تغییرات نیروی خارجی و میدان مغناطیسی بایاس وابستگی دارد. اگر چه هیچ تحلیلی به منظور ارائه مقادیر بهینه این پارامترها انجام نشده است [۸].

پژوهش‌هایی که تا کنون انجام شده نشان می‌دهد که عملکرد و حساسیت نیروسنج‌های ترفنل-دی وابستگی زیادی به مقادیر پیش‌تنش مکانیکی و میدان مغناطیسی بایاس دارد. اما تا کنون مدلی برای پیش‌بینی و بهینه‌سازی پارامترهای موثر بر حساسیت حسگرهای ساخته شده از ترفنل-دی ارائه نشده است. به همین دلیل در تحقیق حاضر، مدل تئوری نیروسنج بر مبنای معادلات ترکیبی کوپل مگنتومکانیکی ارائه می‌شود که این مدل علاوه بر خواص ذاتی ترفنل-دی، شامل دو پارامتر موثر بر حساسیت یعنی میدان مغناطیسی بایاس و پیش‌تنش مکانیکی نیز می‌باشد. سپس با استفاده از یک

1. Magnetostriction
2. Joule effect
3. Villari effect
4. Coupling
5. Terfenol-D

6. Bias
7. Eddy currents
8. Hall sensor

برای مطالعه رفتار مغناطیسی-مکانیکی نیروسنج ترفنل-دی از روابط کوپل شده زیر استفاده می‌شود [۹]:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_y^B} + q'H \quad (2)$$

$$B = q'\sigma + \mu^\sigma H \quad (3)$$

در این معادلات ε کرنش محوری ترفنل-دی، E_y^B مدول الاستیسیته ترفنل-دی در غیاب میدان مغناطیسی، H شدت میدان مغناطیسی، q' ضریب پیزومگنتیک ترفنل-دی، σ تنش محوری ترفنل-دی و μ^σ مقدار تراوایی مغناطیسی ترفنل-دی در تنش ثابت است.

می‌توان فرض کرد که در پیش‌تنش مکانیکی ثابت روابط زیر برقرارند [۱۰]:

$$\mu^\sigma = \frac{dB}{dH} \quad (4)$$

$$q' = \frac{d\varepsilon}{dH} \quad (5)$$

با مشتق‌گیری از معادله (۳) برحسب زمان داریم:

$$\frac{dB}{dT} = q' \frac{d\sigma}{dT} + \frac{dq'}{dT} \sigma + H \frac{d\mu^\sigma}{dT} + \mu^\sigma \frac{dH}{dT} \quad (6)$$

اگر فرض کنیم تنش محوری، σ ، شامل پیش‌تنش مکانیکی (σ_0) و تنش ایجاد شده در ترفنل-دی حاصل از نیروی اندازه‌گیری شونده (σ_1) باشد، داریم:

$$\sigma = \sigma_0 + \sigma_1 \quad (7)$$

با جایگذاری معادله (۷) در معادله (۶) داریم:

$$\begin{aligned} \frac{dB}{dT} = & q' \left[\frac{d\sigma_0}{dT} + \frac{d\sigma_1}{dT} \right] + \frac{dq'}{dT} (\sigma_0 + \sigma_1) \\ & + H \frac{d\mu^{\sigma_0+\sigma_1}}{dT} + \mu^{\sigma_0+\sigma_1} \frac{dH}{dT} \end{aligned} \quad (8)$$

چون در نیروسنج‌های طراحی شده با ترفنل-دی همانند شکل ۱، مقادیر شدت میدان مغناطیسی خارجی و پیش‌تنش مکانیکی ثابت و مستقل از زمان هستند، خواهیم داشت:

$$\frac{d\sigma_0}{dT} = 0 \quad \text{و} \quad \frac{dH}{dT} = 0$$

بنابراین رابطه (۸) تبدیل می‌شود به:

$$\frac{dB}{dT} = q' \frac{d\sigma_1}{dT} + \frac{dq'}{dT} (\sigma_0 + \sigma_1) + H \frac{d\mu^{\sigma_0+\sigma_1}}{dT} \quad (9)$$

با دیفرانسیل‌گیری توسط قاعده زنجیره‌ای خواهیم داشت:

$$\frac{dq'}{dT} = \frac{dq'}{d(\sigma_0 + \sigma_1)} \frac{d(\sigma_0 + \sigma_1)}{dT} \quad (10)$$

$$\frac{d\mu^{\sigma_0+\sigma_1}}{dT} = \frac{d\mu^{\sigma_0+\sigma_1}}{d(\sigma_0 + \sigma_1)} \frac{d(\sigma_0 + \sigma_1)}{dT} \quad (11)$$

مجموعه آزمایشگاهی، مقادیر پارامترهای موجود در مدل تئوری و ارتباط آنها با عوامل خارجی نظیر شدت میدان مغناطیسی و نیروی اعمالی مشخص می‌شود. در انتها با استفاده از مدل تئوری و نتایج تجربی، پاسخ حسگر در مقابل نیروهای دینامیکی شبیه‌سازی شده و تاثیرات میدان مغناطیسی بایاس و پیش‌تنش مکانیکی بر فاکتور حساسیت و محدوده اندازه‌گیری خطی حسگر مطالعه می‌شوند.

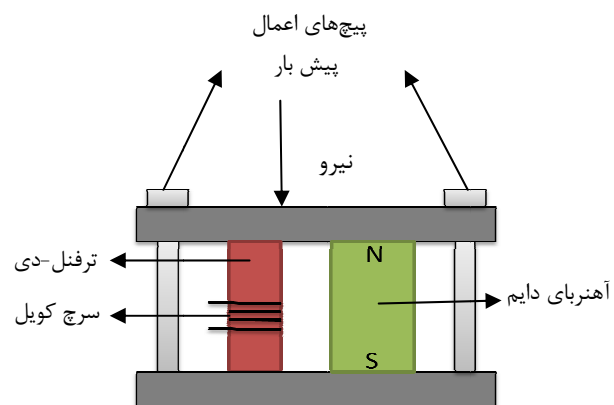
۲- مدل‌سازی رفتار مگنتومکانیکی حسگر

نیروسنج‌های ترفنل-دی صرف‌نظر از تفاوت‌های جزئی موجود در طراحی، دارای چند جزء اصلی هستند که در شکل ۱ نشان داده می‌شود. در این طرح، از دو پیچ برای اعمال پیش‌تنش مکانیکی و از یک آهنربای دائم به منظور ایجاد میدان مغناطیسی بایاس استفاده می‌شود. آهنربای دائم میدان بایاس ثابتی را تولید می‌کند، برای ایجاد میدان‌های بایاس متفاوت می‌توان از کوپل تحریک به جای آهنربا استفاده کرد.

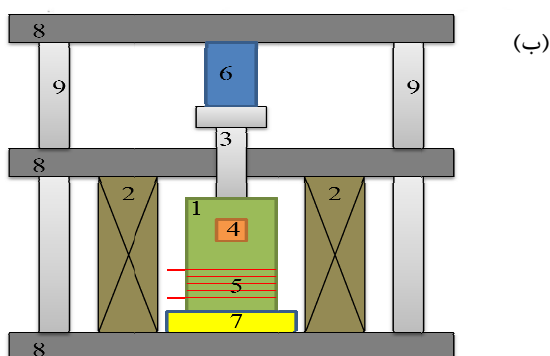
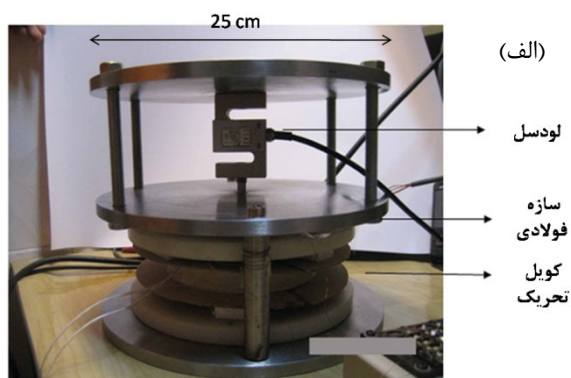
نیروی وارده به حسگر موجب تغییر شار مغناطیسی گذرنده از ترفنل-دی می‌شود. تغییر در شار مغناطیسی، ولتاژی را در سرچ‌کویل پیچیده به دور ترفنل-دی القا می‌کند که ولتاژ خروجی حسگر می‌باشد. طبق قانون القای فارادی، این ولتاژ برابر است با:

$$V = NA \frac{dB}{dt} \quad (1)$$

در این معادله V ولتاژ القا شده در سرچ‌کویل، N تعداد دور سرچ‌کویل، A سطح مقطع ترفنل-دی و B چگالی شار مغناطیسی گذرنده از ترفنل-دی می‌باشد.



شکل ۱ طرح شماتیک نیروسنج ترفنل-دی



شکل ۲ (الف) مجموعه آزمایشگاهی ساخته شده (ب) شماتیک مجموعه آزمایشگاهی شامل: ۱- ترفنل-دی ۲- کویل تحریک ۳- پیچ پیش بار ۴- کرنش سنج ۵- سرچ کویل ۶- لودسل ۷- نشیمنگاه برنجی ۸- صفحات فولادی ۹- پیچ های اتصال

چون در مجموعه آزمایشگاهی ساخته شده مدار مغناطیسی کاملاً بسته شده است، می توان رابطه (۱۵) را به صورت زیر نوشت:

$$H = NI/l \quad (16)$$

که l طول ترفنل-دی می باشد. اعمال پیش بار مکانیکی مطابق شکل از طریق یک پیچ پیش بار صورت گرفته است. برای کنترل نیروی پیش بار اعمالی از یک لودسل اس شکل با حساسیت ۰/۳۳ و دامنه اندازه گیری ۰ تا ۲۰۰ کیلوگرم نیرو استفاده شده است. شار مغناطیسی به وسیله سرچ کویل پیچیده شده به دور ترفنل-دی اندازه گیری می شود. برای بالا بردن پاسخ زمانی این کویل از سیم با قطر ۰/۱۵ میلی متر و تعداد ۵ دور استفاده شده است. با توجه به قانون القای فارادی (معادله ۱) می توان با انتگرال گیری از ولتاژ القا شده بر روی سرچ کویل، شار مغناطیسی گذرنده را محاسبه نمود:

$$B = \frac{1}{NA} \int V dt \quad (17)$$

با توجه به این که در نیروسنج روابط زیر برقرارند:

$$\frac{dq'}{d\sigma_0} = 0, \quad \frac{d\sigma_0}{dt} = 0, \quad \frac{d\mu^{\sigma_0+\sigma_1}}{d\sigma_0} = 0 \quad (12)$$

معادله (۹) تبدیل می شود به:

$$\frac{dB}{dt} = q' \frac{d\sigma_1}{dt} + \frac{dq'}{d\sigma_1} (\sigma_0 + \sigma_1) \frac{d\sigma_1}{dt} + H \frac{d\mu^{\sigma_0+\sigma_1}}{d\sigma_1} \frac{d\sigma_1}{dt} \quad (13)$$

با جاگذاری رابطه اخیر در رابطه (۱) خواهیم داشت:

$$V = NA \frac{d\sigma_1}{dt} \left[q' + \frac{dq'}{d\sigma_1} (\sigma_0 + \sigma_1) + H \frac{d\mu^{\sigma_0+\sigma_1}}{d\sigma_1} \right] \quad (14)$$

رابطه (۱۴) نشان می دهد که هر چقدر تغییرات نیروی مورد اندازه گیری با زمان یا همان فرکانس نیرو بیشتر باشد، ولتاژ خروجی حسگر بزرگتر خواهد بود. برای افزایش ولتاژ خروجی حسگر در فرکانس ثابت، باید عبارت داخل کروشه پیشینه باشد.

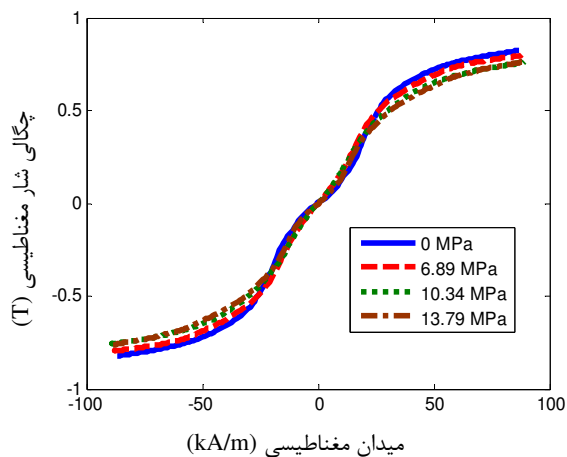
۳- مطالعه تجربی

با توجه به معادله (۱۴) می توان دریافت که برای محاسبه ولتاژ خروجی حسگر ترفنل-دی، باید علاوه بر تنش اعمالی و فرکانس آن، مقادیر شدت میدان مغناطیسی، پیش تنش اعمالی، ضریب پیزومگنتیک و همچنین مشتق ضریب پیزومگنتیک و تراوایی مغناطیسی نسبت به تنش اعمالی مشخص شود. به منظور محاسبه پارامترهای فوق الذکر در میدان های مغناطیسی و پیش تنش های مکانیکی مختلف، یک مجموعه آزمایشگاهی مطابق شکل ۲ ساخته شده است. این مجموعه آزمایشگاهی، امکان اندازه گیری کرنش و شار مغناطیسی عبوری از ترفنل-دی در میدان های مغناطیسی و پیش بارهای مکانیکی مختلف را فراهم می کند.

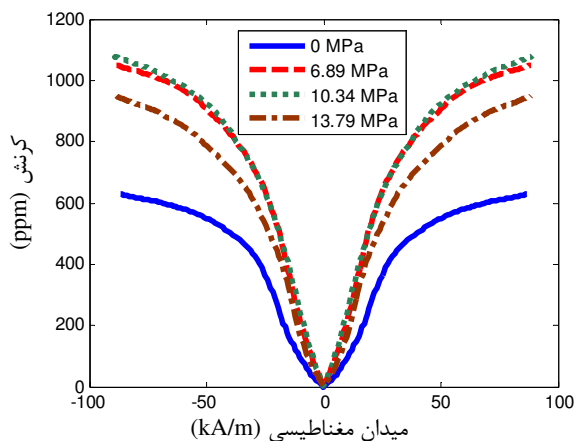
به منظور ایجاد میدان مغناطیسی لازم کویل تحریکی با تعداد دور ۲۰۵۰ دور و قطر سیم ۰/۶۵ میلی متر تعبیه شده که می تواند ترفنل-دی را تا نقطه اشباع مغناطیسی خود برود. با عبور جریان الکتریکی از کویل تحریک، طبق قانون آمپر می توان نوشت:

$$\oint H \cdot dL = NI \quad (15)$$

که در این رابطه H شدت میدان مغناطیسی، L طول مدار مغناطیسی، N تعداد دور سیم پیچ و I جریان گذرنده از کویل تحریک است.



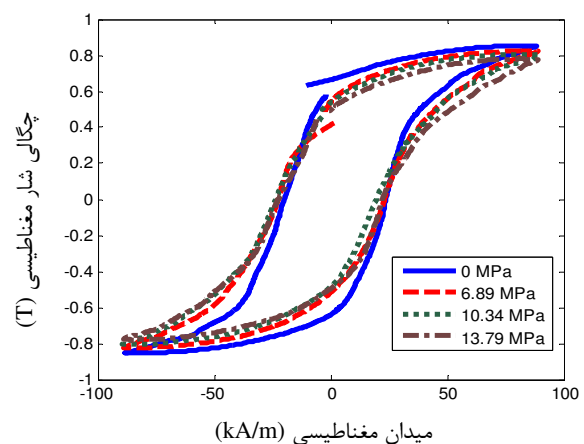
شکل ۵ نمودار بدون هیستریزس چگالی شار مغناطیسی برحسب میدان مغناطیسی در پیش بارهای مکانیکی مختلف



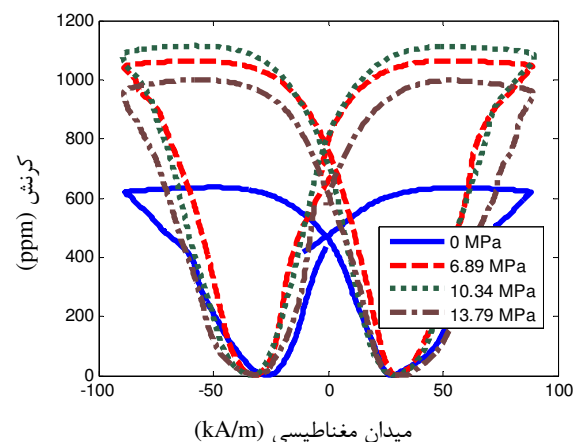
شکل ۶ نمودار بدون هیستریزس کرنش محوری برحسب میدان مغناطیسی در پیش بارهای مکانیکی مختلف

همان‌گونه که شکل ۵ نشان می‌دهد اعمال پیش‌تنش مکانیکی فشاری منجر به کاهش چگالی شار مغناطیسی گذرنده از ترفنل-دی در شدت میدان مغناطیسی ثابت می‌شود که دلیل این پدیده را می‌توان با کاهش چرخش حوزه‌های مغناطیسی در هنگام اعمال پیش‌تنش فشاری بزرگ‌تر مرتبط دانست. در صورتی که مطابق شکل ۶ با افزایش پیش‌تنش فشاری، کرنش ایجاد شده افزایش چشمگیری پیدا می‌کند که در مقدار ۱۰/۳۴ مگا پاسکال بیشترین کرنش محوری مشاهده می‌شود و پس از آن با افزایش پیش‌تنش، کرنش محوری کاهش می‌یابد. افزایش پیش‌تنش مکانیکی می‌تواند به هم محوری بیشتر حوزه‌های مغناطیسی و راستای طولی و در نتیجه افزایش کرنش محوری ترفنل-دی کمک نماید.

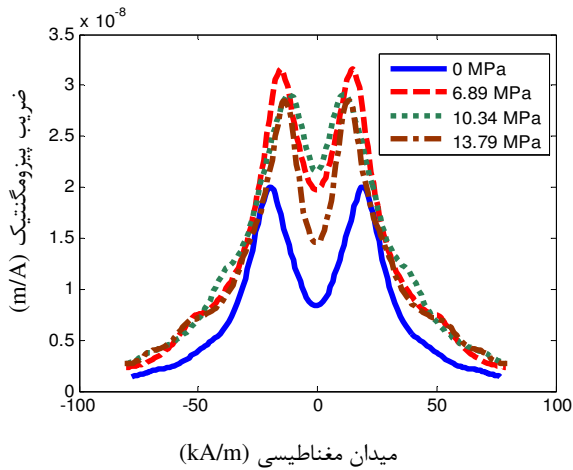
کرنش طولی ایجاد شده در ترفنل-دی در هنگام آزمایش نیز توسط کرنش سنج اندازه‌گیری می‌شود. با استفاده از این مجموعه می‌توان کرنش و شار مغناطیسی عبوری از ترفنل-دی را در میدان‌های مغناطیسی و پیش‌بارهای مکانیکی مختلف اندازه‌گیری نمود. نتایج در شکل‌های ۳ و ۴ ارائه شده‌اند. باید توجه داشت که رابطه بین میدان مغناطیسی و شار عبوری از ترفنل-دی، هیسترتیک است بدین معنا که شار مغناطیسی عبوری از ترفنل-دی در هنگام افزایش و کاهش شدت میدان مغناطیسی دارای دو مقدار متفاوت می‌باشد. به منظور محاسبه پارامترهای موثر بر ولتاژ حسگر در رابطه (۱۴)، باید رفتار بدون هیستریزس ترفنل-دی را به دست آورد که در نمودارهای ۵ و ۶ نمایش داده شده‌اند. این نمودارها به ترتیب با متوسط‌گیری از نمودارهای هیسترتیک تجربی ۳ و ۴ به دست آمده‌اند.



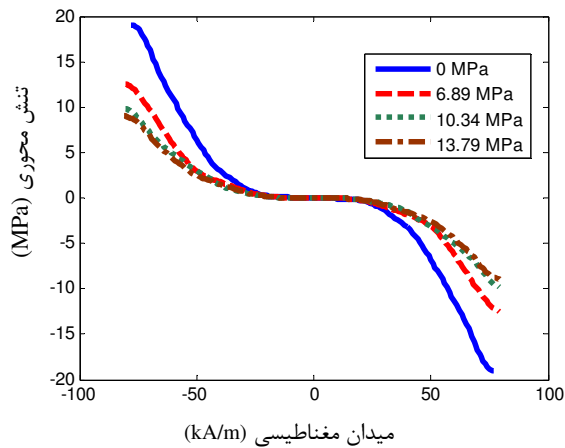
شکل ۳ نمودار چگالی شار مغناطیسی برحسب میدان مغناطیسی در پیش‌بارهای مکانیکی مختلف



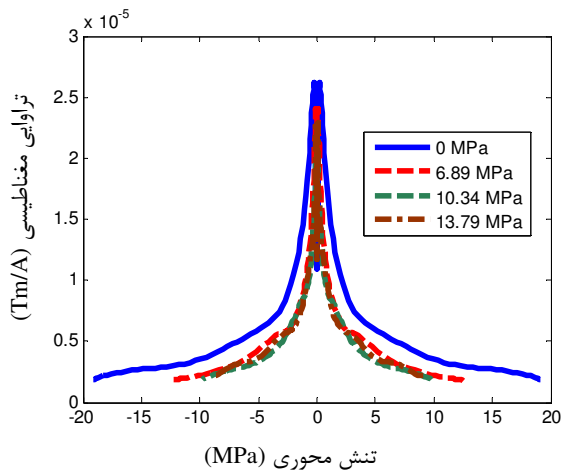
شکل ۴ نمودار کرنش محوری برحسب میدان مغناطیسی در پیش‌بارهای مکانیکی مختلف



شکل ۸ نمودار ضریب پیزومگنتیک ترفنل-دی برحسب میدان مغناطیسی در پیش بارهای مکانیکی مختلف



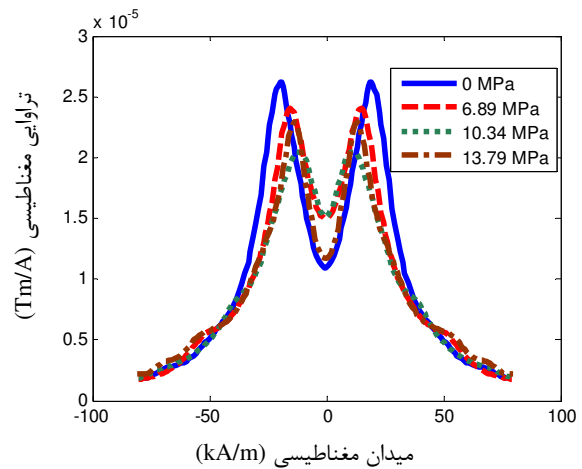
شکل ۹ نمودار تنش محوری ترفنل-دی برحسب میدان مغناطیسی در پیش بارهای مکانیکی مختلف



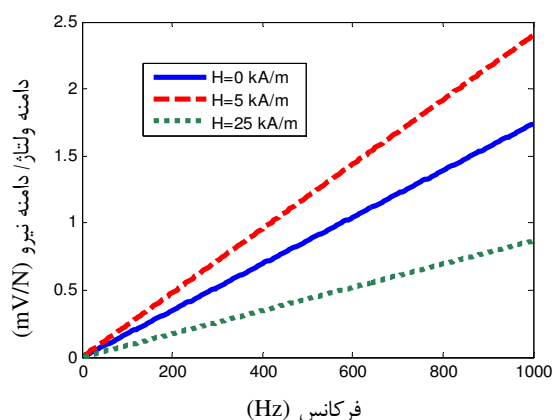
شکل ۱۰ نمودار تراوایی مغناطیسی ترفنل-دی نسبت برحسب تنش محوری در پیش بارهای مکانیکی مختلف

مقادیر تراوایی مغناطیسی و ضریب پیزومگنتیک با توجه به روابط (۴) و (۵)، به ترتیب با مشتق گیری از نمودارهای ۵ و ۶ به دست می‌آیند که در شکل‌های ۷ و ۸ نمایش داده شده‌اند. با افزایش شدت میدان مغناطیسی از صفر تا یک مقدار معین (۲۰-۱۰ kA/m بسته به مقدار پیش تنش فشاری) ابتدا تراوایی مغناطیسی و ضریب پیزومگنتیک افزایش می‌یابند و پس از آن دچار کاهش می‌شوند. بیشترین مقدار تراوایی مغناطیسی در پیش تنش مکانیکی صفر و میدان مغناطیسی ۲۰ kA/m و همچنین بیشترین مقدار ضریب پیزومگنتیک در پیش تنش فشاری ۶/۸۹ MPa و میدان مغناطیسی ۱۵ kA/m دیده می‌شود. باید توجه داشت که افزایش پیش تنش فشاری تا مقدار ۱۰/۳۴ MPa می‌تواند منجر به افزایش مقادیر تراوایی مغناطیسی و ضریب پیزومگنتیک در میدان‌های مغناطیسی کوچک‌تر از ۱۵ kA/m شود.

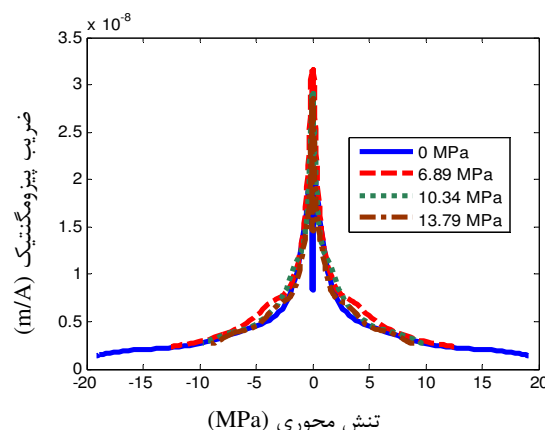
با توجه به این که مقادیر تراوایی مغناطیسی و ضریب پیزومگنتیک به دست آمده‌اند، می‌توان تنش محوری ایجاد شده در ترفنل-دی را با استفاده از رابطه (۳) به دست آورد. شکل ۹ مقدار تنش را در میدان‌های مغناطیسی مختلف نشان می‌دهد. این شکل بیانگر آن است که با افزایش پیش تنش فشاری، تنش ایجاد شده در ترفنل-دی در شدت میدان مغناطیسی ثابت کاهش می‌یابد که این امر می‌تواند به جلوگیری از شکست ماده در برابر تنش‌های کششی کمک نماید. شکل‌های ۱۰ و ۱۱ تغییرات تراوایی مغناطیسی و ضریب پیزومگنتیک را با تنش محوری ایجاد شده نمایش می‌دهد.



شکل ۷ نمودار تراوایی مغناطیسی ترفنل-دی برحسب میدان مغناطیسی در پیش بارهای مکانیکی مختلف



شکل ۱۲ نسبت دامنه ولتاژ حسگر به دامنه نیروی اعمالی (۱۰ N) در فرکانس‌های مختلف به‌ازای سه مقدار میدان مغناطیسی بایاس و بدون پیش‌تنش فشاری



شکل ۱۱ نمودار ضریب پیزومگنتیک ترفنل-دی بر حسب تنش محوری در پیش‌بارهای مکانیکی مختلف

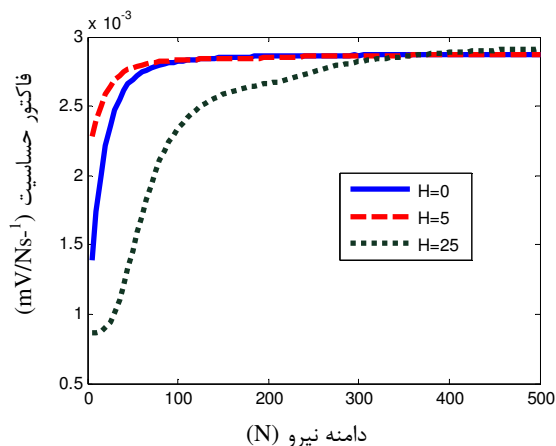
۴- نتایج آزمایشات و بحث

با توجه به این که پارامترهای موثر بر ولتاژ خروجی حسگر در مدل تئوری به وسیله آزمایشات تجربی محاسبه و ارتباط بین ویژگی‌های ماده از قبیل تراوایی مغناطیسی و ضریب پیزومگنتیک با عوامل خارجی مانند شدت میدان مغناطیسی و تنش محوری مشخص شده‌اند، هم اکنون می‌توان پاسخ حسگر را در برابر نیروهای دینامیکی وارده ($F = A \sin(2\pi ft)$) به دست آورد. در این قسمت محدوده خطی خروجی حسگر و همچنین حساسیت آن مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای مقایسه بهتر بین نتایج به دست آمده پارامتری تحت عنوان فاکتور حساسیت به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$SF = \frac{\text{دامنه ولتاژ خروجی (mV)}}{\text{فرکانس زاویه ای (S}^{-1}\text{) } \times \text{دامنه نیروی اعمالی (N)}} \quad (18)$$

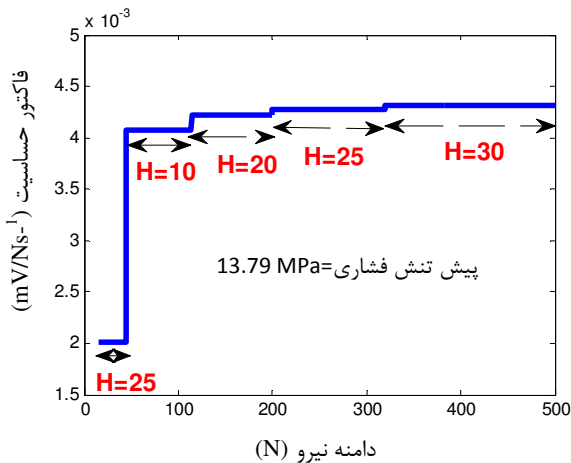
به این دلیل در مخرج کسر از فرکانس زاویه‌ای استفاده شده است تا بتوان فاکتور حساسیت را مستقل از فرکانس در نظر گرفت، چون مطابق شکل ۱۲ با افزایش فرکانس، نسبت دامنه ولتاژ خروجی به دامنه نیروی اعمالی به صورت خطی افزایش می‌یابد اگر چه شیب خطوط در مقادیر متفاوت میدان مغناطیسی بایاس یکسان نیست.

شکل ۱۳، تغییرات فاکتور حساسیت را در هنگام افزایش دامنه نیروی مورد اندازه‌گیری و به ازای سه مقدار مختلف میدان مغناطیسی بایاس و بدون پیش‌تنش فشاری نمایش می‌دهد. همان‌گونه که شکل ۱۳ نمایش می‌دهد، میدان مغناطیسی بایاس علاوه بر تغییر فاکتور حساسیت حسگر، محدوده خطی عملکرد حسگر را نیز تحت تاثیر قرار می‌دهد.



شکل ۱۳ فاکتور حساسیت حسگر در مقادیر مختلف دامنه نیروی اعمالی به ازای سه مقدار میدان مغناطیسی بایاس و بدون پیش‌تنش فشاری

با توجه به شکل محدوده خطی عملکرد حسگر با میدان مغناطیسی بایاس ۵ kA/m، شامل نیروهای دینامیکی با دامنه بین ۷۵ تا ۵۰۰ نیوتن می‌شود و در این محدوده فاکتور حساسیت حسگر $0.0284 \text{ mV/Ns}^{-1}$ می‌باشد، در صورتی که در میدان مغناطیسی بایاس ۲۵ kA/m، حسگر محدوده عملکرد خطی قابل ملاحظه‌ای ندارد. بنابراین ضروری به نظر می‌رسد که در هر مقدار پیش‌تنش فشاری و میدان مغناطیسی بایاس، محدوده خطی حسگر و فاکتور حساسیت به دست آورده شود تا امکان مقایسه بین نتایج و بهینه‌سازی شرایط کاری حسگر وجود داشته باشد. شکل ۱۴ مقادیر ماکزیمم فاکتور حساسیت را به همراه محدوده خطی و میدان مغناطیسی بایاس



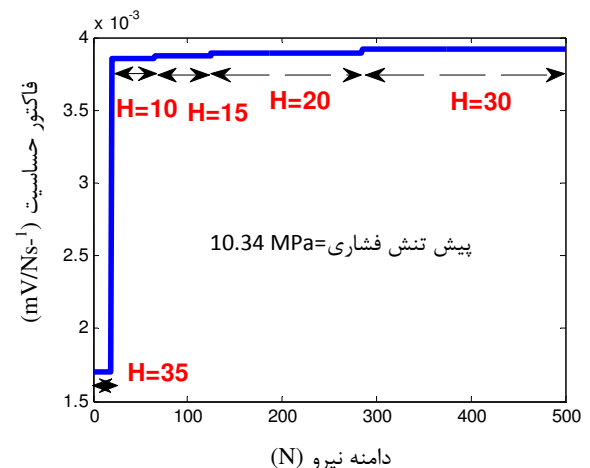
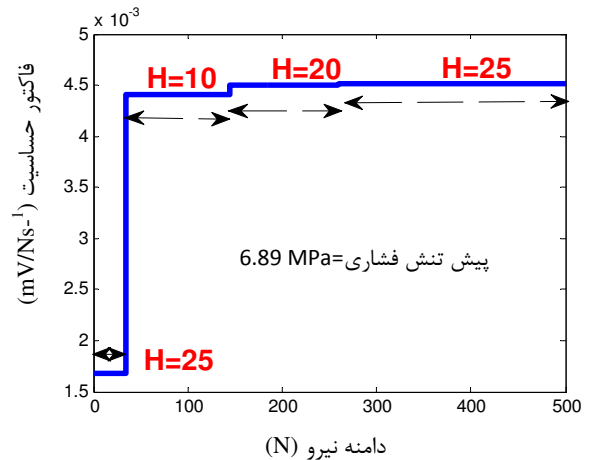
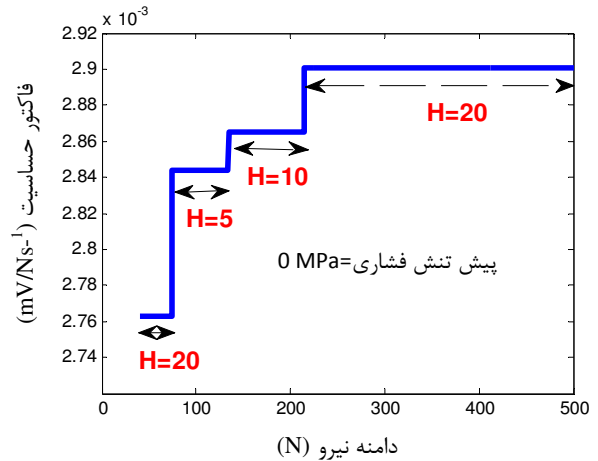
شکل ۱۴ مقادیر ماکزیمم فاکتور حساسیت در محدوده ۰-۵۰۰ نیوتن نیروی وارده به ازای مقادیر مختلف پیش تنش فشاری

این شکل بیانگر آن است که با اعمال پیش تنش فشاری ۰-۵۰۰ نیوتن دامنه نیروی اعمالی را (اگر چه با تغییر میدان مغناطیسی بایاس) به صورت خطی اندازه گیری کرد ولی با پیش تنش‌های ۰ MPa و ۱۳/۷۹ MPa امکان اندازه گیری به صورت خطی در مقادیر کم نیروی وارده (به ترتیب کمتر از ۴۰ و ۲۰ N) وجود ندارد. همچنین در هر مقدار مشخص پیش تنش فشاری، افزایش میدان مغناطیسی بایاس منجر به افزایش فاکتور حساسیت و کاهش محدوده خطی متناظر می‌شود. مقایسه بین نمودارهای شکل ۱۴ نشان می‌دهد که با افزایش پیش تنش فشاری، برای حصول بیشترین فاکتور حساسیت در اندازه گیری یک نیروی دینامیکی با دامنه مشخص، باید میدان مغناطیسی بایاس را نیز افزایش داد. جدول ۱ بیشترین فاکتور حساسیت به دست آمده در هر مقدار پیش تنش فشاری را به همراه محدوده اندازه گیری خطی و میدان مغناطیسی بایاس متناظر نشان می‌دهد.

جدول ۱ مقادیر ماکزیمم فاکتور حساسیت حسگر در پیش تنش‌های فشاری مختلف

پیش تنش فشاری (MPa)	مقادیر ماکزیمم فاکتور حساسیت (mV/Ns ⁻¹)	دامنه اندازه گیری میدان مغناطیسی (kA/m)
۰	۰/۰۰۲۹۰۱	۲۱۵-۵۰۰
۶/۸۹	۰/۰۰۴۵۱۵	۲۶۰-۵۰۰
۱۰/۳۴	۰/۰۰۳۹۲۴	۲۸۵-۵۰۰
۱۳/۷۹	۰/۰۰۴۳۲۱	۳۲۰-۵۰۰

متناظر، در مقادیر مختلف پیش تنش فشاری نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۱۴ می‌توان دریافت که تقریباً در تمام محدوده ۰-۵۰۰ نیوتن دامنه نیروی اعمالی، بیشترین فاکتور حساسیت در پیش تنش ۶/۸۹ MPa حاصل شده است البته به استثناء محدوده ۲۰-۳۵ نیوتن که در این حد فاصل بیشترین فاکتور حساسیت مربوط به پیش تنش فشاری ۱۰/۳۴ MPa می‌باشد.



۴- نتایج نشان دهنده آن است که در هر مقدار پیش‌تنش فشاری معین، فاکتور حساسیت حسگر و محدوده اندازه‌گیری خطی آن وابسته به مقدار میدان مغناطیسی بایاس اعمالی است. می‌توان گفت که در هر مقدار مشخص پیش‌تنش فشاری، افزایش میدان مغناطیسی بایاس تا یک حد مشخص (تقریباً 30 kA/m) منجر به افزایش فاکتور حساسیت و کاهش محدوده اندازه‌گیری خطی متناظر می‌شود.

۵- به صورت کلی می‌توان نتیجه گرفت که حسگر نیروی ترفنل-دی برای اندازه‌گیری نیروهای دینامیکی با دامنه بزرگ‌تر از 20 نیوتن مناسب است چرا که در این حالت رفتار خطی بهتر و فاکتور حساسیت بزرگ‌تری دارد. البته می‌توان با اعمال میدان مغناطیسی بایاس و پیش‌تنش فشاری مناسب، نیروهای کوچک‌تر را هم به صورت خطی اندازه‌گیری کرد ولی فاکتور حساسیت حسگر مقدار کوچک‌تری خواهد داشت.

۶- مراجع

- [1] Jiles D. C., "Theory of the Magnetomechanical Effect", *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol. 28, 1995, pp. 1537-1546.
- [2] Guruswamy S., Mungsantisuk P., Corson R., Srisukhumbowornchai N., "Rare-Earth Free Fe-Ga based Magnetostrictive Alloys for Actuators and Sensor", *Trans. Indian Inst. Met.*, Vol. 57, No. 4, 2004, pp. 315-323.
- [3] Kleinke D. K., Uras H. M., "A Magnetostrictive Force Sensor", *Review of Scientific Instruments*, Vol. 65, No. 5, 1994, pp. 1699-1710.
- [4] Baudendistel T. A., Turner M. L., "A Novel Inverse-Magnetostrictive Force Sensor", *IEEE Sensors Journal*, Vol. 7, No. 2, 2007, pp. 245-250.
- [5] Yang Q., Yan R., Fan C., Chen H., Liu F., Liu S., "A Magneto-Mechanical Strongly Coupled Model for Giant Magnetostrictive Force Sensor", *IEEE Transactions on Magnetis*, Vol. 43, No. 4, 2007, pp. 1437-40.
- [6] Yan R., Yang Q., Yang W., Hou S., Yan W., "Dynamic Model of Giant Magnetostrictive Acceleration Sensors Including Eddy-Current Effects", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol. 20, No. 3, 2010, pp. 1874-1877.
- [7] Jia Z., Liu H., Wang F., Ge C., "Research on a Novel Force Sensor Based on Giant Magnetostrictive Material and Its Model", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 509, Issue 5, 2011, pp. 1760-1767.

با توجه به جدول ۱، بیشترین فاکتور حساسیت حسگر در پیش‌تنش فشاری $6/89 \text{ MPa}$ و میدان مغناطیسی بایاس 25 kA/m به دست آمده است.

۵- نتیجه‌گیری

در تحقیق انجام شده تاثیر پیش‌تنش مکانیکی و میدان مغناطیسی بایاس بر حساسیت و محدوده اندازه‌گیری خطی حسگر ترفنل-دی مورد مطالعه قرار گرفت و مقادیر بهینه آنها با توجه به دامنه نیروی مورد اندازه‌گیری معرفی شد. بدین منظور در ابتدا مدل تئوری حسگر ترفنل-دی با استفاده از معادلات کوپل مگنتومکانیکی استخراج و عوامل موثر بر حساسیت حسگر شناسایی شد. سپس با ساخت یک مجموعه آزمایشگاهی و انجام یک سری از آزمایش‌ها، عوامل موثر فوق‌الذکر و چگونگی تغییر آنها با میدان مغناطیسی و تنش محوری مورد مطالعه قرار گرفت. در انتها با استفاده از مدل تئوری و نتایج تجربی، عملکرد حسگر در هنگام اعمال نیروهای دینامیکی شبیه‌سازی شد و فاکتور حساسیت حسگر و محدوده اندازه‌گیری خطی آن در مقادیر مختلف میدان مغناطیسی بایاس و پیش‌تنش فشاری محاسبه شد. با توجه به تحقیق انجام شده می‌توان موارد زیر را نتیجه‌گیری کرد:

۱- فاکتور حساسیت حسگر در محدوده عملکرد خطی آن، تابع دامنه نیروی اعمالی به حسگر می‌باشد. اعمال میدان مغناطیسی بایاس و پیش‌تنش فشاری مناسب می‌تواند باعث افزایش فاکتور حساسیت و قابلیت اندازه‌گیری خطی نیروهای بزرگ‌تر بشود.

۲- نتایج نشان می‌دهند که حسگر در هنگام اعمال پیش‌تنش فشاری $6/89 \text{ MPa}$ در مقایسه با مقادیر دیگر پیش‌تنش فشاری، دارای بیشترین مقدار فاکتور حساسیت و محدوده اندازه‌گیری خطی می‌باشد. باید دقت نمود که برای حصول مقادیر بهینه فاکتور حساسیت در این حالت، باید میدان مغناطیسی بایاس با توجه به دامنه نیروی اعمالی انتخاب شود.

۳- با توجه به آزمایش‌ها و محاسبات انجام گرفته، بیشترین فاکتور حساسیت حسگر ترفنل-دی ($0/004515 \text{ mV/Ns}^{-1}$) در پیش‌تنش مکانیکی $6/89 \text{ MPa}$ و میدان مغناطیسی بایاس 25 kA/m قابل مشاهده است. تحت این شرایط محدوده اندازه‌گیری خطی حسگر $500-260$ نیوتن می‌باشد.

- [9] Engdahl G., *Handbook of Giant Magnetostrictive Materials*, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2000.
- [10] Grunwakt A., Olabi A. G., "Design of a Magnetostrictive (MS) Actuator", *J. Sensors and Actuators: A Physical*, Vol. 144, 2008, pp. 161-175.
- [8] Weng L., Wang B., Sun Y., Li S., Yang Q., "Model and Experiment of Giant Magnetostrictive Vibration Sensor", *International Conference on Electrical Machines and Systems*, 2008.