



طراحی، ساخت و بررسی رفتار ترانسیدیوسر رزونانسی پیچشی مگنتواستریکتیو

محمدرضا کرفی^۱، یوسف حجت^{۲*}، فرخ ساسانی^۳، مجتبی قدسی^۴

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

۲- دانشیار مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۳- استاد مهندسی مکانیک، دانشگاه بریتیش کلمبیا، ونکوور، کانادا

۴- استادیار مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

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

چکیده- در این مقاله یک ترانسیدیوسر پیچشی مگنتواستریکتیو جدید معرفی می‌شود. این ترانسیدیوسر از یک کله‌گی مگنتواستریکتیو، یک قطعه پشت بند فولادی و یک محفظه در بر گیرنده تشکیل شده است. در این ترانسیدیوسر، یک میدان مغناطیسی مارپیچ که از دو مؤلفه محوری و محیطی تشکیل شده است، به کله‌گی اعمال می‌شود. در نتیجه، کله‌گی بر اساس "اثر ویدمن" در مواد مگنتواستریکتیو دچار تغییر شکل پیچشی می‌شود. کله‌گی از ماده پرمندور تشکیل شده است که یک ماده همسانگرد مغناطیسی می‌باشد. در این مقاله معادلات دیفرانسیل ارتعاشات پیچشی ترانسیدیوسر نوشته شده و یک ترانسیدیوسر پیچشی مگنتواستریکتیو با فرکانس رزونانس ۱۲۰۷۵ هرتز طراحی شده است. فرکانس رزونانس و شکل مود طبیعی ارتعاشی ترانسیدیوسر از لحاظ تئوری، عددی و تجربی بررسی شده و با هم مقایسه می‌شود. اثر پارامترهای مهم بر عملکرد ترانسیدیوسر مانند میدان محوری و محیطی و همچنین اثر پیش بار پیچشی مورد بررسی قرار گرفته است و نقطه کار بهینه ترانسیدیوسر مشخص شده است. با توجه به اینکه اکثر ترانسیدیوسرهای مورد استفاده در صنعت از نوع طولی بوده و ترانسیدیوسرهای پیچشی پیزوالکتریکی به علت برخی از نقاط ضعف و محدودیت‌ها کاربرد چندانی در صنعت پیدا نکرده‌اند، لذا این نوع جدید از ترانسیدیوسرهای پیچشی می‌تواند انتخاب مناسبی برای کاربردهای صنعتی باشد.

کلیدواژه‌ها: مگنتواستریکتیو، ترانسیدیوسر پیچشی، پرمندور، اثر ویدمن.

Design, fabrication and characterization of resonant torsional magnetostrictive transducer

M. Karafi¹, Y. Hojjat^{2*}, F. Sassani³, M. Ghodsi⁴

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

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

3- Prof., Mech. Eng., Univ. of British Columbia, Vancouver, Canada

4- Assis. Prof., Mech. Eng., Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran

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

Abstract- In this paper, a novel transducer called Magnetostrictive Torsional Resonant Transducer (MTRT) is introduced. The transducer is composed of a magnetostrictive horn, a stainless steel backing and housing. In this transducer a spiral magnetic field, made up of longitudinal and circumferential components, is applied to the magnetostrictive horn. As a result, the magnetostrictive horn oscillates torsionally according to the Wiedemann effect. The magnetostrictive horn is made of "2V permendur", which has isotropic magnetic properties. The differential equations of the torsional vibration of the transducer are derived, and the transducer is designed for a resonant frequency of 12075 Hz. Natural frequency and mode shape of the transducer are considered theoretically, numerically, and experimentally. The effects of important parameters such as axial and circumferential magnetic fields, and torsional prestress on the torsional displacement of the MTRT are considered, and the optimum working point is determined. These are promising features for industrial applications.

Keywords: Magnetostrictive, Torsional Transducer, Permendur, Wiedemann Effect.

۱- مقدمه

پیچشی ترانسدیوسر، مانند میدان مغناطیسی محوری و محیطی و پیش بار پیچشی مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که این نوع ترانسدیوسر پیچشی می‌تواند انتخاب خوبی برای استفاده در فرایندهای ماشین‌کاری به کمک امواج صوتی مثل سوراخ‌کاری و قلاویزکاری فلزات سخت و جوش‌کاری قطعات پلاستیکی باشد.

۲- اصول عملکرد ترانسدیوسر پیچشی مگنتواستریکتیو

تغییر شکل مواد فرومغناطیس در اثر اعمال میدان مغناطیسی خارجی، پدیده مگنتواستریکشن نامیده می‌شود. این پدیده در اثر چرخش حوزه‌های مغناطیسی ماده بوجود می‌آید. افزایش و کاهش طول ماده در جهت اعمال میدان مغناطیسی خارجی، اثر ژول نام دارد که به طور وسیعی در عملگرهای طولی مگنتواستریکتیو به کار می‌رود. اثر ویدمن از لحاظ اصول شبیه اثر ژول است، فقط بجای کرنش کششی و فشاری، کرنش پیچشی در اثر اعمال میدان مغناطیسی مارپیچ در ماده بوجود می‌آید. کله‌گی مگنتواستریکتیو در این تحقیق از پرمندور ساخته شده است. پرمندور یک ماده نرم مغناطیسی است و کرنش اشباع آن، λ_p ، در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد برابر ۶۰ ppm (۶۰ واحد در میلیون) است. شار مغناطیسی اشباع آن برابر ۲/۳۴ تسلا، و میدان مغناطیسی اشباع آن برابر ۲۰ kA/m است.

در این بخش به بررسی رفتار ترانسدیوسر پیچشی مگنتواستریکتیو با استفاده از روابط تئوری پیزومگنتیک مواد مگنتواستریکتیو پرداخته خواهد شد. رابطه پیزومگنتیک مواد مگنتواستریکتیو به طور کلی به شکل رابطه (۱) می‌باشد.

$$S_i = s_{ij}^H T_j + d_{in} H_n \rightarrow i, j = 1, 2, \dots, 6$$

$$B_m = d_{mj} T_j + \mu_{mn}^T H_n \rightarrow m, n = 1, 2, 3 \quad (1)$$

که در آن μ^T ، d ، s^H به ترتیب ضریب نرمی در میدان مغناطیسی ثابت، ضریب پیزومگنتیک و ضریب گذردهی مغناطیسی در تنش ثابت می‌باشد. ماتریس‌های S و T به ترتیب ماتریس کرنش و تنش مکانیکی هستند. ماتریس‌های B و H نیز به ترتیب ماتریس‌های چگالی شار مغناطیسی و شدت میدان مغناطیسی هستند. معمولاً معادله پیزومگنتیک مواد مگنتواستریکتیو در کتاب‌های آموزشی و مقالات در سیستم مختصات کارترین مطرح می‌شود، اما با توجه به این که شکل

ترانسدیوسرهای فراصوتی و صوتی امروزه به طور گسترده‌ای در صنعت استفاده می‌شوند. عملیات شستشو، جوش‌کاری، ماشین‌کاری، استفاده در پزشکی و صنایع غذایی مثال‌هایی از کاربرد امواج صوتی در صنعت هستند [۱-۴]. با توسعه موتورهای فراصوتی، جوش‌کاری پلاستیک‌ها و تست‌های خستگی سرعت بالا، به تدریج نیاز به ترانسدیوسرهای پیچشی با ساختار ساده و بازده مناسب بوجود آمده است [۵]. روش‌های ایجاد ارتعاشات پیچشی در تحقیقات گذشته به دو شکل تبدیل ارتعاشات طولی به ارتعاشات پیچشی [۶، ۷] و یا استفاده از پیزوالکتریک‌های پیچشی با جهت پلاریزاسیون محیطی [۸، ۹] بوده است. ساختار ترانسدیوسرهایی که ارتعاشات طولی را تبدیل به ارتعاشات پیچشی می‌کنند معمولاً پیچیده و بازده تبدیل انرژی آنها نیز پایین است. همچنین طراحی این نوع ترانسدیوسرها نیز غالباً پیچیده است. به همین جهت این نوع ترانسدیوسرها کاربرد زیادی در صنعت پیدا نکرده‌اند. از سوی دیگر ساخت سرامیک‌های پیزوالکتریک با جهت پلاریزاسیون محیطی فرایندی دشوار و پرهزینه است. علاوه بر این، به علت محدودیت‌های تکنیکی در فرایند تولید این سرامیک‌ها، امکان تولید پیزوالکتریک‌های پیچشی با قطرهای بزرگ وجود ندارد و بنابراین ترانسدیوسرهای پیزوالکتریکی پیچشی دارای محدودیت توان و میزان جابجایی پیچشی هستند. ترانسدیوسرهای مگنتواستریکتیو نوع دیگری از ترانسدیوسرها می‌باشد. استفاده از مود طولی مواد مگنتواستریکتیو در ساخت عملگرها و ترانسدیوسرها موضوع بسیاری از تحقیقات گذشته بوده است [۱۰].

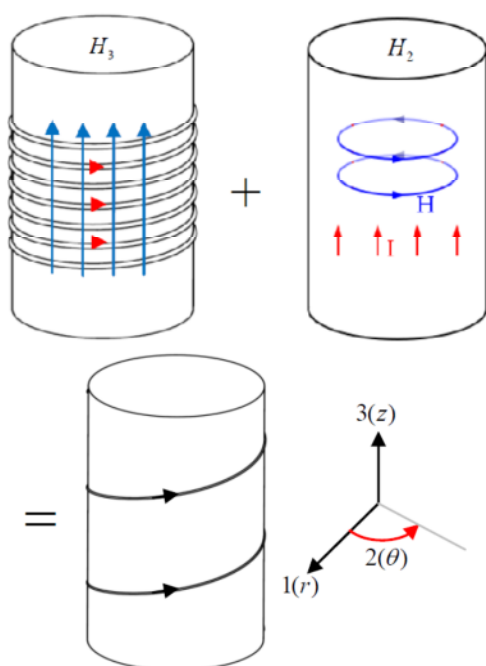
در این مقاله یک نوع جدید از ترانسدیوسرهای پیچشی معرفی می‌شود که در آن از ارتعاشات پیچشی یک ماده مگنتواستریکتیو استفاده می‌شود. این ترانسدیوسر شامل یک کله‌گی مگنتواستریکتیو، یک قطعه پشت بند فولادی و یک محفظه در بر گیرنده است. بر اساس اثر ویدمن در مواد مگنتواستریکتیو، با اعمال یک میدان مغناطیسی مارپیچ، کله‌گی دچار تغییر شکل پیچشی می‌شود. معادلات دیفرانسیل ارتعاشات پیچشی نوشته شده و یک ترانسدیوسر پیچشی مگنتواستریکتیو طراحی می‌شود. فرکانس رزونانس و شکل مود طبیعی ترانسدیوسر با روش تئوری، عددی و تجربی بررسی شده و با هم مقایسه می‌شود. اثر پارامترهای مهم بر جابجایی

میدان مغناطیسی محوری و محیطی انجام می‌گیرد. میدان مغناطیسی محیطی درون ماده را می‌توان توسط عبور یک جریان از داخل ماده بوجود آورد. و میدان مغناطیسی محوری را نیز توسط یک سیم‌پیچ هم محور با ماده می‌توان ایجاد کرد. تأثیر هم زمان این دو میدان باعث بوجود آمدن یک میدان مغناطیسی مارپیچ می‌شود که آن هم باعث چرخش حوزه های مغناطیسی ماده در جهت میدان می‌شود. شکل ۱ ماده مگنتو استریکتیو را تحت اثر میدان مارپیچ نشان می‌دهد.

در تحریک پیچشی ماده مگنتو استریکتیو میدان مغناطیسی در جهت H_1 ، و تنش های T_1 تا T_5 برابر صفر است. اما تنش برشی T_6 ، پیش بار پیچشی ماده، دارای مقدار است.

با استفاده از معادله ماتریسی ۲ رابطه کرنش پیچشی ماده حول محور (z) ، S_6 ، به شکل رابطه (۳) قابل بیان خواهد بود.

$$S_6 = s_{66}^H T_6 + d_{62} H_2 \quad (3)$$



شکل ۱ ماده مگنتو استریکتیو تحت میدان مارپیچ

۳- طراحی مکانیکی ترانسدیوسر پیچشی

در این بخش ترانسدیوسر پیچشی بر اساس روابط تئوری طراحی می‌شود. هدف از طراحی مکانیکی بدست آوردن طول رزونانسی اجزای ترانسدیوسر است. شکل ۲ اجزای مهم ترانسدیوسر پیچشی و شرایط مرزی برای نوشتن معادلات را نشان می‌دهد.

ماده مگنتو استریکتیو مورد استفاده در این تحقیق استوانه‌ای می‌باشد، لذا برای بیان رفتار پیچشی ماده از مختصات استوانه‌ای استفاده شده است. در این سیستم، اندیس‌های ۱، ۲ و ۳ معادل جهات r ، θ و z و اندیس های ۴، ۵ و ۶ معادل چرخش حول محورهای r ، θ و z هستند. H_1 ، H_2 ، H_3 به ترتیب میدان مغناطیسی در جهات r ، θ و z هستند. T_1 ، T_2 ، T_3 تنش‌های نرمال و T_4 ، T_5 ، T_6 تنش‌های برشی هستند. ماتریس S نیز دارای اندیس‌های مشابه با ماتریس T است. فرم ماتریسی معادله پیزومگنتیک (۱) به شکل زیر است.

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11}^H & 0 & S_{13}^H & 0 & 0 & 0 \\ 0 & S_{22}^H & 0 & 0 & 0 & S_{26}^H \\ S_{31}^H & 0 & S_{33}^H & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44}^H & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55}^H & 0 \\ 0 & S_{62}^H & 0 & 0 & 0 & S_{66}^H \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} \\ 0 & d_{22} & d_{23} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & d_{62} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_1 \\ H_2 \\ H_3 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & d_{22} & d_{23} & 0 & 0 & d_{26} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mu_{11}^T & 0 & 0 \\ 0 & \mu_{11}^T & 0 \\ 0 & 0 & \mu_{33}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_1 \\ H_2 \\ H_3 \end{bmatrix}$$

در ماتریس‌های (۲) بعضی از درایه‌ها صفر و بعضی دیگر ممکن است به علت تقارن با هم برابر باشند. با تحریک و اندازه‌گیری خواص در جهات مختلف می‌توان تمام درایه‌ها را مشخص کرد. شایان ذکر است که ضرایب موجود در ماتریس‌ها برای ماده مگنتو استریکتیو، در حالی تعیین می‌شود که ماده تحت یک میدان مغناطیسی بایاس در جهت محور خود، z ، قرار گرفته است. همان‌طور که گفته شد تحریک اثر ویدمن توسط اعمال دو

$$\omega_r = (2k-1) \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{G}{I_1^2 \rho}}, \quad k=1,2,3,\dots \quad (9)$$

که D ماکزیمم جابجایی پیچشی بخش دوم کله‌گی، G_i و J_i مدول برشی و گشتاور قطبی سطح بخش i ام هستند. ω_r فرکانس رزونانس ترانسدیوسر پیچشی و $\tilde{\varphi}_1(z_1)$, $\tilde{\varphi}_2(z_2)$, $\tilde{\varphi}_3(z_3)$ معادلات شکل مود طبیعی سه بخش ترانسدیوسر است. فرکانس رزونانس طراحی برابر 12075 هرتز در نظر گرفته شده است. این مقدار بر اساس اندازه میله پرمندور در دسترس انتخاب شده است. خواص فیزیکی کله‌گی و قطعه پشت بند در جدول ۱ آمده است.

با اعمال شرایط مرزی می‌توان طول‌های l_1 , l_2 , l_3 را بدست آورد. میله پرمندور در دسترس دارای طول 200 میلی‌متر و قطر 11 میلی‌متر می‌باشد. قطر سر کله‌گی، D_1 ، بر اساس ضریب بزرگنمایی مورد نظر طراحی می‌شود. بر اساس معادله (۶) ضریب بزرگنمایی کله‌گی برابر نسبت گشتاور قطبی سطح دو بخش اول کله‌گی، (J_2/J_1) ، می‌باشد.

جدول ۱ خواص فیزیکی کله‌گی و قطعه پشت بند

ماده	چگالی (kg/m ³)	ضریب پواسان	مدول یانگ (GPa)
پرمندور	۸۰۷۶	۰/۲۹	۲۱۶
استیل زنگ نزن	۷۷۲۳	۰/۲۸	۲۱۹

معادله خطی ارتعاشات پیچشی هر بخش از ترانسدیوسر پیچشی به شکل (۴) است [۱۱].

$$\frac{\partial^2 \tilde{\varphi}}{\partial z^2} + k_i^2 \tilde{\varphi}(z) = 0, \quad k_i = \frac{\omega}{V_i} \quad (4)$$

$\tilde{\varphi}(z)$ جابجایی پیچشی سطح مقطع ترانسدیوسر، k_i عدد موج پیچشی و V_i سرعت موج پیچشی در ماده می‌باشد. و ω نیز سرعت زاویه‌ای است. حل تحلیلی معادله (۴) به شکل زیر خواهد بود.

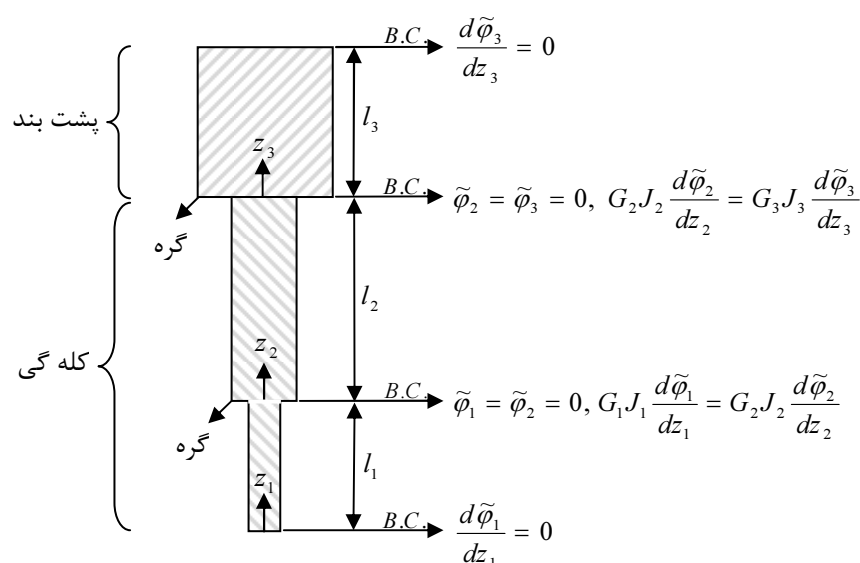
$$\tilde{\varphi}_i(z_i) = A \cos(k_i z_i) + B \sin(k_i z_i), \quad k_{i_i} = \frac{\omega}{V_{i_i}} \quad (5)$$

که $\tilde{\varphi}_i(z_i)$ جابجایی پیچشی بخش i ام، k_{i_i} و V_{i_i} عدد موج و سرعت پیچشی در بخش i ام می‌باشد. معادلات ارتعاشات آزاد ترانسدیوسر پیچشی با اعمال شرایط مرزی شکل ۲ به صورت زیر خواهد بود.

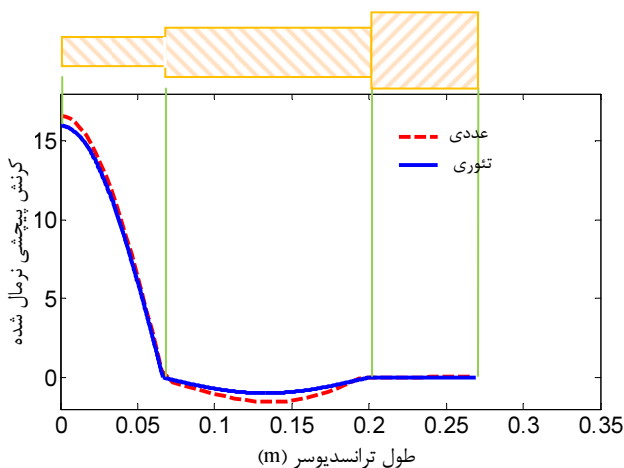
$$\tilde{\varphi}_1(z_1) = \frac{J_2}{J_1} D \cos\left[(2k-1) \frac{\pi}{2} \frac{z_1}{l_1}\right], \quad k=1,2,3,\dots \quad (6)$$

$$\tilde{\varphi}_2(z_2) = D \sin\left[\frac{k\pi}{l_2} z_2\right], \quad k=1,2,3,\dots \quad (7)$$

$$\tilde{\varphi}_3(z_3) = \frac{G_2 J_2}{G_3 J_3} \frac{2l_3}{(2k-1)\pi} D \cos\left[(2k-1) \frac{\pi}{2} \frac{z_3}{l_3}\right], \quad k=1,2,3,\dots \quad (8)$$



شکل ۲ اجزای مهم ترانسدیوسر پیچشی و شرایط مرزی برای نوشتن معادلات



شکل ۵ مقایسه شکل مود حاصل از روابط تئوری و شبیه‌سازی عددی

جدول ۲ پارامترهای مهم ترانسدیوسر پیچشی

پارامتر	مقدار
میدان مغناطیسی محیطی (H_2)	۵۸۷ (A/m)
مدول برشی پرمندور (G)	۸۳/۷۲ (GPa)
کرنش اشباع تخمینی (λ_s)	۶۰ (ppm)
شعاع پرمندور (R)	۵/۵ (mm)
گشتاور قطبی سطح (J)	$۱/۴۳ \times ۱۰^{-۹}$ (m ⁴)
پیش تنش پیچشی (T_0)	۱/۰۷ (MPa)
گشتاور پیش بار (M_p)	۰/۲۸ (N.m)
نرمی پیچشی پرمندور (s_{66}^H)	$۱/۱۹ \times ۱۰^{-۱۱}$ (m ² /N)
ضریب پیزومگنتیک (d_{62})	$۱۳۱/۶۴ \times ۱۰^{-۹}$ (m/A)

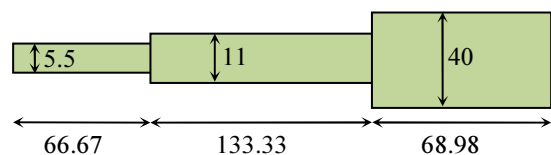
ماکزیمم میدان مغناطیسی محیطی، H_2 ، در پرمندور از رابطه تئوری $H_2 = I' / 2\pi R$ بدست آمده است که در آن جریان گذرنده از پرمندور، I' ، برابر ۲۰ آمپر می‌باشد. این مقدار از آزمایش‌های بررسی تأثیر میدان‌های مغناطیسی بر کرنش پیچشی ترانسدیوسر بدست آمده است. مقدار ضریب پیزومگنتیک d_{62} نیز از آزمایش‌های تجربی روی ماده پرمندور بدست آمده است. برای محاسبه گشتاور ترانسدیوسر در حالتی که کرنش پیچشی آن کاملاً مسدود شده باشد، از رابطه تئوری (۱۰) استفاده می‌شود.

$$M_B = \frac{G \lambda J}{R} \quad (10)$$

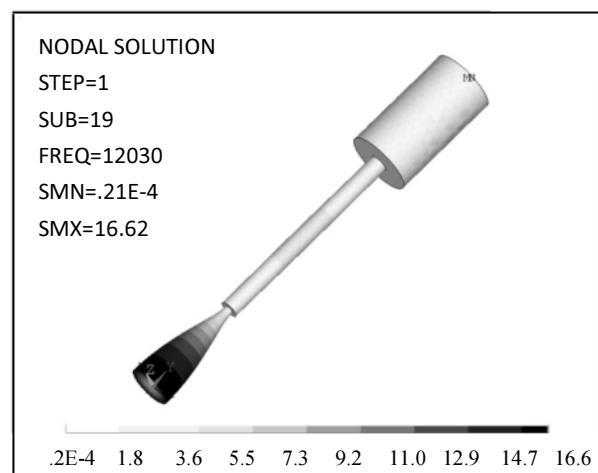
که M_B گشتاور حالت مسدود ترانسدیوسر پیچشی است، و مقدار آن با توجه به پارامترهای جدول ۲، برابر ۱/۳ N.m است.

ضریب بزرگنمایی در این ترانسدیوسر بر اساس ماده در دسترس و ملاحظات تولید قطعه کله‌گی برابر ۱۶ در نظر گرفته شده است. قطر قطعه پشت بند، D_3 ، باید کوچکتر از یک چهارم طول موج پیچشی در این قطعه باشد، تا بتوان از روابط خطی ارتعاشات پیچشی یک قطعه میله‌ای شکل استفاده کرد. بر اساس توضیحات بالا ابعاد طراحی شده ترانسدیوسر پیچشی مگنتواستریکتیو در شکل ۳ نشان داده شده است.

برای صحنه‌گذاری بر فرکانس رزونانس طراحی و شکل مود آن، یک شبیه‌سازی عددی با نرم‌افزار انسیس انجام گرفته است. شکل ۴ نتیجه آنالیز مودال ترانسدیوسر پیچشی را نشان می‌دهد. مود دوم پیچشی ترانسدیوسر در فرکانس ۱۲۰۳۰ هرتز اتفاق افتاده است. شکل ۵ شکل مود حاصل از روابط تئوری و شکل مود حاصل از شبیه‌سازی عددی را با هم مقایسه می‌کند.



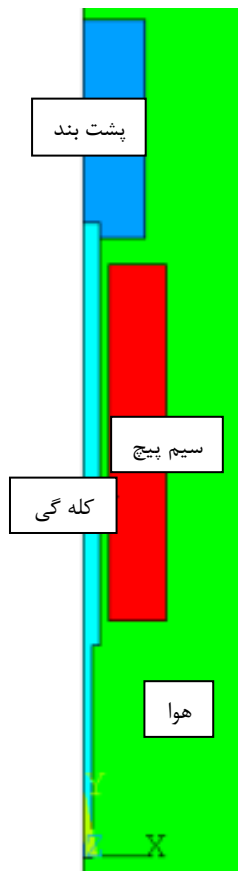
شکل ۳ ابعاد ترانسدیوسر پیچشی (ابعاد به میلی‌متر)



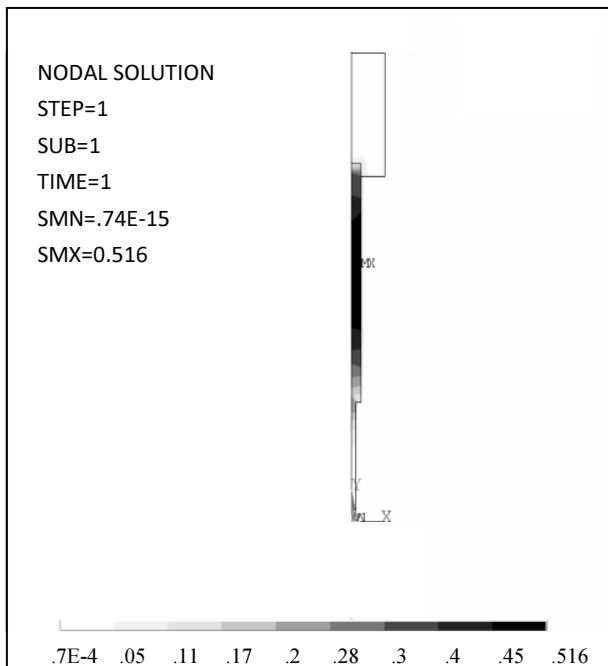
شکل ۴ آنالیز مودال ترانسدیوسر پیچشی

۴- تخمین تئوری کرنش پیچشی و گشتاور ترانسدیوسر

در این بخش کرنش پیچشی و گشتاور ترانسدیوسر به کمک روابط تئوری تخمین زده می‌شود. جدول ۲ پارامتر مورد استفاده در روابط تئوری را بیان می‌کند.



شکل ۵- الف اجزای مغناطیسی ترانسدیوسر



شکل ۶- ب نتیجه آنالیز عددی چگالی شار میدان مغناطیسی محوری بر حسب تسلا در طول کله گی

برای محاسبه کرنش پیچشی ترانسدیوسر، از رابطه پیزومگنتیک (۳) استفاده می‌شود. با جایگذاری مقادیر جدول ۲ در این رابطه، میزان کرنش پیچشی ترانسدیوسر برابر $63/34 \text{ ppm}$ بدست می‌آید، که این مقدار معادل پیچش $3/07$ میلی رادیان در نوک کله گی می‌باشد.

۵- آنالیز بخش‌های مغناطیسی ترانسدیوسر

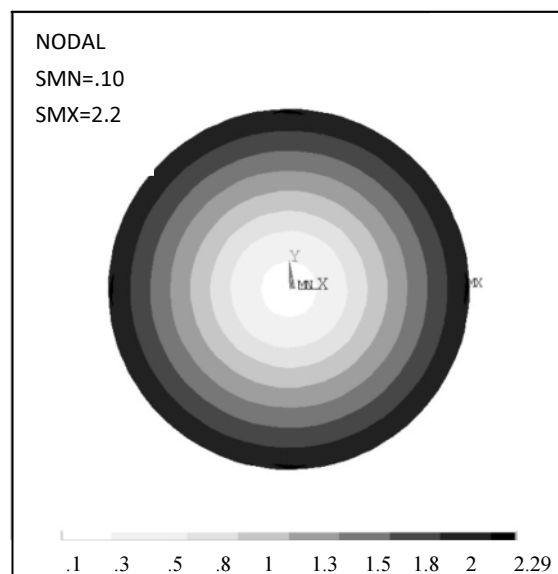
بر اساس آنچه در مورد اصول عملکرد ترانسدیوسر پیچشی مگنتواستریکتیو گفته شد، دو میدان محوری و محیطی برای تحریک ماده نیاز است. یک سیم‌پیچ هم محور با کله گی برای ایجاد میدان محوری در ماده بکار می‌رود. چگالی شار محوری باید کمتر از چگالی شار اشباع پرمندور، $2/34$ تسلا، باشد. زیرا در آن شار مغناطیسی حوزه های مغناطیسی به صورت اشباع شده در جهت محوری قرار می‌گیرند و قادر به چرخش در جهت‌های دیگر نمی‌باشند، لذا میدان محوری اعمال شونده برای تحریک پیچشی ماده باید به اندازه کافی از میدان مغناطیسی محوری اشباع دور باشد. چگالی شار مغناطیسی حدود $0/5$ تسلا برای میدان مغناطیسی محوری انتخاب شده است. این مقدار با توجه به آزمایش‌های بررسی تأثیر میدان‌های مغناطیسی بر کرنش پیچشی ترانسدیوسر انتخاب شده است. با دانستن مقدار میدان مغناطیسی محوری مورد نیاز، می‌توان تعداد دور سیم پیچ و مقدار جریان آن را محاسبه کرد. یک سیم‌پیچ، با تعداد دور 260 و قطر سیم $1/73$ میلی‌متر با توجه به فضای در اختیار و مقدار میدان مغناطیسی مورد نیاز طراحی شده است. شکل ۶ نتیجه آنالیز عددی میدان مغناطیسی محوری را در نرم‌افزار انسیس نشان می‌دهد.

شکل ۶- الف یک نیمه مدل دو بعدی متقارن را در نرم‌افزار انسیس نشان می‌دهد. در حقیقت تحلیل عددی انجام شده در شکل ۶- ب نشان می‌دهد که برای اعمال چگالی شار مغناطیسی حدود $0/5$ تسلا به کله گی، باید جریان 4 آمپر از سیم پیچ طراحی شده عبور داده شود.

میدان مغناطیسی متغییر محیطی توسط عبور جریان متناوب از درون کله گی ایجاد می‌شود. شکل ۷ نتیجه آنالیز عددی میدان مغناطیسی محیطی را در نرم‌افزار انسیس نشان می‌دهد. نتیجه شبیه‌سازی نشان می‌دهد که با عبور جریان 20 آمپر از سطح مقطع پرمندور، چگالی شار مغناطیسی برابر $2/15$ تسلا در سطح خارجی ماده ایجاد می‌شود.

اندازه‌گیری جابجایی پیچشی ترانسدیوسر توسط ارتعاش‌سنج لیزری مدل PSV-400 ساخت شرکت پلی تک انجام شده است. برای اندازه‌گیری زاویه پیچش کله‌گی، یک مهره شش گوش کوچک روی نوک کله‌گی چسبانده شده است و سپس نور لیزر روی یکی از سطوح صاف شش گانه مهره تابانده شده است. با این روش حرکت پیچشی کله‌گی به حرکت رفت و برگشتی سطح مهره تبدیل شده است و سپس توسط یک رابطه ریاضی ساده دامنه رفت و برگشتی سطح مهره به میزان پیچش کله‌گی تبدیل شده است. شکل ۱۱ جابجایی پیچشی در راستای طول ترانسدیوسر پیچشی را در فرکانس رزونانس نشان می‌دهد. در این آزمایش جریان ثابت گذرنده از سیم‌پیچ ترانسدیوسر ۴ آمپر و جریان RMS گذرنده از پرمندور برابر ۲۰ آمپر می‌باشد.

بر اساس شکل ۱۱ شکل مود بدست آمده از آزمایش‌های تجربی تطابق خوبی را با شکل مود بدست آمده از روابط تئوری و آنالیز عددی نشان می‌دهد.

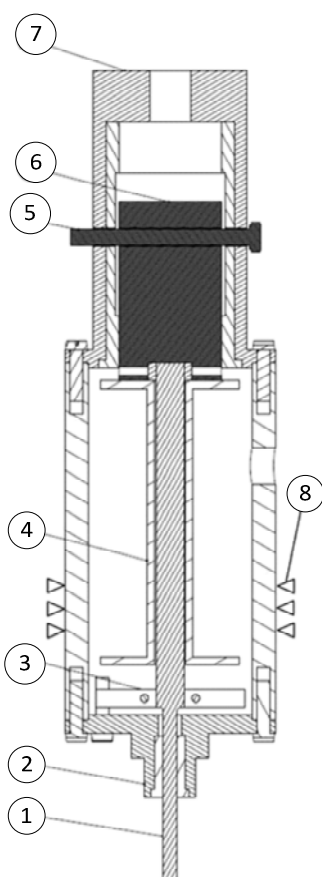


شکل ۷ نتیجه آنالیز عددی مغناطیسی میدان محیطی

با حرکت از سطح خارجی به سمت مرکز پرمندور میدان مغناطیسی به صفر می‌رسد. بنابراین میدان مغناطیسی محیطی در سطح مقطع کله‌گی یکنواخت نمی‌باشد. در آنالیزهای عددی مغناطیسی، ضریب نفوذپذیری نسبی مغناطیسی پرمندور به طور خطی و برابر ۳۰۰۰ در نظر گرفته شده است.

۶- آزمایشات تجربی

شکل ۸ نمای برش خورده از ترانسدیوسر پیچشی را نمایش می‌دهد. برای اعمال پیش بار پیچشی به کله‌گی از یک قطعه آلومینیومی منعطف (قطعه ۳) که روی آن با پیچ بسته و محکم شده است استفاده می‌شود. این قطعه آلومینیومی توسط درپوش ترانسدیوسر (قطعه ۲) و توسط یک پیچ که در شکل نشان داده شده چرخانده می‌شود. برای جلوگیری از چرخش کل ترانسدیوسر در هنگام اعمال پیش بار، قطعه پشت بند توسط یک پیچ (قطعه ۵) در محفظه نگهدارنده ثابت می‌شود. علاوه بر این پیچ از ارتعاشات بلااستفاده قطعه پشت بند به هنگام کار ترانسدیوسر جلوگیری می‌کند. برای نگه داشتن محفظه نگهدارنده نیز از یک نشیمنگاه از جنس تفلون (قطعه ۸) استفاده شده است. شکل ۹ قطعات و نمای مونتاژ شده ترانسدیوسر و منبع تغذیه سوئیچینگ جهت تحریک ترانسدیوسر را نشان می‌دهد. شکل ۱۰ دستگاه اندازه‌گیری جابجایی پیچشی ترانسدیوسر را نمایش می‌دهد.



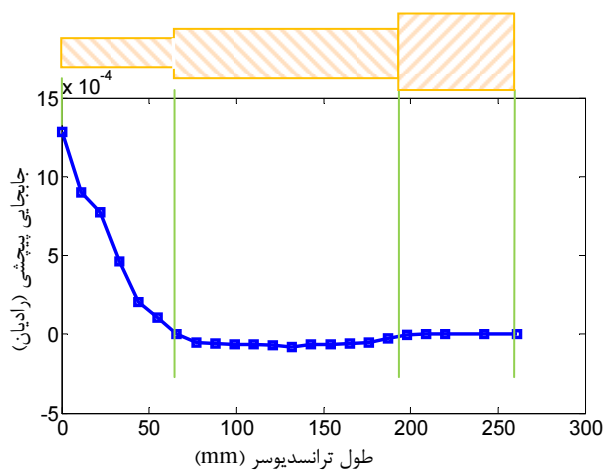
- ۱- کله‌گی
- ۲- مکانیزم اعمال پیش بار پیچشی
- ۳- فنر جهت اعمال پیش بار
- ۴- بوبین سیم پیچ
- ۵- پیچ جهت ثابت نگهداشتن قطعه پشت بند
- ۶- قطعه پشت بند
- ۷- محفظه نگهدارنده
- ۸- تکیه گاه ترانسدیوسر

شکل ۸ نمای برش خورده از ترانسدیوسر پیچشی

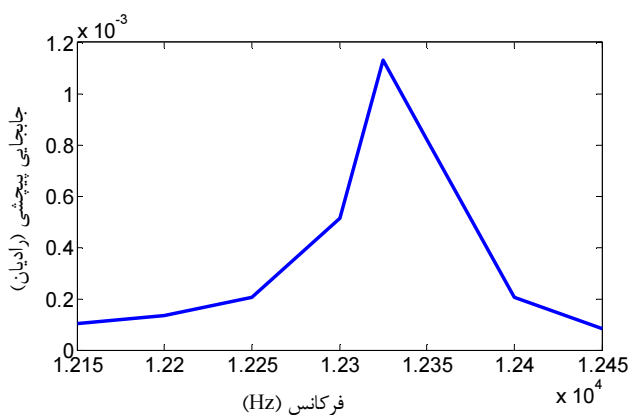
سوئیچینگ با خروجی مربعی و با پلاریته متقارن استفاده شده است. شکل ۱۲ جابه جایی پیچشی نوک ترانسدیوسر پیچشی را در حوالی فرکانس رزونانس نشان می دهد.

برای پیدا کردن مقدار بهینه میدان محوری برای ایجاد ماکزیمم جابجایی پیچشی، در شکل ۱۳ میزان دوران نوک ترانسدیوسر بر حسب میدان مغناطیسی محوری در شرایط استاتیکی (غیر رزونانسی) و در میدان محیطی ثابت ترسیم شده است.

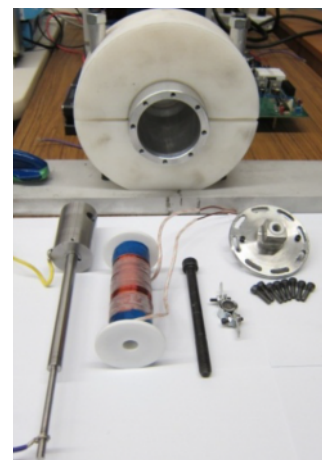
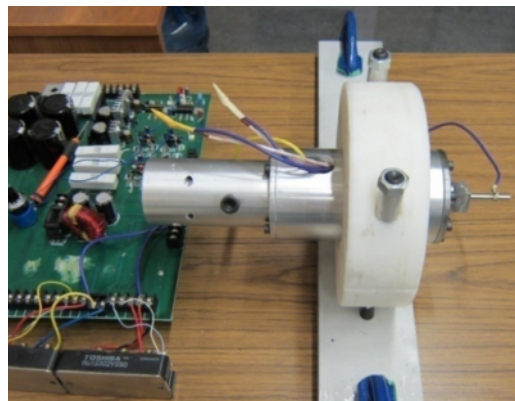
بر اساس شکل ۱۳ ماکزیمم جابجایی پیچشی نزدیک جریان ۴ آمپر اتفاق افتاده است. بر اساس شبیه سازی عددی انجام شده، جریان ۴ آمپر معادل چگالی شار ۰/۵۱۶ تسلا می باشد. شکل ۱۴ جابجایی پیچشی نوک ترانسدیوسر را بر حسب میدان مغناطیسی محیطی در شرایط استاتیکی (غیر رزونانسی) و در میدان محوری ثابت نشان می دهد.



شکل ۱۱ جابجایی پیچشی اندازه گیری شده در راستای طول ترانسدیوسر در فرکانس رزونانس



شکل ۱۲ جابجایی پیچشی اندازه گیری شده نوک ترانسدیوسر در حوالی فرکانس رزونانس



شکل ۹ قطعات و نمای مونتاژ شده ترانسدیوسر

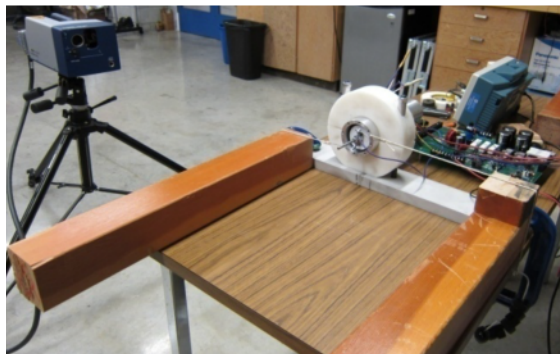


شکل ۱۰ دستگاه اندازه گیری جابجایی پیچشی ترانسدیوسر

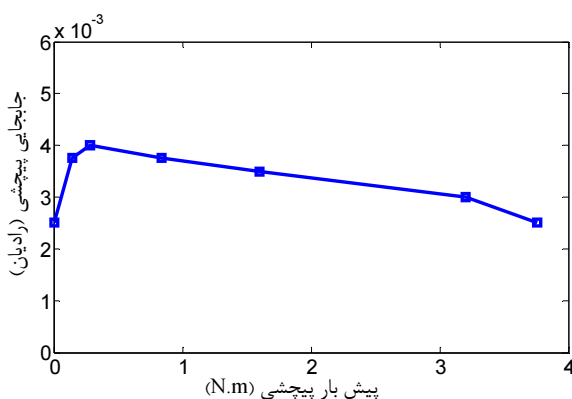
با توجه به شکل ۱۲ فرکانس رزونانس ترانسدیوسر ۱۲۳۲۵ هرتز است. این مقدار تا حد خوبی نزدیک به مقدار تئوری، ۱۲۰۷۵ هرتز و مقدار عددی ۱۲۰۳۰ هرتز می باشد. ماکزیمم جابجایی پیچشی نوک ترانسدیوسر در فرکانس رزونانس برابر ۱/۲ میلی رادیان است. در آزمایش های تجربی، برای تحریک سیم پیچ از یک منبع تغذیه ولتاژ ثابت معمولی استفاده شده و برای تحریک خود پرمندور با جریان متناوب، از منبع تغذیه

تغییر می‌کند و در وضعیتی قرار می‌گیرد که در صورت اعمال میدان مغناطیسی خارجی، تغییر وضعیت بیشتری از خود نشان می‌دهد. شکل ۱۵ دستگاه اندازه‌گیری جابجایی پیچشی را بر حسب پیش تنش های پیچشی مختلف نشان می‌دهد.

شکل ۱۶ جابجایی پیچشی را بر حسب پیش بار پیچشی در میدان محوری و محیطی ثابت نشان می‌دهد. در این آزمایش جریان سیم‌پیچ برابر ۴ آمپر و جریان ثابت عبوری از پرمندور ۲۰ آمپر است. بر اساس شکل ۱۶ ماکزیمم جابجایی پیچشی در پیش بار پیچشی بهینه 0.28 N.m اتفاق می‌افتد و بعد از آن جابجایی پیچشی کاهش می‌یابد.



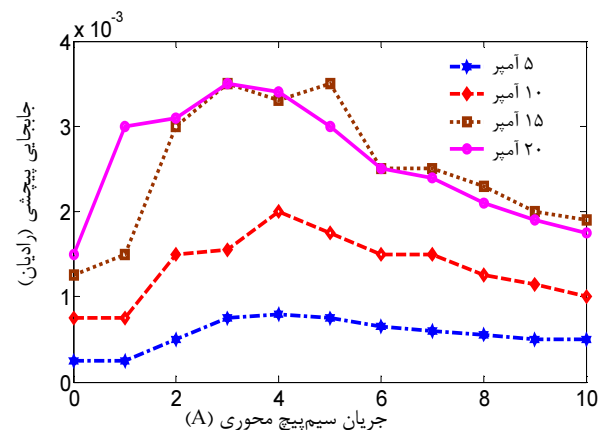
شکل ۱۵ دستگاه اندازه‌گیری جابجایی پیچشی بر حسب پیش تنش‌های پیچشی متغیر



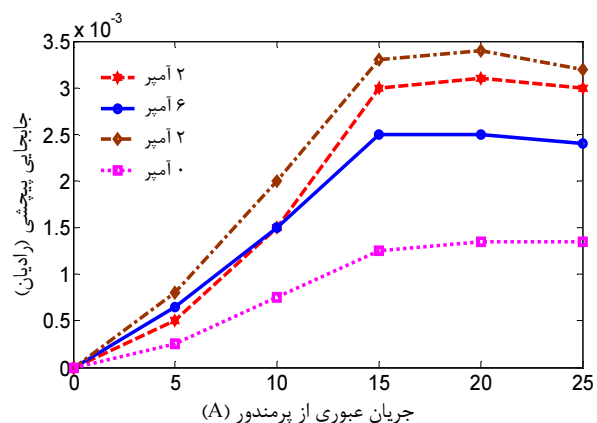
شکل ۱۶ جابجایی پیچشی اندازه‌گیری شده بر حسب پیش بار پیچشی در میدان محوری و محیطی ثابت

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک نوع جدید از ترانسدیوسر پیچشی مگنتواستریکتیو معرفی شد. این ترانسدیوسر شامل یک کله‌گی مگنتواستریکتیو و یک قطعه پشت بند فولادی و یک محفظه



شکل ۱۳ جابجایی پیچشی اندازه‌گیری شده نوک ترانسدیوسر بر حسب میدان مغناطیسی محوری در میدان محیطی ثابت



شکل ۱۴ جابجایی پیچشی اندازه‌گیری شده نوک ترانسدیوسر بر حسب میدان مغناطیسی محیطی در میدان محوری ثابت

شکل ۱۴ نشان می‌دهد که جابجایی پیچشی دارای یک حد اشباع می‌باشد. این حد اشباع در جریان حدود ۲۰ آمپر اتفاق افتاده است. بر اساس نتایج شبیه‌سازی انسیس این جریان معادل میدان محیطی $2/15$ تسلا در لایه سطحی پرمندور می‌باشد. ماکزیمم جابجایی پیچشی نوک ترانسدیوسر در شرایط استاتیکی و در میدان‌های مغناطیسی بهینه ذکر شده برابر $3/5$ میلی رادیان است. این مقدار با کرنش پیچشی تخمین زده شده در بخش ۴ ($3/07$ میلی رادیان) تطابق خوبی را نشان می‌دهد.

یکی دیگر از عوامل مؤثر در عملکرد ترانسدیوسر پیچشی میزان پیش بار پیچشی است. به خاطر طبیعت مگنتوالاستیک مواد مگنتواستریکتیو، با اعمال پیش بار پیچشی میزان کرنش پیچشی ترانسدیوسر تحت تاثیر قرار می‌گیرد. در حقیقت جهت قرارگیری حوزه‌های مغناطیسی در ماده با اعمال تنش مکانیکی

- [3] Dubus B., Debus J., "Analysis of Mechanical Limitations of High Power Piezoelectric Transducers using Finite Element Modeling", *Journal of Ultrasonics*, Vol. 29, No. 3, 1991, pp. 201-207.
- [4] Athikom B., Hari K., Robert D., "Optimizing the Performance of Piezoelectric Drivers that use Stepped Horns", *Journal of Acoustic Society of America*. Vol. 90, 1991, pp. 1223-1229.
- [5] Shuyu L., "Sandwiched Piezoelectric Ultrasonic Transducer of Longitudinal-Torsional Compound Vibrational Modes", *IEEE transactions on ultrasonic, ferroelectrics, and frequency control*, Vol. 44, No. 6, 1997, pp. 1189 – 1197.
- [6] Miura H., "Vibration Characteristics of Stepped Horn Joined Cutting Tip Employed in Circular Cutting Using Ultrasonic Vibration", *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 47, No. 5, 2008, pp. 4282-4286.
- [7] Al-Budairi H., Harkness P., Lucas M., "A Strategy for Delivering High Torsionality in Longitudinal-Torsional Ultrasonic Devices", *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 70, 2011, pp. 339-344.
- [8] Kim J., Kwon O., "Vibration Characteristics of Piezoelectric Torsional Transducers", *Journal of sound and vibration*, Vol. 264, 2003, pp. 453-473.
- [9] Yin Z., Li H., Yang Z., Xie O., Li Y., "Simulation and Experiment of New Longitudinal-Torsional Composite Ultrasonic Elliptical Vibrator", *Advanced Materials Research*, Vol. 338, 2011, pp. 79-83.
- [10] عبدالله امیر، علینقی پور علیرضا، طراحی و ساخت کله‌گی / اولتراسونیک پر قدرت ۱ کیلووات با فرکانس ۲۲ کیلوهرتز، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، ۱۳۷۴، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.
- [11] Meirovitch L., "Analytical Methods in Vibrations", *the Macmillan Company*, London, 1991.

نگهدارنده است. یک میدان مغناطیسی مارپیچ باعث چرخش حوزه‌های مغناطیسی و در نتیجه پیچش ماده می‌شود. معادلات دیفرانسیل ارتعاشات پیچشی ترانسدیوسر حل شد و شکل مود طبیعی ترانسدیوسر از روابط تئوری استخراج گردید. سپس شکل مود طبیعی به روش عددی و تجربی بدست آمده و با شکل مود تئوری مقایسه شد. بر اساس نتایج تجربی بدست آمده، ماکزیمم جابجایی پیچشی در چگالی شار مغناطیسی محوری ۰/۵۱۶ تسلا و محیطی ۲/۱۵ تسلا و در پیش بار پیچشی ۰/۲۸ N.m اتفاق می‌افتد. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که فرکانس رزونانس ترانسدیوسر برابر ۱۲۳۲۵ هرتز می‌باشد، این مقدار تا حد خوبی نزدیک به مقدار تئوری، ۱۲۰۷۵ هرتز و مقدار عددی ۱۲۰۳۰ هرتز است. ماکزیمم جابجایی پیچشی ترانسدیوسر در حالت رزونانس ۱/۲ میلی رادیان می‌باشد. ماکزیمم جابجایی پیچشی در حالت استاتیکی برابر ۳/۵ میلی رادیان است. نتایج نشان می‌دهد که می‌توان از این ترانسدیوسر در کاربردهایی مانند فرایندهای ماشین‌کاری به کمک ارتعاشات مثل فرایند سوراخ‌کاری، قلاویزکاری و یا جوش‌کاری قطعات پلاستیکی استفاده کرد.

۸- مراجع

- [1] Horita R., "Free-Flooding Unidirectional Resonators for Deep Ocean Transducers", *Journal of Acoustic Society America*, Vol. 41, No. 1, 1975, pp. 158-166.
- [2] Graff K., "Macrosonics in Industry", *Journal of Ultrasonics*, Vol. 13, No. 3, 1975, pp. 103-109.