مجله مهندسی مکانیک مدرس، آذر 1394، دوره 15، شماره 9، ص‌ص 255-260

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بررسی اثر تغییر مدول یانگ بر روی فرکانس رزونانس و شکل مد ترانسدیوسرهای دگررسان مغناطیسی ترفنل-دی

یوسف حجت[1*]، محمدرضا شیخ‌الاسلامی بورقانی[2]، مجتبی قدسی[3]، حسام صادقیان[2]

1- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

2-دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه سلطان قابوس، عمان

* تهران، صندوق پستی 143-14115، yhojjat@modares.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 14 خرداد 1394

پذیرش: 20 تیر 1394

ارائه در سایت: 24 مرداد 1394

کلید واژگان:

دگررسان مغناطیسی

اثر تغییر مدول یانگ

فرکانس رزونانس

شکل مد

چکیده

در ترانسدیوسر دگررسان مغناطیسی، مدول یانگ هسته فرومغناطیس در مواجهه با تغییر سطح مغناطیسی آن، تغییر می‌کند. این تغییر برای هسته ترفنل-دی بیشترین مقدار را دارد. تغییر مدول یانگ، سبب تغییر فرکانس رزونانس و شکل مد ترانسدیوسر می‌شود. این مقاله به مطالعه این اثر در ترانسدیوسر با هسته ترفنل-دی پرداخته است. بدین منظور ترانسدیوسر دگررسان مغناطیسی با ماده ترفنل-دی طراحی و ساخته شده است. نقاط گره طراحی ترانسدیوسر، محل اعمال مکانیزم‌های پیش‌تنش در نظر گرفته شده است. اثر تغییر مدول یانگ بر فرکانس رزونانس و شکل مد در محدوده کاری ترانسدیوسر به صورت تحلیلی و نیز با استفاده از نرم‌افزار المان محدود انسیس بررسی شده است. محدوده تغییر فرکانس رزونانس برای مد اول حدود1000 هرتز و برای مد دوم حدود 100 هرتز به دست آمد. شکل مد اثر بسیار محدودی از تغییر مدول یانگ می‌پذیرد. در میدان مغناطیسی بایاس 40 کیلو آمپر بر متر، نتایج تحلیلی و المان محدود در مورد فرکانس رزونانس، با نتایج تجربی راستی آزمایی شده است. فرکانس رزونانس در این میدان بایاس برای مد اول 3100 هرتز و برای مد دوم 8252 هرتز بوده که نزدیکی قابل قبولی به مقادیر ناشی از حل تحلیلی و المان محدود دارد. نتایج نشان می‌دهد که طراحی در مد دوم، از نظرکاهش اختلال تغییر مدول یانگ در رفتار ارتعاشی ترانسدیوسر مزیت دارد.

Study of young modulus change effect on resonance frequency and mode shape of magnetostrictive Terfenol-D transducer

Yousef Hojjat[1*], Mohammad Reza Sheykholeslami[1], Mojtaba Ghodsi[2], Hesam Sadeghian[1]

1- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

2- Department of Mechanical and industrial Engineering, Sultan Qaboos University, Oman.

* P.O.B. 141115-143 Tehran, yhojjat@modares.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 04 June 2015

Accepted 11 July 2015

Available Online 15 August 2015

Keywords:

Magnetostriction

Young Modulus Change Effect

Resonance Frequency

Mode Shape

ABSTRACT

In giant magnetostrictive transducer, Young modulus of the core considerably alters with changing its magnetic level. Young modulus change in Terfenol-D core has the highest value. This effect changes the resonance frequency and mode shapes of the transducer. This subject in Terfenol-D resonance transducer is studied in this paper. For this purpose, a resonance Terfenol-D transducer has been designed and fabricated. Node locations in the transducer are considered to add pre-load and bias mechanisms. Effect of Young modulus change on resonance frequency and mode shape were studied both analytically and by ANSYS FEM software. Range of resonance frequency change in the first mode is 1000 Hz and in the second mode is 100 HZ. Mode shapes changes are limited for both modes. In 40kA/m magnetic field bias, results from analytical and FEM simulation were verified with experimental results. Resonance frequency in this bias is 3100 Hz for the first mode and 8252 Hz for the second mode. Results have acceptable agreement with experimental results. Moreover, in this bias magnetic field, impedance responses between first and second modes are compared. Results show that selecting second mode is preferable for reducing disturbance of Young Modulus change on vibrational behavior.

1- مقدمه

دگررسانی مغناطیسی، تغییر شکل مواد فرومغناطیس تحت اثر تغییر سطوح مغناطیسی این مواد است [1]. این خاصیت دارای اثرهای گوناگون بوده که هرکدام کاربردهای خاص خود را دارند. در میان آن‌ها، تغییر طول این مواد به سبب اعمال میدان مغناطیسی و عکس این اثر بیشتر مورد استفاده قرار گرفته است. اثر مستقیم، ژول نام داشته و عکس آن ویلاری نامیده می‌شود [2]. یکی از کاربردهای مهم اثر ژول، استفاده از مواد دگررسان مغناطیسی در ترانسدیوسرهای رزونانسی است. در این ترانسدیوسرها فرکانس

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

Y. Hojjat, M. R. Sheykholeslami, M. Ghodsi, H. Sadeghian, Study of young modulus change effect on resonance frequency and mode shape of magnetostrictive Terfenol-D transducer, *Modares Mechanical Engineering,* Vol. 15, No. 9, pp. 255-260, 2015 (In Persian)

طبیعی با فرکانس تحریک یکسان است. در این حالت تغییر مکان قابل ملاحظه‌ای توسط آن‌ها تولید می‌شود. هنگام کار در فرکانس رزونانس ، ترانسدیوسرهای دگررسان مغناطیسی رزونانسی، بازدهی تا حدود 50 درصد نیز می‌توانند داشته باشند [3].

اثر تغییر مدول یانگ[1] در مواد فرومغناطیس عبارت از تغییر مدول یانگ به سبب تغییر مغناطیس‌شوندگی مواد، می‌باشد. تغییر در مغناطیس‌شوندگی می‌تواند با تغییر میدان مغناطیسی خارجی، اعمال تنش مکانیکی، دما و یا ترکیبی از این‌عوامل اتفاق بیفتد. این اثر برای آهن و نیکل بسیار کوچک است. اما تغییر مدول یانگ در آلیاژ ترفنل‌ـدی قابل توجه و تحت شرایط ویژه کاری از لحاظ دما و پیش‌بار، تا حدود 6 برابر گزارش شده است [4]. ترفنل-دی آلیاژ آهن، تربیوم و دیسپرسیم است. در مورد این اثر در انواع مختلف آلیاژ ترفنل-دی از لحاظ نوع و درصد استکیومتری در شرایط مختلف، تحقیقات متنوعی انجام شده است. برای نمونه در سال 2007 لیانگ و ژانگ نتایج آزمایش‌های خود را به این صورت بیان کردند که وقتی میدان مغناطیسی ترفنل-دی بیش از 60 کیلوآمپر بر متر باشد، مدول یانگ با افزایش پیش‌بار کاهش می‌یابد. عکس این مورد برای میدان‌های مغناطیسی کمتر از 60 کیلوآمپر بر متر همواره صادق نیست [5].

تأثیر تغییر مدول یانگ در رفتار ترانسدیوسرها در حالت غیر رزونانسی در پژوهش‌های مختلفی بررسی شده است [۶،7] . داپینو و همکاران مدلی را برای بررسی اثر تغییر مدول یانگ در رفتار ترانسدیوسرهای ترفنل-دی ارائه دادند [8]. در مدل ارائه شده، بحث مختصری در رابطه با اثر تغییر مدول یانگ بر روی فرکانس رزونانس مد اول ارائه شده است. ترانسدیوسر مورد مطالعه، از نوع لانگوین (طرح معمول ترانسدیوسرهای رزونانسی) نبوده و فقط روی تغییر فرکانس رزونانس مد اول بررسی شده است. تغییر فرکانس رزونانس گزارش شده برای تغییر میدان مغناطیسی بایاس از صفر تا نقطه اشباع ترفنل-دی، 140 هرتز است.

تاکنون گزارشی در مورد تأثیر تغییر مدول یانگ بر شکل مد و فرکانس کاری ترانسدیوسرهای رزونانسی دگررسان مغناطیسی ارائه نشده است. بررسی این موضوع روی ترانسدیوسرهای ترفنل-دی، هدف مقاله حاضر است. در این مقاله اثر تغییر مدول یانگ بر روی پارامترهای ارتعاشی ترانسدیوسرهای رزونانسی ترفنل-دی بررسی شده است. این اثر می‌تواند مواردی شامل فرکانس رزونانس و نیز شکل مد را تغییر دهد. اهمیت این موضوع بدان جهت است که حین عملکرد ترانسدیوسر، شرایط کاری ترفنل-دی از قبیل میدان بایاس، دما و پیش‌بار می‌تواند تغییر کند و این می‌تواند سبب تغییر مدول یانگ شود. در صورت عدم پیش‌بینی این موضوع، ترانسدیوسر حین کار از شرایط طراحی فاصله گرفته و عملکرد ترانسدیوسر دچار افت ناگهانی می‌شود.

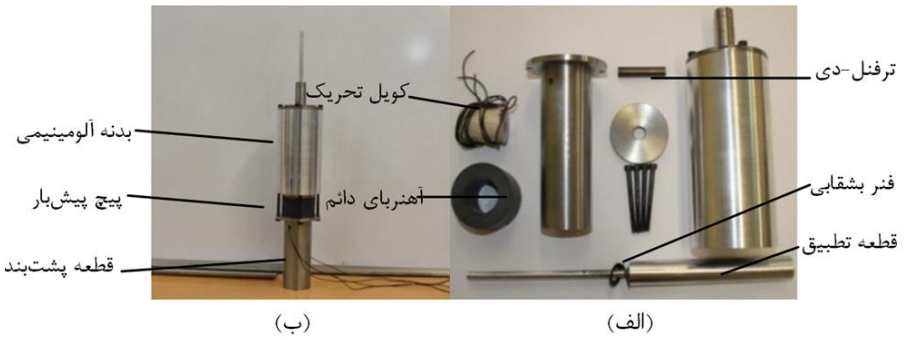
در راستای بررسی این موضوع، ترانسدیوسر رزونانسی ترفنل-دی طراحی و ساخته شد. نقاط گره مدهای اول و دوم این ترانسدیوسر در محل اعمال مکانیزم‌های پیش تنش در نظر گرفته شده است. اثر تغییر مدول یانگ بر روی فرکانس رزونانس و شکل مد ترانسدیوسر به صورت تحلیلی و نیز با استفاده از المان محدود بررسی شده است. برای شبیه‌سازی المان محدود از نرم‌افزار انسیس 12 استفاده شده است. در یک مقدار بایاس مغناطیسی، نتایج تحلیلی و المان محدود با نتایج تجربی، راستی آزمایی شده است.

2- ترانسدیوسرهای دگررسان مغناطیسی

برای افزایش کارایی ترفنل-دی در ترانسدیوسرها، لازم است که میدان مغناطیسی بایاس و پیش‌تنش مناسبی به آن اعمال شود. بایاس مغناطیسی با مغناطیس دائم علاوه بر انتقال منطقه عملکرد ترفنل-دی به ناحیه خطی، این امکان را می‌دهد تا ترانسدیوسر از سیگنال جریان دو قطبی استفاده کند که این از افت در سیم مسی جلوگیری می‌کند. پیش تنش مناسب نیز، باعث افزایش کرنش می‌شود. در توجیه این قضیه می‌توان این گونه استدلال کرد که پیش‌تنش مکانیکی سبب چرخش حوزه‌های مغناطیسی درون ماده در جهتی عمود بر راستای تنش می‌شود [9]. پیش تنش مناسب، پیش تنشی است که سبب جهت دهی حوزه‌های مغناطیسی عمود بر محور طولی شود، بدون این که بار با سختی مکانیکی زیادی تولید کند که غلبه بر آن دشوار باشد. درباره انتخاب پیش‌بار و میدان مغناطیسی بایاس مناسب مطالعات فراوانی انجام شده است [10-12]. با انجام روال مشابهی برای ترانسدیوسر موجود، مقدار 10/34 مگاپاسکال و 40 کیلوآمپر بر متر به عنوان پیش‌بار و میدان مغناطیسی بایاس ترانسدیوسر به ترتیب، انتخاب شد.

با در نظر گرفتن مقادیر پیش‌تنش و میدان بایاس ذکر شده، ترانسدیوسری مطابق شکل 1 طراحی و ساخته شده است. در این ترانسدیوسر میدان مغناطیسی بایاس به کمک آهنربای دایم و پیش‌تنش با فنر بشقابی و پیچ اعمال می‌شود. در مد دوم، هر دو این قطعات به نقاط گره مد دوم متصل شده‌اند تا اثری بر روی رفتار ارتعاشی ترانسدیوسر در این مد نداشته باشند. ولی در مد اول به سبب این که فقط یک گره وجود دارد، محل قرارگیری پیچ‌ها به عنوان گره درنظر گرفته شده است.

برای تعیین تجربی فرکانس رزونانس ترانسدیوسر شکل 1 از دستگاه امپدانس آنالایزر مدل واین کر 6500 استفاده شده است. شکل 2 اندازه‌گیری فرکانس رزونانس ترانسدیوسر را نشان می‌دهد. با استفاده از این دستگاه، منحنی دامنه و فاز امپدانس بر حسب فرکانس به دست می‌آید. تغییر ناگهانی دامنه و فاز در حول یک فرکانس نشان دهنده رزونانس در آن منطقه است. اگر ارتعاشات طولی ترانسدیوسر به روشی مسدود شود، تغییر رزونانسی مربوط به آنها حذف می‌شود. بدین ترتیب فرکانس رزونانس مدهای طولی مشخص می‌شود [13].



شکل 1 الف) قطعات مجزا و ب) مجموعه مونتاژ شده ترانسدیوسر ساخته شده

شکل 2 اندازه‌گیری فرکانس رزونانس ترانسدیوسر

1- ΔE Effect

مدول یانگ حین کارکرد ترفنل-دی در ترانسدیوسرها به سبب تغییر پیش‌بار، دما یا میدان مغناطیسی بایاس می‌تواند تغییرکند. بدین معنی که حین کارکرد، به سبب گرمای ایجاد شده یا عدم دقت در اعمال پیش‌بار و میدان مغناطیسی بایاس، مدول یانگ ترفنل-دی تغییر می‌کند. این تغییر مدول یانگ قابل توجه است. با تغییر میدان مغناطیسی بایاس از 20 تا 100 کیلوآمپر بر متر در 10/34 مگاپاسکال پیش‌تنش، محدوده تقریبی تغییر مدول یانگ بین 25 تا 65 گیگاپاسکال است [14]. در شرایط کاری ترفنل-دی در ترانسدیوسر موجود، مدول یانگ 40 گیگاپاسکال گزارش شده است [14]. تغییر مدول یانگ سبب تغییر در رفتار ارتعاشی ماده از قبیل فرکانس رزونانس و شکل مد ارتعاشی است. تغییر شکل مد ارتعاشی سبب تغییر در نقاط گره و شکم ترانسدیوسر می‌شود. چون معمولاً این ترانسدیوسرها از نقاط گره مهار شده و به تجهیزات مختلفی متصل می‌شوند، لذا تغییر این نقاط گره اثر نامطلوبی بر عملکرد می‌گذارد. از طرفی تغییر فرکانس رزونانس در بسیاری از کاربردها نامطلوب بوده و در صورت عدم پیش‌بینی تغییر فرکانس، عملکرد ترانسدیوسر افت محسوسی می‌کند. لذا مطالعه اثر تغییر مدول یانگ بر روی رفتار ارتعاشی ترانسدیوسر برای پیش‌بینی موارد ذکر شده ضروری است.

3- مطالعه رفتار ارتعاشی ترانسدیوسر

شکل 3 قسمت‌های اصلی ترانسدیوسر را نشان می‌دهد. سه قسمت اصلی ترانسدیوسر عبارت از هسته ترفنل-دی، قطعه تطبیقی و قطعه پشت بند می‌باشد. در ترانسدیوسر موجود قطعه تطبیقی و قطعه پشت بند به ترتیب از جنس آلومینیم سری 7075 و فولاد ضد زنگ سری 420 می‌باشد. مختصات استفاده شده برای حل تحلیلی در شکل 3 نشان داده شده است. در تحلیل، به سبب وجود پیش‌بار کافی در ترانسدیوسر، اتصال قطعات کاملا صلب در نظر گرفته شده است. هدف از تحلیل رفتاری ترانسدیوسر، بررسی اثر تغییر مدول یانگ بر روی فرکانس رزونانس و شکل مد ترانسدیوسر موجود است.

رابطه حاکم بر سیستم، معادله موج است که در رابطه (1) ارائه شده است [15].

$$\frac{\mathrm{d}^2u}{\mathrm{d}x^2}+\frac{1}{A}\frac{\mathrm{d}A}{\mathrm{d}x}\cdot\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}x}+\frac{\omega^2}{C^2}\cdot u=0 \qquad (1)$$

در رابطه (1)، u جابجایی طولی، A سطح مقطع، C سرعت صوت و ω فرکانس دایروی است.

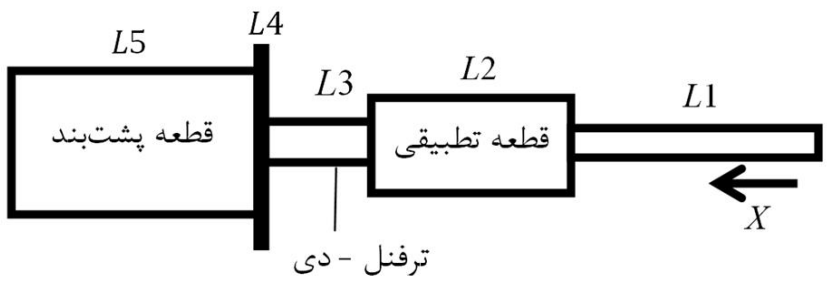
با تقسیم ترانسدیوسر به پنج قسمت با سطح مقطع ثابت مطابق شکل 3، می‌توان رابطه (1) را به صورت رابطه (2) حاکم بر هر یک از قسمت‌های مذکور، بازنویسی کرد.

$$\frac{\mathrm{d}^2u}{\mathrm{d}x^2}+\frac{\omega^2}{C^2}\cdot u=0 \qquad (2)$$

جواب کلی رابطه(2) در هر قسمت ترانسدیوسر را می‌توان به صورت رابطه(3) بیان کرد.

$$u=k_i\cos\left(\frac{\omega}{C}x\right)+k_j\sin\left(\frac{\omega}{C}x\right) \qquad (3)$$

در رابطه (3)، k_i و k_j ثابت‌های معادله هستند که با توجه به شرایط مرزی به



شکل 3 قسمت‌های اصلی ترانسدیوسر

دست می‌آیند. شرایط مرزی مساله فوق، برابری نیرو و جابجایی در فصل مشترک پنج قسمت ذکر شده و نیز به سبب کارکرد ترانسدیوسر در حالت بدون بار، تنش در ابتدا و انتهای ترانسدیوسر معادل صفر است. این شرایط مرزی را برای قسمت اول قطعه تطبیقی، می‌توان به صورت روابط (4) تا (6) بیان کرد.

$$\frac{\partial u_1}{\partial x}|_{x=0}=0 \qquad (4)$$

$$u_1(L_1)=u_2(L_1) \qquad (5)$$

$$E_1A_1\frac{\partial u_1}{\partial x}|_{x=L_1}=E_1A_2\frac{\partial u_2}{\partial x}|_{x=L_1} \qquad (6)$$

با اعمال شرایط مرزی، می‌توان حل معادله در پنج قسمت ترانسدیوسر را به شکل رابطه (7) تبدیل کرد.

$$\bar{A}\cdot\bar{C}=0 \qquad (7)$$

در رابطه (7)، $\bar{C}$ ماتریس سطری ثوابت بوده که درایه‌های آن از k_1 تا k_{10} است. ماتریس ضرایب به صورت رابطه (8) ارائه شده است.

$$\bar{A}=\begin{bmatrix}0&a_1&0&0&0&0&0&0&0&0\\b_1&b_2&b_3&b_4&0&0&0&0&0&0\\c_1&c_2&c_3&c_4&0&0&0&0&0&0\\0&0&d_1&d_2&d_3&d_4&0&0&0&0\\0&0&e_1&e_2&e_3&e_4&0&0&0&0\\0&0&0&0&f_1&f_2&f_3&f_4&0&0\\0&0&0&0&g_1&g_2&g_3&g_4&0&0\\0&0&0&0&0&0&h_1&h_2&h_3&h_4\\0&0&0&0&0&0&i_1&i_2&i_3&i_4\\0&0&0&0&0&0&0&0&j_1&j_2\end{bmatrix}$$

$$a_1=\frac{\omega}{C_1},b_1=\cos\left(\frac{\omega L_1}{C_1}\right),\ b_2=\sin\left(\frac{\omega L_1}{C_1}\right),$$

$$b_3=-\cos\left(\frac{\omega L_1}{C_2}\right),\ b_4=-\sin\left(\frac{\omega L_1}{C_2}\right),\ c_1=-A_1E_1a_1b_2$$

$$c_2=-A_1E_1a_1b_1,c_3=-\frac{A_2E_2a_1b_4}{C_1C_2},c_4=\frac{A_2E_2a_1b_3}{C_1C_2}$$

$$c_2=-A_1E_1a_1b_1,c_3=-\frac{A_2E_2a_1b_4}{C_1C_2},c_4=\frac{A_2E_2a_1b_3}{C_1C_2}$$

$$d_1=\cos\left(\frac{\omega L_2}{C_2}\right),d_2=\sin\left(\frac{\omega L_2}{C_2}\right),\ d_3=-\cos\left(\frac{\omega L_2}{C_3}\right)$$

$$d_4=-\sin\left(\frac{\omega L_2}{C_3}\right),\ e_1=-\frac{A_2E_2a_1d_2}{C_1C_2},e_2=\frac{A_2E_2a_1d_1}{C_1C_2}$$

$$e_3=-\frac{A_3E_3a_1d_4}{C_1C_3},e_4=\frac{A_3E_3a_1d_3}{C_1C_3},f_1=\cos\left(\frac{\omega L_3}{C_3}\right)$$

$$f_2=\sin\left(\frac{\omega L_3}{C_3}\right),\ f_3=-\cos\left(\frac{\omega L_3}{C_4}\right),f_4=-\sin\left(\frac{\omega L_3}{C_4}\right)$$

$$g_1=-\frac{A_3E_3a_1f_2}{C_1C_3},g_2=\frac{A_3E_3a_1f_1}{C_1C_3},g_3=-\frac{A_4E_4a_1f_4}{C_1C_4}$$

$$g_4=\frac{A_4E_4a_1f_3}{C_1C_4},h_1=\cos\left(\frac{\omega L_4}{C_4}\right),\ h_2=\sin\left(\frac{\omega L_4}{C_4}\right)$$

$$h_3=-\cos\left(\frac{\omega L_4}{C_5}\right),h_4-\sin\left(\frac{\omega L_4}{C_5}\right)$$

$$i_1=-\frac{A_4E_4a_1h_2}{C_1C_4},i_2=\frac{A_4E_4a_1h_1}{C_1C_4},i_3=-\frac{A_5E_5a_1h_4}{C_1C_5}$$

$$i_4=\frac{A_5E_5a_1h_3}{C_1C_5},j_1=\frac{a_1\sin\left(\frac{\omega L_5}{C_5}\right)}{C_1C_5},j_2=\frac{a_1\cos\left(\frac{\omega L_5}{C_5}\right)}{C_1C_5} \qquad (8)$$

برای وجود جواب معادله (7)، ماتریس ضرایب باید در رابطه (9) صدق کند. از رابطه (9)، معادله‌ای به دست می‌آید که جواب آن فرکانس‌های طبیعی جهت تمام شکل مدهای طولی ترانسدیوسر است. در واقع به دست‌آوردن فرکانس طبیعی مدهای طولی ترانسدیوسر، حل یک مسأله مقدار ویژه است که در این مقاله، توسط روش‌های عددی انجام گرفته است.

$$|\bar{A}|=0 \qquad (9)$$

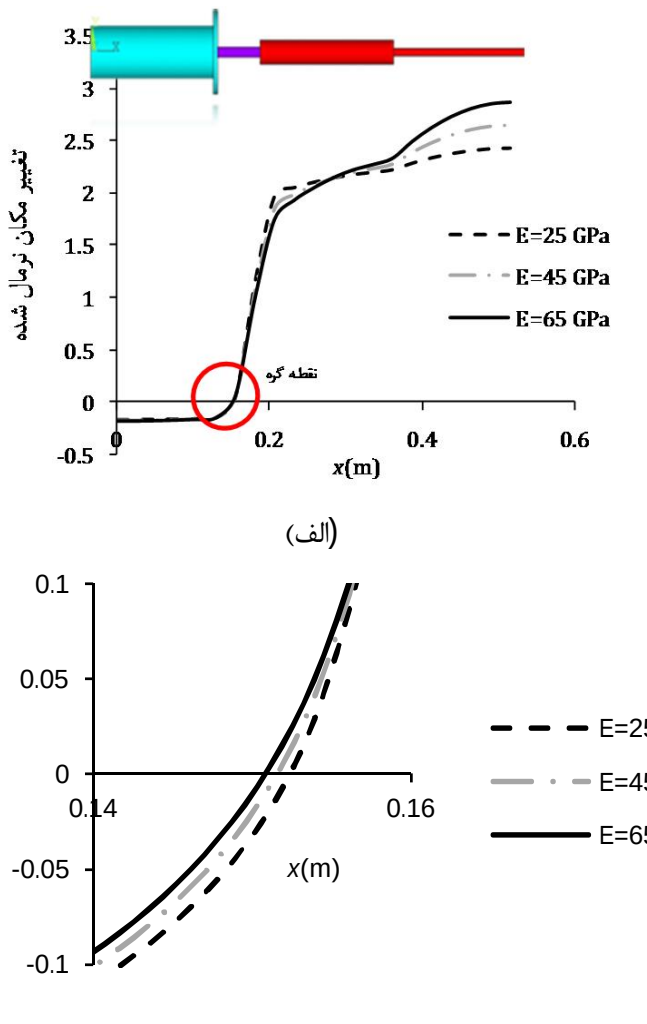
با حل معادله ماتریسی (7) ماتریس ضرایب به صورت نرمال شده نسبت به یکی از ضرایب به دست می‌آید. با اعمال ضرایب و فرکانس طبیعی به رابطه

ارتعاش مکانی هر قسمت ترانسدیوسر، که در رابطه 3 ارائه شده است، شکل مد ترانسدیوسر حاصل می‌شود.

برای شبیه‌سازی المان محدود از نرم‌افزار انسیس12 استفاده شده است. المان مورد استفاده سالید95[1] بوده که یک المان بیست گرهی است و نسبت به المان جایگزین برای انجام این کار مثل سالید 45 دقت مناسبی دارد [16]. با استفاده از شبیه‌سازی المان محدود فرکانس‌های طبیعی و شکل مدهای طولی اول و دوم ترانسدیوسر به دست آمده است.

4- نتایج و بحث

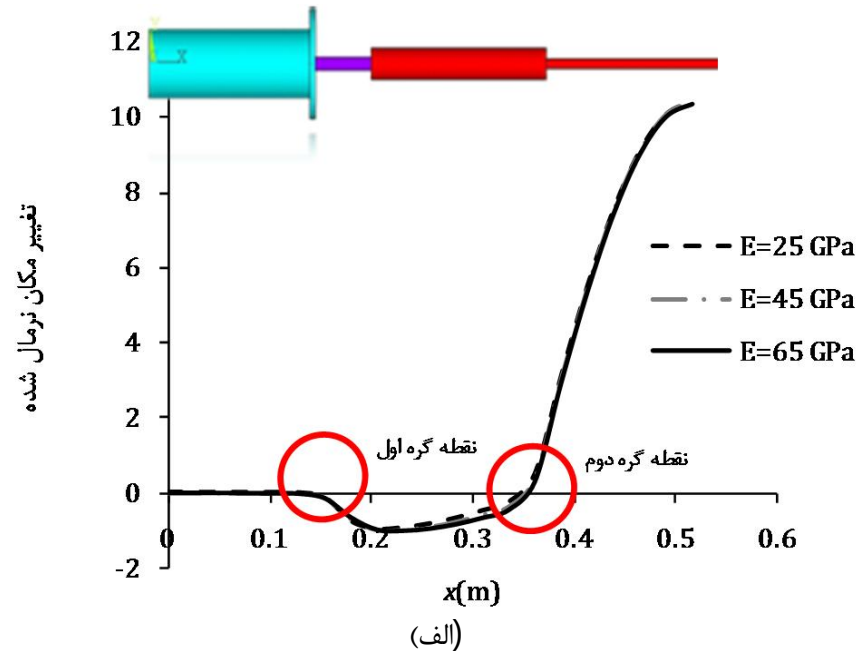
با استفاده از روش ارائه شده در قسمت 3، اثر تغییر مدول یانگ بر روی شکل مد و فرکانس‌های طبیعی ترانسدیوسر در مدهای اول و دوم مطالعه شده است. شکل‌های 4 و 5 اثر تغییر مدول یانگ بر روی شکل مد اول و دوم ترانسدیوسر را به ترتیب نشان می‌دهد. نتایج این شکل‌ها با استفاده از شبیه‌سازی المان محدود به دست آمده‌اند. همان طور که ملاحظه می‌شود می‌توان بیان کرد که شکل مد تاثیر زیادی از تغییر مدول یانگ ترفنل-دی در ترانسدیوسرها ندارد. در شکل‌های 4 و 5 به سبب اهمیت نقطه گره در اتصال ترانسدیوسرها به ماشین‌آلات و نیز الحاق تجهیزات جانبی به ترانسدیوسر، تغییر نقطه گره با جزییات بیشتری نشان داده شده است. تغییر زیاد در نقطه گره باعث اختلال در عملکرد ترانسدیوسر می‌شود. بدین سبب که به غیر از قطعات اصلی، قطعات دیگری بر روی رفتار ارتعاشی ترانسدیوسر تأثیر می‌گذارند. از شکل‌ها مشخص است که نقطه گره اول تغییر مکان کمتری نسبت به نقطه گره دوم دارد. همچنین از شکل‌های 4 و 5 دیده می‌شود که بیشترین دامنه ارتعاشی نیز با تغییر مدول یانگ هسته تغییر می‌کند. برای ترانسدیوسر موجود، بیشترین تغییر در شکل مد اول، 15/2 درصد و در شکل مد دوم 0/6 درصد است.



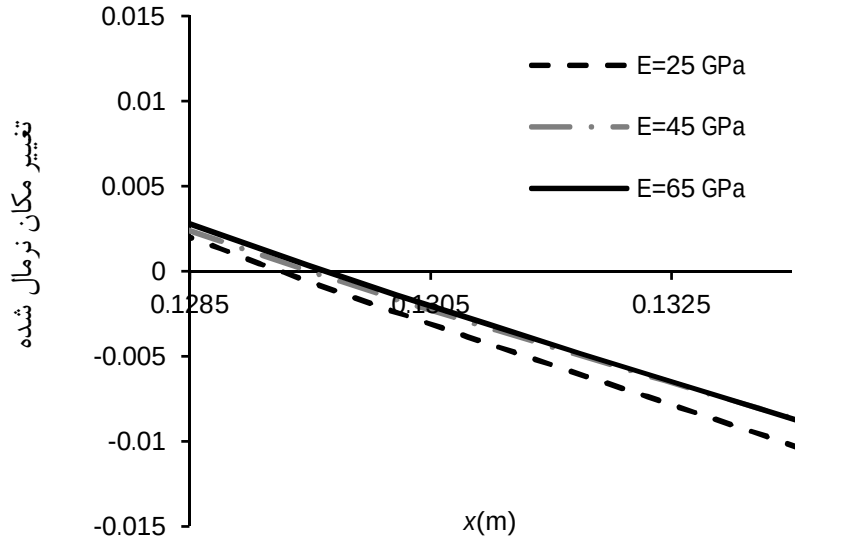
(الف)

(ب)

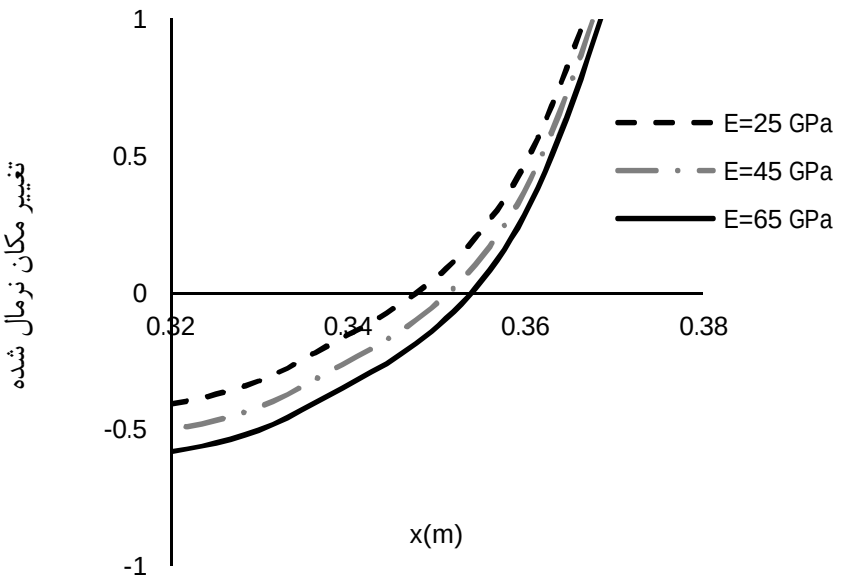
شکل 4 الف) تغییرات شکل مد اول و ب) نقطه گره ترانسدیوسر با تغییر مدول یانگ (با استفاده از شبیه‌سازی المان محدود)



(الف)



(ب)

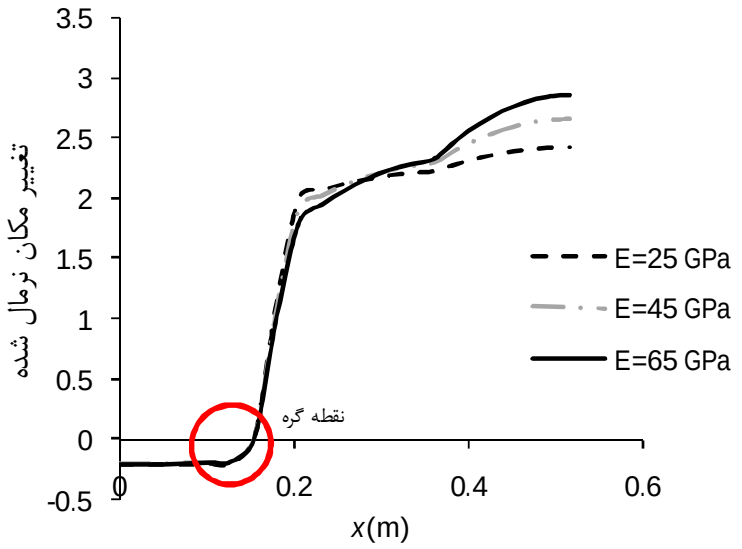


(ج)

شکل 5 الف) تغییرات شکل مد دوم ب) نقطه گره اول و ج) نقطه گره دوم ترانسدیوسر با تغییر مدول یانگ (با استفاده از شبیه‌سازی المان محدود)

با استفاده از روابط تحلیلی ارائه شده در بخش3، می‌توان اثر تغییر مدول یانگ بر شکل مد را به صورت تحلیلی بررسی کرد. شکل‌های 6 و 7 نتایج این بررسی را نشان می‌دهد. شکل مدهای به دست آمده از حل تحلیلی و المان محدود تطابق قابل قبولی دارند. در مد اول، معادله تحلیلی تغییر کمتری را برای نقطه گره نشان می‌دهد. اما تغییر مکان نقاط گره در مورد شکل مد دوم بر اساس معادله تحلیلی، مقداری بیشتر از تخمین المان محدود است.

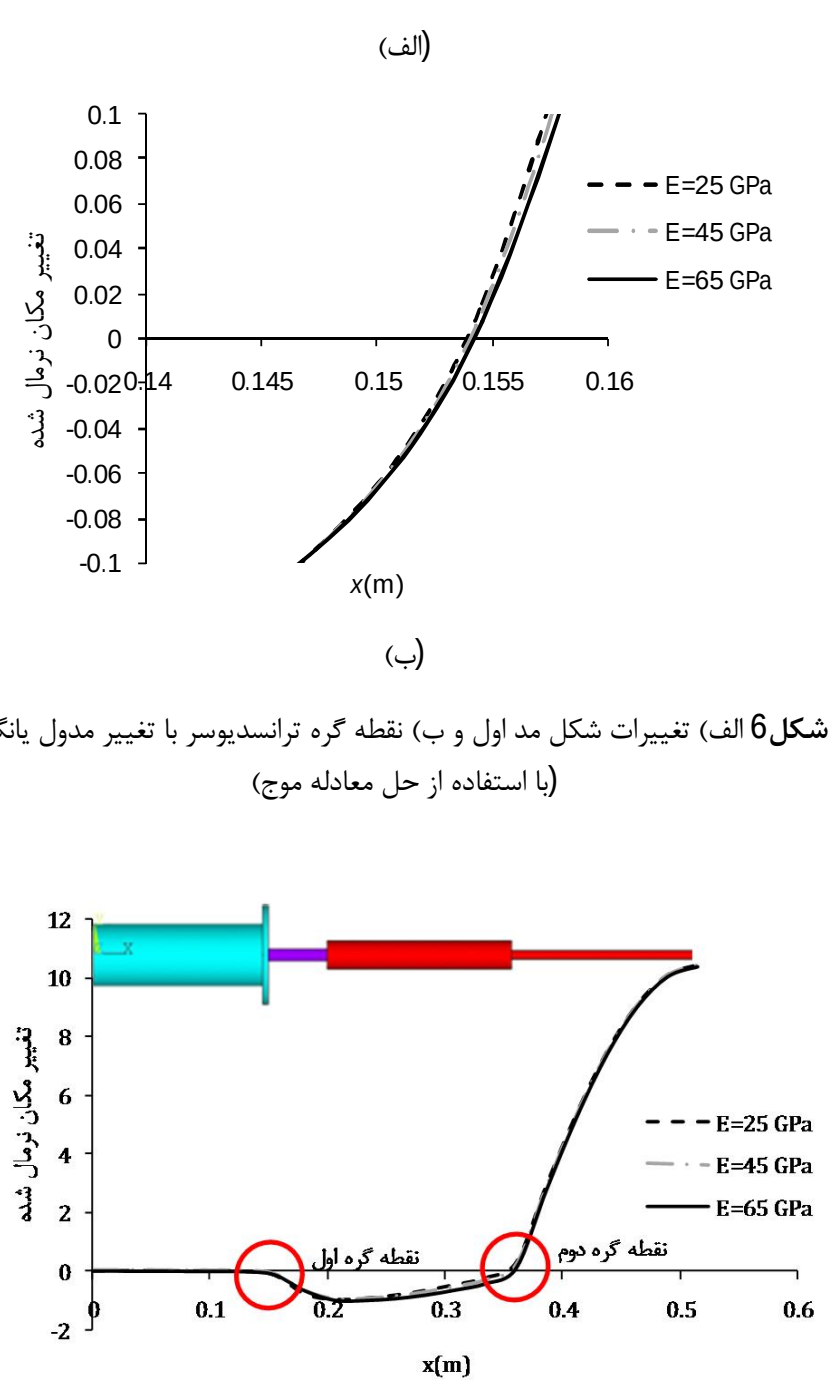
1- Solid95



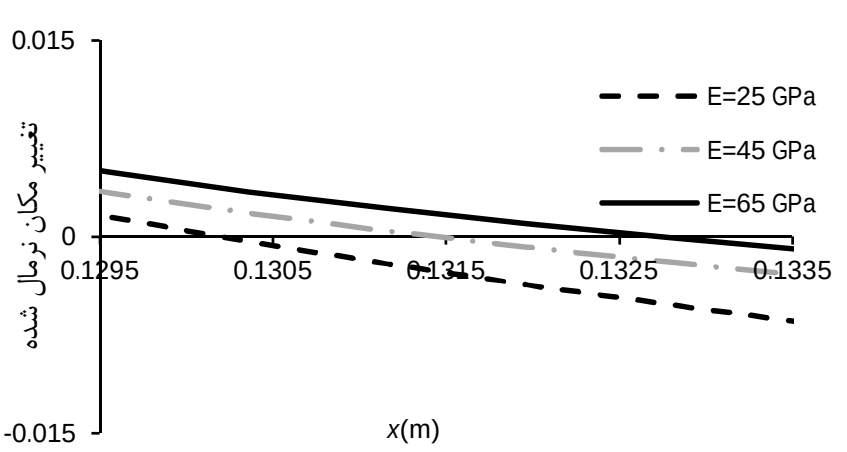
(الف)

(ب)

شکل 6 الف) تغییرات شکل مد اول و ب) نقطه گره ترانسدیوسر با تغییر مدول یانگ (با استفاده از حل معادله موج)

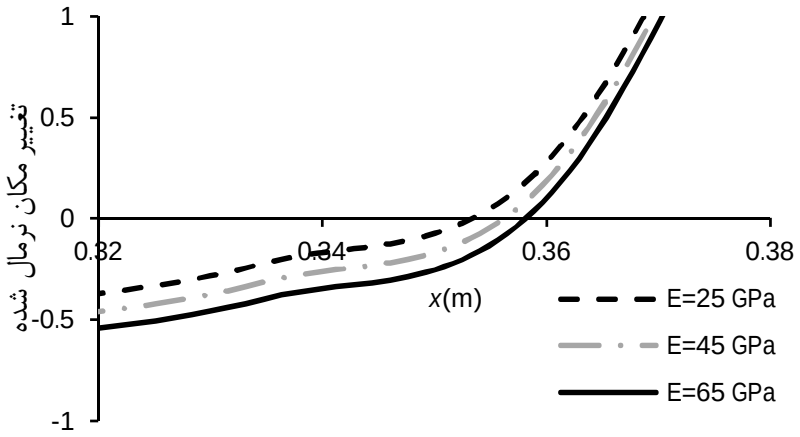


(الف)



(ب)

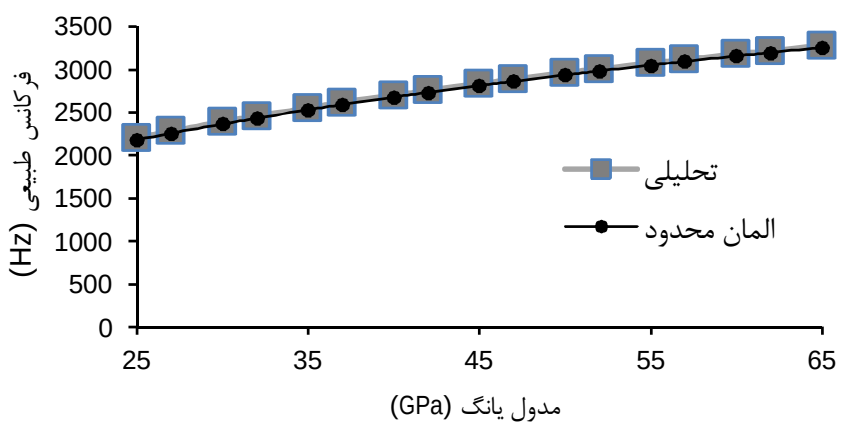
شکل 7 الف) تغییرات شکل مد دوم ب) نقطه گره اول و ج) نقطه گره دوم ترانسدیوسر با تغییر مدول یانگ (با استفاده از حل معادله موج)



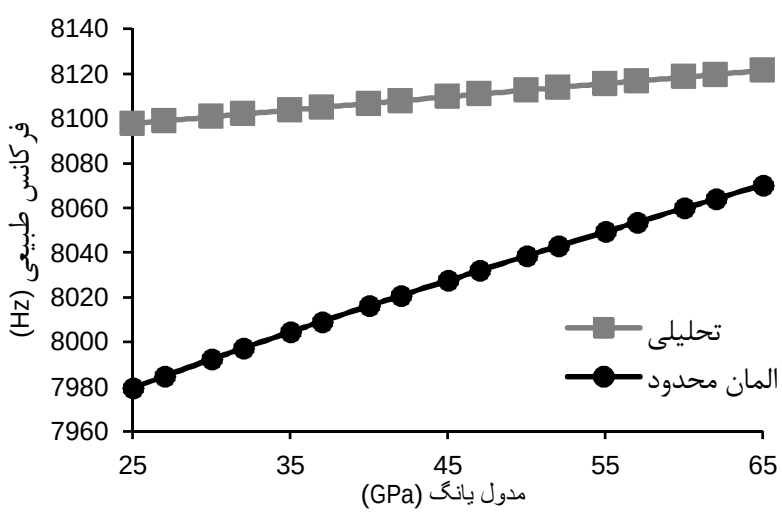
(ج)

شکل‌های 8 و 9 تغییرات فرکانس رزونانس مدهای اول و دوم طولی ترانسدیوسر را بر حسب مدول یانگ نشان می‌دهد. در هر دوی این نمودارها، پاسخ ناشی از حل تحلیلی و نیز جواب المان محدود نشان داده شده است. همان‌طور که قابل مشاهده است، دو جواب نزدیکی قابل قبولی را نشان می‌دهد، به گونه‌ای که بیشترین اختلاف پاسخ‌ها برای مد اول 24/4 هرتز و برای مد دوم 118/3 هرتز است. از شکل‌های 8 و 9 قابل مشاهده است که اثر تغییر مدول یانگ بر روی فرکانس طبیعی مد اول بسیار چشمگیرتر از مد دوم است. لذا در صورت طراحی ترانسدیوسر در مد اول، تغییر شرایط کاری به صورت گسترده‌تر فرکانس رزونانس را جابجا می‌کند. تغییر شرایط کاری می‌تواند ناشی از تغییر میدان بایاس، تنظیم غیر دقیق پیش‌بار و یا گرم‌شدن ترفنل-دی باشد.

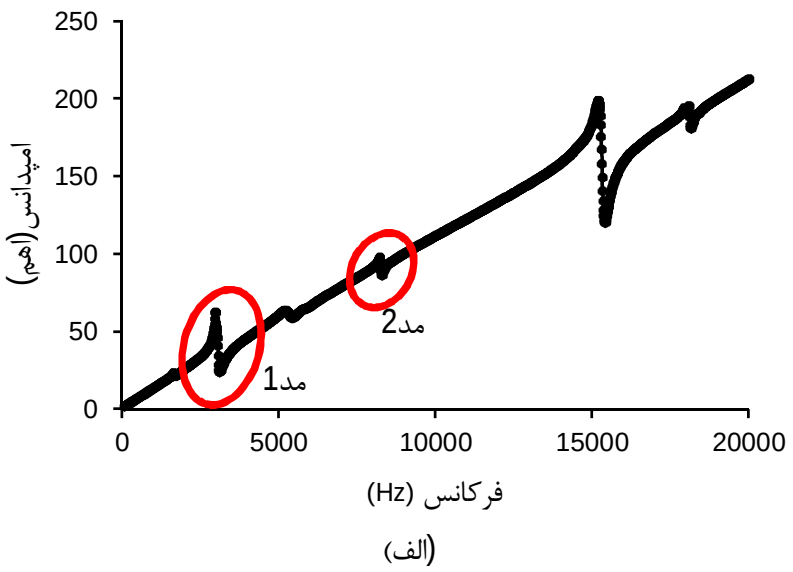
شکل 10 منحنی امپدانس و فاز ترانسدیوسر ، نشان داده شده در شکل 1 ، را نشان می‌دهد. با توجه به شکل، فرکانس رزونانس مد اول 3030 و مد دوم 8252 هرتز می‌باشد. این مقادیر انطباق مناسبی را با مقادیر به دست آمده توسط حل تحلیلی و المان محدود نشان می‌دهد.



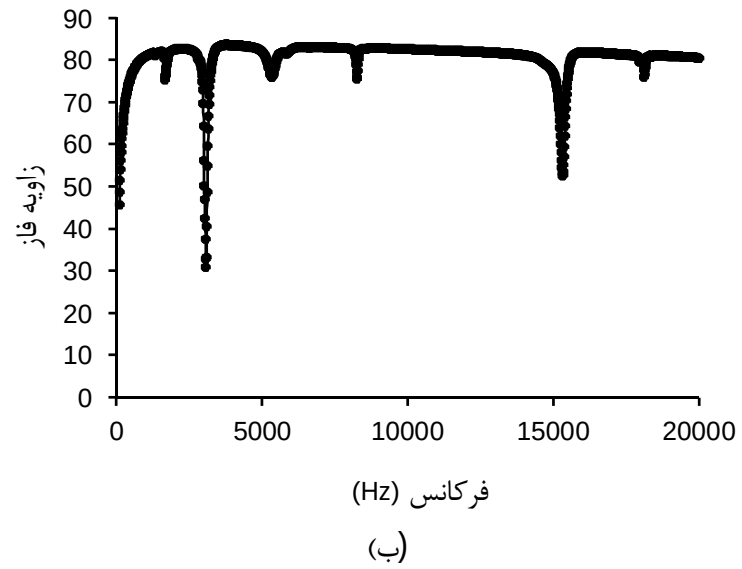
شکل 8 تغییرات فرکانس طبیعی مد اول با تغییر مدول یانگ



شکل 9 تغییرات فرکانس طبیعی مد دوم ترانسدیوسر با تغییر مدول یانگ



(الف)



(ب)

شکل 10 منحنی الف) دامنه و ب) فاز امپدانس ترانسدیوسر

5-نتیجه‌گیری

در این مقاله اثر تغییر مدول یانگ بر رفتار ترانسدیوسرهای طولی رزونانسی ترفنل-دی شامل فرکانس رزونانس و شکل مد بررسی شد. بر اساس آن، ترانسدیوسر رزونانسی طراحی و ساخته شد. طراحی ترانسدیوسر به گونه‌ای انجام گرفت که نقاط گره ارتعاشی در محل اتصال مکانیزم‌های پیش‌بار واقع شوند. سپس تغییر مدول یانگ بر روی این ترانسدیوسر بررسی شد. جهت نیل به این اهداف معادله موج روی هندسه ترانسدیوسر حل شد که نتیجه آن به دست آوردن فرکانس‌های طبیعی و شکل مد ترانسدیوسر در مدول یانگ‌های مختلف بود. ضمنا فرکانس طبیعی و شکل مد برای مدهای اول و دوم با استفاده از شبیه سازی المان محدود (توسط نرم‌افزار انسیس 12) به دست آمد. نتایج تحلیلی و المان محدود در یک مدول یانگ با نتایج تجربی صحت سنجی شده که تطابق مناسبی را نشان داد. با تغییر مدول یانگ ترفنل-دی از 25 تا 65 گیگاپاسکال که بیشترین تغییر برای محدوده کاری مورد استفاده در هسته ترانسدیوسر موجود می‌باشد، فرکانس مد اول حدود 1000 هرتز تغییر می‌کند، ولی تغییر فرکانس طبیعی مد دوم کمتر از 100 هرتز است. نتایج این مطالعه روشن می‌کند که از نظر فرکانس طبیعی اثر تغییر مدول یانگ بر مد اول ارتعاشی بسیار چشمگیرتر از مد دوم است. در ترانسدیوسرهایی که در مد اول طراحی می‌شوند، ملاحظات در طراحی باید به گونه‌ای اعمال شود که تأثیر عوامل تغییر دهنده مدول یانگ به حداقل برسد. با توجه به این موضوع طراحی ترانسدیوسر در مد دوم مزیت پیدا می‌کند. در ضمن شکل مد از لحاظ مکان گره تغییر قابل ملاحظه‌ای با تغییر مدول یانگ نمی‌کند. در ترانسدیوسر مورد مطالعه این تغییرات کمتر از دو درصد طول ترانسدیوسر به دست آمد. ولی ماکزیمم ارتعاشات در شکل مد اول تغییر قابل ملاحظه‌ای در حدود پانزده درصد در ترانسدیوسر مورد مطالعه با تغییرات مدول یانگ دارد. این مطالعه از این نظر حائز اهمیت است که در طول عملکرد این نوع ترانسدیوسرها و نیز هنگام مونتاژ آن‌ها بر اثر تغییر دما، پیش‌بار ، میدان مغناطیسی بایاس تنظیمی یا ترکیبی از این عوامل، مدول یانگ ترفنل-دی می‌تواند تغییر قابل ملاحظه‌ای داشته باشد. به همین دلیل طراح لازم است اثرهای ناشی از این تغییر را بداند تا در صورت لزوم در طراحی لحاظ کند. همچنین در این ترانسدیوسرها وسایل اضافی برای اعمال پیش‌بار و میدان بایاس به قطعات اصلی اضافه می‌شوند می‌شوند که این وسایل ناچار باید به گره ارتعاشی متصل شوند. لذا تغییر نقاط گره در این ترانسدیوسرها اهمیت قابل توجهی پیدا می‌کند.

6-فهرست علایم

A مساحت (m^2)

C سرعت صوت (ms^{-1})

E مدول یانگ (GPa)

u جابجایی طولی تابع مکان

علایم یونانی

ω فرکانس دایروی (Hz)

7-مراجع

[1] K. Khaja Mohaideen, P.A. Joy, High Magnetostriction Coefficient of Mn Substituted Cobalt Ferrite Sintered from Nanocrystalline Powders and after Magnetic Field Annealing, *Curr.Appl.Physc,* Vol. 13, pp. 1697-1701, 2013.

[2] M.Sheykholeslami, Y.Hojjat, , S.Cinquemani , M.Ghodsi, Design and simulation of multi-resonance sonic transducer using Terfenol-D, *SPIE 2015, Proceedings on Smart Structures and Materials,* 94353H-1-94353H-10.

[3] F.Claeyssen, N.Lhermet, Maillard T, Magnetostrictive Actuators Compared to Piezoelectric Actuators, *ASSET2002*.

[4] Richard Allen Kellog, The Delta E Effect in Terfenol-D and its Application in Mechanical Resonator*, M.S thesis, Iowa State University,* Iowa, 2003.

[5] Liang Yerui, Zheng Xiaogeng, Experimental research on magneto-thermo-mechanical characteristic of Terfenol-D, *Acta Mechanica Solida Sinica,* Vol. 20, 2007.

[6] Yang Yong Li Lin, Dynamic model considering the ΔE effect for giant magnetostictive actuator, *IEEE International Conference on Control and Automation* 2009.

[7] Rick Kellog, Alison Flatau, Wide band tunable mechanical resonator employing the ΔE effect of Terfenol-D, *Journal of Inteligent system and Structures*,pp.355-368,2004.

[8] Marcelo J. Dapino, Ralph C. Smith, Alison B. Flatau. Model for the delta-E effect in magneto, 1995strictive transducers. Pro, 1995c SPIE *06/2000*.

[9] A. Grunwald, A.G. Olabi, Design of magnetostictive(MS) actuator, Sensors and Actuators, pp.161-175, 2008.

[10] F.T.Calkin, M.J.Dapino, and A.B. Flatau*,* Effect of Prestress on the Dynamic Performance of a Terfenol-D Transducer, *SPIE 1997, Proceedings on Smart Structures and Materials, 3041-23*.

[11] Xu Gao, Yongmao Pei, Daining Fang. Magnetomechanical Behaviors of Giant Magnetostictive Materials, *Acta Mechanica Solida Sinica,* Vol. 21; pp. 15-19. 2008.

[12] Yerui.Liang, Xiaogeng. *Zheng,* Experimental research on magneto-thermo-mechanical characteristic of Terfenol-D, *Acta Mechanica Solida Sinica,* Vol. 20, 2007.

[13] EngdahlG,editor.Handbook of Giant Magnetostrictive Material,*Royal Institute of Technology,* Stockholm Sweden.2000.

[14] Rick Kellog, Alison Flatau, Experimental investigation of Terfenol-D's elastic modulus*, Journal of Inteligent Material and Structures,* pp. 583-595, 2007.

[15] M.Sheykholeslami, Y.Hojjat, , S.Cinquemani , M.Ghodsi, Design and simulation of multi-resonance sonic transducer using Terfenol-D, *SPIE 2015, Proceedings on Smart Structures and Materials,* 94353G-1-94353G-8.

[16] Release 12.0, Documentation for ANSYS, ANSYS 12.1.