

بررسی تغییر دمای سیال بر عملکرد مبدل آکوستیکی توان بالا

محمدهادی سخنور^{۱*}، رضا مردانی^۲

Sokhanvar_hadi@yahoo.com

Mardani_r@mut.ac.ir

^{۱*} نویسنده مسئول، پژوهشگر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شیراز

^۲ استادیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شیراز

تاریخ پذیرش: ۹۷/۴/۶

تاریخ دریافت: ۹۶/۲/۱۰

چکیده

در این مقاله اثر دما بر امیدانس الکتریکی، فرکانس رزونانس و آنتی رزونانس یک مبدل پیزوالکتریک آکوستیکی پرتوان بررسی شده است. این اثرات در طراحی مدارهای الکترونیکی متصل به پروژکتور تانپیلز پرتوان که در تمیز نمودن لوله‌های نفتی با استفاده از امواج آکوستیکی کاربرد دارد، مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. به این منظور یک لوله مخصوص نگهداری روغن، مبدل، تجهیزات گرمایشی و کنترل، طراحی و ساخته شد. دو دماسنج حساس، دمای روغن و مبدل را به صورت دقیقی اندازه گیری می‌کند. رفتار امیدانسی در ناحیه دمایی 20°C - 120°C و در بازه فرکانسی ۱۸kHz - ۲۵kHz انجام شد. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش دما، فرکانس رزونانس ۴۸۰Hz و آنتی رزونانس ۴۰۰Hz کاهش یافته است. تغییرات مقدار امیدانس افزایشی ۴۳/۴۳ اهمی در فرکانس رزونانس و کاهش ۹۶۵/۹۶۵ اهمی در فرکانس آنتی رزونانس را نشان می‌دهد. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که امیدانس، فرکانس رزونانس و آنتی رزونانس به شدت به دما وابسته هستند. این موضوع می‌تواند برای تحقیقات آینده در خصوص افزایش بازده آکوستیکی مبدل‌های پرتوان در سیستم‌های تمیزکننده به خصوص در لوله‌های نفتی مورد توجه قرار گیرد.

واژگان کلیدی: مبدل آکوستیکی، فرکانس رزونانس، آنتی رزونانس، امیدانس الکتریکی و اثرات دما.

۱. مقدمه

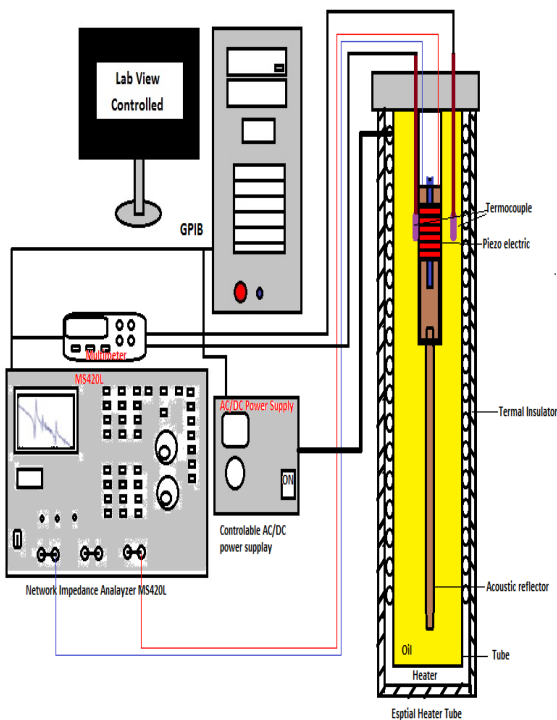
مبدل‌های پیزوالکتریک در سیستم‌های تمیزکننده، جوشکاری، حس گرهای آکوستیکی و شتاب برای استفاده در صنعت و پزشکی کاربردهای وسیعی دارند [۱]. این مبدل‌ها به روش‌های مختلفی از جمله جرم‌گذاری (تانپیلز)، به صورت تک‌المانی یا آرایه‌ای مورد استفاده قرار

می‌گیرند [۲]. در سال‌های اخیر استفاده از این مبدل‌های پرتوان برای جوشکاری و تمیزکاری آلتراسونیک در صنعت رشد چشمگیری داشته است. برای نمونه استفاده از این مبدل‌ها در حمام‌های آلتراسونیک آزمایشگاهی یا صنعتی برای شستشوی بردهای الکترونیکی، قطعات حساس یا قطعات بزرگ صنعتی به‌وفور مشاهده می‌شود [۱].

مبدل در بازه دمایی مختلف انجام یا منتشر نشده است؛ بنابراین در این مقاله رفتار امپدانس و آکوستیکی یک مبدل تانپیلز در سیالی مشابه نفت خام اندازه گیری و تغییرات فرکانسی و امپدانس آن با جزئیات کامل و دلایل فیزیکی و علمی مورد بررسی قرار گرفته است. بازه دمایی انتخاب شده 20°C – 120°C است که از دمای کوری این مبدل فاصله دارد. همچنین بازه فرکانسی در نظر گرفته شده 18 – 25kHz است که شامل فرکانس رزونانس مبدل بوده و بیشترین توان ارسالی در این بازه فرکانسی ارسال می شود.

۲. چیدمان آزمایش ها و اندازه گیری

به منظور بررسی تغییر امپدانس الکتریکی مبدل با دما از چیدمانی که شماتیک آن در شکل (۱) نشان داده شده، استفاده می شود.



شکل ۱. چیدمان مورد استفاده برای اندازه گیری بررسی وابستگی امپدانس الکتریکی مبدل آکوستیکی به دما

طبق شکل، مبدل تانپیلز توان بالا، درون یک لوله مخصوص طراحی شده به این منظور، نصب می شود. این لوله توانایی تولید دما در بازه دمایی 20°C – 120°C را دارد. لوله حاوی سیال است و گرما از راه المنت های الکتریکی و بدنه لوله باعث گرم شدن سیال درون آن می شود. ابعاد لوله و سیال درون آن

اگر مواد پیزوالکتریک تا یک دمای آستانه گرم شوند، دامنه پالس های کریستالی قوی شده و باعث از بین رفتن قطبیدگی آنها شده و خاصیت پیزوالکتریکی خود را از دست می دهند. این دمای بحرانی را دمای کوری می گویند [۳]. به دلیل وجود این دمای بحرانی، بسته به نوع پیزوسرامیک، بازه دمایی قابل استفاده آنها محدود بوده و اغلب در دماهای بالاتر، خواص خود را از دست داده و قابل استفاده نیستند [۴].

رفتار مواد پیزوالکتریک در شرایط دمایی مختلفی به وسیله سیون بای کیم و دیگران بررسی شده است. آنها نشان دادند که با افزایش دما، توان آکوستیکی کاهش می یابد [۵]. زی. بات و دیگران به بررسی اثر دما و جرم گذاری روی ولتاژ خروجی مبدل پرداخته اند. خروجی ولتاژ با افزایش بار و کاهش دما افزایش می یابد [۶]. یورگن ایلگ و دیگران به بررسی امکان استفاده از تجهیزات پیزوالکتریک در اندازه گیری دما پرداخته اند. از این روش علاوه بر آشکارسازی دما، در مانیتورینگ و کاربردهای پزشکی نیز استفاده می شود [۷]. مبدل های پیزوالکتریک اگرچه در دماهای پایین تر می توانند عملکرد قابل قبولی داشته باشند، اما در این دماها پارامترهای مختلف آنها مانند فرکانس رزونانس، آنتی رزونانس و امپدانس تغییر می کنند؛ بنابراین باید بازه دمایی عملکرد خاص آنها بررسی شده و بر آن اساس طراحی های مورد نیاز انجام شود. یکی از کاربردهای جالب و نسبتاً جدید مبدل های تانپیلز و پرتوان، استفاده آنها در سیستم های آلتراسونیک تمیز کننده لوله های نفتی است. در این کاربرد مبدل با تجهیزات خاصی در داخل لوله قرار گرفته و با تولید امواج صوتی پرتوان علاوه بر تأثیرات مستقیم سبب ایجاد حباب می شوند. در اثر ترکیدن حباب های ایجاد شده و آزاد شدن انرژی آنها، رسوبات تشکیل شده روی بدنه داخلی لوله جدا می شوند. دمای مایعات نفتی در لوله های استخراج در حدود 80°C درجه سانتی گراد است؛ بنابراین دانستن رفتار امپدانس و رزونانس این نوع مبدل ها در این دما برای طراحی و ساخت مدارهای فرستنده و تطبیق، برای بهینه سازی تبدیل توان الکتریکی به آکوستیکی و افزایش بازده الزامی است. طبق مدارک، تاکنون تحقیقی برای این نوع

۳. تحلیل رگرسیون

بر اساس اندازه‌گیری‌های انجام شده نمودار تغییرات امپدانس، فرکانس رزونانس و امپدانس در این فرکانس برحسب دما در شکل‌های (۳) و (۴) نمایش داده شده است. به منظور مقایسه بین تغییرات مقادیر فرکانس رزونانس و آنتی رزونانس در دماهای مختلف، برخی داده‌ها در جدول ۱ به صورت خلاصه ارائه شده‌اند. در این جدول فرکانس رزونانس، آنتی رزونانس، مقادیر امپدانس، فاز مبدل در رزونانس و آنتی رزونانس در بازه دمایی ۲۰-۱۲۰°C گزارش شده است.

جدول ۱. فرکانس رزونانس، آنتی رزونانس، مقادیر امپدانس و فاز مبدل در بازه دمایی ۲۰-۱۲۰°C

T °C	f _r kHz	f _{ar} kHz	Z _{fr} Ω	Z _{far} Ω	φ _r Deg	φ _{ar} Deg
۲۰	۲۱/۲۱	۲۱/۳۲	۱۶۱/۲۵	۲۱۲۵/۷۰	-۱۶/۲	-۳۴/۸
۴۰	۲۱/۱۳	۲۱/۲۴	۱۸۴/۷۱	۲۰۰۰/۰۰	-۳۰/۳	-۳/۷
۶۰	۲۱/۰۸	۲۱/۲۱	۱۸۸/۸۰	۱۵۷۲/۱۷	-۲۷/۵	-۴۰/۶
۸۰	۲۰/۹۶	۲۱/۱۰	۱۹۵/۸۸	۱۶۸۶/۵۵	-۳۰/۶	-۴۹/۱
۱۰۰	۲۰/۸۹	۲۱/۰۲	۲۰۲/۸۰	۱۸۰۳/۰۲	-۳۰/۹	-۳۸/۱
۱۲۰	۲۰/۷۶	۲۰/۹۲	۲۰۴/۶۴	۱۱۶۰/۱۱	-۱۳/۳	-۸۴/۸

بر اساس تحلیل رگرسیون تغییرات فرکانس تشدید برحسب دما طبق معادله‌های زیر به دست می‌آید:

$$f_r(T) = a_1 + a_2(T) + a_3(T^2) \quad (1)$$

که در این رابطه ضرایب ثابت a₁ و a₂، a₃ مطابق با جدول ۲ هستند.

جدول ۲. ضرایب تحلیل رگرسیون f_r(T)

	a ₁	a ₂	a ₃
f _r (T)	21.2688	-0.0025	-1.35714 ⁻⁵

بر همین اساس تحلیل رگرسیون تغییرات با تابع

$$Z_r(T) = a_4 + a_5(T) + a_6(T^2) \quad (2)$$

داده می‌شود که در این رابطه ضرایب ثابت a₄ و a₅، a₆ مطابق با جدول ۳ هستند.

جدول ۳. ضرایب تحلیل رگرسیون Z_r(T)

	a ₄	a ₅	a ₆
Z _r (T)	145.7165	1.00266	-0.00432

نسبت به مبدل بسیار بزرگ بوده و مبدل درون سیال در نواحی میانی لوله قرار می‌گیرد. با دماسنجی که برای اندازه‌گیری دمای مبدل در نزدیکی آن تعبیه شده، دمای مبدل با دقت خوبی خوانده می‌شود. همچنین افزایش جریان المنت حرارتی به آهستگی انجام شده و در بازه‌های حدود ۵ دقیقه برای پایدار شدن دمای سیال جریان ثابت نگه داشته می‌شود.

سیستم گرم‌کننده لوله به یک منبع تغذیه قابل کنترل وصل شده که با رایانه توانایی کنترل دمای روغن را دارد. امپدانس الکتریکی مبدل با دستگاه نتورک امپدانس آنالایزر^۱ در بازه فرکانسی ۱۸kHz-۲۵kHz اندازه‌گیری شده است. دو ترموکوپل برای اندازه‌گیری دمای مبدل و روغن اطراف آن در نزدیکی مبدل نصب شده است. ترموکوپل اول به مبدل وصل شده و دمای واقعی آن را نشان می‌دهد و ترموکوپل دوم دمای روغن اطراف مبدل درون لوله را اندازه‌گیری می‌کند. تمامی تجهیزات آزمایش با استفاده از یک کارت جی.پی.آی.بی^۲ به رایانه وصل شده و کنترل می‌شوند.



شکل ۲. الف) پیزوسرامیک‌ها و جرم بارگذاری، ب) پوسته مبدل و انعکاس‌دهنده آکوستیکی آن و ج) لوله گرم‌کننده

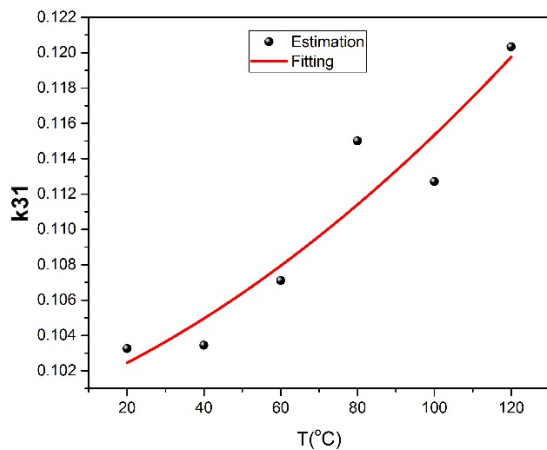
در شکل (۲) مبدل تانپیلز مورد استفاده در این مقاله شامل پیزوسرامیک‌ها و جرم بارگذاری، پوسته مبدل، انعکاس‌دهنده صوتی و لوله خاص گرم‌کننده به کاررفته در اندازه‌گیری‌ها نشان داده شده است.

می دهند که به خوبی بر هم منطبق هستند. تغییرات امپدانس در این بازه دمایی در حدود ۲۸/۱٪ است.

ضریب جفت شدگی پیزوالکتریک بر حسب مقادیر فرکانس های رزونانس و آنتی رزونانس از رابطه زیر به دست می آید [۸]:

$$k_{31} = \frac{\sqrt{f_{ar}^2 - f_r^2}}{f_{ar}} \quad (3)$$

با توجه به مقادیر اندازه گیری شده فرکانس رزونانس در شکل (۳) و آنتی رزونانس در جدول ۱، مقادیر تجربی ضریب جفت شدگی با آنالیز رگرسیون آن ها در شکل (۵) نشان داده شده است.



شکل ۵. تغییرات ضریب جفت شدگی پیزوالکتریک مبدل بر حسب دما

بر اساس تحلیل رگرسیون تغییرات ضریب جفتش بر حسب دما طبق معادله زیر به دست می آید:

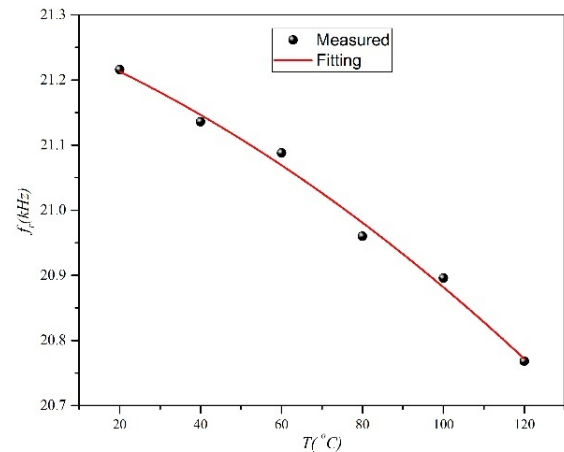
$$K_{31}(T) = a_7 + a_8(T) + a_9(T^2) \quad (4)$$

که در این رابطه ضرایب ثابت a_7 ، a_8 ، a_9 مطابق با جدول ۴ هستند.

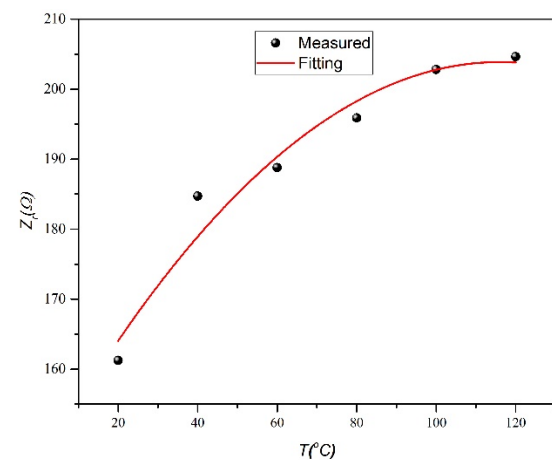
جدول ۴. ضرایب تحلیل رگرسیون $K_{31}(T)$

	a_7	a_8	a_9
$K_{31}(T)$	21.2688	-0.0025	-1.35714 $\times 10^{-5}$

در حالت کلی وابستگی دمایی ثابت دی الکتریک از قانون کوری-وایس پیروی می کند که رابطه زیر به دست می آید [۹]:



شکل ۳. داده های تجربی و نمودار منطبق شده بر آن مربوط به تغییرات فرکانس رزونانس با دما

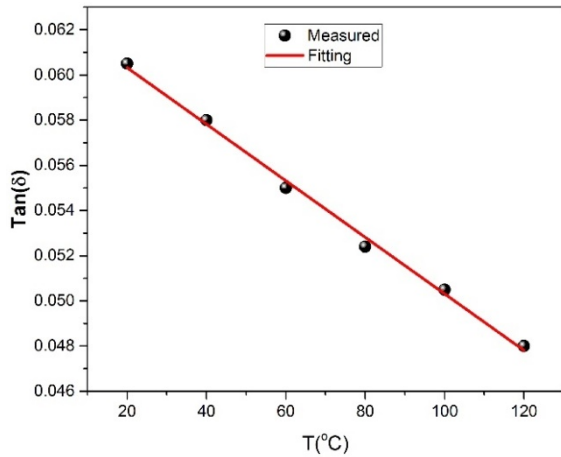


شکل ۴. داده های تجربی و نمودار منطبق شده بر آن مربوط به تغییرات امپدانس در فرکانس رزونانس بر حسب دما

در شکل های (۳) و (۴) نتایج تحلیل رگرسیون (خط پیوسته) مربوط به معادله های (۱) و (۲) و نتایج اندازه گیری تجربی (نقاط توپر) نمایش داده شده اند. همان طور که در شکل (۳) مشاهده می شود با افزایش دما از دمای اتاق ($T=20^\circ\text{C}$) فرکانس رزونانس مبدل از ۲۱/۲۵ kHz، کاهش یافته و در دمای $T=120^\circ\text{C}$ به فرکانس ۲۰/۷۵ kHz می رسد. نتایج همچنین نشان می دهند که تغییرات فرکانس رزونانس در این بازه دمایی در حدود ۲/۳۵٪ است. همان طور که دیده می شود معادله به خوبی نتایج تجربی را پوشش می دهد.

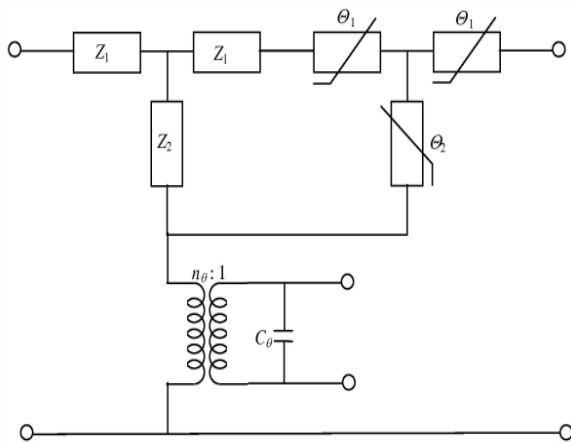
بر اساس نتایج نشان داده شده در شکل (۴)، با افزایش دما امپدانس از ۱۶۰ اهم در دمای اتاق افزایش می یابد و در دمای 120°C به حدود ۲۰۵ اهم می رسد؛ مانند شکل قبلی، خط پیوسته نتایج حاصل از معادله (۲) و نقاط نتایج تجربی را نشان

در این جا نیز مانند سایر مراجع، اتلاف مکانیکی با افزایش دما کاهش یافته است [۴].



شکل ۷. وابستگی دمایی ضریب اتلاف مکانیکی

یکی از روش‌هایی که برای طراحی تجهیزات پیزوالکتریکی و تحلیل آن‌ها استفاده می‌شود، روش مدار معادل است [۱۰]. در اغلب موارد مدار معادل پیزوالکتریک‌ها شامل قسمت وابستگی دمایی محیطی آن‌ها نمی‌شود. این وابستگی دمایی در مطالعات تجربی به صورت مدار معادل نشان داده شده در شکل (۸) در نظر گرفته شده است [۱۱].



شکل ۸. مدار معادل سرامیک‌های پیزوالکتریک به همراه بخش دمایی آن

که المان‌های آن به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$Z_1 = iZ_0 \tan\left(\frac{\beta_0 l}{2}\right), \quad Z_2 = -iZ_0 \csc(\beta_0 l) \quad (۸)$$

$$\begin{cases} T_1 = iZ_0 \tan\left(\frac{\Delta\beta(T)l}{2}\right) \\ T_2 = -iZ_0 \csc(\Delta\beta(T)l) \end{cases} \quad (۹)$$

$$n_T = k_{31}(T)v(T)\sqrt{\rho\varepsilon_{33}^T(T)w} \quad (۱۰)$$

$$C = K \frac{A}{d} = (T - T_c)(\varepsilon_r - 1) \quad (۵)$$

با استفاده از تحلیل رگرسیون تغییرات ثابت دی‌الکتریک در نواحی کمتر از دمای کوری پیزوالکتریک رفتار خطی دارد و رابطه آن به صورت زیر است:

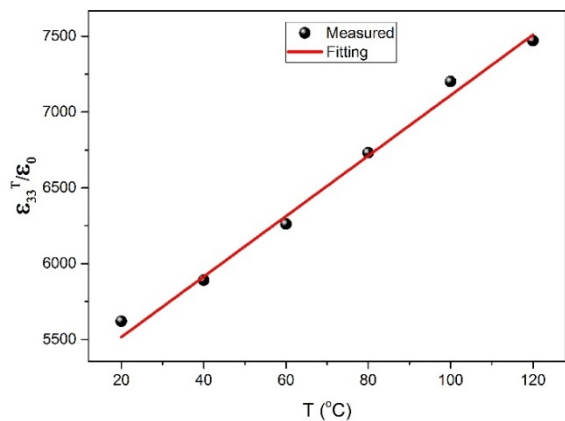
$$\varepsilon_{33}^T(T) / \varepsilon_0 = C_1 + C_2 T \quad (۶)$$

و در آن ضرایب c_1 و c_2 طبق جدول ۵ هستند.

جدول ۵. ضرایب تحلیل رگرسیون $\varepsilon_{33}^T(T) / \varepsilon_0$

	c_1	c_2
$\varepsilon_{33}^T(T) / \varepsilon_0$	5116.57	19.94

این تابع به همراه نتایج تجربی آن در شکل (۶) نشان داده شده‌اند. نتایج نشان می‌دهند که در این تحقیق می‌توان از تخمین خطی برای تغییرات ثابت دی‌الکتریک استفاده نمود.



شکل ۶. وابستگی دمایی ثابت دی‌الکتریک

وابستگی دمایی اتلاف مکانیکی نیز اندازه‌گیری شده و پس از تحلیل و استفاده از روش رگرسیون در شکل (۷) نمایش داده شده‌اند. اتلاف مکانیکی در دمای اتاق در حدود $\tan \delta(T) = 0.044$ است و می‌توان از یک تابع خطی

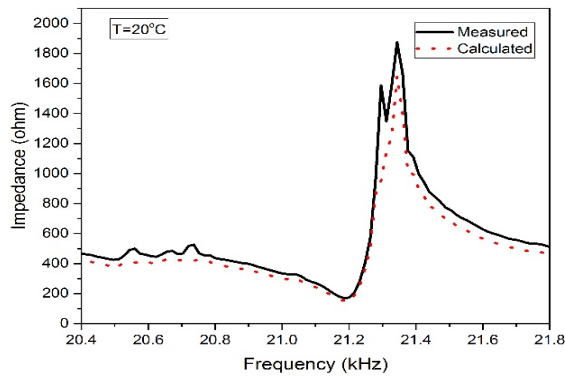
به صورت زیر برای محاسبه آن استفاده نمود:

$$\tan \delta(T) = C_3 + C_4 T \quad (۷)$$

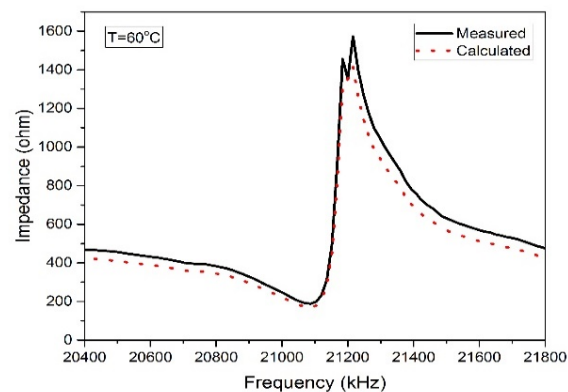
در این رابطه داریم:

جدول ۶- ضرایب تحلیل رگرسیون $\tan \delta(T)$

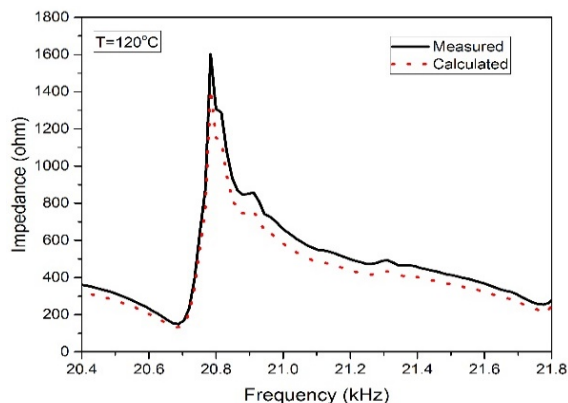
	c_4	c_3
$\tan \delta(T)$	$-1.25 \cdot 10^{-4}$	$6.28 \cdot 10^{-2}$



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱۰. مقایسه نتایج تجربی و نظری امپدانس برحسب فرکانس در دماهای (الف) ۲۰، (ب) ۶۰ و (ج) ۱۲۰ درجه سانتی گراد.

افزایش بازده آکوستیکی اهمیت دارد. اگرچه این تحقیق با یک مبدل تانپیلز پرتوان مورد استفاده در پاک سازی لوله های چاه نفت انجام شده اما نتایج آن، قابل استفاده و تعمیم در سایر مبدل های مورد استفاده در محیط های با دمای بالا نیز هست.

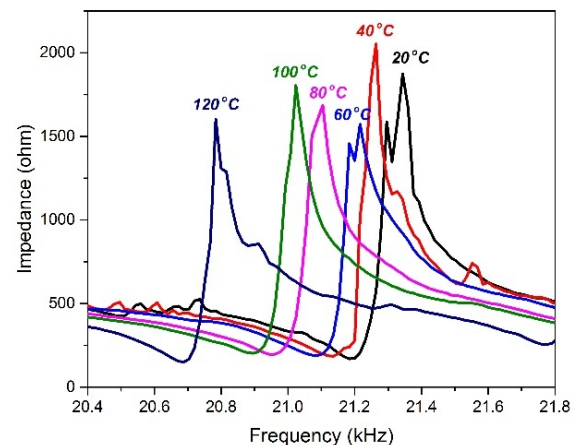
$$C_T = \varepsilon_{33}^T(T) \left(1 - k_{32}^2(T)\right) \frac{S}{t} \quad (11)$$

$$\beta(T) = \beta_0 + \Delta\beta(T) \quad (12)$$

$$\beta_0 = \frac{2\pi f}{v_0 \sqrt{1 + j \tan \delta(T)}} \quad (13)$$

$$\Delta\beta(T) = \left[\frac{1}{lf_r(T) \sqrt{1 + j \tan \delta(T)}} - \frac{2}{v_0 \sqrt{j \tan \delta_0}} \right] \pi f \quad (14)$$

نتایج اندازه گیری امپدانس برحسب فرکانس در دماهای مختلف در شکل (۹) نشان داده شده است. همچنین نتایج محاسبات مدار معادل و اندازه گیری شده در شکل (۱۰) در سه دمای مختلف نشان داده شده است. مشخصات امپدانس اندازه گیری شده و مقادیر تخمین زده شده انطباق خوبی داشته و برخی اختلافات می تواند مربوط به در نظر نگرفتن ضریب اتلاف دی الکتریکی باشد.



شکل ۹. تغییرات منحنی امپدانس برحسب فرکانس در دماهای مختلف

۴. نتیجه گیری

در این تحقیق به بررسی تأثیر دما بر رفتار یک مبدل تانپیلز توان بالا پرداخته شده است. نتایج نشان می دهند که با افزایش دما در بازه دمایی ۲۰-۱۲۰ °C، فرکانس رزونانس و آنتی رزونانس به ترتیب ۴۸۰ Hz و ۴۰۰ Hz کاهش می یابند. همچنین مقدار امپدانس در فرکانس رزونانس حدود ۴۳ اهم افزایش و مقدار امپدانس در فرکانس آنتی رزونانس حدود ۹۶۵ اهم کاهش می یابد. با استفاده از تحلیل رگرسیون و مدار معادل نتایج تجربی با تئوری مقایسه شد. نتایج این تحقیق برای ایجاد تطبیق صحیح بین مدار فرستنده و مبدل به منظور

مراجع

پی‌نوشت

۱. Network Impedance Analyzer (MS420L)
۲. GPIB (General Purpose Interface Bus)

- [1] Baptista FG, Budoya DE, de Almeida VA, Ulson JA. An experimental study on the effect of temperature on piezoelectric sensors for impedance-based structural health monitoring. *Sensors*. 2014 Jan 10; 14(1):1208-27.
- [2] Yao Q, Bjorno L. Broadband Tonpizl underwater acoustic transducers based on multimode optimization. *IEEE transactions on ultrasonic, ferroelectrics, and frequency control*. 1997 Sep; 44(5):1060-6.
- [3] Jordan TL, Ounaies Z. Piezoelectric ceramics characterization. *Institute for computer applications in science and engineering*; 2001 Sep.
- [4] Miclea C, Tanasoiu C, Amarande L. Effect of temperature on the main piezoelectric parameters of a soft PZT ceramic *Romanian Journal of Information Science and Technology*. 2007 Jan 1;10(3):243-50.
- [5] Kim SB, Park JH, Ahn H, Liu D, Kim DJ. Temperature effects on output power of piezoelectric vibration energy harvesters. *Microelectronics Journal*. 2011 Aug 1; 42(8):988-91.
- [6] Butt Z, Pasha RA. Effect of temperature and loading on output voltage of lead zircon ate titan ate (PZT-5A) piezoelectric energy harvester. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016 Aug; 146(1): 012016
- [7] Ilg J, Rupitsch SJ, Lerch R. Impedance-based temperature sensing with piezo ceramic devices. *IEEE Sensors Journal*. 2013 Jun; 13(6):2442-9.
- [۸] خادمی سعید. پی‌زوسرامیک‌ها و مبدل‌های پیزوالکتریک زیر آب. ویرایش ۱. تهران: انتشارات دانشگاه صنعتی مالک اشتر؛ ۱۳۸۴. ص. ۲۱-۲۵.
- [9] Trainer M. Ferroelectrics and the Curie-Weiss law. *European Journal of Physics*. 2000 Sep; 21(5):459.
- [10] Berlincourt DA, Curran DR, Jaffe H. Piezoelectric and piezo magnetic materials and their function in transducers. *Physical Acoustics Principles and Methods*. 1964; 1(Part A):247.
- [11] Lee S, Kim M, Kim J, Yoo S. Equivalent circuit with temperature parameters for piezoelectric sensor under space environment. Paper presented at: 2012 IEEE International Ultrasonics Symposium; 2012 Oct 7; Dresden.