

# تعیین مشخصه‌های عملکردی و پایش سلامت پیزوالکتریک به روش تحلیل

## امپدانسی

راضیه السادات سالاری	وحید فرتاش‌وند	رضوان عابدینی*
کارشناسی ارشد	استادیار	استادیار
مهندسی مکانیک	طراحی صنعتی	مهندسی مکانیک
دانشگاه صنعتی امیرکبیر	دانشگاه الزهراء	دانشگاه علم و صنعت ایران
r.salari@iranultrasonic.ir	v.fartashvand@alzahra.ac.ir	rezvanabedini@iust.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۲/۰۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۰۲

### چکیده

شناسایی عیب‌های پیزوالکتریک و مبدل‌های<sup>۱</sup> فراصوتی براساس امپدانس الکترومکانیکی یکی از روش‌های پایش سلامت آنها است. در پیزوالکتریک سالم، امپدانس الکترومکانیکی براساس خصوصیات، شکل و ابعاد آن تعیین می‌شود. با هدف شناسایی و پیش‌بینی خرابی پیزوالکتریک‌ها، در این مقاله، یک رویه عملی و مؤثر برای ارزیابی کیفیت و سلامت پیزوالکتریک‌های مورد استفاده در مبدل‌های فراصوتی توان بالا ارائه شده است. مبنای این رویه، بررسی تغییر مشخصات امپدانس الکتریکی قطعه پیزوالکتریک است که مطابق استاندارد قابل اندازه‌گیری است. این رویه برای محققان و سازندگان محصولات پیزوالکتریک قابل استفاده است. نتایج آزمون‌های تجربی نشان داده است که با تحلیل نمودار امپدانس پیزوالکتریک‌ها به خوبی می‌توان خرابی و عیب در آنها را شناسایی نمود؛ حتی قبل از آن که با چشم قابل رویت باشند. همچنین مقایسه کیفیت سازندگان مختلف پیزوالکتریک و بررسی میزان افت عملکرد پیزوالکتریک کارکردهی سالم نسبت به پیزوالکتریک نو قابل بررسی است.

**واژگان کلیدی:** سرامیک پیزوالکتریک، آزمون امپدانس الکترومکانیکی، مبدل ساندویچی پیزوالکتریک، پایش سلامت

### ۱. مقدمه

فرکانس بالا (۱۰۰ کیلوهرتز الی ۲ مگاهرتز) تقسیم‌بندی می‌شود. استفاده از ارتعاشات توان پایین-فرکانس بالا در دهه‌های گذشته برای آزمون‌های غیرمخرب و تصویربرداری پزشکی [۲] مورد استفاده قرار گرفته است. با تحول فناوری در صنعت الکترونیک و ساخت منابع تغذیه جدید در قرن ۲۱، استفاده از ارتعاشات فرکانس

فناوری التراسونیک به کاربرد ارتعاشات صوتی در خارج از محدوده شنوایی انسان (از حدود ۱۵ کیلوهرتز تا چند مگاهرتز) اطلاق می‌شود. این فناوری از نظر کاربرد و مقدار توان و فرکانس کاری به دو محدوده توان بالا-فرکانس پایین (۱۵-۱۰۰ کیلوهرتز) و توان پایین-

همچنین در اثر اعمال جابه‌جایی مکانیکی، انرژی الکتریسیته در آن ایجاد می‌شود.



شکل ۲. پیزوالکتریک رایج برای کاربردهای توان بالا

در کاربردهای توان بالا، پیزوالکتریک‌ها در طول عمر کاری خود دچار خرابی‌های گوناگونی می‌شوند. برخی با چشم قابل رویت هستند اما برخی دیگر مانند ترک‌های ریز قابل رویت نیستند اما عملکرد پیزوالکتریک را تحت تأثیر قرار می‌دهند. وجود ترک منجر به ایجاد حرارت، کاهش راندمان و تغییر فرکانس کاری مبدل التراسونیک می‌گردد. همچنین با از بین رفتن تقارن تنش مکانیکی و تغییر شکل ناشی از ارتعاشات، تمرکز تنش ایجاد شده و با رشد ترک در سیکل‌های متمادی، منجر به خرابی کامل مبدل و از کار افتادن سیستم‌های ارتعاشی الحاقی می‌گردد.

در تحقیقات مهندسی اخیر از پیزوالکتریک‌ها برای اندازه‌گیری امپدانس الکترومکانیکی و در نهایت پایش سلامت سازه‌ها استفاده شده است. سپهری و همکاران [۶، ۷] با هدف پایش سلامت سازه، با ارائه مدل تئوری و آزمون‌های تجربی، از پیزوالکتریک به‌عنوان یک سنسور استفاده نموده که خروجی آن بیانگر رفتار مکانیکی سازه متصل به آن است. پرز و همکاران [۸] به شناسایی ثوابت الاستیک، پیزوالکتریک و دی‌الکتریک در رینگ پیزوالکتریک با روش امپدانس الکتریکی و اندازه‌گیری سرعت سطحی پرداختند.

پارک و همکاران [۹] مروری بر کاربردهای پیزوالکتریک در پایش وضعیت سازه‌های مهندسی و موارد مرتبط با سخت‌افزار و نرم‌افزار روش اندازه‌گیری امپدانس توسط مواد پیزوالکتریک را ارائه نمودند.

پایین‌توان بالا مورد توجه زیاد محققان و صنعتگران واقع شده است. در دو دهه گذشته، به دلیل اثرات قابل توجه التراسونیک در محیط‌های گاز، مایع و جامد استفاده از این فناوری در کاربردهای وسیعی نظیر جوشکاری فلزات و پلاستیک‌ها، شکل‌دهی و ماشینکاری مواد [۳]، پردازش و همگن کردن مایعات [۳]، شستشوی قطعات، متالورژی پودر [۴، ۵] و دوخت منسوجات مورد تحقیق و استفاده صنعتی قرار گرفته است. پرکاربردترین مبدل‌های ارتعاشی التراسونیک، مبدل‌های ساندویچی لانگوین<sup>۲</sup> هستند که در آنها تعداد زوجی از پیزوالکتریک رینگی شکل، ما بین یک قطعه پشت‌بند و تطبیق قرار دارد که در شکل ۱ قابل رویت است.



شکل ۱. مبدل فراصوتی توان بالا

بخش مرکزی و قلب مجموعه مبدل‌های ساندویچی که وظیفه تبدیل انرژی الکتریکی به ارتعاشات مکانیکی را به عهده دارد، پیزوالکتریک‌ها هستند. در شکل ۲، پیزوالکتریک رایج برای کاربردهای توان بالا نشان داده شده است. در دو سطح تخت پیزوالکتریک از پوشش فلزی (نقره یا طلا) به‌عنوان الکتروود استفاده و جهت قطبش بر روی آن مشخص می‌شود. سرامیک‌های پیزوالکتریک المان‌های اصلی مبدل‌های فراصوتی بوده و با اعمال انرژی الکتریکی به آنها، تحت اثر خاصیت پیزوالکتریک، جابه‌جایی مکانیکی حاصل می‌شود.

بائیک و همکاران [۱۰] کاربرد پیزوالکتریک برای ارزیابی امپدانس الکترومکانیکی سازه را به عنوان یک روش غیرمخرب و یکی از مؤثرترین روش‌های پایش سلامت در سازه‌های عمرانی معرفی نمودند. آنها بیان داشتند علاوه بر شناسایی خرابی در سازه‌ها می‌توان از تحلیل امپدانس توسط پیزوالکتریک برای شناسایی بازشدگی اتصالات، اندازه‌گیری استحکام بتون و تعیین مشخصه‌های مودال سازه استفاده نمود. همان‌طور که ملاحظه می‌شود از پیزوالکتریک‌ها بیشتر برای شناسایی رفتار و یا خرابی در سازه‌های مکانیکی پرداخته شده است و در پژوهش‌ها کمتر به رفتارشناسی و شناخت عیب در پیزوهای مورد استفاده در کاربردهای توان بالا پرداخته شده است.

پارامترهای ضریب کوپلینگ الکترومکانیکی، امپدانس مکانیکی و ... نشان‌دهنده کیفیت عملکرد پیزوالکتریک به عنوان یک مبدل انرژی هستند. در استفاده از پیزوالکتریک‌ها، شناسایی مشخصات پیزوالکتریک‌ها با دو هدف اصلی انجام می‌شود: اول شناسایی مشخصات پیزوالکتریک نو با هدف ارزیابی کیفیت آن و دوم شناسایی خرابی پیزوالکتریک کارکرده با هدف جایگزینی آن و بهبود عملکرد سیستم ارتعاشی. در پژوهش حاضر نحوه بررسی و شناسایی مشخصات عملکردی و خرابی پیزوالکتریک‌ها توسط روش تحلیل امپدانس الکترومکانیکی مورد بررسی قرار گرفته است. با این هدف پیزوالکتریک‌های سالم نو و کارکرده و خراب تحت آزمون امپدانس قرار گرفته و نتایج خروجی شامل نمودار امپدانس-فرکانس و پارامترهای ضریب کیفیت، مقدار امپدانس روزنانس و ... مورد ارزیابی قرار گرفته است. در کنار آزمون‌های تجربی، از شبیه‌سازی اجزاء محدود نیز برای تعیین رفتار پیزوهای معیوب استفاده و نتایج با آزمون‌های تجربی مقایسه شده است.

## ۲. تئوری

امپدانس الکتریکی بیانگر مقاومت در برابر جریان الکتریکی در یک فرکانس مشخص است و یک کمیت برداری بوده و

برحسب فرکانس در عناصر واکنش‌پذیر نظیر خازن و سلف تغییر می‌کند. در موارد خاصی از مقاومت‌ها که واکنش‌پذیر نیستند مقدار امپدانس ثابت و برابر مقاومت است. برای مبدل و مجموعه آکوستیکی، وابستگی امپدانس به فرکانس پیچیده بوده و به فرکانس‌های کاری بستگی دارد.

از مقدار امپدانس، برای بررسی رفتار مجموعه‌های ارتعاشی برحسب فرکانس استفاده می‌شود. در مجموعه ارتعاشی دو فرکانس روزنانس وجود دارد: فرکانس روزنانس سری و روزنانس موازی (آنتی-روزنانس)؛ در حالت سری، حداکثر نیروی ارتعاشی وجود داشته و دامنه ارتعاشی کم بوده و برای کارهای شستشو مناسب است و معادل حداقل امپدانس و بیشترین خروجی جریان از منبع تغذیه فراصوتی است. در حالت موازی سیستم آکوستیکی در حداکثر دامنه ارتعاشی فعالیت می‌نماید. با توجه به اینکه حاصل ضرب نیرو در دامنه مقدار ثابتی است، در این صورت نیرو کمینه‌ترین حالت را دارد که این زمینه بیشتر در تجهیزات جوشکاری اتفاق می‌افتد و معادل حداکثر مقدار امپدانس است و جریان خروجی ژنراتور فراصوتی، کمترین حالت ممکن را دارد. رسم منحنی امپدانس برحسب فرکانس مشخص‌کننده فرکانس سری و موازی سیستم تراسونیک است که از اندازه‌گیری دامنه امپدانس برحسب فرکانس حاصل می‌شود.

هنگامی که به پیزوالکتریک جریان متناوب اعمال می‌شود، رفتار آن با تغییرات امپدانس الکتریکی برحسب فرکانس نوسان تشریح می‌شود. دو روش برای تعیین امپدانس پیزوالکتریک مشابه امپدانس مدار الکتریکی وجود دارد که از معادلات مشخصه پیزوالکتریک حاصل می‌شوند.

یک حالت استفاده از فرکانس سری و موازی در حالت بی‌بار به صورت یک صفحه بزرگ آزاد است که در راستای ضخامت نوسان می‌کند. در این حالت پیزوالکتریک به عنوان یک رکتانس<sup>۳</sup> الکتریکی مدنظر قرار می‌گیرد. نحوه محاسبه امپدانس (Z) در رابطه ۱ آمده است.

مقدار فرکانس رزونانس سری  $f_s$  مبدل از رابطه ۳ محاسبه می‌شود:

$$f_s = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC}} \quad (۳)$$

مقدار ظرفیت خازنی  $C_0$  از رابطه ۴ محاسبه می‌شود:

$$C_0 = \frac{n_0 \varepsilon_{33} S}{L} (1 - k_t^2) \quad (۴)$$

که  $n_0$  تعداد رینگ پیزوالکتریک،  $\varepsilon_{33}$  ضریب نفوذپذیری،  $S$  سطح مقطع،  $L$  طول المان،  $k_t^2$  ضریب کوپلینگ الکترومکانیکی است.

مقدار امپدانس مجموعه ارتعاشی در فرکانس رزونانس زاویه‌ای  $\omega$  برابر است با:

$$Z = \frac{\omega^2 CL - 1 - j\omega CL}{\omega^2 RCC_0 + j\omega(\omega^2 C_0 CL - (C + C_0))} \quad (۵)$$

با رسم منحنی مشخصه امپدانس در بازه فرکانسی می‌توان به شناسایی رفتار سیستم ارتعاشی پرداخت. در بررسی نمودار با استفاده از تحلیل گر امپدانس<sup>۵</sup>، فرکانس با اعمال یک ولتاژ پایین در محدوده مشخصی جاروب می‌شود تا فرکانس‌های سری و موازی برحسب مقدار امپدانس (به ترتیب حداقل و حداکثر) مشخص گردد.

### ۳. ویژگی و اصول عملکرد پیزوالکتریک

#### ۳-۱. اصول و کاربرد پیزوالکتریک

اثر پیزوالکتریک<sup>۶</sup> در سال ۱۸۸۰ توسط پیرکوری<sup>۷</sup> کشف شد. او متوجه شد که چنانچه کرنش مکانیکی روی کریستال‌های خاص اعمال شود، آنها را به‌طور الکتریکی پلاریزه می‌کند. درحالی‌که درجه پلاریزاسیون<sup>۸</sup> متناسب با مقدار کرنش است. او همچنین دریافت که اگر این مواد در میدان الکتریکی قرار داده شوند تغییر طول می‌دهند [۱۲]. عملکرد سرامیک‌های پیزوالکتریک در سه گروه اصلی الکتریکی-مکانیکی (سنسور)،

$$Z = \frac{t}{j\omega A \varepsilon_{33}^S} \left( 1 - \frac{k_t^2 \tan\left(\frac{\omega}{4f_p}\right)}{\frac{\omega}{4f_p}} \right) \quad (۱)$$

که  $t$  ضخامت،  $A$  سطح تحت ارتعاش،  $k_t$  ضریب کوپلینگ مود شعاعی،  $\varepsilon_{33}^S$  نفوذپذیری دی‌الکتریک در کرنش ثابت،  $f_p$  فرکانس رزونانس موازی و  $\omega$  فرکانس زاویه‌ای است.

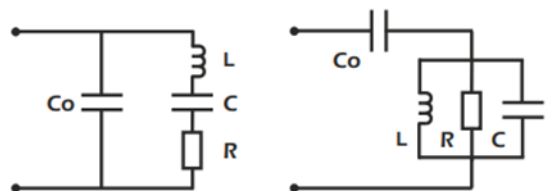
در مواردی که سیستم ارتعاشی و بار اعمالی بر روی سیستم مشخص باشد، چون سیستم هم دارای حالت غیرفعال و هم دارای رکتانس است، از رابطه ۲ برای محاسبه مقدار امپدانس استفاده می‌شود:

$$Z = \frac{1}{j\omega C_E} \left( 1 - \frac{k_t^2}{jk_t} S^* \right) \quad (۲)$$

که  $C_E$  ظرفیت خازنی پیزوسرامیک کلمپ شده و  $S^*$  تابع مختلط امپدانس است که در مرجع [۱۱] تعریف شده است.

مدار باترورث-وان دایکه<sup>۴</sup> (BVD) به‌عنوان معادلی برای ترسیم امپدانس الکتریکی برحسب فرکانس مشابه مجموعه ارتعاشی در نزدیکی موقعیت‌های رزونانس به کار می‌رود که در شکل ۳ قابل مشاهده است. این مدار برای ارتعاش مود طولی پیزوالکتریک استفاده می‌شود. این مدار شامل دو خازن ( $C, C_0$ )، یک سلف ( $L$ ) و یک مقاومت ( $R$ ) است که به‌صورت سری یا موازی قرار گرفته‌اند. مؤلفه‌های خازن و سلف مرتبط با اثرات پیزوالکتریک، مقاومت بیانگر اتلافات (برقی، مکانیکی) و بار است. مقدار مقاومت مکانیکی به دامنه ارتعاش (کرنش) بستگی دارد.

خازن  $C_0$  در حالت موازی مرتبط با ظرفیت خازنی مبدل پیزوالکتریک است.



شکل ۳. مدار معادل الکتریکی مجموعه آکوستیکی در حالت موازی

(سمت راست) و سری (سمت چپ)

مکانیکی-الکتریکی (محرك<sup>۱</sup>) و الکتریکی-مکانیکی-الکتریکی (سنسور) طبقه‌بندی می‌شوند [۱۳].

پیزوالکتریک‌های معمول مورد استفاده در فناوری فراصوتی عبارتند از:

۱- تک کریستال پیزوالکتریک (مانند  $\text{SiO}_2, \text{LiNbO}_3$ )

۲- سرامیک‌های پیزوالکتریک (مانند  $\text{BaTiO}_3, \text{PZT}, \text{PbTiO}_3$ )

۳- فیلم‌های نازک پیزوالکتریک (مانند  $\text{ZnO}$ )

۴- فیلم‌های پلیمری پیزوالکتریک (مانند  $\text{PVDF-TrFE}$ )

در کاربردهای فناوری فرکانس پایین-توان بالا بیشتر از سرامیک‌های پیزوالکتریک ( $\text{PZT}^{10}$ ) استفاده می‌شود.

با رشد فناوری و توسعه مواد پیزوالکتریک جدید سرامیک‌های پیزوالکتریک از جنس تیتانات سرب و زیرکونات سرب و با

اختصار  $\text{PZT}$  با قابلیت‌های بالاتر، توسط شرکت‌های پیشگام [۱۴، ۱۵] به بازار عرضه شده‌اند این پیزوالکتریک‌ها اغلب از

ترکیب دو ماده زیرکونات سرب ( $\text{Pb-ZrO}_2$ ) و تیتانات سرب ( $\text{Pb-TiO}_2$ ) با نسبت تقریباً مساوی ساخته می‌شوند. برای

ساخت پیزوسرامیک‌ها، با قرار دادن سرامیک در یک میدان الکتریکی قوی در دماهای کمی پایین‌تر از نقطه کیوری<sup>۱۱</sup>، این

سرامیک دارای پلاریزاسیون در همان جهت میدان می‌شود. عملیات پلاریته کردن به‌طور معمول آخرین عملیاتی است که

روی  $\text{PZT}$  ها صورت می‌گیرد. پیزوالکتریک‌ها در شکل‌های مختلف نظیر رینگ، دیسکی، صفحه‌ای و ... ساخته و مورد

استفاده قرار می‌گیرند.

شکل ۴، نمونه پیزوالکتریک‌های رینگ شکل رایج در ابعاد مختلف برای استفاده در ساخت میدل‌های توان بالا را نشان

داده است. ابعاد مهم پیزوالکتریک رینگ شکل رایج در طراحی، قطر داخلی و ضخامت است. نمونه‌های رایج در طراحی

میدل‌های پرکاربرد ۲۰ کیلوهرتز معمولاً دارای قطر خارجی ۵۰ یا ۳۵ میلی‌متر و متناسب با آن محدوده قطر داخلی رایج ۱۵-

۲۰ میلی‌متر و ضخامت ۵ الی ۶/۵ میلی‌متر است.

جنس رایج این مواد سرامیکی گرید  $\text{PZT-4}$  یا  $\text{PZT-8}$  است که در مشخصه‌های مهم پیزوالکتریک‌ها، نظیر چگالی، کمیت

الاستیسیته (مثل تنش یا کرنش) و خاصیت عبور الکتریکی (میدان الکتریکی یا شارژ الکتریکی) و ثابت شارژ پیزوالکتریک

(ضریب تبدیل انرژی الکتریکی به مکانیکی) و ثابت ولتاژ پیزوالکتریک (ضریب تبدیل انرژی مکانیکی به الکتریکی)

متفاوت هستند. جدول ۱ مشخصات و کاربرد برخی از پیزوالکتریک‌های رایج را ارائه نموده است [۱۶].



شکل ۴. پیزوالکتریک‌های رینگ شکل رایج در فناوری فراصوتی

توان بالا

جدول ۱. مشخصات و کاربرد پیزوالکتریک‌های رایج [۱۶]

جنس	مشخصات فیزیکی	کاربردها
PZT-4	پیزوسرامیک سخت با مقاومت بالا در برابر قطبش‌زدایی، کوپلینگ بالا، افت دی‌الکتریک کم، تحت تحریک الکتریکی زیاد	کاربرد در مبدل‌های توان بالا
PZT-5A	پیزوسرامیک نرم با مقاومت بالا در دمای زیاد، حساسیت بالا، پایداری زمانی زیاد	کاربرد در تشخیص پزشکی، میکروفون و NDT
PZT-8	پیزوسرامیک سخت شبیه به PZT-4 با افت مکانیکی و دی‌الکتریک کمتر تحت تحریک الکتریکی زیاد، مناسب برای کارکرد در توان بالا	کاربرد در مبدل‌های توان بالا
Pb (NbO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	دارا بودن دمای کیوری بالا، قطبش‌زایی خود به خودی بالا، دی‌الکتریک و فاکتور مکانیکی پایین	کاربرد در تشخیص پزشکی و NDT
PMNT-28	یک تک کریستال با کوپلینگ و جابه‌جایی فزاینده با پهنای باند ارتقا یافته، مقاومت بالاتر در برابر کرنش اعمال شده نسبت به پیزوسرامیک	کاربرد در تشخیص پزشکی و عملگرها
PVDF	پیزوالکتریک پلیمری با حساسیت بالا و پایداری ابعادی مناسب، دمای کیوری پایین، تضعیف شیمیایی	کاربرد در تشخیص پزشکی، میکروفون، فشارسنج و سنسورهای مادون قرمز

### ۳-۲. مشخصه‌های سرامیک پیزوالکتریک

سازندگان پیزوالکتریک پارامترهای مشخصه مطلوب آنها را ارائه می‌دهند. مهم‌ترین پارامترهای مورد ارزیابی شامل مشخصات الکتریکی و ثابت‌های فیزیکی پیزوالکتریک هستند. امپدانس حداقل در فرکانس رزونانس سری ( $Z_{\min}$ ) و امپدانس حداکثر در فرکانس رزونانس موازی ( $Z_{\max}$ )، ضریب کیفیت مکانیکی ( $Q_m$ ) و اختلاف فرکانس رزونانس سری ( $f_s$ ) و موازی پیزوالکتریک ( $f_p$ ) جزء مهم‌ترین مشخصه‌های الکتریکی هستند. واحد امپدانس از نوع مقاومت و برحسب اهم ( $\Omega$ ) است. فرکانس رزونانس سری ( $f_s$ ) بیانگر فرکانسی است که در رسم نمودار امپدانس برحسب فرکانس، امپدانس حالت کمینه دارد و فرکانس رزونانس موازی ( $f_p$ ) بیانگر فرکانسی است که در آن امپدانس بیشترین مقدار را دارد. ضریب کیفیت مکانیکی ( $Q_m$ ) از رابطه ۶ حاصل می‌شود. در این رابطه  $f_1$  و  $f_2$  مقادیر فرکانس نیمه توان پیزوالکتریک هستند.

$$Q_m = \frac{f_s}{f_2 - f_1} \quad (6)$$

ضریب تبدیل انرژی الکتریکی به انرژی مکانیکی ( $d_{33}$ ) مهم‌ترین پارامتر مورد ارزیابی در کنترل کیفی پیزوالکتریک است. پارامتر  $d_{33}$ ، پلاریزاسیون القا شده در جهت ۳ بر واحد تنش اعمال شده در جهت ۳ را نشان می‌دهد. در اثر اعمال جابه‌جایی مستقیم به پیزوالکتریک جریان الکتریکی برقرار می‌شود (کاربرد سنسور) و در حالت معکوس با اعمال ولتاژ الکتریکی به دو سر پلاریزه شده دیسک پیزوالکتریک کرنش مکانیکی حاصل (کاربرد محرک) می‌گردد [۱۷].

جلول ۲ به‌عنوان نمونه محلوده‌های قابل قبول پیزوالکتریک با ابعاد  $6 \times 20 \times 50$  میلی‌متر از جنس PZT-8 شرکت MPI را برای ابعاد و جنس‌های مختلف مقادیر مجاز متفاوت ارائه نموده است [۱۷]. فرکانس رزونانس کاری، به‌صورت میانگین فرکانس رزونانس سری و موازی در نظر گرفته می‌شود. درحین بارگذاری روی مبدل، فرکانس رزونانس سری کاهش یافته و مشخصه امپدانس نیز کاهش می‌یابد.

جدول ۲. مشخصات پیزوالکتریک، ابعاد  $۵۰ \times ۲۰ \times ۶$  میلی متر از جنس PZT-8 شرکت MPI [۱۷]

مشخصات	مقادیر متوسط	حداکثر تolerانس
فرکانس رزونانس سری ( $f_s$ ) (Hz)	۳۲۸۸۰	$\pm 1\%$
فرکانس رزونانس موازی ( $f_p$ ) (Hz)	۳۴۸۸۰	$\pm 1\%$
اختلاف فرکانس رزونانس ( $\Delta f$ ) (Hz)	۲۰۰۰	$\pm 3\%$
امپدانس حداقل ( $Z_{min}$ ) ( $\Omega$ )	$\geq 13/7$	$\pm 10\%$
امپدانس حداکثر ( $Z_{max}$ ) ( $\Omega$ )	$\geq 245$	$\pm 20\%$
ضریب کیفیت مکانیکی ( $Q_m$ )	$\geq 1000$	$\pm 15\%$
ضریب تبدیل الکتریکی به مکانیکی در جهت پلاریزاسیون ( $d_{33}$ )	۲۶۰-۲۴۵	$\pm 5\%$

### ۳-۳. خرابی پیزوالکتریک

- در حین کارکرد به دلیل شل شدن پیچ مرکزی و حذف پیش بار اولیه
- در حین حمل و نقل مبدل به دلیل شوک‌های مکانیکی و افتادن
- خستگی پیزوالکتریک در اثر کارکرد متناوب
- وجود یک پیزوالکتریک خراب و یا ترک خورده منجر به کاهش راندمان کارکرد مبدل و از کار افتادگی آن می‌شود. از طرفی وجود ترک در داخل و سطوح بیرونی پیزوالکتریک منجر به ایجاد حرارت، افت راندمان تبدیل انرژی و تغییرات فرکانسی می‌گردد.

### ۴. روش اجرای آزمون

#### ۴-۱. تعیین پارامترهای عملکردی پیزوالکتریک

##### سالم

روش آزمون برای تعیین پارامترهای عملکردی و شناسایی خرابی و ترک در سرامیک پیزوالکتریک مبتنی بر داده‌های حاصل از تحلیل گر امپدانس است. دستگاه تحلیل گر امپدانس می‌تواند خروجی امپدانس، فرکانس رزونانس (موازی) و آنتی رزونانس (سری)، فاز، ضریب کیفیت مکانیکی و ... را نسبت به فرکانس تحریک تعیین نماید.

پیزوالکتریک ممکن است به دلایلی حین فرایند ساخت و یا در طول عمر کاری خود دچار خرابی گردد. این خرابی می‌تواند به دلایل مختلف مانند اعمال ولتاژ زیاد، عبور جریان بیش از حد ضربه مکانیکی و ... باشد از طرفی خرابی می‌تواند به صورت تغییر خواص مکانیکی و الکتریکی پیزوالکتریک، حضور ترک درون پیزوالکتریک و یا شکستن آن ظاهر شود. مهم‌ترین دلایل ایجاد خرابی در پیزوالکتریک‌ها عبارتند از:

- در حین ساخت پیزوالکتریک و در قالب متالورژی پودر به دلیل توزیع نامساوی تنش روی پودرها
- در حین مونتاژ مبدل به دلیل وارد کردن تنش بیش از حد استحکام پیزوالکتریک یا سرعت بالای اعمال تنش
- در حین مونتاژ مبدل به دلیل وجود نامنظمی‌ها روی سطوح و عدم تختی سطوح مونتاژی
- در حین کارکرد مبدل به دلیل اعمال اختلاف پتانسیل و جریان الکتریکی بیش از ولتاژ قطبش‌زدایی
- در حین کارکرد مبدل به دلیل حرارت بالای تجمع یافته در محل پیزوالکتریک
- در حین کارکرد مبدل به دلیل جرقه الکتریکی در محل پیزوالکتریک

رزونانس اصلی) جاروب<sup>۱۲</sup> می‌کند و منحنی مشخصه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

#### ۴-۲. شناسایی عیب و ترک در پیزوالکتریک

با هدف پیش‌گیری از خرابی مجموعه ارتعاشی حین کارکرد و صدمه به دیگر اجزای سیستم مانند منبع تغذیه و مدارات کنترلی دستگاه و همچنین پایش وضعیت لازم است عملکرد پیزوالکتریک‌ها پس از ساخت و یا در مرحله بازمینی و تعمیر دوره‌ای به صورت آگاهانه و پیشگیرانه مورد بررسی قرار گیرد. سه راهکار مهم در ارزیابی خرابی، عیب و یا افت عملکرد در استفاده از این نوع پیزوالکتریک‌ها وجود دارد:

(۱) ارزیابی خروجی (ولتاژ و جریان) کل مجموعه ارتعاشی

(۲) ارزیابی چشمی عیب در پیزوالکتریک‌ها

(۳) ارزیابی امپدانس الکترومکانیکی پیزوالکتریک‌ها

در مورد اول، خروجی کل مجموعه ارتعاشی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و در صورت معیوب بودن قطعات رفتار خروجی سیستم مطابق با رفتار یک سیستم ارتعاشی سالم نخواهد بود. از آنجا که مجموعه ارتعاشی ترکیبی از اجزای مختلف مانند مبدل، بوستر و هورن و یا ابزار ارتعاشی است و البته مبدل نیز از اجزای مختلف تشکیل شده است، تفکیک جزء دارای خرابی نیازمند طی مراحل براساس دستورالعمل‌های تعمیر و نگهداری است.

در برخی موارد خرابی پیزوالکتریک با بازرسی چشمی مشهود و قابل شناسایی است. در این موارد پیزوالکتریک‌های شکسته شده و یا تمامی پیزوالکتریک‌ها در مبدل با پیوسرامیک‌های نو و سالم جایگزین می‌شوند. اما در برخی موارد پیرو دارای عیب پنهان است و با بازرسی چشمی قابل شناسایی نیست. در این موارد راهکار مناسب پایش رفتار امپدانس الکترومکانیکی پیزوالکتریک و مقایسه آن با رفتار پیرو سالم است و از این روش می‌توان به‌عنوان شاخصی برای تعیین پیزوالکتریک سالم استفاده نمود.

دستگاه تحلیل‌گر امپدانس می‌تواند پیزوالکتریک‌ها را با استفاده از هولدر مخصوص پیزوالکتریک که در شکل ۵ قابل مشاهده است، مورد آزمون قرار دهد.

رینگ پیزوالکتریک در فیکسچر مربوطه قرار گرفته و اندازه‌گیری با اعمال ولتاژ بر روی قطب‌های پیزوالکتریک انجام می‌گیرد. فرکانس در محدوده تنظیمی (اطراف موقعیت رزونانس) جاروب می‌گردد. سپس به تحلیل داده‌های حاصل از نمودار پرداخته می‌شود [۱۹].



شکل ۵. تجهیزات آزمون؛ (الف) دستگاه تحلیل‌گر امپدانس و (ب) هولدر آزمون پیزوالکتریک [۱۸]

در آزمون تجربی رفتار دو نوع پیزوالکتریک پرکاربرد در فناوری فراصوتی توان بالا به ابعاد  $۶ \times ۲۰ \times ۵۰$  و  $۶/۵ \times ۱۷ \times ۵۰$  میلی‌متر از جنس PZT-8 ساخت دو شرکت معتبر مورد بررسی قرار گرفته است. از هر نوع از پیزوالکتریک‌ها دو نمونه مورد آزمون قرار گرفته است. در مرحله نخست با استفاده از تحلیل‌گر فرکانسی و فیکسچر نگهدارنده پیزوالکتریک، یک ولتاژ به دو سر پیرو اعمال می‌شود و سپس دستگاه در دو مرحله  $۱۰-۱۶۰$  kHz (فرکانس وسیع) و  $۳۰-۴۰$  kHz (فرکانس حول



هر جسم صلبی دارای فرکانس رزونانس مناسب با موده‌های ارتعاشی متناظر است. پیزوالکتریک‌ها براساس جنس، شکل و ابعاد دارای رزونانس در محدوده‌های خاص فرکانسی هستند. هرگونه تغییر و یا ایجاد عیب در مشخصه‌های بیان شده، موجب تغییر پاسخ فرکانسی پیزوالکتریک خواهد شد. پیزوسرامیک‌های رینگی شکل بیشتر دارای موده‌های ارتعاش شعاعی و طولی هستند. بروز ترک سبب می‌شود که موده‌های رزونانسی و ارتعاشی دیگری در هنگام به‌کارگیری دستگاه تحلیل‌گر امپدانس رویت شود.

در بررسی رفتار رینگ پیزوسرامیک‌های کار شده و معیوب پیزوالکتریک با ابعاد  $6 \times 20 \times 50$  میلی‌متر از جنس PZT-8 مدنظر قرار گرفته‌اند.

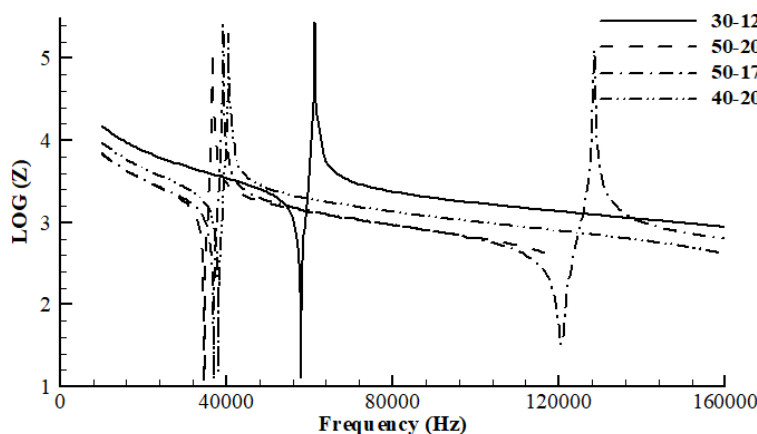
## ۵. نتایج و بحث

### ۵-۱. مقایسه مشخصات پیزوالکتریک سالم

در نمودار حاصل از آزمون تحلیل امپدانس، محور افقی منحنی مشخصه فرکانس تحریک و محور عمودی منحنی مشخصه لگاریتم امپدانس خروجی پیزوالکتریک است. شکل ۶ نمودار تحلیل امپدانس چهار نمونه پیزوالکتریک با ابعاد  $5 \times 12 \times 30$ ،  $6 \times 20 \times 50$ ،  $5 \times 20 \times 40$  و  $6/5 \times 17 \times 50$  میلی‌متر را نشان داده است. ظاهر نمودار دارای یک بخش کاهش تدریجی یکنواخت (متناسب با معکوس ظرفیت خازنی و فرکانس) است که سپس

دچار یک کاهش تیز می‌گردد که موقعیت حداقل امپدانس می‌شود و سپس بلافاصله یک افزایش سریع دارد که منجر به حداکثر امپدانس می‌گردد و سپس با یک شیب متناسب با معکوس فرکانس و ظرفیت خازنی به حالت صاف در می‌آید. در فرکانس‌های پایین، پیزوالکتریک با جریان اعمالی به‌صورت هم‌فاز نوسان می‌کند و از منظر الکتریکی، پیزوالکتریک به‌صورت یک خازن رفتار کرده و مقدار امپدانس به‌صورت رابطه  $\frac{1}{\omega C}$  کاهش می‌یابد.

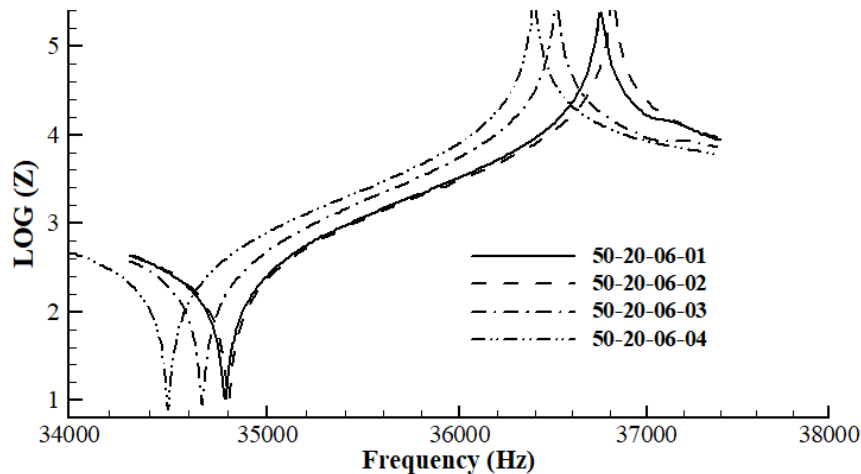
در فرکانس مشخصی، رزونانس مکانیکی اتفاق می‌افتد و در این وضعیت ولتاژ الکتریکی، کاملاً با ارتعاش پیزوالکتریک هم‌فاز است. مقدار دامنه در ضریب کیفیت مکانیکی ضرب می‌شود. کرنش بالا در پیزوالکتریک منجر به جابه‌جایی بیشتر و در نتیجه مصرف جریان الکتریکی بالاتر می‌گردد و امپدانس به پایین‌ترین مقدار ممکن می‌رسد. مقدار کمینه امپدانس به افت‌های درونی پیزوالکتریک و مقاومت آن بستگی دارد. با افزایش بیشتر فرکانس، اختلاف فاز بین ولتاژ اعمالی و ارتعاش مکانیکی بیشتر می‌شود و امپدانس به حداکثر مقدار خود در اختلاف فاز  $180^\circ$  درجه می‌رسد. در این حالت ارتعاشات بیشتر تضعیف شده و پیزوالکتریک جریان کمتری مصرف می‌کند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با کوچک شدن ابعاد پیزوالکتریک فرکانس رزونانس شعاعی اول آن افزایش می‌یابد.



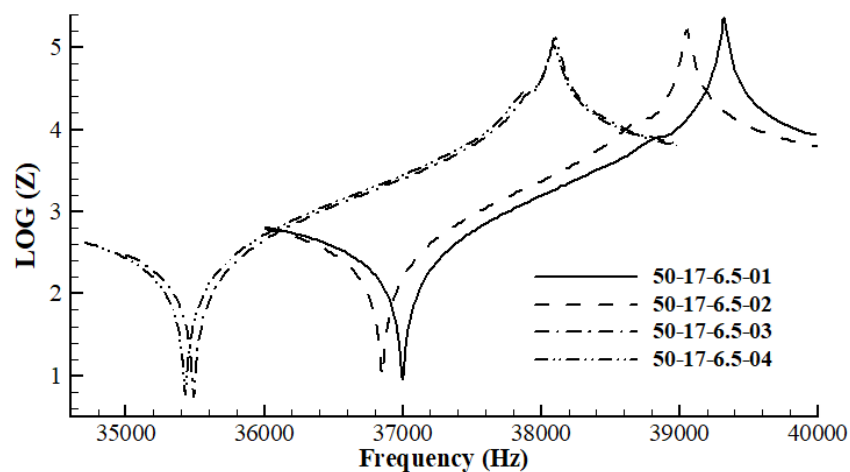
شکل ۶. منحنی امپدانس برحسب فرکانس چهار نمونه پیزوالکتریک با ابعاد  $5 \times 12 \times 30$ ،  $6 \times 20 \times 50$ ،  $5 \times 20 \times 40$  و  $6/5 \times 17 \times 50$  میلی‌متر

شکل ۷ و شکل ۸ نمودار فرکانس-لگاریتم امپدانس در شکل مود اول رزونانس شعاعی رینگ پیزوالکتریک برای پیزوالکتریک‌ها به ترتیب در ابعاد  $۶ \times ۲۰ \times ۵۰$  و  $۶/۵ \times ۱۷ \times ۵۰$  میلی‌متر را نمایش می‌دهد.

در هر شکل نتایج آزمون امپدانس چهار پیزوالکتریک نو از دو شرکت متفاوت ارائه شده است. در هر شکل پیزوهای شماره ۰۱ و ۰۲ از یک شرکت (نوع ۱) و پیزوهای شماره ۰۳ و ۰۴ از شرکت دیگر (نوع ۲) هستند.



شکل ۷. نمودار فرکانس-لگاریتم امپدانس پیزوالکتریک‌های در ابعاد  $۶ \times ۲۰ \times ۵۰$  میلی‌متر



شکل ۸. نمودار فرکانس-لگاریتم امپدانس پیزوالکتریک‌های در ابعاد  $۶/۵ \times ۱۷ \times ۵۰$  میلی‌متر

جدول ۳ مقایسه عملکرد رینگ‌های پیزوالکتریک با ابعاد  $۶ \times ۲۰ \times ۵۰$  و  $۶/۵ \times ۱۷ \times ۵۰$  میلی‌متر (نوع ۱ و ۲) را نشان داده است. مقادیر ارائه شده متوسط حداقل دو نمونه پیزوالکتریک از هر جنس و ابعاد هستند. با مقایسه خصوصیات پیزوالکتریک‌ها ملاحظه می‌شود پیزوالکتریک نوع ۲ دارای امپدانس آکوستیکی پایین‌تر و ضریب کیفیت بالاتری نسبت به پیزو نوع ۱ است.

همان‌طور که پیشتر گفته شد پیزوالکتریک مناسب برای استفاده در مبدل‌های توان بالای فراصوتی، رینگ با ضریب کیفیت بالاتر و امپدانس پایین‌تر در حالت رزونانس است. با مقایسه مقادیر ضریب کیفیت مکانیکی، امپدانس در رزونانس و ضریب تبدیل انرژی الکتریکی به ارتعاشات مکانیکی در جدول ۳ برای پیزوهای با ابعاد  $۶ \times ۲۰ \times ۵۰$  میلی‌متر ملاحظه می‌شود

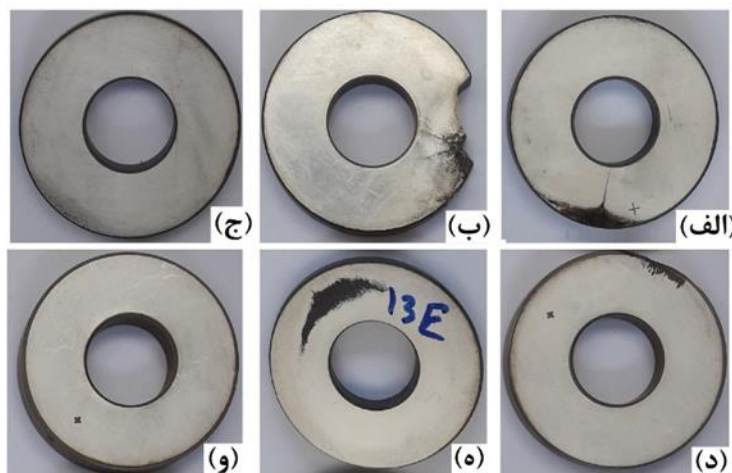
که داده‌های مشخصات و کیفیت پیزوالکتریک‌ها در محدوده مجاز قرار دارند. دو پارامتر ضریب کیفیت مکانیکی و امپدانس الکتریکی ارتباط معناداری با یکدیگر دارند. یعنی در عمل در پیزوالکتریک‌ها ضریب کیفیت مکانیکی بالاتر با امپدانس الکتریکی پایین‌تر در پیزوهای با ابعاد و جنس مشابه همراه است.

جدول ۳. مشخصات رینگ پیزوالکتریک نتیجه تحلیل امپدانسی

PZT-8	۶×۲۰×۵۰		۶٫۵×۱۷×۵۰	
	۱	۲	۱	۲
نوع				
$f_s$ (Hz)	۳۴۷۹۵	۳۴۵۸۳	۳۶۹۲۸	۳۵۴۶۱
$f_p$ (Hz)	۳۶۷۸۳	۳۶۴۵۴	۳۹۱۸۷	۳۸۰۹۶
$\Delta f$ (Hz)	۱۹۸۸	۱۸۷۰	۲۲۵۹	۲۶۳۵
$Q_m$	۱۸۲۵	۲۴۰۶	۱۸۱۰	۲۱۸۱
$Z_{min}(\Omega)$	۱۰٫۳	۸٫۴	۹٫۵	۵٫۸
$d_{33}$ (Hz)	۲۵۰	۲۱۹	۲۳۵	۲۵۸

## ۲-۵. نتایج آزمون پیزوالکتریک کارشده و معیوب

انواع عیب قابل رویت در پیزوالکتریک‌ها شامل لب پریدگی جزئی، ترک ریز، ترک شعاعی و شکست مقطعی از پیزوالکتریک در اندازه‌های مختلف هستند در شکل ۹ پیزوالکتریک (الف) دارای ترک شعاعی مشهود، (ب) دارای شکستگی و ترک شعاعی، (ج) عیب غیرمشهود (ترک داخلی)، (د) لب پریدگی کناری، (ه) کندگی پوشش نقره و ترک ریز داخلی غیرمشهود و (و) نمونه پیزو کارکرده سالم نشان داده شده است. در بسیاری از موارد عیب مشهود است اما در برخی موارد عیب مشهود نیست و تنها از طریق آزمون امپدانسی قابل تشخیص است. به‌عنوان مثال در نمونه پیزوالکتریک شکل ۹-ج و ه دارای ترک قابل مشاهده نیستند و یا به سختی قابل رویت است. در ادامه اثر خرابی بر نمودار و پارامترهای خروجی حاصل از آزمون امپدانسی مورد بررسی و تحلیل قرار خواهند گرفت. خرابی پیزوالکتریک براساس شکل و ابعاد آن تأثیرهای متفاوتی بر نمودار فرکانس-امپدانس پیزوالکتریک می‌گذارد.



شکل ۹. خرابی‌های رایج در پیزوالکتریک‌ها (در ابعاد ۶×۲۰×۵۰ میلی‌متر): (الف) ترک شعاعی، (ب) ترک شعاعی و کندگی بخشی، (ج) عیب

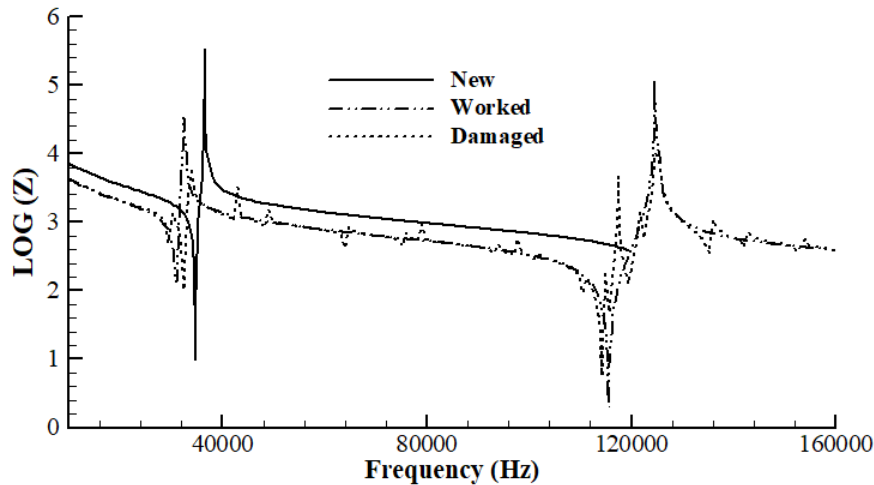
غیرمشهود (ترک داخلی)، (د) لب پریدگی، (ه) از بین رفتن بخشی از پوشش نقره و (و) نمونه پیزو سالم کارکرده

نمودار فرکانس-امپدانس رینگ پیزوالکتریک نو و کارکرده سالم، بدون هیچ‌گونه مود ارتعاشی مضاعف در کنار مود ارتعاش شعاعی اصلی است.

طیف امپدانسی یک نمونه پیزوسرامیک سالم نو<sup>۱۳</sup>، کارکرده سالم<sup>۱۴</sup> و معیوب ترک‌دار<sup>۱۵</sup> در کنار یکدیگر در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

مضاعف در نمودار است. در عین حال ملاحظه می‌شود کیفیت مکانیکی پیزوالکتریک سالم کار کرده کمتر از پیزوالکتریک نو است و این پارامتر معیار مناسبی برای ارزیابی تضعیف پیزوهای کار کرده است.

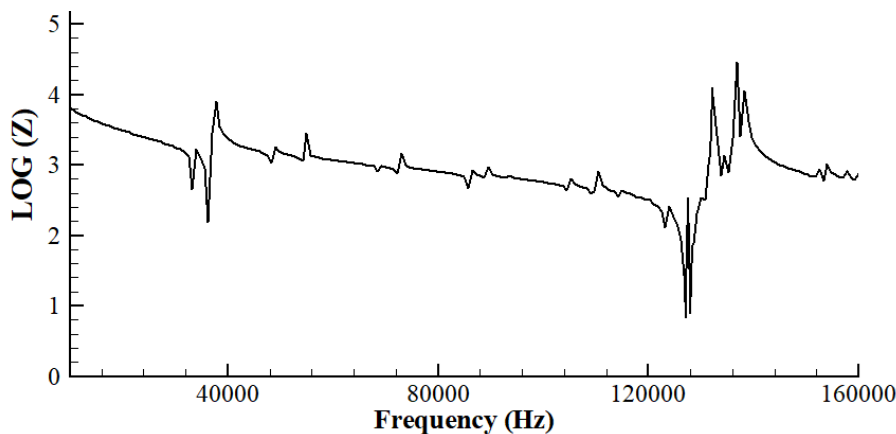
در حالی که پیزو سرامیک معیوب، علاوه بر مود(های) اصلی دارای مود(های) ارتعاشی مضاعف متعددی است. به دلیل به هم ریختگی نمودار امپدانس در نمونه‌های خراب، امکان مقایسه عددی مشخصه‌های عملکردی پیزو خراب و سالم وجود ندارد و راه شناسایی آن مشاهده قله‌های رزونانسی



شکل ۱۰. منحنی پیزو سرامیک سالم و معیوب در کنار هم در ابعاد ۶×۲۰×۵۰ میلی‌متر

مضاعف را در محدوده آزمون رفتار امپدانس فرکانسی نمایش می‌دهد که بیانگر ترک داخلی و غیرمشهود در آن هستند.

در نمودار شکل ۱۱ در ظاهر رینگ پیزوالکتریک (مانند شکل ۹-ج) ترکی مشهود نیست اما نمودار امپدانس شکل موده‌های



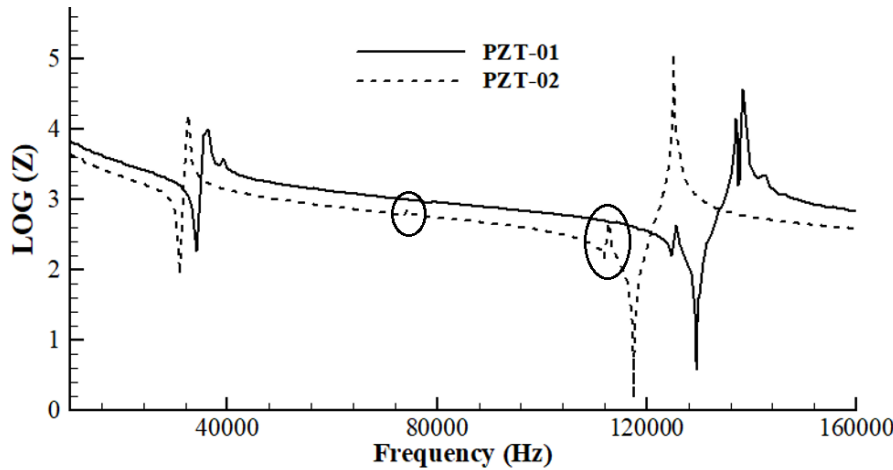
شکل ۱۱. منحنی فرکانس - امپدانس پیزوالکتریک با ظاهر سالم به همراه عیب داخلی در ابعاد ۶×۲۰×۵۰ میلی‌متر

با رسم بیضی در نمودار مشخص شده‌اند این عیب می‌تواند ناشی از ترک ریز داخلی یا توزیع نایکنواخت چگالی قطعه در حین فشرده‌سازی باشد؛ در حالی که در ظاهر قطعه (مانند شکل ۹-ج و ه) عیبی مشهود نیست.

شکل ۱۲ نشان‌دهنده نمودار مشخصات امپدانس دو پیزوالکتریک معیوب است. در پیزو شماره ۰۱ یک مود مضاعف در حدود فرکانس ۷۵ کیلوهرتز و یک مود ثانویه در کنار شکل مود شعاعی دوم در فرکانس حدود ۱۱۰ کیلوهرتز است. موقعیت‌های مد نظر

نامناسب رزونانسی در مدهای اصلی رزونانسی و یک پیک مضاعف کوچک در کنار پیک رزونانسی اصلی شده است.

نمودار ۰۲ شکل ۱۲ نشان‌دهنده اثر کندگی لبه کناری پیزوالکتریک (مانند شکل ۹-د) بر نمودار فرکانس-امپدانس حاصل است. ملاحظه می‌شود این خرابی باعث ایجاد یک توزیع



شکل ۱۲. منحنی فرکانس-امپدانس پیزوالکتریک (در ابعاد  $۶ \times ۲۰ \times ۵۰$  میلی‌متر): ۰۱ با ظاهر بدون ترک و رفتگی بخشی روکش نقره به همراه عیب داخلی ریز و ۰۲ با کندگی لبه کناری

۳-۵. مقایسه نتایج شبیه‌سازی و آزمون تجربی

در نمودارهای پیشین ملاحظه شد خرابی‌های مشهود و یا ترک‌های ریز غیرمشهود و عدم یکنواختی در فشرده‌سازی پیزوها تأثیر خود را بر نمودار فرکانس-امپدانس و مقادیر مشخصه‌های امپدانسی می‌گذارند.

برای نمایش اثر ترک بر مدهای ارتعاشی و فرکانس رزونانس پیزوالکتریک، شبیه‌سازی رفتار رزونانسی پیزوالکتریک از جنس PZT-8 در ماژول تحلیل مودال نرم افزار انسیس<sup>۱۶</sup> ورکبنچ انجام شده است. در این شبیه‌سازی ابتدا نمونه سالم با ابعاد  $۶ \times ۲۰ \times ۵۰$  شبیه‌سازی شد سپس با ایجاد ترک شعاعی در مدل دیسک پیزوالکتریک، نتایج فرکانس و شکل مدهای ارتعاشی مورد بررسی قرار گرفت.

شکل ۱۳-الف، شکل مود اصلی شعاعی دیسک پیزوالکتریک سالم و بدون ترک در فرکانس ۳۱۷۹۸ هرتز را نشان داده است. سایر شکل مدهای مجاور، مود ارتعاش اصلی شعاعی به صورت مدهای مزدوج با فرکانس نزدیک به هم (به دلیل تقارن دیسک

پیزو) در فرکانس‌های ۲۶۲۳۸ و ۲۶۲۳۹ هرتز (مود خمشی) و ۳۴۰۲۱ و ۳۴۰۲۸ (مود خمشی) قابل مشاهده هستند.

در شکل ۱۳-ب اثر ترک بر روی شکل مود شعاعی و نیز یکنواختی جابه‌جایی در این شکل مود نشان داده شده است.

با ایجاد ترک ملاحظه می‌شود شکل مود شعاعی در پیزوالکتریک سالم، به مود نامتقارن با تغییر فرکانس رزونانس به ۳۰۶۴۱ هرتز تبدیل شده است.

در این شکل مود نزدیک به شکل مود شعاعی، به‌علاوه ترک موجب ایجاد مدهای متنوع و تکی در اطراف شکل مود اصلی شعاعی در فرکانس‌های ۳۰۰۷۱، ۳۲۰۹۸، ۳۳۵۷۵ و ۳۵۸۹۷ هرتز شده است. نتیجه تغییر فرکانس (کاهش) رزونانس در شبیه‌سازی از پیزو سالم به پیزو معیوب در آزمون‌های تجربی شکل ۱۰ نیز قابل ملاحظه است.

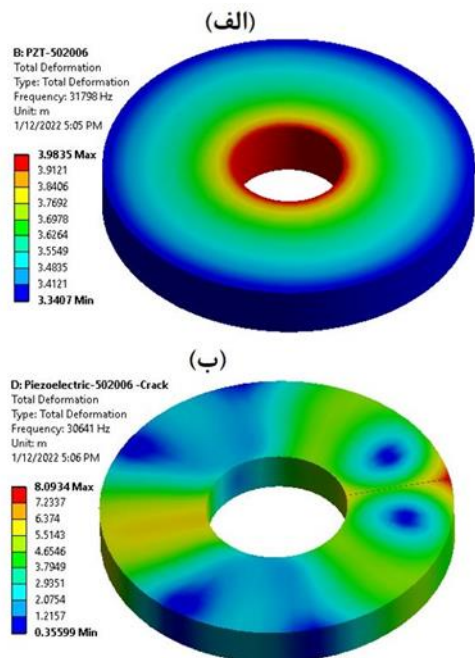
علاوه بر این موارد، عدم وجود مود ارتعاشی در نمودار تحلیل امپدانس می‌تواند دلیلی بر قطبش‌زدایی پیزوالکتریک‌ها باشد. این پدیده می‌تواند بر اثر اعمال میدان الکتریکی قوی در حدود  $500-200 \text{ V/mm}$  در خلاف جهت میدان قطبش‌زا رخ دهد؛ همچنین اعمال تنش مکانیکی بالا می‌تواند منجر به از بین رفتن جهت قطب‌ها در مواد پیزوالکتریک شود. افزایش دمای مواد پیزوالکتریک به بالای دمای کیوری منجر به قطبش‌زدایی می‌شود که در نمودار تحلیل امپدانس، پیکی مشاهده نمی‌گردد.

### ۶. نتیجه‌گیری

آزمون امپدانس یک روش مناسب برای مقایسه عملکرد پیزوالکتریک‌های مختلف و تشخیص خرابی در پیزوالکتریک‌ها است. در این پژوهش مقایسه کیفیت پیزوالکتریک‌های نو و یا کارکرده و راه‌حل تشخیص پیزوالکتریک سالم از معیوب توسط روش تحلیل امپدانس الکترومکانیکی مورد مطالعه قرار گرفته است.

مهم‌ترین نتایج حاصل از بررسی نتایج آزمون امپدانس رینگ‌های پیزوالکتریک عبارتند از:

- امپدانس مکانیکی علاوه بر وابستگی به جنس پیزوالکتریک و ابعاد و شکل آن به وجود خرابی و یا ترک‌های ریز در آن نیز وابسته است.
- وجود عیب در پیزوالکتریک موجب تغییر در نتایج آزمون امپدانس الکترومکانیکی پیزوالکتریک، شامل ایجاد مودهای اضافه، تغییر فرکانس رزونانس مود شعاعی اصلی و کاهش مقدار ضریب کیفیت پیزوالکتریک می‌شود.
- وجود مودهای روزنانشی متعدد در نمودار فرکانس-امپدانس بیانگر وجود ترک در پیزوالکتریک است.
- ترک‌های ریز غیرمشهود به‌طور معمول اثر خود را به‌صورت پیک ریز در کنار پیک رزونانشی اصلی پیزوالکتریک نمایش می‌دهند.



شکل ۱۳. اثر ترک بر روی تغییر یکنواختی جابه‌جایی و برهم‌خوردن

شکل مود شعاعی ارتعاشی در ابعاد  $6 \times 20 \times 50$  میلی‌متر

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، ترک منجر به از بین رفتن تقارن تنش مکانیکی و تغییر شکل در مودهای ارتعاشی شده و در نتیجه تمرکز تنش حاصل سبب رشد ترک در سیکل‌های پی‌درپی ارتعاشی شده و این در نهایت به شکست نهایی منجر می‌شود.

براساس پارامترهای خروجی آزمون امپدانس می‌توان کیفیت پیزوهای تولید شده و یا کارکرده را ارزیابی و با یکدیگر مقایسه نمود. با بررسی نمودار امپدانس آکوستیکی پیزوالکتریک، می‌توان در مرحله کنترل کیفی خطوط تولید کیفیت پیزوالکتریک‌های ساخته شده را مورد ارزیابی قرار داد. همچنین در زمان تعمیرات اساسی مبدل می‌توان برای بررسی عملکرد پیزوالکتریک‌ها و تشخیص پیزوالکتریک صدمه دیده و خراب از پیزوالکتریک کارکرده و سالم بهره برد. در نتیجه روش پایش سلامت و کیفیت پیزوالکتریک از طریق آزمون امپدانس توسط دستگاه تحلیل‌گر امپدانس یک روش قابل اطمینان و غیرمخرب در این زمینه است.

## ۷. قدردانی

این مقاله با حمایت و استفاده از قطعات و تجهیزات شرکت دانش بنیان فراصوت تجهیز ایرانیان یکی از شرکت‌های پیشرو در زمینه ساخت و تجاری‌سازی تجهیزات و ماشین‌آلات با فناوری فراصوت توان بالا به انجام رسیده است. نویسندگان کمال تشکر را از مدیران و متخصصان این شرکت در مراحل اجرای پژوهش دارند.

- در صورتی که پیزو سالم و بدون عیب باشد در منحنی نباید هیچ‌گونه مود رزونانسی دیگری مشاهده شود و وابسته به ابعاد پیزوالکتریک یک یا دو مود رزونانسی شعاعی در محدوده ۱۰-۱۶۰ kHz قابل رویت باشد
- در شبیه‌سازی پیزوالکتریک‌ها، وجود ترک موجب ایجاد مودهای غیرممتقارن و مضاعف متنوع حول شکل مود شعاعی اصلی می‌گردد.

## ۸. مأخذ

- [1] Gallego-Juárez, Juan A., and Karl F. Graff, eds., "Power ultrasonics: applications of high-intensity ultrasound", Elsevier, 2014.
- [2] Abedini, Rezvan, Amir Abdullah, Yunes Alizadeh, and Vahid Fartashvand, "A Roadmap for application of high-power ultrasonic vibrations in metal forming", *Modares Mechanical Engineering*, 2017, Vol.16, no.10, pp.323-334.
- [3] Ghafarzadeh, Mahdi, Rezvan Abedini, and Rohollah Rajabi, "Optimization of ultrasonic waves application in municipal wastewater sludge treatment using response surface method", *Journal of Cleaner Production*, 2017, Vol.150, pp.361-370.
- [4] Fartashvand, Vahid, Amir Abdullah, and Seyed Ali Sadough Vanini, "Effects of high-power ultrasonic vibration on the cold compaction of titanium", *Ultrasonics sonochemistry*, 2017, Vol.36, pp.155-161.
- [5] Abedini, Rezvan, Amir Abdullah, and Yunes Alizadeh, "Ultrasonic hot powder compaction of Ti-6Al-4V", *Ultrasonics Sonochemistry*, 2017, Vol.37, pp.640-647.
- [6] Sepehry, Naserodin, Mahnaz Shamshirsaz, and Ali Bastani, "Experimental and theoretical analysis in impedance-based structural health monitoring with varying temperature", *Structural Health Monitoring*, 2011, Vol.10, no.6, pp.573-585.
- [7] Sepehry, N., M. Shamshirsaz, and F. Bakhtiari Nejad, "Low-cost simulation using model order reduction in structural health monitoring: Application of balanced proper orthogonal decomposition", *Structural Control and Health Monitoring*, 2017, Vol.24, no.11, p.e1994.
- [8] Perez, Nicolas, Marco AB Andrade, Flavio Buiochi, and Julio C. Adamowski, "Identification of elastic, dielectric, and piezoelectric constants in piezoceramic disks", *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, 2010, Vol.57, no.12, pp.2772-2783.
- [9] Park, Gyuhae, Hoon Sohn, Charles R. Farrar, and Daniel J. Inman, "Overview of piezoelectric impedance-based health monitoring and path forward", *Shock and vibration digest*, 2003, Vol.35, no.6, pp.451-464.
- [10] Na, Wongi S., and Jongdae Baek, "A review of the piezoelectric electromechanical impedance based structural health monitoring technique for engineering structures", *Sensors*, 2018, Vol.18, no.5, pp.1307.

- [11] A.M. Abdel-Fattah, M.G.S. Ali, N.Z. Elsayed, Gharieb A. Ali, "Piezoceramic Materials for Ultrasonic Probes" *Egypt. J. of Solids*, 2005, Vol.18, no.121.
- [12] Frederick. J. R., "Ultrasonic engineering", *John Wiley and Sons*, 1965.
- [13] Ultrasonic Handbook, HONDA Electronic Co., 2019, Ch.4, pp.200-206.
- [14] <https://www.morgantechnicalceramics.com/en-gb/materials/>. Piezoelectric Ceramics Properties & Applications, Morgan Matroc Inc, Last visit: 2022/08/09.
- [15] Ceramic, P. I., "*Piezoelectric ceramic products: fundamentals, characteristics and applications*", 2011, pp.107-109.
- [16] Mathieson, Andrew C., "*Nonlinear characterisation of power ultrasonic devices used in bone surgery*", PhD diss., University of Glasgow, 2012.
- [17] M. Prokic, Piezoelectric Converters Modelling and Characterization, MPI Interconsulting, 2004, [https://www.mastersonics.com/documents/book\\_transducers\\_modeling.pdf](https://www.mastersonics.com/documents/book_transducers_modeling.pdf).
- [18] Touch type Ultrasonic Impedance Analyzer, C.A.o. Sciences (Ed.), Tsinghua University of department of Automation and Institute of acoustics, 2010, p.7.

پی نوشت:

- 
1. Transducer
  2. Sandwich Langevin Transducer
  3. Reactance
  4. Butterworth–Van Dyke (BVD)
  5. Impedance Analyzer
  6. Piezoelectric Effect
  7. Pierre Curie
  8. Polarization
  9. Actuator
  10. Lead Zirconate Titanate (PZT)
  11. Cure Temperature
  12. Sweep
  13. New
  14. Worked
  15. Damaged
  16. ANSYS Workbench