



## شبیه‌سازی اجزا محدود و ارزیابی عملکرد تجربی رادیاتور ارتعاشی فراصوت

آریانا اکبری، رضوان عابدینی\*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۰۶  
بازنگری: ۱۴۰۲/۰۹/۰۶  
پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۱۸  
ارائه آنلاین: ۱۴۰۲/۱۱/۰۶

### کلمات کلیدی:

رادیاتور فراصوتی  
ارتعاشات فراصوتی  
شبیه‌سازی اجزاء محدود  
فرکانس تشدید  
دامنه ارتعاشات

**خلاصه:** در پژوهش حاضر از روش شبیه‌سازی اجزاء محدود و آزمون‌های تجربی برای طراحی، ساخت و ارزیابی عملکرد یک مجموعه رادیاتور ارتعاشی فراصوتی توان بالا بهره گرفته شده است. دو هدف اصلی در طراحی دستیابی به فرکانس تشدید نامی ۲۰ کیلوهرتز در شکل مود ارتعاش طولی مجموعه ترانسدیوسر و بوستر و شکل مود خمشی صفحه رادیاتور و دور نمودن شکل مدهای مزاحم از محدوده فرکانسی شکل مود اصلی است. پس از طراحی و ساخت نمونه براساس نتایج شبیه‌سازی، آزمون‌های تجربی تحلیل مودال، آزمون ضربه و تحلیل امیدانسی برای ارزیابی مشخصات عملکردی مجموعه رادیاتور ارتعاشی فراصوت انجام گرفت. جهت صحت‌سنجی، نتایج شبیه‌سازی شامل فرکانس تشدید و موقعیت گره و شکم ارتعاشی با نتایج آزمون تجربی مقایسه شدند. نتایج آزمون‌های تجربی تعیین فرکانس تشدید و مقایسه آن با نتایج شبیه‌سازی (خطای کمتر از ۵٪، درصد)، بیانگر دقت پیشبینی نتایج و تطابق فرکانس تشدید با مقدار نامی طراحی شده است. همچنین شکل مدهای مزاحم با فاصله قابل قبولی از شکل مود اصلی خمشی رادیاتور قرار داشتند. در نهایت نتایج آزمون اندازه‌گیری دامنه ارتعاشی بیانگر تطابق موقعیت نقاط گره و شکم ارتعاشی در آزمون تجربی با مقادیر شبیه‌سازی اجزاء محدود است.

### ۱- مقدمه

و گازها و مواد چند فازی مورد بررسی محققان قرار گرفته است. به عنوان مثال اعمال ارتعاشات به مواد جامد فلزی موجب کاهش استحکام لحظه‌ای آن‌ها می‌شود که به نرم‌شدگی آکوستیکی معروف است [۳]. اعمال ارتعاشات فراصوتی به محل اتصال دو قطعه ترموپلاستیک و جذب آن موجب ایجاد گرما و در نتیجه اتصال دو قطعه به یکدیگر می‌گردد [۴]. اعمال ارتعاشات فراصوتی به محیط مایع نیز اثراتی مانند کاویتاسیون و برهم خوردگی جریان (استریمینگ) را در پی دارد که این پدیده حوزه فناوری سونوشیمیایی را رشد داده است [۵].

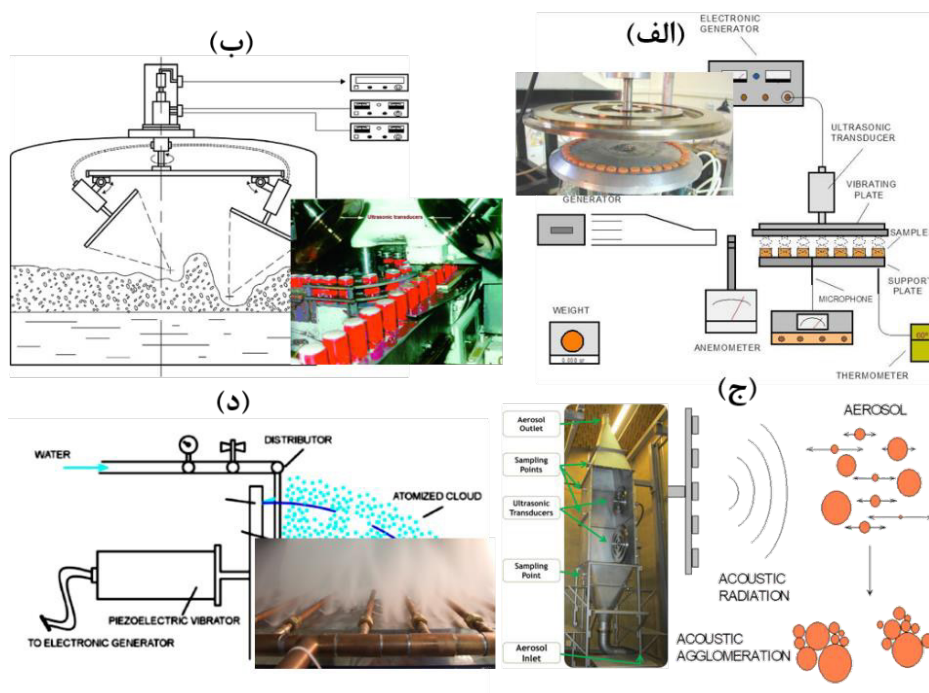
اعمال ارتعاشات توان بالای فراصوتی به محیط گازها و مواد چند فازی نیز اثرات منحصر به فردی در پی دارد. مانند کاربرد فناوری فراصوت توان بالا در خشک کردن مواد غذایی، گاز زدایی و فوم زدایی در صنعت غذایی، جدا کردن ذرات ریز در هوا، اتمایز کردن مایعات و ... که در همه آنها میدان آکوستیکی ایجاد شده توسط یک رادیاتور فراصوتی موجب ایجاد اثرات در هوا و یا محیط چند فازی می‌شود [۲، ۶]. شکل ۱ انواع کاربردهای صنعتی فناوری رادیاتور فراصوتی را شامل (الف) خشک کن مواد غذایی (به تنهایی و

توجه به صوت و ارتعاش از دیرباز در زمینه‌های تحقیقاتی و صنعتی مهندسی مکانیک مورد توجه بوده است. در این کاربردها محدوده فراتر از شنوایی انسان (۲۰ کیلوهرتز) به ناحیه فراصوت معروف است. کاربردهای فراصوت به دو حوزه فراصوت: (۱) توان پایین و فرکانس بالا و (۲) توان بالا و فرکانس پایین تقسیم بندی می‌شود. اولی در حوزه فرکانسی بیش از ۱۰۰ کیلوهرتز و توان کمتر از چند وات، بیشتر در کاربردهای تشخیص و شناسایی غیر مخرب مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱]. در این کاربرد فراصوت اثر محسوسی بر روی محیط نمی‌گذارد، بلکه اثر محیط و شرایط محیط بر روی امواج فراصوت مورد بررسی و ارزیابی قرار می‌گیرد. اما دومی در محدوده فرکانسی ۱۵ الی ۱۰۰ کیلوهرتز و توان در حدود ۵۰ وات الی ۳ کیلووات قرار دارد و اعمال این ارتعاشات با این قدرت به محیط موجب اثرات فیزیکی و شیمیایی بر روی محیط‌های پیرامون می‌شود [۲].

اعمال ارتعاشات توان بالای فراصوتی به محیط‌های مختلف جامد، مایع

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: rezvanabedini@iust.ac.ir



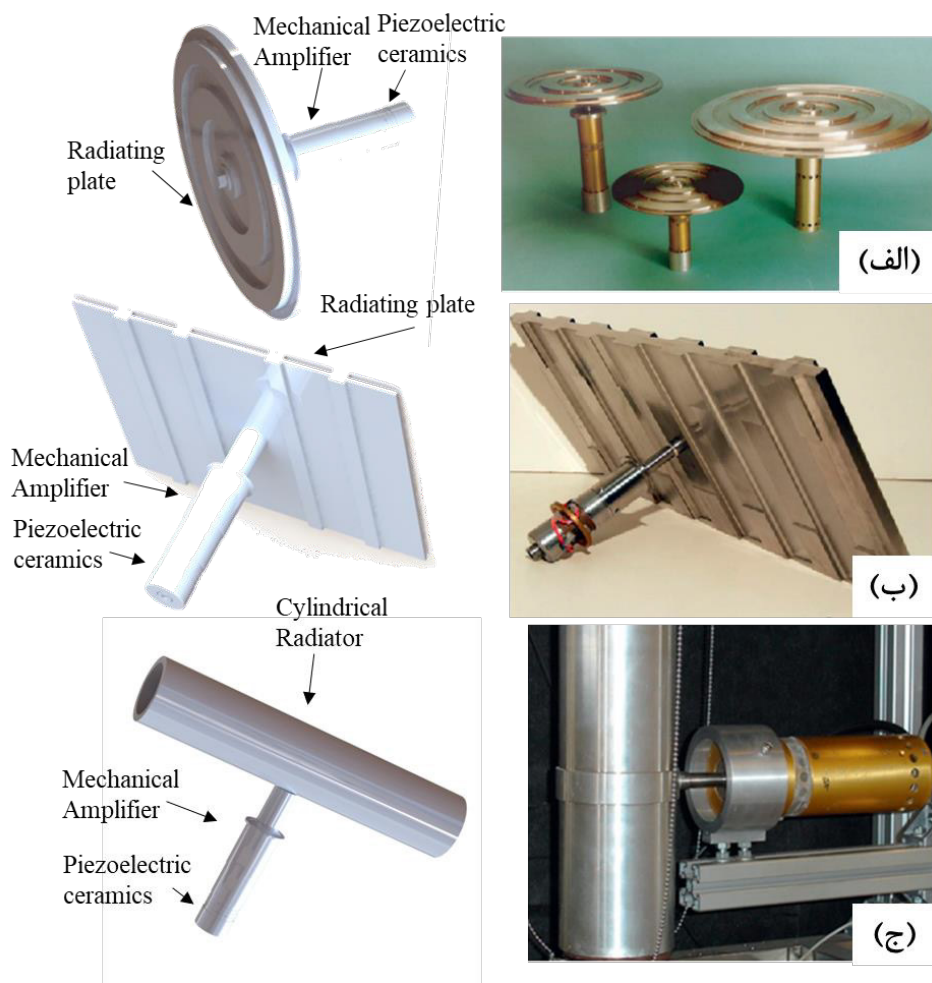


شکل ۱. کاربرد رادیاتورهای فراصوتی: (الف) خشک کردن مواد غذایی، (ب) فوم زدایی در صنایع نوشیدنی، (ج) جداسازی ذرات ریز در هوا و (د) اتمایز کردن مایعات [۷]

Fig. 1. Applications of ultrasonic radiators: (a) Food drying, (b) Defoaming in the beverage industry, (c) Separation of fine particles in the air and (d) Atomization of liquids [7]

از این رادیاتورها بعضاً در جدا نمودن ذرات ریز در هوا استفاده می‌شود. رادیاتورهای لوله‌ای نیز شکل خاصی از اجزای ارتعاشی هستند که به طور معمول برای خشک کردن مواد غذایی استفاده می‌شوند (شکل ۲-ج). اعمال ارتعاشات فراصوتی توان بالا در هوا با چالش‌های بسیار مهمی همراه است. به دلیل اختلاف امپدانس آکوستیک هوا با محیط در انتقال ارتعاشات فراصوتی، اغلب هوا به عنوان یک سم در برابر امواج آکوستیکی عمل می‌کند و موجب تضعیف شدید و یا از بین رفتن قدرت امواج فراصوتی در ناحیه انتقال از یک محیط به محیط دیگر می‌گردد. برای رفع این مشکل در رادیاتورهای ارتعاشی نوین با بزرگ نمودن ابعاد و طراحی خاص در محل انتقال ارتعاشات به هوا، درصد انتقال قدرت امواج آکوستیکی به هوا به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته است. اولین بار گوآرز [۷] و همکاران ایده طراحی رادیاتور ارتعاشی برای انتقال ارتعاشات توان بالای فراصوتی به هوا را ارائه نمودند. سپس تحقیقات در این زمینه در ابعاد آزمایشگاهی، نیم صنعتی

یا هیبرید با سایر فناوری‌ها، (ب) فوم و کف زدایی از مایعات و مواد نوشیدنی در خط تولید، (ج) جدا کردن ذرات ریز در هوا و (د) اتمایز کردن مایعات در ابعاد میکرو و نانو را نشان داده است [۶، ۷]. در زمینه طراحی رادیاتور ارتعاشی تحقیقات متنوعی انجام شده است. شکل ۲ انواع رادیاتورها با شکل (الف) دایروی، (ب) مستطیلی و (ج) لوله‌ای را نشان داده است [۸]. در هر یک از شکل‌ها ویژگی‌های منحصر به فردی وجود دارد که آن‌ها را برای کاربردهای مشخص متمایز می‌نماید. در رادیاتورهای صفحه‌ای دایروی، دامنه ارتعاشی در بخش‌های داخلی بیشتر و در نواحی خارجی کمتر است. همچنین این امکان وجود دارد که بتوان امواج را در یک ناحیه مشخص با یک فاصله مشخص از رادیاتور متمرکز نمود. به همین دلیل از این نوع شکل بیشتر برای کاربردهای خشک کردن مواد غذایی و یا فوم و کف زدایی در صنایع غذایی استفاده می‌شود (شکل ۲-الف). در حالی که در رادیاتورهای مستطیلی (شکل ۲-ب) می‌توان به دامنه یکنواخت‌تری در ابعاد بزرگتر رادیاتور دست یافت [۹]. به همین دلیل



شکل ۲. انواع شکل و کاربرد [۲] و نمای مفهومی رادیاتورهای ارتعاشی فراصوتی توان بالا، (الف) دایروی، (ب) مستطیلی و (ج) استوانه‌ای

Fig. 2. Shape type, application [2] and conceptual design of high power ultrasonic vibration radiators, a) Circular, b) Rectangular and c) Cylindrical

دست یافت. اما دو عامل خستگی اجزای ارتعاشی و رفتار غیرخطی الاستیک در ولتاژ و دامنه‌های بالاتر به طور معمول مشکل‌ساز هستند. همچنین در توان‌های بالاتر مبدل‌های ارتعاشی، پیزوالکتریک‌ها ممکن است در اثر اتلاف حرارتی و ایجاد دمای بالا، دچار پدیده دیپولاریزاسیون شوند.

تغییر فرکانس تشدید<sup>۱</sup> و برهم کنش بین شکل مدهای مزاحم از عوامل رفتار غیرخطی رادیاتورهای ارتعاشی هستند [۱۲، ۱۳]. برای این منظور طراحی و شبیه‌سازی باید به گونه‌ای انجام شود که شکل مدهای مزاحم در دورترین فاصله فرکانسی از شکل مود اصلی ارتعاشی قرار گیرند [۱۴، ۱۵].

و صنعتی توسط محققان دیگر مورد بررسی قرار گرفت [۱۰]. در طراحی مبدل‌های فراصوتی توان بالا، اغلب از شکل مود ارتعاش طولی برای ایجاد و انتقال ارتعاشات فراصوتی استفاده می‌شود. در این موارد برای اجتناب از ایجاد شکل مود شعاعی، اغلب قطر اجزای ارتعاشی کمتر از یک‌چهارم طول موج طولی در نظر گرفته می‌شود [۱۱]. برای ایجاد ارتعاشات و اعمال آن به محیط گازی، چالش‌هایی در حوزه‌های الکتریکی، مکانیکی و دمایی وجود دارد. افزایش ضریب کیفیت مکانیکی مجموعه‌های ارتعاشی موجب افزایش توان قابل استحصال از آن می‌گردد. در طراحی مکانیکی با دستیابی به دامنه ارتعاش زیاد می‌توان به چگالی انرژی ارتعاشی بالاتری

1 Resonance

## ۲- طراحی کلی رادیاتور فراصوتی

برای طراحی کلی مجموعه رادیاتور فراصوتی باید نکات ذیل را مد نظر قرار داد: (۱) صفحه ارتعاشی در شکل مود خمشی خود ارتعاش خواهد نمود. (۲) فرکانس تحریک باید منطبق با فرکانس تشدید شکل مود خمشی صفحه ارتعاشی باشد. (۳) نقطه گره در محل اتصال مجموعه ارتعاشی به بدنه (برای جلوگیری از زیاد گرم شدن و عدم انتقال ارتعاشات) باید به دقت انتخاب شود. (۴) برای اجتناب از اثر متقابل مودهای ارتعاشی، شکل مودهای مزاحم نباید ضریب عدد صحیح مود اصلی باشند و یا نباید در مجاورت مود در حال تحریک باشند. با تغییر شکل یک رادیاتور ساده و ایجاد پله در دو طرف رادیاتور، می‌توان به میدان‌های آکوستیکی مختلف دست یافت. شکل ۳ نمای طراحی مفهومی مجموعه رادیاتور دایروی پله ای ارتعاشی شامل مجموعه ترنسدیوسر و بوستر (شکل ۳-ب) و صفحه رادیاتور (شکل ۳-ج) را نمایش داده است. برای طراحی کلی مجموعه رادیاتور ابتدا صفحه ارتعاشی رادیاتور طراحی شده و در نهایت به مجموعه ترنسدیوسر و بوستر مونتاژ می‌گردد (شکل ۳-الف). برای ایجاد امواج آکوستیکی ایستا در مجموعه رادیاتور لازم است فرکانس طراحی رادیاتور با فرکانس تشدید مجموعه ترنسدیوسر و بوستر برابر باشد (در این پژوهش فرکانس تشدید طراحی ۲۰ کیلوهرتز است).

در طراحی رادیاتورهای ارتعاشی فراصوتی با شکل مود ارتعاش خمشی<sup>۲</sup> (شکل ۳-د)، نقاط گره به صورت خط موازی (خط گره<sup>۳</sup>) در رادیاتورهای مستطیلی و به صورت دایره‌های هم مرکز (دایره گره<sup>۴</sup>) در رادیاتورهای دایروی ظاهر می‌شوند. برای دستیابی به یک میدان مشخص باید دو نکته طراحی را در نظر داشت: (۱) تغییر ارتفاع تنها در موقعیت‌های گره ایجاد شود و (۲) وابسته به میدان آکوستیک مد نظر یک اختلاف ارتفاع مشخص ( $h_i$ ) در محل تغییر ارتفاع ایجاد شود. مطابق شکل ۳-د اگر اختلاف ارتفاع پله‌های رادیاتور برابر نصف طول موج ارتعاشی صوتی در هوا ( $\frac{\lambda}{2}$ ) باشند می‌توان به یک میدان آکوستیک همگن دست یافت [۱۰]. اگر هدف تمرکز ارتعاشات در یک ناحیه مشخص در مقابل رادیاتور باشد شکل ۴-الف نیاز است ابعاد اولیه براساس (۱) طراحی و ابعاد نهایی (طراحی جزئی) توسط شبیه‌سازی اجزاء محدود تعیین شود [۲]. در این رابطه پارامترهای  $d_i$ ،  $r_i$  و  $Z_0$  به ترتیب شعاع موقعیت مرکز پله، فاصله نقطه کانونی تا مرکز سطح مرتعش هر پله، فاصله نقطه کانونی تا سطح رادیاتور در جهت محور مرکزی می‌باشد.

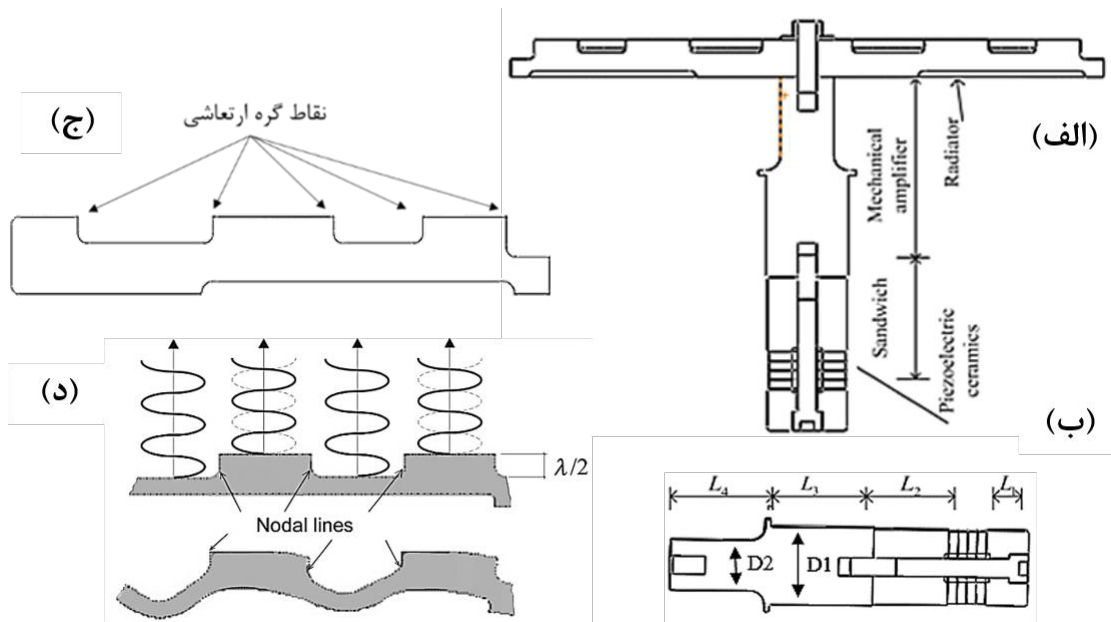
مشکل دیگر انتقال ارتعاشات به هوا می‌باشد. به دلیل اختلاف زیاد امپدانس آکوستیک اجزای ارتعاشی و هوا، تقریباً تمامی ارتعاشات در موقعیت مرزی بین رادیاتور و هوا تلف شده و مانع انتقال ارتعاشات به هوا می‌گردند. در این موارد تحقیقات مختلف نشان داده است که افزایش سطح ارتعاشی (سطح مقطع زیاد صفحه) موجب افزایش تابش تشدید و انطباق خوب صفحه با محیط و در نتیجه یک راهکار مناسب برای افزایش ضریب انتقال ارتعاشات به هوا است [۹]. از طرفی به دلیل افزایش دامنه بیش از حد و خستگی ماده رادیاتور نمی‌توان ابعاد سطح را از یک اندازه مشخص بیشتر نمود [۱۶].

اغلب پژوهش‌های انجام شده در زمینه طراحی و تحلیل رادیاتورهای ارتعاشی فرکانس‌های مختلف مانند ۲۱، ۲۵ و ۳۰ کیلوهرتز را مورد بررسی قرار داده‌اند. در عین حال فرکانس کاربردی ۲۰ کیلوهرتز که در بیشتر کاربردهای صنعتی فناوری فراصوت توان بالا مورد استفاده قرار می‌گیرد به دلیل وجود شکل مودهای مزاحم نزدیک به شکل مود اصلی کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین اغلب تحقیقات به کاربردها [۱۷] و شبیه‌سازی و اندازه‌گیری میدان آکوستیک حاصل از رادیاتور [۱۸، ۱۹] پرداخته اند و کمتر تحقیق جامعی در زمینه طراحی و تحلیل و بررسی رفتار ارتعاشی رادیاتورهای ارتعاشی توان بالای فراصوتی انجام شده است.

بهبود طراحی و دستیابی به عملکرد مطلوب همیشه یکی از اهداف مهم در طراحی و ساخت سیستم‌های توان بالای فراصوتی مورد استفاده در تحقیقات علمی و کاربردهای صنعتی بوده است. روش‌های عددی مانند شبیه‌سازی اجزاء محدود یک ابزار مناسب برای تحقق این هدف است. در تحقیق حاضر با هدف طراحی و ساخت یک رادیاتور ارتعاشی در فرکانس تشدید ۲۰ کیلوهرتز، ابتدا با انتخاب برخی پارامترهای ورودی، طراحی مفهومی و کلی مجموعه رادیاتور ارتعاشی شامل ترنسدیوسر، بوستر و هورن انجام شده است. سپس با هدف دستیابی به اهداف طراحی، ابعاد مهم صفحه رادیاتور تغییر داده شد به گونه ای که فرکانس تشدید ۲۰ کیلوهرتز برای رادیاتور بدست آید و شکل مودهای مزاحم قابل تحریک در فاصله مناسب از شکل مود ارتعاش اصلی رادیاتور قرار داشته باشند. پس از تغییر ابعاد و بهبود طراحی، صفحه رادیاتور ساخته شد و به طور مستقل توسط آزمون ضربه مودال و دستگاه آزمون امپدانس مورد ارزیابی قرار گرفت. پس از دستیابی به فرکانس تشدید طراحی، صفحه رادیاتور به مجموعه ترنسدیوسر و بوستر ارتعاشی مونتاژ شد و توسط آزمون امپدانس فرکانس تشدید و توسط آزمون حسگر درزا<sup>۱</sup> ارتعاشی، دامنه ارتعاشی نواحی مختلف بر روی رادیاتور تعیین شد.

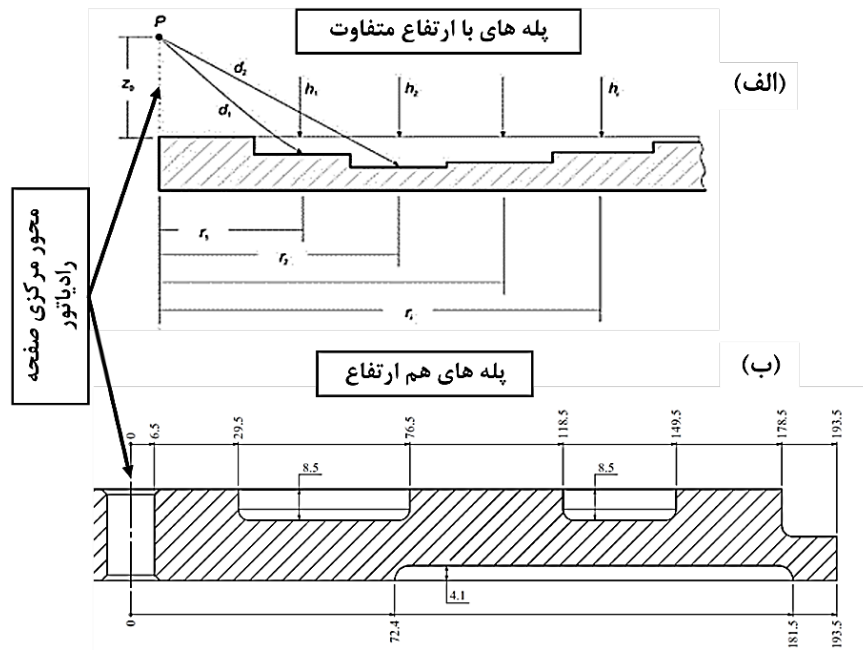
2 Flexural Mode Shape  
3 Nodal Line (NL)  
4 Nodal Circle (NC)

1 Gap Sensor



شکل ۳. طراحی مفهومی مجموعه رادیاتور ارتعاشی شامل ترنسیدیوسر، بوستر و صفحه رادیاتور دایروی

Fig. 3. Schematic view of ultrasonic airborne including transducer, booster and circular radiator plate



شکل ۴. (الف) رادیاتور پله ای با پله های با ارتفاع متفاوت (میدان متمرکز) و (ب) رادیاتور طراحی شده با پله های هم ارتفاع (میدان همگن)

Fig. 4. (a) Stepped radiator with steps of different heights (Concentrated field) and (b) Radiator designed with steps of the same height (Homogeneous field)

کمی تغییر می‌کند، اما از اثرات دمایی در تحلیل صرفنظر شده است. همچنین از لغزش شعاعی بین اجزاء ارتعاشی صرفنظر شده است و فرض می‌شود در حین موتاژ به اجزاء پیش‌تنش اعمال نشده است.

در شبیه‌سازی جنس قطعات پشت بند و تطبیق، پیزوالکتریک و الکتروود ترنسدیوسر به ترتیب فولاد ضد زنگ ۳۰۴، آلومینیوم (۷۰۷۵)، پیزوالکتریک و برنج انتخاب گردید. جنس بوستر ارتعاشی که وظیفه بزرگنمایی دامنه ارتعاشات ترنسدیوسر و نگهداری مجموعه ارتعاشی رادیاتور (از نقطه گره ارتعاشی) را به عهده دارد از فولاد ۲۰۸۰ انتخاب شد. جنس صفحه رادیاتور دایروی نیز آلیاژ آلومینیوم (۷۰۷۵) انتخاب شد. خواص مکانیکی مورد نیاز در شبیه‌سازی در جدول ۱ ارائه شده است. برای رسیدن به فرکانس نزدیک به ۲۰ کیلوهرتز و دستیابی به نقطه گره و شکم مناسب بر روی پله‌های ارتعاشی اندازه عمق شیارها و عرض شیارها و قطر کلی صفحه رادیاتور تغییر داده شد تا نتیجه مطلوب حاصل گردید.

### ۳-۲- نتایج مدل‌سازی اجزاء محدود

پس از شبیه‌سازی‌های انجام شده با هدف رسیدن به فرکانس نامی ۲۰ کیلوهرتز و ۵ گره ارتعاشی دایروی و قرار گرفتن پله‌ها بر روی نقاط گره برای صفحه دایره‌ای پلکانی شیاردار، شکل مود مورد نظر در فرکانس ۲۰۱۰۸ هرتز به دست آمد. شکل ۵-الف نتیجه شبیه‌سازی تحلیل مودال (شکل مود اصلی) در فرکانس ۲۰۱۰۸ هرتز و با ۵ گره ارتعاشی دایروی (شکل مود اصلی) و شکل ۵-ب شکل مود مجاور در فرکانس ۱۹۱۷۸ هرتز را نمایش داده است. در شکل مود ارتعاشی علامت‌های حداکثر و حداقل<sup>۳</sup> به ترتیب بیانگر موقعیت‌ها با حداقل (گره ارتعاشی) و حداکثر (شکم ارتعاشی) دامنه ارتعاشی در صفحه رادیاتور می‌باشند. ملاحظه می‌شود مود مزاحم در فاصله در حدود ۱ کیلوهرتزی از مود اصلی ارتعاشی قرار دارد. لازم به ذکر است برای این که شکل مود مجاور تحریک شود لازم است در نقطه مرکزی (محل اتصال به بوستر) دارای شکم ارتعاشی باشد. به دلیل این که شکل مود مجاور دارای گره ارتعاشی در مرکز خود است به احتمال زیاد در آزمون عملی تحریک نخواهد شد و فرکانس تشدید در نمودار آزمون تجربی مشاهده نخواهد شد.

پس از شبیه‌سازی‌های انجام شده با هدف رسیدن به فرکانس نامی ۲۰ کیلوهرتز و ۵ گره ارتعاشی دایروی و قرار گرفتن پله‌ها بر روی نقاط گره برای صفحه دایره‌ای پلکانی شیاردار و هم‌چنین با توجه به هدف دور نمودن شکل

$$d_i = [(z_0 + h_i)^2 + r_i^2]^{1/2} \quad (1)$$

$$d_i - d_{i-1} = \lambda / 2 \quad (2)$$

شکل ۴-الف رادیاتور دایروی پله‌ای با ارتفاع پله‌های متفاوت (برای ایجاد میدان صوتی متمرکز) و شکل ۴-ب رادیاتور طراحی و ساخته شده با پله‌های هم‌ارتفاع (برای ایجاد میدان صوتی همگن) را نشان داده است. براساس (۲) مقدار اولیه اختلاف ارتفاع برای فرکانس تشدید ۲۰ کیلوهرتز و با فرض سرعت صوت در هوا برابر ۳۴۳ متر بر ثانیه برابر ۸/۵ میلی‌متر بدست می‌آید.

### ۳-۳- شبیه‌سازی اجزاء محدود

#### ۳-۱- مدل‌سازی در نرم افزار

در تحلیل اجزا محدود رادیاتور از تحلیل مودال برای تعیین فرکانس‌های رزونانس، شکل مودهای ارتعاشی و موقعیت نقاط گره و شکم ارتعاشی استفاده شده است. طراحی رادیاتور ارتعاشی با پنج دایره گره ارتعاشی (NC=5) در (شکل ۴-ب) نشان داده شده است. شبیه‌سازی تحلیل مودال در نرم‌افزار انسیس ورکبنچ<sup>۱</sup> در ناحیه فرکانسی ۱۸ الی ۲۲ کیلوهرتز انجام شده است. اندازه مش در این شبیه‌سازی ۷ میلی‌متر در نظر گرفته شد. برای مشاهده شکل مودهای غیر متقارن در نتایج، مدل سه بعدی مجموعه ارتعاشی شبیه‌سازی مورد بررسی قرار گرفته است. برای تحلیل سه بعدی از المان تتراهدرال SOLID186 با سه درجه آزادی استفاده شده است. این المان برای مدل‌سازی پلاستیسیته، خزش، تغییرشکل زیاد و کرنش‌های بزرگ مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای تعیین فرکانس تشدید در تحلیل مودال، شرط مرزی اتصال کوتاه برای المان‌های الکترودها اعمال شده است. تحلیل شرایط تشدید، که در آن ولتاژ صفر بر همه اتصالات الکتریکی دیسک‌های سرامیک اعمال می‌شود، انجام گرفته است. این حالت همان شرایط اتصال کوتاه است که در آن تمام اتصالات الکتریکی به زمین متصل هستند. برای تحلیل مودال هیچ قید سازه‌ای<sup>۲</sup> در نظر گرفته نشده است. این حالت مشابه موقعیتی است که مجموعه ارتعاشی بدون هیچ قیدی از ناحیه گره آویزان شده است. اگرچه عملکرد پیزوالکتریک در طول آزمون با گرم‌شدن پیزوالکتریک

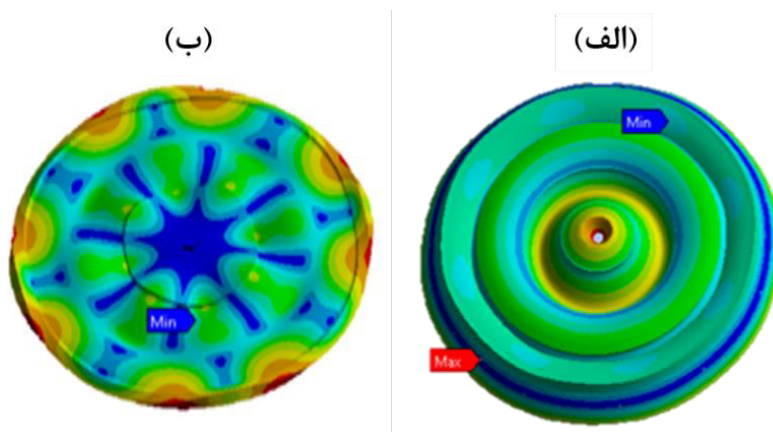
1 ANSYS Workbench

2 Structural constraint

جدول ۱. خواص مکانیکی اجزای ارتعاشی رادیاتور فراصوتی در شبیه سازی

Table 1. Mechanical properties of ultrasonic radiator vibrating components in simulation

جنس ماده	فولاد ۲۰۸۰	برنج	آلومینیوم ۷۰۷۵-T6	فولاد SS304	پیزوالکتریک PZT8
چگالی ( $\frac{kg}{m^3}$ )	۷۷۶۰	۸۴۸۴	۲۸۲۳	۸۰۰۰	۷۹۱۰
ضریب الاستیک (GPa)	۱۱۵	۱۰۵	۷۱٫۷	۲۰۵	-
نسبت پواسون	۰/۲۹	۰/۳۰	۰/۳۳	۰/۲۹	-



شکل ۵. نمایش (الف) شکل مود اصلی (فرکانس ۲۰۱۰۸ Hz) و (ب) شکل مود مجاور (۱۹۱۷۸ Hz)

Fig. 5. Modal analysis results (a) Main mode shape (frequency 20108 Hz) and (b) Adjacent mode shape (frequency 19178 Hz)

گرفت (شکل ۷). آزمایش‌های آزمون ضربه و تحلیل امپدانس به ترتیب برای تعیین مشخصه‌های فرکانسی صفحه رادیاتور (به تنهایی) و مجموعه مونتاژ شده رادیاتور فراصوتی و آزمون حسگر درز برای اندازه‌گیری دامنه جابجایی موقعیت‌های مختلف روی سطح مرتعش صفحه رادیاتور انجام گرفت.

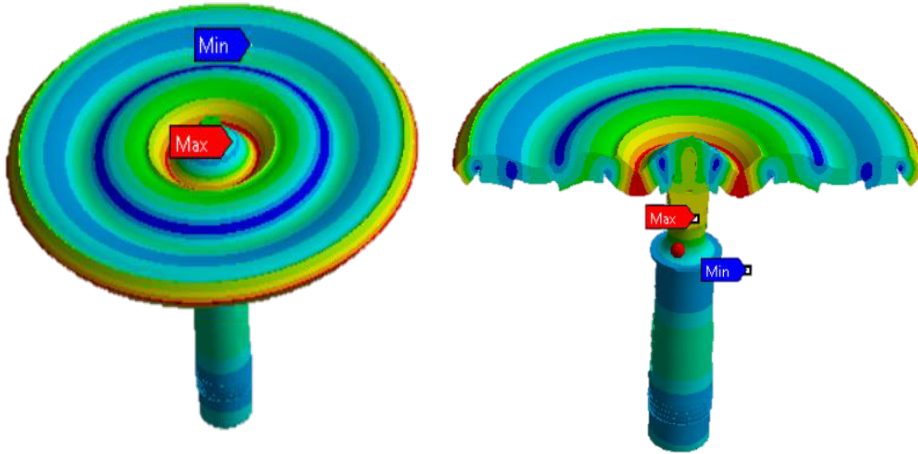
#### ۴-۱- آزمون ضربه

در حالی که صفحه ارتعاشی جدای از مجموعه ترنسدیوسر و بوستر باشد تنها راه تعیین فرکانس تشدید آزمون ضربه و یا تحریک توسط یک لرزاننده ارتعاشی می‌باشد. در آزمون ضربه، توسط یک ضربه زنده کروی به

مودهای مزاحم، شکل مود خمشی مورد نظر در رادیاتور ارتعاشی فراصوت در فرکانس ۱۹۹۶۷ هرتز به دست آمد. در شکل ۶ نتیجه تحلیل مودال در شبیه سازی اجزاء محدود نشان داده شده است. در این شکل مونتاژ رادیاتور همراه با ترنسدیوسر و بوستر نقاط گره و شکم به وضوح قابل مشاهده است.

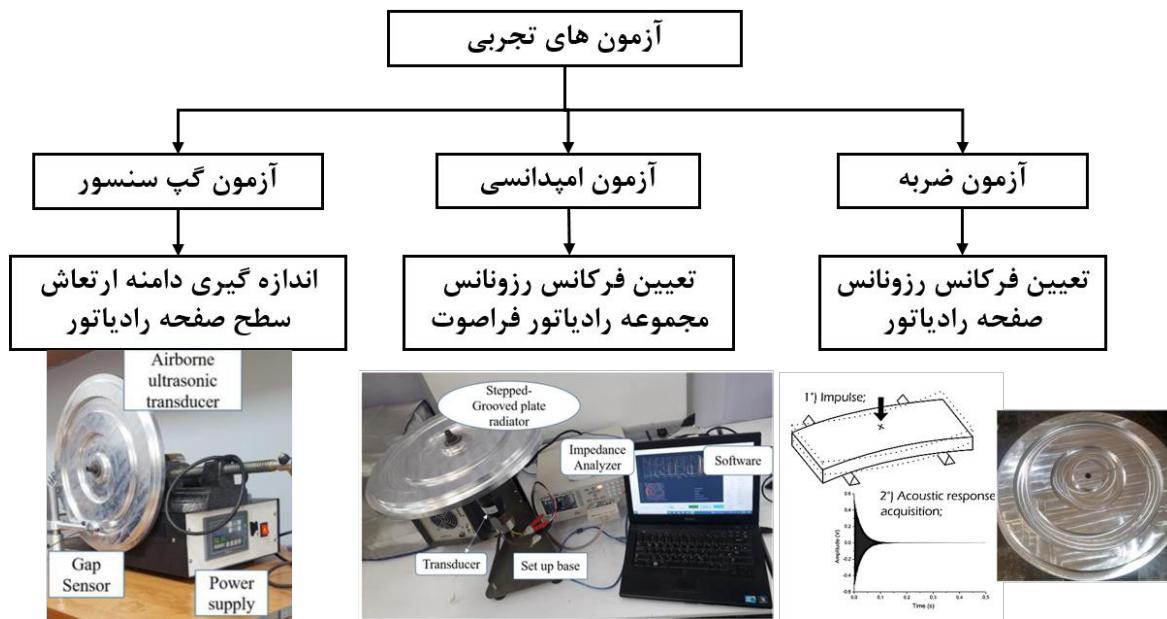
#### ۴- نتایج و بحث آزمون تجربی

به منظور صحت‌گذاری نتایج شبیه‌سازی و ارزیابی عملکرد مجموعه رادیاتور فراصوت (شامل ترنسدیوسر، بوستر و صفحه رادیاتور) سه آزمون تجربی (۱) آزمون ضربه، (۲) آزمون امپدانس و (۳) آزمون حسگر درز انجام



شکل ۶. نمایش شکل مود اصلی خمشی صفحه رادیاتور ارتعاشی در فرکانس تشدید ۱۹۹۶۷ هرتز

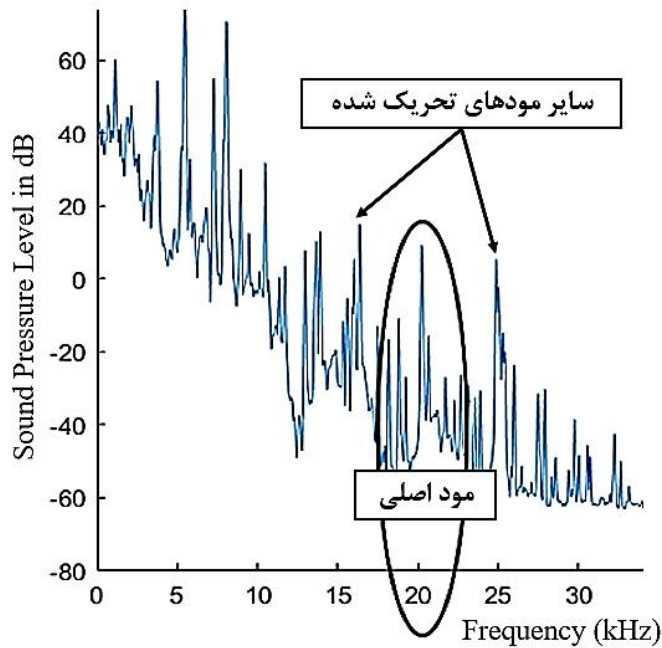
Fig. 6. Flexural mode shape of the circular radiator plate at the resonant frequency of 19967 Hz



شکل ۷. آزمونهای تجربی ارزیابی عملکرد مجموعه رادیاتور فراصوتی

Fig. 7. Experimental tests to evaluate the performance of the ultrasonic airborne





شکل ۸. نتیجه آزمون ضربه و فرکانس تشدید مود اصلی در فرکانس ۲۰۱۵۰ هرتز

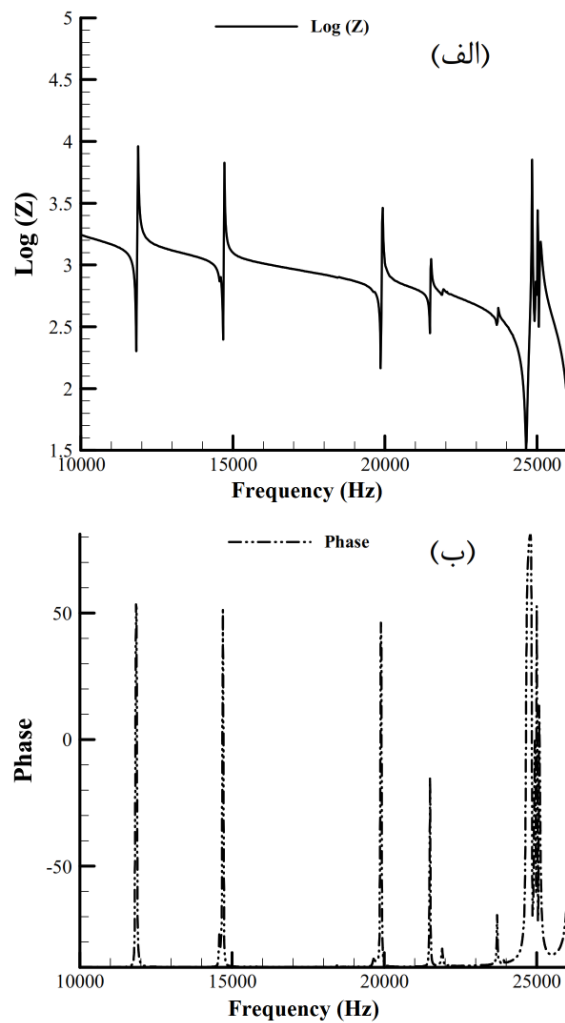
Fig. 8. Impact test results and the resonance frequency of the main mode (frequency 20150 Hz)

صفحه رادیاتور در حالتی که صفحه رادیاتور به طور آزاد قرار دارد به آن یک ضربه وارد شده است و توسط یک میکروفون و ضبط کننده فرکانس بالا (۹۶ کیلوهرتز) طیف صوتی ضربه حاصل استخراج شده است. همانطور که از شکل ۸ مشاهده می‌شود در نتیجه آزمون ضربه (بدون تحریک صفحه رادیاتور توسط منبع تغذیه و مجموعه ارتعاشی ترنسدیوسر و بوستر)، فرکانس تشدید برابر ۲۰۲۰۰ هرتز بدست آمده است. لازم به ذکر است در شبیه‌سازی رادیاتور دایروی در نرم افزار شبیه سازی نیز فرکانس تشدید ۲۰۱۰۸ هرتز حاصل شده بود که حدود ۰٫۵ درصد خطا را در پیش بینی فرکانس تشدید صفحه رادیاتور نشان می‌دهد.

کیلوهرتز می‌باشد. این دستگاه با اعمال ولتاژ در حدود ۰/۵ الی ۱/۵ ولت و دریافت بازخورد جریان، نمودار امپدانس الکتریکی و فاز امپدانس در محدوده فرکانسی تعیین شده را رسم می‌نماید. خروجی آزمون به صورت نمودار امپدانس-فرکانس و فاز-فرکانس در شکل ۹ ارائه شده است. در این نمودار فرکانس با حداقل مقدار امپدانس، فرکانس تشدید و فرکانس با حداکثر مقدار امپدانس، فرکانس ضد تشدید<sup>۱</sup> می‌باشد. فرکانس‌های تشدید اصلی در بازه ۱۰ الی ۲۵ کیلوهرتز برای شکل مودهای خمشی مجموعه رادیاتور فراصوتی به ترتیب برابر با ۱۱۸۲۰، ۱۴۶۸۰، ۱۹۸۶۰، ۲۴۶۶۰ و ۲۵۰۶۰ هرتز به دست آمدند. همانطور که ملاحظه می‌شود در بازه ۱۰ الی ۲۵ کیلوهرتز شکل مود طولی ترنسدیوسر و بوستر و خمشی رادیاتور (برای مودهای ارتعاشی خمشی با  $NC=7-3$ ) در نمودار ظاهر شده است. مقدار دقیق فرکانس تشدید با پنج دایره گره ( $NC=5$ ) برابر ۱۹۸۶۳ هرتز بدست آمده است. در حالی که فرکانس تشدید در شبیه‌سازی اجزاء محدود ۱۹۹۶۷ هرتز بدست آمده بود و این ۱۰۴ هرتز اختلاف بیانگر کمتر از ۰٫۵ درصد خطا در شبیه‌سازی می‌باشد. ضریب کیفیت مکانیکی ( $Q_m$ ) بیانگر بازده ارتعاشی اجزای تشکیل دهنده

۲-۴- آزمون امپدانسی

آزمون امپدانسی توسط دستگاه تحلیلگر امپدانس با قابلیت اندازه‌گیری در بازه ۱-۲۰۰ کیلوهرتز، حداقل تفکیک‌پذیری فرکانس ۰٫۱ هرتز، محدوده امپدانس الکتریکی بین ۱ اهم الی ۱ مگا اهم و خطای کمتر از ۰/۱ درصد در محدوده کارکرد انجام گرفته است. هدف از این آزمون تعیین فرکانس و بزرگی امپدانس تشدید تمامی شکل مودهای ارتعاشی در بازه ۱ تا ۲۶



شکل ۹. (الف) نمودار امپدانس-فرکانس و (ب) نمودار فاز-فرکانس در محدوده فرکانسی ۱۰ الی ۲۵ کیلوهرتز توسط دستگاه آزمون امپدانسی

Fig. 9. (a) Impedance-frequency and (b) Phase-frequency diagram in the frequency range of 10 to 25 kHz by the impedance test

و ضد تشدید ( $F_{sp}$ )، ضریب کیفیت مکانیکی ( $Q_m$ ) و مقدار حداقل ( $Z_{min}$ ) و حداکثر امپدانس ( $Z_{max}$ ) را ارائه نموده است.

همانطور که در نتایج آزمون امپدانسی مشخص است (شکل ۹) در اطراف شکل مود اصلی ارتعاشی، شکل مود مزاحم وجود ندارد و نزدیک‌ترین فرکانس‌های تحریک برابر ۱۴۶۸۰ و ۲۴۶۶۰ کیلو هرتز هستند. در ارتعاشات با توان بالا، اختلال رفتار غیر خطی موجب ایجاد ارتعاش در مودهای ناخواسته و مزاحم می‌گردد. این اختلال موجب گرم شدن، ایجاد نویز، دامنه ارتعاش ناکافی و قابلیت اطمینان پایین و حتی خرابی اجزای ارتعاشی می‌گردد. مشکل تداخل مودال باعث انتقال انرژی از تحریک شکل مود اصلی به دیگر

مجموعه رادیاتور و رابطه عکس با مقدار میرایی و اتلاف انرژی داخلی دارد (رابطه ۳). در رابطه ۳،  $F_s$  فرکانس تشدید و  $F_1$  و  $F_2$  مقادیر فرکانس نیمه توان مجموعه ارتعاشی می‌باشند.

$$Q_m = \frac{F_s}{F_2 - F_1} \quad (3)$$

جدول ۲ مشخصه‌های امپدانسی مجموعه رادیاتور فراصوتی شامل فرکانس تشدید ( $F_s$ )، فرکانس ضد تشدید ( $F_p$ )، اختلاف فرکانس تشدید

## جدول ۲. خروجی‌های آزمون امپدانس رادیاتور فراصوتی

Table 2. Impedance test results of ultrasonic circular radiator

$F_s$ (Hz)	$F_p$ (Hz)	$F_{sp}$ (Hz)	$Q_m$	$Z_{min}$ (OHM)	$Z_{max}$ (OHM)
۱۹۸۶۳	۱۹۹۰۹	۴۶	۱۳۲۴/۷۴	۱۳۴/۵۳	۴۲۰۵/۸۵

تحلیل مودال مقادیر حداکثر دامنه‌ها یکسان سازی شده‌اند. باید در نظر داشت در این مقایسه موقعیت نقاط گره نسبت به محور مرکزی مهم است و نه مقدار دامنه ارتعاش. نقاط با حداقل دامنه ارتعاشی (گره ارتعاشی) مطابق با طراحی جزئی در شکل ۴-ب در فواصل ۲۹، ۷۶، ۱۱۸، ۱۴۹ و ۱۷۸ میلی‌متر از محور مرکزی قابل مشاهده هستند.

نتایج آزمون‌های ضربه و امپدانس در تعیین فرکانس تشدید شکل مود خمشی اصلی رادیاتور ارتعاشی و نتیجه آزمون اندازه‌گیری دامنه ارتعاش در تعیین موقعیت‌های گره ارتعاشی در سطح صفحه رادیاتور بیانگر دقت شبیه‌سازی اجزاء محدود تحلیل مودال در پیش‌بینی رفتار ارتعاشی مجموعه‌های ارتعاشی می‌باشد. بدین صورت می‌توان انواع رادیاتورهای صفحه‌ای دایروی و مستطیلی و رادیاتورهای لوله‌ای را برای کاربرد در انواع فرایندهای صنعتی نظیر خشک‌کن‌ها، جداکننده‌های چند فاز و فوم زدایی در صنایع غذایی و دارویی طراحی نمود.

### ۵- نتیجه‌گیری

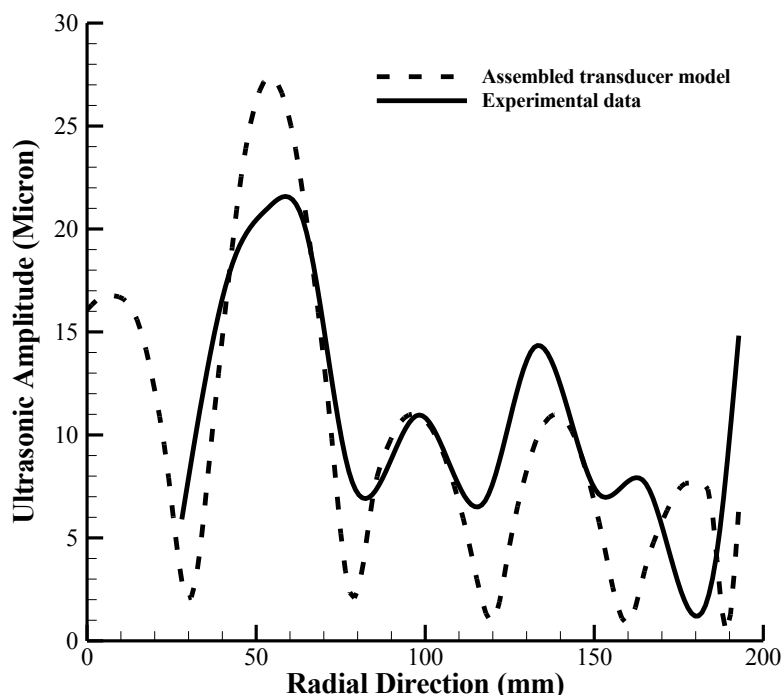
در این پژوهش طراحی جزئی و ساخت یک مجموعه رادیاتور فراصوتی توان بالا بر پایه نتایج شبیه‌سازی اجزاء محدود تحلیل مودال انجام شده است. هدف اصلی در طراحی جزئی دستیابی به فرکانس تشدید نامی مد نظر (۲۰ کیلوهرتز) و در عین حال دور نمودن شکل مودهای مزاحم ارتعاشی قابل تحریک از شکل مود اصلی (مود خمشی رادیاتور) بوده است. پس از ساخت صفحه رادیاتور دایروی، بر روی مجموعه ترانس‌دیوسر و بوستر نصب گردید. به منظور ارزیابی عملکرد و صحت سنجی نتایج شبیه‌سازی اجزاء محدود، آزمون‌های تجربی شامل آزمون ضربه مودال، آزمون امپدانس و آزمون اندازه‌گیری دامنه ارتعاش بر روی مجموعه رادیاتور فراصوتی انجام گرفت. نتایج آزمون مودال و آزمون امپدانس نشان دهنده تطابق نتایج فرکانس تشدید مجموعه ساخته و مونتاژ شده با فرکانس نامی ۲۰ کیلوهرتز است. همچنین

مودهای ناخواسته می‌شود و مانع انتقال توان می‌گردد. راه حل اصلی در اینجا جدا کردن و فاصله دادن مودهای مزاحم از شکل مود تنظیم شده اصلی است [۱۳]. براساس داده‌های آزمون امپدانس مشخص است که مودهای مزاحم اطراف شکل مود اصلی با فاصله مناسبی از فرکانس تشدید قرار دارند و در کارکرد رادیاتور در فرکانس تشدید ۲۰ کیلوهرتز خللی وارد نمی‌کنند.

### ۴-۳- آزمون اندازه‌گیری دامنه

در آزمون اندازه‌گیری دامنه ارتعاشی، توسط یک حسگر درز از نوع PU-05 و مبدل مدل AEC-55 با تفکیک‌پذیری ۰/۳ میکرومتر، دامنه ارتعاشی سطح مرتعش‌جلو رادیاتور اندازه‌گیری شد. در این آزمون، حسگر درز در نقاط گره و شکم طراحی قرار داده شد و داده‌های ولتاژ خروجی حسگر ذخیره گردید. این داده‌ها به صورت نمودار ولتاژ بر زمان بودند و فاصله قله تا دره بیانگر حداکثر دامنه ارتعاشی سطح مورد اندازه‌گیری رادیاتور می‌باشد. مقادیر بدست آمده با محاسبات عددی براساس مشخصات سنسور به دامنه ارتعاش تبدیل می‌شوند و دامنه ارتعاشی نقاط مختلف رادیاتور در فاصله‌های مشخص از محور مرکزی بدست آمده است. تحریک مجموعه رادیاتور ارتعاشی توسط منبع تغذیه فراصوتی با توان نامی ۲ کیلووات و فرکانس نامی ۲۰ کیلوهرتز انجام شده است.

برای بررسی انطباق نقاط گره در طراحی جزئی صفحه رادیاتور با نتیجه آزمون تجربی، در شکل ۱۰ نتایج دو آزمون در کنار یکدیگر نشان داده شده‌اند. محور افقی بیانگر فاصله نقطه اندازه‌گیری از محور مرکزی صفحه رادیاتور و محور عمودی بیانگر حداکثر دامنه ارتعاش در شبیه‌سازی اجزاء محدود و آزمون تجربی می‌باشد. لازم به ذکر است آزمون مودال با توجه به در نظر نگرفتن مکانیزم‌ها و خصوصیات میرایی مواد مقدار درستی برای دامنه ارتعاش نشان نمی‌دهد اما بیانگر جابجایی نسبی نقاط مختلف سطح مرتعش می‌باشد. بدین منظور با ضرب یک مقدار مشخص در داده‌های



شکل ۱۰. دامنه جابجایی رادیاتور در آزمون تجربی و شبیه‌سازی اجزاء محدود

Fig. 10. Comparison of radiator surface amplitude results obtained from experimental test and finite element simulation

Vibrations in Metal Forming, Modares Mechanical Engineering, 16(10) (2017) 323-334, (In persian).

- [4] R. Abedini, A Roadmap for Application of High Power Ultrasonic in Plastic and Metal Welding, Journal of Vibration and Sound, 10(20), (2022) 35-55, (In Persian).
- [5] D. Chen, S.K. Sharma, A. Mudhoo, Handbook on applications of ultrasound: sonochemistry for sustainability, CRC press, (2011).
- [6] M. Villamiel, E. Riera, J. García-Pérez, The Use of Ultrasound for Drying, Degassing and Defoaming of Foods, in, (2021), 415-438.
- [7] J.A. Gallego-Juárez, E. Riera, Technologies and Applications of Airborne Power Ultrasound in Food Processing, in: Ultrasound Technologies for Food and Bioprocessing, (2011), 617-641.
- [8] C.M.G. Charoux, K.S. Ojha, C.P. O'Donnell, A. Cardoni, B.K. Tiwari, Applications of airborne ultrasonic

نتایج آزمون اندازه‌گیری دامنه ارتعاش، در عمل، بیانگر قرارگرفتن نقاط گره و شکم ارتعاشی بر روی نقاط مد نظر در طراحی جزئی رادیاتور می‌باشند.

### تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله کمال تشکر خود را از شرکت دانش بنیان فراصوت تجهیز ایرانیان، پژوهشکده فناوری نو دانشگاه صنعتی امیرکبیر و مرکز فناوری تولید دانشگاه علم و صنعت ایران جهت همکاری در انجام آزمون‌های تجربی اعلام می‌نمایند.

### منابع

- [1] H. Kuttruff, Ultrasonics: Fundamentals and applications, Springer Science & Business Media, (2012).
- [2] J.A. Gallego-Juárez, K.F. Graff, Power ultrasonics: applications of high-intensity ultrasound, Elsevier, (2014).
- [3] R. Abedini, A. Abdullah, Y. Alizadeh, V. Fartashvand, A Roadmap for Application of High Power Ultrasonic

- [15] R.R. Andres, V.M. Acosta, M. Lucas, E. Riera, Modal analysis and nonlinear characterization of an airborne power ultrasonic transducer with rectangular plate radiator, *Ultrasonics*, 82 (2018) 345-356.
- [16] R.R. Andrés, A. Pinto, J.A. Cárcel, E. Riera, Airborne power ultrasonic transducers with stepped circular radiator for lyophilization at atmospheric pressure, in: *Proceedings of Meetings on Acoustics ICU, Acoustical Society of America*, (2019), 030011.
- [17] J.V. García-Pérez, J.A. Carcel, A. Mulet, E. Riera, R.R. Andrés, J.A. Gallego-Juárez, Chapter 33 - Ultrasonic drying for food preservation, in: J.A. Gallego-Juárez, K.F. Graff, M. Lucas (Eds.) *Power Ultrasonics (Second Edition)*, Woodhead Publishing, (2023), 743-771.
- [18] J.A. Gallego-Juárez, G. Rodríguez, E. Riera, R.R. Andrés, A. Cardoni, Chapter 7 - Power ultrasonic transducers with vibrating plate radiators, in: J.A. Gallego-Juárez, K.F. Graff, M. Lucas (Eds.) *Power Ultrasonics (Second Edition)*, Woodhead Publishing, (2023), 109-130.
- [19] R. Dorovskikh, A. Puzhaykina, P. Tertishnikov, A. Shalunov, V. Nesterov, Development of specialized disk emitters for the formation of high-intensity ultrasonic fields in gaseous media, in: *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing, (2023), 012003.
- technology in the food industry, *Journal of Food Engineering*, 208 (2017), 28-36.
- [9] R.R. Andrés, A. Pinto, I. Martínez, E. Riera, Acoustic field generated by an innovative airborne power ultrasonic system with reflectors for coherent radiation, *Ultrasonics*, 99 (2019) 105963.
- [10] G.V. Selicani, F. Buiochi, Stepped-plate ultrasonic transducer used as a source of harmonic radiation force optimized by genetic algorithm, *Ultrasonics*, 116 (2021) 106505.
- [11] D. Ensminger, F.B. Stulen, *Ultrasonics: data, equations and their practical uses*, CRC press, (2008).
- [12] A. Cardoni, E. Riera, A. Blanco, V. Acosta, J.A. Gallego-Juárez, Modal interactions in ultrasonic plate transducers for industrial applications, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 226(8) (2012) 2044-2052.
- [13] J. Gallego-Juárez, E. Riera, V. Acosta-Aparicio, Modal interactions in high-power ultrasonic processing transducers, in: *AIP Conference Proceedings*, American Institute of Physics, (2008), 595-604.
- [14] R.R. Andrés García, V.M. Acosta, A. Pinto, E. Riera, Airborne power ultrasonic systems for food dehydration processes intensificatio, (2018).

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. Akbari, R. Abedini, *Finite Element Simulation and Experimental Evaluation of an Ultrasonic Radiator*, *Amirkabir J. Mech Eng.*, 55(10) (2024) 1261-1274.

DOI: [10.22060/mej.2024.22635.7654](https://doi.org/10.22060/mej.2024.22635.7654)



