

نگاهی بر برداشت انرژی اکوستیکی

انوشیروان فرشیدیان^۱، سیده فاطمه نبوی^۲

۱ استاد دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، farshid@um.ac.ir

۲ دانشجوی کارشناسی مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۵/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۶/۱۰

چکیده

امروزه با افزایش جمعیت، پیشرفت دانش و فناوری و در نتیجه بالارفتن نیاز به انرژی، استفاده از انرژی‌های نو و تجدیدپذیر از جمله مهمترین مسائل پیش رو محسوب می‌شود. از جمله این انرژی‌ها، انرژی اکوستیکی است. با توجه به تحقیقات صورت گرفته می‌توان دریافت که بررسی این امر به صورت تفکیک شده کمک شایانی به این طرح خواهد کرد. در این مقاله سعی شده است مروری جامع و کامل بر مبحث انرژی اکوستیکی ارائه شود. امکان استفاده از انرژی اکوستیکی ناشی از منابع آلودگی صوتی مانند موتور توربو فن و هواپیما به منظور استفاده در ریزپردازشگرهای کم قدرت نظیر سمعک مورد مطالعه قرار خواهد گرفت. پس از شرح مکانیکی برداشت کننده اکوستیکی، به بررسی ساختار رزوناتورها، ترانسدیوسرها و انواع آنها پرداخته می‌شود. در پایان، به جهت کاربردی نمودن مباحث، نمونه آزمایش‌های صورت گرفته بیان و دلیل به حاشیه رفتن این طرح بحث خواهد شد.

واژگان کلیدی: انرژی اکوستیکی، برداشت کننده، رزوناتور، ترانسدیوسر

۱. مقدمه

توجه به اینکه عمر متوسط یک باطری استاندارد سمعک ۳ تا ۲۲ روز است و هر بار تعویض سمعک نیازمند تنظیمات مجدد است و بیشتر کاربران این محصول در کشورهای در حال توسعه و دارای سن ۶۰ سال به بالا می‌باشند، مسئله عمر محدود باطری این محصول را باید امری جدی در نظر گرفت. با پیشرفت علم و با توجه به اینکه امروزه بیشتر وسائل الکترونیکی از قابلیت شارژ برخوردارند، چنین اتفاقی برای سمعک هم رخ داده است [۱-۲]. در برخی از محصولات جدید، چنین شارژرهایی توانایی شارژ سمعک را با ولتاژ ورودی متوسط ۱۰۰ تا ۲۴۰ ولت در طی ۶ ساعت در روز فراهم کرده‌اند. در دهه

براساس مطالعات انجام شده توسط سازمان سلامت جهانی^۱ در سال ۲۰۱۱ م، حدود ۳۶۰ میلیون نفر در جهان از مشکل شنوایی رنج می‌برند؛ دو سوم این جمعیت در کشورهای در حال توسعه قرار دارند. بر طبق این آمار در کشورهای در حال توسعه، ۲۰ درصد از مشکلات شنوایی با سمعک رفع می‌شود. به طور کلی، حدود ۷۲ میلیون کاربر سمعک در جهان تخمین زده شده است. اگرچه تولیدات امروز، تنها ۱۰ درصد از نیاز بیماران را رفع می‌کنند، در کشورهای در حال توسعه کمتر از ۳ درصد جمعیت نیازمند سمعک، امکان استفاده از این وسیله را دارند. در کنار مشکل کمبود سمعک، این وسیله هنوز با مشکلاتی روبروست. با

اخیر، نظر به بالا بودن اهمیت انرژی، تحقیقات بسیاری در زمینه استفاده از انرژی‌هایی که به صورت‌های مختلف از قبیل گرما، نور، باد، ارتعاشات و مکانیکی هدر می‌روند معطوف شده است. هدف این تحقیقات بر این اساس است که راهی فراهم شود تا به وسیله آن، از تمامی ظرفیت‌های انرژی موجود در کره زمین به صورت بهینه و کارآمد استفاده شود. مثلاً پاروینگ (۲۰۰۴) در پژوهشی درباره سمک و ارتقای آن به طرح امکان وجود سمک خورشیدی پرداخت [۱]. در ادامه، تلاش‌های سایرین این طرح را به مرحله اجرایی رساند؛ به طوری که امروزه

شارژرهای خورشیدی در سراسر جهان در حال پیش‌فروش می‌باشند [۲]. با توجه به افزایش روزافزون آلودگی صوتی، یکی از این ظرفیت‌ها می‌تواند انرژی اکوستیکی باشد. از این انرژی به دلیل عدم وجود پسماند مضر برای طبیعت می‌توان به عنوان انرژی سبز نیز یاد کرد.

بشر روزمره با طیف وسیعی از منابع این گونه انرژی، چه در صنعت و چه در محیط اطراف، روبروست. برخی از منابع مختلف انرژی اکوستیکی، تراز فشار صوتی^۲ و فرکانس آنها در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱. تراز فشار صوتی و فرکانس برخی از منابع اکوستیکی

منبع انرژی صوتی	بازه فرکانسی (هرتز)	تراز فشار صوتی (دسی‌بل)	مآخذ
موتور توربو فن	۲۰-۲۰۰۰۰	۱۵۰	[۳]
کشتی کم‌قدرت	۳۵۰-۱۲۰۰	۱۵۰	[۴]
قطار در حرکت با سرعت ۲۰۰ کیلومتر بر ساعت درون تونل	-	۱۴۰-۱۵۰	[۵]
درون هواپیما (ایرباس ای. ۳۲۰)	-	۸۶	[۶]
سیستم تهویه خودرو	۲۰-۲۰۰۰۰	۷۱.۹	[۷]
خودرو	۱-۱۰۰	۷۰-۹۰	[۸]
ویولون	۱۹۶-۲۰۹۳	-	[۹]
پیانو	۲۵-۴۲۰۰	-	[۹]
جاروبرقی	-	۷۸	[۱۰]
آبمیوه‌گیری	-	۷۶	[۱۰]
سشوار	-	۶۷	[۱۰]
ماشین اصلاح (ریش‌تراش)	-	۵۶	[۱۰]

در وسائل نقلیه از جمله انواع خودرو، قطار، کشتی و هواپیما تراز فشار صوتی در محدوده ۷۱/۹ تا ۱۵۰ دسی‌بل و فرکانسی بین ۲۰ هرتز تا ۲۰ کیلوهرتز می‌باشد. همچنین بازه تراز فشار صوتی منابع اکوستیکی در یک محیط خانگی ۵۶ تا ۷۸ دسی‌بل قرار می‌گیرد. این در حالی است که برای آلات موسیقی، که دو نمونه از آنها در جدول ۱ ذکر شده است، متناسب با نت در حال نواختن، گستره فرکانس و فشار اکوستیکی گسترده خواهد بود. بنابراین می‌توان اذعان داشت که محیط اطراف از پتانسیل

بالایی از این منبع برخوردار است. همان‌گونه که ذکر شد، انرژی اکوستیکی انرژی جاری در فضا می‌باشد؛ پس به منظور بهره‌گیری از این انرژی باید در پی طرحی بود که بتوان به سادگی آن را از محیط جذب نمود. نمونه‌ای از این طرح در شکل ۱ نمایش داده شده است. براساس این طرح، امواج اکوستیکی صفحه‌ای از منبع به سمت برداشت‌کننده اکوستیکی^۳ تابانده می‌شوند. بخشی از این امواج توسط برداشت‌کننده اکوستیکی جذب و به جریان الکتریکی متناوب تبدیل می‌شود. در ادامه با

استفاده از مدار الکتریکی مناسب این جریان به جریان الکتریکی مستقیم قابل ذخیره‌سازی در باطری به‌منظور استفاده در پردازشگرهای کم‌قدرت مانند سمعک تبدیل خواهد شد [۳]. در این مقاله، که تنها به بخش برداشت‌کننده اکوستیکی پرداخته خواهد شد، سعی شده است از سازه‌ای استفاده شود که همانند گوش انسان از دو بخش اصلی تشکیل شده باشد: بخش اول وظیفه جمع‌آوری انرژی اکوستیکی را برعهده بگیرد و در بخش دیگر، انرژی اکوستیکی به انرژی قابل استفاده الکتریکی تبدیل گردد. در یک برداشت‌کننده اکوستیکی، انرژی اکوستیکی توسط رزوناتور^۴ جمع‌آوری و با استفاده از ترانسدیوسر پیزوالکتریک یا الکترومغناطیس، به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود. در ادامه، ابتدا رزوناتور و انواع آن بررسی می‌شود. سپس انواع ترانسدیوسرها و نحوه کارکرد آنها بیان خواهد شد. همچنین تحقیقات و آزمایش‌های صورت‌گرفته در زمینه برداشت انرژی اکوستیکی نیز نقد و بررسی خواهد شد.

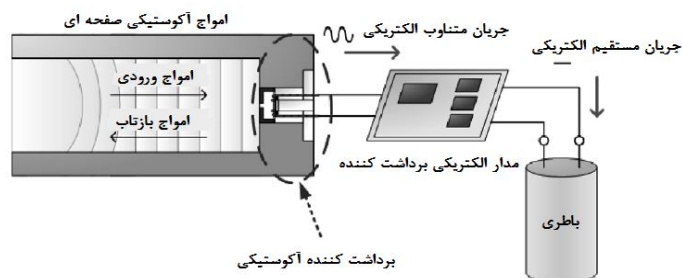
۲. مطالعه جزء اول ساختار؛ رزوناتور

رزوناتورهای صوتی هم جهت کاهش نوفه‌های مزاحم و هم به‌منظور افزایش صوت مورد استفاده قرار می‌گیرند. مثلاً از رزوناتورهای صوتی در آلات موسیقی به‌منظور افزایش صدا [۱۱] و در ابزارآلات صنعتی به‌منظور کاهش صدا استفاده می‌شود [۱۲]. به‌طور کلی رزوناتور وظیفه جمع‌آوری امواج را برعهده دارد. علاوه بر این وقتی رزوناتور اکوستیکی به‌وسیله

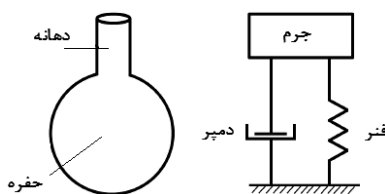
یک موج ورودی در فرکانس اکوستیکی رزونانس برانگیخته می‌شود، انرژی اکوستیکی درون رزوناتور به‌دلیل رخداده پدیده تشدید چند برابر امواج صوتی ورودی جمع‌آوری خواهد شد. در ادامه به بررسی انواع رزوناتور پرداخته می‌شود.

۲-۱. رزوناتورهای صنعتی

رزوناتور هلمهولتز^۵ از پرکاربردترین رزوناتورهای اکوستیکی است. همان‌گونه که در شکل ۲ نیز نمایش داده شده است، یک رزوناتور هلمهولتز از یک دهانه و یک حفره تشکیل شده است. با فرض اینکه طول موج ورودی از ابعاد رزوناتور هلمهولتز بزرگتر باشد، فرکانس طبیعی مد اول را می‌توان از مدل اجزای محدود^۶ به‌دست آورد [۱۳]. به‌عبارت دیگر با صرف‌نظر از انرژی تلف‌شده، یک رزوناتور هلمهولتز می‌تواند همانند یک سیستم جرم فنر دمپر مدلسازی شود. در اولین مد فرکانسی، هوای درون دهانه همانند جرمی در حال نوسان است. در این سیستم هوای ایستای درون حفره که دائماً تحت انبساط و انقباض است، نقش فنر را ایفا می‌کند [۳]. رزوناتور مشهور دیگر، رزوناتور ربع طول موج^۷ است که به نوعی شکل تکامل‌یافته رزوناتور هلمهولتز است. تحقیقات اخیر نوع سوم رزوناتور را با عنوان رزوناتور نیم طول موج^۸ مطرح می‌کند [۱۴-۱۵]. دو رزوناتور ربع طول موج و نیم طول موج به‌دلیل کوچکتر بودن طول رزوناتور از طول موج ورودی، قابلیت مدلسازی به روش اجزای محدودی را ندارند. با این حال چنین رزوناتورهایی در صنعت به‌وفور استفاده می‌شوند.

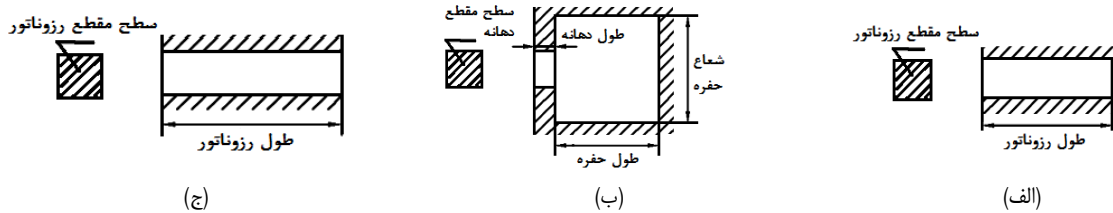


شکل ۱. نمای کلی نمونه طرح برداشت انرژی اکوستیکی [۳]

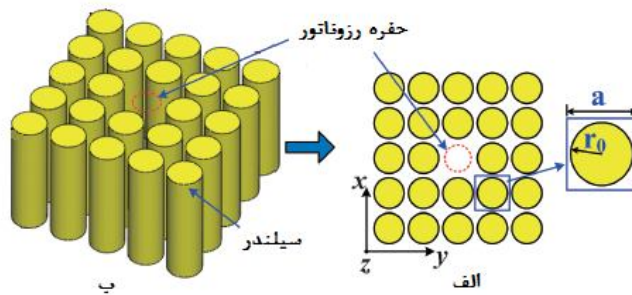


شکل ۲. رزوناتور هلمهولتز و معادل‌سازی آن با یک سیستم جرم، فنر و میراکننده

است و رزوناتور نیم طول موج از دو سر باز تشکیل شده است. باید توجه داشت که با توجه به نامگذاری رزوناتور ربع طول موج و نیم طول موج، طول رزوناتورهای مذکور متناسب با نامگذاری آن به ترتیب ربع و نصف طول موج اکوستیکی مورد استفاده طراحی می‌شوند.



شکل ۳. سه مدل کلی رزوناتور صنعتی، شامل الف) رزوناتور ربع طول موج، ب) رزوناتور هلمهولتز، ج) رزوناتور نیم طول موج



شکل ۴. نمای الف) جانبی ب) سه بعدی رزوناتور کریستال صوتی [۱۶]

ربع طول موج در حدود سه برابر رزوناتور نیم طول موج است. همچنین در حالت برابر بودن خروجی انرژی اکوستیکی جمع‌آوری شده رزوناتور هلمهولتز حجم بیشتری از فضا را نسبت به رزوناتور ربع طول موج اشغال می‌کند [۱۴-۱۵]. به این ترتیب می‌توان نتیجه گرفت که از میان سه رزوناتور صنعتی، در برداشت انرژی اکوستیکی، رزوناتور ربع طول موج می‌تواند بهترین انتخاب باشد. مزیت رزوناتور کریستال صوتی به سه رزوناتور صنعتی، مشخص بودن محل بیشترین فشار است. به عبارت دیگر امکان هدایت موج اکوستیکی به محلی خاص و دستیابی به بیشینه فشار اکوستیکی فراهم است. مسئله‌ای که استفاده از رزوناتور کریستال صوتی را با مشکل روبرو کرده، فضای اشغالی آن و شرایط ساخت شبکه کریستالی است. همچنین در ادامه گفته خواهد شد که به دلیل کوچک بودن فضای حفره رزوناتور، ترانسدیوسر مورد استفاده کوچک و در نتیجه میزان خروجی الکتریکی به نسبت رزوناتورهای صنعتی کمتر خواهد بود.

طرح رزوناتور نیم طول موج، به دلیل نوپا بودن، به نسبت دو رزوناتور دیگر از پیشینه تاریخی کمتری برخوردار است و در شکل ۳، به منظور درک بهتر تفاوت سه رزوناتور مذکور، نمایش داده شده است. در حالی که رزوناتور هلمهولتز دهانه دارد، رزوناتور ربع طول موج تنها شامل یک سر بسته و یک سر باز

۲-۲. رزوناتور اختصاصی

علاوه بر رزوناتور هلمهولتز، از کریستال صوتی^۹ برای جمع‌آوری انرژی اکوستیکی استفاده شده است. همان گونه که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، با ایجاد فضایی خالی در یک شبکه کریستال صوتی، حفره نقش رزوناتور را ایفا می‌کند. وقتی امواج اکوستیکی از چند جهت به شبکه کریستالی برخورد می‌کند، امواج درون حفره به دام می‌افتند. به این ترتیب موج اکوستیکی در حفره چندین برابر موج ورودی خواهد بود. یک نمونه آزمایش خاص نشان می‌دهد که در شرایط یکسان بودن فرکانس موج ورودی و فرکانس سازه، با توجه به رخداد پدیده تشدید، فشار اکوستیکی درون حفره و قدرت اکوستیکی به ترتیب $4/94$ و $24/4$ برابر بزرگتر از حالت بدون رزوناتور کریستال صوتی خواهد شد [۱۷].

۲-۳. مقایسه چهار نوع رزوناتور

نتایج پژوهش‌ها و آزمایش‌ها نشان می‌دهد که در حالت فرکانس و ابعاد برابر بازده انرژی اکوستیکی جمع‌آوری شده توسط رزوناتور

۳. مطالعه جزء دوم ساختار؛ ترانسدیوسر

در این مقاله، منظور از ترانسدیوسر وسیله‌ای است که انرژی اکوستیکی جمع‌آوری شده توسط رزوناتور را به انرژی الکتریکی مورد استفاده تبدیل کند. بر اساس مطالعات انجام شده در برداشت انرژی اکوستیکی، دو نوع ترانسدیوسر الکترومغناطیس^{۱۰} و پیزوالکتریک^{۱۱} کاربرد دارند.

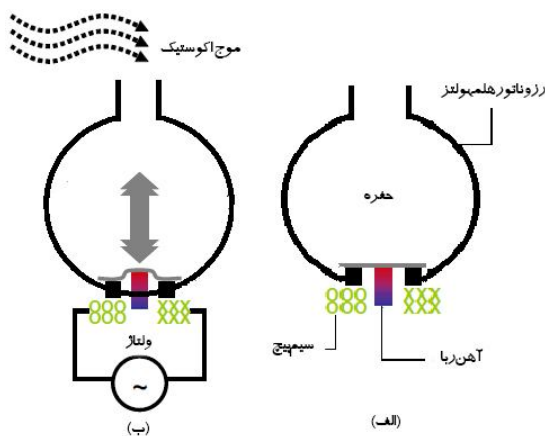
۳-۱. ترانسدیوسر الکترومغناطیس

اساس کار این نوع ترانسدیوسر بر پایه قانون فارادی^{۱۲} در الکترومغناطیس استوار است. به بیان ساده، کاری که در یک ترانسدیوسر الکترومغناطیس انجام می‌شود عکس کار یک بلندگو است. به منظور درک بهتر یک نمونه ترانسدیوسر مورد استفاده در رزوناتور هلمهولتز در شکل ۵ نمایش داده شده است. آهنربای متصل به غشاء و یک بخش سیم‌پیچ ثابت قسمت‌های اصلی این ترانسدیوسر را نشان می‌دهند. وقتی امواج اکوستیکی از دهانه وارد رزوناتور می‌شوند، رزوناتور فشار موج اکوستیکی را چند برابر می‌کند، به طوری که موج اکوستیکی قادر خواهد بود غشاء را به حرکت درآورد. نوسانات غشاء و در نتیجه نوسانات آهنربا موجب ایجاد میدان الکتریکی شده و در نتیجه در سیم‌پیچ جریان الکتریکی القاء خواهد شد.

۳-۲. ترانسدیوسر پیزوالکتریک

بحث ترانسدیوسر پیزوالکتریک، در قرن اخیر به مبحثی داغ و پرکاربرد مبدل شده است. اساس این ترانسدیوسر نخستین بار توسط پیتر کوری^{۱۳} در سال ۱۸۸۰ م مطرح شد. به دلیل قابلیت مواد سرامیکی پیزوالکتریک در تحمل شرایط سخت محیطی، این مواد در شاخه‌های مختلف کاربرد دارند. نمونه کاربرد آن در شتاب‌سنج‌ها، مبدل اولتراسونیک، محرک و حسگر کنترل صدا و ارتعاشات می‌باشد. اثر پیزوالکتریک نوعی مبدل انرژی مکانیکی به انرژی الکتریکی و بالعکس است. اصطلاح پیزوالکتریک که پدیده‌ای الکترومکانیکی است، از دو کلمه پیزو (در زبان یونانی معادل فشار) و الکتریک (مبین بخش الکتریکی) متشکل شده است. به طور کلی، دو دسته مواد پیزوالکتریک در ارتعاشات وجود دارند: سرامیک‌ها و پلیمرها. معروف‌ترین سرامیک تیتانات زیرکونات سرب^{۱۴} به دلیل خواص پیزوالکتریک قوی و پایین بودن تلفات دی‌الکتریک و الاستیک آن در فرکانس‌های بالاتر است.

پیزوپلیمرها بیشتر در موارد کاربرد حسگرها استفاده می‌شود. نوع مشهور پلیمری پرکاربرد در برداشت انرژی پلی وینیل دی فلوراید^{۱۵} است [۱۸]. دو نمونه ترانسدیوسر پیزوالکتریک ذکر شده، بیشترین میزان کاربرد در بخش برداشت‌کننده‌های انرژی را دارا می‌باشند. با مقایسه این دو نمونه می‌توان نتیجه گرفت که در حالت اعمال تنش مستقیم، در حالی که تیتانات زیرکونات سرب از بیشترین کرنش برخوردار است، پلی وینیل دی فلوراید به دلیل پایین بودن مدول یانگ تعداد نوسانات بیشتر و در نتیجه توانایی خروجی چگالی انرژی بیشتری دارد [۱۹].



شکل ۵. ترانسدیوسر الکترومغناطیس و رزوناتور هلمهولتز در حالت الف) سکون ب) وجود فشار اکوستیک

۴. نمونه‌های آزمایش و تحقیقات برداشت انرژی

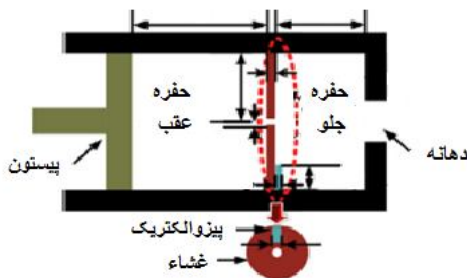
اکوستیکی

با بهره‌گیری از ترکیبی متفاوت از رزوناتورها و ترانسدیوسرهای ذکر شده می‌توان نتایج متفاوت و جالبی برای برداشت‌کننده اکوستیکی عنوان کرد. شکل ۶ طرح هورویترز^{۱۶} را نمایش می‌دهد که با اتصال حلقه پیزوالکتریک تیتانات زیرکونات سرب به غشاء دایروی در انتهای حفره رزوناتور هلمهولتز، انرژی اکوستیکی را به انرژی الکتریکی تبدیل نمود. نتیجه آزمایش وی دریافت قدرت پیکو واتی از ۱۴۹ دسی‌بل موج اکوستیکی در فرکانس ۱۳۵۷۰ هرتز بود [۳]. طرح وی علاوه بر اثبات امکان برداشت انرژی اکوستیکی، گامی نو برای تشویق سایرین شد. در ادامه همکاری وی با لیو^{۱۷} و همکاران، منجر به استفاده مستقیم از جریان الکتریکی، با قرار دادن کانورتور گشت که نتیجه کار به میزان چشم‌گیری تغییر یافت. با انتخاب مدار الکتریکی،

وی همچنین با آزمایش نشان داد که وجود دهانه مخروطی به دلیل هدایت ملایم امواج اکوستیکی و وجود هدایت‌کننده مثلثی به دلیل ایجاد کرنش پیشی علاوه بر کرنش عمودی، خروجی را به ترتیب $43/8$ و $25/11$ درصد افزایش خواهد داد [22]. در حالی که تمامی طرح‌های مذکور رزوناتور هلمهولتز و ترانسدیوسر پیزوالکتریک برای امواج اکوستیکی تک‌فرکانسی^{۲۰} در یک فرکانس خاص کاربرد داشتند. پنگ^{۲۱} با طرح نمایش داده شده در شکل ۸ ادعا کرد که امکان بهره‌برداری از انرژی اکوستیکی در طیف فرکانسی ثابت^{۲۲} وجود دارد.



(الف)

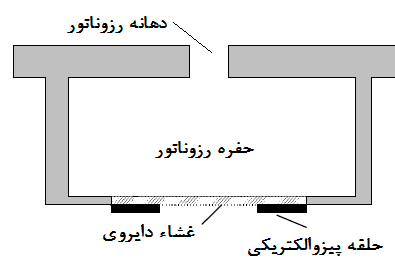


(ب)

شکل ۸. نمای الف) تجربی، ب) تئوری رزوناتور دو گانه [23]

وی با قرار دادن حلقه برنجی درون پیستون و فراهم شدن دو رزوناتور به طوری که حلقه مذکور نقش بخش انتهایی حفره را برای رزوناتور اولی و بخش دهانه و ورودی را برای رزوناتور ثانویه بازی کند و حرکت متناسب پیستون امکان بهره‌برداری از فرکانس اکوستیکی در بازه 1400 تا 1100 هرتز برای موج اکوستیکی 100 دسی‌بل فراهم کرد که بیشینه خروجی در فرکانس 1358 هرتز تقریباً $7/5$ میکرووات شد [23]. در ادامه این مبحث، چندی بعد گروه وی طرح دیگری ارائه کردند که به جای دو رزوناتور، از دو تیر پیزوالکتریک استفاده شود که به منظور افزایش نوسانات تیر در انتهای آن، جرمی قرار می‌گیرد. سازه مذکور به انتهای دیواره رزوناتور متصل می‌شود، با این

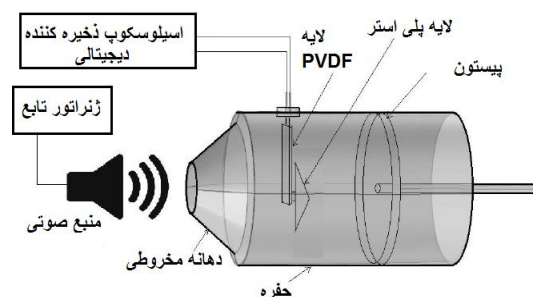
کانورتور، کنترلر مناسب و استفاده از پیزوسرامیک خاص، امکان برداشت میلی‌واتی از موج اکوستیکی 161 دسی‌بلی در فرکانس 2646 هرتز فراهم گشت [20]. لی^{۱۸} با بهره‌گیری از تیر چندلایه چندلایه پلی وینیل دی فلورایدی و قرار دادن آن در انتهای حفره رزوناتور ترکیب تازه‌ای از رزوناتور هلمهولتز و پیزوالکتریک بیان نمود. وی پس از اثبات افزایش خروجی در حالت چندلایه نسبت به تک‌لایه و دستیابی به فاصله مناسب تیر از انتها حفره رزوناتور به قدرت $0/19$ میکرووات از موج اکوستیکی 118 دسی‌بل با فرکانس 850 هرتز دست یافت [21].



شکل ۶. نخستین برداشت‌کننده اکوستیکی

با استفاده از رزوناتور هلمهولتز و مبدل پیزوالکتریک [3]

پایلی^{۱۹} با اصلاح دهانه رزوناتور به صورت مخروطی و افزودن هدایت‌کننده‌ای به ترانسدیوسر تک‌لایه پیزوالکتریکی طرح جدیدی ارائه نمود (شکل ۷).

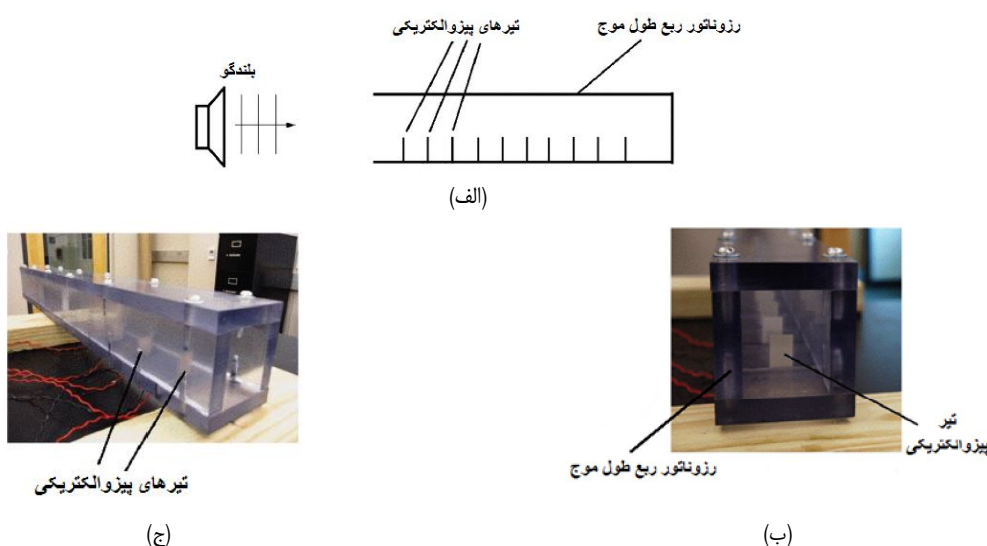


شکل ۷. نمایی شماتیک از برداشت‌کننده اکوستیکی دهانه مخروطی به همراه لایه هدایت‌کننده پیزوالکتریک [22]

طبق آزمایش وی ژنراتور منبع صوتی، موجی با فشار 103 دسی‌بل و فرکانسی 99 هرتز تولید نموده که پس از گذر از دهانه مخروطی رزوناتور هلمهولتز منجر به حرکت ترانسدیوسر وینیل دی فلوراید می‌شود که پیش هدایت‌کننده مثلثی پلی‌استری منجر به افزایش جابه‌جایی ترانسدیوسر می‌شود تا اسیلوسکوپ دیجیتالی خروجی 842 میلی‌ولت را نمایش دهد.

تفاوت که قابلیت بهره‌برداری از امواج فرکانس پایین ۱۷۰ تا ۲۰۶ هرتز را خواهد داشت. در بهترین حالت فاصله دو تیر از هم، قدرتی به میزان ۱/۴۳ میلی‌وات تولید شد [۲۴]. استفاده از رزوناتور ربع طول موج در برداشت‌کننده اکوستیکی نخستین بار توسط لی^{۳۳} بیان شد. وی پس از آزمایش مشاهده کرد که هرچه دهانه رزوناتور هلمهولتز بلندتر بلندتر شود، فشار اکوستیکی درون رزوناتور نیز افزایش می‌یابد. نتایج کار وی منجر به پیشنهاد رزوناتور ربع طول موج با مقطع مربعی شد که علاوه بر بازده بیشتر، امکان برداشت انرژی در بازه فرکانس پایین را فراهم کرد. وی پس از تحلیل عددی و یافتن فرکانس رزونانس

رزوناتور پیشنهادی و قرار دادن تعدادی تیر پلی وینیل دی فلوراید معین با فاصله بهینه نسبت به هم درون رزوناتور توانست با تولید ۰/۳۸۲ میکروژول ادعای خود را اثبات کند [۱۵]. همان‌طور که در شکل ۹ نمایش داده شده است، امواج اکوستیکی از بلندگو وارد رزوناتور شده و در جهت حرکت خود منجر به جابه‌جایی تیرهای پیزوالکتریکی می‌شود و در نتیجه امکان تولید انرژی الکتریکی را فراهم می‌کند. با تغییر طول رزوناتور و در نتیجه فرکانس مختلف و قرار دادن تعدادی تیر دوطرفه سرامیک تیتانات زیرکونات سرب به بررسی نتایج پرداخت که بخشی از تلاش‌های وی در جدول ۲ بخش بعد ارائه شده است [۲۵-۲۷].



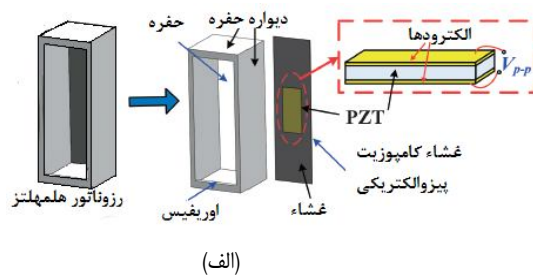
شکل ۹. نمایی از برداشت‌کننده اکوستیکی دارای رزوناتور ربع طول موج؛ (الف) شماتیک آزمایش، (ب) نمای روبرو، (ج) نمای جانبی [۲۷]

امکان ترکیب ترانسدیوسر پیزوالکتریک و رزوناتور کریستال صوتی طی چند آزمایش بررسی شده است. با قرار گرفتن لایه پیزوالکتریک درون حفره رزوناتور اثبات می‌شود که امکان بهره‌برداری انرژی اکوستیکی وجود دارد [۱۷]. یکی از مؤلفه‌هایی که روی خروجی اثر می‌گذارد می‌تواند هندسه باشد. نتایج گزارش قرار دادن تیر خمیده پیزوالکتریک درون حفره کریستال صوتی حاکی از این است که استفاده از هندسه خمیده ورق پیزوالکتریک موجب افزایش خروجی الکتریکی خواهد شد [۲۸]. با توجه به اینکه دو بخش اصلی برداشت‌کننده اکوستیکی رزوناتور و ترانسدیوسر می‌باشد، امکان ارتقای خروجی الکتریکی با استفاده از طرح‌های تلفیقی نیز می‌تواند مورد بررسی قرار گیرد. شکل ۱۰ مطالعه‌ای را نمایش می‌دهد که به ترکیب

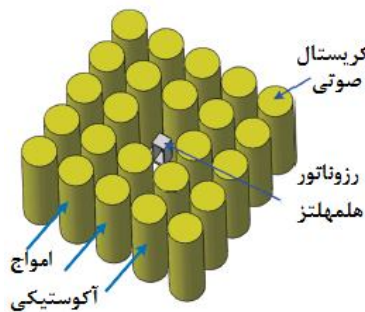
رزوناتور هلمهولتز و کریستال صوتی می‌پردازد. در انتهای رزوناتور هلمهولتز مکعب مستطیلی، غشائی قرار داده می‌شود که پیزوالکتریک روی آن قرار می‌گیرد. قرار گرفتن سازه مذکور در حفره کریستال صوتی منجر به کوپل شدن دو رزوناتور و در نتیجه بهره‌برداری از میزان بالای انرژی اکوستیکی را حاصل می‌شود [۱۶]. در مبحث بهره‌برداری از ترانسدیوسر الکترومغناطیس نیز کارهایی صورت گرفته است که به نسبت پیزوالکتریک از جامعیت کمتری برخوردار می‌باشد. قسمت الف و ب از شکل ۱۱ به ترتیب نمای شماتیک برداشت‌کننده اکوستیکی شامل رزوناتور هلمهولتز و ترانسدیوسر الکترومغناطیس و قسمت ج نمای کلی سازه را نمایش می‌دهد. امواج اکوستیکی توسط ژنراتور عملگر با استفاده از اسیلوسکوپ و میکروفون تنظیم و

انتخاب می‌شود، سپس بلندگو امواج مورد نظر را تولید می‌کند. امواج هدایت‌شده از طریق کانال از دهانه رزوناتور هلمهولتز می‌گذرند. در حفره به دلیل افزایش فشار اکوستیکی غشاء به حرکت درآمده و در نتیجه آهنربا مرتعش می‌شود. در نهایت به دلیل حرکت آهنربا در حضور سیم‌پیچ، طبق قانون فارادی، میدان الکتریکی ایجاد شده و در نتیجه جریان الکتریکی القاء

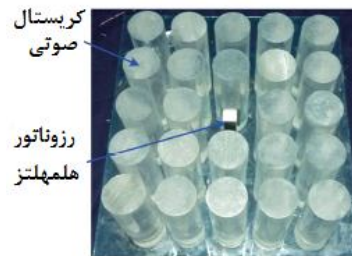
می‌شود [۲۹-۳۰]. طرح دیگری از برداشت‌کننده اکوستیکی که از ترکیب رزوناتور هلمهولتز و ترانسدیوسر مغناطیسی تشکیل شده، به جای اتصال آهنربا به غشاء، سیم‌پیچ روی غشاء قرار گرفته و در اثر حضور امواج اکوستیکی غشاء و در نتیجه سیم‌پیچ در حضور آهنربا به ارتعاش در می‌آید. که این حرکت سبب ایجاد میدان الکتریکی و القای جریان الکتریکی خواهد شد [۳۱].



(الف)



(ج)



(ب)

شکل ۱۰. نمایشی از الف) رزوناتور هلمهولتز، ب) سازه آزمایش، ج) سازه ترکیب رزوناتور هلمهولتز و کریستال صوتی [۱۶]

نمونه جالب دیگر، که در شکل ۱۲ نمایش داده شده است، به تلفیق دو ترانسدیوسر پیزوالکتریک و الکترومغناطیس درون رزوناتور هلمهولتز می‌پردازد. امواج درون حفره، صفحه پیزوالکتریکی و آهنربای متصل به آن را به نوسان درمی‌آورند و در ادامه، حرکت آهنربا در حضور سیم‌پیچ و نوسان پیزوالکتریک، منجر به تولید جریان الکتریکی می‌شود [۳۲].

اتصال آهنربا یا سیم‌پیچ با غشاء سبب افزایش جرم قسمت متحرک ترانسدیوسر الکترومغناطیس نسبت به پیزوالکتریک می‌شود، در نتیجه با افزایش جرم، فرکانس تشدید کاهش می‌یابد. باید توجه داشت که در مواردی مانند [۱۷] و [۲۸] با وجود ولتاژ خروجی بیشتر توان الکتریکی کمتری حاصل شده است که علت این امر نقش مقاومت داخلی است؛ زیرا با افزایش مقاومت، توان خروجی کاهش می‌یابد.

در بحث مقایسه توان خروجی رزوناتور مورد استفاده نسبت به فرکانس تشدید، در شکل ۱۳ نموداری از نتایج مطالعات رسم شده است. مشاهده می‌شود در حالی که رزوناتورهای هلمهولتز از قابلیت کاربرد برای بازه متفاوت فرکانسی برخوردارند، رزوناتور ربع طول موج در بازه فرکانس پایین مورد استفاده قرار می‌گیرد. در رزوناتور کریستال صوتی به دلیل حضور استوانه‌های موجود در شبکه و در نتیجه پایین بودن قابلیت نوسان سازه، به منظور

۵. مقایسه‌ای بر برداشت‌کننده‌های اکوستیکی

مطالعات انجام‌شده را از ابعاد مختلفی چون تراز فشار اکوستیکی ورودی، فرکانس تشدید، بیشترین ولتاژ و توان تولیدی می‌توان مقایسه کرد. تفاوت پارامترهای برداشت‌کننده‌های مختلف در جدول ۲ مده است. مشاهده می‌شود که ترانسدیوسرهای الکترومغناطیس در بازه فرکانس پایینی نسبت به پیزوالکتریک قرار می‌گیرند. علت این امر را می‌توان این‌گونه بیان کرد که

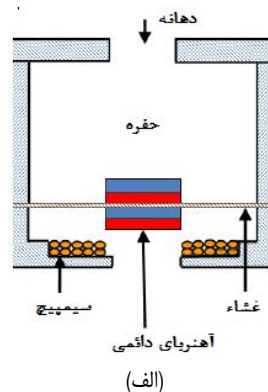
دریافت انرژی اکوستیکی، در بازه فرکانس بالا توان خروجی پایینی نسبت به سایر رزوناتورها دارد. همچنین مشاهده می‌شود که با قراردادن رزوناتور هلمهولتز درون حفره کریستال صوتی، برای فرکانس تشدید بالاتری، بازده این رزوناتور را می‌توان به میزان چشمگیری ارتقاء بخشید. در حالی که کریستال‌های صوتی

امواج اکوستیکی ورودی را در حفره چند برابر کرده، رزوناتور هلمهولتز امواج به‌دام افتاده را در انتهای خود جمع‌آوری می‌کند و امواج افزایش‌یافته را مجدداً افزایش می‌دهد. به این ترتیب تا سرحد امکان از تلفات امواج جلوگیری می‌شود و میزان خروجی الکتریکی افزایش می‌یابد.

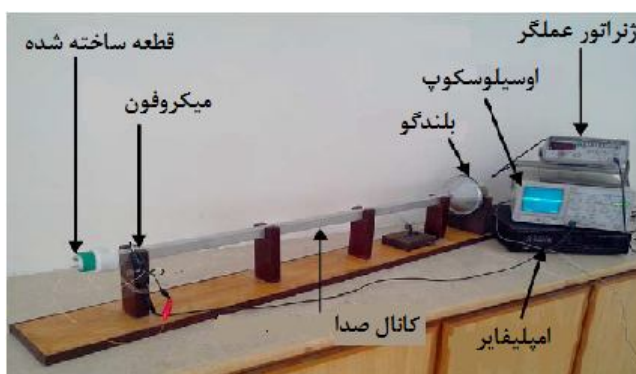


برداشت‌کننده اکوستیکی

(ب)



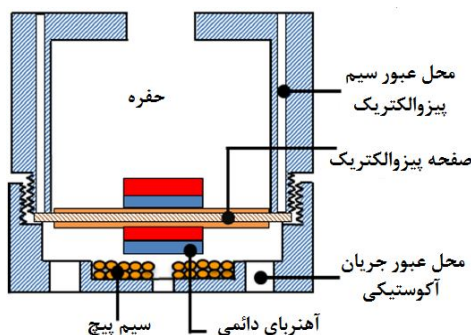
(الف)



(ج)

شکل ۱۱. الف) نمای شماتیک، ب) برداشت‌کننده ساخته شده

ج) طرح برداشت انرژی اکوستیک شامل رزوناتور هلمهولتز و ترانس‌دیوسر الکترومغناطیس [۲۹]



شکل ۱۲. برداشت‌کننده اکوستیکی تلفیقی ترانس‌دیوسرها [۳۲]

جدول ۱. مقایسه‌ای از برداشت‌کننده‌های اکوستیکی [۳۳]

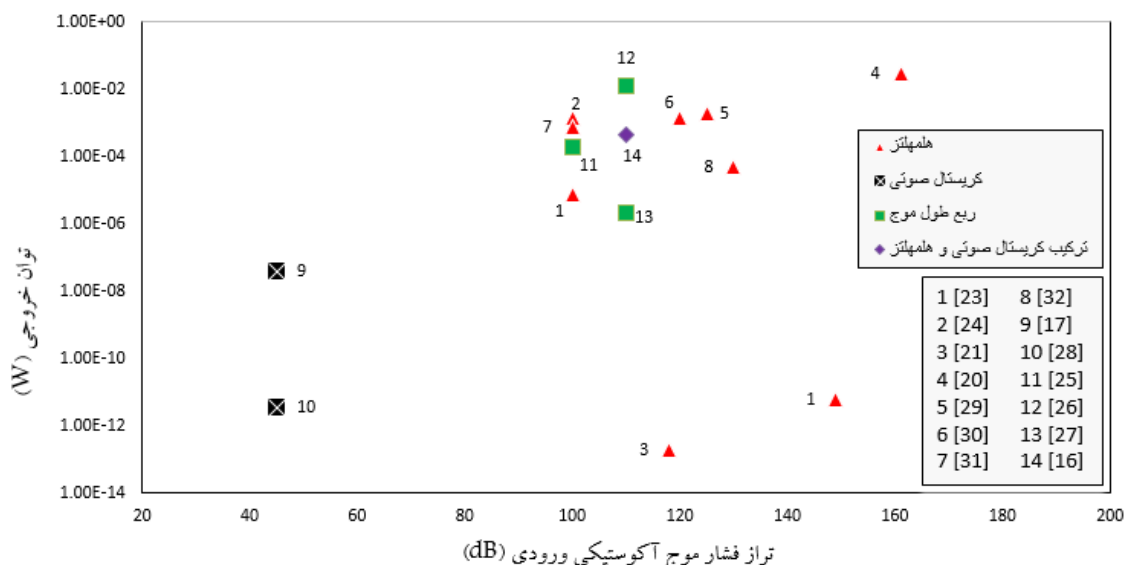
مأخذ	خروجی	مقاومت داخلی	ولتاژ تولیدشده	فشار اکوستیکی	فرکانس	سال	ترانسدیوسر	رزوناتور
[۳]	2.0×10^{-8}	۹۸۰	-	۱۴۹	۱۳۵۷۰	۲۰۰۶	تیتانات زیرکونات سرب	همپونتر
[۲۳]	$7/5 \times 10^{-6}$	۷۵۰۰	-	۱۰۰	۱۳۵۸	۲۰۱۳	تیتانات زیرکونات سرب	
[۲۴]	$1/43 \times 10^{-3}$	۳۸۰۰۰	-	۱۰۰	۲۰۱	۲۰۱۴	تیتانات زیرکونات سرب	
[۲۱]	0.19×10^{-12}	-	-	۱۱۸	۸۵۰	۲۰۱۳	پلی وینیل دی فلوراید	
[۲۲]	-	-	۸۴۲	۱۰۳	۹۹	۲۰۱۵	پلی وینیل دی فلوراید	
[۲۰]	3.0×10^{-3}	۲۰۰۰۰	-	۱۶۱	۲۶۴۶	۲۰۰۸	پیزوسرامیک	
[۲۹]	$1/96 \times 10^{-3}$	۵۲	۹۵۳	۱۲۵	۱۴۳	۲۰۱۳	الکترومغناطیس	
[۳۰]	$1/5 \times 10^{-3}$	۶۶	-	۱۲۰	۱۴۴	۲۰۱۳		
[۳۱]	$789/65 \times 10^{-6}$	۵۰	0.1987	۱۰۰	۳۱۹	۲۰۱۶		
[۳۲]	49×10^{-3}	۱۰۰۰	0.443	۱۳۰	۲۱۰۰	۲۰۱۶	تلفیق تیتانات زیرکونات سرب الکترومغناطیس	
		۱۱۴	0.38					
ربع طول موج	0.193×10^{-3}	-	$1/43333$	۱۰۰	۱۹۹	۲۰۱۲	تیتانات زیرکونات سرب	
		-	0.105				پلی وینیل دی فلوراید	
	$12/697 \times 10^{-3}$	-	$15/689$	۱۱۰	۱۹۹	۲۰۱۳	تیتانات زیرکونات سرب	
	$2/3 \times 10^{-6}$	۱۰۰۰۰۰۰	$1/480$	۱۱۰	۱۴۶	۲۰۱۳	پلی وینیل دی فلوراید	
[۱۷]	4.0×10^{-9}	۳۹۰۰	0.177	۴۵	۴۲۰۰	۲۰۰۹	پلی وینیل دی فلوراید	کریستال صوتی
		۱۳۶۰۰	0.24	۴۵	۴۲۱۰	۲۰۱۰		
[۱۶]	429×10^{-6}	۴۴۰۰	$3/89$	۱۱۰	۵۵۴۵	۲۰۱۳	تیتانات زیرکونات سرب	کریستال صوتی و همپونتر

که با توجه به جدول ۱ این محدوده در بخش صنعتی قرار می‌گیرند. در بخش خانگی، به‌طور تقریبی فشار اکوستیکی کمتر از ۷۰ دسی‌بل، تنها رزوناتورهای صنعتی پیشنهاد شده است که از خروجی الکتریکی پایینی برخوردار است. بیشترین توان خروجی حاصل‌شده به رزوناتور ربع طول موج که در بازه فرکانس پایین کار می‌کند تعلق دارد که این نتیجه را می‌توان

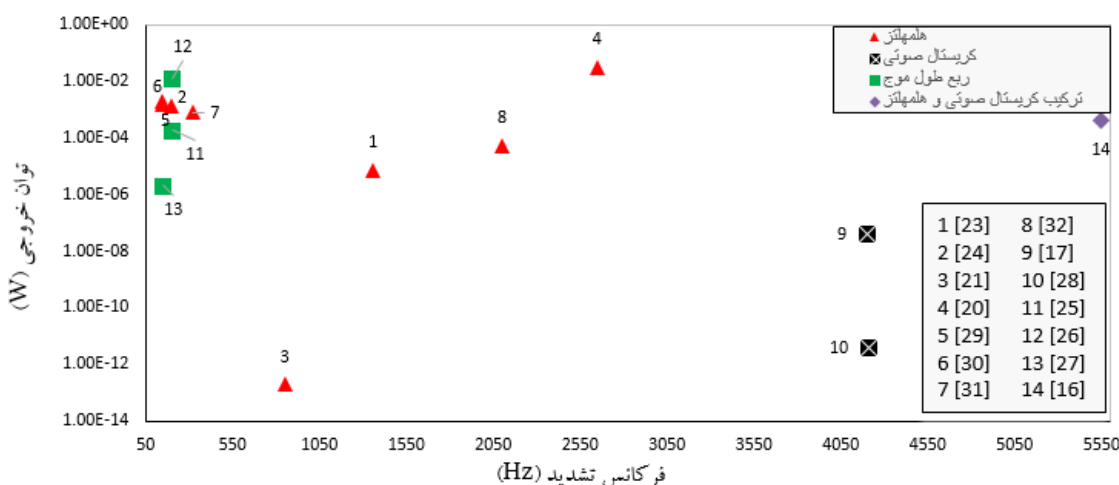
شکل ۱۴ بیشترین توان خروجی الکتریکی برداشت‌کننده‌های اکوستیکی متفاوت را نسبت به تراز فشار موج اکوستیکی ورودی نشان می‌دهد. با توجه به اینکه با افزایش فشار موج اکوستیکی ورودی، توان الکتریکی افزایش می‌یابد، مشاهده می‌شود، بیشتر مطالعات صورت‌گرفته در بازه تراز فشار اکوستیکی ۱۰۰ تا ۱۴۰ دسی‌بل (به‌جز موارد ۱، ۴، ۹ و ۱۰) است

اکوستیکی محل قرارگیری برداشت‌کننده، نوع رزوناتور مناسب را انتخاب نمود.

تأییدی برای این رزوناتور در نظر گرفت. در کل با توجه به این دو نمودار می‌توان متناسب با فرکانس و تراز فشار موج



شکل ۱۳. نمودار توان خروجی برداشت‌کننده‌های اکوستیکی نسبت به فرکانس تشدید



شکل ۱۴. نمودار توان خروجی برداشت‌کننده‌های اکوستیکی نسبت به تراز فشار موج اکوستیکی ورودی

برداشت‌کننده اکوستیکی؛ رزوناتور و ترانسدیوسر مورد بررسی قرار گرفت. گفته شد رزوناتور ربع طول موج از کمترین فضای اشغالی و بیشترین بازده برخوردار است. به‌منظور درک بهتر، چند نمونه طرح تجربی و تئوری مورد مطالعه قرار گرفت که بیشتر تحقیقات صورت‌گرفته در بازه فشار اکوستیکی صنعتی قرار گرفته بودند. همچنین در مقام مقایسه در حالی که متناسب با محل استفاده برداشت‌کننده اکوستیکی، گزینه‌های متفاوتی وجود خواهد داشت. گفته شد ترانسدیوسر الکترومغناطیسی عموماً در

۶. نتیجه‌گیری

مسئله انرژی، با پیشرفت روزافزون فناوری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است که در سال‌های اخیر بشر نهایت تلاش خود را نموده که از تمامی ظرفیت‌های جهان استفاده نماید. همان‌طور که گفته شد یکی از این ظرفیت‌ها می‌تواند انرژی اکوستیکی باشد. در این مطالعه ابتدا سعی شد لزوم برداشت انرژی اکوستیکی به‌منظور استفاده در شارژرهای سمعک که نمونه‌ای از پردازشگرهای کم‌قدرت‌اند بیان شود. دو بخش اصلی

نگاه داشته، بازده پایین آن و پیچیدگی فیزیک آن است که هر دو مشکل، متوجه محدودیت‌های بشر می‌باشد و نه فیزیک انرژی اکوستیک. امید است با جمع‌آوری و فراهم کردن این نوشته کمکی به این منبع انرژی بی‌ادعا شده باشد.

بازه فرکانس پایین و رزوناتور کریستال صوتی برای امواج اکوستیکی کم‌فشار کاربرد دارند. مشکل عمده‌ای که این انرژی را در کنار فواید بسیار آن از جمله پاک، رایگان و بی‌خطر بودن، با توجه به افزایش بیش از پیش آلودگی صوتی در سطح نظری

۷. مأخذ

- [1] Parving, A., and B. Christensen. "Clinical trial of a low-cost, solar-powered hearing aid." *Acta otolaryngologica* 124, no. 4 (2004): 416-420.
- [2] Solar recharger, Products, 2016, Solar Ear, <http://solarear.com.br/products> (accessed August 03, 2016)
- [3] Horowitz, Stephen Brian. "Development of a MEMS-based acoustic energy harvester." PhD diss., University of Florida, 2005.
- [4] Barlett, Martin L., and Gary R. Wilson. "Characteristics of small boat acoustic signatures." *The Journal of the Acoustical Society of America* 112, no. 5 (2002): 2221-2221.
- [5] Xiao, Hu, Aoki Toshiyuki, and Tokura Naoya. "The feature of weak shock wave propagated in a overlong tunnel." *Open Journal of Fluid Dynamics* 2012 (2012).
- [6] Woods T A, Poliakoff E, Lloyd M D, Kuenzel J, Hodson R, Gonda H, Batchelor B J, Dijksterhuis G and Thomas A 2011 Effect of background noise on food perception *Food Qual. Prefer.* 22 42-7.
- [7] Yokoyama, Yoshihiko, and Katsufumi Hashimoto. "Development of low-noise air conditioning ducts." *JR East Technical Review* 16 (2010).
- [8] Jung, Sung Soo, Yong Tae Kim, Yong Bong Lee, Ho Cheol Kim, Su Hyun Shin, and Cheolung Cheong. "Spectrum of infrasound and low-frequency noise in passenger cars." *Journal of the Korean Physical Society* 55, no. 6 (2009): 2405-2410.
- [9] Wilson, G. E., *NOISE CONTROL*, Revised Edition, Krieger Publishing Company, 2006.
- [10] Chang, Shu Hua, Hsiao Wen Wu, and Chen Far Hung. "A sound quality study of household electrical appliances by jury test in indoor space." *The Open Acoustics Journal* 6, no. 1 (2013).
- [11] Bork, Ingolf. "Practical tuning of xylophone bars and resonators." *Applied Acoustics* 46, no. 1 (1995): 103-127.
- [12] Tang, S. K. "On sound transmission loss across a Helmholtz resonator in a low Mach number flow duct." *The Journal of the Acoustical Society of America* 127, no. 6 (2010): 3519-3525.
- [13] Alster, M. "Improved calculation of resonant frequencies of Helmholtz resonators." *Journal of Sound and Vibration* 24, no. 1 (1972): 63-85.
- [14] Sohn, Chae Hoon, and Ju Hyun Park. "A comparative study on acoustic damping induced by half-wave, quarter-wave, and Helmholtz resonators." *Aerospace Science and Technology* 15, no. 8 (2011): 606-614.
- [15] Li, Bin, and Jeong H. You. "Harvesting ambient acoustic energy using acoustic resonators." In *Proceedings of Meetings on Acoustics*, vol. 12, no. 1, p. 065001. Acoustical Society of America, 2011.
- [16] Yang, Aichao, Ping Li, Yumei Wen, Caijiang Lu, Xiao Peng, Jitao Zhang, and Wei He. "Enhanced acoustic energy harvesting using coupled resonance structure of sonic crystal and Helmholtz resonator." *Applied Physics Express* 6, no. 12 (2013): 127101.
- [17] Wu, Liang-Yu, Lien-Wen Chen, and Chia-Ming Liu. "Acoustic energy harvesting using resonant cavity of a sonic crystal." *Applied Physics Letters* 95, no. 1 (2009): 013506.

[۱۸] حسینی هاشمی ش، فاضلی س، فدایی م، "مواد پیزوالکتریک و کاربرد آن در صنعت حمل‌ونقل"، مهندسی مکانیک، ش. ۷۷، س. ۲۰، ۱۳۹۰.

- [19] Jiang, Yonggang, Syohei Shiono, Hiroyuki Hamada, Takayuki Fujita, Kohei Higuchi, and Kazusuke Maenaka. "Low-frequency energy harvesting using a laminated PVDF cantilever with a magnetic mass." *Power MEMS* 375378 (2010).
- [20] Liu, Fei, Alex Phipps, Stephen Horowitz, Khai Ngo, Louis Cattafesta, Toshikazu Nishida, and Mark Sheplak. "Acoustic energy harvesting using an electromechanical Helmholtz resonator." *The Journal of the Acoustical Society of America* 123, no. 4 (2008): 1983-1990.
- [21] Lee, Ho Young, and Bumkyoo Choi. "A multilayer PVDF composite cantilever in the Helmholtz resonator for energy harvesting from sound pressure." *Smart Materials and Structures* 22, no. 11 (2013): 115025.
- [22] Pillai, Minu A., and D. Ezhilarasi. "Improved Acoustic Energy Harvester Using Tapered Neck Helmholtz Resonator and Piezoelectric Cantilever Undergoing Concurrent Bending and Twisting." *Procedia Engineering* 144 (2016): 674-681.
- [23] Peng, Xiao, Yumei Wen, Ping Li, Aichao Yang, and Xiaoling Bai. "A wideband acoustic energy harvester using a three degree-of-freedom architecture." *Applied Physics Letters* 103, no. 16 (2013): 164106.
- [24] Yang, Aichao, Ping Li, Yumei Wen, Caijiang Lu, Xiao Peng, Wei He, Jitao Zhang, Decai Wang, and Feng Yang. "Note: High-efficiency broadband acoustic energy harvesting using Helmholtz resonator and dual piezoelectric cantilever beams." *Review of Scientific Instruments* 85, no. 6 (2014): 066103.
- [25] Li, Bin, Andrew J. Laviage, Jeong Ho You, and Yong-Joe Kim. "Acoustic energy harvesting using quarter-wavelength straight-tube resonator." In *ASME 2012 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, pp. 467-473. American Society of Mechanical Engineers, 2012.
- [26] Li, Bin, Jeong Ho You, and Yong-Joe Kim. "Low frequency acoustic energy harvesting using PZT piezoelectric plates in a straight tube resonator." *Smart Materials and Structures* 22, no. 5 (2013): 055013.
- [27] Li, Bin, Andrew J. Laviage, Jeong Ho You, and Yong-Joe Kim. "Harvesting low-frequency acoustic energy using quarter-wavelength straight-tube acoustic resonator." *Applied Acoustics* 74, no. 11 (2013): 1271-1278.
- [28] Wang, Wei-Chung, Liang-Yu Wu, Lien-Wen Chen, and Chia-Ming Liu. "Acoustic energy harvesting by piezoelectric curved beams in the cavity of a sonic crystal." *Smart Materials and Structures* 19, no. 4 (2010): 045016.
- [29] Khan, Farid Ullah. "Electromagnetic-based acoustic energy harvester." In *Multi Topic Conference (INMIC), 2013 16th International*, pp. 125-130. IEEE, 2013.
- [30] Khan, F. U., and E. Izhar. "Acoustic-based electrodynamic energy harvester for wireless sensor nodes application." *Int. J. Mater. Sci. Eng* 1, no. 2 (2013): 72-78.
- [31] Khan, Farid Ullah. "Hybrid acoustic energy harvesting using combined electromagnetic and piezoelectric conversion." *Review of Scientific Instruments* 87, no. 2 (2016): 025003.
- [32] Khan, Farid Ullah. "State of the art in acoustic energy harvesting." *Journal of Micromechanics and Microengineering* 25, no. 2 (2015): 023001.

پی نوشت

-
1. world health organization (WHO)
 2. sound pressure level (SPL)
 3. acoustic energy harvester (AEH)
 4. resonator
 5. Helmholtz resonator
 6. lumped element
 7. quarter wavelength
 8. half wavelength
 9. sonic crystal

-
10. electromagnetic transducer
 11. piezoelectric transducer
 12. Faraday's law
 13. Pierre Curie
 14. lead zirconate titanate (PZT)
 15. polyvinylidene fluoride (PVDF)
 16. Horowitz
 17. Liu
 18. Lee

-
19. Pialli
 20. pure tone
 21. Peng
 22. wide band
 23. Li