

## (یادداشت فنی)

# طراحی، ساخت و آزمایش یک سامانه گرمصوتی موج ایستای هلیومی توان پایین برای کاربردهای تهویه مطبوع

احمد لشکر بلوک<sup>۱</sup>، غلامرضا اطاعتی\*<sup>۲</sup>، محمد افتخاری یزدی<sup>۱</sup>

۱. دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی

۲. دانشکده مهندسی انرژی و فیزیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

### چکیده

سامانه‌های گرمصوتی، از قوانین گرمصوتی برای انتقال حرارت با استفاده از صدا، سود می‌برند. این وسائل شامل موارد زیر هستند: یک منبع صوتی، یک لوله موج ایستا که طولی معادل کسری از یک طول موج دارد و یک پشته که گرادیان دمایی ایجاد شده در دو سر آن، عامل انتقال حرارت خواهد بود. در این تحقیق، طراحی و ساخت یک سامانه گرمصوتی توان پایین به منظور کاربردهای تهویه مطبوع، در دستور کار قرار گرفته است. این تحقیق شامل دو بخش می‌باشد که در بخش اول به طراحی اجزاء یک سامانه گرمصوتی براساس تحلیل‌های عددی، پرداخته شده است و در بخش دوم، ساخت و بررسی عملکرد دستگاه تشریح شده‌اند. بررسی‌های عددی نشان دادند که طول و مکان پشته در لوله بازآوایش گر، سهم عمده‌ای در عملکرد کلی یک سامانه گرمصوتی دارند. در این دستگاه، هلیوم در فشار و دمای استاندارد به عنوان سیال کاری مورد استفاده قرار گرفت و منبع تولید توان صوتی نیز، یک بلندگوی ۲۵ وات است که در بسامد ۳۷۸ هرتز، کار می‌کند. بر اساس تحلیل‌های عددی و به منظور رسیدن به گرادیان دمایی معادل ۲۰ درجه سلسیوس، طول پشته برابر با ۳۸ میلی‌متر و موقعیت مرکز آن نیز در فاصله‌ی ۸۵ میلی‌متری نسبت به سر بلندگو بدست آمدند. نتیجه‌ی آزمایش‌ها نشان داد که دستگاه گرمصوتی ساخته شده، گرادیان دمایی معادل ۱۴ درجه سلسیوس دارد.

**کلیدواژه‌ها:** گرمصوتی، پشته، بازآوایش گر، سیال عامل، گرادیان دمایی

### ۱. مقدمه

سامانه‌های معمول می‌باشد. در سامانه‌های تولید توان و تبرید به روش گرمصوتی از سوخت‌های فسیلی و مبردهای مخرب محیط‌زیست استفاده نمی‌گردد و از امواج صوتی جهت تولید توان صوتی استفاده می‌شود. از همین رو در این سامانه‌ها، قطعه متحرک مانند پیستون، میل‌لنگ، سوپاپ و غیره وجود ندارد. در نتیجه، در این سامانه‌ها ارتعاش به حداقل رسیده، به روغن کاری نیز نیازی نیست و تعمیر و نگهداری آن بسیار آسان است. در سامانه‌های گرمصوتی از گازهایی مانند گازهای نجیب و حتی هوا به عنوان سیال کاری استفاده می‌شود که نه تنها دوستدار محیط‌زیست هستند، بلکه به علت عدم تغییر فاز، کاربرد گسترده‌ای در صنعت دارند. در ضمن تنوع و انعطاف‌پذیری در نوآوری و کاربرد از دیگر مزایای گرمصوتیات<sup>۲</sup> است.

با مهار کردن تغییرهای دمایی در امواج طولی صوتی، می‌توان ماشینی را خلق کرد که جایگزین یخچال‌ها و تأسیسات تهویه مطبوع فعلی گردد. این ماشین‌ها می‌توانند به همراه یخچال‌ها، مولدهای خانگی، آبگرمکن‌ها و یا خنک‌ساز (کولرها) و بخاری‌های معمولی به کار گرفته شوند.

این سامانه‌ها قابلیت‌های ویژه‌ای دارند که موجب برتری آن‌ها از دیگر سامانه‌های رایج می‌شود. یک سامانه گرمصوتی<sup>۱</sup> چه از نوع تولید توان و چه از نوع تبریدی، بسیار ارزان قیمت‌تر از الگوهای رایج بوده و دارای قابلیت اطمینان بیشتر، معمولاً سبک‌تر و ساخت آسان‌تر از

\* نویسنده پاسخگو: r\_etaati@aut.ac.ir

<sup>1</sup> Thermoacoustic

<sup>2</sup> Thermoacoustics

خود منجر به افزایش کارایی کلی سردساز گرمصوتی می‌گردد. عمق پخش لزج نیز، معیاری برای اندازه‌گیری مقدار اتلاف‌های اصطکاکی در درون سیال است [۲]. در بسیاری از موارد از هلیوم به این خاطر که عدد پرناتل پایین ( $\sigma = 0.68$ ) و نسبت گرمای مخصوص ( $1.6667 = \gamma$ ) بالایی دارد، استفاده می‌شود. علاوه بر آن، هلیوم هدایت حرارتی خوبی نیز دارد [۳].

## ۲-۲. فشار کاری

فشار کاری متوسط ( $P_m$ ) نیز متناسب با چگالی قدرت در یک سردساز گرمصوتی است [۴]. به این منظور، مناسب می‌باشد که فشار کاری بالاتری را انتخاب نماییم. اگرچه، سایر عوامل از قبیل مقاومت مکانیکی لوله بازآوایش‌گر و تأثیر فشار بر عمق پخش گرمایی، انتخاب این فشار کاری را محدود می‌نماید. فشار کاری بالاتر، منجر به انتخاب محفظه فشاری قوی‌تری می‌شود. انتخاب بازآوایش‌گری قوی‌تر منجر به سردساز گرمصوتی گران‌تر، سنگین‌تر و حجیم‌تر خواهد شد. علاوه بر این اشکالات، فشار درونی بیشتر در سامانه موجب پیچیده‌تر شدن آب‌بندی سیال کاری در درون بازآوایش‌گر خواهد شد. آب‌بندی سردساز گرمصوتی هنگامی سخت‌تر خواهد شد که با گازی مانند هلیوم به واسطه اندازه کوچک مولکول‌های آن، سر و کار داشته باشیم. به همین منظور برای طراحی سردساز گرمصوتی با فشارهای داخلی بالاتر، نیازمند استفاده از مواد ناآشنایی مانند حلقه‌های ایندیومی برای جلوگیری از نشت هلیوم، می‌باشیم. ملاحظه دیگری که باید در نظر گرفته شود، تأثیر فشار کاری بر عمق پخش گرمایی است. عمق پخش گرمایی متناسب با عکس ریشه دوم فشار کاری متوسط خواهد بود و بنابراین، هنگامی که فشار کاری متوسط افزایش می‌یابد، عمق پخش گرمایی کاهش می‌یابد. برای یک اندازه مشخص کال (کانال) پشته، این موضوع منجر به کاهش کارایی سامانه خواهد شد. اگر قصد انتخاب و طراحی اندازه کال‌های (کانال‌های) پشته براساس فشار کاری متوسط را داریم، می‌توان این مشکل را با انتخاب کال‌های (کانال‌های) کوچک‌تر جبران نمود. اگرچه، انتخاب کال‌های (کانال‌های) کوچک‌تر ممکن است

البته باید توجه داشت این سامانه‌ها مشکل‌هایی نیز دارند. بزرگ‌ترین این مشکل‌ها، توان و کارایی پایین این سامانه‌هاست. مشکل دیگر این سامانه‌ها حساسیت بسیار به شرایط محیطی مانند کثیفی تراگذارهای (مبدل‌های) حرارتی و یا وجود شوک و ارتعاش است که در کارکرد آن‌ها اختلال ایجاد می‌کند. در ضمن باید اشاره کرد که این سامانه‌ها اندازه بزرگی دارند که مشکل‌های بسیاری به بار می‌آورد. علاوه بر آن وجود معادله‌های مختلط و روابط بسیار پیچیده و نه چندان آسان از دیگر معایب این فن‌آوری است. ضمن اینکه فهم بسیار مشکل فیزیکی جریان، باعث شده است تا مشاهده جریان‌های گرمصوتی و حوادثی که در حین این فرآیندها اتفاق می‌افتد، همچنان به طور واضح مشخص نباشد.

## ۲. طراحی سامانه

در طراحی یک سامانه گرمصوتی، پارامترهای فراوانی از قبیل: خواص سیال عامل، شرایط کاری سامانه، اندازه و هندسه کال‌های (کانال‌های) پشته<sup>۱</sup>، طول، جنس و موقعیت پشته، ابعاد و جنس لوله بازآوایش<sup>۲</sup> و پارامترهای مربوط به مولد صوتی، را باید در نظر داشت [۱].

### ۲-۱. سیال عامل

برای انتخاب سیال عامل، مهم‌ترین پارامتر انتخاب عدد پرناتل می‌باشد که به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$\sigma = \left( \frac{\delta_v}{\delta_k} \right)^2 \quad (1)$$

$\delta_k$  عمق پخش گرما<sup>۳</sup> و  $\delta_v$  عمق پخش لزج<sup>۴</sup> می‌باشد. عمق پخش گرمایی متناظر با ضخامت لایه‌ای در اطراف یک صفحه از پشته می‌باشد که گرما طی یک چرخه نوسان کامل می‌تواند از درون آن منتشر شود. عمق پخش لزج نیز متناظر با ضخامت لایه‌ای در اطراف یک صفحه از پشته می‌باشد که اثرات لزجت، عمده و قابل توجه باشد. عمق پخش گرمایی بالا، اجازه خواهد داد انتقال حرارت بیشتری بین دیواره‌های پشته و ذرات گاز انجام شود که

<sup>1</sup> Stack

<sup>2</sup> Resonator

<sup>3</sup> Thermal Diffusion

<sup>4</sup> Viscous Diffusion

براساس مطالعه‌های قبلی، بهینه‌ترین نسبت برای افزایش بازده صوتی پشته،  $\delta_k/h = 3$  می‌باشد (شعاع هیدرولیک کال است) [۶].

از آن جایی که فاصله بین صفحه‌های پشته در این مورد برابر با ۱/۱ میلی‌متر است، این نسبت، منجر به عمق پخش گرمایی برابر با ۰/۳۷ میلی‌متر، خواهد شد. با استفاده از رابطه زیر:

$$\delta_k = \sqrt{\frac{2K}{\rho C_p \omega}} \quad (2)$$

می‌توان بسامد کاری سامانه را محاسبه نمود. در رابطه فوق،  $K$  ضریب هدایت حرارتی گاز،  $\rho$  چگالی گاز،  $C_p$  گرمای مخصوص گاز در فشار ثابت و  $\omega$  سرعت زاویه‌ای نوسان هستند.

با دانستن بسامد کاری، می‌توان از معادله‌های شارش گرما و توان بدون- بعد زیر برای محاسبه و ترسیم منحنی‌های عملکرد به ازای طول و موقعیت‌های متفاوت پشته نسبت به منبع صوتی، استفاده نمود [۷].

$$\dot{Q}_{cn} = - \frac{\delta_{kn} D^{\vee} \sin(\gamma x_{sn})}{\lambda \gamma (1 + \sigma) \Lambda} \left( \frac{\Delta T_{mn} \tan(x_{sn}) (1 + \sqrt{\sigma} + \sigma)}{(\gamma - 1) B L_{sn} (1 + \sqrt{\sigma})} - 1 \right) \quad (3)$$

و

$$\dot{W}_n = \frac{\delta_{kn} L_{sn} D^{\vee}}{4\gamma} \left[ \begin{array}{l} (\gamma - 1) B \cos^{\vee}(x_{sn}) \\ \left( \frac{\Delta T_{mn} \tan(x_{sn})}{B L_{sn} (\gamma - 1) (1 + \sqrt{\sigma}) \Lambda} - 1 \right) \\ - \frac{\sqrt{\sigma} \sin^{\vee}(x_{sn})}{B \Lambda} \end{array} \right] \quad (4)$$

که در آن

$$\Lambda = 1 - \delta_{kn} \sqrt{\sigma} + \frac{1}{\gamma} \sigma \delta_{kn}^{\vee} \quad (5)$$

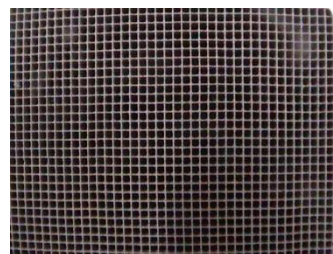
حال خواهیم داشت:

$$COP = \frac{\dot{Q}_{cn}}{\dot{W}_n} \quad (6)$$

منجر به دشواری در ساخت پشته گردد. علاوه بر آن، کال‌های (کانال‌های) کوچک‌تر منجر به اتلاف انرژی لزج بیشتری شده که به معنای سطح جامد بیشتری در تماس با سیال عامل، خواهد بود. بنابراین، انتخاب فشار کاری متوسط باید در تعادل با تاثیرات آن در ارتباط با چگالی قدرت، طراحی بازآوایش‌گر و طراحی پشته، باشد. استفاده از هلیوم در فشار جو یک، به شکل بسیار عمده‌ای خطر نشتی را کاهش داده و در نتیجه نیاز به استفاده از مواد آب‌بندی گران قیمت را از بین می‌برد. علاوه بر آن، از آنجایی که در این سردساز گرماسوتی از یک پشته آماده به جای ساخت یک پشته، استفاده شده است، استفاده از فشار کاری بیشتر نیازمند بسامد کاری پایین‌تری برای غلبه بر تاثیر نامطلوب آن بر روی عمق پخش گرمایی است. فشار کاری پایین‌تر، کارایی سامانه را کاهش داده و در نتیجه نیازمند طول بازآوایش‌گر بیشتری خواهد بود.

### ۲-۳. پشته

در مورد پشته نیز باید اشاره کرد که یک پشته مناسب باید قادر به تبدیل مؤثر نوسان‌های فشاری صوتی به گرادیان دما باشد. مطلوب این است که پشته از موادی باشد که هدایت حرارتی پایین و ظرفیت گرمایی بیشتری نسبت به سیال عامل داشته باشد. بنابر همین دلیل‌ها، بیشتر از مواد سرامیکی و پلاستیکی برای ساخت پشته، استفاده می‌شود [۵]. در ساخت این سامانه گرماسوتی و به جهت تسهیل در انجام آن، از تراگذار (مبدل) کاتالیست آگزوز یک خودرو (شکل ۱) که استوانه‌ای سرامیکی با کال‌های (کانال‌های) مربعی به موازات محور آن است، استفاده شد.



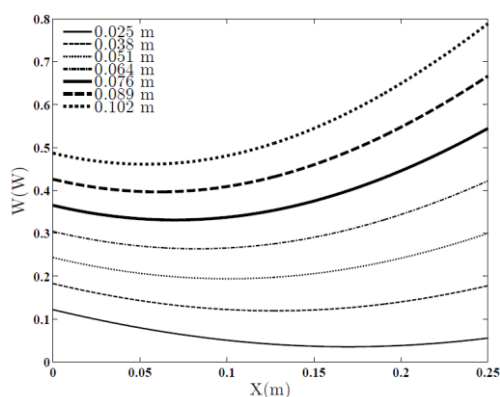
شکل ۱ تراگذار سرامیکی کاتالیست آگزوز خودرو با کال‌های (کانال‌های) مربعی.

میلی‌متر، در نظر می‌گیریم. حال با توجه به انتخاب قطر مناسب، می‌توان، سطح مقطع عرضی پشته را محاسبه نمود.

$$A = \frac{1}{4} \pi (74 \text{ mm})^2 = 4300.7 \text{ (mm)}^2 \quad (7)$$

$$= 0.0043 \text{ m}^2$$

با استفاده از این مقدار می‌توانیم برای محاسبه توان صوتی بدون - بعد مورد نیاز، اقدام کنیم که نمودار مرتبط، در شکل ۳ آورده شده است. مطابق شکل ۳، برای رسیدن به گرادیان دمایی انتخابی، توان صوتی ورودی باید در حدود ۰/۱۲۵ وات باشد.



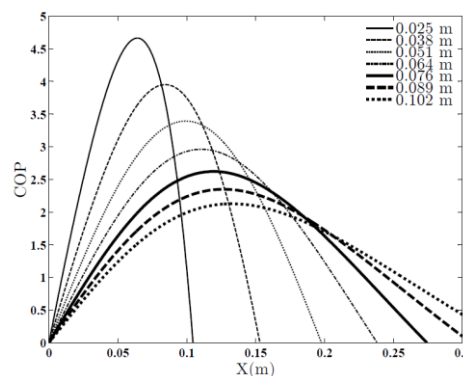
شکل ۳ توان صوتی مورد نیاز به ازای موقعیت مرکز پشته بر اساس طول‌های متفاوت پشته.

#### ۲-۴. بازآوایش‌گر

در مورد انتخاب جنس بازآوایش‌گر، سه حوزه وجود دارند که باید در نظر گرفته شوند: مقاومت مکانیکی، صوتی و انتقال حرارت. فهم مقاومت مکانیکی تا حدودی سر راست است. جنس پشته باید به گونه‌ای باشد که هم به اندازه کافی مقاوم بوده و هم اینکه نشت‌ناپذیر باشد (به خصوص هنگامی که از هلیوم استفاده می‌کنیم). از منظر صوتی، جنس بازآوایش‌گر باید به گونه‌ای باشد که مقاومت بالایی داشته باشد و در برابر گاز، به شکل مرز صلب، عمل نموده و در نتیجه اتلافات ناشی از امواج فشاری صوتی، به حداقل برسد. مقاومت مشخصه یک ماده متناسب با چگالی آن بوده و در نتیجه، مواد چگال‌تر، بازآوایش‌گرهای بهتری خواهند بود.

( $Q$ ) توان خنک‌کنندگی سامانه،  $W$  توان صوتی ورودی،  $\Lambda$  متغیر واسطه،  $D=0/01$  نسبت محرکه،  $\gamma$  نسبت گرماهای مخصوص گاز،  $B$  ضریب تخلخل پشته،  $X_s$  و  $L_s$  و  $\Delta T_m$  به ترتیب مکان، طول و گرادیان دمایی متوسط دو سر پشته، و زیرنویس  $n$  نشان‌دهنده بدون - بعد بودن متغیرها، می‌باشند).

در این تحقیق، با استفاده از برنامه‌های نوشته‌شده در محیط نرم‌افزار متلب، معادله‌های ۳ تا ۵ و با استفاده از شرایط کاری مرتبط با هلیوم در فشار و دمای جو، تحلیل گردیدند. در شکل ۲ منحنی مربوط به سی‌اِپی<sup>۱</sup> رسم شده است.



شکل ۲ ضریب عملکرد به ازای موقعیت مرکز پشته بر اساس طول‌های متفاوت پشته.

به واسطه شکنندگی سرامیک، طول پشته را برابر با ۰/۰۳۸ متر انتخاب می‌کنیم که از سی‌اِپی مناسبی هم برخوردار است (در حدود ۴).

با توجه به این منحنی، موقعیت مرکز پشته از مقابل مولد صوتی، برابر با ۰/۰۸۵ متر خواهد بود. بنابراین، سر گرم پشته باید در فاصله  $m = \frac{1}{4} (0.038) = 0.0095$  از مقابل مولد صوتی و سر سرد آن در فاصله  $m = 0.085 + 0.019 = 0.104$  قرار گیرد. با توجه به انتخاب لوله پلی وینیل کلراید (پی‌وی‌سی)<sup>۲</sup> با قطر داخلی ۷۶/۶ میلی‌متر و با در نظر گرفتن امکان جابجایی مناسب برای پشته به منظور انجام آزمایش‌های متفاوت، قطر واقعی پشته را اندکی کمتر از قطر داخلی لوله و برابر با ۷۴

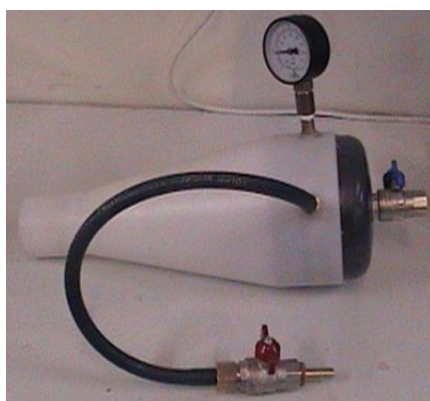
<sup>۱</sup> COP; Coefficient of Performance

<sup>۲</sup> PVC

اگر صرفاً به جهت نصب آسان تجهیزات، طول قسمت با قطر بیشتر را برابر با ۱۸ سانتی‌متر در نظر بگیریم، و با توجه به این‌که طول قسمت شیب‌دار (به منظور جلوگیری از اغتشاش‌های صوتی در گذار ناگهانی از لوله با قطر بیشتر به لوله با قطر کمتر، از یک قسمت شیب‌دار استفاده می‌شود). برابر با ۲٫۲ سانتی‌متر است، با انتخاب قطر قسمت باریک‌تر برابر با ۴۲٫۶ میلی‌متر، طول آن طبق رابطه زیر [۱۰]:

$$\cot(kl) = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2 \tan(k(L_t - l)) \quad (9)$$

(k عدد موج) برابر با ۲۳٫۲ سانتی‌متر خواهد شد. معمولاً به خاطر جلوگیری از اغتشاش‌های صوتی در گذار سیال از قسمت با قطر کمتر به انتهای سامانه، از یک حجم واسط مخروطی استفاده می‌شود که ابعاد آن با استفاده از امکانات موجود بدین‌گونه خواهد شد که در یک طول مستقیم ۲۰ سانتی‌متری از شعاع قاعده کوچک ۲۱٫۳ میلی‌متری به شعاع قاعده بزرگ ۴۱٫۲ میلی‌متر خواهد رسید. بنابراین زاویه مخروط برابر با ۱۱٫۶۴۰ خواهد شد که در بازه‌ی توصیه شده  $9 \leq \alpha \leq 12$  قرار دارد [۱۱]. انتهای این مخروط نیز با یک درپوش استاندارد ۶ اینچ از جنس پی‌وی‌سی مسدود خواهد شد. بر روی این مخروط، شیرهایی برای پر و خالی کردن سامانه و همچنین یک فشارسنج ۱- تا ۵ بار برای اندازه‌گیری فشار لحظه‌ای سامانه، تعبیه شده‌اند. شکل ۵، حجم خنثی را به همراه تجهیزات نصب شده بر روی آن، نشان می‌دهد.

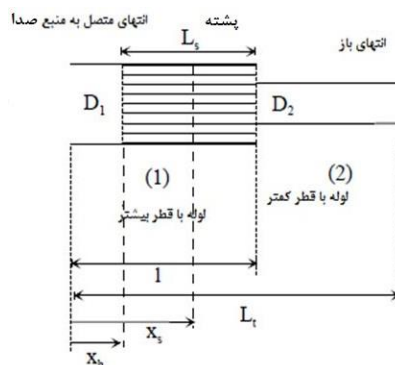


شکل ۵ حجم خنثی به همراه تجهیزات آن.

از منظر انتقال حرارت، استفاده از بازآوایش‌گرهای فلزی در کاربردهای گرمصوتی، معایبی دارد. هدایت حرارتی بالای فلزات، به گرما این امکان را خواهد داد که از محیط اطراف به سر سرد پشته، منتقل گردد. نشت حرارت در سر سرد پشته، منجر به استفاده از بخشی از توان خنک‌کنندگی در دسترس، به منظور دفع حرارت از طریق پشته و بازگشت آن به محیط اطراف در سر گرم پشته خواهد شد که البته به معنای انرژی اتلافی است که بار اضافی برای سردساز گرمصوتی، محسوب می‌گردد [۸]. با در نظر گرفتن تمام ملاحظه‌های گرمایی، بازآوایش‌گر، باید هدایت حرارتی پایینی داشته باشد. با توجه به دلایل ذکر شده در بالا، و با لحاظ کردن هر دو مورد قیمت پایین و آسانی ساخت، به سمت انتخاب لوله‌های پی‌وی‌سی برای ساخت بازآوایش‌گر، هدایت می‌شویم. توان اتلافی در واحد سطح تماس را می‌توان به صورت زیر تعریف نمود:

$$\frac{dW_{loss}}{dS} = \frac{1}{4} \rho_m |u_1|^2 \delta_v \omega + \frac{1}{4} \frac{|P_1|^2}{\rho_m a^2} (\gamma - 1) \delta_k \omega \quad (8)$$

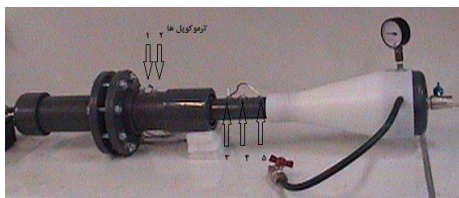
( $u_1$  سرعت ذره،  $P_1$  نسبت دامنه فشار صوتی و  $a$  سرعت بی‌درو صوتی می‌باشد) بنابراین، کاهش در سطح تماس در لوله بازآوایش‌گر منجر به افزایش کارایی خواهد شد [۹]. دو راه برای کاهش سطح تماس سردساز گرمصوتی موج ایستا با سیال عامل وجود دارند که به صورت گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند: اولین راه استفاده از یک بازآوایش‌گر  $\frac{1}{4}$  طول موج و دومین راه کاهش قطر بازآوایش‌گر در سمت سرد پشته، می‌باشد. این هندسه را، "بازآوایش‌گر هافلر" می‌نامند (شکل ۴).



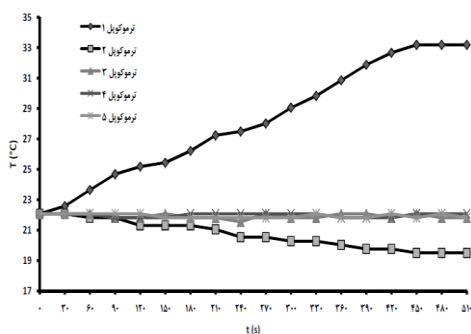
شکل ۴ هندسه‌ی هافلر.

### ۳. ساخت سامانه

محیط آزمایشگاه که تقریباً برابر با ۲۲ درجه سلسیوس می‌باشد، قرار داشته‌اند. هنگامی که بلندگو با شرایط کاری از پیش تعیین شده (بسامد ۳۷۸ هرتز و توان صوتی ورودی ۰/۱۲ وات) و با استفاده از یک موج سینوسی که توسط منبع تولید موج، ایجاد می‌شود، تحریک شده و به کار می‌افتد، موج صوتی ایستا در درون لوله بازآوایش‌گر ایجاد شده و فرایند گرمصوتی، آغاز می‌شود. به محض آغاز فرایند گرمصوتی، ذرات هلیوم شروع به انتقال حرارت از سر سرد پشته به سر گرم آن خواهند نمود. در نتیجه دما در سر سرد پشته شروع به کاهش و در سر گرم آن شروع به افزایش خواهد نمود. بدیهی است که به واسطه وجود پشته، حداکثر گرادیان دمایی نیز در دو سر پشته ایجاد شده و در سه گرماسنج باقی‌مانده، تقریباً هیچ تغییر دمایی مشاهده نشده و دما ثابت می‌ماند. یک تفاوت دمایی به اندازه تقریبی ۱۴ درجه سلسیوس در دو سر پشته و پس از ۴۵۰ ثانیه مشاهده گردید به گونه‌ای که در سر سرد پشته شاهد ۳ درجه سلسیوس کاهش دما و در سر گرم آن شاهد ۱۱ درجه سلسیوس افزایش دما بود.



شکل ۷ موقعیت گرماسنج‌ها (ترموکوپل‌ها) بر روی بازآوایش‌گر.



شکل ۸ سیر زمانی دماهای اندازه‌گیری شده در پنج گرماسنج.

### ۵. نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

گرمصوتیات یک حوزه‌ی نوید بخش در مباحث مرتبط با تولید انرژی می‌باشد که می‌تواند به عنوان یک منبع

سردساز گرمصوتی طراحی شده در قسمت قبل، با استفاده از مواد در دسترس ساخته شد. بازآوایش‌گر و جعبه نگهدارنده مولد صوتی، به وسیله اتصال لوله‌های استاندارد پی‌وی‌سی و حجم خنثی از پلی‌اتیلن ساخته شدند و اتصال‌های مربوط به آن‌ها با چسب مخصوص پی‌وی‌سی، به هم متصل شدند. از مجموعه نوسان‌ما (اسیلوسکوپ)<sup>۱</sup>، تقویت‌کننده<sup>۲</sup>، منبع تولید موج<sup>۳</sup> و یک بلندگوی ۲۵ وات نیز برای تولید موج صوتی با بسامد و توان ورودی دلخواه (یک موج سینوسی ۳۷۸ هرتز و ۰/۱۲ وات) استفاده کردیم. از ۵ دماسنج مقاومتی پی‌تی ۱۰۰<sup>۴</sup> نیز برای خواندن مقاومت‌های هر نقطه و در نتیجه دمای متناظر آن، استفاده گردید. سرهم کردن نهایی دستگاه به همراه تجهیزات آن نیز در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶ سرهم کردن نهایی سامانه گرمصوتی به همراه متعلقات آن.

### ۴. آزمایش‌ها و نتایج

در این آزمایش تأثیر طراحی ارائه شده در قسمت قبل، بر روی توزیع دما در دو سر پشته و هم‌چنین در درون لوله بازآوایش‌گر را بررسی کردیم. بدین منظور پشته در مکان از پیش تعیین شده قرار داده شد (مرکز پشته در فاصله ۸/۵ سانتی‌متری از منبع صوتی قرار خواهد گرفت  $x_8 = 8.5 \text{ cm}$ ). دو گرماسنج (ترموکوپل) در دو سر پشته و به فاصله ۳/۸ سانتی‌متر از یکدیگر (به اندازه طول پشته) قرار داده شدند. سه گرماسنج دیگر نیز در درون لوله‌ی با قطر کم‌تر و با همین فاصله نسبت به یکدیگر (۳/۸ سانتی‌متر) قرار داده شدند (شکل ۷).

تمامی داده‌های آزمایش در طول ۵۱۰ ثانیه جمع‌آوری گردیدند. تغییرات زمانی دما در ۵ نقطه مشخص شده پیش‌گفته در شکل ۸ نشان داده شده‌اند. این منحنی نشان می‌دهد که تمام این نقاط در ابتدای آزمایش در در دمای

<sup>1</sup> Oscilloscope

<sup>2</sup> Amplifier

<sup>3</sup> Function generator

<sup>4</sup> PT100

نشده و در نتیجه تحت تأثیر شوک‌های حرارتی و صوتی محیط اطراف قرار گرفت.

#### ۶. فهرست منابع

- [1] C. Herman, Z. Travnicsek, "Cool sound: the future of refrigeration? Thermodynamic and heat transfer issues in thermoacoustic refrigeration," *Heat and Mass Transfer*, 42, pp. 492-500, 2005.
- [2] M.E.H. Tijani, J.C.H. Zeegers, A.T.A.M. De Waele, "Prandtl number and thermoacoustic refrigerators," *Journal of Acoustical Society of America*, vol. 112, no. 1, pp. 134-43, 2002.
- [3] J.R. Belcher, W.V. Slaton, R. Raspet, H.E. Bass, J. Lightfoot, "Working gases in thermoacoustic engines," *Journal of Acoustical Society of America*, vol. 105, no. 5, pp. 2677-84, 1999.
- [4] M.E.H. Tijani, J.C.H. Zeegers, A.T.A.M. De Waele, "Design of thermoacoustic refrigerators, *Cryogenics*," vol. 42, pp. 49-57, 2002.
- [5] M.E.H. Tijani, J.C.H. Zeegers, A.T.A.M. De Waele, "The optimal stack spacing for thermoacoustic refrigeration," *Journal of Acoustical Society of America*, vol. 112, no. 1, pp. 128-33, 2002.
- [6] B. Ward, J. Clark, G. Swift, "Design Environment for Low-amplitude thermoacoustic energy conversion," Version 6.2, Los Alamos National Laboratory, 2008.
- [7] M.E.H. Tijani, J.C.H. Zeegers, A.T.A.M. De Waele, "Construction and performance of a thermoacoustic refrigerator," *Cryogenics*, 42, pp. 59-66, 2002.
- [8] S. Backhaus, G. W. Swift, "A thermoacoustic-Sterling heat engine: Detailed study," *Journal of Acoustical Society of America*, vol. 107, no. 6, pp. 3148-66, 2000.
- [9] J.A. Adeff, T.J. Hofler, "Design and construction of a solar-powered, thermoacoustically driven, thermoacoustic refrigerator," *Journal of Acoustical Society of America*, vol. 107, no. 6, pp. L37-L42, 2000.
- [10] H. Ishikawa, J. David, "Numerical investigations of flow and energy fields near a thermoacoustic couple," *Journal of Acoustical Society of America*, vol. 111, no. 2, pp. 831-39, 2002.
- [11] T. Jin, G.B. Chen, B.R. Wang, S.Y. Zhang, "Application of thermoacoustic effect to refrigeration," *Review of Scientific Instruments*, vol. 74, no. 1, pp. 677-79, 2003.

تجدیدپذیر انرژی نیز مورد توجه قرار گیرد. اگر چه از بازده نسبتاً پایینی در مقایسه با سامانه‌های رایج فعلی، حداقل در حوزه‌های مرتبط با تهویه مطبوع، برخوردار است، اما، به دلیل مزایای فوق‌العاده‌ای که نسبت به همین سامانه‌ها دارد، با اقبال بسیار گسترده‌ای در محافل علمی کشورهای پیش‌رو در این زمینه، مواجه گردیده است.

هدف اصلی از انجام این پروژه، ساخت یک سامانه ساده گرماسوتی توان پایین به منظور معرفی و نشان دادن قابلیت‌های نهفته در گرماسوتیات بوده است.

براساس این آزمایش‌ها، نتیجه‌های زیر به دست آمدند:

۱. توزیع دما در درون لوله‌ی بازآوایش‌گر، به شدت تابعی از حضور پشته می‌باشد. بعد از حدود ۴۵۰ ثانیه، گرادیان دمایی به اندازه ۱۴ درجه سلسیوس در دو سر پشته ایجاد شد.
۲. مکان و موقعیت پشته در تعیین گرادیان دمایی، فوق‌العاده حائز اهمیت می‌باشد. در این حالت، برای رسیدن به حداکثر سی‌اُپی در طول ۳/۸ سانتی‌متری پشته، مکان پشته باید برابر با ۸/۵ سانتی‌متر باشد.
۳. توان صوتی ورودی به منظور رسیدن به حداکثر گرادیان دمایی، پارامتر مهمی است. به همین منظور استفاده از یک بلندگو با بازده بالا، برای رسیدن به این هدف، بسیار مهم می‌باشد.
۴. حداکثر ضریب عملکرد (سی‌اُپی) در این طراحی، تقریباً برابر با ۴ می‌باشد.
۵. اصلی‌ترین دلایل‌ها برای تفاوت ایجادشده بین محاسبه‌های نظری (طراحی برای گرادیان دمایی ۲۰ درجه سلسیوس) و نتیجه‌ی عملی (حداکثر گرادیان دمایی ۱۴ درجه سلسیوس)، شامل موارد زیر هستند:  
 الف) عدم آب‌بندی مناسب: هلیوم گاز بسیار نشت‌پذیری است و در صورت آب‌بندی نامناسب، پس از مدتی از سامانه تخلیه شده و جای خود را به هوای محیط اطراف می‌دهد.  
 ب) عدم استفاده از یک بلندگو با بازده بسیار بالا: که موجب افزایش اتلاف حرارتی و در نتیجه عملکرد غیر دقیق سامانه شد.  
 ج) عدم استفاده از عایق‌بندی حرارتی و صوتی مناسب: در این آزمایش، سامانه به طرز مناسبی عایق‌بندی

(Technical Note)

**Design, manufacturing and testing of a low power helium standing wave thermoacoustic system for air-conditioning applications**

**A. Lashkarbolouk<sup>1</sup>, G.R. Etaati<sup>\*2</sup>, M. Eftekhariyazdi<sup>1</sup>**

1. Department of Engineering, Islamic Azad University Central Tehran Branch  
2. Department of Energy Engineering and Physics, Amirkabir University of Technology

**Abstract**

Thermoacoustics is a science dealing with conversion of thermal energy into sound energy and vice versa. Thermoacoustic systems use thermoacoustics rules for heat transfer by sound. These devices include a loudspeaker, a standing wave tube with a length of a fraction of a wavelength and a stack which its temperature gradient is the cause of heat transfer. In this study, design and construction of a low power thermoacoustic system for air conditioning applications, were considered. This paper consist of two parts: design of a thermoacoustic system based on numerical analyses, and its construction plus its performance analysis. Numerical analyses reveals that the length and position of the stack in the resonator, the working frequency and the input acoustic power, have major contributions to the total performance of the system. In this system, helium at the standard pressure and temperature was used as working fluid. The acoustic driver was a 25 watts loudspeaker that works in 378Hz. Based on numerical analyses and a 20 °C temperature gradient quota, the length of the stack and the position of its center were found to be 38 mm and 85 mm, respectively. Our experimental results indicated a 14 C temperature gradient across the stack.

**Keywords:** Thermoacoustic, Stack, Resonator, Working fluid, Temperature gradient

pp. 73-79 (In Persian)

---

\* Corresponding author E-mail: r\_etaati@aut.ac.ir