



# Analysis of the Onset Process of Spontaneous Oscillations in a Standing Wave Thermoacoustic Engine, Using the Experimental Method and an Improved Numerical Solution Method

## ARTICLE INFO

### Article Type

Original Research

### Authors

Moradi A.<sup>1</sup>,  
Omami F.<sup>1\*</sup>,  
Saboochi Z.<sup>2</sup>,  
Bahrami M.<sup>1</sup>

### How to cite this article

Moradi A, Omami F, Saboochi Z, Bahrami M. Analysis of the Onset Process of Spontaneous Oscillations in a Standing Wave Thermoacoustic Engine, Using the Experimental Method and an Improved Numerical Solution Method. Modares Mechanical Engineering. 2021; 21(11):767-781.

<sup>1</sup> Faculty of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

<sup>2</sup> Aerospace Research Institute, Ministry of Science, Research, and Technology, Tehran, Iran.

### \*Correspondence

Faculty of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

Phone: -

Fax: -

ommi.fathollah@gmail.com

### Article History

Received: 01, September 2020

Accepted: 21 June, 2021

ePublished: 29 September, 2021

## ABSTRACT

Thermoacoustic engine is an energy conversion device that uses the energy carrying capacity of sound waves to generate sound power from thermal energy. Although it is not difficult to build thermoacoustic engines due to having no moving parts, many researchers have always tried to reduce the temperature difference required to run thermoacoustic engines, so that these devices can be used in most industries. To investigate the onset conditions of the system, temperature changes in the stack section of a standing wave Thermoacoustic engine were investigated. Numerical analysis of temperature changes along the stack, was performed using the Rott's thermoacoustic equations. The temperature was calculated instantaneously along the stack, and this process continued until the thermal equilibrium was established in the system. In addition, integrating numerical solution equations with the circuit analogy method, made it possible to calculate the startup time of spontaneous oscillations. A standing wave with an open end was designed and built to validate the temperature curves obtained at different moments. This thermoacoustic engine was able to display the temperature instantaneously along the stack with parallel plates structure. The data obtained from the experimental tests and the temperature changes diagram resulting from the numerical solution method, showed a good agreement with each other for the onset process in the system.

**Keywords** Thermoacoustic Engine, Standing Wave, Stack, Onset Process, Numerical analysis

## CITATION LINKS

[1] Common features in the thermoacoustics of flames and engines. [2] Review of the Literature on Psoriasis. [3] Ueber die Schallschwingungen ... [4] The Theory of Sound. [5] Damped and thermally driven acoustic oscillations ... [6] General formulation of thermoacoustics for stacks having arbitrarily shaped pore cross sections. [7] A pistonless Stirling engine. [8] Study of a thermoacoustic prime mover below onset of self-oscillation. [9] Standing wave analysis of a thermoacoustic prime mover below onset of self-oscillation. [10] Design environment for low-amplitude thermoacoustic energy conversion. [11] Thermoacoustics. [12] Numerical simulation of the onset characteristics in a standing wave ... [13] Performance measurements on a thermoacoustic refrigerator driven at high amplitudes. [14] Natural engines. [15] Experimental study of the oscillating flow characteristics for a regenerator ... [16] Numerical investigation of synthetic jets driven by thermoacoustic standing waves. [17] Numerical study of entropy generation within thermoacoustic heat exchangers with plane fins. [18] 3D investigation of thermoacoustic fields in a square stack. [19] Numerical study on effects of computational domain length ... [20] Experimental and numerical investigations of thermal characteristics of heat exchangers ... [21] Energy flux density in a thermoacoustic couple. [22] Numerical investigations of flow and energy fields ... [23] Estimation of heat transfer coefficients in oscillating flows. [24] Thermoacoustics. [25] High-amplitude thermoacoustic flow ... [26] Modelling of oscillations ... [27] Convective heat transport along a thermoacoustic couple in the transient regime. [28] Numerical investigation of local entropy production rate of a finned oval tube ... [29] Nucleate pool-boiling heat transfer... [30] Thermoacoustic heat transportation and energy transformation... [31] Numerical calculation of the temperature difference ...

## تحلیل فرآیند شروع نوسانات خوبه‌خودی در موتور گرماصوتی موج ایستا به کمک روش تجربی و روش حل عددی بهبود یافته

علیرضا مرادی

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

فتح‌اله امی\*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

زهیر صبحی

پژوهشگاه هوافضا، وزارت علوم، تحقیقات و فناوری، تهران، ایران

محسن بهرامی

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

### چکیده

موتور گرماصوتی یک ابزار جهت بازیابی انرژی است که با استفاده از ویژگی حمل انرژی به کمک امواج صوتی، امکان تولید توان صوتی از انرژی حرارتی را فراهم می‌کند. هرچند ساخت موتورهای گرماصوتی به جهت نداشتن قطعات متحرک، کار چندان دشواری نیست، اما محققان بسیاری همواره تلاش نموده‌اند تا اختلاف دمای مورد نیاز جهت راه اندازی موتورهای گرماصوتی را کاهش دهند تا این دستگاه در اکثر صنایع مورد استفاده قرارگیرد. جهت بررسی شرایط شروع سیستم، تغییرات دما در بخش استک یک موتور گرماصوتی موج ایستا مورد بررسی قرار گرفت. بررسی عددی تغییرات دما در طول استک، به کمک معادلات گرماصوتی رات صورت گرفت. محاسبه دما در طول استک به صورت لحظه-ای صورت می‌گرفت که این روند تا لحظه برقراری تعادل حرارتی در سیستم ادامه می‌یافت. همچنین، ادغام معادلات حل عددی و روش همترایی مدار الکتریکی، امکان محاسبه زمان شروع نوسان‌های خودبه‌خودی را فراهم نمود. جهت اعتبار سنجی منحنی‌های دمای به‌دست آمده در زمان-های مختلف، موتور گرماصوتی موج ایستا با یک انتهای باز طراحی و ساخته شد. این موتور گرماصوتی قادر به نمایش دما به صورت لحظه‌ای در طول استک با آرایش صفحات موازی بود. داده‌های حاصل از تست‌های تجربی و نمودارهای تغییرات دمای به‌دست آمده از روش حل عددی، مطابقت خوبی را برای فرآیند شروع عملکرد سیستم با یکدیگر نشان دادند.

**کلیدواژه‌ها:** موتور گرماصوتی، موج ایستا، استک، فرآیند شروع، حل عددی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۶/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۳۱

\*نویسنده مسئول: ommi.fathollah@gmail.com

### ۱- مقدمه

بایرون هیگنز اولین کسی بود که با مشاهده صدایی که از شعله هیدروژن داخل لوله ایجاد شده بود، توانست اولین مشاهدات علمی تبدیل انرژی حرارتی به نوسانات صوتی را انجام دهد. این پدیده به شعله آواز خوان معروف است<sup>[1]</sup>. فیزیکدان هلندی به نام پیتر ریک مشاهدات بایرون هیگنز را با استفاده از یک صفحه مشبک گرم شده، در لوله‌ای با مقیاس بزرگتر که همراه با ایجاد نوسان‌های صوتی شدیدتری بود، ارتقا داد که قوی‌ترین نوسان‌ها زمانی اتفاق افتاد که صفحه در یک چهارم طول لوله قرار گرفت.

همچنین فلدمن عامل اصلی این پدیده را جریان هوای همرفتی در داخل لوله بیان نمود<sup>[2]</sup>. سال ۱۸۵۰ تحقیقاتی به‌طور تجربی روی نوسان‌های مربوط به صنایع شیشه‌سازی توسط ساند هاوس صورت پذیرفت که برای اولین بار مفهوم مدرن نوسان‌های حرارتی را تقریب می‌زد. او صوت بلند و یکنواختی را هنگام دمیدن هوا به داخل لوله بلندی که به حباب شیشه گداخته متصل است مشاهده نمود و اظهار داشت که پسماند صدا و شدت آن به طول و حجم حباب بستگی دارد<sup>[3]</sup>.

نخستین تعاریف و توصیف‌های کاربردی درباره پدیده گرماصوتی و با تاکید بر توانایی موج صوتی در ایجاد تغییرات دما، در سال ۱۸۸۷ توسط لرد ریلی در اثری با عنوان نظریه صدا بیان گردید. او در اثر خود بیان نمود که تولید این نوسان‌های حرارتی در شرایط خاصی صورت می‌گیرد؛ "اگر حرارت درست زمانی به هوا داده شود که بیشترین تراکم را دارد و یا در زمانی که هوا در رقیق‌ترین حالت خود قرار دارد از آن حرارت دریافت شود، نوسان‌ها و تغییرات تقویت می‌گردند"<sup>[4]</sup>. با فاصله ۸۰ سال بعد از ریلی، نیکلاس رات تحقیقاتی را بنیان نهاد که اساس تحقیقات امروزی درباره سیستم‌های گرماصوتی موج ایستا را شکل داده است. او با ایجاد یک تئوری خطی موفق به پیشرفت در مطالعه و مدل‌سازی پدیده‌های ترمودینامیکی حوزه گرماصوتی شد<sup>[5]</sup>.

بعد از محاسبه‌های رات، معادله‌های گرماصوتی در یک چارچوب گسترده ترمودینامیکی توسط سویفت پیوند خورد و زمانی که محاسبه‌ها برای استک با آرایش صفحه‌های موازی انجام شد، آرنوت، باس و راسپت محاسبه‌های گرماصوتی را برای اشکال مختلف حفره (مستطیل، آرایع مثلثی، دایره و پین) توسعه دادند<sup>[6,7]</sup>. بعدها به کمک محاسبه‌های انجام شده، ویتلی بر روی موضوعات مختلفی که بیشتر جنبه تجربی و عملی داشتند، فعالیت نمود که از جمله آن‌ها، تحلیل موتور گرماصوتی نوع اولیه و بررسی شرایط شروع نوسان‌های خودبه‌خودی در آن‌ها بود<sup>[8,9]</sup>. در دو دهه اخیر و با گسترش و توسعه توان محاسبه رایانه-ها، نرم‌افزار محاسبات عددی دلتا ای و سپس نسخه ارتقا یافته آن با عنوان دلتا ای سی منتشر شد که مسیر را برای محققان بعدی جهت آزمون دستگاه‌های جدید خود تسهیل نمود<sup>[10]</sup>.

در یک موتور ترمو آکوستیک، انرژی حرارتی به وسیله نوسان‌های صوتی به کار تبدیل می‌گردد. در واقع نه تنها انرژی حرارتی می‌تواند به کمک امواج صوتی در یک محیط منتقل شود، بلکه در جهت عکس نیز، وجود گرادیان دمای معین در طول یک مجرا با هندسه خاص می‌تواند منجر به تولید امواج صوتی گردد که آن را اثر گرماصوتی گویند. عمل تبدیل انرژی حرارتی به توان صوتی در موتور گرماصوتی، همراه با مجموعه‌ای از تغییرات وابسته به زمان خواص ترمودینامیکی سیال همچون: دما، فشار و چگالی است. دما نقش اساسی را در پدیده گرماصوتی ایفا می‌کند. جهت توصیف این پدیده، نظریه گرماصوتی خطی رات به‌طور گسترده در چهل سال

همترازی مدار الکتریکی، امکان استفاده از نرم افزارهای الکتریکی جهت بررسی فرآیند شروع نوسان‌های خودبه‌خودی در موتورهای گرماصوتی فراهم گردید.

یکی از اهداف این مقاله مرتبط ساختن حل عددی حالت گذرا با همترازی الکتریکی موتور گرماصوتی است. به کمک این روش امکان تعیین بازه زمانی شروع نوسان‌های خودبه‌خودی و بررسی تغییرات گذرا خواص گاز کاری در موتور گرماصوتی فراهم می‌گردد. همچنین به کمک این روش که در قالب یک حل ترکیبی عددی و شبیه سازی الکتریکی است، امکان مشاهده لحظه‌ای شرایط نوسان‌های خودبه‌خودی در سامانه وجود دارد.

در پژوهش پیش‌رو تغییرات دما با هدف تعیین محل شروع نوسان‌ها در یک استک (پشته) با صفحه‌های موازی به صورت عددی و تجربی مورد بررسی قرار گرفت که مبنای اصلی تحلیل حالت شروع، تحلیل عددی معادله‌های وابسته به زمان است. طرحواره نمونه آزمایشی که جهت اعتبار سنجی نتایج مورد استفاده قرار گرفت، ارائه شده است تا مدل‌سازی شرایط مرزی به درستی صورت پذیرد. این نمونه شامل یک استک بدون مبدل حرارتی سمت سرد است که در یک لوله رزوناتور (بازآویشگر) بلند قرار می‌گیرد و توسط یک گرمکن راه‌اندازی می‌گردد. در یک موتور گرماصوتی که فاقد انتقال حرارت با محیط اطراف باشد، همواره دما افزایش می‌یابد که این امر یا باعث افزایش بسامد تشدید می‌گردد و یا به دلیل کم شدن اختلاف دمای دو طرف استک، این نوسان‌ها ناپدید می‌گردد. اما به دلیل جنس مواد مورد استفاده در بخش باز آویشگر و خود بخش استک و انتقال حرارت میان آن‌ها دما به یک سطح تعادلی می‌رسد. در عمل نیز به دلیل تماس حرارتی با محیط، حالت پایا اتفاق می‌افتد. این پژوهش به طور خاص شرایط فرآیند شروع در موتور گرماصوتی را مورد بررسی قرار می‌دهد و نوآوری این پژوهش در بخش حل عددی - مداری معادلات گرماصوتی است. در این روش به کمک روش همترایی مدار الکتریکی، بسامد نوسان‌ها محاسبه شده و سپس محاسبه‌های مربوط به تغییرات دما در طول استک صورت می‌پذیرد. در انتها نیز نتایج حاصل از حل ترکیبی، به کمک یک نمونه موتور گرماصوتی موج ایستا که برای صحت سنجی نتایج این پژوهش ساخته شده است، مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۲- معادله‌های حاکم

معادله‌های اصلی که جهت بررسی تغییرات سیال در عبور از استک مورد استفاده قرار می‌گیرد، معادله تغییرات فشار، دبی حجمی و معادله انرژی است که امکان بررسی تغییرات دما را فراهم می‌نماید. معادله‌های (۱) تا (۳) به ترتیب نمایش دهنده این معادله‌ها در سامانه‌های گرماصوتی است [24].

گذشته مورد استفاده قرار گرفته است [11]. درک مفاهیم گرماصوتی نیازمند بررسی این پدیده در حوزه زمان است. گرچه تقریب گرماصوتی خطی، پیش بینی‌های دقیقی از عملکرد سیستم گرماصوتی در حالت پایدار را ارائه می‌دهد، اما اساساً برای حل در حوزه فرکانس است و در شبیه‌سازی‌های مربوط به پیش بینی زمان شروع نوسان‌های صوتی، نمی‌تواند مورد استفاده قرار گیرد و همچنین در دامنه‌های نوسان زیاد همراه با انحراف خواهد بود [12,13]. معادلات گرماصوتی که توسط رات، ویتلی و سوئیفت در طول زمان ارتقا پیدا نمود، امکان پیش‌بینی دما و بسامد نوسان‌های خودبه‌خودی را برای یک موتور گرماصوتی اولیه فراهم نمود [7,11,14]. اما وجود تفاوت دما میان شروع نوسان‌ها و حالت میرایی نوسان‌ها که اولین بار توسط ژو و ماتسوبارا در یک موتور گرماصوتی موج ایستا مشاهده گردید، توسط معادله‌های بیان شده قابل ارزیابی نبود [15]. به‌طور کلی اساس مدل ارائه شده توسط آن‌ها یافته‌های ترمودینامیکی بود که انتقال انرژی و تلفات از سطح را مرتبط می‌ساخت. این روش مطابقت خوبی با نتایج حاصل از آزمون‌های تجربی دستگاه‌های گرماصوتی داشت اما دارای محدودیت‌هایی بود. در بسیاری از پژوهش‌ها، روش‌های حل عددی غیر خطی متفاوتی برای پوشش دادن محدودیت‌های موجود در تئوری خطی استفاده شده است [16-20].

یکی از محدودیت‌های حل معادلات گرماصوتی حالت نوسان‌های پایا، عدم پیش‌بینی شرایط زمانی مربوط به لحظه شروع نوسان‌های خودبه‌خودی بوده است. به همین دلیل حل عددی حالت گذرا معادله‌های گرماصوتی، همواره مورد توجه محققین بسیاری بوده است. با بررسی ارتباط میان ظرفیت حرارتی ماده به کار رفته در بخش استک موتورهای گرماصوتی (بخش بازپایب یخچال‌های گرماصوتی) و معادله‌های انتقال حرارت در این بخش، امکان مشاهده تغییر شاخصه‌های ترمودینامیکی گاز کاری سامانه به صورت وابسته به زمان فراهم می‌گردد. اولین تلاش‌ها جهت حل عددی معادله‌های گرماصوتی در حالت گذرا بدین صورت شکل گرفت که کائو و همکاران [21] و ایشی‌کاوا و می [22]، با استفاده از انتقال حرارت متوسط در طول صفحه استک که در دمای ثابت قرار داشت، عملکرد یک سامانه گرماصوتی را بررسی نمودند و این در حالی بود که پیکولو و پیستون [23]، با ترکیب معادله‌های گرماصوتی و ظرفیت حرارتی مربوط به صفحه استک، توانستند معادله‌های گرما صوتی را در حالت گذرا حل کنند و بدین شکل به نتایج مشابهی دست یافتند. اما در این روش تنها بخش استک برای حالت گذرا مورد مطالعه قرار گرفت. لذا شبیه‌سازی کامل یک دستگاه گرماصوتی مورد توجه بود که در سال ۲۰۱۴ سوئیفت و همکارانش با تاکید بر وجود تشابه میان معادله‌های حاکم بر میدان‌های فیزیکی همچون مکانیکی، صوتی و الکتریکی توانستند الگوی مناسبی را جهت شبیه‌سازی دستگاه‌های گرماصوتی به کمک مدار الکتریکی، ممکن سازند [24]. به کمک این

$$\mu = \mu_0 \left( \frac{T_0}{T_r} \right)^{b_\mu} \quad (۹) \quad \text{لزجت دینامیکی گاز}$$

$$k = k_0 \left( \frac{T_0}{T_r} \right)^{b_k} \quad (۱۰) \quad \text{ضریب هدایت حرارتی گاز}$$

$$\sigma = cp\mu/k \quad (۱۱) \quad \text{عدد پرانتل}$$

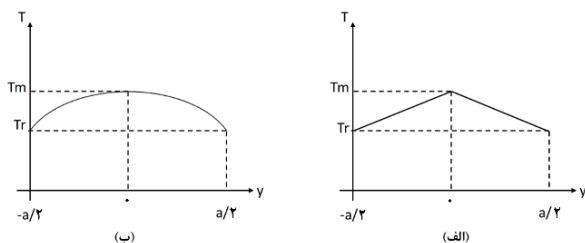
$$\rho_0 = \frac{p_0 R}{T_0} \quad (۱۲) \quad \text{چگالی گاز}$$

توزیع دما در عرض صفحات می‌تواند به صورت خطی، سهموی و یا با رابطه‌ای پیچیده‌تر فرض گردد. شکل ۱ نحوه توزیع دمای صفحه میانی در جهت محور  $y$  را برای دو تابع خطی و سهمی نمایش می‌دهد. دمای  $T_r$  دمای مرجع محیط که در لبه‌های ورقه قابل دستیابی است و  $T_m$  دمای مربوط به وسط ورقه است. لذا با توجه به شکل ۱ تابع توزیع دما برای دو حالت توزیع دما در عرض صفحات استک، به شکل معادله (۱۳) محاسبه گردید [25]. با مشخص شدن معادله‌ها و فرضیه‌های اصلی مسئله، برای ادامه روند حل نیاز به تعیین فرضیه‌ها، حجم کنترل و شرایط حل می‌باشد که در ادامه تشریح می‌گردد.

$$\dot{q}_{out} = -k \frac{\partial T}{\partial y} = -k \left( \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{-\frac{a}{2}} - \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{\frac{a}{2}} \right) \Rightarrow \dot{q}_{out} = \begin{cases} \frac{4k}{a} (T_m - T_r) & \text{خطی} \\ \frac{8k}{a} (T_m - T_r) & \text{سهموی} \end{cases} \quad (۱۳)$$

### ۳- بیان مسئله

در حالت پایا، مقدار کل گرمایی که از طریق مبدل گرم به سیستم داده می‌شود، برابر است با توان صوتی که از سیستم خارج می‌شود و بخشی از حرارت که به محیط منتقل می‌گردد. جهت ایجاد فهم مناسبی از عملکرد استک گرماسوتی، می‌توان نحوه انتقال حرارت به محیط را بررسی نمود. در اغلب موتورهای گرماسوتی، توان کل در طول استک ثابت فرض می‌گردد که البته برای نمونه‌هایی که به صورت ایزوله شده و با دو مبدل حرارتی سرد و گرم باشند، فرض مناسبی است که با گرمکن (هیتر) راه‌اندازی می‌شوند، مقدار انرژی ورودی استک تقریباً برابر با توان حرارتی تولیدی توسط گرمکن است ولی به جهت وجود اتلاف حرارتی و انتقال حرارت به



شکل ۱ تغییرات دمای ورقه برحسب تغییرات موقعیت مکانی روی محور  $y$ .  
الف) توزیع دما با فرض پروفیل خطی، ب) توزیع دما با فرض پروفیل سهمی.

$$dp_1 = - \frac{i\omega\rho_m \frac{dx}{A}}{1 - f_v} U_1 \quad (۱)$$

$$dU_1 = - \frac{i\omega A dx}{\gamma p_m} [1 + (\gamma - 1)f_k] p_1 + \frac{f_k - f_v}{(1 - f_v)(1 - \sigma)} \frac{dT_m}{dx} \frac{U_1}{T_m} \quad (۲)$$

$$\dot{H}_2 = \frac{1}{2} Re \left[ p_1 \bar{U}_1 \left( 1 - \frac{f_k - \bar{f}_v}{(1 - \bar{f}_v)(1 + \sigma)} \right) \right] + \frac{\rho_m cp |U_1|^2}{2A\omega |1 - f_v|^2 (1 - \sigma^2)} Im(f_k) + \sigma \bar{f}_v \frac{dT_m}{dx} - (Ak + A_{solid} k_{solid}) \frac{dT_m}{dx} \quad (۳)$$

در معادله‌های (۱) تا (۳) مقادیر زیرنویس‌ها بیانگر مرتبه متغیر می‌باشد و علامت مد نمایش دهنده شاخصه‌هایی با مقادیر مختلط است. جهت محاسبه میزان انتقال حرارت، به جهت ضخامت کم ورقه‌ها از انتقال حرارت در راستای  $z$  صرف نظر می‌گردد و تنها انتقال حرارت در راستای  $y$  مورد بررسی قرار می‌گیرد. رابطه انتقال حرارت هدایتی در جهت  $y$  به دلیل تماس لبه ورقه‌ها با دیواره جانبی (محیط)، به شکل معادله (۴) می‌باشد [25].

$$\dot{q}_{out} = -k \frac{\partial T}{\partial y} \quad (۴)$$

معادله‌های (۵) تا (۱۲) نحوه محاسبه متغیرهای وابسته به دما که برای آرایش صفحه‌های موازی در بخش استک موتورهای گرماسوتی کاربرد دارد را تعیین می‌نماید. تابع لزجی متوسط فضایی و تابع حرارتی متوسط فضایی به صورت زیر محاسبه می‌گردند [24].

$$f_v = \frac{\tanh \left[ \frac{(1+i)y_0}{\delta_v} \right]}{(1+i)y_0/\delta_v} \quad (۵)$$

$$f_k = \frac{\tanh \left[ \frac{(1+i)y_0}{\delta_k} \right]}{(1+i)y_0/\delta_k} \quad (۶)$$

همچنین جهت محاسبه مقادیر عمق نفوذ لزجی گاز و عمق نفوذ حرارتی گاز به صورت زیر عمل می‌نماییم [24].

$$\delta_v = \sqrt{\frac{2\mu}{\omega\rho_0}} \quad (۷)$$

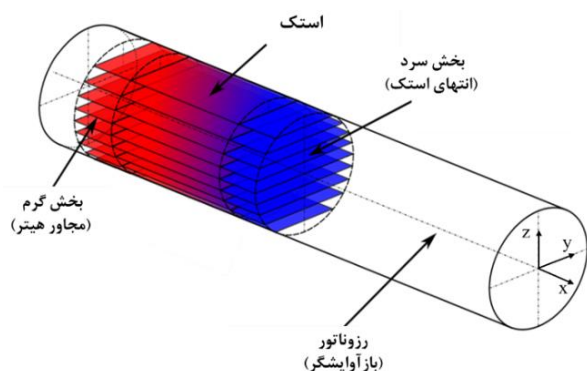
$$\delta_k = \sqrt{\frac{2k}{\omega\rho_0 cp}} \quad (۸)$$

لزجت دینامیکی، ضریب هدایت حرارتی، عدد پرانتل و چگالی گاز که وابسته به دما هستند نیز از روش زیر محاسبه خواهند شد [24].

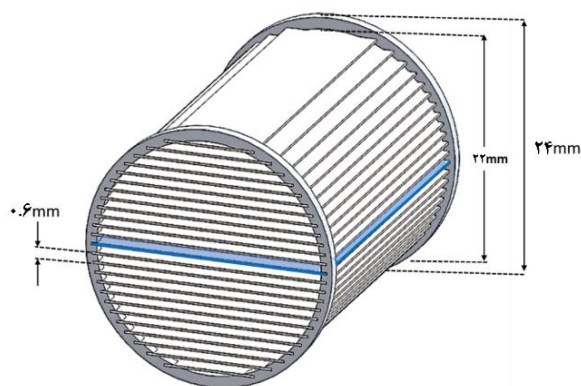
میلی‌متر که به صورت موازی هم قرار گرفته‌اند، ساخته شده است. در شکل ۳ صفحه میانی با رنگ آبی مشخص شده است.

#### ۵- شبکه حل

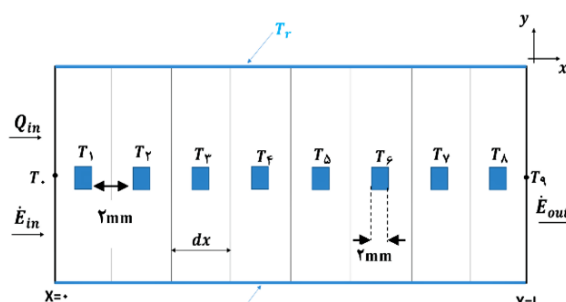
جهت حل معادله‌های ۱ تا ۳ نیاز به یک شبکه حل و تعیین شرایط مرزی و اولیه است. شکل ۴ به طور طرحواره صفحه میانی استک را که به تعداد ۸ جزء تقسیم شده است نمایش می‌دهد. در این جا به جهت استفاده از گرمکن، توان حرارتی و توان صوتی در ورود به استک وجود دارد و در خروج از آن با توجه به دمای گاز خروجی، تنها توان صوتی وجود خواهد داشت. جهت حل معادله انرژی برای محاسبه پروفیل دمای استک، صفحه میانی استک به عنوان نمونه در جهت محور موتور (محور x) گسسته‌سازی گردید که در شکل ۴ نمایش داده شده است.



شکل ۲) شماتیک استک با آرایش صفحات موازی در مختصات کارتزین



شکل ۳) نمایی از استک طراحی شده



شکل ۴) شماتیک شبکه حل در قسمت استک موتور گرماصوتی

محیط، مقدار انرژی خارج شده از انتهای استک تقریباً صفر است. به همین دلیل نمی‌توان با فرض ثابت بودن کل در طول استک این گونه ساختارها را مدل‌سازی نمود. یک فرض ساده در نظر گرفتن یک تغییرات انرژی خطی در طول استک جهت حل معادله انرژی برای محاسبه مقادیر دما در طول استک است [26]. اما این تقریب دقیق نبوده چرا که تلفات حرارتی در طول استک به اختلاف دمای آن نقطه از استک با محیط بستگی دارد [26,27]. پس می‌توان بیان نمود که نتایج حالت پایا به خوبی شرایط شروع و میرایی را مدل‌سازی نمی‌کند و برای ارائه حالتی دقیق‌تر، از یک مدل تعریف شده متغیر با زمان، در این پژوهش استفاده گردید که در بخش بعدی تشریح گردیده است. مطالعات عددی بیشتری جهت محاسبه دقیق‌تر معادله انرژی در استک، توسط هاوارد، زندر و کازولاتو صورت گرفت. همچنین آن‌ها مطالعات بسیاری را با هدف بررسی تاثیر لبه‌های مختلف ورقه‌ها بر جریان انرژی انجام دادند [28,29].

#### ۴- فرض‌های مسئله

فرضیه‌هایی که برای حل این مسئله در نظر گرفته شده است به شرح زیر می‌باشد:

- سیال عملکردی سامانه یک گاز مطلوب و در دسته سیالات نیوتنی است.
- انتشار موج صوتی در حجم کنترل مورد بررسی، با بسامد ثابت و یکتا و تنها در جهت محور لوله اتفاق می‌افتد. (این مسئله لزوم کوچک‌تر بودن شعاع هیدرولیکی را از طول موج صوتی گوشزد می‌نماید زیرا در غیر این صورت منجر به خاموشی سامانه و عدم تشدید نوسان‌ها می‌گردد)
- انتقال حرارت در سطح تماس گاز با جامد به صورت کامل صورت می‌گیرد. (دمای گاز و جامد در سطح ورقه برابر است)
- از ترم انرژی جنبشی در معادله انرژی صرف نظر می‌شود.
- وابستگی دمایی بسیار کوچک فرض می‌گردد که معادله موج را تحت تأثیر قرار ندهد.
- تنها دما به عنوان متغیر وابسته به زمان در نظر گرفته شده است. (به دلیل وابستگی دبی حجمی و فشار به دما، آن‌ها نیز با زمان تغییر می‌نمایند)

- در حالت وابسته به زمان، فرض یکنواخت بودن تغییرات دما در طول استک کاربرد ندارد و تغییرات دما و انتقال حرارت به محیط، هردو به صورت متغیرهایی وابسته به زمان در معادله‌ها اعمال می‌گردند.

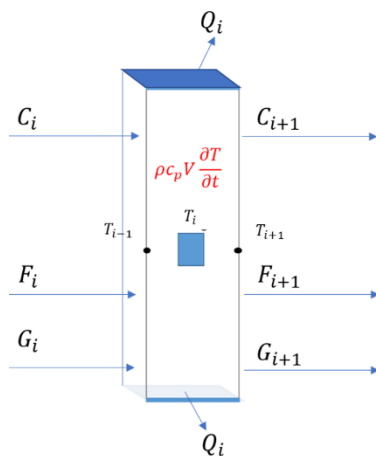
طرحواره نحوه قرارگیری ورقه‌های داخل استک و نحوه تغییرات دما در طول استک به صورت کیفی در شکل ۲ نمایش داده شده است.

شکل ۳ طرحواره استک طراحی شده با آرایش صفحه‌های موازی را نمایش می‌دهد که این استک از ۲۵ ورقه نازک با قطر ۰/۲

ذخیره می‌شود و صرف بالا رفتن دمای آن قسمت می‌گردد که متغیر با زمان است. شکل ۵ طرحواره تعادل انرژی در یک بخش استک را نمایش می‌دهد که معادله (۹) تساوی عددی قابل حل برای محاسبه تغییرات دمای بخش  $i$  را ارائه می‌نماید<sup>[31]</sup>.

### ۶- الگوی حل عددی معادله‌ها

بعد از تعیین معادله‌های اصلی، شبکه حل و حجم واری مورد نظر، نوبت به تعیین ثابت‌های معادله (۱۹) و نحوه حل این معادله می‌رسد. در جدول ۱ ثوابت مهمی که مربوط به شاخصه‌های ساختاری موتور گرماسوتی موج ایستا به کاررفته در این پژوهش می‌باشد بیان گردیده است. جهت بررسی تغییرات دما از لحظه شروع به کار موتور تا شروع نوسان‌های خود تقویت شونده می‌توان از چند روش استفاده نمود.



شکل ۵) طرحواره تعادل انرژی بخش  $i$  در استک موتور گرماسوتی

جدول ۱) مشخصات هندسی استک، ضرائب ترمودینامیکی و مقدار ثابت‌های مورد استفاده در حل عددی<sup>[25]</sup>

| عنوان                              | نماد        | مقدار (یکا)               |
|------------------------------------|-------------|---------------------------|
| سطح مقطع عبور گاز                  | $A$         | $229.889e-06 \text{ (m)}$ |
| سطح مقطع استک                      | $A_{solid}$ | $222.5e-06 \text{ (m)}$   |
| طول صفحات استک                     | $l_p$       | $0.035 \text{ (m)}$       |
| عرض صفحه میانی                     | $w_p$       | $0.02206 \text{ (m)}$     |
| فاصله میان صفحات                   | $D_p$       | $6e-04 \text{ (m)}$       |
| ضخامت صفحات                        | $d_p$       | $2e-04 \text{ (m)}$       |
| دمای مرجع                          | $T_r$       | $300 \text{ (K)}$         |
| فشار محیط                          | $p_0$       | $101800 \text{ (Pa)}$     |
| لزجت دینامیکی در دمای مرجع         | $\mu_0$     | $1.85e-05 \text{ (Pa.s)}$ |
| ضریب هدایت حرارتی گاز در دمای مرجع | $k_0$       | $0.026 \text{ (W/Km)}$    |
| ضریب هدایت حرارتی صفحات استک       | $k_{solid}$ | $4.05 \text{ (W/Km)}$     |
| ثابت گاز هوا                       | $R_{air}$   | $286.7 \text{ (J/kgK)}$   |
| ظرفیت حرارتی ویژه گاز              | $c_p$       | $1003 \text{ (J/kgK)}$    |
| ظرفیت حرارتی ویژه صفحات استک       | $c_{so}$    | $880 \text{ (J/kgK)}$     |
| -                                  | $b_\mu$     | $0.76$                    |
| -                                  | $b_k$       | $0.89$                    |

دمای حاشیه صفحات که توسط نگه دارنده استک به دیواره رزوناتور متصل شده است، فرض شده است که در دمای محیط قرار دارد. در این شبکه حل، هر بخش به‌طور مجزا دارای ظرفیت حرارتی مشخصی است و می‌توان معادله انرژی را برای هرکدام از ۸ بخش مختلف نوشت و حل نمود که در نهایت، با تقسیم توان کل بخش مورد نظر بر ظرفیت حرارتی مربوط به آن بخش، تغییرات دما نسبت به زمان در آن بخش استک محاسبه می‌گردد. توان صوتی ورودی به استک و خروجی از آن باتوجه به روابط (۱۴) و (۱۵) محاسبه می‌شوند<sup>[10]</sup>.

$$\dot{E}_{in} = \frac{1}{2} Re(p_1|_{x=0} \bar{U}_1|_{x=0}) \quad (14)$$

$$\dot{E}_{out} = \frac{1}{2} Re(p_1|_{x=l} \bar{U}_1|_{x=l}) \quad (15)$$

همچنین باتوجه به وجود گرمکن در مجاورت ورودی استک، مقدار حرارت به عنوان شاخصه ورودی و بر حسب وات با توان صوتی ورودی جمع می‌گردد. برای محاسبه میزان انرژی ورودی به یک بخش و خروجی از آن، با نگاهی عمیق‌تر به معادله (۳) می‌توان این معادله را برای اعمال شرایط دقیق‌تر، به سه بخش مجزا تقسیم نمود:

۱- معادله جریان انرژی: ترم اول معادله (۳) به دلیل نوسان‌های صوتی است. بسته به ناحیه تولید صوت، در دو بخش ورودی و خروجی استک (حجم واری) می‌تواند مثبت یا منفی باشد<sup>[30]</sup>.

$$F(x) = \frac{1}{2} Re \left[ p_1 \bar{U}_1 \left( 1 - \frac{f_k - \tilde{f}_v}{(1 - \tilde{f}_v)(1 + \sigma)} \right) \right] \quad (16)$$

۲- معادله اثر پمپاژ گرماسوتی: حاصل ضرب معادله (۷) در گرادین دما در طول حجم کنترل، ترم دوم معادله (۳) را می‌سازد که به دلیل برگشت ناپذیری محیط عملکرد ایجاد می‌شود و متناسب با شیب دما است. جهت آن از سمت گرم به سمت سرد (مخالف جهت شیب دما) است<sup>[30]</sup>.

$$G(x) = \frac{\rho_m c_p |U_1|^2}{2A\omega |1 - f_v|^2 (1 - \sigma^2)} Im(f_k + \sigma \tilde{f}_v) \quad (17)$$

۳- معادله هدایت حرارتی میان گاز و جامد: این معادله میزان انرژی که به صورت هدایت حرارتی به وسیله گاز کاری و ماده مورد استفاده در استک منتقل می‌شود را محاسبه می‌نماید. مقدار هدایت حرارتی در دو بخش ورودی و خروجی استک (حجم واری) متفاوت است.

$$C = (Ak + A_{solid} k_{solid}) \quad (18)$$

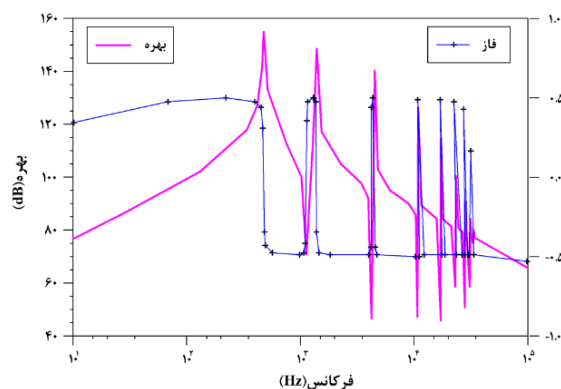
$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial t} &= \frac{F(x_i) - F(x_{i+1}) + (G(x_i) + C) \left( \frac{T_i - T_{i-1}}{\Delta x} \right)}{\rho c_p V} \\ &+ \frac{-(G(x_{i+1}) + C) \left( \frac{T_{i+1} - T_i}{\Delta x} \right) - \dot{Q}_{out}}{\rho c_p V} \end{aligned} \quad (19)$$

در نهایت تفاوت تغییرات انرژی هر قسمت و مقدار انرژی حرارتی که به محیط می‌دهد، برابر است با مقدار انرژی که در آن بخش

رزوناتور قرار گرفته است و می‌بایست شامل یک حد مشخصی سرعت و فشار باشد تا پدیده گرماصوتی رخ دهد، اعمال فاز سرعت و فشار اهمیت می‌یابد [26].

## ۷- نتایج حل عددی

شکل ۷ طرحواره مدار رسم شده برای موتور گرماصوتی با یک انتهای باز را نمایش می‌دهد. در این حالت، بخش استک به تعداد ۸ جزء مختلف تقسیم می‌گردد تا بتوان با اعمال محدودیت‌های دمایی در اندازه‌گیری‌های مداری، به حل پایا دقت بیشتری بخشید و بسامد تشدید اول را که در شروع حل عددی مورد نیاز است، محاسبه نمود. بعد از شبیه‌سازی مداری موتور گرماصوتی در نرم‌افزار Ltspice، نمودار بهره و فاز به صورت آنچه در شکل ۸ ارائه شده است استخراج گردید. مقدار بسامد تشدید اول ۴۷۹ هرتز محاسبه شد.

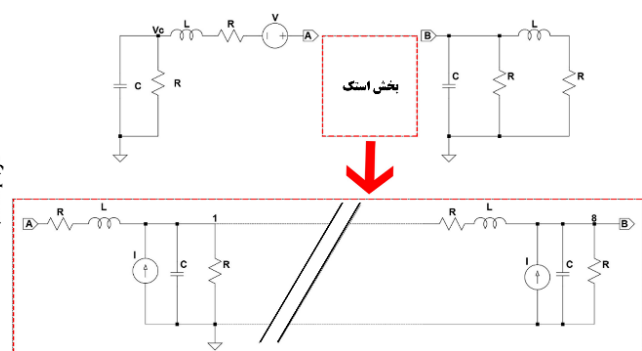


شکل ۸ نمودار بهره و فاز مدار الکتریکی ترسیم شده برای موتور گرماصوتی یک انتهای باز

روش اول محاسبه  $p_1$  و  $U_1$  با مشخص بودن شیب دما در طول استک است و روش دوم محاسبه شیب دمایی در استک با مشخص بودن فشار و سرعت حجمی در لحظه‌های مختلف می‌باشد که در عمل هیچ یک از این دو روش قابل استفاده نیست چراکه هم دما و هم سرعت حجمی و فشار در طول استک و با تغییر زمان مجهول هستند لذا نیاز به یک روش حل تکراری می‌باشد. شکل ۶ طرحواره الگوی حل کد مورد نظر را نمایش می‌دهد. مرحله‌ای که باید قبل از حل تکراری صورت گیرد، تحلیل جریان متناوب است تا بسامد تشدید سیستم تعیین گردد.

اختلاف فاز بین فشار و سرعت حجمی در ساختارهای گرماصوتی موج ایستا چه موتور گرماصوتی و چه یخچال گرماصوتی در محدوده ۸۵ تا ۹۵ درجه می‌باشد [24]. لذا می‌بایست این اختلاف فاز در هر حلقه از برنامه مد نظر قرار گیرد. همچنین با توجه به موقعیت قرارگیر استک در لوله رزوناتور که در یک سوم طول لوله

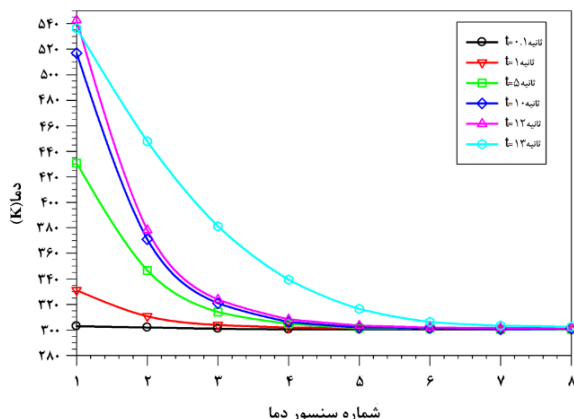
شکل ۶ طرحواره الگوی حل تکراری برنامه نوشته شده



شکل ۷ طرحواره مدار الکتریکی برای موتور گرماصوتی با یک انتهای باز

روش اول تنها بخش استک در حجم واریسی لحاظ گردید و پس از محاسبه بسامد تشدید سامانه از روش آنالوژی مدار الکتریکی، حل عددی مسئله به کمک معادله‌های (۱)، (۲) و (۹) صورت پذیرفت. به طور کلی در روش اول در هر حلقه محاسبه پروفیل دما، بعد از به دست آمدن دما در طول استک، برای گام زمانی بعدی فشار و سرعت حجمی دوباره محاسبه می‌شوند و این روند تا انتهای حل ادامه می‌یابد. این در حالی است که در عمل، با تغییر دما در طول استک متغیرهایی همچون مقاومت لزجی، لختی گاز، مقاومت آسایش حرارتی و... تغییر می‌نمایند که تأثیر مستقیم بر دامنه نوسانی فشار و سرعت حجمی دارند. جهت دقیق‌تر نمودن فرآیند حل و رفع این نارسایی، مدل بهبود یافته ارائه گردید که طی آن در هر حلقه حل عددی، متغیرهای موتور گرماسوتی باتوجه به دما به روز رسانی می‌گردد. در این حالت با تعیین فهرست اجزای الکتریکی که با موتور گرما صوتی مشابه سازی شده بود، ابتدا یک تحلیل بسامدی در دمای مرجع صورت گرفت که طی آن بسامد تشدید سامانه محاسبه گردید. همچنین در روش بهبود یافته علاوه بر سه معادله استفاده شده در روش اول، شاخصه‌های مدار الکتریکی همترا شده نیز نقش داشتند. در این حالت پس از هربار محاسبه دما در هر گام زمانی، اجزای مدار الکتریکی به روز رسانی می‌شدند. با ادغام مدار الکتریکی و روش حل عددی، علاوه بر استک، سایر بخش‌های موتور گرماسوتی نیز در فرآیند حل وارد شدند. شکل ۱۰ منحنی تغییرات دما در طول استک را برای ۶ لحظه مختلف تا زمان شروع نوسان‌ها خود تقویت شونده برای روش حل بهبود یافته نمایش می‌دهد. در این روش، با تغییر دما در طول استک، دمای سایر اجزای سامانه نیز به روز رسانی گردید. در این حالت، تغییرات دما منجر به تغییر مقدار اجزای الکتریکی مدار همترا شده با موتور گرماسوتی گردید که در گام بعدی حل تأثیر مستقیم داشت.

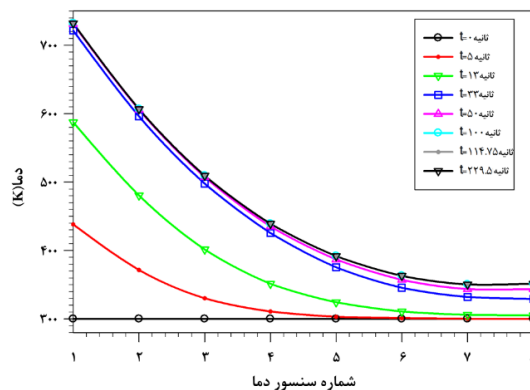
با مقایسه منحنی‌های دما در شکل ۹ و ۱۰ اثر اعمال تغییرات دما بر اجزای الکتریکی مدار همترا شده مشخص می‌گردد. کاهش دما در لحظه شروع نوسان‌های خود تقویت شونده ( $s13 t$ ) در شکل



شکل ۱۰) شیب دمای اندازه‌گیری شده در استک موتور گرماسوتی در لحظات قبل و اندکی بعد از شروع نوسان‌های خودبه‌خودی

پس از محاسبه بسامد، با فرض ثابت بودن مقدار اجزای مدار الکتریکی همترا شده با موتور گرماسوتی موج ایستا نمودارهای فرآیند شروع به کار سامانه با حل عددی معادله (۱۹) در نرم افزار متلب صورت گرفت که طی آن معادله برای  $229.5/5$  ثانیه حل گردید. شکل ۹ منحنی‌های دما در ۸ نقطه متوالی در طول استک و برای ۸ زمان مختلف را نمایش می‌دهد. با توجه به شکل ۹ پس از گذشت ۳۳ ثانیه از شروع به کار، تعادل حرارتی موتور با محیط اتفاق افتاده و در لحظات بعدی (باتوجه به شروع نوسانات خود تقویت شونده در موتور) نقاط انتهایی شروع به افزایش دما نموده‌اند و منحنی  $s229.5 t$  حد نهایی دمای اندازه‌گیری شده در مقاطع هشتگانه استک را نمایش می‌دهد. در این حالت، تا لحظه نهایی توان حرارتی ورودی ۶۵ وات باقی می‌ماند. در این پژوهش هرچند با ادغام روش حل عددی و همترایی مدار الکتریکی، امکان شبیه سازی کامل موتور گرماسوتی فراهم گردید اما جهت فائق آمدن بر محدودیت تشخیص محل شروع نوسانات خودبه‌خودی در سیستم، برنامه نوشته شده به این صورت بهبود یافت که ابتدا با وارد نمودن مشخصات هندسی موتور گرماسوتی، محل قرارگیری هیتر (موقعیت مکانی ورود حرارت)، تعیین جنس قسمت‌های مختلف موتور، تعیین گاز عملکردی سیستم و شرایط محیط آزمایش، اطلاعات مورد نیاز برنامه تکمیل می‌گردد. در قدم بعدی با مشخص بودن دمای اولیه، در یک تحلیل بسامدی، اولین بسامد تشدید سیستم توسط کد محاسبه می‌گردد (مشابه آنچه در شکل ۹ نمایش داده شد).

در این مرحله تمام اجزای مدار الکتریکی محاسبه شده و برنامه وارد مرحله انجام یک تحلیل گذرا می‌شود که وابسته به نتیجه این تحلیل، دو گزینه وجود خواهد داشت؛ ۱- یا سامانه دچار تشدید نوسان شده است و یا ۲- دامنه نوسان‌ها با شیب کمی افزایش یافته است. در واقع، در روش بهبود یافته، محاسبه‌های زمانی متوقف می‌گردد که دامنه فشار نوسانی در سامانه دچار تشدید گردد. این در حالی است که بدون تحلیل مداری، سامانه تا زمان ایجاد تعادل حرارتی حل خواهد گردید و قادر به تشخیص محل شروع نوسان‌ها نخواهد بود.



شکل ۹) منحنی‌های دما به عنوان متغیر وابسته به زمان و مکان، برای ۸ نقطه مختلف در استک



شکل ۱۲) ساختار موتور گرماصوتی موج ایستا با آرایش صفحات موازی در استک

جدول ۲) مشخصات هندسی و مواد به کاررفته در موتور گرماصوتی موج ایستا

| نام قسمت                      | مشخصات هندسی                                                                                                                 | جنس                                                                                                               | توضیحات                                                                                                                       |
|-------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| رزوناتور (بازآوایشگر) شماره ۱ | طول ۰/۱۱۵ (m)<br>قطر ۰/۰۲۵ (m)<br>ضخامت ۱ (mm)<br>ضریب هدایت حرارتی ۱۴/۳ (W/m K)                                             | لوله استیل                                                                                                        | جهت افزایش انتقال حرارت با محیط از لوله استیل برای این بخش استفاده گردید                                                      |
| مبدل حرارتی (هیت سینک)        | عرض ۰/۰۲ (m)<br>قطر ۰/۰۹ (m)<br>ضریب هدایت حرارتی ۲۳۵ (W/m K)                                                                | آلومینیوم                                                                                                         | افزایش توان خنک کاری                                                                                                          |
| استک (پشته)                   | طول ۰/۰۳۵ (m)<br>شعاع موثر ۳۰۰ (μm)<br>قطر کل ۰/۰۲۴ (m)<br>ضریب هدایت حرارتی ۴/۰۵ (W/m K)<br>چگالی ۲۶۰۰ (kg/m <sup>3</sup> ) | ورقه‌های موازی از جنس میکا KAl <sub>2</sub> (Si <sub>3</sub> Al <sub>10</sub> O <sub>10</sub> ) (OH) <sub>2</sub> | کاهش میزان هدایت استک (پشته) کاهش اختلاف دمای دو انتهای استک                                                                  |
| بخش داغ (حجم داغ)             | طول ۰/۰۵ (m)<br>قطر ۰/۰۲۴ (m)<br>ضخامت ۱ (mm)<br>ضریب هدایت حرارتی ۲۳۵ (W/m K)                                               | آلومینیوم                                                                                                         | انتخاب این نوع لوله به جهت مقاومت بالا در برابر شوک‌های حرارتی، توان خنک کاری بالا و ضریب انبساط دمایی پایین، بسیار مناسب است |
| گرمکن الکتریکی                | پهنای سیم ۲ (mm)<br>ضخامت ۰/۵ (mm)<br>فاصله میان دو لایه ۱ (mm)                                                              | سیم نیکل کروم                                                                                                     | مقاومت بالا در برابر حرارت، گرما، فرسایش، خوردگی و اکسید شدن                                                                  |

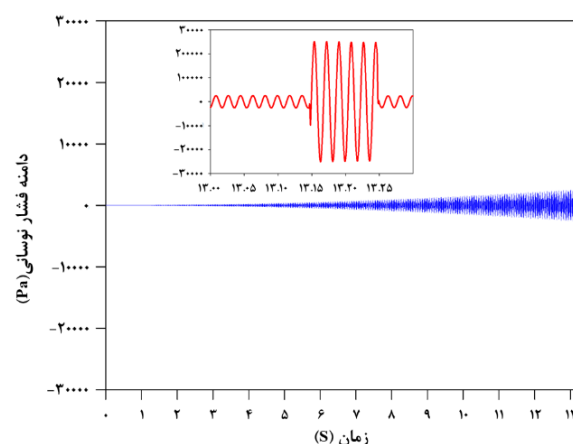
#### ۸-۱- مراحل ساخت

طول کل سامانه در این نمونه موتور گرماصوتی ۲۰ سانتی‌متر است. در این نمونه، مرکز استک در موقعیت یک سوم طول لوله قرار گرفته است. لذا مرکز بخش استک با توجه به شکل ۱۳ در موقعیت ۶/۷۵ سانتی‌متری نسبت به انتهای بسته سامانه قرار خواهد گرفت و به این ترتیب طول لوله استیل مورد نیاز و بخش گرم به دست آمده و می‌توان براساس این اندازه‌ها برش زد. در این نمونه، با استفاده از سیستم پیچی، قسمت گرمکن به انتهای بسته موتور

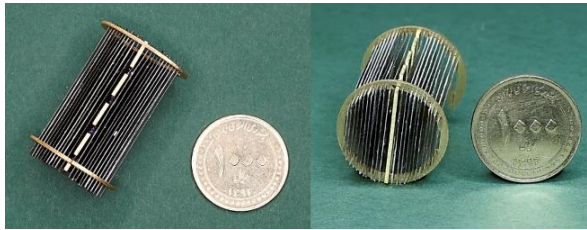
۱۰ به نسبت منحنی دما در ثانیه ۱۳ در شکل ۹، بیانگر تأثیر دما بر اجزای الکتریکی مدل شده و تأثیر متقابل آن‌ها بر دما در گام بعدی است. به تعبیر واقعی، با اعمال تغییر دما در طول استک، مقاومت لزجی، مقاومت آسایش حرارتی، تراکم پذیری و اینرسی گاز دچار تغییر شده و فشار و سرعت حجمی به‌دست آمده در این گام زمانی، روی متغیرهای محاسبه پروفیل دمای گام زمانی بعدی اثر می‌گذارد و این اتفاق روند حل مسئله را واقعی‌تر می‌نماید. تفاوت موجود در نمودارهای ۹ و ۱۰ در جهش صورت گرفته در بازه زمانی ۱۲ تا ۱۳ ثانیه نمایان می‌گردد. این اختلاف به جهت شروع نوسان‌های خودبه خودی در سیستم است که باعث تقویت جریان همرفتی سیال در استک می‌گردد و به همین دلیل، تغییر دما در نقاط بعدی محسوس تر می‌شود. شکل ۱۱ دامنه فشار نوسانی گاز را قبل و اندکی بعد از شروع نوسان‌های خودبه‌خودی نمایش می‌دهد که به کمک تحلیل گرمداری، تغییرات ناگهانی دامنه فشار نوسانی را تشخیص داده و زمان شروع نوسان‌های خودبه‌خودی را ثبت می‌نماید.

#### ۸- ساخت موتور گرماصوتی موج ایستا

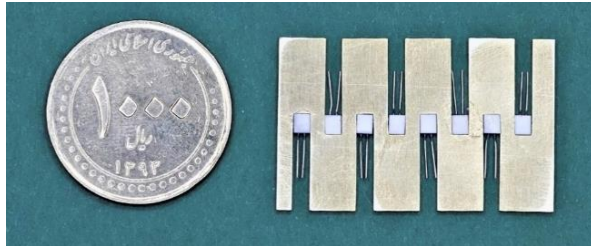
موتور گرماصوتی موج ایستا ساخته شده برای این پژوهش، از استکی با آرایش صفحه‌های موازی ساخته شده است. ورقه میکا جهت کاهش میزان انتقال حرارت هدایتی در طول استک به عنوان صفحه‌های موازی در استک استفاده گردید. تعداد صفحات موازی موجود در استک ۲۳ عدد بود. در موتور گرماصوتی، از دو لوله فلزی با جنس و قطر مشابه جهت ساخت بخش رزوناتور و بخش گرم استفاده گردید. در شکل ۱۲ ساختار کلی موتور گرماصوتی نمایش داده شده است. ویژگی‌های هندسی و ساختاری بخش‌های مختلف در جدول ۲ ارائه شده است. این موتور با هدف اندازه‌گیری دما در مقاطع مختلف بخش استک موتور گرماصوتی (اندازه‌گیری پروفیل دما در استک) ساخته شد.



شکل ۱۱) دامنه فشار نوسانی محاسبه شده در لحظات قبل و ۰/۱ ثانیه بعد از شروع نوسان‌های خودبه‌خودی



شکل ۱۵) دو نمای متفاوت از استک موتور گرماصوتی نمونه سوم با آرایش صفحات موازی

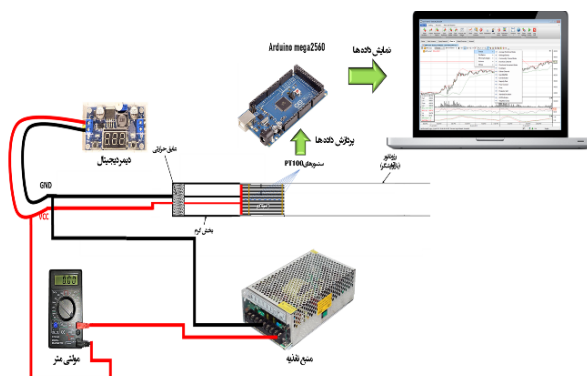


شکل ۱۶) نمای از ۸ سنسور دمای قرار گرفته روی صفحه میانی استک موتور گرماصوتی

مختلف هم دما می‌گردند لذا جهت جریان انرژی برهم خورده و شیب دمایی مورد انتظار، از سنسورها دریافت نمی‌شود. به همین خاطر از ورقه میکا با ضریب پخش حرارتی بسیار پایین استفاده گردید. مراحل ساخت نمونه سوم با قرار دادن بخش استک در رزوناتور و اتصال آن به بخش گرم در موقعیت مشخص شده به اتمام رسیده و آماده راه‌اندازی گردید.

#### ۸-۲- راه‌اندازی و انجام آزمایش

شکل ۱۷ طرحواره تجهیزات اندازه‌گیری و مدار الکتریکی مربوط به راه‌اندازی موتور گرماصوتی نمونه سوم را نمایش می‌دهد. جهت اندازه‌گیری دمای مربوط به بخش‌های مختلف استک، از سنسورهای PT100 و یک برد آردوینو استفاده گردید. همزمان با متصل کردن منبع تغذیه، گرمکن شروع به داغ شدن نموده و گداخته می‌شود در این حالت مقادیر ولتاژ و جریان ورودی به سیستم و اطلاعات ۸ سنسور دما با نرخ داده برداری یک سوم ثانیه ثبت گردید. همچنین بسامد نوسان و شدت صوت تولید شده نیز اندازه‌گیری و ثبت شد.

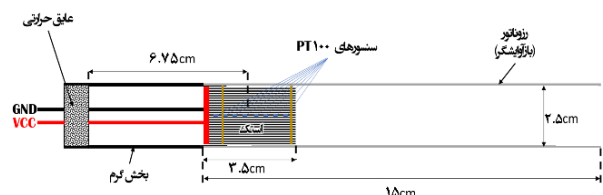


شکل ۱۷) تجهیزات اندازه‌گیری و نحوه برقراری اتصالات مداری موتور گرماصوتی

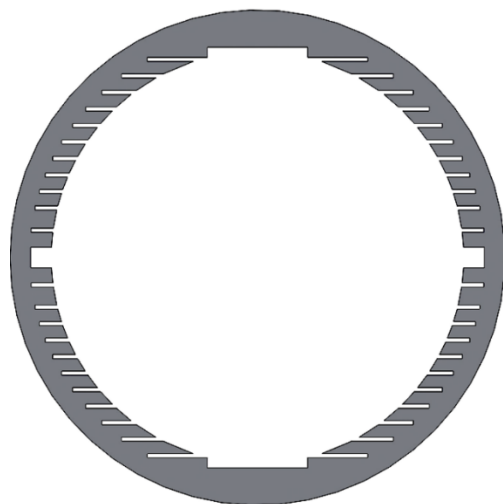
گرماصوتی متصل می‌گردد. این ویژگی امکان بررسی و دسترسی به گرمکن را ایجاد. در شکل ۱۳ طرحواره اندازه بخش‌های مختلف سامانه نمایش داده شده است که برش و ساخت قسمت‌های مختلف با توجه به آن انجام شده‌است.

ساخت استک (پشته): در شکل ۱۴ طرح دو بعدی نگهدارنده صفحات استک نمایش داده شده است. پس از طراحی این نگهدارنده، برش آن به کمک برش لیزری روی فلز برنج صورت گرفت. تعداد دو عدد نگهدارنده با ضخامت یک میلی‌متر به کمک این روش برش خورد که بعد از آن صفحه‌هایی از جنس میکا با طول ۳/۵ سانتی‌متر و با عرض‌های متفاوت برش خوردند و در محل از پیش تعیین شده، روی نگه دارنده نصب گردیدند. ضخامت صفحات ۰/۲ میلی‌متر است و تعداد این صفحه‌ها ۲۲ عدد (بدون احتساب صفحه میانی که سنسورها روی آن قرار گرفت) است. شکل ۱۵ دو نمای متفاوت از استک با صفحه‌های موازی ساخته شده را نمایش می‌دهد.

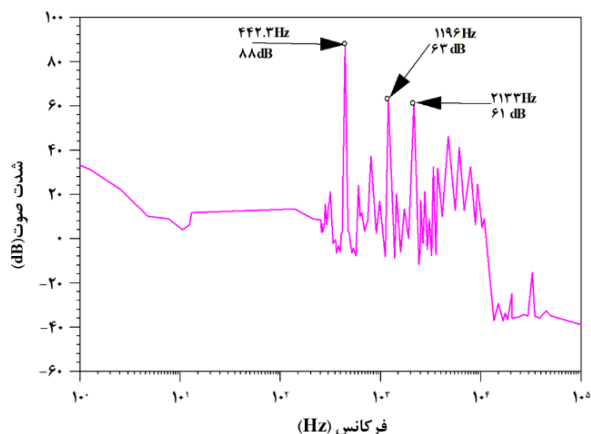
در شکل ۱۶ نمای مقابل صفحه میانی (از جنس برنج و برش دقیق به کمک برش لیزری فلزات) و آرایش سنسورهای دما نشان داده شده‌است. ساخت موتور گرماصوتی نمونه سوم با تغییر جنس صفحه میانی از برنج به ورقه میکا همراه بود چراکه فلز برنج دارای ضریب پخش حرارتی بالایی است و با افزایش دما در یک سمت استک، دما در طول این صفحه به سرعت تغییر کرده و نقاط



شکل ۱۳) طرحواره موقعیت قرارگیری استک، گرمکن و سنسور دما در موتور گرماصوتی



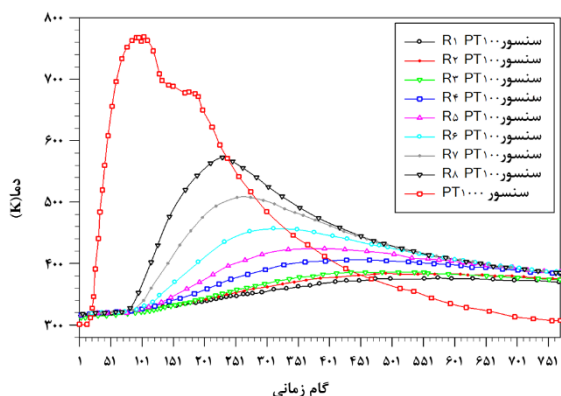
شکل ۱۴) طرح دو بعدی نگهدارنده صفحه‌های استک با آرایش موازی در موتور گرماصوتی



شکل ۱۸) فرکانس‌های تشدید موتور گرماصوتی

PT1000 نوع K دمای دقیق گرمکن در طول انجام آزمایش اندازه‌گیری شد که در شکل ۲۰ با رنگ قرمز نمایش داده شده است. در میانگین آزمون‌های انجام شده، در زمان ۳۷ ثانیه سامانه به حالت تشدید درآمده و همزمان توان ورودی کاهش می‌یابد تا سامانه به مدت ۲۰ ثانیه در حالت نوسان‌های پایدار فعالیت نماید و سپس جریان برق در سامانه قطع گردیده و دمای استک در طول فرآیند میرایی اندازه‌گیری شد. بعد از قطع جریان برق در سامانه، تولید صوت ۷ ثانیه ادامه داشت (تا  $t=60s$ ). هر آزمون در مدت زمان تقریبی ۲۶۰ ثانیه انجام شد و در هر ثانیه ۳ بار دمای سنسورها ثبت گردید. دمای مجموعه سنسورها در زمان معین در کنار یکدیگر شیب دمایی در طول استک را مشخص می‌نماید. شکل ۲۱ مربوط لحظه‌های قبل و اندکی بعد از شروع نوسان‌های خود تقویت شونده در سامانه است.

هنگامی که سنسور مجاور گرمکن بیشترین دما را ثبت می‌نماید، صوت بلند و یکنواختی تولید می‌گردد این در حالی است که دمای ابتدای استک به مقدار بیشینه خود نرسیده است و این نکته پایین بودن ضریب هدایت حرارتی صفحه‌های میکا قرارگرفته در طول استک را بیان می‌کند. مقایسه صورت گرفته برای پروفیل دما میان

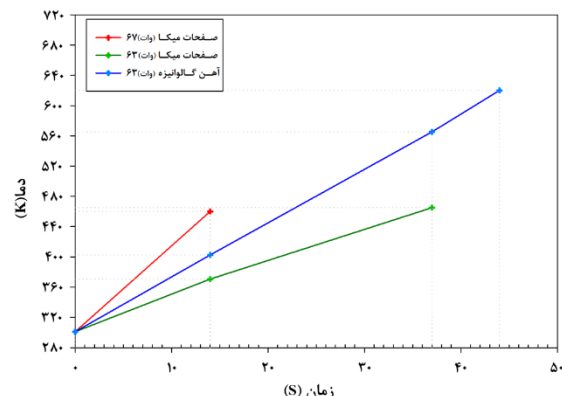


شکل ۲۰) دمای اندازه‌گیری شده توسط سنسورهای ۱ تا ۸ و سنسور مجاور گرمکن در طول فرآیند عملکردی سیستم

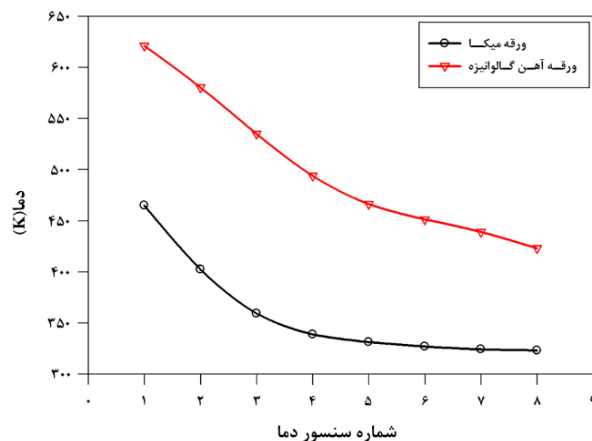
### ۸-۳- نتایج آزمون تجربی

با اتصال جریان برق، گرمکن شروع به گداخته شدن نموده و دما در ورودی استک افزایش می‌یابد در این حالت مقدار جریان و ولتاژ ورودی به ترتیب ۶/۳ آمپر و ۱۰/۶ ولت اندازه‌گیری شد. همچنین مقدار شدت صوت تولیدی اندازه‌گیری شده برابر با ۸۸ دسی-بل بود. شکل ۱۸ تعداد ۳ بسامد تشدید اندازه‌گیری شده برای موتور گرماصوتی نمونه سوم را نمایش می‌دهد که بسامد تشدید اول برابر ۴۴۲/۳ هرتز اندازه‌گیری شد. با تغییر جنس صفحه‌های استفاده شده در استک و استفاده از صفحه‌هایی از جنس میکا، بعد از گذشت ۳۷ ثانیه (با توان ورودی ۶۳ وات و یا ۱۴ ثانیه با توان ورودی ۶۷ وات) از متصل نمودن جریان، سیستم به حالت نوسان‌های خود تقویت شونده رسیده و صدای یکنواخت و بلندی تولید می‌شود.

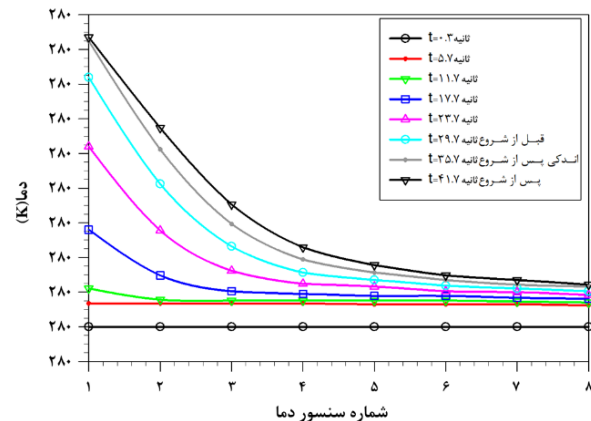
شکل ۱۹ زمان و دمای شروع نوسانات خودبه‌خودی را برای دو ماده مختلف استفاده شده در استک موتور گرماصوتی نمایش می‌دهد. با توجه به شکل ۱۹ دمای شروع نوسان‌های خود به خودی تنها به جنس صفحه‌های مورد استفاده در استک وابسته است، بلکه توان حرارتی ورودی نیز وابسته است. به بیان دیگر، شروع نوسان‌های خودبه‌خودی وابسته به اختلاف دمای ایجاد شده در دو طرف استک است. با توجه به اینکه مبدل حرارتی جهت ثابت نگه داشتن دما در سمت سرد استک استفاده نشده است، لذا هرگونه افزایش مدت زمان جهت ایجاد اختلاف دمای مورد نیاز، مقدار دمای بالاتری را در سمت گرم استک می‌طلبد. استفاده از صفحه‌های میکا در استک موتور گرماصوتی این پژوهش، کاهش انتقال حرارت هدایتی در طول صفحات استک را در بر داشت که این امر از هم دما شدن سریع دو طرف استک جلوگیری می‌نمود. نحوه تغییرات دمای استک و گرمکن در طول انجام آزمایش، اندازه‌گیری شد که طی آن تغییرات دمایی که ۸ سنسور تعبیه شده در طول استک اندازه‌گیری نمودند، در شکل ۲۰ نمایش داده شده است. به ترتیب شمارش، نزدیک‌ترین سنسور به گرمکن R1 و دورترین سنسور R8 می‌باشد. همچنین به کمک یک سنسور



شکل ۱۹) دمای شروع نوسانات خودبه‌خودی برای دو ماده مورد استفاده در صفحات استک



شکل ۲۲) شیب دمای اندازه‌گیری شده برای دو ماده مختلف مورد استفاده در استک موتور گرمصوتی در لحظات قبل از شروع نوسان‌های خودبه‌خودی



شکل ۲۱) شیب دمای اندازه‌گیری شده در استک موتور گرمصوتی در لحظات قبل و اندکی بعد از شروع نوسان‌های خودبه‌خودی

عددی و تست تجربی، اعتبار محاسبات و روش مورد استفاده مورد سنجش قرار می‌گیرد. در شکل ۲۳ منحنی تغییرات دما برای دو روش حل عددی و مقادیر اندازه‌گیری شده توسط سنسورهای دما در طول بازه شروع نوسان‌ها نشان داده شده است.

نمودار شکل ۲۲ میزان تطابق دمای اندازه‌گیری شده در حالت تجربی و مقدار محاسبه شده توسط دو روش بیان شده را برای محدوده شروع نوسان‌های خودبه‌خودی نمایش می‌دهد. مقادیر ارائه شده، میانگین دمای اندازه‌گیری شده در مجموع آزمون‌های انجام شده توسط هر سنسور در لحظه شروع نوسان‌های خودبه‌خودی است.

باتوجه به شکل ۲۲ مطابقت خوبی میان روند تغییرات دما اندازه‌گیری شده به روش تجربی و دو روش حل عددی دیگر در نیمه انتهایی استک دیده می‌شود. روش اول بدون تأثیر تغییرات دما در اجزای مدار الکتریکی است و در روش دوم، تغییرات دما همراه با تغییر مقدار اجزای مدار الکتریکی می باشد. در نیمه نخست استک هرچند داده‌های روش تلفیقی دارای اختلاف اندکی

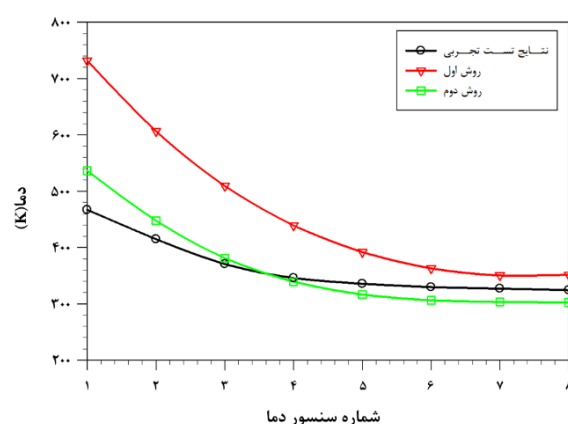
استک با صفحه‌های میکا و استک با صفحه‌های آهن گالوانیزه در زمان شروع نوسان‌های خود به خودی در شکل ۲۲ نمایش داده شده است.

با افزایش ضریب انتقال حرارت ورقه‌های به‌کار رفته در استک موتور گرمصوتی، تعادل حرارتی زودتر اتفاق افتاده و اختلاف دمای دو سر استک کاهش می‌یابد. برای ثابت نگه داشتن اختلاف دمای دو طرف استک به دو روش می توان عمل نمود، یا میل حرارتی جهت خنک کاری سمت سرد استک استفاده نمود و یا همواره دما در سمت گرم را افزایش داد. به طور کلی در یک موتور گرمصوتی با یک مبدل حرارتی گرم، مدت زمان عملکرد موتور در حالت نوسان‌های پایدار کوتاه است که رابطه مستقیم با ضریب هدایت حرارتی ماده مورد استفاده در بخش استک دارد.

## ۹- اعتبار سنجی

### ۹-۱- مقایسه شیب دمای محاسبه شده به کمک کد نویسی و مقادیر آزمون تجربی برای موتور گرمصوتی موج ایستا نمونه سوم

تغییرات دما وابسته به زمان در یک استک (پشته) با صفحه‌های موازی به کمک تحلیل عددی و هم‌ترازی مدار الکتریکی مورد مطالعه قرار گرفت. پس از بررسی و استخراج معادله‌ها و فرضیه‌های اصلی جهت حل معادله‌های گرمصوتی، شبکه حل مناسبی براساس تعداد تقسیم‌بندی‌های بخش استک ارائه گردید. درنهایت بر اساس شبکه حل و شرایط مرزی مسئله، معادله‌ها به دو روش و به کمک دو نرم‌افزار متلب و Ltspice حل شدند که نتایج آن‌ها در بخش ۶ و ۷ ارائه شده است. در این روش تغییرات دما منجر به تغییر مقدار اجزای الکتریکی نمی‌شد که با بهبود این روش و تصحیح مقدار اجزای الکتریکی در هر گام حل، مقدار دما تأثیر مستقیم بر مقادیر اجزای مدار الکتریکی داشت که منجر به واقعی‌تر شدن روند حل گردید. در این پژوهش با استفاده از دو روش عددی و تجربی، دما در ۸ نقطه مختلف در طول استک ثبت گردید. در ادامه این فصل با مقایسه منحنی‌های دما برای محاسبه‌های



شکل ۲۳) منحنی‌های تغییرات دما در طول استک برای دو روش حل عددی مختلف و نتایج آزمون تجربی در بازه شروع عملکرد

محاسبه گردید. دلیل این تفاوت، عدم به روز رسانی برخی متغیرها و عدم تأثیر تلفاتی چون مقاومت لزجی، مقاومت آسایش حرارتی و ... می باشد. جهت فائق آمدن بر این مشکل، روش بهبود یافته ای تشریح گردید که در هر گام زمانی، متغیرهای معادله از روش همترایی مدار الکتریکی به روزرسانی گردید. پژوهش پیش رو با رویکرد حل عددی و ساخت صورت گرفت که طی آن نتایج ذیل حاصل گشت:

- ارائه روش مقایسه شفاف از روش حل عددی تعیین دمای وابسته به زمان در استک موتور گرماسوتی
- اندازه گیری شیب دما در طول استک موتور گرماسوتی موج ایستا به دو روش تجربی و حل عددی
- ساخت موتور گرماسوتی موج ایستا با قابلیت نمایش لحظه ای دما در طول انجام فرآیندهای شروع، میرایی و خاموشی سیستم
- امکان تحلیل دامنه فشار نوسانی و دبی حجمی نوسانی در هر گره از مدار شبیه سازی شده برای موتور گرماسوتی این پژوهش.

### فهرست علائم

|                 |                                        |
|-----------------|----------------------------------------|
| $\dot{H}_2$     | انرژی کل                               |
| $Re[]$          | بخش حقیقی                              |
| $Im[]$          | بخش موهومی                             |
| $f_k$           | تابع حرارتی متوسط فضایی                |
| $f_k$           | تابع لزجی متوسط فضایی                  |
| $dx$            | تغییرات طول در جهت محور x              |
| $R$             | ثابت جهانی گازها                       |
| $\rho_m$        | چگالی متوسط                            |
| $\rho_0$        | چگالی مرجع (در دمای مرجع و فشار متوسط) |
| $U_1$           | دامنه سرعت حجمی نوسانی                 |
| $p_1$           | دامنه فشار نوسانی                      |
| $T_m$           | دمای متوسط                             |
| $T_r$           | دمای مرجع                              |
| $A_{solid}$     | سطح مقطع جامد                          |
| $\dot{q}_{out}$ | شار حرارتی خروجی                       |
| $k$             | ضریب هدایت حرارتی                      |
| $k_{solid}$     | ضریب هدایت حرارتی جامد                 |
| $k_0$           | ضریب هدایت حرارتی در دمای مرجع         |
| $cp$            | ظرفیت حرارتی گاز در فشار ثابت          |
| $\sigma$        | عدد پراوتل                             |
| $i$             | عدد موهومی                             |
| $a$             | عرض صفحه میانی استک                    |
| $\delta_k$      | عمق نفوذ حرارتی                        |
| $\delta_v$      | عمق نفوذ لزجی                          |
| $\omega$        | فرکانس دورانی                          |
| $p_m$           | فشار متوسط                             |
| $A$             | مساحت مقطع عبور گاز                    |
| $\gamma$        | نسبت حرارت ویژه                        |
| $\gamma_0$      | نصف فاصله صفحات استک                   |
| $\mu$           | ویسکوزیته دینامیکی                     |
| $\mu_0$         | ویسکوزیته دینامیکی در دمای مرجع        |

با مقادیر مربوط به سنسورها در روش تجربی هستند، اما هرچه به ابتدای استک (نقطه  $R1$ ) نزدیک می شویم، این اختلاف افزایش می یابد. علت وجود این تفاوت در موقعیت نیمه نخست استک، به جهت وجود فاصله دو میلی متری سنسور اول با المنت گرمکن و تأخیر زمانی در برقراری تعادل حرارتی میان سنسور و المنت گرمکن است. تعادل حرارتی زمانی ایجاد می گردد که سامانه مدت زمان مشخصی را در دمای معین گرمکن بگذرانند یا به عبارت دیگر دمای المنت و سنسور دقیقاً یکسان باشد.

به طور کلی روش بهبود یافته (روش دوم) مطابقت مناسبی را با داده های آزمون تجربی نشان داد. در میانگین آزمون های تجربی انجام شده، زمان اندازه گیری شده جهت شروع نوسان های خودبه خودی ۳۷ ثانیه اندازه گیری شد.

با توجه به اینکه مقدار توان ورودی اندازه گیری شده در آزمون تجربی به دلیل وجود تلفات فرعی، دقیقاً برابر با همان مقدار توان اعمال شده به حل عددی نمی باشد و همچنین مدت زمان مشخصی طول می کشد تا المنت گرمکن به دمای آستانه شروع نوسان برسد، همه این موارد منجر به وجود اختلاف میان زمان اندازه گیری شده در آزمون های تجربی و حل عددی شده است. در حالتی که عدم قطعیت بیان شده، در حل عددی روش تلفیقی وجود ندارد و به محض شروع حل، توان ورودی ۶۵ وات به طور دقیق در هر لحظه در معادله های اثر می نماید.

به عبارت دیگر در آزمایش های تجربی توان ورودی یک شیب خطی را از مقدار صفر تا ۶۵ وات برحسب زمان طی می نماید که همین امر باعث افزایش زمان شروع نوسان های خودبه خودی می گردد. مدت زمان لازم جهت شروع فرآیند نوسان های خودبه خودی در حل عددی به روش بهبود یافته ۱۳/۱۴۷ ثانیه اندازه گیری شد که عدد قابل قبولی است.

### ۱۰- جمع بندی و نتیجه گیری

در این پژوهش یک مدل تعادل حرارتی برای صفحه میانی استک موتور گرماسوتی موج ایستا ارائه گردید که همراه با حل عددی معادله های گرماسوتی و همترایی مدار الکتریکی بود و با اعمال ظرفیت حرارتی صفحه میانی، امکان بررسی تغییرات دما در طول زمان فراهم می شد. ارتباط شیب دمایی در جهت شعاعی به کمک توزیع خطی و سهموی ارائه گردید.

نمودارهای خروجی روش حل عددی و نمودارهای آزمایش تجربی مطابقت خوبی را نشان دادند لذا مدل بررسی شده برای یک استک با یک مبدل حرارتی که ایزولاسیون حرارتی بر روی آن صورت نگرفته است، نتایج خوبی را به نمایش گذاشت. در نهایت نتایج عددی و آزمایش های تجربی، جهت جمع بندی مباحث و ارائه یک مقایسه مناسب، ارائه گردیدند. نمودار دمایی که به کمک روش عددی استخراج گردید، رفتار یکسانی را با نتایج تجربی نشان داد اما مقادیر دما در حالت حل عددی اول بسیار بیشتر از نتایج تجربی

amplitudes. The Journal of the Acoustical Society of America. 2000;107(5):2480-6.

14-Wheatley J, Cox A. Natural engines. Physics Today. 1985;38(8):50-8.

15-Ju Y, Jiang Y, Zhou Y. Experimental study of the oscillating flow characteristics for a regenerator in a pulse tube cryocooler. Cryogenics. 1998;38(6):649-56.

16-Chen G, Krishan G, Yang Y, Tang L, Mace B. Numerical investigation of synthetic jets driven by thermoacoustic standing waves. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2020;146:118859.

17-Piccolo A. Numerical study of entropy generation within thermoacoustic heat exchangers with plane fins. Entropy. 2015;17(12):8228-39.

18-Abd El-Rahman AI, Abdelfattah WA, Fouad MA. A 3D investigation of thermoacoustic fields in a square stack. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2017;108:292-300.

19-Mergen S, Yildirim E, Turkoglu H. Numerical study on effects of computational domain length on flow field in standing wave thermoacoustic couple. Cryogenics. 2019;98:139-47.

20-Ilori OM, Jaworski AJ, Mao X. Experimental and numerical investigations of thermal characteristics of heat exchangers in oscillatory flow. Applied Thermal Engineering. 2018;144:910-25.

21-Cao N, Olson JR, Swift GW, Chen S. Energy flux density in a thermoacoustic couple. The Journal of the Acoustical Society of America. 1996;99(6):3456-64.

22-Ishikawa H, Mee DJ. Numerical investigations of flow and energy fields near a thermoacoustic couple. The Journal of the Acoustical Society of America. 2002;111(2):831-9.

23-Piccolo A, Pistone G. Estimation of heat transfer coefficients in oscillating flows: The thermoacoustic case. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2006;49(9-10):1631-42.

24-Swift GW. Thermoacoustics. In: Springer Handbook of Acoustics 2014 (pp. 247-263). Springer, New York, NY.

25-Aben PC. High-amplitude thermoacoustic flow interacting with solid boundaries.

۲۶-بهرامی م، صبوخی ز، امی ف، مدلسازی شروع نوسانات در موتور گرماسوتی به روش همترائی مدار الکتریکی، پنجمین کنگره انجمن مهندسی صوتیات ایران، ۱۳۹۷.

27-Piccolo A, Cannistraro G. Convective heat transport along a thermoacoustic couple in the transient regime. International journal of thermal sciences. 2002;41(11):1067-75.

28-Herpe J, Bougeard D, Russeil S, Stanciu M. Numerical investigation of local entropy production rate of a finned oval tube with vortex generators. International Journal of Thermal Sciences. 2009;48(5):922-35.

29-Pioro IL, Rohsenow W, Doerffer SS. Nucleate pool-boiling heat transfer. I: review of parametric effects of boiling surface. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2004;47(23):5033-44.

30-Xiao JH. Thermoacoustic heat transportation and energy transformation Part 1: Formulation of the problem. Cryogenics. 1995;35(1):15-9.

**تأییدیه اخلاقی:** نویسندگان مقاله ضمن اعلام موافقت خود مبنی بر ارسال این مقاله به نشریه دانشگاه تربیت مدرس، تعهد می‌نمایند که این مقاله در زمان ارسال برای این مجله در هیچ نشریه ایرانی یا غیر ایرانی در حال بررسی نبوده و تا تعیین تکلیف قطعی در این نشریه برای هیچ نشریه ایرانی یا غیر ایرانی دیگری ارسال نخواهد شد.

**تعارض منافع:** نویسندگان با اختیار و آگاهی کامل، کلیه حقوق مادی مربوط به انتشار این مقاله را به نشریه دانشگاه تربیت مدرس واگذار می‌نمایند و نشریه در انتشار این مقاله به هر صورت اختیار تام دارد و منافع مادی احتمالی متعلق به نشریه است.

**منابع مالی:** هزینه این مقاله از طرف نویسندگان پرداخت شده است.

## منابع

- 1- Lawn CJ, Penelet G. Common features in the thermoacoustics of flames and engines. International Journal of Spray and Combustion Dynamics. 2018;10(1):3-7.
- 2- KATABIRA Y, HARIU K. Review of the Literature on Psoriasis. Hifuka no rinsho. Rinsho derma (Tokyo). 1963;5:1-9.
- 3- Sondhauss C. Ueber die Schallschwingungen der Luft in erhitzten Glasröhren und in gedeckten Pfeifen von ungleicher Weite. Annalen der Physik. 1850;155(1):1-34.
- 4- LR W. The Theory of Sound. Nature. 1898;58(1493):121-2.
- 5- Rott N. Damped and thermally driven acoustic oscillations in wide and narrow tubes. Zeitschrift für angewandte Mathematik und Physik ZAMP. 1969;20(2):230-43.
- 6- Arnott WP, Bass HE, Raspet R. General formulation of thermoacoustics for stacks having arbitrarily shaped pore cross sections. The Journal of the Acoustical Society of America. 1991;90(6):3228-37.
- 7- Ceperley PH. A pistonless Stirling engine—the traveling wave heat engine. The Journal of the Acoustical Society of America. 1979;66(5):1508-13.
- 8- Atchley AA, Bass HE, Hofler TJ, Lin HT. Study of a thermoacoustic prime mover below onset of self-oscillation. The Journal of the Acoustical Society of America. 1992;91(2):734-43.
- 9- Atchley AA. Standing wave analysis of a thermoacoustic prime mover below onset of self-oscillation. The Journal of the Acoustical Society of America. 1992;92(5):2907-14.
- 10-Clark JP, Ward WC, Swift GW. Design environment for low-amplitude thermoacoustic energy conversion (DeltaEC). The Journal of the Acoustical Society of America. 2007;122(5):3014-3014.
- 11-Rott N. Thermoacoustics. In: Advances in applied mechanics, Elsevier. 1980;20:135-175.
- 12-Qiu LM, Lai BH, Li YF, Sun DM. Numerical simulation of the onset characteristics in a standing wave thermoacoustic engine based on thermodynamic analysis. International journal of heat and mass transfer. 2012;55(7-8):2200-3.
- 13-Poese ME, Garrett SL. Performance measurements on a thermoacoustic refrigerator driven at high

a thermoacoustic stack plate. Cryogenics. 2005;45(3):163-72.

31-Marx D, Blanc-Benon P. Numerical calculation of the temperature difference between the extremities of