

توسعه‌ی مدل برای فرایند شروع و میرایی موتور گرماسوتی موج ایستا

علیرضا مرادی (دانشجوی دکتری)

فتح‌اله امی* (استاد)

محسن بهرامی (دانشجوی دکتری)

دانشکده مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس

زهیر صموچی (استادیار)

پژوهشگاه هوافضا، وزارت علوم، تحقیقات و فناوری، تهران

مهندسی مکانیک شریف، (بهار ۱۴۰۱)
دوره ۳-۲، شماره ۱، ص. ۱۱۳-۱۲۵، (پادداشت شریف)

این مقاله یک روش مدل‌سازی موتور گرماسوتی موج ایستا برای بررسی شرایط سیستم در حالت گذرا را ارائه می‌کند. تمرکز این روش بر دقیق‌سازی پیش‌بینی‌ها و ایجاد شناخت بهتر درباره‌ی شرایط عملکردی این دستگاه‌هاست. ایده‌ی که پایه‌ی اصلی این کار را تشکیل می‌دهد تلفیق روش حل عددی حالت گذرا و هم‌ترازی مدار الکتریکی موتور گرماسوتی موج ایستا است. با فرض هر جزء موتور گرماسوتی به‌عنوان یک المان فشرده‌ی هم‌ترازی مدار الکتریکی یک موتور گرماسوتی موج ایستا صورت می‌پذیرد. نتیجه‌ی حاصل از ترکیب روش حل عددی وابسته به زمان و هم‌ترازی مدار الکتریکی، یک کد برنامه‌نویسی است که امکان تعیین شرایط شروع، پایداری و میرایی نوسانات خودبه‌خودی در یک موتور گرماسوتی موج ایستا را فراهم می‌کند. با استفاده از این روش، لحظه‌ی شروع نوسانات خودبه‌خودی در سیستم ۱۳/۱ ثانیه محاسبه شد.

moradialireza@modares.ac.ir
fommi@modares.ac.ir
bahramymohsen@modares.ac.ir
saboochi@ari.ac.ir

واژگان کلیدی: موتور گرماسوتی، موج ایستا، فرایند شروع، فرایند میرایی، هم‌ترازی مدار الکتریکی، حل عددی.

۱. مقدمه

توان ثابت عمل می‌کند.^[۷] در این سیستم‌ها، حرارت گاز خروجی از آگزوز به‌عنوان توان حرارتی ورودی به موتور گرماسوتی استفاده می‌شود. با تبدیل انرژی حرارتی به توان صوتی و در مرحله‌ی دوم تبدیل توان صوتی به توان الکتریکی، بخشی از انرژی حرارتی اتلافی آگزوز خودرو بازیابی می‌شود.

در یک موتور گرماسوتی، انرژی حرارتی به وسیله‌ی نوسانات صوتی به کار تبدیل می‌شود. در واقع از یک سو انرژی حرارتی می‌تواند به کمک امواج صوتی در یک محیط منتقل شود و از سوی دیگر نیز وجود گرادیان دمای معین در طول یک مجرا با هندسه‌ی خاص می‌تواند منجر به تولید امواج صوتی شود که آن را اثر گرماسوتی^۳ گویند. عمل تبدیل انرژی حرارتی به توان صوتی در موتور گرماسوتی، همراه با مجموعه‌ی تغییرات وابسته به زمان خواص ترمودینامیکی سیال همچون دما، فشار و چگالی است. رابطه‌ی میان دمای نوسانی و جابه‌جایی گاز نقش اساسی را در اثر گرماسوتی ایفا می‌کند که این رابطه توسط لرد ریلی توضیح داده شده است.^[۱۲] علاوه بر این، نظریه‌ی گرماسوتی خطی رات،^۴ به‌طور گسترده در چهل سال گذشته برای توصیف این پدیده مورد استفاده قرار گرفته است.^[۱۳] درک مفاهیم گرماسوتی نیازمند بررسی این پدیده در حوزه زمان است. هرچند نظریه‌ی خطی رات می‌تواند معادلات گرماسوتی را در حوزه‌ی فرکانس محاسبه کند، اما در شبیه‌سازی‌های مربوط به پیش‌بینی زمان شروع و خاتمه نوسانات صوتی، نمی‌تواند

امروزه با توجه به حجم قابل توجه انرژی‌های اتلافی قابل بازیافت، استفاده از تکنولوژی‌های بازیافت انرژی همچون چرخه‌ی تولید توان رانکین،^[۱] شامل چرخه‌ی کالینا،^۱ بویلرهای بازیافت حرارتی،^۲ سیستم‌های خورشیدی،^[۲] مازول ترموالکتریک، مواد پیزوالکتریک^[۳] و یخچال‌های جذبی،^[۴] توجیه اقتصادی دارد. موتور گرماسوتی نیز یکی از تکنولوژی‌های بازیابی انرژی به شمار می‌آید که با توجه به نداشتن قطعات متحرک، قابلیت اطمینان بالا و سازگاری با محیط زیست، توجه بسیار گسترده‌ی را به خود جلب کرده است.^[۵] این در حالی است که این سیستم‌ها به دلیل وجود پدیده‌ی تلفات داخلی جریان صوتی، به‌صورت ایده‌آل عمل نمی‌کنند.^[۶] همچنین وزن و ابعاد دستگاه به تناسب میزان انرژی مورد نیاز بالاست و هزینه‌ی ساخت درایورهای صوتی - الکتریکی نیز بسیار زیاد است.^[۷] هرچند بازده سیستم‌های گرماسوتی تک‌مرحله‌ی پایین است اما با توجه به مطالعات بسیاری که در زمینه‌ی بازیابی انرژی به کمک این سیستم‌ها انجام شده است نشان از توجه محققان به مزیت‌های بیان شده برای این سیستم‌هاست.^[۸-۱۱] یک مورد کاربرد بهینه‌ی این سیستم‌ها در خودروهای هیبریدی است، برای حالتی که در یک مسیر طولانی، خودرو با شرایط

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۰/۲/۴، اصلاحیه ۱۴۰۰/۶/۲۶، پذیرش ۱۴۰۰/۸/۱۱.

DOI:10.24200/J40.2021.57707.1586

مورد استفاده قرار گیرد.^[۱۴] معادلات گرماصوتی که توسط رات، ویتلی و سوئیفت در طول زمان ارتقا پیدا کرد، امکان محاسبه‌ی دما و فرکانس نوسانات خودبه‌خودی را برای یک موتور گرماصوتی اولیه فراهم می‌کرد.^[۱۵-۱۷] اما وجود تفاوت دما میان شروع نوسانات و حالت میرایی نوسانات که اولین بار توسط ژو و مانتویا را در یک موتور گرماصوتی موج ایستا مشاهده شد، توسط معادلات بیان شده قابل ارزیابی نبود.^[۱۸] 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 آزمون‌های تجربی دستگاه‌های گرماصوتی داشت، اما دارای محدودیت‌هایی نیز بود. به همین دلیل، از روش‌های مختلف حل عددی غیر خطی برای پوشش محدودیت‌های نظریه‌ی خطی استفاده شده است.^[۱۹-۲۳]

یکی از محدودیت‌های استفاده از معادلات حالت نوسانات پایا، عدم پیش‌بینی شرایط زمانی مربوط به لحظه‌ی شروع نوسانات خودبه‌خودی بوده است. لذا حل عددی حالت گذرای معادلات گرماصوتی، همواره مورد توجه محققین بسیاری بوده است. با بررسی ارتباط میان ظرفیت حرارتی ماده‌ی به‌کار رفته در بخش استک موتورهای گرماصوتی (بخش باز یا ب یخچال‌های گرماصوتی) و معادلات انتقال انرژی در این بخش، امکان مشاهده‌ی تغییر پارامترهای ترمودینامیکی گاز کاری سیستم به‌صورت وابسته به زمان فراهم می‌شود. اولین تلاش‌ها برای حل عددی معادلات گرماصوتی در حالت گذرا توسط کائو و همکارانش،^[۲۴] ایشیکاوا و می،^[۲۵] استفاده از انتقال حرارت متوسط در طول صفحه‌ی استک که در دمای ثابت قرار داشت، عملکرد یک سیستم گرماصوتی را بررسی کردند و این در حالی بود که پیکولو و پیستون،^[۲۵] با ترکیب معادلات گرماصوتی و ظرفیت حرارتی مربوط به صفحه‌ی استک، توانستند معادلات گرماصوتی را در حالت گذرا حل کنند و از این طریق به نتایج مشابهی دست یافتند. اما در این روش تنها بخش استک برای حالت گذرا مورد مطالعه قرار گرفت. لذا امکان شبیه‌سازی کامل یک دستگاه گرماصوتی به چشم می‌خورد که در سال ۲۰۱۴ سوئیفت و همکارانش،^[۲۶] با تأکید بر وجود تشابه میان معادلات حاکم بر میدان‌های فیزیکی همچون مکانیکی، صوتی و الکتریکی توانستند الگوی مناسبی برای شبیه‌سازی دستگاه‌های گرماصوتی به‌کمک مدار الکتریکی، ممکن سازند. به کمک این همتراپی مدار الکتریکی، امکان استفاده از نرم‌افزارهای الکتریکی برای بررسی فرایند شروع و میرایی نوسانات خودبه‌خودی در موتورهای گرماصوتی فراهم شد.

یکی از اهداف این مقاله مرتبط ساختن حل عددی حالت گذرا با همتراپی الکتریکی موتور گرماصوتی است. به‌کمک این روش امکان تعیین بازه زمانی شروع و میرایی نوسانات خودبه‌خودی، دقیق‌تر کردن پیش‌بینی شرایط شروع و میرایی نوسانات و بررسی لحظه‌ی تغییرات خواص در موتور گرماصوتی فراهم می‌شود. همچنین به کمک این روش که در قالب یک حل ترکیبی عددی و شبیه‌سازی الکتریکی است، امکان مشاهده لحظه‌ی پارامترهای نوسان‌کننده برای یک موتور گرماصوتی در مقیاس کامل وجود دارد. با تعیین شرایط ترمودینامیکی و محل زمانی شروع نوسانات خودبه‌خودی و شرایط میرایی نوسانات سیستم، وجود اختلاف دما در شرایط شروع و میرایی نوسانات در سیستم گرماصوتی که توسط آزمایش‌ها مشاهده شده بود، تأیید شد. در ادامه این مقاله، روش حل عددی ارتقا یافته تشریح شده و نتایج حاصل از آن به کمک یک نمونه موتور گرماصوتی موج ایستا که برای صحت سنجی نتایج این پژوهش ساخته شده است، مورد بررسی قرار گرفته است. به عبارت دیگر، اختلاف دما اندازه‌گیری شده نشان داد که دو درجه حرارت بحرانی وجود دارد و رفتار موتور گرماصوتی در نزدیکی این دو دما متفاوت است. این اثر قابلیت‌پذیری^۵ نام دارد که با تقریب خطی گرماصوتی رات قابل توضیح نیست، اما در تحقیقات تجربی مشاهده

شده است.^[۲۷-۲۹] در ادامه این نوشتار، روش حل عددی ارتقا یافته توصیف شد و نتایج حاصل از آن، به کمک موتور گرماصوتی موج ایستا که برای اعتبارسنجی نتایج این تحقیق ساخته شده، مورد بررسی قرار گرفت.

۲. مدل حل عددی

معادلات اصلی که برای بررسی تغییرات سیال در عبور از استک، داکت‌ها و مبدل‌های حرارتی مورد استفاده قرار می‌گیرد، معادله‌ی تغییرات فشار، دبی حجمی و معادله‌ی انرژی است که امکان بررسی تغییرات دما را فراهم می‌کند. معادلات ۱ تا ۳ به ترتیب نمایش‌دهنده‌ی این معادلات در سیستم‌های گرماصوتی هستند:^[۲۷]

$$dp_v = -\frac{i\omega\rho_m \frac{dx}{A}}{1-f_v} U_v \quad (1)$$

$$dU_v = -\frac{i\omega A dx}{\gamma p_m} [1 + (\gamma - 1) f_k] p_v + \frac{f_k - f_v}{(1-f_v)(1-\sigma)} \frac{dT_m}{dx} \frac{U_v}{T_m} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \dot{H}_v = & \frac{1}{\gamma} Re \left[\tilde{p}_v U_v \left(1 - \frac{f_k - \tilde{f}_v}{(1-\tilde{f}_v)(1+\sigma)} \right) \right] \\ & + \frac{\rho_m c p |U_v|^2}{2A\omega|1-f_v|^2(1-\sigma^2)} Im(f_k + \sigma \tilde{f}_v) \frac{dT_m}{dx} \\ & - (Ak + A_{solid} k_{solid}) \frac{dT_m}{dx} \quad (3) \end{aligned}$$

معادلات ۱ و ۲ که معادلات گرماصوتی رات نیز نامیده می‌شوند، به ترتیب برگرفته از معادله‌ی اندازه حرکت و پیوستگی هستند. این دو معادله به کمک شرایط اولیه دما، فشار و سرعت جریان در طول استک را محاسبه می‌کنند. معادله‌ی ۳ نیز حالت کلی معادله‌ی انرژی است و متشکل از ترم جریان انتالپی و ترم جریان حرارتی است. در این معادلات dU_v ، dp_v و dT_m به ترتیب تغییرات دامنه فشار نوسانی، سرعت حجمی نوسانی و دمای متوسط را نسبت به گام قبلی نمایش می‌دهند. همچنین به کمک این سه معادله، مشخص بودن شرایط مرزی حجم کنترل و شرایط اولیه دما، می‌توان حدود تغییرات دما در دو طرف استک را در حالت نوسانات پایا محاسبه کرد. اما با توجه به این که معادلات ۱ تا ۳ برای حل در حالت پایای نوسانی هستند، بررسی حالت حل گذرا برای پیش‌بینی زمان شروع و خاتمه نوسانات صوتی مورد توجه است.

۱.۲. معادلات حالت گذرا

در حالت گذرا، تغییرات خواص سیال نه تنها وابسته به مکان است بلکه با زمان نیز تغییر می‌کند. در این حالت می‌بایست اتلاف حرارتی به محیط و حرارت ورودی به استک در موتور گرماصوتی به‌صورت تابع وابسته زمان، در نظر گرفته شود. در این نوع مدل‌سازی می‌توان تغییرات زمانی دما در طول استک را به‌صورت مرحله به مرحله بررسی کرد. در این حالت با برقراری ارتباط میان ظرفیت حرارتی ماده به کار رفته در استک و معادله‌ی انرژی، تغییرات زمانی دما در طول استک را می‌توان بررسی کرد.^[۲۶] استک موتور گرماصوتی این مقاله، از ۲۳ صفحه که با آرایش موازی در جهت محور موتور گسترش یافته‌اند تشکیل شده است. شکل ۱ شماتیک نحوه آرایش صفحات استک را نمایش می‌دهد که صفحه میانی برای انجام مدل‌سازی انرژی مشخص شده است.

پارامتر ورودی و برحسب وات با توان صوتی ورودی جمع می‌شود. برای محاسبه‌ی میزان انرژی ورودی به یک بخش و خروجی از آن، با نگاهی عمیق‌تر به معادله‌ی ۳ می‌توان این معادله را برای اعمال شرایط دقیق‌تر، به سه بخش مجزا تقسیم کرد:

۱. معادله‌ی جریان انرژی: ترم اول معادله‌ی ۳ به دلیل نوسانات صوتی است که بسته به محل اندازه‌گیری، در دو بخش ورودی و خروجی استک (حجم کنترل) می‌تواند مثبت یا منفی باشد.^[۳۳]

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

۲. معادله‌ی اثر پمپاژ گرماصوتی: حاصل ضرب ترم دوم معادله‌ی ۳ در گرادینان دما در طول استک که به دلیل برگشت ناپذیری محیط کار ایجاد می‌شود و متناسب با شیب دماست اثر پمپاژ گرماصوتی نام دارد. جهت آن از سمت گرم به سمت سرد (مخالف جهت شیب دما) است.^[۳۳]

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

۳. معادله‌ی هدایت حرارتی میان گاز و جامد: این معادله میزان انرژی منتقل شده به صورت هدایت حرارتی به وسیله‌ی گاز کاری و ماده‌ی مورد استفاده در استک را محاسبه می‌کند. مقدار هدایت حرارتی در دو بخش ورودی و خروجی استک (حجم کنترل) متفاوت است.^[۳۳]

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

در نهایت تفاوت تغییرات انرژی هر قسمت و مقدار انرژی حرارتی که به محیط می‌دهد، برابر است با مقدار انرژی که بر آن بخش اعمال می‌شود و صرف تغییر دمای آن قسمت می‌شود که متغیر با زمان است. معادله‌ی ۶ تساوی عددی قابل حل برای محاسبه‌ی تغییرات دمای در المانی از شکل ۲ را ارائه می‌کند.^[۳۴]

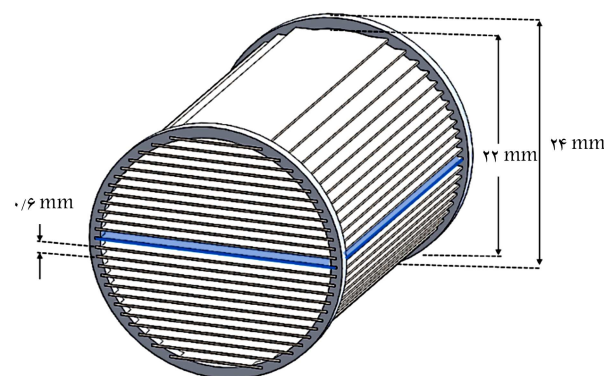
$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{F(x_i) - F(x_{i+1}) + (G(x_i) + C) \frac{(T_i - T_{i-1})}{\Delta x}}{\rho c_p V} - \frac{(G(x_{i+1}) + C) \frac{(T_i - T_{i-1})}{\Delta x} + \dot{Q}_{out}}{\rho c_p V} \quad (6)$$

۲.۲. مشخصات مواد و هندسه‌ی مسئله

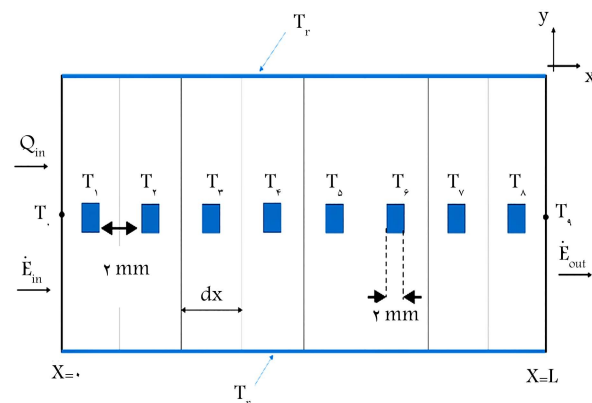
پس از تعیین معادلات اصلی، شبکه حل و حجم کنترل مورد نظر، نوبت به تعیین ثابت‌های معادله‌ی ۶ و نحوه‌ی حل این معادله می‌رسد. در جدول ۱ ثوابت مهمی که مربوط به پارامترهای ساختاری موتور گرماصوتی موج ایستا به کار رفته در این پژوهش است، بیان شده است.

۳. مدل همترایی مدار الکتریکی

همترایی مدار الکتریکی موتور گرماصوتی دو هدف را در این مقاله محقق می‌کند؛ یکی امکان پیش‌بینی نوسانات خودبه‌خودی با استفاده از حل گذرای مدار الکتریکی و دیگری حل موتور گرماصوتی به صورت یک مدار الکتریکی مجتمع. به گونه‌ی که



شکل ۱. شماتیک استک موتور گرماصوتی با آرایش صفحات موازی.



شکل ۲. شماتیک شبکه حل در قسمت استک موتور گرماصوتی.

برای حل معادلات ۱ تا ۳ به یک شبکه‌ی حل و تعیین شرایط مرزی و اولیه نیازمندیم. شکل ۲ شماتیک صفحه میانی استک را که به تعداد مشخصی المان تقسیم شده است نمایش می‌دهد. در این بخش برای استفاده از گرمکن، توان حرارتی و توان صوتی در ورود به استک وجود دارد و در خروج از آن، ترم توان صوتی وجود خواهد داشت. در شکل ۲ T_r دمای دیواره جانبی صفحات استک است که نشان‌دهنده‌ی دمای مرجع است. همچنین عبارت‌های Q_{in} و E_{in} در ابتدای استک به ترتیب نشان‌دهنده‌ی حرارت ورودی (حاصل از گرمکن) و انرژی صوتی ورودی است و E_{out} نمایانگر انرژی صوتی خارج شده از المان حجم کنترل خواهد بود که به طور مجزا در روند حل برای هر بخش محاسبه می‌شود و در ادامه تشریح شده است.

برای حل معادله‌ی انرژی برای محاسبه‌ی پروفیل دمای استک، صفحه‌ی میانی استک به عنوان نمونه در جهت محور موتور (محور x) گسسته‌سازی شد (شکل ۲). هر بخش به طور مجزا دارای ظرفیت حرارتی مشخصی است و می‌توان معادله‌ی انرژی را برای هر کدام از ۸ بخش مختلف نوشت و حل کرد 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 می‌شود. توان صوتی ورودی به استک و خروجی از آن با توجه به روابط ۴ و ۵ محاسبه می‌شود.^[۳۲]

$$\dot{E}_{in} = \frac{1}{\rho} Re(p_1|_{x=0} \tilde{U}_1|_{x=0}) \quad (4)$$

$$\dot{E}_{out} = \frac{1}{\rho} Re(p_1|_{x=l} \tilde{U}_1|_{x=l}) \quad (5)$$

همچنین با توجه به وجود گرمکن در مجاورت ورودی استک، مقدار حرارت به عنوان

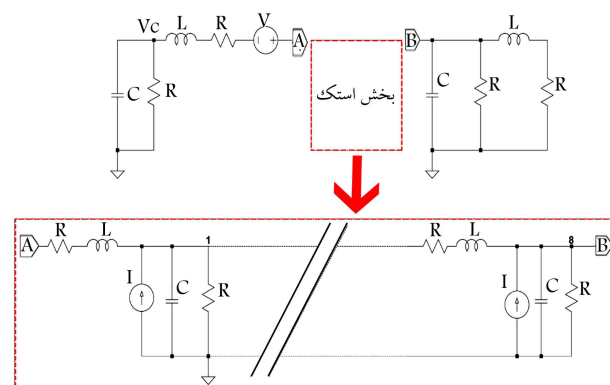
جدول ۱. مشخصات هندسی استک، ضرایب ترمودینامیکی و مقدار ثابت‌های مورد استفاده در حل عددی. [۳۵]

عنوان	نماد	مقدار (یکا)
سطح مقطع عبور گاز	A	$229/889 \times 10^{-6} (m)$
سطح مقطع استک	A_{solid}	$222/5 \times 10^{-6} (m)$
طول صفحات استک	l_p	$0/35 (m)$
عرض صفحه میانی	w_p	$0/2206 (m)$
فاصله میان صفحات	D_p	$6 \times 10^{-4} (m)$
ضخامت صفحات	d_p	$2 \times 10^{-4} (m)$
دمای مرجع	T_r	$300 (K)$
فشار محیط	p_o	$101800 (Pa)$
لزجت دینامیکی در دمای مرجع	μ_o	$1/85 \times 10^{-5} (Pa.s)$
ضریب هدایت حرارتی گاز در دمای مرجع	k_o	$0/26 (W/K.m)$
ضریب هدایت حرارتی صفحات استک	k_{solid}	$4705 (W/K.m)$
ثابت گاز هوا	R_{air}	$286/7 (J/kg.K)$
ظرفیت حرارتی ویژه گاز	C_p	$1003 (J/kg.K)$
ظرفیت حرارتی ویژه صفحات استک	C_{SO}	$880 (J/kg.K)$
ثابت توانی ویسکوزیته	b_μ	$0/76$
ثابت توانی هدایت حرارتی	b_k	$0/89$

۴. مدل ارتقاء یافته

مبنای روش ارتقاء یافته، پیوند حل عددی معادلات و روش مدل‌سازی الکتریکی موتور گرماسوتی است. کد نوشته شده در این روش برای فائق آمدن بر محدودیت‌های بیان شده، استفاده شد. تشخیص محل زمانی شروع نوسانات خودبه‌خودی و ارائه مدل‌سازی کاملی از موتور گرماسوتی دو محدودیت بیان شده در این پژوهش هستند. برنامه‌ی نوشته شده به این صورت عمل می‌کند که ابتدا با وارد کردن مشخصات هندسی موتور گرماسوتی، محل قرارگیری گرمکن (موقعیت مکانی ورود حرارت)، تعیین جنس قسمت‌های مختلف موتور، تعیین گاز عملکردی سیستم و شرایط محیط آزمایش، اطلاعات مورد نیاز برنامه تکمیل می‌شود. در مرحله دوم با مشخص بودن دمای اولیه، در یک تحلیل فرکانسی، اولین فرکانس تشدید سیستم توسط کد محاسبه می‌شود. در این مرحله تمام المان‌های مدار الکتریکی محاسبه شده و برنامه وارد مرحله انجام یک تحلیل گذرا می‌شود که بسته به نتیجه‌ی این تحلیل، دو گزینه وجود خواهد داشت. فاز اول بیانگر روند شروع حل عددی برنامه تا لحظه‌ی تشخیص شروع نوسانات خودبه‌خودی است. در این مرحله مقدار حرارت ورودی به گونه‌ی اعمال می‌شود که در مدت زمان مورد نظر و یا کم‌تر از آن نوسانات خودبه‌خودی شروع شود، در غیر این صورت مقدار توان افزایش می‌یابد. فاز دوم برنامه، مربوط به نحوه‌ی کاهش توان ورودی برای برقرار کردن حالت نوسانات پایدار در سیستم است (مقدار توان مورد نیاز برای شروع نوسانات خودبه‌خودی بیشتر از مقدار توان مورد نیاز برای ایجاد حالت نوسانات پایدار است) و نهایتاً فاز سوم، مسیر مورد نظر برای ایجاد فرایند میرایی را در برنامه نوشته شده نمایش می‌دهد. در یک سیستم گرماسوتی، دو دمای بحرانی وجود دارد، دمای بحرانی بزرگتر دمای شروع می‌نامند، که هرگونه افزایش مقدار دما باعث تشدید دامنه فشار نوسانی شده و سیستم از حالت سکون به حالت نوسانات ناپایا منتقل می‌شود. از طرف دیگر، دمای بحرانی پایین‌تر، دمای میرایی نامیده می‌شود و هرگونه کاهش دما از این مقدار، باعث از بین رفتن نوسانات صوتی می‌شود. برای تغییرات دما میان دو دمای بحرانی بیان شده تعیین کننده نوع رفتار سیستم خواهد بود. در یک جهت با افزایش یکنواخت دما از مقداری کوچکتر از دمای بحرانی میرایی تا رسیدن به دمای شروع نوسانات، سیستم به حالت سکون باقی می‌ماند. در جهت معکوس، با کاهش یکنواخت دما از مقدار شروع، تا رسیدن به دمای میرایی، سیستم در حالت نوسانات پایا عمل خواهد کرد که به دلیل رفتار هیستریزیس^۶ سیستم اتفاق می‌افتد.

کد حل عددی به دو روش مختلف حل شد. در روش اول تنها بخش استک در حجم کنترل لحاظ شد و پس از محاسبه‌ی فرکانس تشدید سیستم از روش آنالوژی مدار الکتریکی، حل عددی مسئله به کمک معادلات ۱، ۲ و ۶ صورت پذیرفت. به طور کلی در روش اول در هر حلقه‌ی محاسبه‌ی پروفیل دما، بعد از به دست آمدن دما در طول استک، برای گام زمانی بعدی فشار و سرعت حجمی دوباره محاسبه



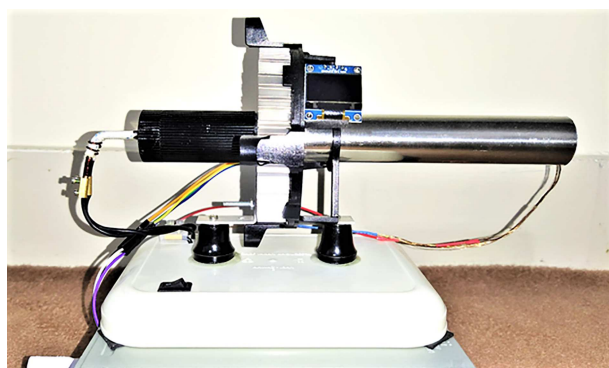
شکل ۳. شماتیک مدار الکتریکی برای موتور گرماسوتی با یک انتها باز.

پارامترهای محاسبه شده در بخش استک، هم از سایر بخش‌های موتور تأثیر می‌پذیرد و هم بر سایر قسمت‌ها اثر می‌گذارد. شکل ۳ شماتیک مدار رسم شده برای موتور گرماسوتی با یک انتهای باز را نمایش می‌دهد. در این حالت، بخش استک به تعداد ۸ المان تقسیم می‌شود. تعداد المان‌ها بر اساس محدودیت تعداد حسگرهای دمایی است که در استک موتور گرماسوتی نصب شده‌اند تا بتوان با اعمال محدودیت‌های دمایی در اندازه‌گیری‌های مداری، به حل پایا دقت بیشتری بخشید.

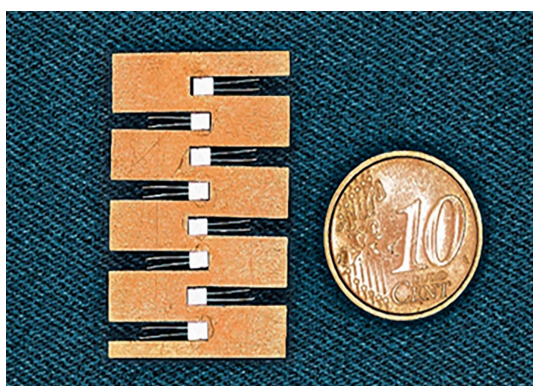
در هم‌تربایی مدار الکتریکی دو نوع تحلیل مد نظر است: الف) تحلیل حوزه‌ی فرکانس، ب) تحلیل حوزه‌ی زمان. تحلیل فرکانسی، پاسخ مدار به یک موج سینوسی در یک فرکانس یا مجموعه‌ی از فرکانس‌هاست. مشابه تحلیل جریان مستقیم، این تحلیل رفتار حالت پایای یک سیستم توصیف شده در یک گره ورودی در یک فرکانس تحریک را نشان می‌دهد. به کمک این نوع تحلیل می‌توان فرکانس‌هایی را که مدار طی آن دچار تشدید می‌شود، محاسبه کرد. تحلیل گذرای یک مدار نیز، همراه یک حل جریان مستقیم شروع شده تا نقطه‌ی جدایی شبیه‌سازی با رفتار متغیر با زمان تعیین شود. پس از این که حل جریان مستقیم مدار محاسبه شد، تغییرات

جدول ۲. مشخصات هندسی استک، ضرائب ترمودینامیکی و مقدار ثابت‌های مورد استفاده در حل عددی.

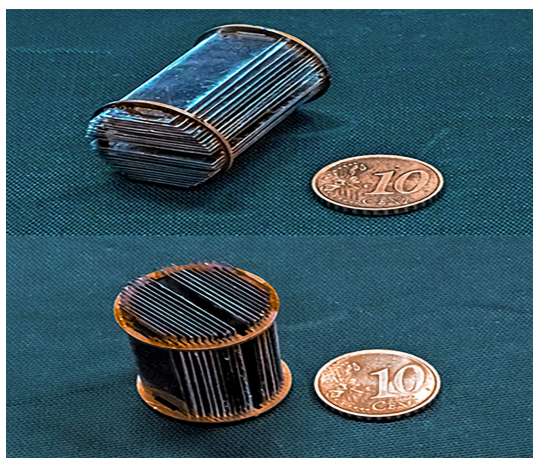
نام قطعه	مواد بکار رفته	ضخامت (mm)	شعاع (m)	طول (m)	درصد تخلخل
بازآوايشگر	لوله استیل ضد زنگ	۱	۰/۰۲۵	۰/۱۱۵	۱۰۰
مبدل حرارتی	آلومینیوم	-	۰/۰۹	۰/۰۲	-
استک	صفحات میکا $KAl_2(Si_3AlO_{10})(OH)_2$	۰/۲	۰/۰۲۴	۰/۰۳۵	۴۵
بخش گرم	آلومینیوم	۱	۰/۰۲۴	۰/۰۵	۱۰۰
گرمکن الکتریکی	سیم نیکل کروم	۰/۵	۰/۰۲۲	۰/۰۰۲	۶۰



شکل ۴. ساختار موتور گرم‌صوتی موج ایستا.



شکل ۵. نمایی از صفحه‌ی میانی استک و آرایش حسگرهای دما.



شکل ۶. دو نمای مختلف از استک با آرایش صفحات موازی از جنس میکا.

می شود 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 می‌کنند که تأثیر مستقیم بر دامنه فشار نوسانی و سرعت حجمی دارند. برای دقیق‌تر کردن فرایند حل و رفع این نارسایی، مدل جدیدی از حل عددی تلفیق شده با هم‌ترازی مدار الکتریکی اتخاذ شد. طی آن در هر حلقه حل عددی، متغیرهای موتور گرم‌صوتی با توجه به دما به‌روزرسانی می‌شود. در روش دوم با تعیین لیست المان‌های الکتریکی که با موتور گرم‌صوتی مشابه‌سازی شده بود، ابتدا یک آنالیز فرکانسی در دمای مرجع صورت گرفت که طی آن فرکانس تشدید سیستم محاسبه شد. همچنین در روش دوم علاوه بر سه معادله‌ی استفاده شده در روش اول، پارامترهای مدار الکتریکی هم‌ترا شده نیز نقش داشتند. در این حالت پس از هر بار محاسبه دما در هر گام زمانی، المان‌های مدار الکتریکی به‌روزرسانی می‌شدند. با ادغام مدار الکتریکی و روش حل عددی، علاوه بر استک، سایر بخش‌های موتور گرم‌صوتی نیز در فرایند حل وارد شوند. مزیت‌های اساسی استفاده از روش تلفیق حل عددی با حل مدار الکتریکی هم‌ترا شده با موتور گرم‌صوتی (روش دوم) را می‌توان چنین بیان کرد:

- تعیین زمان و دمای شروع نوسانات خودبه‌خودی در موتور گرم‌صوتی؛
- تعیین اختلاف دمای میان شروع نوسانات خودبه‌خودی و حالت نوسانات پایدار در سیستم؛
- تعیین زمان و دمای میرایی نوسانات خودبه‌خودی در موتور گرم‌صوتی.

۵. تجهیزات آزمایش تجربی

در شکل ۴ ساختار موتور گرم‌صوتی موج ایستا با یک انتهای باز که برای انجام آزمایشات این پروژه ساخته شده است را نمایش می‌دهد.

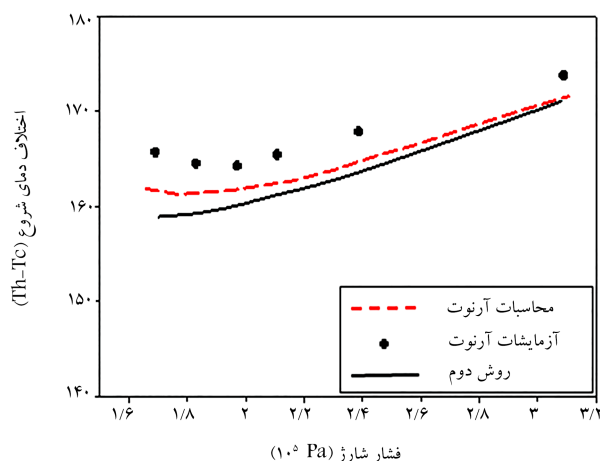
در جدول ۲ مشخصات هندسی و جنس مواد به‌کاررفته در بخش‌های مختلف موتور گرم‌صوتی شکل ۴ گردآوری شده است. در این نمونه موتور گرم‌صوتی از یک بخش استک با آرایش صفحات موازی استفاده شد. شکل ۵ آرایش حسگرهای قرار گرفته در صفحه میانی استک و شکل ۶ دو نمای متفاوت از استک موتور گرم‌صوتی مورد استفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد. هرچند آرایش حسگرها که در صفحه میانی استک قرار گرفته‌اند به فرمت نشان داده شده در شکل ۵ است، اما صفحه میانی با صفحه‌یی از جنس میکا جایگزین شد. در حالتی که صفحه میانی از جنس برنج بود، به دلیل بالا بودن ضریب هدایت حرارتی این فلز، جهت جریان انرژی در استک مختل می‌شد که جایگزین کردن ورقه میکا باعث کاهش این اثر شد.

۶. اعتبارسنجی مدل ارائه شده

در این بخش نمودار دمای شروع نوسانات خودبه‌خودی برای دستگاه گرماصوتی آرنت و نتایج به دست آمده برای دستگاه آرنت با استفاده از روش حل تلفیقی تشریح شده در بخش ۴، مقایسه می‌شود و میزان تفاوت موجود در نتایج، برای اعتبارسنجی روش حل تلفیقی، بررسی می‌شود. در یک نمونه موتور گرماصوتی موج ایستا با دو انتهای بسته و پر شده از گاز هلیوم که توسط آرنت و همکارانش مورد بررسی قرار گرفت، اختلاف دمای مورد نیاز برای شروع نوسانات خودبه‌خودی از روش تحلیلی و روش آزمون تجربی استخراج شد.^[۳۶] محاسبات برای محدوده‌ی فشارهای مختلف گاز محبوس در سیستم صورت پذیرفت. در شکل ۷ منحنی‌های دمای شروع نوسانات خودبه‌خودی برحسب فشار گاز موجود در سیستم ترسیم شده است. مقادیر دمای شروع نوسانات خودبه‌خودی برای آزمون‌های تجربی صورت گرفته توسط آرنت و همکارانش به همراه محاسبات تحلیلی آن‌ها، با مقادیر محاسبه شده توسط روش ارتقا یافته (روش دوم) در شکل ۷ ارائه شده است.

برای محاسبه‌ی دمای شروع نوسانات خودبه‌خودی سیستم ارائه شده توسط آرنت، ابتدا هم‌ترازی مدار الکتریکی متناظر با دستگاه صورت پذیرفت، سپس به کمک حل ترکیبی مدار الکتریکی و حل عددی معادلات گرماصوتی (روش دوم)، دمای شروع نوسانات خودبه‌خودی در لحظه‌ی تشدید دامنه‌ی نوسانی فشار در سیستم، برای چند فشار شارژ مختلف محاسبه شد. می‌توان مشاهده کرد که منحنی حاصل از روش دوم، برای مقادیر فشارهای شارژ مختلف، نزدیک به مقادیر محاسبه شده و آزمون‌های تجربی حاصل از دستگاه آرنت و همکارانش است و مقدار خطای موجود میان روش دوم و مقادیر تجربی، کم‌تر از ۵٪ محاسبه شد. بنابراین، می‌توان در نظر گرفت که نتیجه به دست آمده از روش دوم با مقادیر آزمون تجربی آرنت مطابقت خوبی دارد و نتایج حاصل از روش دوم منطقی است.

اغتشاش موجود در گاز عملکردی سیستم یکی از پارامترهای مهم در شروع نوسانات خودبه‌خودی است و فشار گاز سیستم تأثیر مستقیم بر تولید اغتشاش در گاز را دارد. به علاوه، چنان که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، فشار گاز سیستم با اختلاف دمای مورد نیاز برای شروع نوسانات خودبه‌خودی رابطه‌ی غیرخطی دارد. به تعبیر فیزیکی تغییر فشار گاز سیستم می‌تواند بر تولید اغتشاش در گاز عملکردی



شکل ۷. نمودار دمای شروع نوسانات خودبه‌خودی برحسب فشار محیط (فشار شارژ گاز) خط پیوسته نمایشگر نتایج حاصل از اعمال روش ارتقا یافته برای ساختار گرماصوتی آرنت است.^[۳۶]

سیستم تأثیرگذار و باعث کاهش یا افزایش دمای شروع نوسانات خودبه‌خودی و تغییر راندمان موتور گرماصوتی شود.

۷. نتایج و بحث

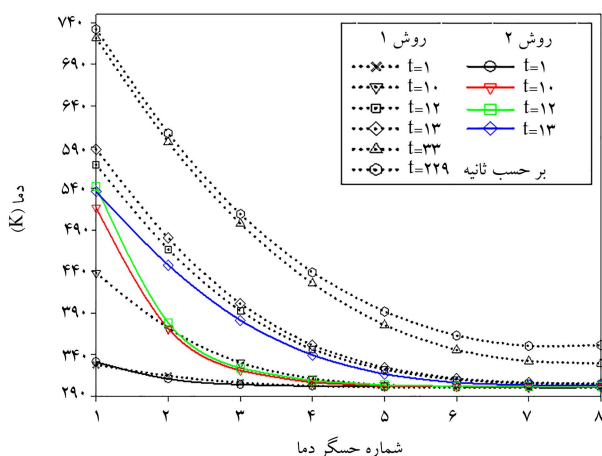
در این بخش منحنی‌های دما از دو روش حل عددی و یک روش تجربی گردآوری شده است که در طول مراحل شروع و میرایی نوسانات ثبت شده است.

۱.۷. پروفیل دمای استک در مرحله‌ی شروع نوسانات

فاز اول دربرگیرنده‌ی زمان اتصال جریان برق تا لحظه‌ی شروع نوسانات خودبه‌خودی در موتور گرماصوتی است. در کدهای حل عددی این فاز مربوط به لحظه‌ی شروع به حل تا زمان تشدید دامنه‌ی فشار نوسانی است. تفاوت موجود میان حل عددی و آزمون تجربی موتور گرماصوتی، در مدت زمانی است که گرمکن به دمای بحرانی (دمای شروع فرایند نوسانات خود به خودی) برسد. در آزمون تجربی با متصل کردن جریان برق، مدتی طول می‌کشد تا دمای گرمکن افزایش یابد و به حد نهایی خود برسد.

در روش اول، مقدار المان‌های مدار الکتریکی هم‌ترا شده با موتور گرماصوتی موج ایستا ثابت فرض شد. در این حالت، نمودارهای فرایند شروع به کار سیستم با حل عددی معادله‌ی ۶ برای ۲۲۹ ثانیه حل شد (تا برقراری تعادل حرارتی). شکل ۸ منحنی‌های دما در ۸ نقطه با فاصله‌ی یکسان از هم، در طول استک و برای ۸ زمان مختلف را نمایش می‌دهد (منحنی‌های نقطه‌چین). با توجه به شکل ۸، پس از گذشت تقریبی ۳۳ ثانیه از شروع به کار موتور گرماصوتی، تعادل حرارتی موتور با محیط اتفاق افتاده و در لحظات بعدی نقاط انتهایی شروع به افزایش دما کرده‌اند و منحنی لحظه‌ی ۲۲۹ ثانیه حد نهایی دمای اندازه‌گیری شده در مقاطع هشتگانه‌ی استک را نمایش می‌دهد. در روش اول تنها معادلات در قسمت استک موتور گرماصوتی حل شد. در شکل ۸ حسگر ۱ نزدیک‌ترین حسگر به گرمکن موتور گرماصوتی است و نمودارها تا زمان برقراری تعادل حرارتی ادامه یافته است.

منحنی‌های دما در شکل ۸ در حالتی اندازه‌گیری شده‌اند که یک توان حرارتی ۶۳ وات در طول حل عددی در ورودی استک (به دلیل وجود گرمکن) تا رسیدن به تعادل حرارتی اعمال شده است. این توان حرارتی برابر با توان الکتریکی مصرف شده



شکل ۸. منحنی‌های دمای محاسبه شده توسط روش اول (نقطه‌چین) و روش دوم (خطوط ممتد رنگی) پیش از ورود به حالت نوسانات پایا.

دامنه‌ی فشار نوسانی و دبی حجمی نوسانی در هر گره از مدار شبیه‌سازی شده برای موتور گرماسوتی این پژوهش وجود دارد. گرچه اندازه‌ی دامنه نوسانی فشار و سرعت حجمی در طول فرایند شروع نوسانات خودبه‌خودی متفاوت بود اما فرکانس نوسان یکسان داشتند و در یک زمان مشخص با اختلاف فاز ۸۵ تا ۹۰ درجه زمان شروع فرایند نوسانات خودبه‌خودی را پیش‌بینی کردند.

۲.۷. پروفیل دمای استک در مرحله‌ی میرایی نوسانات

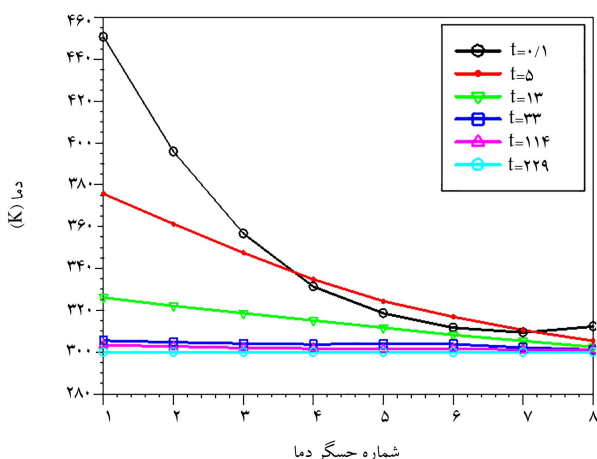
در عمل، رژیم خاموشی درست بعد از قطع جریان برق در موتور گرماسوتی اتفاق می‌افتد. این اتفاق در شبیه‌سازی عددی با حذف توان حرارتی ورودی به سیستم و اعمال فشار و سرعت حجمی نوسانی حالت پایا در شروع فرایند آغاز می‌شود و تا لحظه‌ی رسیدن به دمای مرجع ادامه می‌یابد. در این بخش پروفیل دما در طول استک با استفاده از دو روش حل عددی ارائه می‌شود. در روش اول، پروفیل دما و خواص ترمودینامیکی گاز در حالت نوسانات پایا، شرایط اولیه را در رژیم خاموشی تعیین می‌کنند. با انجام محاسبات به کمک روش اول، منحنی‌های شکل ۱۰ حاصل شد.

در شکل ۱۰ در لحظات اولیه رژیم خاموشی، یک افزایش دمای پنج درجه‌یی بین نقاط ۴ تا ۷ مشاهده می‌شود. اندکی پس از ورود به رژیم خاموشی، نوسانات خودبه‌خودی گاز در سیستم متوقف شده و جریان همرفتی به تدریج از بین می‌رود. در این حالت با ساکن شدن گاز در سیستم، ترم انتقال حرارت به محیط که از طریق انتقال حرارت میان سطح صفحات استک و گاز صورت می‌گرفت، کاهش یافته و افزایش دمای جزئی در نقاط ۴ تا ۷ را در بر داشته است. پروفیل دما از ثانیه ۱۳ام به بعد به صورت خطی است که طی آن تمامی نقاط تا لحظه‌ی رسیدن به دمای مرجع، با نرخ ثابت دچار کاهش دما می‌شوند. در این بازه، انتقال حرارت هدایتی از گاز داخل سیستم به صفحات استک و در نهایت به محیط، نقش اصلی را در کاهش دمای سیستم ایفا می‌کند. در روش اول، سیستم از حالت تعادل حرارتی وارد رژیم میرایی نوسانات خودبه‌خودی می‌شود. این در حالی است که در روش دوم، پس از این که شروع نوسانات خودبه‌خودی در سیستم تشخیص داده شد، توان حرارتی ورودی کاهش یافته و تا لحظه‌ی همگرایی دامنه‌ی فشار نوسانی، تغییرات فشار نوسانی توسط یک تحلیلگر مداری بررسی می‌شود. پس از همگرایی دامنه‌ی فشار نوسانی سیستم وارد رژیم میرایی نوسانات می‌شود. هرچند نحوه‌ی ورود این دو

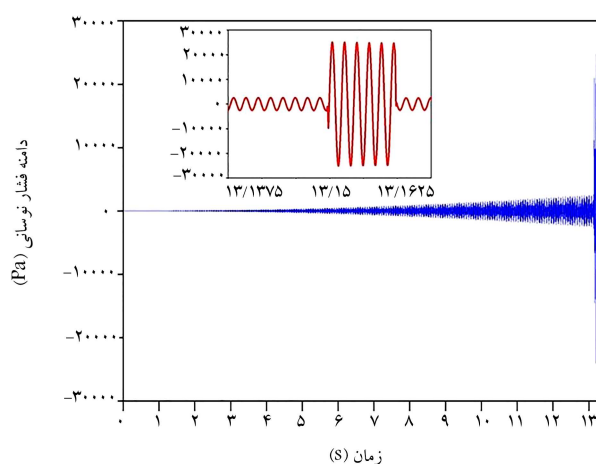
توسط گرمکن است. همچنین فشار نوسانی در ابتدای فرایند حل در بازه نوسانات با دامنه کم^۷ در نظر گرفته شد. همچنین شکل ۸ منحنی تغییرات دما در طول استک را برای ۶ لحظه‌ی مختلف تا زمان شروع نوسانات خود تقویت شونده برای روش حل دوم نمایش می‌دهد (منحنی‌های رنگی). در این روش، با تغییر دما در طول استک، دمای سایر اجزای سیستم نیز به‌روزرسانی شد. در این حالت، تغییرات دما منجر به تغییر مقدار المان‌های الکتریکی مدار هم‌ترا شده با موتور گرماسوتی شد که در گام بعدی حل تأثیر مستقیم داشت. با مقایسه‌ی منحنی‌های دمای هر دو روش ارائه شده در شکل ۸ اثر اعمال تغییرات دما بر المان‌های الکتریکی مدار هم‌ترا شده مشخص می‌شود. کاهش دما در لحظه‌ی شروع نوسانات خود تقویت شونده (ثانیه‌ی ۱۳) در روش دوم به نسبت منحنی دما در ثانیه ۱۳ در روش اول، بیانگر تأثیر دما بر المان‌های الکتریکی مدل شده و تأثیر متقابل آن‌ها بر دما در گام بعدی است. به تعبیر فیزیکی، با اعمال تغییر دما در طول استک، مقادیر مقاومت لژی، مقاومت آسایش حرارتی، تراکم پذیری و ایزرسی گاز دچار تغییر شده و فشار و سرعت حجمی به دست آمده در این گام زمانی، روی متغیرهای محاسبه‌ی پروفیل دمای گام زمانی بعدی اثر می‌گذارد و این اتفاق روند حل مسئله را واقعی‌تر می‌کند.

تفاوت موجود در نمودارهای روش اول و دوم در جهش صورت گرفته در بازه زمانی ۱۲ تا ۱۳ ثانیه نمایان می‌شود. این اختلاف به دلیل شروع نوسانات خودبه‌خودی در سیستم است که باعث تقویت جریان همرفتی سیال در استک می‌شود و به همین دلیل، تغییر دما در نقاط بعدی محسوس‌تر می‌شود. در روش دوم تا قبل از شروع نوسانات خودبه‌خودی، بخش اصلی انتقال حرارت به دلیل هدایت حرارتی و تشعشع حرارتی در حجم کنترل صورت می‌گرفت. اما پس از شروع نوسانات خودبه‌خودی، جریان همرفتی تقویت شده و منجر به افزایش دمای حسگرهای نصب شده در نیمه دوم استک شد. همچنین با توجه به نمودار شکل ۸ روش دوم، نقاط انتهایی استک (نقاط ۴ تا ۸ نمودار) تا زمان شروع نوسانات خودبه‌خودی تغییرات دمایی کمی را احساس می‌کنند.

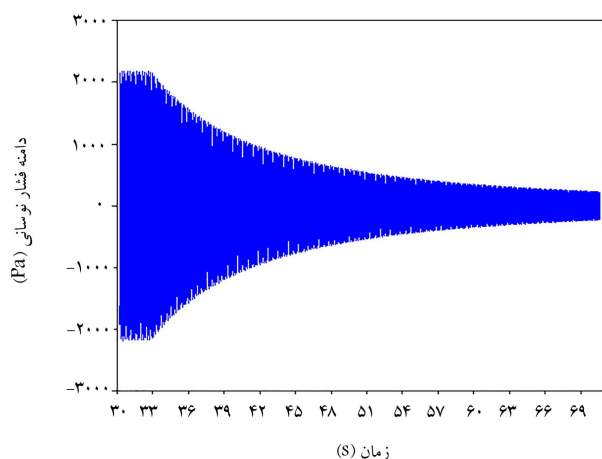
در شکل ۹ دامنه‌ی فشار نوسانی گاز، قبل و اندکی بعد از شروع نوسانات خودبه‌خودی نمایش داده شده است که به کمک تحلیلگر مداری، تغییرات ناگهانی دامنه فشار نوسانی را تشخیص داده و زمان شروع نوسانات خودبه‌خودی را ثبت می‌کند. بخش بزرگنمایی شده در شکل ۹ به خوبی نمایانگر تغییرات صورت گرفته در لحظه‌ی شروع نوسانات خودبه‌خودی در سیستم است. در روش دوم، امکان تحلیل



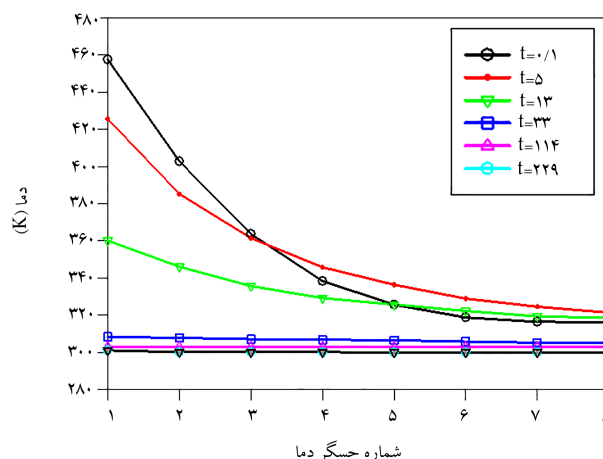
شکل ۱۰. منحنی‌های دما برای ۶ لحظه‌ی مختلف در مرحله‌ی میرایی نوسانات خودبه‌خودی. زمان‌های ثبت شده برحسب ثانیه است (روش اول).



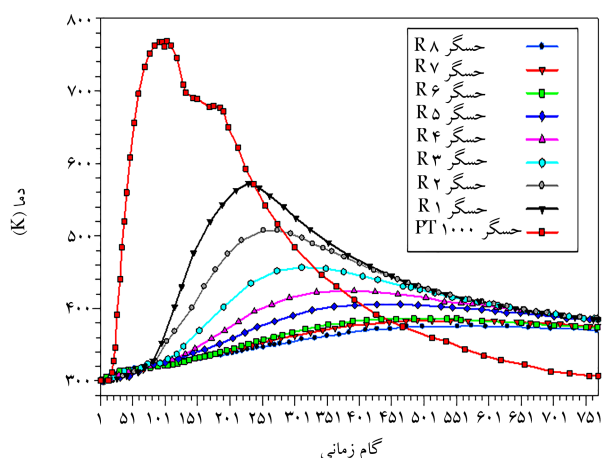
شکل ۹. دامنه‌ی فشار نوسانی در لحظات قبل و اندکی بعد از شروع نوسانات خودبه‌خودی.



شکل ۱۲. دامنه‌ی فشار نوسانی در مرحله‌ی میرایی نوسانات خودبه‌خودی.



شکل ۱۱. منحنی‌های دما در مرحله‌ی میرایی نوسانات (روش دوم).



شکل ۱۳. دمای اندازه‌گیری شده توسط حسگرهای ۱ تا ۸ ($PT 1000$) و حسگر مجاور گرمکن ($PT 1000$) در طول فرایند عملکردی سیستم.

ورودی استک افزایش می‌یابد در این حالت مقدار جریان $6/3$ آمپر ولتاژ 10 ولت اندازه‌گیری شد. همچنین مقدار شدت صوت تولیدی اندازه‌گیری شده در لحظه‌ی شروع نوسانات خودبه‌خودی برابر با 8 دسی بل بود.

بعد از شروع نوسانات، با کاهش توان ورودی تا مقدار 35 درصد توان ورودی اولیه، تولید صوت همچنان ادامه داشت. این در حالی بود که هرگونه کاهش بیشتر توان، منجر به قطع تولید صوت شد. نحوه‌ی تغییرات دمای استک و گرمکن در طول انجام آزمایش، اندازه‌گیری شد که طی آن تغییرات دمایی که 8 حسگر تعبیه شده در طول استک اندازه‌گیری کردند، در شکل ۱۳ نمایش داده شده است. به ترتیب شمارش، نزدیک‌ترین حسگر به گرمکن $R1$ و دورترین حسگر $R8$ است. همچنین به کمک یک حسگر $PT 1000$ نوع K دمای دقیق گرمکن در طول انجام آزمایش اندازه‌گیری شد که در شکل ۱۳ با منحنی قرمز رنگ نمایش داده شده است. منحنی دمای حسگر نصب شده در موقعیت گرمکن در شکل ۱۳ دمای دقیق گرمکن را در طول تمام مراحل آزمایش نمایش می‌دهد. با توجه به شکل ۱۳ دمای حسگر $R1$ حتی تا بعد از ورود به مرحله‌ی خاموشی نیز روبه افزایش است.

در ثانیه‌ی ۳۷ سیستم به حالت تشدید درآمده و هم‌زمان توان ورودی کاهش می‌یابد (کاهش توان ورودی، کاهش دامنه‌ی فشار نوسانی را در پی داشته و باعث همگرایی دامنه‌ی نوسانی فشار و در نتیجه رسیدن به حالت نوسانات پایا می‌شود) تا

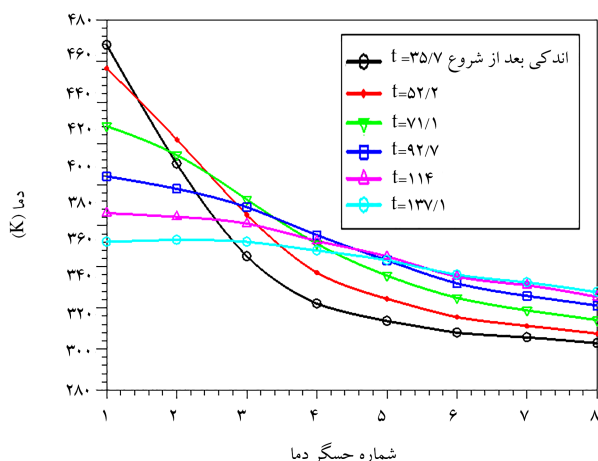
روش به رژیم میرایی متفاوت است، اما رفتارهای مشابهی از خود نشان دادند. در روش دوم حل دقیق‌ترین‌گونه حاصل شد که در هرگام زمانی، با محاسبه‌ی تغییرات دمایی، مقدار المان‌های الکتریکی مدار الکتریکی هم‌ترا شده نیز به‌روزرسانی شد. با اعمال شرایط بیان شده برای حالت تلفیق مدار الکتریکی و حل عددی (روش دوم)، منحنی‌های دما در طول فرایند خاموشی به‌صورت شکل ۱۱ خواهد بود. در حالتی که با تغییر دما، مقدار المان‌های الکتریکی هم‌ترا شده با موتور گرم‌صوتی نیز به‌روزرسانی گردند، پس از گذشت مدت زمان کوتاهی، دما در طول استک به مقدار متعادلی می‌رسد. در این حالت تمام نقاط استک به صورت هم‌زمان دچار کاهش دما می‌شوند.

به عبارت دیگر در ثانیه‌های اولیه رژیم خاموشی همچنان ترم پمپاژ گرم‌صوتی به عنوان ترم غالب متقبل‌کننده‌ی انرژی عمل می‌کند اما با گذشت زمان، تأثیر این ترم کاهش یافته و ترم انتقال حرارت هدایتی به عنوان ترم غالب، تا زمان رسیدن به دمای مرجع عمل می‌کند. بعد از ورود به مرحله‌ی خاموشی، جریان همرفتی کاهش یافته و منجر به افزایش دما در حسگرهای نیمه دوم استک می‌شود. به‌طور کلی منحنی‌های دما در شکل ۱۰ و شکل ۱۱ با اختلاف اندکی به صورت یکسان رفتار کردند اما نکته‌ی مورد توجه در این دو شکل مربوط به منحنی دما در ثانیه اول رژیم خاموشی است. در شکل ۱۰ رژیم خاموشی بعد از فعالیت چند دقیقه‌ی سیستم در حالت نوسانات پایا اتفاق افتاده است در حالی که در شکل ۱۱ منحنی دما بعد از چند ثانیه عملکرد در مرحله‌ی نوسانات پایا وارد رژیم خاموشی شده است. از آنجا که در روش دوم فاصله‌ی رژیم شروع نوسانات خودبه‌خودی و رژیم خاموشی کوتاه تر است، لذا مقادیر دما در لحظه‌ی ورود به مرحله‌ی خاموشی برای روش دوم، نسبت به همین حالت در روش اول بیشتر است.

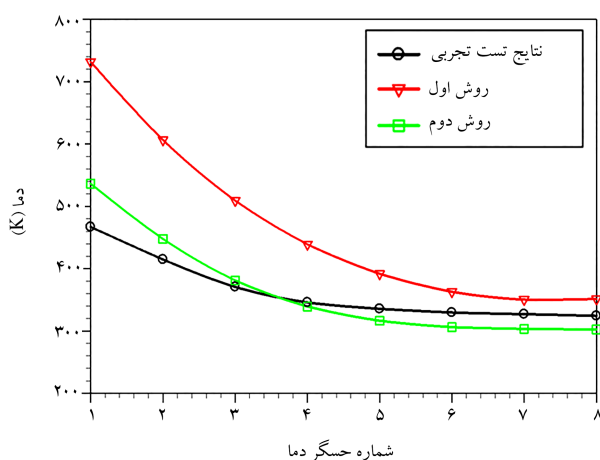
همچنین در شکل ۱۲ روند تغییرات دامنه فشار نوسانی نمایش داده شده است که به محض قطع شدن توان حرارتی ورودی به استک، دامنه فشار نوسانی نیز روند کاهش را در پیش می‌گیرد. شروع فرایند خاموشی از ثانیه ۳۳، با حذف توان ورودی اتفاق افتاد.

۳.۷. نتایج تجربی

هر آزمون در مدت زمان تقریبی ۲۶۰ ثانیه انجام شد و در هر ثانیه ۳ بار دمای حسگرها ثبت شد. با اتصال جریان برق، گرمکن شروع به گداخته شدن کرده و دما در



شکل ۱۵. مقادیر دمای اندازه‌گیری شده در طول استک برای مرحله‌ی میرایی نوسانات خودبه‌خودی.

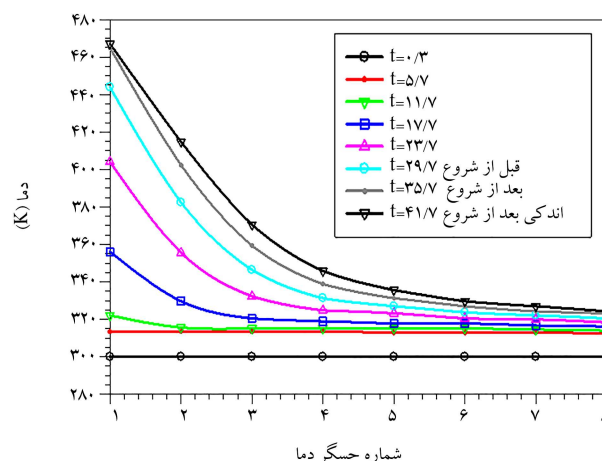


شکل ۱۶. منحنی دما در طول استک برای دو روش حل عددی و مقادیر آزمایش تجربی (مرحله‌ی شروع نوسانات خودبه‌خودی).

۴.۷. مقایسه نتایج

در شکل ۱۶ منحنی تغییرات دما برای دو روش حل عددی و مقادیر اندازه‌گیری شده توسط حسگرهای دما در طول آزمایش نشان داده شده است. نمودار شکل ۱۶ میزان تطابق دمای اندازه‌گیری شده در حالت تجربی و مقدار محاسبه شده توسط دو روش بیان شده را برای بازه شروع نوسانات خودبه‌خودی نمایش می‌دهد. مقادیر ارائه شده، میانگین دمای اندازه‌گیری شده در مجموع آزمون‌های انجام شده توسط هر حسگر در لحظه‌ی شروع نوسانات خودبه‌خودی است.

باتوجه به شکل ۱۶ مطابقت خوبی میان روند تغییرات دما اندازه‌گیری شده به روش تجربی و دو روش حل عددی دیگر در نیمه انتهایی استک دیده می‌شود. در نیمه نخست استک هرچند داده‌های روش تلفیقی دارای اختلاف اندکی با مقادیر مربوط به حسگرها در روش تجربی هستند، اما هرچه به ابتدای استک (نقطه‌ی R_1) نزدیک می‌شویم، این اختلاف افزایش می‌یابد. علت وجود این تفاوت در موقعیت نیمه‌ی نخست استک، به دلیل وجود فاصله دو میلی‌متری حسگر اول با المنت گرمکن و تأخیر زمانی در برقراری تعادل حرارتی میان حسگر و المنت گرمکن است. تعادل حرارتی زمانی ایجاد می‌شود که سیستم مدت زمان مشخصی را در دمای معین گرمکن بگذرانند یا به عبارت دیگر دمای گرمکن و حسگر دقیقاً یکسان باشد.

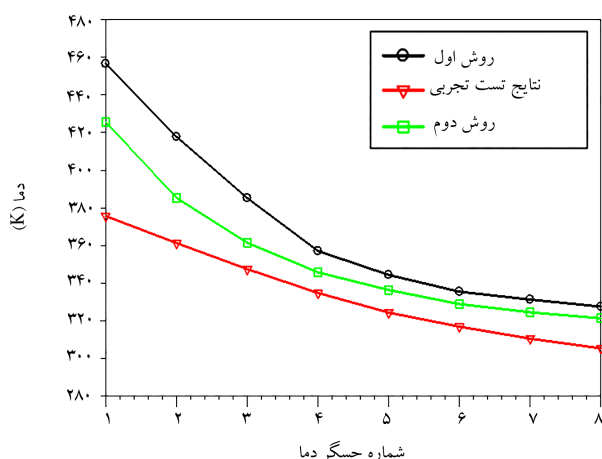


شکل ۱۴. مقادیر دمای اندازه‌گیری شده در طول استک برای لحظات قبل و اندکی بعد از شروع نوسانات خودبه‌خودی. زمان‌ها برحسب ثانیه است.

سیستم برای مدتی (حدوداً ۲۰ ثانیه) در حالت نوسانات پایدار فعالیت کند و سپس جریان برق در سیستم قطع شده و دمای استک در طول فرایند میرایی اندازه‌گیری می‌شود. فرایند میرایی نوسانات از لحظه قطع جریان برق شروع شده و تا زمانی که اختلاف دمای دو طرف استک به زیر حد بحرانی^۸ برسد ادامه دارد درحالی که بعد از قطع جریان برق در سیستم، تولید صوت هفت ثانیه ادامه داشت (تا ثانیه‌ی ۶۰). هنگامی که صوت بلند و یکنواختی تولید شد، توان ورودی سیستم توسط اپراتور کاهش یافت. در این حالت حسگر مجاور گرمکن بیشترین دما را ثبت کرد درحالی که دمای ابتدای استک به مقدار بیشینه‌ی خود نرسیده است و این نکته پایین بودن ضریب هدایت حرارتی صفحات میکا قرارگرفته در طول استک را بیان می‌کند.

شکل ۱۴ نمودار شیب دمای اندازه‌گیری شده در استک در ۸ زمان متفاوت را نمایش می‌دهد. در شکل ۱۴ دمای مجموعه حسگرها در یک زمان معین، در کنار یک دیگر شیب دمایی در طول استک را مشخص می‌کند و پروفیل دمایی مربوط به لحظات قبل و اندکی بعد از شروع نوسانات خودبه‌خودی در سیستم نمایش داده شده است. همچنین شیب دمایی در طول استک در ۶ زمان متفاوت ثبت شد و در شکل ۱۵ ارائه شده است این لحظات مربوط به اندکی بعد از شروع نوسانات خودبه‌خودی تا محدوده خاموشی سیستم است.

تعداد ۱۰ آزمون برای اطمینان از صحت داده‌های دریافتی حسگرها و بررسی تکرارپذیری آزمایش‌ها انجام شد. مدت زمان انجام آزمایش می‌بایست به اندازه‌ی باشد که تأثیر متغیرهایی که در آزمایش وجود دارند، به خوبی نمایان شود. آزمون‌ها برای مدت زمان تقریبی ۲۶۰ ثانیه صورت گرفت و در نهایت، حاصل میانگین داده‌های دریافتی استخراج شد. بیشترین مقدار انحراف معیار در دمای اندازه‌گیری شده در طول انجام ۱۰ آزمون متوالی و در طول استک، برابر ۸/۷ کلوین اندازه‌گیری شد. در بازه شروع فرایند نوسانات خودبه‌خودی تا رسیدن به حالت نوسانات پایا، میزان اغتشاشات موجود در گاز افزایش می‌یابد (به دلیل تغییرات زیاد دامنه‌ی فشار نوسانی) و متأثر از آن، دمای نقاط مختلف دچار تغییرات با سرعتی بالاتر از نرخ اندازه‌گیری حسگرهای دمای تعبیه شده در قسمت استک می‌شود. لذا مقادیر انحراف معیار دمای اندازه‌گیری شده، با افزایش دما و در بازه شروع و پایداری نوسانات خودبه‌خودی بیشترین مقادیر را به خود اختصاص دادند.



شکل ۱۷. منحنی دمای استک برای دو روش حل عددی و مقادیر آزمایش تجربی (۵ ثانیه پس از شروع مرحله‌ی میرایی نوسانات).

و باعث کاهش دما در نیمه‌ی دوم استک می‌شود، کاهش یافته است. این اثر منجر به افزایش دما در حسگرهای قرارگرفته در نیمه‌ی انتهایی استک می‌شود. همچنین در رژیم خاموشی، اهمیت هدایت حرارتی افزایش یافته و تأثیر انتقال انرژی به کمک امواج صوتی کاهش می‌یابد. این اثر با شدت کم‌تری برای حل عددی روش اول در شکل ۱۷ دیده می‌شود که بدون تأثیر دما در المان‌های الکتریکی هم‌تراز شده است. اما در روش تلفیقی که در شکل ۱۷ نمایش داده شده است، رفتاری مشابه آنچه توسط حسگرهای دما در آزمایش‌ها ثبت شده، مشاهده می‌شود. بعد از گذشت چند ثانیه از ورود به مرحله‌ی خاموشی، روند کاهشی دما بسیار کند می‌شود و در این حالت تمام حسگرها به تعادل حرارتی رسیده‌اند و هم زمان با یکدیگر دچار کاهش دما تا رسیدن به دمای مرجع می‌شوند. با از بین رفتن نوسانات صوتی در سیستم، جریان همرفتی که در موتور ایجاد شده بود به شدت تضعیف می‌شود. در این حالت تنها عامل انتقال حرارت به محیط، از طریق هدایت حرارتی میان اجزای سیستم و گاز ساکن اطراف سیستم صورت می‌پذیرد. نکته‌ی مورد توجه دیگر مدت زمانی است که سیستم به دمای مرجع می‌رسد. مدت زمان رسیدن سیستم به دمای مرجع برای منحنی‌های دما مربوط به آزمون تجربی نسبت به دو روش حل عددی ارائه شده بیشتر است.

حسگر R_1 نزدیک‌ترین حسگر اندازه‌گیری دما به المنت گرمکن در آزمون تجربی بود. همچنین در روش حل عددی، محل ورود توان حرارتی (منبع جریان وابسته در مدار الکتریکی، ورودی به گره ۱) در نظر گرفته شد. به همین جهت، تغییرات دما در موقعیت مربوط به حسگر اول برای هر سه مرحله‌ی ذکر شده مورد بررسی قرارگرفت (شکل ۱۷).

مقدار این تغییرات برای موقعیت المان‌های بعدی کم‌تر از مقادیر ثبت شده در موقعیت حسگر شماره ۱ در روش‌های حل عددی است. در شکل ۱۸ رفتار ثبت شده از تغییرات دما در موقعیت R_1 برای هر دو روش حل عددی مشابه است. در روش اول قابلیت تشخیص لحظه‌ی شروع نوسانات خود به خودی وجود نداشت و برنامه تا زمان ایجاد تعادل حرارتی ادامه می‌یافت لذا برای مقایسه تغییرات دما ثبت شده در مرحله‌ی شروع نوسانات خود به خودی برای روش اول، این تغییرات تا ثانیه ۱۳/۱ در نظر گرفته شد. شیب تغییرات دما در هر دو روش برای مرحله‌ی شروع نوسانات خودبه‌خودی کاملاً مشابه است اما روش اول دمای بالاتری را در مرحله‌ی

در طی فرایند آزمایش، بعد از شروع نوسانات خود تقویت شونده، توان ورودی توسط اپراتور کاهش یافت که در این حالت، دامنه فشار نوسانی از حالت واگرا به حالت پایا رسید.

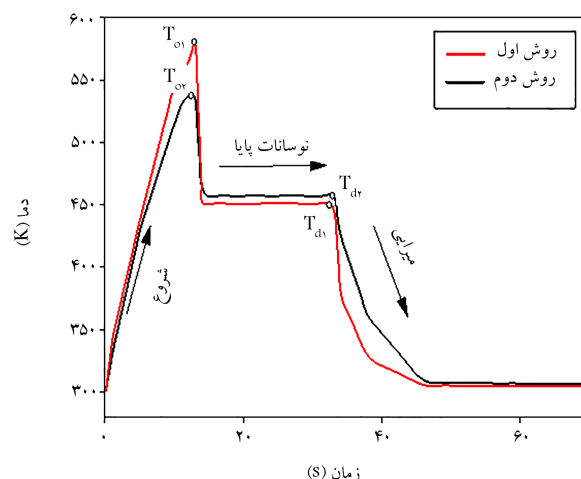
سیستم برای شروع نوسانات به توان بیشتری نیاز دارد و در صورتی که بعد از رسیدن به حالت شروع نوسانات خود تقویت شونده، توان سیستم توسط اپراتور کاهش نیابد، فرکانس نوسانات افزایش یافته و سیستم در دمای بالاتری به تعادل خواهد رسید. این در حالی است که ایجاد نوسانات خود به خودی و عملکرد دستگاه در دمای پایین‌تر همواره مدنظر است. اگر دستگاه با توانی که در حالت نوسانات پایا اعمال شد شروع به کار کند، هیچ‌گاه نوسانات خودبه‌خودی در سیستم شروع نمی‌شود. در موتورهای گرم‌صوتی با یک مبدل در سمت گرم، به دلیل کاهش لحظه‌ی اختلاف دمای دو طرف استک، فرصت کافی برای ایجاد تعادل حرارتی در هر مرحله از آزمایش (مرحله‌ی شروع، پایداری و خاموشی) وجود ندارد. ذکر این نکته بسیار قابل توجه است که به دلیل وجود فاصله یک میلی‌متری میان لبه‌ی صفحات استک و لوله‌ی استیل (ضخامت نگهدارنده‌ی صفحات استک)، میزان انتقال حرارت از صفحات به محیط، نسبت به حالت حل عددی کم‌تر است و در طول انجام آزمایش منجر به افزایش دما در استک می‌شود. این موضوع از مقایسه‌ی منحنی‌های دمای رسم شده برای روش دوم و آزمون تجربی در شکل ۱۶ برای حسگرهای انتهای استک کاملاً مشخص است.

به‌طور کلی روش تلفیقی مطابقت مناسبی را با داده‌های آزمون تجربی نشان داد. در میانگین آزمون‌های تجربی انجام شده، زمان اندازه‌گیری شده برای شروع نوسانات خودبه‌خودی ۳۷ ثانیه اندازه‌گیری شد. با توجه به این که مقدار توان ورودی اندازه‌گیری شده در آزمون تجربی به دلیل وجود تلفات فرعی، دقیقاً برابر با همان مقدار توان اعمال شده به حل عددی نیست و همچنین مدت زمان مشخصی طول می‌کشد تا المنت گرمکن به دمای آستانه‌ی شروع نوسانات برسد، همه‌ی این موارد منجر به وجود اختلاف میان زمان اندازه‌گیری شده در آزمون‌های 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 معادلات اثر می‌کند. به عبارت دیگر در آزمایش‌های تجربی دمای گرمکن یک شیب خطی را از دمای مرجع تا رسیدن به مقدار بیشینه، برحسب زمان طی می‌کند و این اتفاق در میانگین آزمون‌ها ۲۲ ثانیه طول می‌کشد که منجر به افزایش زمان شروع نوسانات خودبه‌خودی می‌شود. مدت زمان لازم برای شروع فرایند نوسانات خودبه‌خودی در حل عددی به روش تلفیقی ۱۳/۱ ثانیه اندازه‌گیری شد که با احتساب مدت زمانی که طول می‌کشد تا گرمکن به دمای مشخص برسد، مطابقت خوبی با زمان اندازه‌گیری شده در آزمون‌های تجربی دارد.

مرحله‌ی سوم ورود به ناحیه‌ی خاموشی سیستم است که در شکل ۱۰ و شکل ۱۱ منحنی‌های دمای حاصل از روش‌های حل عددی اول و دوم و در شکل ۱۳ منحنی‌های دما برای آزمون تجربی نمایش داده شده است. شکل ۱۷ مقایسه‌ی این شکل‌های ۱۰، ۱۱ و ۱۳ است که تغییرات دما در مرحله‌ی خاموشی را نمایش می‌دهد. با توجه به شکل ۱۷ روند کاهش دما در طول استک برای دو روش حل عددی و نتایج آزمون تجربی، برای ثانیه ۵ام ورود به مرحله‌ی خاموشی نشان داده شده است. در آزمایش‌های تجربی با ورود به مرحله‌ی خاموشی، دمای گزارش شده توسط حسگرها کاهش می‌یابد، اما با توجه به کاهش شدت نوسانات صوتی در سیستم، بخشی از انرژی که به صورت توان صوتی از سیستم خارج

پژوهش پیش رو با رویکرد ارتقا روش حل عددی معادلات گرماصوتی و ساخت صورت گرفت که طی آن نتایج کلی ذیل حاصل گشت:

- ارائه روش تلفیقی حل عددی و همترایی مدار الکتریکی برای یک موتور گرماصوتی موج ایستا با یک انتهای بسته که با دقت مناسبی بر نتایج آزمون های تجربی مطابقت داشت؛
- محاسبه ی زمان تقریبی شروع فرایند نوسانات خود به خودی در یک موتور گرماصوتی به کمک روش ارائه شده. این مقدار برای روش حل تلفیقی ۱۳/۱ ثانیه اندازه گیری شد؛
- اندازه گیری شیب دما در طول استک موتور گرماصوتی موج ایستا به کمک دو روش حل عددی ارتقا یافته. پروفیل دمای ثبت شده در طول استک برای روش دوم، مطابقت بیشتری را با نتایج حل عددی نشان داد؛
- بررسی عددی تفاوت میان شرایط فرایند شروع و میرایی نوسانات در سیستم که با تحلیل دامنه ی فشار نوسانی در روش دوم مشخص شد. در این حالت شروع نوسانات پروفیل دمای اندازه گیری شده در طول استک با پروفیل دما در لحظه ی حذف توان حرارتی ورودی به سیستم که درست در انتهای حالت نوسانات پایا اندازه گیری شد، نشان دهنده ی وجود اختلاف دما میان فرایند شروع و میرایی در موتور گرماصوتی موج ایستا مدل شده بود؛
- مقدار توان حرارتی ورودی به موتور گرماصوتی برای شروع نوسانات خود به خودی وابسته به جنس ماده مورد استفاده در استک است؛
- در یک توان حرارتی ورودی یکسان، استفاده از ورقه های میکا به جای ورقه های آهن گالوانیزه در استک موتور گرماصوتی، زمان شروع نوسانات خود به خودی را کاهش می دهد؛
- هرچه میزان رسانش حرارتی ماده مورد استفاده در استک موتور گرماصوتی کم تر باشد، مدت زمان عملکرد سیستم در حالت نوسانات پایا بیشتر خواهد بود.



شکل ۱۸. منحنی دمای حسگر R_1 برای مرحله ی شروع، پایداری و میرایی نوسانات خود به خودی. مقادیر T_0 و T_d به ترتیب نمایش دهنده ی مقدار دمای بحرانی شروع و میرایی نوسانات در سیستم است.

شروع نوسانات پیش بینی کرده است. مرحله ی نوسانات پایا به مدت ۲۰ ثانیه برای روش دوم ادامه داشت و برای روش اول از تعادل حرارتی در توان حرارتی پایین تر حاصل شد. برای هر دو روش حل عددی، دمای ثبت شده برای حالت نوسانات پایا کم تر از دمای ثبت شده طی فرایند شروع نوسانات خود به خودی است و وجود دو دمای بحرانی در سیستم را تأیید می کند. بخش سوم نمودار که از ثانیه ی ۳۷ شروع می شود، مربوط به رژیم میرایی است که با حذف توان حرارتی ورودی آغاز می شود و تا لحظه ی رسیدن به دمای مرجع ادامه می یابد. به طور کلی در روش دوم با تأثیر دما بر مقدار المان های الکتریکی، تغییرات دما به صورت هموارتری محاسبه شد.

۸. نتیجه گیری

در این پژوهش یک مدل حل عددی و شبیه سازی الکتریکی برای موتور گرماصوتی موج ایستا ارائه شد که تلفیقی از حل عددی معادلات گرماصوتی و همترایی مدار الکتریکی بود که با در نظر گرفتن ظرفیت حرارتی صفحه ی میانی، تغییرات زمانی دما در طول استک بررسی شد. مدل مدار الکتریکی هم ترا شده با موتور گرماصوتی موج ایستا، در بخش استک به شکل خاصی هم ترا شده بود که امکان شبیه سازی کامل یک دستگاه گرماصوتی را فراهم کرد.

مشخصات مربوط به این همترایی، حاصل از نمونه ساخته شده برای انجام تحقیقات تجربی در این پژوهش بود. در این مدل همترایی مدار الکتریکی، بخش استک به تعداد ۸ قسمت تقسیم شد که مشاهده پروفیل دما در طول آن فراهم شد و دقت محاسبه ی دما را از دو نقطه به ۸ نقطه در طول استک افزایش داد. همچنین فرایندهای شروع، پایداری و میرایی نوسانات در سیستم به کمک دو روش در این پژوهش بررسی شد که طی آن روش دوم قادر به پیش بینی زمان شروع و میرایی نوسانات خود به خودی در سیستم بود.

نمودارهای خروجی روش حل عددی با نمودارهای آزمایش تجربی مطابقت خوبی داشتند؛ لذا مدل بررسی شده برای یک استک با یک مبدل حرارتی که ایزولاسیون حرارتی روی آن صورت نگرفته است، نتایج خوبی را به نمایش گذاشت.

فهرست علائم

- p_m : فشار متوسط Pa ؛
- ρ_m : چگالی متوسط kg/m^3 ؛
- p_1 : دامنه فشار نوسانی Pa ؛
- U_1 : دامنه دبی حجمی نوسانی m^3/s ؛
- T_{ref} : دمای مرجع K ؛
- T_m : دمای متوسط، K ؛
- k_{solid} : ضریب انتقال حرارتی صفحات استک $W/m^2 K$ ؛
- k : ضریب انتقال حرارتی $W/m^2 K$ ؛
- A_{solid} : سطح جامد m^2 ؛
- V_{solid} : حجم صفحات استک m^3 ؛
- A : سطح عبور گاز، m^2 ؛
- \dot{q}_{out} : شار حرارتی به محیط، W/m^2 ؛
- \dot{Q}_{in} : توان حرارتی ورودی، W ؛
- \dot{E}_{in} : توان صوتی ورودی W ؛
- \dot{E}_{out} : توان صوتی خروجی W ؛
- $F(x)$: جریان انرژی W ؛

y : فاصله میان صفحات استک m ؛
 δ_v : عمق نفوذ لزجی m ؛
 δ_k : عمق نفوذ حرارتی m ؛
 g : ضریب منبع وابسته؛
 ω : فرکانس دورانی rad ؛
 Re : بخش حقیقی عدد مختلط؛
 Im : بخش حقیقی عدد مختلط؛
 i : عدد موهومی.

$G(x)$: اثر پمپاژ گرماسوتی W ؛
 R : ثابت جهانی گاز $J/K.mol$ ؛
 σ : عدد پراشتل؛
 f_v : تابع لزجی رات؛
 f_k : تابع حرارتی رات؛
 γ : نسبت حرارتی ویژه؛
 μ : ویسکوزیته دینامیکی $kg.s/m$ ؛
 C_p : ظرفیت گرمایی ویژه فشار ثابت $J/K.mol$ ؛

پانویسها

1. Kalina cycle
2. heat recovery steam generators (HRSGs)
3. thermo-acoustic effect
4. rott
5. bistability
6. hysteresis
7. low-pressure amplitude (5-10% Pm)
8. حد بحرانی، مقدار اختلاف دمایی است که طی آن، نوسانات خود به خودی در سیستم در حالت پایا باقی خواهد ماند.

منابع (References)

1. Wang, K., Sanders, S.R., Dubey, S. and et al. "Stirling cycle engines for recovering low and moderate temperature heat: a review", *Renew. Sustain. Energy Rev.*, **62**, pp. 89-108 (2016). DOI: 10.1016/j.rser.2016.04.031.
2. Suresh, C. and Saini, R.P. "Review on solar thermal energy storage technologies and their geometrical configurations", *Int. J. Energy Res.*, **44**(6), pp. 4163-4195 (2020). DOI: 10.1002/er.5143.
3. Safaei, M., Sodano, H.A. and Anton, S.R. "A review of energy harvesting using piezoelectric materials: state-of-the-art a decade later (2008-2018)", *Smart Mater. Struct.*, **28**(11), pp.44-45 (2019). DOI: 10.1088/1361-665X/ab36e4.
4. Robbins, T. and Garimella, S. "A centrally heated, air-coupled adsorption cooling system driven by waste heat", *Int. J. Refrig.*, **120**, pp. 58-65 (2020). DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2020.08.026.
5. Jin, T., Huang, J., Feng, Y. and et al. "Thermoacoustic prime movers and refrigerators: thermally powered engines without moving components", *Energy*, Elsevier, **93**(P1), pp. 828-853, (Dec. 15 2015). DOI: 10.1016/j.energy.2015.09.005.
6. Karlsson, M., Åbom, L., Lalit, M. and et al. "A Note on the applicability of thermo-acoustic engines for automotive waste heat recovery", *SAE Int. J. Mater. Manuf.*, **9**(2), pp. 286-293 (2016). DOI: 10.4271/2016-01-0223.
7. Bou Nader, W., Chamoun, J. and Dumand, C. "Thermoacoustic engine as waste heat recovery system on extended range hybrid electric vehicles", *Energy Convers. Manag.*, **215**(April), p. 112912 (2020). DOI: 10.1016/j.enconman.2020.112912.
8. Ramadan, I.A., Bailliet, H. and Valière, J.C. "Experimental investigation of acoustic streaming in a simple thermoacoustic engine", *24th Int. Congr. Sound Vib. ICSV 2017*, pp. 1-8 (2017).
9. Wang, K., Dubey, S., Choo, F.H. and et al. "Thermoacoustic stirling power generation from LNG cold energy and low-temperature waste heat", *Energy*, **127**, pp. 280-290 (2017). DOI: 10.1016/j.energy.2017.03.124.
10. Chen, G., Tang, L., Yang, Z. and et al. "An electret-based thermoacoustic-electrostatic power generator", *Int. J. Energy Res.*, **44** (3), pp. 2298-2305 (2020). DOI:10.1002/er.5019.
11. Chen, G., Tang, L. and Mace, B.R. "Modelling and analysis of a thermoacoustic-piezoelectric energy harvester", *Appl. Therm. Eng.*, **150** (November 2018), pp. 532-544 (2019). DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2019.01.025.
12. L. R. W. "The Theory of Sound", *Nature*, **58**(1493), pp. 121-122 (Jun 1898). DOI: 10.1038/058121a0.
13. Rott, N. "Damped and thermally driven acoustic oscillations in wide and narrow tubes", *Zeitschrift für Angew. Math. und Phys. ZAMP*, **20**(2), pp. 230-243 (1969). DOI: 10.1007/BF01595562.
14. Qiu, L.M., Lai, B.H., Li, Y.F. and et al. "Numerical simulation of the onset characteristics in a standing wave thermoacoustic engine based on thermodynamic analysis", *Int. J. Heat Mass Transf.*, **55**(7-8), pp. 2200-2203 (2012). DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.11.043.
15. Rott, N. "Thermoacoustics", **20**, C-S. Yih. Elsevier, pp.135-175 (1980).
16. Swift, G.W. "Thermoacoustic engines", *J. Acoust. Soc. Am.*, **84**(4), pp. 1145-1180 (Oct 1988). DOI:10.1121/1.396617.
17. A. Cox. "Natural Engines", *Phys. Today*, **38**(8), pp. 50-58 (1985). DOI: 10.1063/1.880985.

18. Zhou, S., and Matsubara, Y. "Experimental research of thermoacoustic prime mover", *Cryogenics (Guildf)*, **38**(8), pp. 813-822 (1998). DOI: 10.1016/S0011-2275(98)00055-1.
19. Chen, G., Krishan, G., Yang, Y. and et al. "International journal of heat and mass transfer numerical investigation of synthetic jets driven by thermoacoustic standing Waves", *Int. J. Heat Mass Transf*, **146**, p. 118859 (2020). DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118859.
20. Piccolo, A. "Numerical study of entropy generation within thermoacoustic heat exchangers with plane fins", no. July, pp. 8228-8239 (2015). DOI: 10.3390/e17127875.
21. El-rahman, A.I.A., Abdelfattah, W.A. and Fouad, M.A. "International journal of heat and mass transfer a 3D investigation of thermoacoustic fields in a square stack", *Int. J. Heat Mass Transf*, **108**, pp. 292-300 (2017). DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.12.015.
22. Mergen, S., Yildirim, E. and Türkoğlu, H. "Numerical study on effects of computational domain length on flow field in standing wave thermoacoustic refrigerators", *Cryogenics (Guildf)* (2018). DOI: 10.1016/j.cryogenics.2018.09.012.
23. Ilori, O.M., Jaworski, A.J. and Mao, X. "Experimental and numerical investigations of thermal characteristics of heat exchangers in oscillatory flow ", *Appl. Therm. Eng* (2018). DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2018.07.073
24. Cao, N., Olson, J.R., Swift, G.W. and et al. "Energy flux density in a thermoacoustic couple", *J. Acoust. Soc. Am*, **99**(6), pp. 3456-3464 (1996). DOI: 10.1121/1.414992.
25. Ishikawa, H. and Mee, D.J. "Numerical investigations of flow and energy fields near a thermoacoustic couple", *J. Acoust. Soc. Am*, **111**(2), pp. 831-839 (2002). DOI: 10.1121/1.1430687.
26. Piccolo, A. and Pistone, G. "Estimation of heat transfer coefficients in oscillating flows: The thermoacoustic case", *Int. J. Heat Mass Transf*, **49**(9-10), pp. 1631-1642 (2006). DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2005.11.009.
27. Swift, G.W., *Thermoacoustics. Cham: Springer International Publishing* (2017).
28. Jin, T., Yang, R., Liu, Y. and Tang, et al. "Thermodynamic characteristics during the onset and damping processes in a looped thermoacoustic prime mover", *Appl. Therm. Eng*, **100**, pp. 1169-1172 (2016). DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.02.115.
29. Qiu, L.M. and et al. "Characteristics of onset and damping in a standing-wave thermoacoustic engine driven by liquid nitrogen", *Chinese Sci. Bull*, **58**(11), pp. 1325-1330 (2013). DOI: 10.1007/s11434-012-5214-z.
30. He, Y.L., Ke, H.B., Cui, F.Q. and et al. "Explanations on the onset and damping behaviors in a standing-wave thermoacoustic engine", *Appl. Therm. Eng*, **58**(1-2), pp. 298-304 (2013). DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2013.04.031.
31. Chen, G.B. and Jin, T. "Experimental investigation on the onset and damping behavior of the oscillation in a thermoacoustic prime mover", *Cryogenics (Guildf)*, **39**(10), pp. 843-846 (1999). DOI: 10.1016/S0011-2275(99)00099-5.
32. Clark, J.P., Ward, W.C. and Swift, G.W. "Design environment for low-amplitude thermoacoustic energy conversion (DeltaEC) " *J. Acoust. Soc. Am*, **122**(5), p. 3014 (2007). DOI: 10.1121/1.2942768.
33. Xiao, J.H. "Thermoacoustic heat transportation and energy transformation part 1: formulation of the problem", *Cryogenics (Guildf)*, **35**(1), pp. 15-19 (1995). DOI: 10.1016/0011-2275(95)90419-G.
34. Marx, D. and Blanc-benon, P. "Numerical calculation of the temperature difference between the extremities of a thermoacoustic stack plate", **45**, pp. 163-172 (2005). DOI: 10.1016/j.cryogenics.2004.08.007.
35. Aben, P. "High-amplitude thermoacoustic flow interacting with solid boundaries", Eindhoven University of Technology Library (2010).
36. Arnott, W.P., Belcher, J.R., Raspet, R. and et al. "Stability analysis of a helium-filled thermoacoustic engine", *J. Acoust. Soc. Am*, **96**(1), pp. 370-375 (1994). DOI: 10.1121/1.410486.