

## علمی - پژوهشی

**Analytical and numerical investigation of the effect of different materials in the stack construction of the thermo acoustic system on the temperature difference between its extremities**A. Mahdavi<sup>1</sup>S.D. Mosavian<sup>\*2</sup>

Shahid Sattari University, Tehran, Iran.

(Received: 2024/04/24, Revised: 2024/05/30, Accepted: 2024/06/23, Published: 2024/07/22)

DOR: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23223278.1403.13.1.4.0>**ABSTRACT**

In this research, the effect of different common materials in the stack of a thermoacoustic cooling system on the temperature field between the sides of the stack is investigated and the effect of these materials on heat transfer is calculated. The main focus is to investigate the effect of different materials on the amount of deviation of the results (temperature difference of the sides of the stack) obtained from the numerical and analytical method of the classical thermoacoustic theory in the computational model. The numerical method used in this research is an explicit finite difference numerical method, which is presented in the form of a simple mathematical method of energy balance based on the results of classical thermoacoustic theory. Boundary conditions and assumptions are also considered to simplify calculations. Operational conditions are considered in the range of Mach numbers ( $0.04 \leq Ma \leq 0.08$ ). At Mach number 0.04, the amount of deviation between numerical results and linear theory of Mylar, rigid PVC, polyethylene and stainless steel materials was 25%, 15%, 11% and 215% respectively and at the Mach number of 0.08, the amount of deviation reaches 34%, 24%, 13% and 490%, respectively, which is due to the non-linearity of the temperature fluctuations on the stack. Mylar has a better performance in heat transfer between the sides of the stack according to the linear theory, and a temperature difference of 7.2K can be achieved at a Mach number of 0.6. The difference between the results of numerical methods and linear theory for polyethylene stack with 11% and 13% in different Mach indicates its better compatibility than other tested materials. It was also found that by using stainless steel only a temperature difference of 0.3-0.5 K can be achieved. For this reason, it does not have a good performance in heat transfer.

**Keywords:** Thermo Acoustic, Temperature Difference, Material, Finite Difference, Mach Number**بررسی تحلیلی و عددی تأثیر مواد مختلف در ساخت استک سیستم ترموآکوستیک بر اختلاف دمای بین طرفین آن**سید داود موسویان<sup>\*2</sup>امیر مهدوی<sup>1</sup>

دانشگاه هوایی شهید ستاری، تهران، ایران.

(دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۰۵، بازنگری: ۱۴۰۳/۰۳/۱۰، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۰۳، انتشار: ۱۴۰۳/۰۵/۰۱)

**چکیده**

در این پژوهش تأثیر مواد مختلف رایج در ساخت بخش استک یک سیستم سرمایش ترموآکوستیک، بر میدان دما بین طرفین آن مورد بررسی قرار می‌گیرد و اثر این مواد در انتقال حرارت روی این بخش محاسبه می‌گردد. تمرکز اصلی این پژوهش، بررسی تأثیر مواد مختلف بر میزان انحراف نتایج (اختلاف دمای طرفین استک) حاصل از روش عددی و روش تحلیلی تئوری ترموآکوستیک کلاسیک در مدل محاسباتی می‌باشد. روش عددی بکار رفته در این تحقیق یک روش عددی تفاضل محدود صریح می‌باشد که در قالب یک روش ساده ریاضی تعادل انرژی بر اساس نتایج حاصل از تئوری ترموآکوستیک کلاسیک ارائه می‌شود. شرایط مرزی و مفروضاتی نیز در جهت ساده‌تر شدن محاسبات صورت می‌گیرد. سیال کاری در این آزمایش گاز هلیوم و هندسه استک مشخص و ثابت است. شرایط عملیاتی در بازه اعداد ماخ ( $0.04 \leq Ma \leq 0.08$ ) در نظر گرفته می‌شود. مشاهده می‌گردد در عدد ماخ ۰/۰۴، میزان انحراف بین نتایج عددی و تئوری خطی مواد میلار، پی‌وی‌سی صلب، پلی‌اتیلن و استیل ضدزنگ ۳۰۴ به ترتیب ۱۵٪، ۱۱٪ و ۲۱۵٪ بوده و در عدد ماخ ۰/۰۸، میزان انحراف به ترتیب به ۳۴٪، ۲۴٪، ۱۳٪ و ۴۹۰٪ می‌رسد که این افزایش اختلاف ناشی از غیرخطی شدن نوسانات دمایی در روی استک به واسطه افزایش عدد ماخ است. ماده میلار در انتقال حرارت بین طرفین صفحه استک مطابق تئوری خطی، عملکرد بهتری دارد و می‌توان در عدد ماخ ۰/۶ به اختلاف دمای ۷/۲K دست یافت. اختلاف بین نتایج روش‌های عددی و تئوری خطی برای استک پلی‌اتیلن با ۱۱٪ و ۱۳٪ در ماخ‌های مختلف حکایت از همخوانی بهتر آن نسبت به سایر مواد آزمایش شده دارد. همچنین مشخص شد که با استفاده از استیل ضدزنگ تنها می‌توان به اختلاف دمای ۰/۵-۰/۳K دست یافت. به همین دلیل عملکرد مطلوبی در انتقال حرارت و نهایتاً اختلاف دما بین طرفین صفحه استک ندارد.

**واژه‌های کلیدی:** ترموآکوستیک، اختلاف دما، مواد مختلف، تفاضل محدود، عدد ماخ

۱- دانشجوی دکتری: amir.mahdavi@sharif.edu

۲- استادیار (نویسنده پاسخگو): Davood.mosavian@ssau.ac.ir

## فهرست علائم و اختصارات

a	سرعت صوت
$c_p$	گرمای ویژه فشار ثابت
Dr	Drive ratio
h	آنتالپی
k	ضریب هدایت حرارتی
$L_s$	طول استک
Ma	عدد ماخ
P	فشار
Pr	عدد پرانتل
T	دما
t	زمان
$\omega$	فرکانس زاویه‌ای
$\rho$	چگالی
$\delta_c$	شرایط مرجع
$\delta_v$	عمق نفوذ لزوج

موقعیت صفحات استک و طول صفحات استک دارند، می‌توان دماهای مختلفی را بدون تغییر سیال ایجاد کرد، با تغییر طول موج آکوستیکی از نوع ایستایی به انتقالی هم می‌توان به راندمان‌های مختلفی از این نوع سیستم دست‌یافت. [۲].

دستگاه‌های سرمایش ترمواکوستیک کاربرد گسترده‌ای در صنایع مختلف تجاری، نظامی و پزشکی و .. دارند. اولین نمونه عملی خنک‌کننده ترمواکوستیک در سال ۱۹۹۲ توسط آقایان هافلر و گرت برای اولین بار در شاتل فضایی دیسکاوری به کار گرفته شد. این سیستم جهت خنک‌کاری سوپرکانداکتورها شاتل استفاده گردید. خنک‌کردن قطعات و چیپ‌های الکترونیکی به‌خودی‌خود یک مبحث بحث‌برانگیز در مرزهای دانش است [۳]. از کاربردهای نظامی این سیستم در خنک‌کاری قطعات حساس (( خنک‌کردن کانورتور رادار بروی عرشه در کشتی‌های نظامی آمریکا)) از سال ۱۹۹۵ تاکنون است.

موتورهای سرمایشی ترمواکوستیک اساساً از چهار

قسمت زیر تشکیل می‌شوند (شکل (۱)):

- (۱) رزناتور موج سطحی که به‌صورت محفظه کاملاً بسته و صلب از گاز پر شده است.
- (۲) تبدیل‌کننده قدرت الکتریکی به آکوستیک.
- (۳) محیط جامد متخلخل (استک).
- (۴) یک جفت مبدل حرارتی که در طرفین استک قرار گرفته‌اند.

اصول انتقال حرارت ترمواکوستیک به‌صورت جامع در قالب تئوری ترمواکوستیک خطی استاندارد توسط سوئیفت ارائه شده است [۳].

استک شامل یک مجموعه از صفحات موازی نازک است که در جهت نوسانی آکوستیک ذره (جهت طولی) قرار گرفته‌اند و فاصله میان آن‌ها چندین برابر عمق نفوذ حرارتی است (فاصله‌هایی که گرما می‌تواند حول آن در یک سیکل آکوستیک نفوذ کند). این قسمت که به‌عنوان قلب موتور، از آن یاد می‌شود و مکانی برای تبدیل انرژی صوتی به گرمایی مطلوب (که به‌عنوان اثر ترمواکوستیک خوانده می‌شود) است. پدیده ترمواکوستیک در نواحی مرزی جریان سیال که به‌طور آکوستیکی در حال نوسان است اتفاق می‌افتد. در این ناحیه حرارت بین ذرات سیال و صفحه ثابت صلب (استک) مبادله می‌گردد. مجموعه استک و مبدل‌های

## ۱- مقدمه

امروزه فناوری ترمواکوستیک، پتانسیل لازم برای ایفای نقش بزرگ در گسترش دستگاه‌های تولید و تبدیل انرژی با کارایی بالا را دارا می‌باشد. دستگاه‌های سرمایش ترمواکوستیک نیز در این راستا دارای مزایای زیر هستند:

(۱) سیالات مورد استفاده در دستگاه‌های ترمواکوستیک مانند گاز هلیوم، قابلیت‌هایی از قبیل عدم اشتعال‌پذیری آسان و نداشتن آلاینده‌گی محیطی به دلیل سمی نبودن را دارا می‌باشند. زیرا هم‌اکنون مبردهایی نظیر R-134a چالش‌های پتانسیل تخریب لایه ازن و گرمایش جهانی را به همراه دارند. [۱].

(۲) این دستگاه‌ها را می‌توان از مواد و قطعات کم‌ارزش تجاری و بسیار ساده ساخت. لذا هزینه‌های ساخت و تعمیر و نگهداری بسیار پائینی خواهند داشت.

(۳) با توجه به ایجاد فرکانس‌های بالا، این دستگاه‌ها هیچ‌گونه قطعات متحرک ندارند در نتیجه نیاز به روغن کاری نیز در این دستگاه‌ها احساس نمی‌شود.

(۴) این دستگاه‌ها می‌توانند کاملاً بی‌صدا سرمایش موردنیاز را تأمین کنند.

(۵) محدوده دمای کاری وسیعی را می‌توان در این دستگاه‌ها ایجاد کرد. با توجه به اینکه توان و دمای طراحی، بستگی به

۱۰ دست‌یافت. [۷]. لازم به یادآوری است که مقدار اختلاف دما با افزایش مقدار نسبت درایو می‌تواند افزایش پیدا کند که این موضوع در دستگاه‌های ساخته‌شده فوق نیز مشهود است. یک وسیله ترمواکوستیک بر اساس تئوری خطی ترمواکوستیک طراحی می‌شود [۳]. این تئوری، روش طراحی تیجانی را تشکیل می‌داد و به‌خوبی با نتایج پیش‌بینی‌شده تیو مطابقت داشت. البته تاکنون محدودیت‌های این تئوری به‌طور کامل برطرف نشده است، مخصوصاً هنگامی که نسبت درایو را با افزایش قدرت آکوستیک، بالا برده و حداقل دما به دست می‌آید.

آقایان چوان و هان با مدل‌سازی مولد صوت با به‌کارگیری معادلات خطی و کالیبراسیون تجربی امیداند آن، توانستند به تخمین قدرت بالایی دست یابند [۸].

همچنین در این راستا، نامدار و همکاران یک بررسی عددی بر روی یک یخچال ترمواکوستیک در دامنه‌های ضعیف و بزرگ با در نظر گرفتن اثرات خنک‌کنندگی را انجام دادند. [۹]

زمانی که یک سیستم سرمایه‌ش ترمواکوستیک به حالت پایدار می‌رسد، با به‌کارگیری تئوری خطی، می‌توان اختلاف دما بین طرفین صفحه را به دست آورد. این معادله ناشی از معادل قراردادن شار حرارتی ترمواکوستیک در طول صفحه استک با شار حرارتی مربوط به ترم هدایت در صفحه و سیال است. چندین محقق، مطالعاتی در زمینه اختلاف دما چه به‌صورت تجربی و چه عددی انجام دادند و مقایسه‌ای بین نتایج آن‌ها با نتایج حاصله از تئوری خطی صورت گرفت ولی نتایج واحدی از مطالعات آن‌ها به دست نیامد [۷].

عدد ماخ آکوستیک  $Ma = u_A/c$  به‌صورت نسبت دامنه سرعت ماکزیمم  $u_A$  در رزوناتور به‌سرعت صوت  $c$  تعریف می‌شود. نسبت درایو  $Dr$  با عدد ماخ  $(Ma = Dr/\gamma)$ ، رابطه مستقیم دارد که  $\gamma$  نسبت حرارت‌های مخصوص است. در مطالعات اشلی [۱۰] و ورلیکر [۱۱] تطابق خوبی با نتایج تئوری خطی در اعداد ماخ کم و متوسط حاصل شد در صورتی که در اعداد ماخ بالا این تطابق وجود نداشت که علت آن وجود اثرات غیرخطی در اعداد ماخ بالا بود. اثرات غیرخطی، اثر نامطلوبی بر مکانیزم انتقال حرارت در استک خواهند داشت. این اثرات غیرخطی که در نوسانات فشاری بالا اتفاق می‌افتند باعث افزایش برگشت‌ناپذیری در سیستم

حرارتی، مسئله اساسی در طراحی موتورهای ترمواکوستیک است. مبدل‌های حرارتی بر اساس نوع عملکرد و چگونگی حرکت سیال در آن‌ها در دسته‌های گوناگون تقسیم‌بندی می‌شوند. [۴].

طراحی بهینه مبدل‌های حرارتی ترمواکوستیک بستگی به درک عمیق فرایندهای دینامیک سیالاتی و انتقال حرارت دارد. بین موج صوتی و مبدل‌های حرارتی در محل اتصال استک و مبدل حرارتی دارد [۱۹] مبدل‌های حرارتی نقطه آغازین برای حل این مسئله، تحلیل ساختار میدان‌های جریان، انرژی و دمای میانگین زمانی نزدیک طرفین سرد و گرم در راستای طولی صفحات استک هست. نتایج کار محمودی و علوی نشان داد که توان ورودی و دمای مبدل‌های حرارتی بر روی حل حالت پایدار و عملکرد صحیح یخچال تأثیر می‌گذارند [۵].

ساختار مدل ارائه‌شده به‌گونه‌ای است که از دو سر عایق صفحه استک هیچ تبادل گرمایی چه به‌صورت عمودی و چه طولی صورت نمی‌گیرد. همین موضوع باعث ایجاد محاسبات ساده‌تر نسبت به دیگر انواع هندسه‌های استک می‌شود [۶]، در صورتی که اساس فیزیک مسئله که همان چگونگی مکانیزم انتقال حرارت در صفحات استک هست ثابت نگه داشته می‌شود.

روش ارائه‌شده در این مقاله بر اساس نتایج تئوری ترمواکوستیک خطی کلاسیک مبتنی بر استک کوتاه و متغیرهای انتقال انرژی استوار است [۷] دستیابی به حداقل دمای ورود و چگونگی کنترل اختلاف دمای بین طرفین صفحه از مهم‌ترین اهداف دستگاه‌های سرمایه‌ش ترمواکوستیک می‌باشند.

یک روش طراحی برای دستگاه‌های سرمایه‌ش ترمواکوستیک که محرک آن موج صوتی است توسط تیجانی و همکاران [۷] جهت کاربردهای بروندی تهیه شد. دمای طراحی خنک‌کننده آن‌ها  $65^\circ\text{C}$  بود که در یک نسبت درایو  $Dr = 3\%$  می‌توان به آن دست‌یافت. نسبت درایو به‌صورت نسبت دامنه ماکزیمم فشار در رزوناتور به فشار متوسط تعریف می‌شود  $(Dr = P_A/P_m)$ . همچنین یک خنک‌کننده که محرک آن حرارت است، توسط تیو ساخته شد. در وسیله وی قسمت سردکننده ترمواکوستیک با موج آکوستیک تولیدشده توسط موتور بکار می‌افتاد. وی در نسبت درایو  $Dr = 1/5\%$  به اختلاف دمایی در حدود  $^\circ\text{C}$

قانون میانگین زمانی بقای انرژی برای یک سیال لزج تراکم‌پذیر با معادله زیر بیان می‌شود [۱۵]:

$$\nabla \cdot \dot{e} = 0 \quad (1)$$

با انتگرال‌گیری این معادله حول یک المان حجمی که توسط سطح بسته  $S$  مرزبندی شده است و با به‌کارگیری قضیه دیورژانس، معادله (۲) حاصل می‌شود:

$$\int_S \dot{e} \cdot n ds = 0 \quad (2)$$

که  $n$  بردار واحد در جهت عمود به جزء سطح  $ds$  است. معادلات (۱) و (۲) به‌طور هم‌ارز بیان می‌کنند که چگالی شار انرژی میانگین زمانی  $\dot{e}$ ، یک کمیت بقایی است. نتیجتاً معادله (۲) می‌تواند به‌صورت قراردادی برای زیر ناحیه مشخص‌شده در گاز برای ایجاد تعادل انرژی بکار گرفته شود. معادله ترموآکوستیک برای چگالی شار انرژی هیدرودینامیکی در طول جهت  $x$  یک استک با صفحات موازی، به‌دست‌آمده است. نسبت فاصله بین صفحات (و همچنین نسبت ضخامت صفحه) به پهنا در راستای عمودی به‌قدری کوچک است (همانند موارد واقعی) که جریان انرژی در طول جهت  $z$  (عمود بر صفحه  $x-y$ ) جزئی و قابل‌چشم‌پوشی می‌شود و در نتیجه مسئله را می‌توان دوبعدی در نظر گرفت.

عبارت مختلط همراه با متغیرهای زمانی به‌صورت

$$\xi(t) = \xi_m + \text{Re}\{\xi_1 e^{i\omega t}\} \quad (3)$$

در نظر گرفته می‌شود. که  $t$  زمان،  $i$  واحد موهومی و  $\text{Re}\{\}$  بخش حقیقی را مشخص می‌کند.  $\xi_1$  دامنه مختلط مرتبه اول متغیر  $\xi$  است که با فرکانس زاویه‌ای  $\omega$  حول مقدار  $\xi_m$  نوسان می‌کند.

جریان میانگین زمانی انرژی هیدرودینامیکی در گاز در جهت طولی ( $\dot{h}_x$ ) با جریان میانگین زمانی آنتالپی هیدرودینامیکی برابر می‌شود که به‌صورت زیر محاسبه می‌شود [۳]:

$$\dot{h}_x = \rho_m c \int_0^{2\pi/\omega} T(t) u(t) dt = \frac{1}{2} \rho_m c_p \text{Re}\{T_1 \tilde{u}_1\} \quad (4)$$

که در آن  $\rho_m$  چگالی متوسط گاز،  $c_p$  گرمای مخصوص فشار ثابت گاز،  $T$  دما،  $u$  مؤلفه افقی سرعت آکوستیک ذره

سرمایش ترموآکوستیک شده و آنتروپی را افزایش می‌دهند. افزایش آنتروپی باعث افزایش تلفات و در نهایت کاهش راندمان سیستم می‌گردد.

اشلی [۱۰] و ورلیکر [۱۱] در عدد ماخ بیش از ۰٫۱ به اختلاف محسوس بین نتایج عددی و تئوری خطی رسیدند. در شبیه‌سازی آن‌ها که روی صفحه استک انجام‌شده است اثرات غیرخطی به‌جز اثرات غیرخطی ناشی از انتشار موج در رزوناتور مشاهده شد [۱۰].

در زمینه تجربی نیز کارهایی توسط کیم [۱۲]، دوفورت [۱۳] و پیکوله [۱۴] نیز انجام شد که نتایج حاصله همخوانی خوبی با نتایج تئوری خطی حتی در ماخ‌های کم نداشتند و حدود ۳۰٪ بین نتایج اختلاف دیده شد. گرچه، اختلافات دمایی اندازه‌گیری شده در حالت‌های پایدار توسط پیکوله و همکاران با پیش‌بینی‌های تئوری خطی همخوانی نداشت ولی اندازه‌گیری‌های انجام‌شده در حالت گذرا نشان‌دهنده این بود که شار حرارتی ترموآکوستیک که در طول صفحات جابه‌جا می‌شود به‌خوبی با تئوری خطی پیش‌بینی می‌شود. نتیجه فوق نشان می‌دهد که ناسازگاری مربوط به مقایسه اختلاف دمایی در حالت پایدار، لزوماً ناشی از اثرات غیرخطی نیست، بلکه مربوط به اثرات حرارتی نیز است که تأثیر آن در ماخ‌های مختلف متفاوت است.

## ۲- فرمولاسیون

برای صفحات استک با طول‌هایی بزرگ‌تر از طول دامنه جابه‌جایی ذره، گرچه تقریب استک کوتاه رعایت شده، ولی متغیرهای انتقال انرژی با حل‌های تئوری خطی استاندارد باید به‌صورت دقیق در قسمت‌های مرکزی استک محاسبه شود. زیرا در قسمت‌های مرکزی دیگر لبه استک تأثیرگذار نخواهد بود و تئوری خطی تطابق خوبی با نتایج واقعی در قسمت‌های مرکزی استک دارد.

در این مطالعه با به‌کارگیری یک روش محاسباتی نسبتاً ساده میدان دمایی در طول صفحه استک محاسبه می‌شود. روش پیشنهادشده، بر اساس قضیه تعادل انرژی بوده و شرایط مرزی مخصوصی را دربر می‌گیرد.

در ابتدا فرمولاسیون صریح مدلی به‌صورت ریاضی تشریح می‌شود. تمامی معادلات، با یک وابستگی زمانی متناوب (همانند مسائل ترموآکوستیک) همراه هستند.

$$P_1 = P_A \sin kx_s = P_0 \quad (8)$$

$$u_1 = i \frac{P_A}{\rho_m a} \cos kx_s = iu_0 \quad (9)$$

$P_a$  دامنه فشار دینامیکی در یک ضدگره فشار،  $k$  عدد موج ( $k = 2\pi/\lambda$ )،  $a$  سرعت صوت و  $x_s$  نقطه مرکزی در راستای طولی استک است که به صورت فاصله مرکز استک از مرکز رزوناتور تعریف می‌شود (در تقریب استک کوتاه، مکان ورودی استک می‌تواند بدون خطای محسوس در  $P_1$  و  $U_1$  یک موقعیت متوسطی داشته باشد).

ب) اختلاف دما در طول استک به قدری کمتر از دمای میانگین استک باشد که از وابستگی پارامترهای ترموفیزیکی گاز به دما و به موقعیت مکانی در طول محور  $x$  بتوان چشم‌پوشی کرد. با به‌کارگیری معادله (۹)، نرخ جریان حجمی در ورودی استک را به صورت زیر می‌توان تعریف کرد:

$$U_1 = A_{res} u_1 = iA_{res} u_0 \quad (10)$$

$A_{res}$  مساحت سطح مقطع رزوناتور می‌باشد. با انتگرال‌گیری از معادله (۶) در طول سطح مقطع مجاری بین دو صفحه انتقال حرارت (یکی از طرفین انتهایی) می‌توان مقدار  $U_1$  را در درون استک به دست آورد:

$$U_1 = \frac{A_s}{y_0} \int_0^{y_0} u_1(y) dy = \frac{i}{\omega \rho_m} \frac{dp_1}{dx} (1 - f_v) \quad (11)$$

که

$$f_v = \frac{\tanh[(1+i) \frac{y_0}{\delta_v}]}{[(1+i) \frac{y_0}{\delta_v}]} \quad (12)$$

$A_s$  مساحت سطح مقطع درونی استک است که جریان گاز از آن عبور می‌کند. با حاکم کردن معادله پیوستگی نرخ جریان حجمی در ورودی استک و با کمک معادلات (۱۰) و (۱۱)، می‌توان مقدار  $dp_1/dx$  را در درون استک پیدا کرد

$$\frac{dp_1}{dx} = \frac{u_0}{\Omega} \frac{\rho_m \omega}{(1 - f_v)} \quad (13)$$

$\Omega = A_s / A_{res} = 1/(1 + l/y_0)$  مساحت مجاری بین دو صفحه استک را نسبت به مساحت سطح مقطع رزوناتور نشان می‌دهد. با جایگذاری معادله (۸) و در معادلات (۵)

است. گروه ترکیب مختلط را نشان می‌دهد و سیال گاز ایده‌آل فرض می‌شود.

برای ارزیابی این مقدار، عبارت‌های صریح برای دامنه‌های مختلط مرتبه اول  $T_1$  و  $u_1$  درون استک نیز لازم است. اگر گرمای مخصوص ماده صفحه استک ( $c_s$ ) به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای بزرگ‌تر از  $c_p$  باشد،  $T_1$  و  $u_1$  به صورت زیر محاسبه می‌شود [۱۱]:

$$T_1 = \frac{1}{\rho_m c_p} (1 - h_x) P - \frac{1}{\rho_m c_p} \frac{dp_1}{dx} \frac{dT_m}{dx} \left[ \frac{(1 - h_x) - \text{Pr}(1 - h_v)}{(1 - \text{Pr})} \right] \quad (5)$$

$$u_1 = \frac{i}{\omega \rho_m} \frac{dp_1}{dx} (1 - h_v) \quad (6)$$

$$h_x = \frac{\cosh[(1+i) \frac{y}{\delta_x}]}{\cosh[(1+i) \frac{y_0}{\delta_x}]} \quad (7)$$

$$h_v = \frac{\cosh[(1+i) \frac{y}{\delta_v}]}{\cosh[(1+i) \frac{y_0}{\delta_v}]}$$

$P_1$  دامنه محلی فشار دینامیکی،  $\text{Pr}$  عدد پرانتل،  $y_0$  نصف فاصله بین دو صفحه استک،  $\delta_x$  عمق نفوذ حرارتی و  $\delta_v$  عمق نفوذ لزج می‌باشد و  $y = 0$  در مرکز سیال در بین دو صفحه تعیین می‌شود.

اگر استک، تقریب استک کوتاه را که مطابق ذیل بیان می‌شود ارضاء کند، می‌توان یک عبارت ساده برای مشتق فشاری  $dp_1/dx$  می‌تواند به دستاورد. [۱۴]

الف) طول موج آکوستیک کاهش یافته ( $\lambda/2\pi$ ) خیلی بزرگ‌تر از طول استک ( $L_s$ ) می‌باشد. این موضوع بیانگر این است که وجود استک به‌طور آکوستیکی اغتشاش ایجاد نمی‌کند و فشار و سرعت به‌طور تقریبی در ورودی استک برای یک‌نیمه طول موج رزوناتور، با معادلات بدون تلفات آکوستیک زیر، بیان می‌شوند:

می‌باشد. این ترم چون در مقابل چگالی شار آنتالپی ناچیز است لذا در اینجا از آن چشم‌پوشی می‌شود. از سوی دیگر، مؤلفه عمودی چگالی شار انرژی برای این اساس فرض می‌شود که فقط شامل ترم نفوذ باشد

$$\dot{q}_y = -K \frac{\partial T_m}{\partial y} \quad (18)$$

که چگالی شار حرارتی میانگین زمانی در طول محور عمودی است. این فرضیه در ناحیه دور از سطح صفحه نیز طبق تئوری خطی صدق می‌کند.

سرعت در جهت  $y$  که مرتبه‌ای از  $\delta_k/\lambda$  است کوچک‌تر از مقدار  $u_1$  می‌شود. در نتیجه می‌توان به این نتیجه رسید که شارهای گرمایی هیدرودینامیکی در طول جهت  $y$  در مقایسه با ترم‌های نفوذ خیلی کوچک‌تر هستند.

زمانی که عبارت  $\partial T_m/\partial x$  وابسته به  $x$  و همچنین  $\dot{h}_x$  تابعی از  $x$  است، در طول استک بر وارد یا خارج شدن گرمای خالص از دیواره‌های استک دلالت می‌کند، معادلات (۱۵) و (۱۸) در دیواره‌های استک باید یکسان باشند.

اگر  $K_s$ ، ضریب هدایت حرارتی صفحه باشد، چگالی‌های شار گرمایی میانگین زمانی، در طول محورهای  $x$  و  $y$  در صفحه انتقال حرارت استک به صورت زیر ساده می‌شوند:

$$\dot{q}_y = -K_s \frac{\partial T_{sm}}{\partial y} \quad (19)$$

$$\dot{q}_x = -K_s \frac{\partial T_{sm}}{\partial x}$$

این هدایت حرارتی، به عنوان مکانیزم یکنواختی از انتقال انرژی در درون صفحات استک محاسبه می‌شود. همچنین با فرض  $c_p \geq c_s$ ، نوسان‌های دمایی در درون صفحه استک قابل چشم‌پوشی می‌شوند.

با مشتق گرفتن از معادله (۱۴) و با ایجاد یک معادله تعادل انرژی ساده، می‌توان اختلاف دما بین طرفین (سرد و گرم) صفحه استک  $\Delta T = T_s(H) - T_s(C)$  در طول صفحه را نیز به دست آورد. باید به این نکته توجه شود که اختلاف دما در محاسبات در طول خط مرکزی صفحه، با افزایش فشار آکوستیک افزایش می‌یابد (شکل ۲).

چنانچه  $T_m$  مستقل از  $y$  فرض شود برای شار آنتالپی کل در نیمه یک کانال (مجاری بین دو صفحه استک) معادله (۲۰) حاصل خواهد شد.

$$\dot{H} = \int_0^{y_0} \dot{h}_x(y) dy = \dot{H}_\alpha - \frac{dT_m}{dx} \dot{H}_\beta \quad (20)$$

(۶) و معادله (۱۳) در معادله (۴) عبارت مرتبه دوم در دامنه نوسانی آکوستیکی زیر برای  $\dot{h}_x$  نتیجه می‌شود:

$$\dot{h}_x = \frac{1}{2\Omega} \text{Im} \left[ \frac{(1-\tilde{h}_v)(1-h_k)}{(1-f_v)} \right] P_0 u_0 - \frac{\rho_m c_p}{2\omega\Omega^2(1-\text{Pr})} \frac{dT_m}{dx} \text{Im} \left[ \frac{(1-\tilde{h}_v)(1-h_k)}{|1-f_v|^2} \right] u_0^2 \quad (14)$$

نکته قابل توجه اینکه در یک موقعیت تعیین شده استک ( $x_s$ ) در رزوناتور، همه مقادیر به جز مقدار  $T_m$ ، در این معادله باید مستقل از محور مختصات افقی  $x$  در استک باشند. مقادیر قرار گرفته در براکت‌های مربعی، از سوی دیگر فقط به محور  $y$  وابسته‌اند که انعکاس‌دهنده تغییرات عمودی  $u_1$  و  $T_1$  می‌باشند. معادله (۱۴)، در نواحی مرکزی مجاری بین صفحات استک، درجایی که شار انرژی انتظار می‌رود که هم جهت (محور  $x$ ) باشد، بر عدم انتقال حرارت خالص بین سیال و صفحه استک صحت می‌گذارد.

کاربرد معادله (۱۴) در ناحیه‌های مجاور طرفین سرد و گرم بین دو صفحه استک، با شرط اینکه گرادینان‌های دمایی عمودی در اعداد ماخ آکوستیک کم گسترش نیابند، درست می‌باشد. همین فرضیه از سوی دیگر، به صورت موفقیت‌آمیزی در [۱۷] برای به دست آوردن یک معادله دیفرانسیل برای دمای گاز میانگین زمانی بکار گرفته شده است.

از نقطه نظر تحلیلی، این تقریب اجازه می‌دهد در معادله (۱۴)،  $T_m$  و مشتق آن  $dT_m/dx$  به صورت تابعی از  $x$  و  $y$  شوند. بنابراین معادله (۱۴) به شکل زیر بازنویسی می‌شود:

$$\dot{h}_x(x, y) = \dot{h}_\alpha(y) - \frac{\partial T_m(x, y)}{\partial x} \dot{h}_\beta(y) \quad (15)$$

$$\dot{h}_\alpha(y) = \frac{1}{2\Omega} \text{Im} \left[ \frac{(1-\tilde{h}_v)(1-h_k)}{(1-f_v)} \right] P_0 u_0 \quad (16)$$

$$\dot{h}_\beta(y) = \frac{\rho_m c_p (u_0^2)}{2\omega\Omega^2(1-\text{Pr})} \text{Im} \left[ \frac{(1-\tilde{h}_v)(1-h_k)}{|1-f_v|^2} \right] \quad (17)$$

که  $\dot{h}_\alpha(y)$  و  $\dot{h}_\beta(y)$  هر دو مقادیر واقعی و مثبت می‌باشند.

چگالی شار انرژی در جهت محور افقی شامل ترم نفوذ  $-K(\partial T_m/\partial x)$  (که  $K$  هدایت حرارتی گاز است) نیز

کمیت‌های  $f_v, f_K, \varepsilon_s$  به خواص و هندسه صفحه انتقال حرارت و سیال بستگی دارند که سوئیفت [۳] آن‌ها به شکل زیر بیان کرد:

$$f_v = \frac{\tanh[(1+i)\frac{y_o}{\delta_v}]}{[(1+i)\frac{y_o}{\delta_v}]} \quad (28)$$

$$f_K = \frac{\tanh[(1+i)\frac{y_o}{\delta_K}]}{[(1+i)\frac{y_o}{\delta_K}]} \quad (29)$$

$$\varepsilon_s = \varepsilon_o \frac{\tanh[(1+i)\frac{y_o}{\delta_K}]}{\tanh[(1+i)\frac{l}{\delta_{K,s}}]} \quad (30)$$

$$\varepsilon_o = \frac{\rho_m c_p \delta_K}{\rho_s c_s \delta_{K,s}} \quad (31)$$

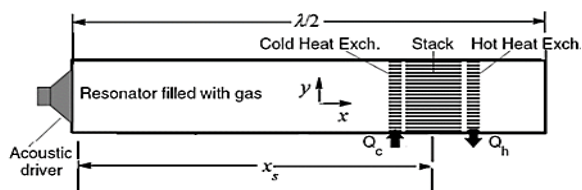
در این معادلات  $\delta_v$  عمق نفوذ ویسکوز در سیال و  $\delta_K$  عمق نفوذ حرارت در سیال و  $\delta_{K,s}$  عمق نفوذ حرارت در صفحه انتقال حرارت جامد می‌باشند که به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\delta_v = \sqrt{\frac{2\nu}{\omega}}, \delta_K = \sqrt{\frac{2K}{\omega}}, \delta_{K,s} = \sqrt{\frac{2K_s}{\omega}} \quad (32)$$

$\nu$  ویسکوزیته سینماتیکی سیال،  $K = K_s/\rho_s c_s$  ویسکوزیته حرارتی صفحه است. در این معادلات تقریب استک کوتاه رعایت شده است و فرضیات اساسی تئوری خطی بکار گرفته شده است. همچنین فرض شده است که گرادیان دمایی  $dT_m/dx = \Delta T/L_s$  هم در صفحه انتقال حرارت و هم در سیال یکسان است.

### ۳- مدل عددی و شرایط مرزی

مدل شبیه‌سازی شده، یک استک با صفحات موازی می‌باشد که عایق حرارتی شده است و به طول  $L_s$  در موقعیت  $x_s$  در رزونانوری حاوی گاز هلیوم و به طول نیمه طول موج آکوستیک ( $\lambda/2$ ) است شکل (۱).



شکل (۱): شماتیک دستگاه سرمایش ترمواکوستیک [۷].

$$\dot{H}_\alpha = \int_0^{y_o} \dot{h}_\alpha(y) dy \quad (21)$$

$$\dot{H}_\beta = \int_0^{y_o} \dot{h}_\beta(y) dy$$

و شار هدایت گرمائی برابر:

$$\dot{Q}_{cond,m} = (Ky_o \frac{dT_m}{dx} + K_s l \frac{dT_{sm}}{dx}) \quad (22)$$

خواهد بود. در حالت پایدار جریان انرژی هیدرودینامیکی باید توسط یک جریان نفوذ که همان شار هدایت گرمائی در جهت مخالف در هر دو محیط گازی و جامد (صفحه) است، متعادل شود. در نتیجه خواهیم داشت:

$$(\dot{H}_\alpha - \frac{dT_m}{dx} \dot{H}_\beta) - (Ky_o \frac{dT_m}{dx} + K_s l \frac{dT_{sm}}{dx}) = 0 \quad (23)$$

مشاهده می‌شود که با داشتن  $dT_m/dx = dT_{sm}/dx$  و با جایگزینی  $\Delta T/\Delta X$  با  $dT_m/dx$  (همان‌گونه که البته قبلاً گفته شده بود  $dT_m/dx$  در تئوری خطی استاندارد ثابت فرض می‌شود) رابطه زیر برای اختلاف دمای بین دو سر صفحه به دست می‌آید:

$$\Delta T = \frac{\dot{H}_\alpha L_s}{Ky_o + K_s l + \dot{H}_\beta} \quad (24)$$

با جاگذاری مقادیر به طور دقیق‌تر خواهیم داشت:

$$\Delta T = \frac{L_s y_o}{4\rho_m c} P_A^2 \sin(2kx_s) A_1 \times [y_o K + lK_s]^{-1} \times \left[ -\frac{y_o c_p}{4\omega\rho_m c^2 (1-pr)} P_A^2 (1 - \cos(2kx_s)) A_2 \right]^{-1} \quad (25)$$

و ضرایب  $A_1, A_2$  برابر است با:

$$A_1 = \frac{\frac{\delta_K}{2y_o} \left( 1 - \frac{\delta_v}{y_o} + \sqrt{Pr} \right)}{(1 + \varepsilon_o)(1 + pr) \left( 1 - \frac{\delta_v}{y_o} + \frac{1}{2} \left( \frac{\delta_v}{y_o} \right)^2 \right)} \quad (26)$$

$$A_2 = \frac{-\frac{\delta_K}{2y_o} (1 + \sqrt{Pr} + Pr + Pr \varepsilon_o)}{(1 + \sqrt{Pr})(1 + \varepsilon_o) \left( 1 - \frac{\delta_v}{y_o} + \frac{1}{2} \left( \frac{\delta_v}{y_o} \right)^2 \right)} \quad (27)$$

یک استک از یک مجموعه صفحات مشخص تشکیل می‌شود. در این مقاله، محاسبات در یک کانال از استک که بین دو جفت صفحه موازی قرار گرفته است انجام می‌شود. اثر شکل هندسی سطح مقطع تأثیر مستقیم بر ضریب انتقال حرارت دارد. [۱۶].

ناحیه خاکستری با سیستم مختصات بکار رفته در شکل ۲، محدوده محاسباتی را مشخص می‌کند. این محدوده بین خط تقارن صفحه استک و خط تقارن بین دو صفحه می‌باشد. محور موازی با صفحه، محور  $x$  و نقطه  $x = 0$  در ابتدای استک در سمت چپ انتخاب می‌شود. محور  $y$  عمود بر صفحه استک و  $y = 0$  به عنوان نقطه میانی بین دو صفحه مجاور در نظر گرفته می‌شود.  $S$  و  $H$ ،  $C$  به ترتیب نشان‌دهنده سمت سرد صفحه استک، سمت گرم صفحه استک و مرکز صفحه استک است.

$$K \frac{\Delta x}{\Delta y} T_m^{i-1,j} + h_\beta \frac{\Delta y}{\Delta x} T_m^{i,j-1} + h_\beta \frac{\Delta y}{\Delta x} T_m^{i,j+1} - (2h_\beta \frac{\Delta y}{\Delta x} + 2K \frac{\Delta x}{\Delta y}) T_m^{i,j} + K \frac{\Delta x}{\Delta y} T_m^{i+1,j} = 0 \quad (33)$$

در ادامه به اعمال شرایط مرزی می‌پردازیم: خطوط آغازین در  $y = 0$  و  $y = y_0 + l$ ، خطوط متقارنی هستند، لذا شرایط مرزی در آن‌ها به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود.

$$\left(\frac{\partial T_m}{\partial y}\right)_{y=0} = 0, \left(\frac{\partial T_{sm}}{\partial y}\right)_{y=y_0+l} = 0 \quad (34)$$

شرایط پیوستگی در خط تماس محیط جامدی (استک) و سیال ( $y = y_0$ ) به گونه‌ای است که دمای متوسط گاز برابر دمای صفحه و شار انرژی خروجی (یا ورودی) گاز، معادل شار انرژی ورودی (یا خروجی) از دیواره جامدی می‌باشد.

$$T_m(y = y_0) = T_{sm}(y = y_0) \quad (35)$$

$$K \left(\frac{\partial T_m}{\partial y}\right)_{y=y_0} = K_s \left(\frac{\partial T_{sm}}{\partial y}\right)_{y=y_0}$$

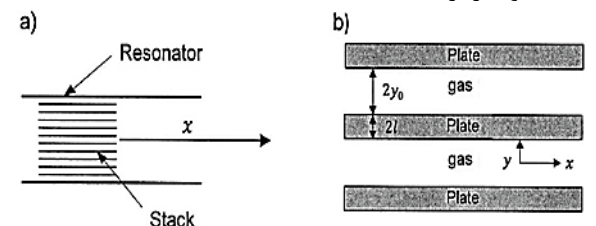
در یک صفحه استک که از دو طرف لبه سمت راست و چپ عایق حرارتی شده هیچ گرمایی نمی‌تواند به طور نفوذی از طرفین صفحات استک وارد یا خارج شود ( $y_0 \leq y \leq y_0 + l$ ).

$$\left(\frac{\partial T_{sm}}{\partial x}\right)_{x=0} = 0, \left(\frac{\partial T_{sm}}{\partial x}\right)_{x=L_s} = 0 \quad (36)$$

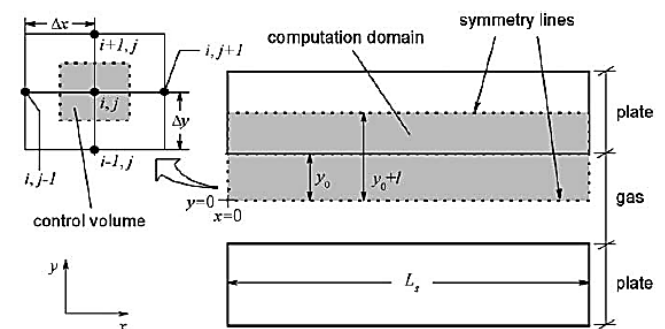
همچنین در یک استک عایق حرارتی شده هیچ انرژی‌ای به طور هیدرودینامیکی از طرفین سمت سرد و گرم (مجاری بین دو صفحه استک) نمی‌تواند وارد یا خارج شود ( $0 \leq y < y_0$ ).

شکل (۲): (a). هندسه استک، (b). نمایی بزرگ از صفحات آن [۷].

شکل (۲): (a) هندسه استک، (b) نمایی بزرگ از صفحات آن [۷].



شکل (۲): (a). هندسه استک، (b). نمایی بزرگ از صفحات آن [۷].



شکل (۳): سطوح خاکستری رنگ (کم‌رنگ)، دامنه محاسباتی بین دو صفحه استک را نشان می‌دهد.

محاسبات توزیع دمای میانگین زمانی دوبعدی پایدار با به‌کارگیری روش عددی تفاضل محدود انجام شده است. ناحیه محاسباتی یک ناحیه مستطیلی شبکه‌بندی شده است. با توجه به طول و عرض ناحیه محاسباتی، جدول (۳) و زمان مناسب جهت حل مسئله، اندازه شبکه محاسباتی



جدول (۳): مشخصه‌های هندسی استک

مشخصه‌های هندسی استک	
$L_s$ (m) طول استک	۰/۰۰۸۸
$y_0$ (m) نصف فاصله دو صفحه	۱/۹ $\delta_k$
$l$ (m) نصف ضخامت صفحه	۰/۴۱ $\delta_k$
$x_s$ (m) فاصله متوسط استک از مرکز رزوناتور	۰/۰۰۶

#### ۵- مشخصات مواد استک

صفحه انتقال حرارت استک باید به طور مؤثر قادر باشد تا نوسانات فشار صوتی را به یک گرادیان دما تبدیل نماید. مواد سازنده استک باید رسانش کم و ظرفیت گرمایی بالاتری نسبت به گاز درون سیستم داشته باشد. علاوه بر این، فاصله بین صفحات استک باید به گونه‌ای طراحی گردد تا راندمان حرارتی و تلفات ویسکوز درون استک از طریق عمق نفوذ حرارتی و عمق نفوذ ویسکوزیته متعادل گردند. طول استک و موقعیت آن در رزوناتور را می‌توان از طریق معادلات حرارت و جریان‌های کاری تعیین کرد. [۳]

ماده انتخاب‌شده در ساخت استک باید هدایت حرارتی پایینی داشته باشد. از آنجایی که هدف اصلی یک سیستم سرمایش ترمواکوستیک، انتقال گرما از انتهای سرد به انتهای گرم است، هدایت گرما در جهت مخالف (از انتهای گرم به انتهای سرد) منجر به کاهش راندمان می‌شود. اگر مقدار هدایت حرارتی بیش از حد بالا باشد، این وضعیت مشابه حمل آب در یک سربالایی با یک سطل سوراخ است. این ماده باید ظرفیت گرمایی ویژه بیشتری نسبت به سیال کاری سیستم داشته باشد.

یک صفحه استک با ظرفیت گرمایی بالا، کمتر تحت تأثیر نوسانات دمایی گاز مجاور قرار می‌گیرد؛ بنابراین گرادیان دما در امتداد دیواره‌های صفحه استک ثابت می‌ماند و راندمان سیستم افزایش یابد. استک‌هایی با جنس‌های مختلف در سیستم سرمایش ترمواکوستیک بکار گرفته شده است. روی [۱۷] از فویل آلومینیومی، کاجورک [۱۸]، و انتا [۱۹]، تیجانی [۷] از ماده میلار، امیرین [۲۰] و انتا از پی‌وی‌سی صلب، ترتیب و از سرامیک، هافلر از رول فیلم عکاسی، سوئیفت [۳] از استیل ضدزنگ، و سلی [۲۱] از فلز تنگستن استفاده کردند. به‌طور کلی استفاده از غیر فلزات

$$\dot{h}_x(x=L_s) = 0, \dot{h}_x(x=0) = 0 \quad (37)$$

با به‌کارگیری این شرایط مرزی و معادلات به‌دست‌آمده در بخش فرمولاسیون و اعمال روش عددی تفاضل محدود صریح در قالب قضیه تعادل انرژی، ساختار کد عددی این مقاله شکل می‌گیرد. کد عددی این پروژه به زبان برنامه‌نویسی فترن و متلب نوشته شده است.

#### ۴- مشخصات سیال کاری و هندسه استک

خصوصیات سیال کاری در سیستم سرمایش ترمواکوستیک نقش مهمی در میزان توان و راندمان ایفاء می‌کند. سیالاتی که نسبت حرارت مخصوص بالا و عدد پرانتل پایین دارند بسیار مناسب می‌باشند [۱۰] گاز هلیوم به‌واسطه داشتن خصوصیات بیان‌شده، از سیالات پرکاربرد در دستگاه‌های ترمواکوستیک است، و در محاسبات این مقاله از آن استفاده می‌شود. ویژگی‌های گاز هلیوم و پارامتر عملیاتی مربوط به آن در جداول ۱ و ۲ آورده شده است. مشخصه‌های هندسی استک نیز در جدول ۳ بیان شده است.

جدول (۱): خواص گاز هلیوم

سیال	هلیوم
خصوصیات ماده	
$(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$ ضریب هدایت حرارتی	۰/۱۴۹
$(J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$ گرمای مخصوص در فشار ثابت	۵۱۹۵
(J/kgK) ثابت گاز	۲۰۷۷
نسبت گرماهای مخصوص	۵/۳
$(m \cdot s^{-1})$ سرعت صوت	۹۷۰
(Pa) ویسکوزیته	$1/96 \cdot 10^{-5}$

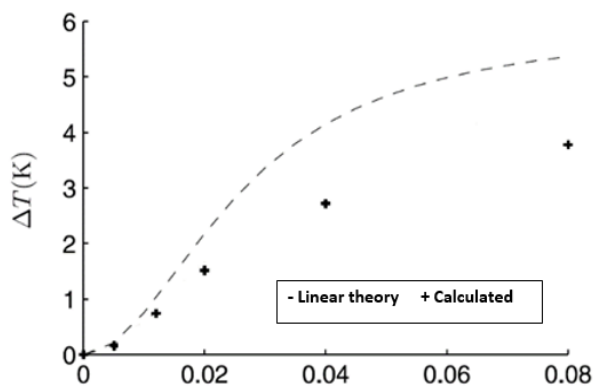
جدول (۲): پارامترهای عملیاتی گاز هلیوم.

سیال	هلیوم
پارامترهای عملیاتی	
(K) دمای متوسط	۳۰۰
عدد ماخ	۰/۰۲-۰/۰۸
(kHz) فرکانس	۱۰۰
(kPa) فشار متوسط	۱۰
$(kg \cdot m^3)$ چگالی	۰/۱۷۶
(m) طول موج صوت	۱۰/۰۸

دمایی محاسبه شده عددی به صورت جزئی منحنی می شود و به مقادیر کمتر از تئوری خطی میل می کند. این انحراف به تأثیر نامطلوبی بر راندمان طراحی خواهد داشت. انحناء به وجود آمده به دلیل وجود اثرات حرارتی است که از لایه بندی دمایی در نزدیکی لبه های صفحه، ناشی می گردد. در تئوری خطی این گرادیان های دمایی در هر دو محیط (صفحه استک و گاز) یکسان در نظر گرفته می شوند در صورتی که این یکسان بودن گرادیان ها در نتایج عددی دیده نمی شود.

شکل ۵ اختلاف دما در یک صفحه استک با ماده میلار در دو حالت عددی و تئوری خطی به صورت تابعی از ماخ را نشان می دهد. انحراف اختلاف دما در دو حالت عددی و تئوری خطی در اعداد ماخ پایین و متوسط ( $Ma < 2\%$ ) ناشی از اثرات حرارتی است که از لایه بندی دمایی که در نزدیکی لبه های صفحه ایجاد می شود. این انحراف در ماخ ۰/۰۴ به ۳۷/۵ درصد می رسد [۶ و ۱۵].

در اعداد ماخ بالاتر ( $Ma > 4\%$ ) اثرات غیرخطی نقش بسیار مهمی در ایجاد انحراف بین نتایج عددی و تئوری خطی دارد. به طور دقیق تر، انحراف بین این دو، حاصل غیرخطی شدن نوسانات دمایی در روی استک در اعداد ماخ بالا است. در ماخ های بالا، اشباع دامنه نوسان های دمایی در روی صفحه استک صورت می گیرد که همین موضوع باعث غیرخطی شدن نوسان های دمایی می شود. عامل غیرخطی شدن نوسانات دمایی مربوط به گذر از حالت آدیاباتیک بیرونی صفحه استک به حالت همدمای بالای صفحه است که این مورد به صورت تحلیلی توسط گوسو و به صورت عددی توسط مارکس و بنون به دست آمده است که به صورت شکل ۵ ارائه شده است [۱۱ و ۱۸].



شکل (۵): اختلاف دما در یک صفحه استک با ماده میلار در دو حالت عددی و تئوری خطی به صورت تابعی از ماخ [۱۵]

با خاصیت هدایت حرارتی پایین به دلیل تأثیر بالایی در افزایش راندمان سیستم بیشتر مدنظر است.

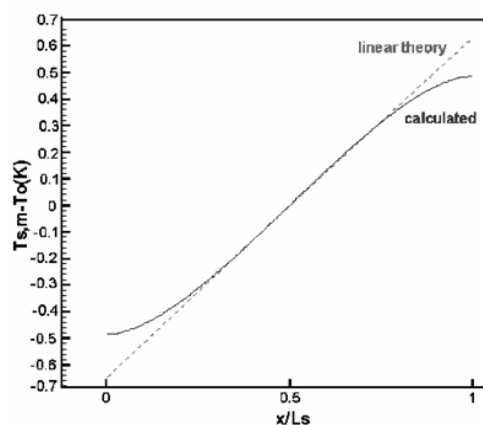
باتوجه به اینکه هدف اصلی ساخت یک سیستم ترمواکوستیک، ایجاد اختلاف دما بین طرفین یک صفحه استک در اعداد ماخ مختلف است، لذا در این مقاله تأثیر مواد مختلف که در ساخت استک رایج هستند مورد بررسی قرار می گیرد و اثر آن ها در اختلاف دما بین طرفین استک در ماخ های متفاوت بررسی می گردد.

## ۶- نتایج و بحث

### ۶-۱- بررسی اختلاف دما بین دو طرف صفحه استک

در شبیه سازی حاضر، عدم همخوانی میزان اختلاف دمای بین طرفین صفحه استک در هر دو حالت روش عددی و روش تئوریک مورد بررسی قرار می گیرد. برای رسیدن به این هدف باید میدان دمایی در دستگاه های سرمایش ترمواکوستیک بررسی شود. در روی صفحات استک، ایجاد گرادیان دمایی و به دنبال آن اختلاف دما در طرفین (سمت چپ و راست) صفحات وجود دارد.

بر اساس پیش بینی های تئوری خطی، گرادیان دمایی در طول صفحه استک ثابت می باشد؛ ولی همان طور که در شکل ۴ دیده می شود، طبق نتایج عددی، گرادیان دمایی در طول صفحه به جز در دو طرف (سمت چپ و راست) صفحه، ثابت است.



شکل (۴): دمای متوسط  $T_{sm} - T_0$  در روی صفحه انتقال حرارت، در دو حالت تئوری خطی و روش عددی

در این شکل مشخص است که در میانه صفحه، پروفیل دمایی به صورت خطی منطبق بر پروفیل دمایی تئوری خطی می باشد؛ ولی در نزدیکی لبه های صفحه پروفیل

**جدول (۴): مشخصات خواص مواد استک های مختلف**

خواص مواد استک	
میلار	مقدار
(W .m-1. K-1) ضریب هدایت حرارتی	۰/۲۳۷
(kg .m <sup>-3</sup> ) چگالی	۹۰۰
(J .kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ) گرمای مخصوص	۲۷۰۰
پی وی سی	مقدار
(W .m-1. K-1) ضریب هدایت حرارتی	۰/۱۵
(kg .m <sup>-3</sup> ) چگالی	۱۴۰۰
(J .kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ) گرمای مخصوص	۱۲۶۰
پلی اتیلن	مقدار
(W .m-1. K-1) ضریب هدایت حرارتی	۰/۱۳
(kg .m <sup>-3</sup> ) چگالی	۱۰۵۰
(J .kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ) گرمای مخصوص	۱۲۰۰
استیل ۳۰۴	مقدار
(W .m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ) ضریب هدایت حرارتی	۱۵
(kg .m <sup>-3</sup> ) چگالی	۷۵۰۰
(J .kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ) گرمای مخصوص	۵۰۲

**۶-۲-۱- صفحه استک ترمواکوستیک از جنس ماده میلار**

در شکل ۶ اختلاف دما محاسبه شده از دو روش تئوری خطی و عددی به صورت تابعی از مایخ برای یک صفحه ترمواکوستیک از جنس میلار نشان داده شده است. انحرافات ایجاد شده در محاسبه  $\Delta T$  بین دو روش عددی و تئوری خطی در بازه مایخ ۰/۰۴ تا ۰/۰۸ آورده می شود. همان گونه که در این شکل مشاهده می شود بر طبق محاسبات عددی انجام شده در مایخ ۰/۰۴، ۵K بین دو طرف صفحه استک اختلاف دما وجود دارد که با افزایش عدد مایخ به ۰/۰۸ این اختلاف دما به ۶/۲K افزایش می یابد. در عدد مایخ ۰/۰۴، انحرافی حدود ۲۵٪ بین  $\Delta T$  حاصل از تئوری خطی و محاسبات عددی وجود دارد که با افزایش عدد مایخ به مقدار ۰/۰۸، انحراف  $\Delta T$  به دست آمده از دو روش به ۳۴٪ می رسد.

برای اعتبارسنجی محاسبات صورت گرفته مقایسه ای بین نمودارهای شکل ۵ نتیجه کار مارکس و بنون و شکل ۶ که

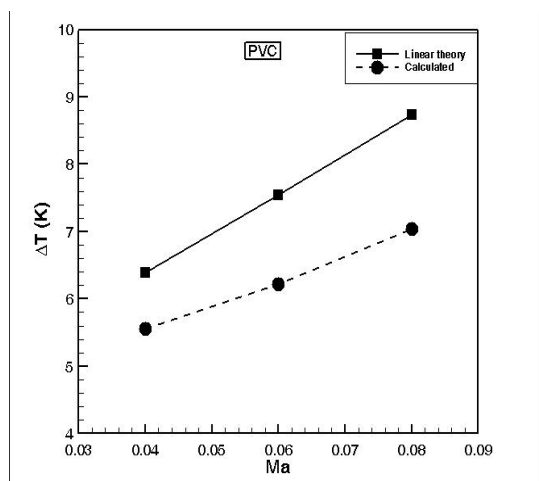
در شکل بالا، محل قرارگیری استک در موقعیت ثابت  $kx_s = 2.35$  در رزوناتور بوده و سیال کاری نیز هوا است. انحراف ایجاد شده در محاسبه  $\Delta T$  بین دو روش عددی و تئوری خطی در بازه مایخ ۰/۰۸، ۴۵٪ می شود. با افزایش عدد مایخ به دلیل اینکه دامنه فشار ماکزیمم افزایش می یابد، نسبت درایو بیشتر می شود. با افزایش نسبت درایو اختلاف دما طرفین سردوگرم صفحه استک ( $\Delta T$ ) افزایش پیدا می کند. بنابراین با افزایش عدد مایخ، اختلاف بین نتایج روش عددی و نتایج پیش بینی شده بیشتر نمایان می شود و این انحراف با افزایش بیشتر مایخ، سیر صعودی به خود می گیرد؛ لذا در بخش بعدی سعی می گردد نقش استک با مواد مختلف در میزان اختلاف دما در بازه اعداد مایخ بالا مورد بررسی قرار گیرد.

**۶-۲- تأثیر مواد مختلف صفحه استک بر اختلاف دمای بین طرفین آن در اعداد مایخ مختلف**

به طور کلی سه پارامتر در طراحی یک سیستم سرمایش ترمواکوستیک نقش دارند که عبارتند از (۱) مواد، (۲) هندسه صفحه استک، و (۳) عملیات کاری سیستم. پارامترهای مواد، به مواد بکار رفته در صفحه استک و سیال سیستم مربوط می شود. در این بخش به مواد به بکار رفته در صفحه استک و پارامترهای مربوط به آن یعنی ضریب هدایت حرارتی، چگالی و گرمای ویژه پرداخته می شود. هرچند، مواد گوناگونی در ساخت استک مورد استفاده قرار می گیرند ولی این مواد باید به گونه ای در نظر گرفته شوند که بتوانند با سایر پارامترهای مؤثر آکوستیکی در بخش صفحه استک نظیر نوع هندسه صفحه، هماهنگ باشند. [۲۲].

در این بخش جهت بررسی تأثیر مواد مختلف بر اختلاف دما بین طرفین استک و میزان انحراف بین نتایج عددی و تئوری خطی، چهار ماده رایج در ساخت صفحات استک شامل میلار، پی وی سی صلب، پلی اتیلن و استیل ضدزنگ ۳۰۴ جهت آزمایش انتخاب می شوند. در جدول ۴ مشخصات این مواد شامل ضریب هدایت حرارتی، چگالی و گرمای ویژه آورده شده است.

لازم به ذکر است که در تمامی آزمودن ها، شرایط پارامتری هندسه صفحه استک و پارامترهای کاری سیستم یکسان می باشند. محل قرارگیری استک در موقعیت ثابت  $kx_s = 0.704$  در رزوناتور است.



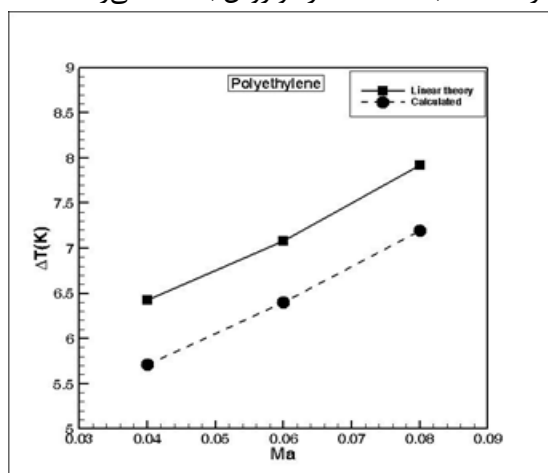
شکل (۷): اختلاف دما در صفحه استک از جنس

پی‌وی‌سی در دو حالت عددی و تئوری خطی به صورت تابعی از ماخ

### ۶-۲-۳- صفحه استک ترمواکوستیک از جنس ماده

#### پلی‌اتیلن

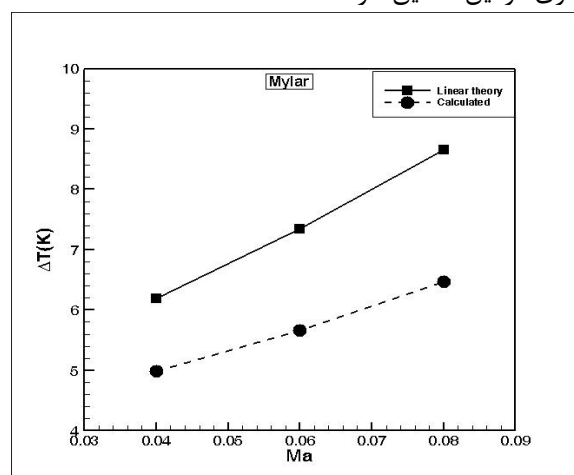
در شکل ۸ اختلاف دمای محاسبه شده از دو روش تئوری خطی و عددی به صورت تابعی از ماخ برای یک صفحه ترمواکوستیک از جنس پلی‌اتیلن نشان داده شده است. شکل ۸ نشان می‌دهد که در عدد ماخ ۰/۰۴ اختلاف دما محاسبه شده دو طرف استک با روش عددی، ۵/۶ K و با روش تئوری خطی ۶/۵ K است. به عبارت دیگر در عدد ماخ ۰/۰۴،  $\Delta T$  حاصل از تئوری خطی حدود ۱۱٪ بیشتر از نتایج محاسبات عددی است. با افزایش عدد ماخ به مقدار ۰/۰۸، انحراف  $\Delta T$  به دست آمده از دو روش به ۱۳٪ می‌رسد.



شکل (۸): اختلاف دما در صفحه استک از جنس پلی‌اتیلن

در دو حالت عددی و تئوری خطی به صورت تابعی از ماخ

نتیجه این پژوهش است صورت می‌گیرد. مشخصات هندسی استک و جنس آن (میلار) در هر دو تحقیق یکسان است ولی سیال کاری متفاوت می‌باشد (اولی هوا و دومی هلیوم)؛ لذا نتایج به واسطه تفاوت خصوصیات و پارامترهای عملیاتی هر دو گاز یکسان نیست، ولی می‌توان تشابه روند کلی جریان را در هر دو شکل مشاهده کرد. در شکل ۵، انحراف بین نتایج عددی و تحلیلی در ماخ ۰/۰۴، ۳۷/۵٪ و در ماخ ۰/۰۸، ۴۵/۲٪ می‌باشد و در شکل ۶ این انحرافات به ترتیب در ماخ‌های ۰/۰۴ و ۰/۰۸، ۲۵٪ و ۳۴٪ است. رشد یکسان ۹٪ در انحرافات در هر دو شکل به واسطه افزایش عدد ماخ از ۰/۰۴ به ۰/۰۸ مشاهده می‌شود که نشان از صحت روش جاری در این تحقیق دارد.



شکل (۶): اختلاف دما در صفحه استک از جنس میلار در

دو حالت عددی و تئوری خطی به صورت تابعی از ماخ

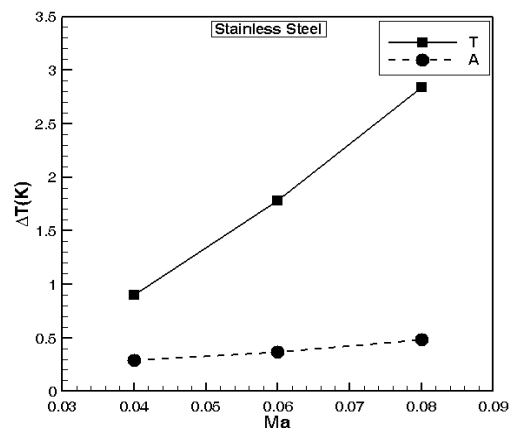
### ۶-۲-۲- صفحه استک ترمواکوستیک از جنس

#### پی‌وی‌سی صلب

در شکل ۷ اختلاف دمای محاسبه شده از دو روش تئوری خطی و عددی به صورت تابعی از ماخ برای یک صفحه ترمواکوستیک از جنس پی‌وی‌سی نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود بر طبق محاسبات انجام شده از روش تئوری خطی در ماخ ۰/۰۴، اختلاف دما دو طرف صفحه استک، ۶/۲ K است که با افزایش عدد ماخ به ۰/۰۸ این اختلاف دما به ۸/۶ K افزایش می‌یابد. در عدد ماخ ۰/۰۴، حدود ۱۵٪ اختلاف بین  $\Delta T$  حاصل از تئوری خطی و محاسبات عددی مشاهده می‌شود که با افزایش عدد ماخ به مقدار ۰/۰۸، انحراف  $\Delta T$  به دست آمده از دو روش به ۲۴٪ می‌رسد.

## ۶-۲-۴- صفحه استک ترمواکوستیک از جنس استیل ضدزنگ

در شکل ۹ اختلاف دمای محاسبه شده از دو روش تئوری خطی و عددی به صورت تابعی از ماخ برای یک صفحه ترمواکوستیک از جنس استیل ضدزنگ نشان داده شده است. در عدد ماخ ۰٫۰۴، حدود ۲۱۵٪ بین  $\Delta T$  حاصل از تئوری خطی و محاسبات عددی اختلاف وجود دارد. با افزایش عدد ماخ به مقدار ۰٫۰۸، انحراف  $\Delta T$  به دست آمده از دو روش به ۴۹۰٪ می رسد.



شکل (۹): اختلاف دما در صفحه استک از جنس استیل ضدزنگ در دو حالت عددی و تئوری خطی به صورت تابعی از ماخ

با مقایسه شکل های ۶ تا ۹ مشخص می شود که در استیل، انحراف  $\Delta T$  بین نتایج تئوری خطی و روش عددی از مواد متداول دیگر بیشتر است و با افزایش عدد ماخ، انحراف با شیب تندی افزایش می یابد. به عنوان مثال این انحراف برای پی وی سی ۱۵٪ تا ۲۴٪ است در حالی که برای استیل ۲۱۵٪ تا ۴۹۰٪ است.

به طور کلی جمع بندی این بخش به صورت زیر انجام می شود: در اعداد ماخ کم (۰٫۰۴ ماخ) میزان انحراف بین نتایج عددی و تئوری خطی، چهار ماده رایج در ساخت صفحات استک شامل میلار، پی وی سی صلب، پلی اتیلن و استیل ضدزنگ ۳۰۴ به ترتیب ۲۵٪، ۱۵٪، ۱۱٪ و ۲۱۵٪ گردید. در اعداد ماخ کم، دمای نوسانی، غیرخطی نیست، در نتیجه اثرات غیرخطی نقشی در ایجاد اختلاف دمایی محاسبه شده از روش عددی و روش تئوری خطی ندارد. اثرات حرارتی لبه های استک نقش عمده ای در اختلاف  $\Delta T$  حاصل از تئوری خطی و روش عددی ایفاء می کند و باعث می شود که گرادیان دمایی یکسان (که در تئوری خطی در

هر دو ناحیه صفحه انتقال حرارت استک و سیال فرض شده است) در روش عددی وجود نداشته باشد (شکل (۴)). در نتیجه اختلاف دما بین طرفین ابتدائی و انتهائی صفحه استک، محاسبه شده به روش عددی، نسبت به تئوری خطی کاهش یافته است.

اما شدت این اختلاف در سرعت های بالاتر (۰٫۰۸ ماخ) خیلی افزایش می یابد. در اعداد ماخ بالا میزان انحراف بین نتایج عددی و تئوری خطی، مواد میلار، پی وی سی صلب، پلی اتیلن و استیل ضدزنگ ۳۰۴ به ترتیب ۳۴٪، ۲۴٪، ۱۳٪ و ۴۹۰٪ می باشد، که از مقادیر متناظر در شرایط ماخ کم، بیشتر است. با افزایش عدد ماخ، دامنه فشار حداکثر و نسبت درایو افزایش می یابد. با افزایش نسبت درایو، اختلاف دما در طول طرفین صفحه استک، افزایش پیدا می کند. اثرات غیرخطی نیز نقش بسیار مهمی در ایجاد انحراف بین نتایج عددی و تئوری خطی دارد. تغییرات غیرخطی از دو پارامتر موقعیت صفحه انتقال حرارت در رزوناتور و طول صفحه انتقال حرارت تأثیر می پذیرد. بدین صورت که هر چه طول صفحه استک بزرگ تر باشد تغییرات نوسانات دمایی کم تر است و همچنین هر چه موقعیت صفحه استک به گره سرعت یا پاد گره فشار در رزوناتور نزدیک تر باشد، انحرافات کمتری بین نتایج تئوری خطی و کار محاسباتی عددی وجود خواهد داشت [۱۵].

عامل غیرخطی شدن نوسانات دمایی مربوط به گذر از حالت آدیاباتیک بیرونی صفحه استک به حالت هم دما بالای صفحه است، البته شرایط عملیاتی نزدیک به نقطه بحرانی، را نیز باید در نظر گرفت هر چند اتلاف صوتی نیز افزایش می یابد [۲۳].

## ۶-۳- تحلیل اثر به کارگیری صفحه استک با جنس های مختلف بر اختلاف دمای طرفین آن و میزان

### انحراف $\Delta T$ حاصل از دو روش عددی و تئوری خطی

شکل ۱۰ اختلاف دمای محاسبه شده با استفاده از تئوری خطی در صفحات استک با مواد میلار، پی وی سی، پلی اتیلن و استیل را نشان می دهد. شکل ۱۰ نشان می دهد که در عدد ماخ ۰٫۰۶ اختلاف دمای دو طرف استکی از جنس پی وی سی ۲۲K، میلار ۷/۳K، پلی اتیلن ۷K، و استیل ضدزنگ ۱/۹K است؛ بنابراین مطابق تئوری خطی ترمواکوستیک، مواد میلار و پی وی سی نقش مؤثری در انتقال حرارت بین طرفین استک

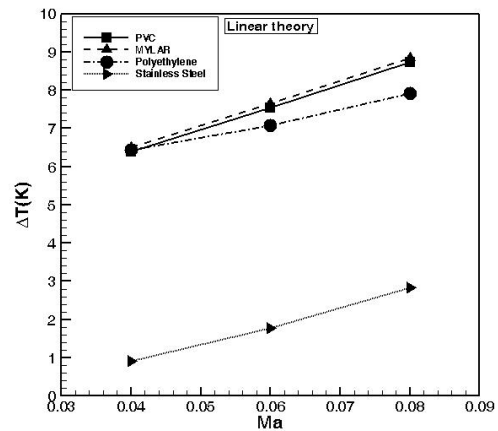
## ۷- نتیجه گیری

در این مقاله مکانیزم انتقال حرارت و توزیع دمای میانگین زمانی متأثر از به کارگیری مواد مختلف (میلار، پی وی سی، صلب، پلی اتیلن و استیل ضد زنگ ۳۰۴) در ساخت صفحه استک یک سیستم سرمایش ترموآکوستیک مورد بررسی قرار گرفت. روش عددی (تفاضل محدود صریح) بکار رفته در این تحقیق بر اساس نتایج حاصل از تئوری ترموآکوستیک خطی کلاسیک و در قالب یک روش ریاضی تعادل انرژی می باشد. در این تحقیق به طور ویژه ای تأثیر مواد مختلف در ساخت صفحه استک، بر میزان انحراف نتایج حاصل از روش عددی و تئوری خطی کلاسیک در اعداد ماخ مختلف بررسی و اثر آلیاژهای تعیین شده در انتقال حرارت در یک صفحه استک ارزیابی می شود. شرایط عملیاتی در بازه اعداد ماخ (0.04  $\leq Ma \leq 0.08$ ) است. مشاهده می شود در عدد ماخ ۰/۰۴، میزان انحراف بین نتایج عددی و تئوری خطی مواد میلار، پی وی سی صلب، پلی اتیلن و استیل ضد زنگ ۳۰۴ به ترتیب ۲۵٪، ۱۵٪، ۱۱٪ و ۲۱۵٪ بوده و در عدد ماخ ۰/۰۸، میزان انحراف بین نتایج عددی و تئوری خطی، این مواد به ترتیب به ۳۴٪، ۲۴٪، ۱۳٪ و ۴۹۰٪ می رسد که این افزایش اختلاف ناشی از غیرخطی شدن نوسانات دمایی در روی استک به واسطه افزایش عدد ماخ است. نتایج به دست آمده همخوانی خوبی با سایر نتایج کارهای عددی دیگر (مارکس و بنون) دارد. همچنین مشاهده گردید ماده میلار در انتقال حرارت بین طرفین صفحه استک مطابق تئوری خطی، عملکرد بهتری دارد و می توان با آن در عدد ماخ ۰/۶ به اختلاف دمایی تا ۷/۳K دست یافت. نتایج روش های عددی و تئوری خطی برای استک پی وی سی تنها ۱۵٪ تا ۲۴٪ با یکدیگر اختلاف دارند و نسبت به مواد دیگر همخوانی بهتری دارند. همچنین مشخص شد که استیل ضد زنگ عملکرد مطلوبی در انتقال حرارت و نهایتاً اختلاف دما بین طرفین صفحه استک ندارد زیرا فقط می توان به مقدار اختلاف دمای ۰/۵K- دست یافت.

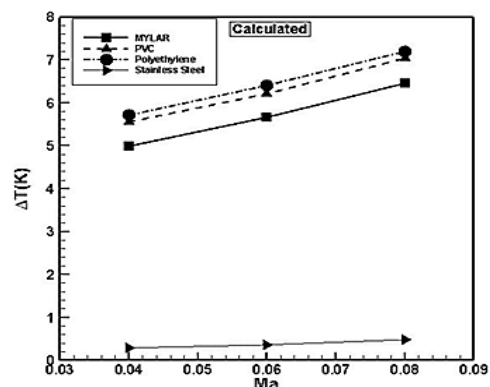
## ۸- مراجع

[1] Shabankare A.Y.T, Mirjalily S.A.A, Oloomi M.R, and Salimpour S. Experimental Study of the Pressure Drop and Condensed Heat Transfer of R-406a Refrigerant in Tubes Equipped with Extended Surface of Twisted Fins in Different Steps and Lengths. J. Aerospace Mech 2023 ; 19

ایفا می کنند و فلز استیل ضد زنگ عملکرد نامناسبی را در این خصوص از خود نشان می دهد (شکل ۱۰).



شکل (۱۰): اختلاف دمای محاسبه شده (تئوری خطی) در صفحات استک با مواد میلار، پی وی سی، پلی اتیلن و استیل شکل ۱۱ اختلاف دمای محاسبه شده با روش عددی در صفحات استک با مواد میلار، پی وی سی، پلی اتیلن و استیل ضد زنگ را نشان می دهد. مقایسه شکل های ۱۰ و ۱۱ مشخص می کند که نتایج روش عددی در خصوص مواد پی وی سی و پلی اتیلن نسبت به ماده میلار، با نتایج تئوری خطی در انتقال حرارت بین طرفین استک از مطابقت بهتری برخوردار می باشند. همچنین بررسی شکل های ۱۰ و ۱۱ مشخص می کند که با استفاده از استیل نمی توان به اختلاف دماهای بالادست یافت. نتایج روش عددی نشان می دهد که با استفاده از استیل در ساخت استک تنها می توان به اختلاف دمای ۰/۵K-۰/۳ دست یافت. این در حالی است که با روش تئوری خطی اختلاف دمای ۰/۹-۲/۸K حاصل می شود. به همین دلیل استفاده از استیل در سیستم ترموآکوستیک پیشنهاد نمی شود.



شکل (۱۱): اختلاف دمای محاسبه شده (روش عددی) در صفحات استک با مواد میلار، پی وی سی، پلی اتیلن و استیل ضد زنگ

- [16] Goudarzi A. Exergy Analysis of a Gas to Liquid Compact Heat Exchanger as an Intercooler for Various Working Conditions. *J. Aerospace Mech* 2021; 16(3): 85-98 . (in Persian). DOI 20.1001.1.26455323.1399.16.3.7.5
- [17] Roy D, Ghosh s. An experimental study on the effect of various stack materials on thermo acoustic refrigeration effect. *J. Phys* 2021; 20(4): 1-10. DOI 10.1088/1742-6596/2070/1/012220
- [18] Kajurek J. The influence of stack position and acoustic frequency on the performance of thermoacoustic refrigerator with the standing wave. *Arch. Therm* 2017; 38(4): 88-107. DOI 10.1515/aoter-2017-0026
- [19] Wantha CH. The impact of stack geometry and mean pressure on cold end temperature of stack in thermoacoustic refrigeration systems. *Int. J. Heat Mass Trans* 2018; 54(2): 2153–2161. DOI 10.1007/s00231-018-2280-z
- [20] Amirin T, Yulianto M. Experimental study of thermoacoustic cooling with parallel plate stack in different distances. *International Conference on Design, Energy, Materials and Manufacture, Indonesia*; 2019. DOI 10.1088/1757-899X/539/1/012037
- [21] Vesely M. Difference between working gases in thermoacoustic engine. *Epj. Web. Conf.* 2014, 67(5):1-4. DOI 10.1051/epjconf/20146702126
- [22] Shahrjerdi A, Nazari F. Numerical simulation of the effect of geometric parameters of silencer on its acoustic performance. *J. Fluid Mech. Aerodynamics* 2014; 12(2): 57-67. (in Persian). DOI 20.1001.1.23223278.1402.12.2.5.6
- [23] Blance N, Yange R. Thermo acoustic engines with near-critical working fluids”, *Appl. Therm. Eng* 2023; 231(7): 1-13. DOI 10.1016/j.applthermaleng.2023.1208
- (1):93-106 (inPersian).  
https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26455323.1402.19.1.7.2
- [2] Zhu S, Yu G, Tang W, Hu J, and Luo E. Thermoacoustically driven liquid-metal-based triboelectric nanogenerator: a thermal power generator without solid moving parts. *Appl. Phys. Lett.* 2021; 118(11): 1-6. DOI 10.1063/5.0041415
- [3] Swift G.W. Thermoacoustic engines. *J. Acoust. Soc. American* 1998; 84(2): 1145–1180. DOI 10.1121/1.396617
- [4] Alimohammadian S, Hashemabadi M, Ghasemlooy S. Investigation of Effect of Geometric Structure on Two Phase Flow Heat Transfer in Microchannels in Different Steps and Lengths. *J. Fluid Mech. Aerodynamics* 2023; 9(1):11-22. (in Persian). https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23223278.1401.11.2.2.6
- [5] Mohammadi A, and Alavi A. Investigation of Effective Parameters on a Thermal Load in a Thermo-Acoustic Refrigerator. *AUT J. Mech. Eng* 2017; 1(1): 49-54. DOI 10.22060/mej.2016.782
- [6] Mozurkewich G. Time average temperature distribution in a thermoacoustic stack. *J. Acoust. Soc. Amer* 1998; 103(8): 380–388. DOI 10.1121/1.423109
- [7] Tijani M, Zeegers H. Design of thermoacoustic refrigerators. *Cryogenics* 2002; 42: 49–57. DOI 10.1016/S0011-2275 (01) 00179-5
- [8] Shu-Han H. Evaluating the onset conditions of a thermoacoustic Stirling engine loaded with an audio loudspeaker. *Front. Therm. Eng* 2023; 3(3): 52-59. DOI 10.3389/fther.2023.1241411
- [9] Namdar A, Kianifar A, Roohi E. Numerical investigation of thermoacoustic refrigerator at weak and large amplitudes considering cooling effect. *Cryogenics* 2015; 67(2): 36–44. DOI 10.1016/j.cryogenics.2015.01.005
- [10] Atchley J, Hofler A. Acoustically generated temperature gradients in short plates. *J. Acoust. Soc. Amer* 1990; 88(1): 251-363. DOI 10.1121/1.399947
- [11] Worlikar S, Knio M. Numerical simulation of a thermoacoustic refrigerator: II. Stratified flow around the stack. *J. Comput. Phys* 1998; 144(2): , No. 299-324. DOI 10.1006/jcph.1997.5816
- [12] Kim T, Suh S. Linear resonant duct thermoacoustic refrigerator having regenerator stacks. *Proceedings of the 16th International Congress on Acoustics, Ochmann*; 1998.
- [13] Duffourd S. *Refrigerateur thermoacoustique: etudes analytiques et experimentales en vue dune miniaturisation.* PhD thesis, Ecole Centrale de Lyon; 2001.
- [14] Piccolo A. Numerical computation for parallel plate thermoacoustic heat exchangers in standing wave oscillatory flow. *Int. J. Heat Mass Trans* 2011; 54(3):13-18. DOI 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.06
- [15] Marx D, Blanc-Bennon P.h. Numerical calculation of the temperature difference between the extremities of a thermoacoustic stack plate. *Cryogenics* 2005;45(4):163–172. DOI 10.1016/j.cryogenics.2004.08.007