

طراحی سیستم کوپل سردساز ترموآکوستیکی بر مبنای جذب گرمای اتلافی موتورهای پیستونی نیروگاه های تولید برق

علی دهقانی^{۱*}، کریم مظاهری^۲، عباس بابائی زارچ^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف، ali.dehghani@ae.sharif.edu

۲- استاد دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف، mazaheri@sharif.ir

۳- دانشجوی دکترا مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف، babaei_abbas@ae.sharif.edu

* علی دهقانی

چکیده

طراحی و مطالعه پارامتریک یک سیستم کوپل سردساز ترموآکوستیک بر اساس نظریات ترموآکوستیک انجام شده است. کاربرد این سردساز جایی است که گرمای اتلافی موتور های پیستونی نیروگاه های تولید برق پراکنده می تواند به عنوان ورودی انرژی استفاده شود. طراحی بر اساس سادگی و کم هزینه بودن ساخت سردساز صورت می گیرد. بنابراین بخش موتور و سردساز سیستم کوپل در یک تشدید کننده با قطر ثابت محصور شده است که دو طرف تشدیدکننده بسته می باشد. سردساز موج متحرک ضریب عملکرد بیشتری نسبت به سردساز موج ایستا دارد. هدف طراحی سردساز با بالاترین عملکرد می باشد و سردساز موج متحرکی که با یک موتور موج ایستا تحریک می شود برای طراحی نهایی انتخاب می شود. سیال کاری هوا در فشار ۱ مگاپاسکال و فرکانس کاری ۶۰ هرتز است. پارامترهای هندسی استک و ریجنریتر، به عنوان قلب سیستم ترموآکوستیک، برای حداکثر کارایی سیستم کوپل سردساز ترموآکوستیک بهینه شده اند. این سامانه سردساز، با توان ورودی ۸۰۰ وات قادر است ۱۶۳ وات توان خنک کنندگی در دمای ۲۷۳ کلوین تولید کند. راندمان موتور ترموآکوستیک برای تبدیل انرژی حرارتی به صوتی ۱۲ درصد و ضریب عملکرد سردساز ۲/۳ است. سردساز کوپل ترموآکوستیکی دارای راندمان کلی ۲۰ درصد می باشد.

واژه های کلیدی: سردساز کوپل ترموآکوستیک - موتور ترموآکوستیک - نیروگاه پراکنده - موج ایستا - موج متحرک

۱- مقدمه

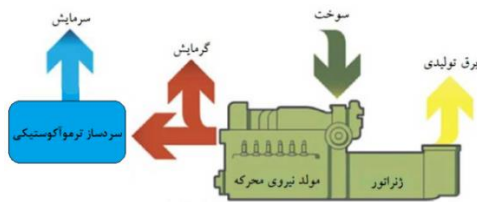
با توجه به پایان پذیر بودن انرژی های فسیلی و نقش آن ها به عنوان مهم ترین عامل آلودگی هوا و تغییرات آب و هوایی، استفاده بهینه ی انرژی از اهمیت بسیار بالایی برخوردار بوده و از چالش های قرن حاضر به شمار می رود. در نیروگاه های تولید پراکنده^۱ (DG)، هنگامی که از یک موتور احتراق داخلی برای تولید الکتریسیته استفاده می شود، بخش زیادی از انرژی که به شکل سوخت به موتور عرضه می شود، به صورت گرما در آگزوز موتور خارج می شود یا توسط سیستم های خنک کننده موتور به

محیط ریخته می شود. اگر بتوان این گرما را جذب کرد، می توان از آن برای گرم کردن فضا، گرم کردن آب و یا به عنوان توان ورودی سیستم کوپل سردساز ترموآکوستیک استفاده کرد، که به طور بالقوه مصرف انرژی را بسیار کارآمدتر می کند. سیستم های ترموآکوستیک قابلیت های ویژه ای دارند که موجب برتری آن ها از دیگر سیستم های رایج شده است. یک سیستم ترموآکوستیک چه از نوع تولید توان و چه از نوع تبرید، بسیار ارزان قیمت تر از مدل های رایج بوده و دارای قابلیت اطمینان بیشتری می باشد. برای سیال کاری در سیستم های ترموآکوستیک از گازهایی همچون هلیوم، آرگون، هوا و ... استفاده می شود که هیچ گونه اثر مخربی بر روی محیط زیست ندارند. در این سیستم ها قطعه متحرکی مانند پیستون، میل لنگ، سوپاپ و ... وجود ندارد. در نتیجه، در این سیستم ها ارتعاش به حداقل رسیده، به روغن کاری نیز نیازی نیست و تعمیر و نگهداری آن بسیار آسان است. این دلایل بزرگترین عامل در تشویق دانشمندانی است که در این زمینه به فعالیت مشغول می باشند. باید اشاره کرد که عمده ترین چالش این سیستم ها، بازده پایین آن ها در مقایسه با سیستم های رایج کنونی می باشد.

۱-۱- مروری بر ادبیات

ترموآکوستیک اساساً زمینه های ترمودینامیک و آکوستیک را ترکیب می کند. بنابراین، تعامل بین صدا و گرما را توصیف می کند. سردساز کوپل ترموآکوستیک، دستگاهی است که از ترکیب دو سیستم سردساز ترموآکوستیک و موتور ترموآکوستیک تشکیل شده است. از این رو، یک سردساز ترموآکوستیک به گرما نیاز دارد تا با استفاده از یک موج صوتی تولید شده توسط موتور ترموآکوستیک، سرما فراهم کند. تاریخچه ترموآکوستیک به قرن ها پیش برمی گردد. این پدیده برای اولین بار توسط بایرون هیگینز [۱] در سال ۱۷۷۷ ثبت شد. او کشف کرد که وقتی یک منبع گرما به شکل شمع در داخل یک لوله قرار می گیرد که دو انتهای لوله باز می باشد، نوسانات صوتی ایجاد می شود. او همچنین مشاهده کرد که فرکانس های خاصی از صدا بسته به موقعیت منبع گرما در داخل لوله تولید می شود. نادر و همکاران [۲] در سال ۲۰۲۰، یک موتور ترموآکوستیکی را به منظور بازیافت گرمای اتلافی حاصل از آگزوز یک موتور احتراق داخلی طراحی و بررسی کردند. در سال ۲۰۰۵ میلادی مطالعه ای که توسط زونتج و همکاران [۳] انجام شد، چشم انداز استفاده از پیکربندی سردساز کوپل ترموآکوستیک را به عنوان جایگزینی برای

¹ Distributed Generation



شکل ۱- شماتیک نیروگاه CCHP با سردساز کوپل ترموآکوستیکی

در یک موتور احتراق داخلی منابع اصلی گرمای اتلاف عبارتند از: اگزوز موتور، سیستم خنک‌کننده آب محفظه موتور و سیستم خنک‌کننده روغن (روغن‌کاری). گاز خروجی حاوی یک سوم انرژی سوخت و ۳۰ تا ۵۰ درصد از کل گرمای اتلافی موتور است [۶]. گرمای اگزوز معمولاً در موتورهای معمولی جذب نمی‌شود، اما در صورت نیاز به گرما، نصب یک سیستم بازیابی حرارت به اگزوز موتور آسان است. دمای اگزوز معمولاً بین ۳۷۰ تا ۵۴۰ درجه سانتیگراد است. فرآیند تولید همزمان را می‌توان بر اساس انواع مولدهای نیروی محرکه، از جمله توربین‌های گاز، توربین‌های بخار، موتورهای احتراقی و مولدهای دیگر طبقه‌بندی نمود. در شرایطی که منابع تولید انرژی اولیه نیز شامل دامنه وسیعی از جمله سوخت‌های فسیلی، زیست توده، زمین گرمایی و یا انرژی خورشیدی می‌باشند. یکی از پرکاربردترین موتورهای پیستونی گاز سوز که از آن‌ها در نیروگاه‌های تولید همزمان در ایران استفاده می‌شود، موتور ژنراتورهای گازی مدل MTU 20V4000 GS می‌باشند. در این پژوهش، موتور MTU 20V4000 GS بررسی شده است. این موتور ژنراتور دارای ۲۰ سیلندر می‌باشد و از جمله اطلاعات مورد نیاز در رابطه با گاز خروجی از اگزوز این نوع موتور می‌توان به دما و دبی جرمی اشاره کرد که مقادیر آن و سایر پارامترهای مهم این موتور ژنراتور در جدول (۱) آورده شده است.

جدول ۱- خصوصیات موتور ژنراتور MTU 20V4000 GS

پارامتر	مقدار
برق تولیدی (کیلو وات)	۲۱۴۵
گرمای تولیدی (کیلو وات)	۱۱۹۶
گرمای اگزوز (کیلو وات)	۱۰۷۸
انرژی ورودی (کیلو وات)	۴۹۹۰
راندمان الکتریکی (درصد)	۴۳
دمای گاز خروجی از اگزوز (کلون)	۷۴۵
دبی جرمی گاز خروجی از اگزوز (کیلوگرم بر ثانیه)	۲/۸۵

در این پژوهش، مطابق شکل (۲)، مقدار مورد نیازی از گاز خروجی از اگزوز موتور ژنراتور به مبدل حرارتی گرم مرتبط به موتور سیستم کوپل ترموآکوستیک انتقال داده خواهد شد و بدین صورت گرمای مورد نیاز سیستم سردساز کوپل ترموآکوستیک تامین می‌شود. با در نظر گرفتن تلفات گرما در مسیر انتقال به موتور ترموآکوستیک می‌توان دمای ۷۰۰ کلون را برای گرمای داده شده به سیستم ترموآکوستیک تخمین زد. آن جایی که گازهای خروجی از اگزوز موتور احتراق داخلی شامل محصولات مخرب احتراق می‌باشند و قابلیت خوردگی فلزات را دارند، انتخاب مبدل حرارتی گرم سیستم ترموآکوستیک حائز اهمیت می‌باشد.

تهویه مطبوع خودرو بررسی کرد. آن‌ها از گرمای باقیمانده ناشی از اگزوز موتور برای به حرکت درآوردن موتور ترموآکوستیک و در نتیجه کارکرد تهویه مطبوع استفاده کردند. به این نتیجه رسیدند که با دریافت ۳۰۰ وات گرمای اتلافی از اگزوز خودرو، می‌توان ۳۰ وات بار خنک‌کنندگی در دمای ۲۷۵ کلون تولید کرد. جوامع روستایی اغلب فاقد اتصال شبکه برق هستند اما برای ذخیره‌سازی تجهیزات حیاتی پزشکی به قابلیت‌های برودتی نیاز دارند. بنابراین، در یک پژوهشی جاورسکی و همکاران [۴] در سال ۲۰۱۸ برای رفع این مشکل از گرمای ضایعات حاصل از پخت و پز روزمره برای هدایت یک سردساز کوپل ترموآکوستیک استفاده کردند. آن‌ها توانستند با توان ورودی ۶۰۰ وات به موتور ترموآکوستیک، ۱۳۳ وات بار خنک‌کنندگی در دمای ۲۵۰ کلون تولید کنند. در زمینه سردسازهای کوپل ترموآکوستیک مطالعات تجربی نیز انجام شده است. دسای و همکارانش [۵] به طور تجربی به مطالعه و آنالیز یک یخچال ترموآکوستیک موج ایستا با محرک ترموآکوستیک موج ایستا پرداخته‌اند. هدف از بررسی این سامانه، افزایش عملکرد یک سیستم سردساز کوپل با استفاده از انتخاب‌های هندسی و شرایط عملیاتی بهتر است.

۱-۲- نیروگاه‌های موتور پیستونی

موتورهای پیستونی یا موتورهای رفت و برگشتی با اختلاف زیادی بزرگترین گروه موتورهای حرارتی ترمودینامیکی هستند که در سراسر جهان استفاده می‌شوند. هنگامی که از یک موتور احتراق داخلی برای تولید الکتریسیته استفاده می‌شود، بخش زیادی از انرژی که به شکل سوخت به موتور عرضه می‌شود، به صورت گرما در اگزوز موتور خارج می‌شود، اگر بتوان این گرما را جذب کرد می‌توان از آن برای گرم کردن فضا یا گرم کردن آب استفاده کرد، که به طور بالقوه مصرف انرژی را بسیار کارآمدتر می‌کند. راندمان تولید برق مبتنی بر موتور پیستونی از ۲۵ درصد برای موتورهای کوچک تا نزدیک به ۵۰ درصد برای موتورهای بسیار بزرگ متغیر است. این بدان معناست که بین ۵۰ تا ۷۵ درصد از انرژی سوخت در واقع به صورت گرما هدر می‌رود [۶]. اگر این گرما قابل جذب باشد، می‌توان از آن در یک سیستم تولید همزمان استفاده کرد. این نوع سیستم اغلب سیستم حرارت و برق ترکیبی^۱ (CHP) نیز نامیده می‌شود و می‌تواند بازده مصرف سوخت را تا ۸۰ درصد یا بیشتر افزایش دهد. راندمان کلی به نوع و اندازه موتور بستگی دارد. در واقع تولید همزمان از نگاه ترمودینامیکی به معنای تولید دو یا چند شکل از انرژی با استفاده از یک منبع انرژی اولیه می‌باشد و از آن‌جا که دو شکل معمول انرژی، حرارتی و مکانیکی هستند و انرژی مکانیکی غالباً برای راندن یک ژنراتور الکتریکی به کار برده می‌شود، این فرآیند به تولید همزمان برق و حرارت (CHP) شناخته می‌گردد. حال در صورت به کارگیری سردساز ترموآکوستیکی، جهت تولید برودت و استفاده از گرمای قابل بازیافت نیروگاه تولید برق، به منظور تأمین انرژی مورد نیاز موتور ترموآکوستیک کوپل شده با سردساز، مطابق با شکل (۱)، امکان تولید همزمان برق، گرما و سرما نیز وجود خواهد داشت که چنین سیستمی را سیستم برودت، حرارت و برق ترکیبی^۲ (CCHP) می‌نامند.

^۱ Combined Heat and Power

^۲ Combined Cooling, Heat and Power

عمق نفوذ لزج، ضخامت لایه اطراف صفحه جامد است که در آن اثرات لزجت قابل توجه می باشد.

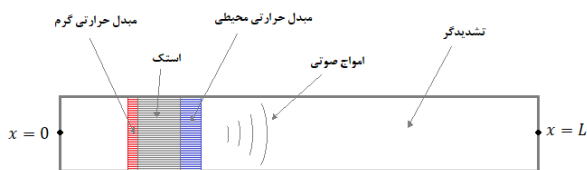
$$\delta_v = \sqrt{\frac{2\mu}{\rho\omega}} \quad (2)$$

در روابط بالا، K ضریب هدایت حرارتی، C_p گرمای ویژه در فشار ثابت، ρ چگالی گاز، ω فرکانس زاویه ای و μ ویسکوزیته دینامیکی گاز است. لازم به ذکر است که در سردسازهای ترموآکوستیک، دامنه جابجایی گاز $|\zeta_1|$ ، بسیار کوچکتر از طول موج صوتی و طول افقی استک و بسیار بزرگتر از هر دو عمق نفوذ حرارتی و لزج می باشد [۹].

$$\delta_k, \delta_v \ll |\zeta_1| \ll \lambda, L_s \quad (3)$$

۲-۳- شرایط مرزی

دستگاه های ترموآکوستیک را از نظر نوع موج (سیکل کاری) می توان به سیستم های موج رونده و موج ایستا دسته بندی کرد. وابسته به این که فشار و سرعت آکوستیکی تقریباً هم فاز باشند یا تقریباً ۹۰ درجه با هم اختلاف فاز داشته، دستگاه به ترتیب موج رونده و موج ایستا خواهد بود. اگرچه تبادل حرارتی بین استک و سیال کاری در هر دو سیستم موج ایستا و رونده مشابه است اما تفاوت اصلی بین آن ها در طرح و ساختار لوله تشدید کننده^۲ می باشد [۱۰]. یک سیستم موج رونده توسط مرزی محدود نمی شوند و صدا را تا زمانی که تلف شود، قادر به حرکت می سازند. برعکس، سیستم های موج ایستا شامل یک لوله استوانه ای خطی می باشند که از یک مرز تشکیل شده و امواج صوتی را منعکس می کند. در نتیجه، سیستم های موج رونده به دلیل عدم برگشت ناپذیری ذاتی نسبت به همتایان موج ایستای خود کارآمدتر هستند [۱۱]. در این پژوهش بخش موتور و سردساز سیستم کوپل در یک لوله تشدید کننده با قطر ثابت محصور شده است که دو طرف تشدیدکننده بسته می باشد. در شکل (۴) شماتیک لوله تشدید کننده شامل موتور موج ایستا مشاهده می شود.



شکل ۴- شماتیک موتور ترموآکوستیک موج ایستا

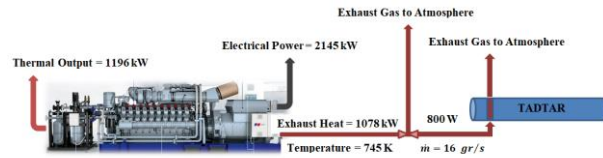
ابتدا و انتهای سامانه بسته می باشد یعنی سرعت حجمی در ابتدا و انتهای سامانه صفر شده که در رابطه (۴) آورده شده است.

$$U_1 = 0 \text{ at } x = 0, x = L \quad (4)$$

توان صوتی از رابطه زیر بدست می آید:

$$\dot{E}_{Acoustic} = \frac{1}{2} |P_1| |U_1| \cos(\phi_{PU}) \quad (5)$$

جنس مبدل حرارتی گرم فولاد ضد زنگ انتخاب می شود چرا که در برابر حرارت بالا و گاز های خورنده مقاوم است و در برابر خوردگی مقاومت بالایی از خود نشان می دهد.



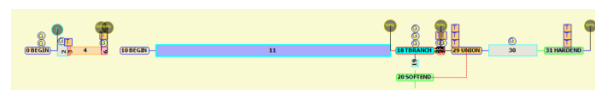
شکل ۲- بلوک دیاگرام سردساز ترموآکوستیک برای بازیابی گرمای اتلافی

۲-۲ مدل عددی

نظری ترموآکوستیک اساساً مبتنی بر خطی سازی با دامنه کم معادله ناویر-استوکس با نوسانات سینوسی همه متغیرها است که توسط رات در سال ۱۹۸۰ گزارش شده است [۷]. معادلات ترموآکوستیک حاکم، از معادلات خطی ناویر-استوکس، پیوستگی، انرژی و همچنین با استفاده از قانون دوم ترمودینامیک حاصل شده اند. اولین معادله حاکم، معادله موج رات نامیده می شود، که معادله موج فشار برای زمانی است که گرادیان دما در امتداد استک وجود دارد. دومین معادله حاکم معادله شار انرژی است و معادله سوم حاکم، معادله توان صوتی نامیده می شود که می توان از آن برای استخراج توان صوتی جذب شده در استک استفاده کرد.

۲-۱- نرم افزار دلتا ای سی

نرم افزار دلتا ای سی^۱ یک برنامه تخصصی است که توسط وارد و سوئیفت در آزمایشگاه ملی لوس آلاموس برای بررسی عملکرد سامانه های ترموآکوستیک نوشته شده است [۸]. دلتا ای سی یک نرم افزار شبیه سازی است که به طور گسترده در طراحی سردسازها و موتورهای ترموآکوستیک و برای پیش بینی کارایی آن ها کاربرد دارد. این نرم افزار بر پایه نظریه ترموآکوستیک خطی طراحی شده است. در این پژوهش برای طراحی و بهینه سازی سیستم کوپل ترموآکوستیک از این نرم افزار استفاده شده است. شکل (۳) یک مدل ساده از سردساز کوپل ترموآکوستیک را نشان می دهد.



شکل ۳- مدل عددی سردساز کوپل ترموآکوستیک در نرم افزار DeltaEC

۲-۲- مقیاس های طولی در سیستم های ترموآکوستیک

در یک سیستم ترموآکوستیک، دو مقیاس طولی از نظر طراحی مهم هستند. یکی عمق نفوذ حرارتی (δ_k) و دیگری عمق نفوذ لزج (δ_v) نام دارد. این دو مقیاس به ترتیب در روابط (۱) و (۲) آورده شده اند. عمق نفوذ حرارتی مربوط به ضخامت لایه در اطراف صفحه جامد است که از طریق آن گرما می تواند در طول یک چرخه کامل نوسانی یک توده گاز پخش شود.

$$\delta_k = \sqrt{\frac{2K}{\rho C_p \omega}} \quad (1)$$

² Resonator

¹ DeltaEC Software

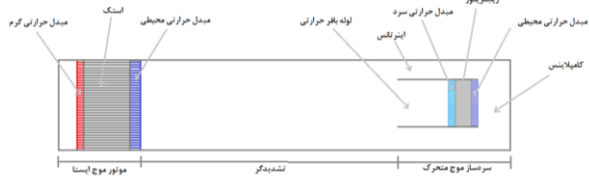
در این بخش موتور ترموآکوستیک موج ایستایی در نرم افزار دلتا ای سی طراحی و بهینه سازی شده است. پارامترهای عملکردی و خروجی این سامانه پس از بهینه سازی در جدول (۲) آورده شده است. در بخش بعدی برای طراحی سامانه سردساز کوپل ترموآکوستیک، بخش سردساز به این موتور اضافه شده و فرآیند بهینه سازی انجام شده است.

جدول ۲- پارامترهای عملکردی و خروجی سامانه موتور ترموآکوستیک

واحد	مقدار	پارامترهای عملکردی
وات	۸۰۰	مقدار حرارت منتقل شده در مبدل حرارتی گرم
وات	۶۷۲	مقدار حرارت منتقل شده به مبدل حرارتی محیطی
مگاپاسکال	۱	فشار متوسط
وات	۱۲۷	بیشینه توان صوتی تولیدی
درصد	۱۶	بیشینه راندمان موتور
هرتز	۶۰	فرکانس

۳-۲- طراحی و بهینه سازی سردساز کوپل ترموآکوستیک

در این بخش به طراحی و بهینه سازی سیستم سردساز موج متحرک کوپل شده با موتور موج ایستا پرداخته می شود که شماتیک آن در شکل (۶) قابل مشاهده می باشد. تاثیر پارامترهای مختلف بر روی عملکرد کلی سامانه کوپل ترموآکوستیک مورد بررسی قرار می گیرد و در ادامه عملکرد کلی سیستم کوپل تحلیل خواهد شد.



شکل ۶- شماتیک سیستم سردساز کوپل ترموآکوستیک

شرایط عملکردی سیستم سردساز کوپل ترموآکوستیک برای طراحی و بهینه سازی در نرم افزار دلتا ای سی در جدول (۳) آورده شده است.

جدول ۳- پارامترهای عملکردی سامانه سردساز کوپل ترموآکوستیک

واحد	مقدار	پارامتر
وات	۸۰۰	گرمای داده شده به موتور
کلوین	۷۰۰	دمای مبدل حرارتی گرم موتور
کلوین	۳۰۵	دمای مبدل حرارتی محیطی موتور
کلوین	۳۰۵	دمای مبدل حرارتی محیطی سردساز
کلوین	۲۷۳	دمای مبدل حرارتی سرد سردساز

با استفاده از معادله های توان صوتی و مومنوم شرایط مرزی در ابتدا و انتهای سامانه به صورت رابطه (۶) در می آیند.

$$\frac{dp_1}{dx} = 0, \dot{E}_{acoustic} = 0 \text{ at } x = 0, x = L \quad (6)$$

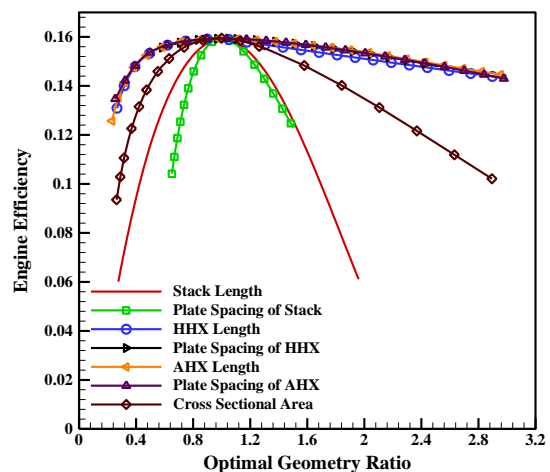
۳- نتایج عددی

۳-۱- طراحی و بهینه سازی موتور ترموآکوستیک

در فرآیند بهینه سازی موتور ترموآکوستیکی موج ایستا (شکل (۴)) مهم ترین پارامترهایی که روی عملکرد سامانه اثر می گذارند و در پژوهش های دیگر نیز بررسی شده است [۱۲]، پارامترهای هندسی مربوط به استک موتور می باشد. اگرچه پارامترهای هندسی دیگر اجزا مانند مبدل های حرارتی سرد و گرم تاثیر کمتری بر عملکرد سامانه دارند اما پارامترهای طراحی این اجزا نیز در فرآیند بهینه سازی کارایی موتور بررسی می شود. ابعاد بهینه اجزای موتور توسط بهینه سازی در نرم افزار دلتا ای سی به دست می آید. فرآیند بهینه سازی با تغییر دادن مقدار پارامترهای هر بخش از دستگاه شامل طول و فاصله بین صفحات استک، طول و فاصله بین صفحات مبدل حرارتی گرم، طول و فاصله بین صفحات مبدل حرارتی سرد و سطح مقطع موتور صورت می گیرد. فرآیند بهینه سازی هنگامی که به پیکربندی بهینه با بیشترین عملکرد موتور رسید متوقف می شود، که عملکرد موتور در رابطه (۷) آورده شده است.

$$Engine \ Efficiency = \frac{\dot{E}_{Acoustic}}{Q_H} \quad (7)$$

در رابطه بالا، Q_H گرمای منتقل شده به مبدل حرارتی گرم و $\dot{E}_{Acoustic}$ توان صوتی تولید شده توسط سیستم موتور ترموآکوستیک می باشد. تحلیل حساسیت اثر پارامترهای هندسی هر بخش روی عملکرد موتور در شکل (۵) آورده شده است. در این شکل پارامترهای هندسی سامانه موتور با استفاده از مقدار بهینه هر پارامتر، بی بعد شده است. در نتیجه نسبت هندسی بهینه برابر با یک شده و راندمان موتور در آن بیشینه می شود. مشاهده می شود که سطح مقطع موتور، طول استک و فاصله بین صفحات استک بیشترین اثر را بر راندمان موتور داشته و تغییرات کم این سه پارامتر باعث تغییرات شدید راندمان موتور می شود. همچنین می توان نتیجه گرفت که راندمان موتور حساسیت چندانی به تغییر طول و فاصله بین صفحات مبدل های حرارتی ندارد. در نهایت با بهینه کردن پارامترهای هندسی موتور می توان به راندمان ۱۶ درصدی برای موتور ترموآکوستیک رسید.



شکل ۵- اثر نسبت هندسی بهینه شده روی راندمان موتور ترموآکوستیک

یک فرکانس کاری مشخص باعث کوچک شدن دستگاه و در نتیجه کم شدن هزینه ساخت آن می شود و این نکته که استفاده از هوا به عنوان گاز کاری هزینه ای در بر ندارد. همچنین دسترسی راحت تری به هوا نسبت به سایر گاز ها وجود دارد. بنابراین هوا به عنوان گاز کاری سیستم کوپل انتخاب شده است. پارامتر های گاز کاری در جدول (۴) آورده شده اند.

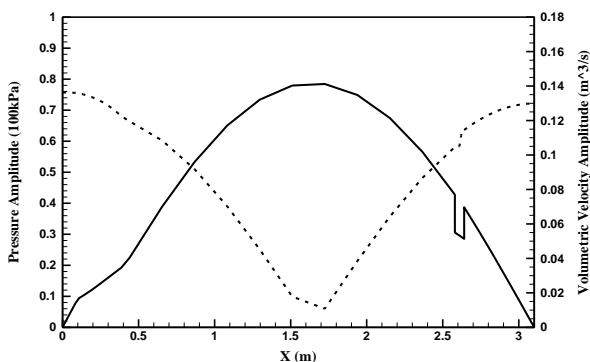
جدول ۴- پارامتر های گاز کاری

Parameters	Value	Unit
Dynamic Viscosity (μ)	2.05×10^{-5}	kg/m.s
Thermal Conductivity (K)	2.96×10^{-2}	W/m.K
Sound Velocity (a)	372.19	m/s
Ratio of Isobaric to Isochoric Specific Heat (γ)	1.4	
Thermal Penetration Depth (δ_k)	1.24×10^{-4}	m
Viscous Penetration Depth (δ_v)	1.03×10^{-4}	m
Prandtl Number (σ)	0.695	

۲-۲-۳- فشار

چگالی توان هر سیستم ترموآکوستیک مستقیماً با فشار متوسط گاز در حال نوسان متناسب است [۱۳]. بنابراین، داشتن فشار متوسط بالا سودمند است. نکته ای که باید در نظر گرفت این است که عمق نفوذ حرارتی (δ_k) با ریشه درجه دوم فشار متوسط نسبت معکوس دارد. بنابراین، با توجه به این نکته، انتخاب فشار متوسط خیلی زیاد، δ_k را به مقادیر کوچک کاهش می دهد، که به معنی فاصله کوچک بین صفحات استک است. فراتر از یک مقدار معین، این می تواند منجر به کار و زمان فشرده ساخت استک شود و گاهی اوقات حتی ممکن است غیرممکن باشد. فشار متوسط سامانه کوپل برابر با ۱ مگاپاسکال و دامنه فشار نوسانی آن برابر با ۷۰/۶۶ کیلوپاسکال می باشد.

در شکل (۸) نمودار تغییرات دامنه فشار و دامنه سرعت حجمی در طول سیستم کوپل رسم شده است (خط چین و خط توپر به ترتیب مربوط به دامنه فشار و دامنه سرعت حجمی می باشد) و همانطور که مشاهده می شود با توجه به این که سیستم کوپل از نوع موج ایستا می باشد در ابتدا و انتهای سیستم گره سرعت و در وسط سیستم گره فشار اتفاق می افتد.

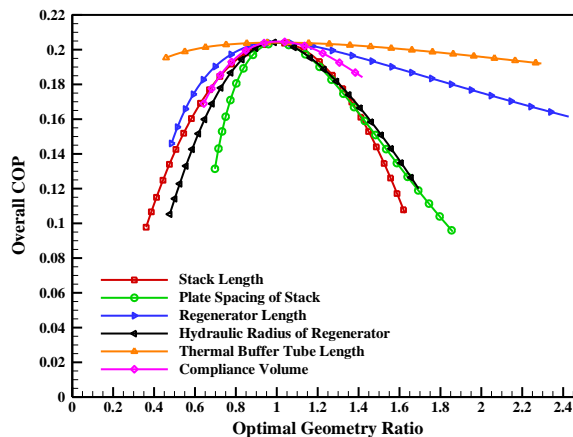


شکل ۸- تغییرات دامنه فشار و سرعت حجمی در طول سیستم کوپل

در این بخش بهینه سازی برای رسیدن به حداکثر ضریب عملکرد کلی سامانه سردساز کوپل انجام خواهد شد. برای محاسبه ضریب عملکرد کلی سامانه سردساز کوپل از رابطه (۸) استفاده می شود.

$$Overall COP = \frac{\dot{Q}_{load}}{Q_H} \quad (8)$$

در رابطه بالا، \dot{Q}_{load} توان خنک کنندگی سردساز و Q_H گرمای داده شده به موتور سامانه کوپل می باشد. مشابه تحلیل حساسیتی که برای موتور موج ایستا انجام شد، در این بخش حساسیت سامانه کوپل نسبت به تغییر پارامتر های هندسی مختلف سامانه مورد بررسی قرار گرفته است. در بخش های قبلی از تحلیل حساسیت موتور ترموآکوستیک نتیجه گیری شد که عملکرد موتور حساسیت چندانی به تغییر پارامتر های هندسی مبدل های حرارتی ندارد. بنابراین در این بخش دیگر پارامتر های هندسی مربوط به مبدل های حرارتی بررسی نشده است. در شکل (۷) نمودار حساسیت ضریب عملکرد کلی سامانه کوپل نسبت به تغییر پارامتر های هندسی سامانه آورده شده است. مشاهده می شود که فاصله بین صفحات استک و شعاع هیدرولیکی ریجنریتور بیشترین تاثیر را بر ضریب عملکرد کلی دارند. میان پارامتر های هندسی بررسی شده تغییر طول لوله بافر حرارتی کمترین اثر را بر ضریب عملکرد سامانه کوپل دارد. حساسیت ضریب عملکرد سامانه کوپل نسبت به تمامی پارامتر های هندسی بررسی شده زیاد می باشد (به جز طول لوله بافر حرارتی که حساست کمتری مشاهده می شود).

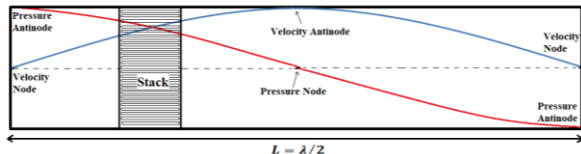


شکل ۷- اثر نسبت هندسی بهینه شده روی ضریب عملکرد کلی سامانه سردساز کوپل ترموآکوستیک

در ادامه پارامتر های عملکردی و هندسی مربوط به بخش های مختلف سیستم سردساز کوپل ترموآکوستیکی به طور مجزا بررسی و تحلیل خواهد شد.

۳-۲-۱- انتخاب گاز کاری

چگالی توان یک دستگاه ترموآکوستیکی با سرعت صوت در گاز کاری متناسب است [۱۳]. با توجه به این که گاز هلیوم بالاترین سرعت صوت را داراست و ضریب هدایت حرارتی بالایی هم دارد، می تواند یک گزینه مناسب به عنوان گاز کاری باشد. اما بالا بودن سرعت صوت هلیوم باعث افزایش طول تشدیدکننده و بزرگ شدن دستگاه شده و هزینه های ساخت و نگهداری را افزایش می دهد. از سوی دیگر سرعت صوت پایین هوا برای



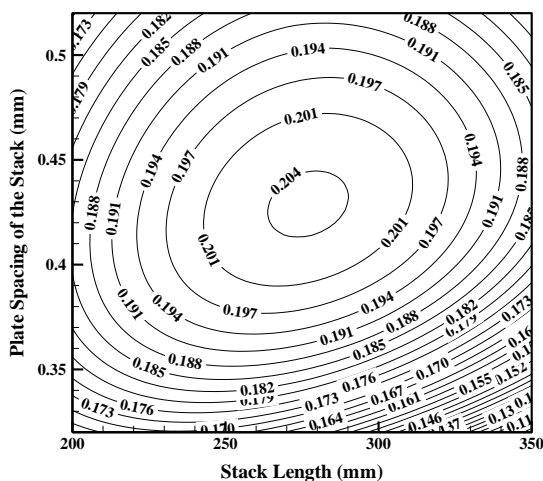
شکل ۹- گره و پادگره سرعت و فشار در سامانه موج ایستا

در پادگره سرعت، تلفات ویسکوز در بالاترین حد خود است زیرا بالاترین مقدار سرعت در این نقطه است و در پادگره فشار، تلفات حرارتی بالاترین است. بنابراین محل قرار گیری استک باید بین گره سرعت و گره فشار باشد. موقعیت مطلوب قرار گیری مرکز استک پیشنهاد شده توسط سوئیفت [۹]، تقریباً $\lambda/20$ است که از آنتی گره فشار اندازه گیری می شود. مرکز استک موتور در فاصله 0.2476 متری از دیواره سمت چپ سیستم کوپل قرار دارد.

برای یک استک با صفحات موازی، فاصله بهینه صفحات استک تقریباً بین $2\delta_k$ تا $4\delta_k$ می باشد [۱۴]. فاصله بین صفحات و ضخامت صفحات استک موتور به ترتیب برابر با 0.43 میلی متر و 0.5 میلی متر می باشد. بنابراین از رابطه (۱۰) ضریب تخلخل استک برابر با 0.46 به دست می آید.

$$\phi = \frac{y_0}{y_0 + l} \quad (10)$$

در رابطه بالا، y_0 نصف فاصله بین صفحات استک و l نصف ضخامت صفحات استک می باشد. افزایش طول استک منجر به افت فشار بیشتر در سراسر استک می شود که عملکرد سیستم را کاهش می دهد و از سوی دیگر استک با طول خیلی کوچک برای ایجاد یک اثر تبرید خوب کافی نخواهد بود. بنابراین طول بهینه ای برای استک باید انتخاب شود. در شکل (۱۰) اثر طول و فاصله بین صفحات استک موتور بر ضریب عملکرد کلی سامانه کوپل به طور همزمان بررسی شده و کانتور آن رسم شده است.



شکل ۱۰- کانتور اثر طول و فاصله بین صفحات استک موتور روی ضریب عملکرد کلی سامانه کوپل

۳-۲-۳- فرکانس کاری

فرکانس سیستم از رابطه (۹) به دست می آید که در این رابطه a سرعت صوت و λ طول موج می باشد.

$$f = \frac{a}{\lambda} \quad (9)$$

از رابطه بالا مشخص می شود که برای تعیین فرکانس، سرعت صوت و طول موج مورد نیاز است که به نوبه خود به نوع گاز، شرایط مرزی و طول تشدیدکننده بستگی دارد. هنگامی که سیستم در حال تشدید است، طول کلی دستگاه معمولاً ممکن است نصف طول موج یا یک چهارم طول موج باشد. یک تشدیدگر نیم طول موج دارای دو سر بسته است که منجر به گره های سرعت و پادگره های فشار در هر انتهای تشدیدکننده می شود. در تشدیدکننده نیم طول موج، موده های اساسی دارای طول تشدیدگری هستند که با نیم طول موج مطابقت دارد. دو عامل مهم دیگر وجود دارد که فرکانس نوسان یک دستگاه ترموآکوستیک را تعیین می کند. یکی چگالی توان است که به طور خطی با فرکانس تشدید صوتی متناسب است. بنابراین مطلوب است که فرکانس تا حد ممکن زیاد باشد. اما عامل دوم، عمق نفوذ حرارتی است که با جذر فرکانس نسبت معکوس دارد. بنابراین، داشتن فاصله بین صفحات استک بزرگتر به این معنی است که فرکانس باید کوچکتر باشد. فرکانس بهینه باید با در نظر گرفتن این پارامترهای مرتبط انتخاب شود. فرکانس سیستم کوپل 60 هرتز می باشد و طول موج سیستم تقریباً برابر با $6/2$ متر به دست می آید.

۳-۲-۴- بهینه سازی استک

هندسه های مختلف استک^۱ در دستگاه های ترموآکوستیک موج ایستا استفاده می شود. برخی از آن ها استک با صفحه های موازی، استک با منافذ مستطیلی، استک های مارپیچی، آرایه های پین و ... هستند. هر یک از این هندسه ها را می توان به طور موثر برای ایجاد اثر ترموآکوستیک استفاده کرد. بالاترین چگالی توان برای هندسه استک آرایه پین و هندسه صفحه موازی به دست می آید. استک با منافذ دایره ای و منافذ مستطیلی، چگالی توان کمتری دارند [۹]. در مقایسه با هندسه استک آرایه پین، ساخت هندسه صفحه موازی آسان تر است و از این رو انتخاب می شود. در هنگام انتخاب ماده استک، باید ماده ای با کمترین مقدار هدایت حرارتی و بالاترین ظرفیت حرارتی ممکن انتخاب شود. استک ها را می توان از فلزات مختلفی مانند فولاد ضد زنگ، سرامیک، پلاستیک یا فایبرگلاس، بسته به کاربردی که دارند، ساخت. اگر مواد استک دارای رسانایی بالایی باشد، انتقال حرارت در سراسر استک به جای گاز از طریق مواد استک انجام می شود که منجر به عدم تولید اثر ترموآکوستیک می شود. بنابراین جنس استک موتور، فولاد ضد زنگ انتخاب شده است. همانطور که در شکل (۹) مشاهده می شود، با در نظر گرفتن یک تشدیدکننده به طول $\lambda/2$ سرعت در دو انتهای سیستم صفر است و در $x = \lambda/2$ نیز تغییرات فشار کم است.

¹ Stack

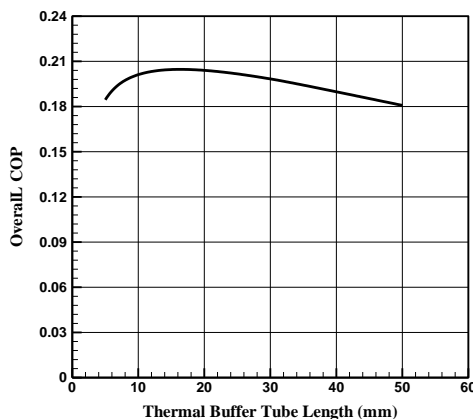
حدود دو تا چهار مبدل حرارتی در سیستم وجود دارد. این سامانه شامل چهار مبدل حرارتی می باشد که مشخصات آن ها پس از طراحی و بهینه سازی در جدول (۵) آورده شده است.

جدول ۵- پارامتر های هندسی مبدل های حرارتی سامانه کوپل

واحد	مقدار	پارامتر
میلی متر	۲۴	طول مبدل حرارتی گرم موتور
میلی متر	۱/۱۷۵	فاصله بین صفحات مبدل حرارتی گرم موتور
	۰/۷	ضریب تخلخل مبدل حرارتی گرم موتور
میلی متر	۵۵	طول مبدل حرارتی محیطی موتور
میلی متر	۱/۱۵	فاصله بین صفحات مبدل حرارتی محیطی موتور
	۰/۷	ضریب تخلخل مبدل حرارتی محیطی موتور
میلی متر	۱۴/۹	طول مبدل حرارتی محیطی سردساز
میلی متر	۰/۵	فاصله بین صفحات مبدل حرارتی محیطی سردساز
	۰/۷۵	ضریب تخلخل مبدل حرارتی محیطی و سرد سردساز
میلی متر	۱۲/۴	طول مبدل حرارتی سرد سردساز
میلی متر	۰/۵	فاصله بین صفحات مبدل حرارتی سرد سردساز

۳-۲-۷- لوله بافر حرارتی

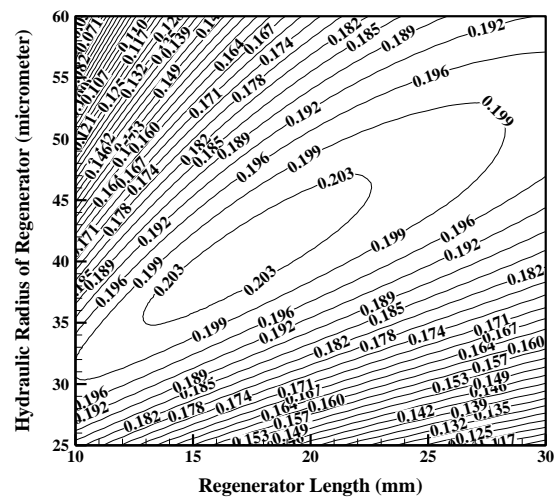
سطح مقطع لوله بافر حرارتی^۲ برابر با سطح بخش سردساز سامانه کوپل بوده که لوله ای ۳ اینچی می باشد. ضخامت لوله بافر نیز برابر با ۱ میلی متر می باشد و اثر طول آن روی ضریب عملکرد کلی سامانه کوپل در شکل (۱۲) آورده شده است. لوله بافر حرارتی قطعه ای است که برای عایق کردن مبدل سرد از محیط اطراف استفاده می شود. در لوله بافر حرارتی دمای گاز از سمت مبدل سرد سردساز به سمت دیگر سامانه کوپل به تدریج افزایش می یابد. اگر لوله بافر حرارتی خیلی کوتاه باشد نمی تواند از نشت گرما به مبدل سرد به خوبی جلوگیری کند. از طرف دیگر اگر طول آن زیاد باشد باعث زیاد شدن افت های لزج می شود. بیشترین ضریب عملکرد سامانه کوپل در طول لوله بافر حرارتی ۱۶/۴۷ میلی متر به دست می آید.



شکل ۱۲- نمودار اثر طول لوله بافر حرارتی روی ضریب عملکرد کلی سامانه کوپل

۳-۲-۵- بهینه سازی ريجنراتور

ريجنراتور^۱ مهم ترین بخش سردساز سامانه کوپل ترموآکوستیکی می باشد. در سردساز های ترموآکوستیکی موج متحرک برای ريجنراتور به طور گسترده از توری های فولادی ضد زنگ استفاده می شود. بنابراین در این پژوهش توری فولادی ضد زنگ به عنوان ريجنراتور سردساز انتخاب می شود. توری فولادی دارای شعاع هیدرولیکی کم در مقایسه با عمق نفوذ حرارتی است، بنابراین تماس حرارتی خوبی بین گاز و جامد مجاورش برقرار می شود. نسبت شعاع هیدرولیکی به عمق نفوذ حرارتی (r_h/δ_k) ، معمولاً به عنوان پارامتر بهینه سازی برای هندسه ريجنراتور در نظر گرفته می شود [۱۵]. این پارامتر نشان دهنده موثر بودن تماس حرارتی بین گاز و مرز جامد است. اگر این پارامتر کم باشد تماس حرارتی عالی بین گاز کاری و جامد برقرار می شود ولی این عمل باعث افزایش افت فشار در عبور گاز از ريجنراتور می شود، که باعث کاهش دامنه سرعت حجمی عبوری از ريجنراتور و در نتیجه کاهش توان آکوستیکی عبوری برای تولید اثر سرمایش ترموآکوستیکی کافی می شود. بیشینه ضریب عملکرد کلی سامانه در شعاع هیدرولیکی ۳۹/۶ میکرومتر به دست می آید. طول ريجنراتور نیز اثری مشابه با شعاع هیدرولیکی روی ضریب عملکرد کلی سامانه کوپل دارد. معمولاً ريجنراتور کوتاه تر مقاومت کمتری در برابر جریان ایجاد کرده و توان صوتی کمتری را تلف می کند. اما اگر طول ريجنراتور زیاد باشد، افت لزج خیلی بیشتر شده و توان صوتی بیشتری در ريجنراتور تلف می شود. بیشینه ضریب عملکرد کلی در طول ريجنراتور ۱۶/۴۸ میلی متر به دست می آید. در شکل (۱۱) اثر طول و شعاع هیدرولیکی سردساز بر ضریب عملکرد کلی سامانه کوپل به طور همزمان بررسی شده و کانتور آن رسم شده است.



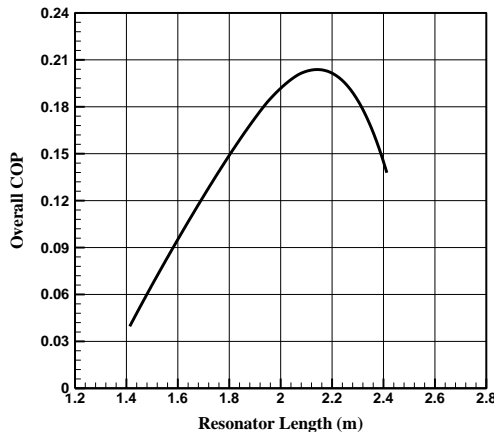
شکل ۱۱- کانتور اثر طول و شعاع هیدرولیکی ريجنراتور روی ضریب عملکرد کلی سامانه کوپل

۳-۲-۶- مبدل های حرارتی

در این سامانه کوپل از ساده ترین نوع مبدل های حرارتی یعنی مبدل با صفحات موازی استفاده شده است. بسته به نوع دستگاه ترموآکوستیک،

² Thermal buffer tube

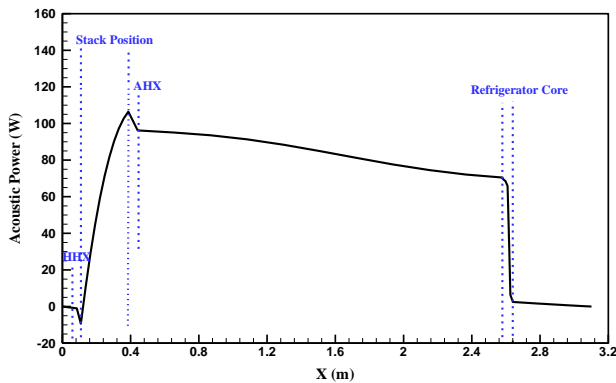
¹ Regenerator



شکل ۱۴- نمودار اثر طول تشدیدکننده روی ضریب عملکرد کلی سامانه کوپل

۳-۲-۱۱- عملکرد سامانه سردساز کوپل

در شکل (۱۵) توزیع توان صوتی در طول سیستم سردساز کوپل نمایش داده شده است. همانطور که مشاهده می شود، ۱۰۶/۴۸ وات توان صوتی توسط استک موتور تولید می شود که ۱۰/۲۶ وات از این توان صوتی در مبدل حرارتی محیطی موتور و ۲۵/۷۵ وات در تشدیدگر تلف می شود. در نهایت تقریباً ۷۰/۵ وات توان صوتی به بخش سردساز سیستم کوپل داده می شود. بخش سردساز با دریافت توان صوتی از بخش موتور سامانه قادر است تقریباً ۱۶۲/۳ وات توان خنک کنندگی در دمای ۲۷۳ کلوین تولید کند.

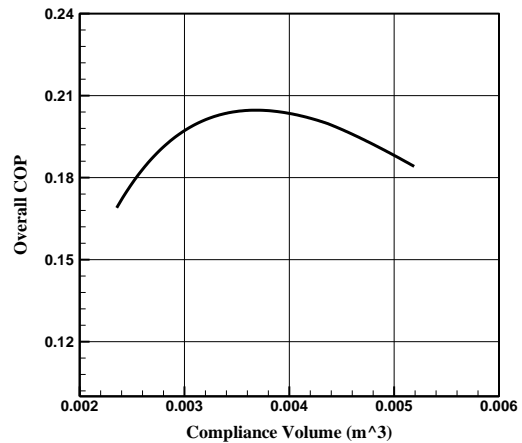


شکل ۱۵- نمودار توزیع توان صوتی در طول سامانه سردساز کوپل

نمودار تغییرات دما در طول سیستم کوپل در شکل (۱۶) آورده شده است. دمایی که در آن گرمای تلف شده به استک تحویل داده می شود، ۷۰۰ کلوین در نظر گرفته می شود. دمای مبدل های حرارتی محیطی نیز ۳۰۵ کلوین می باشد. همانطور که مشاهده می شود دمای گاز در ناحیه ای از استک موتور تا انتهای چپ سیستم تقریباً در ۶۷۴ کلوین ثابت است. زیرا مبدل های حرارتی گرم و محیطی متصل به استک موتور در دمای تنظیم شده خود حفظ می شوند. اختلاف دمای تولید شده در سراسر استک ۳۶۴ کلوین است. در بخش سردساز سیستم کوپل، انتهای سرد در دمای ۲۷۳ کلوین حفظ می شود در حالی که انتهای گرم در دمای محیطی ۳۰۵ کلوین است.

۳-۲-۸- کامپلاینس

سطح مقطع کامپلاینس^۱ برابر با سطح مقطع تشدیدکننده و بخش موتور می باشد که برابر است با ۰/۰۰۸۱ متر مربع (لوله ۴ اینچی) می باشد. از آن جایی که حجم کامپلاینس پارامتر تاثیر گذاری بر عملکرد سامانه می باشد، بنابراین طول کامپلاینس است که حجم آن را تعیین می کند. کامپلاینس مانند یک فضا برای ذخیره و تغذیه توان آکوستیکی به سردساز عمل می کند و همچنین اختلاف فاز بین فشار و سرعت حجمی را در ریجنریتور کنترل می کند. در شکل (۱۳) اثر حجم کامپلاینس روی عملکرد کلی سامانه کوپل آورده شده است که بیشینه ضریب عملکرد در حجم کامپلاینس ۰/۰۰۳۷ متر مکعب (۳/۷ لیتر) به دست می آید. حجم کمتر یا بیشتر کامپلاینس نسبت به مقدار بهینه باعث افت ضریب عملکرد سامانه کوپل می شود.



شکل ۱۳- نمودار اثر حجم کامپلاینس روی ضریب عملکرد کلی سامانه کوپل

۳-۲-۹- اینرتانس

دو پارامتر هندسی مهم اینرتانس^۲ طول و سطح مقطع آن می باشد. سطح مقطع اینرتانس از تفاضل سطح مقطع تشدیدگر و سطح مقطع بخش سردساز سامانه کوپل به دست می آید که برابر با ۰/۰۰۳۳ متر مربع می باشد. طول اینرتانس نیز از مجموع طول ریجنریتور، لوله بافر حرارتی، مبدل حرارتی سرد سردساز و مبدل حرارتی محیطی سردساز به دست می آید که برابر با ۶۰/۲۵ میلی متر می باشد.

۳-۲-۱۰- تشدید کننده

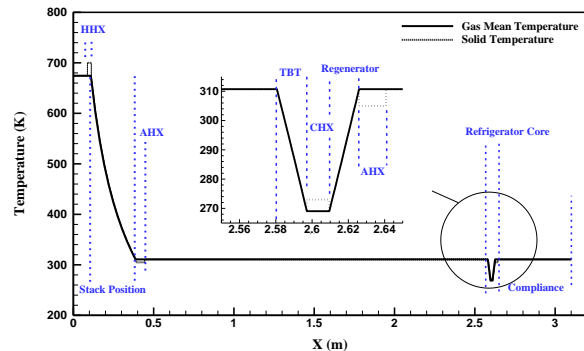
فضای بین بخش سردساز و موتور مربوط به سامانه کوپل همانطور که در شکل (۶) نشان داده شده است، همان تشدید کننده می باشد که اثر طول آن روی ضریب عملکرد کلی سامانه کوپل در شکل (۱۴) نشان داده شده است. بالاترین عملکرد سامانه کوپل در طول تشدید کننده برابر با ۲۱۴/۳ میلی متر اتفاق می افتد.

^۱ Compliance

^۲ Inertance

Journal of natural philosophy, chemistry and the arts, Vol. 1, Issue. 129-131, p. p. 2, 1802.

- [2] Nader, W. B., Chamoun, J., & Dumand, C.; “Thermoacoustic engine as waste heat recovery system on extended range hybrid electric vehicles”, *Energy Conversion and Management*, Vol. 215, p. p. 112912, 2020.
- [3] Zoontjens, L., Howard, C., Zander, A., & Cazzolato, B.; “Feasibility study of an automotive thermoacoustic refrigerator”, *Proceedings of acoustics*, Busselton, Australia, 2005.
- [4] Saechan, P., & Jaworski, A. J.; “Thermoacoustic cooler to meet medical storage needs of rural communities in developing countries—High pressure system”, *Thermal Science and Engineering Progress*, Vol. 8, p. p. 31-46, 2018.
- [5] Desai, A., Desai, K., Naik, H., & Atrey, M.; “Experimental study and analysis of a thermoacoustically driven thermoacoustic refrigerator”, *Sādhanā*, Vol. 45, Issue. 1, p. p. 1-12, 2020.
- [6] Breeze, P.; *Piston engine-based power plants*, Academic Press, 2017.
- [7] Rott, N.; “Thermoacoustics”, *Advances in applied mechanics*, Vol. 20, p. p. 135-175, 1980.
- [8] Ward, B., Clark, J. and Swift, G. W.; “Design Environment for Low Amplitude ThermoAcoustic Energy Conversion (DELTAEC) programme. Version 6.3 b11”, Los Alamos National Laboratory, New Mexico, USA, 2012.
- [9] Swift, G. W.; *Thermoacoustics: A unifying perspective for some engines and refrigerators*, Acoustical society of America, 2003.
- [10] Yasui, K., Kozuka, T., Yasuoka, M., & Kato, K.; “Revisiting the difference between traveling-wave and standing-wave thermoacoustic engines—A simple analytical model for the standing-wave one”, *Journal of the Korean Physical Society*, Vol. 67, Issue. 10, p. p. 1755-1766, 2015.
- [11] Ceperley, P. H.; “A pistonless Stirling engine - The traveling wave heat engine”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 66, Issue. 5, p. p. 1508-1513, 1979.
- [12] Swift, G. W.; “Thermoacoustic engines”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 84, Issue. 4, p. p. 1145-1180, 1988.
- [13] Olson, J., & Swift, G.; “Similitude in thermoacoustics”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 95, Issue. 3, p. p. 1405-1412, 1994.
- [14] Tijani, M., Zeegers, J., & De Waele, A.; “The optimal stack spacing for thermoacoustic refrigeration”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 112, Issue. 1, p. p. 128-133, 2002.
- [15] Jaworski, A. J. & Mao, X.; “Development of thermoacoustic devices for power generation and refrigeration. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers”, *Part A: Journal of Power and Energy*, Vol. 227, Issue. 7, p. p. 762-782, 2013.



شکل ۱۶- نمودار تغییرات دما در طول سامانه سردساز کوپل

پس از طراحی و بهینه سازی سیستم سردساز موج متحرک کوپل شده با موتور موج ایستا، پارامترهای خروجی در جدول (۶) آورده شده است.

جدول ۶- پارامترهای حاصل از طراحی و بهینه سازی سامانه کوپل

پارامتر	مقدار	واحد
توان صوتی تولیدی موتور ترموآکوستیک	۹۶/۲۲	وات
راندمان موتور ترموآکوستیک	۱۲	درصد
توان خنک کنندگی سردساز	۱۶۲	وات
ضریب عملکرد سردساز	۲/۳	
ضریب عملکرد کلی سامانه کوپل	۲۰	درصد

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش یک سردساز کوپل ترموآکوستیکی بر مبنای جذب گرمای اتلافی موتورهای پیستونی نیروگاه های تولید برق طراحی و بهینه سازی شده است. برای شروع طراحی ابتدا پارامترهای عملکردی سامانه ترموآکوستیک از تجزیه و تحلیل گرمای اتلافی موتور احتراق داخلی استخراج شده است. سپس در ادامه یک موتور ترموآکوستیکی موج ایستا طراحی و بهینه سازی شد و حساسیت عملکرد موتور ترموآکوستیک نسبت به پارامترهای هندسی آن بررسی شد. از تحلیل حساسیت نتیجه گیری شد که پارامترهای هندسی استک و سطح مقطع سیستم بیشترین تاثیر را بر عملکرد یک سیستم موتور ترموآکوستیک موج ایستا دارند. با اضافه کردن سردساز به موتور طراحی شده یک سامانه سردساز کوپل ترموآکوستیکی با شرایط عملکردی استخراج شده از موتور پیستونی طراحی و بهینه سازی شد. گاز کاری هوا انتخاب شد و سامانه سردساز کوپل در فشار ۱ مگاپاسکال کار می کند. این سامانه سردساز، با توان ورودی ۸۰۰ وات قادر است ۱۶۳ وات توان خنک کنندگی در دمای ۲۷۳ کلوین تولید کند و ضریب عملکرد سردساز ۲/۳ می باشد. موتور ترموآکوستیک کوپل شده با سردساز دارای راندمان ۱۲ درصدی در تبدیل انرژی گرمایی به انرژی آکوستیکی می باشد. ضریب عملکرد کلی سردساز کوپل برابر با ۲۰ درصد می باشد. می توان از سامانه های سردساز کوپل ترموآکوستیکی به عنوان یک سامانه جدید برای بازیافت گرمای اتلافی موتورهای احتراق داخلی استفاده نمود.

۵- مراجع

- [1] Higgins, B.; “On the sound produced by a current of hydrogen gas passing through a tube”,