

بررسی آزمایشگاهی انتقال حرارت در محفظه احتراق ضربانی

حامد ارزانی شهنی^۱، حمید ممهدی هروی^۲، جواد ابوالفضلی اصفهانی^۳

دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه آزاد مشهد

hamedarzany@gmail.com

چکیده

بطور عادی می توان از نرخ بالای انتقال حرارت در لوله خروجی به عنوان مزیت محفظه احتراق ضربانی نام برد. در تحقیقات گذشته بر روی نحوه افزایش انتقال حرارت و همچنین تاثیر تغییرات پارامترهای جریان بر این افزایش بی نتیجه باقی مانده است. محفظه احتراق مورد استفاده در این مقاله از نوع هلمهولتز^۴ با شیر ورودی ایرودینامیکی می باشد. نتایج بدست آمده با استفاده از دماهای اندازه گرفته شده توسط ترموکوپل در مبدل گرمایی، نشان می دهد ضریب انتقال حرارت و فرکانس با کاهش طول لوله تخلیه افزایش می یابد. همچنین افزایش دبی سوخت و هوای ورودی به محفظه احتراق با افزایش ضریب انتقال حرارت همراه است. در این مقاله به بررسی محفظه های احتراق ضربانی، انتقال حرارت و عوامل موثر بر آنها مانند خصوصیات زمانی، فرکانس و میانگین نرخ جریان می پردازیم و مقایسه اطلاعات بدست آمده با نتایج دیگر محققان توافق خوبی را نشان می دهد.

واژه های کلیدی: محفظه احتراق ضربانی- انتقال حرارت در لوله تخلیه - ضریب انتقال حرارت.

۱- مقدمه

سیستم حرارتی محفظه احتراق ضربانی دارای فواید زیادی نسبت به کوره های متداول می باشد، بطور مثال می توان به راندمان حرارتی در حدود ۹۵ درصد یا بیشتر، آلودگی پایین CO، NOx و سرعت بالای انتقال حرارت در لوله خروجی گازهای احتراق اشاره نمود که این سرعت ۲.۵ برابر بیشتر از زمانی است که جریان آشفته با رینولدز یکسان باشد. مهمترین ارتباط فاز بین فشار محفظه احتراق و انرژی آزاد شده در محفظه برای اولین بار توسط Realy در سال ۱۸۷۸ نشان داده شده است [۱] که توسط آزمایشات کلر (Keller) در محفظه احتراق هلمهولتز اثبات شده است [۲] و شبیه سازی عددی آن توسط بار (Barr) صورت گرفته است [۳]. در دیگر مطالعات شبیه سازی شده Tsujimoto, machii [۴] با استفاده از متد خاصی به تاثیر تاخیر زمانی بین تزریق و احتراق در ضربانات ثابت پرداختند.

نرخ بالای انتقال حرارت هدایت در لوله تخلیه یکی دیگر از مزایا محفظه احتراق ضربانی می باشد. بدلیل عدم شناخت کافی بر انتقال حرارت و دیگر پروسه های ابتدایی انتقال حرارت، طراحی و ساخت محفظه احتراق ضربانی بطور زیادی بر سعی و خطا متکی است. شناخت بیشتر انتقال حرارت در لوله خروجی برای طراحی اینگونه محفظه های احتراق به دو دلیل مهم می باشد [۱].

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک (تبدیل انرژی) دانشگاه آزاد اسلامی

۲- استادیار بخش مکانیک دانشکده مهندسی دانشگاه آزاد اسلامی مشهد

۳- دانشیار بخش مکانیک دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد

(۱) پی بردن به مکانیزم انتقال حرارت در حین تغییرات ایجاد شده در دمای گاز خروجی.
(۲) شناخت بیشتر انتقال حرارت به ما در بهینه سازی و افزایش نرخ انتقال حرارت کمک می کند.
ضریب انتقال حرارت لوله خرجی محفظه احتراق می تواند از ۷۰٪ کمتر تا بیشتر از ۲۴۰٪ [۵] در مقایسه با جریان یکنواخت در محفظه های مشابه و در رینولدز برابر باشد. تحقیقات نشان می دهد در جریان های ضربانی می توان شاهد کاهش ضریب انتقال حرارت تا ۲۰٪ و افزایش آن تا ۵ [۶] برابر جریان دائمی در شرایط مشابه باشیم. گاهی اوقات مقدار افزایش گزارش شده در مقالات گیج کننده می باشد، زیرا در برخی مقالات مقایسه انتقال حرارت ضربانی با شرایط جریان دائمی در تجهیزات یکسان با جریان های کاملاً آشفته صورت می پذیرد و این سبب ایجاد تفاوت در نتایج می گردد. بعلاوه برخی تحقیقات صورت گرفته برای محفظه های احتراق متشابه در فرکانس بیشتر از 200 - 40 Hz انجام می شود.
کنترل منظم پارامترهای جریان اصلی موجود در محفظه احتراق ضربانی بسیار مفید خواهد بود و مطمئناً برای فهم بیشتر و گسترش شناخت بر تغییرات در طول زمان مناسب می باشد [۷].
در این مقاله بر روی انتقال حرارت در لوله خروجی محفظه احتراق بطور آزمایشگاهی و تاثیر پارامترهایی مانند فرکانس ضربانی و نرخ جریان در آن پرداخته شده است. تفاوت محسوس این تحقیق با مطالعات قبلی صورت گرفته، در پیش آمیخته نبودن هوا و سوخت می باشد و این امر سبب کاهش هزینه تولید، سهولت راه اندازی و عدم نیاز به شیر ورودی سوخت و هوا می گردد، در نتیجه بدلیل حذف قطعات متحرک امکان خرابی و از سرویس خارج شدن محفظه کاهش می یابد. نتایج جدید بدست آمده به ما در شناخت محفظه احتراق در شرایط عملکرد 65 Hz تا 95 Hz و عدد رینولدز بین ۳۱۰۰ تا ۴۷۵۰ کمک می کند.

۲- تجهیزات آزمایش

محفظه احتراق مورد استفاده در این تحقیق از نوع هلمهولتز با شیر ایرودینامیکی می باشد. این محفظه از ورودی هوا و سوخت، محفظه احتراق که توسط مقطع همگرا به لوله تخلیه متصل می شود، تشکیل شده است. شکل محفظه احتراق در شکل ۱ نشان داده شده است. تمامی قسمتهای آن بصورت استوانه ساخته شده و جنس آن از کرین استیل است. هرچند برخی از قسمتهای آن همانند لوله تخلیه، قابل تغییر می باشد ولی محفظه احتراق و دیگر بخشهای آن دارای ابعاد ثابتی می باشند.



شکل ۱ - محفظه احتراق ضربانی هلمهولتز با شیر ایرودینامیکی مورد استفاده در آزمایشات

کپسول گاز مایع از طریق ورودی ثابت بطور مستقیم و غیر پیش آمیخته با هوا به داخل محفظه احتراق تزریق می گردد. با توجه به عدم پیش آمیخته بودن هوا و سوخت ورودی همچنین عدم استفاده از نگهدارنده شعله، محل ورود سوخت برای رسیدن به احتراق پایدار بسیار مهم می باشد. برای دستیابی به احتراق پایدار باید محل قرار گیری نازل در موقعیت $X/D_c = 0.25$ قرار گیرد [۷]. مقدار فاصله ای است که لوله ورودی سوخت می بایست به داخل محفظه احتراق وارد شود و D_c قطر محفظه احتراق می باشد.

ماهیت محفظه احتراق با شیر آیرودینامیک از ثابت بودن نسبت هم ارزی در احتراق ممانعت میکند [۸]. برای راه اندازی محفظه احتراق، هوای فشرده با سرعت بالا مورد نیاز می باشد، تا با اضافه نمودن به ورودی هوا، هوای مورد نیاز در راه اندازی تامین گردد. زمانی که محفظه شروع بکار می کند، جت هوا با سرعت بالا و فشار مورد نیاز تامین می شود و مخلوط بوجود آمده توسط شمع محترق می گردد. نرخ جریان سوخت و جت هوای فشرده پس از راه اندازی بصورت ثابت نگه داشته می شود تا به مخلوط ثابت و احتراق ضربانی دست یابیم.

لوله تخلیه دارای قطرداخلی 37mm و ضخامت 5 mm می باشد که فرم لوله ای بودن آن سبب بوجود آمدن احتراق ضربانی و انتقال محصولات احتراق می گردد. لوله استفاده شده به عنوان مبدل دارای قطر 60 mm می باشد. هوای خنک کننده از فاصله میان دو لوله عبور کرده و در انتهای مبدل خارج می گردد. لوله خروجی دارای ساختار قابل تغییر می باشد، که این امکان وجود دارد تا آزمایشات با لوله تخلیه به طولهای 88 mm و 120 mm صورت پذیرد و به فرکانس 60 Hz تا 95 Hz دست یابیم.

۳- دستگاههای اندازه گیری

ترموکول نصب شده در خروجی مبدل گرمایی، برای اندازه گیری دمای هوای خنک کننده خروجی از مبدل گرمایی استفاده می شود. این ترموکوپل از جنس Pt-Pt, 13% Rh و کرم-آلومینیوم می باشد. دستگاه Lutron YK-2005AM قابلیت اتصال ترموکوپل و پراب سرعت سنج هوا را دارد. پراب سرعت سنج در مسیر حرکت هوای خنک کننده قرار می گیرد و ضمن اندازه گیری سرعت هوای خنک کننده، دبی هوای عبوری از روی لوله تخلیه در واحد زمان مشخص می شود. ترموکوپل و سرعت سنج ضمن اتصال به دستگاه Lutron اطلاعات اندازه گیری شده را بوسیله کابل RS232 به کامپیوتر منتقل می کند و ضمن ذخیره سازی اطلاعات بدست آمده، توسط نرم افزار مخصوص دستگاه بصورت شکل نمایش داده می شوند.

برای اندازه گیری دمای گازهای خروجی از لوله تخلیه و غلظت آلاینده های خروجی از دستگاه Testo 350xl استفاده می شود. این دستگاه بوسیله کابل RS232 به کامپیوتر متصل شده و کلیه اطلاعات را توسط نرم افزار مخصوص دستگاه، ذخیره می کند.

۴- محاسبات ضریب انتقال حرارت

شرط لازم برای رابطه مبدل گرمایی جریان ضربانی، فرض عایق بودن مبدل گرمایی می باشد. با توجه به اینکه دیوار خارجی مبدل گرمایی را عایق می کنیم، رابطه ۱ با در نظر گرفتن اتلاف گرمایی از دیواره خارجی مبدل گرمایی به محیط مورد استفاده قرار می گیرد. این رابطه به ما مقدار U ، ضریب کلی انتقال حرارت با در نظر گرفتن هر دو عامل گازهای خروجی، هوای خنک کننده و همچنین شرایط دیواره را می دهد [۷].

$$U = (\ln(\Delta T_2 / \Delta T_1)) / ((A/Q)(\Delta T_2 - \Delta T_1) + (1/C_c)(\int ((dQ_0 DA/dQ) - (Q_0 A/Q)))) \quad (1)$$

در رابطه فوق ΔT به تغییرات دمای گاز خروجی و هوای خنک کننده اشاره دارد. عدد ۱ اختلاف دمای گاز در ورودی و عدد ۲ به این اختلاف در خروجی با هوای خنک کننده اشاره دارد. C_c حاصلضرب نرخ جریان جرمی با گرمای ویژه در فشار ثابت هوای خنک کننده می‌باشد. Q نیز گرمای مبادله شده بین گازهای خروجی و هوای خنک کننده است، Q_0 گرمای مبادله شده بین هوای خنک کننده و محیط می‌باشد، A مساحت داخلی لوله تخلیه است. تفاوت معادله بالا برای U ، به نسبت رابطه استاندارد آدیاباتیک فقط در عبارت دوم مخرج کسر می‌باشد. با توجه به عایق نمودن لوله خنک کننده و جلوگیری از تبادل حرارت با محیط، در رابطه ۱ می‌توان این فرم آدیاباتیک را طبق رابطه ۲ و مساوی قرار دادن آنها، حذف نمود [۷].

$$\int (dQ_0 DA/dQ) = (Q_0 A/Q) \quad (2)$$

اگر چه این فرض دقیقاً به دلیل غیر خطی بودن نسبت شار حرارتی صحیح نیست، ولی تاثیر انگرال، خیلی کم می‌باشد. علاوه بر این، نمونه اندازه‌گیری‌های انجام شده در لوله تخلیه محفظه احتراق ضربانی، نشان می‌دهد عبارت سمت راست در مخرج، ۵ برابر کوچکتر از عبارت سمت چپ مخرج می‌باشد. ازینرو خطای ایجاد شده بین حالت آدیاباتیک و حالت فرض صورت گرفته خیلی کوچک می‌باشد. ضریب انتقال حرارت با استفاده از رابطه ۳ قابل محاسبه است.

$$1/h = (1/U) - (1/h_{c,a}) - (t_{wall}/T_{wall}) \quad (3)$$

در رابطه فوق h ضریب انتقال لوله تخلیه می‌باشد. U از رابطه ۱ بدست می‌آید. t_{wall} ضخامت لوله تخلیه و T_{wall} دمای دیواره در دمای میانگین می‌باشد. $h_{c,a}$ انتقال حرارت به هوای خنک کننده است. لذا با تغییر دبی هوای خنک کننده می‌توانیم مبنا را بر اساس رینولدز ثابت قرار دهیم و با استفاده از رابطه ۴ که عدد ناسلت در جریان مغشوش برای مبدل‌های حرارتی می‌باشد، ضریب انتقال حرارت را در این شرایط و برای هوای خنک کننده بدست آوریم، سپس با جایگذاری در رابطه ۳ ضریب انتقال حرارت در لوله تخلیه محاسبه می‌شود [۹].

$$Nu = 0.023 * Re^{0.8} * Pr^{0.4} \quad (4)$$

نرخ انتقال حرارت با استفاده از رابطه ۵ بدست می‌آید.

$$Q = m * C_v * \Delta T \quad (5)$$

m جرم عبوری هوای از روی لوله تخلیه، C_v گرمای ویژه در حجم ثابت و ΔT تغییرات اختلاف دمای هوای خنک کننده در ورودی و خروجی از مبدل حرارتی می‌باشد.

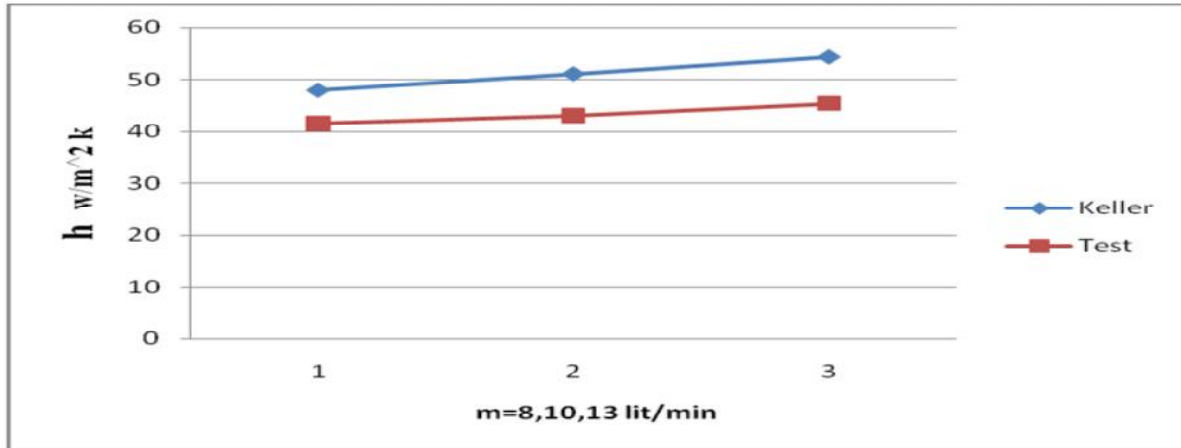
در این آزمایشات طول لوله تخلیه قابلیت تغییر برای دو حالت 88 cm تا 120 cm را دارد. انتقال حرارت در محفظه احتراق ضربانی برای سه نوع دبی 8 lit/min، 10 lit/min، 13 lit/min سوخت انجام شده است.

۵- نتایج و بحث

نرخ انتقال حرارت در لوله تخلیه محفظه احتراق ضربانی می‌تواند حدود ۷۰٪ کمتر تا ۲۴۰٪ بیشتر [۵] از نرخ انتقال حرارت در محفظه‌های مشابه با جریان پایدار و عددهای رینولدز برابر باشد.

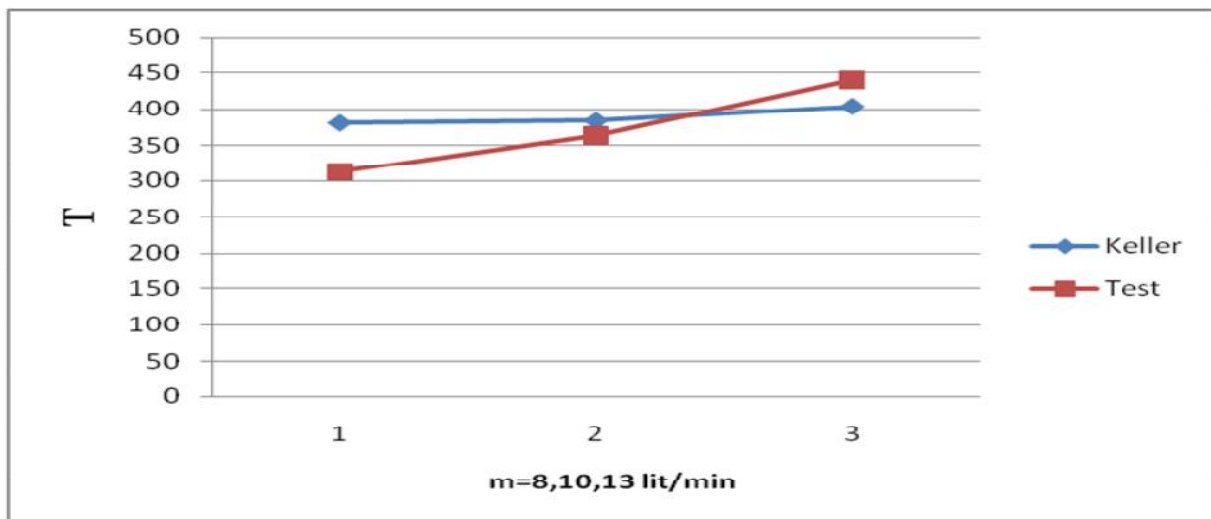
شکل ۲ تغییرات ضریب انتقال حرارت برای لوله تخلیه با طول 0.88m ترسیم شده است. این شکل‌ها برای دبی‌های مختلف ترسیم می‌شوند. بامقایسه ضریب انتقال حرارت بدست آمده در آزمایشات این پروژه و آزمایشات صورت گرفته توسط کلر تشابه خوبی را در خصوص ضریب انتقال حرارت در لوله تخلیه شاهد می‌باشیم [۵]. همانطور که در شکل مذکور نشان داده

شده است، با افزایش دبی سوخت، افزایش نوسانات جریان و مقدار ضریب انتقال حرارت برای محفظه احتراق ضربانی افزایش می یابد.



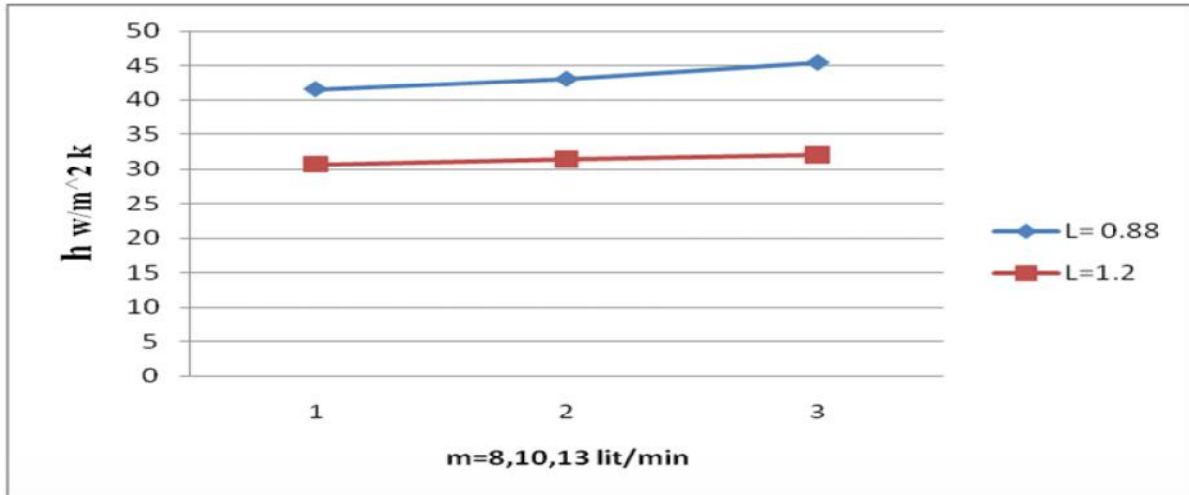
شکل ۲- ضریب انتقال حرارت گاز های خروجی از لوله تخلیه با طول 0.88 m و دبی سوخت 8lit/min, 10lit/min, 13lit/min

همانطور که در شکل مذکور نشان داده شده است، با افزایش دبی سوخت و افزایش نوسانات، مقدار ضریب انتقال حرارت برای محفظه احتراق ضربانی افزایش می یابد. دلیل بیشتر بودن ضریب انتقال حرارت در آزمایشات کلر نسبت به آزمایشات انجام شده در این پروژه، می تواند به محفظه احتراق مورد استفاده در آزمایشات مربوط باشد [۵]. در آزمایشات سوخت و هوا بطور پیش آمیخته به محفظه تزریق می شوند، این درحالی است که در آزمایشات این پروژه ورودی سوخت و هوا بطور جداگانه و غیر پیش آمیخته به داخل محفظه احتراق تزریق می گردند.



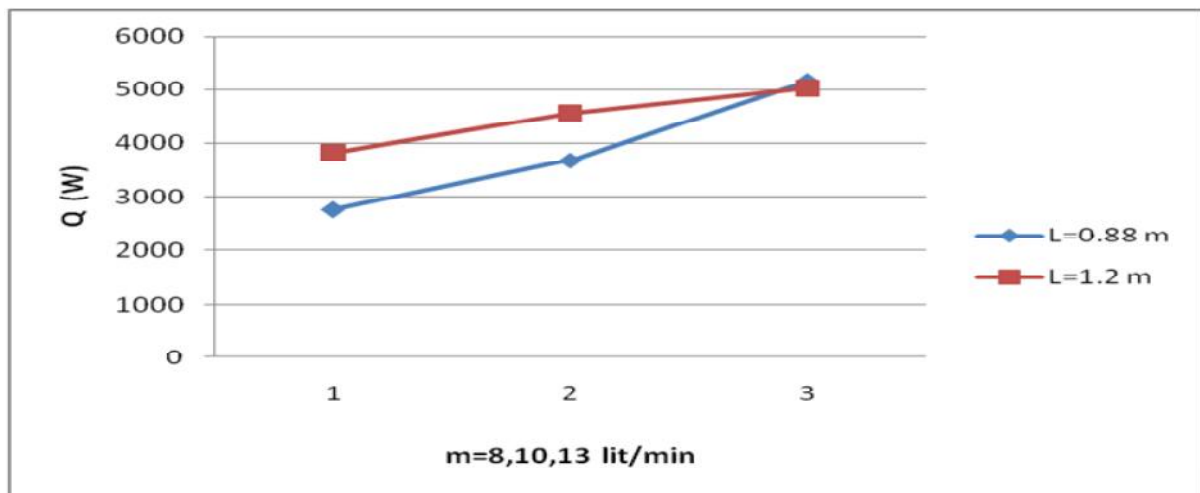
شکل ۳- تغییرات دمای هوای خنک کننده عبوری از روی لوله تخلیه با طول 0.88m و دبی سوخت 8lit/min, 10lit/min, 13lit/min

شکل ۳ برای دمای هوای خنک کننده بعد از عبور از روی لوله تخلیه ترسیم شده است. مقایسه شکل رسم شده در آزمایشات کلر [۵] با آزمایشات صورت گرفته در این پروژه، نشان می دهد افزایش دبی سوخت موجب افزایش نوسانات جریان می شود و این امر موجب افزایش در میزان انتقال حرارت و دمای هوای خنک کننده عبوری از روی لوله تخلیه می گردد.



شکل ۴ - ضریب انتقال حرارت در آزمایشات برای لوله تخلیه با طول 0.88 m ، 1.2 m و دبی سوخت 8lit/min, 10lit/min, 13lit/min

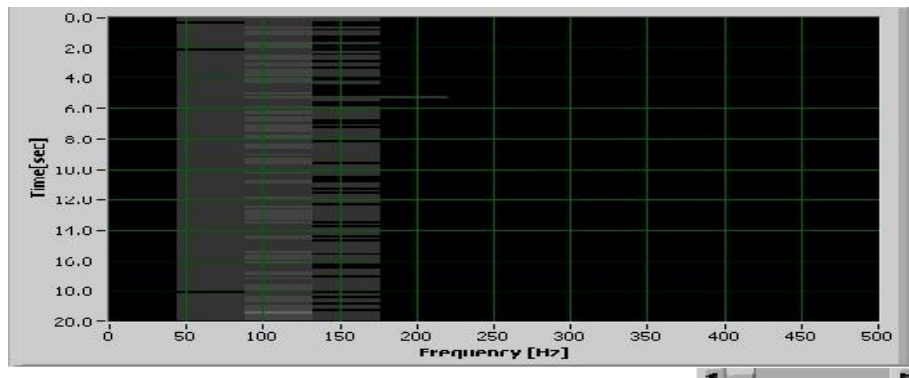
شکل ۴ تغییرات ضریب انتقال حرارت در لوله تخلیه با طول متغییر 0.88m و 1.2m ترسیم شده است. این شکل در دبی های 8lit/min, 10lit/min, 13lit/min اندازه گیری می شود. در هر دو شکل بیشترین ضریب انتقال حرارت در دبی 13lit/min بدست می آید. با مقایسه شکل رسم شده برای حالت 0.88m با شکل رسم شده برای حالت 1.2m می توان دریافت که در طول لوله برابر با 0.88m نرخ انتقال حرارت بیشتر از طول 1.2m می باشد و با افزایش طول لوله تخلیه ضریب انتقال حرارت کاهش می یابد.



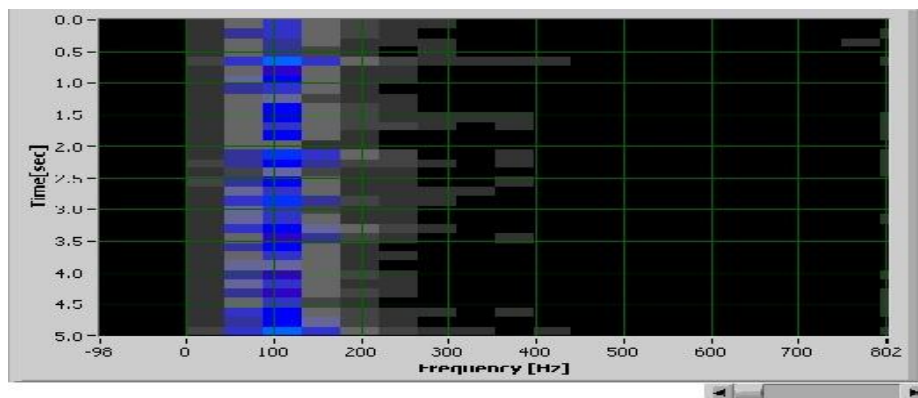
شکل ۵ - تغییرات نرخ انتقال حرارت در آزمایشات برای لوله تخلیه با طول 0.88 m ، 1.2 m و دبی سوخت 8lit/min, 10lit/min, 13lit/min

شکل ۵ تغییرات نرخ انتقال حرارت برای دبی های 8lit/min, 10lit/min, 13lit/min در طول های 0.88 m و 1.2m لوله تخلیه نشان داده شده است. همانطور که در شکل‌های فوق نشان داده شده است با افزایش دبی سوخت نرخ انتقال حرارت نیز افزایش می یابد، بیشترین نرخ انتقال حرارت در دبی 13 lit/min روی می دهد. نظر به اینکه با افزایش طول لوله میزان ماند هوا در لوله تخلیه و سطح تبادل حرارت افزایش می یابد، ولیکن در لوله با طول 0.88m نیز می توانیم به همان نرخ انتقال حرارت برسیم و این امر نشان دهنده اهمیت فرکانس در انتقال حرارت به هوای خنک کننده می باشد.

فرکانس محفظه احتراق برای محفظه احتراق با طول 0.88m و 1.2m اندازه گیری شده است. شکل ۶ برای لوله تخلیه با طول 0.88 m می باشد. فرکانس محفظه 60Hz است.



شکل ۶- فرکانس محفظه احتراق با طول لوله تخلیه 0.88m



شکل ۷- فرکانس محفظه احتراق با طول لوله تخلیه 1.2m

شکل ۷ فرکانس لوله تخلیه با طول 1.2m نشان داده شده است. با توجه به مقدار فرکانس در طول های مختلف محفظه احتراق و نظر به اینکه کاهش طول لوله تخلیه سبب افزایش فرکانس از 60Hz به 95Hz می گردد، می توان نتیجه گرفت افزایش طول لوله تخلیه سبب کاهش در فرکانس و در نتیجه کاهش ضریب انتقال حرارت می شود. افزایش فرکانس بدلیل این است که با کاهش طول لوله تخلیه زمان لازم جهت شروع و اتمام سیکل احتراق کاهش می یابد، در نتیجه میزان دفعات احتراق در واحد زمان افزایش می یابد و ضریب انتقال حرارت بیشتر می گردد.

۶- نتیجه گیری

پس از آزمایش های صورت گرفته بر روی محفظه احتراق ضربانی از نوع هلمهولتز با شیر ورودی آیرودینامیکی به نتایج زیر دست می یابیم.

- افزایش دبی سوخت ورودی به محفظه احتراق ضربانی، موجب افزایش نوسانات جریان و در نتیجه افزایش ضریب انتقال حرارت در لوله تخلیه می گردد.
- افزایش دبی سوخت برای طول یکسان لوله تخلیه، با افزایش انتقال حرارت همراه است و این افزایش میزان انتقال حرارت را می توان در افزایش دمای هوای خنک کننده عبوری از روی لوله تخلیه مشاهده نمود.
- با افزایش طول لوله تخلیه، ضریب انتقال حرارت کاهش یافته و در نتیجه دمای گاز خروجی نیز افزایش می یابد.
- کاهش طول لوله تخلیه با افزایش فرکانس در محفظه احتراق ضربانی همراه می باشد.
- نتایج بدست آمده نشان دهنده بالا بودن راندمان حرارتی محفظه احتراق ضربانی در حالت مشابه با دیگر محفظه های احتراق می باشد.

مراجع

- 1- J. E. Dec, J. O. Keller, Pulse combustor Tailpipe Heat Transfer Dependence on Frequency, Amplitude, and Mean Flow Rate, combustion and flame, 77:359-374, 1989.
- 2- J. O. Keller, Eibeck, P. A., Bramlette, T. T., and Barr P. K., Pulse Combustion: Tailpipe Exit Jet Characteristics. Combustion Science and Technology, Vol. 94, pp. 147-165, 1993.
- 3- Barr, P. K., Dwyer, H.A., and Bramlette, T. T., Combustor. Sci. Technol. 85:315, 1988.
- 4- Martinelli, R.C., Boelter, L. M. K., Weinberg, E.B., and Yakahi, S., Asme trans. 65:798, 1943.
- 5- V. I. Hanby, Convective heat transfer in a gas-fired pulsating combustor, ASME, J. Engng Pwr 91, 48-52, 1969.
- 6- Galitseyskiy, B. M., and Ryzhov, Yu. A Heat Transfer Soviet Res., Vol. 9:178-183, 1977.
- 7- J. E. Dec and J. O. Keller, Pulse combustor tail-pipe heat-transfer dependence on frequency, amplitude, and mean flow rate Combust. Flame 77, 359-374, 1989.
- 8- Reay, D., J. Inst. Fuel, 22:135-142, 1969.
- 9- R.S.GEMMEN, J.O. KELLER, V.S.ARPACI, Heat/Mass Transfer from a cylinder in the strongly Oscillating Flow of a Pulse Combustor Tailpipe, Combust. Sci and Tech, Vol 94, pp 103-130, 1993.