

بررسی عددی انتقال حرارت اجاق گازهای خانگی جهت بهبود راندمان

مجید ابراهیمی^۱، علی اکبر گلنشان^۲

چکیده:

در این تحقیق تاثیر مقدار و جهت حرکت هوای هجومی به سمت یک شعله گاز مورد بررسی قرار گرفته است. هدف، بررسی میزان انتقال حرارت از یک جت گرم (شعله) به یک صفحه‌ی موازی با جت (کف ظرف) می‌باشد که با قرار دادن دیواره‌هایی به اشکال مختلف در اطراف شعله، تغییر در مقدار و جهت هوای هجومی به سمت آن ارزیابی گردیده است. در همین راستا چند هندسه مختلف مدل‌سازی شده و برای هر یک میزان انتقال حرارت از جت گرم به صفحه‌ی موازی با آن (بازده حرارتی) محاسبه گردیده است. نتایج نشان می‌دهد که قراردادن یک مرز جامد بین محیط و فضای اطراف شعله موجب افزایش بازده حرارتی آن می‌گردد که کاهش اتلافات ناشی از انتقال حرارت جابجایی و انتقال حرارت تشعشی علت اصلی این افزایش است. در هر حالت میزان انتقال حرارت از دیواره‌ها بر بازده موثر بوده و عایق کردن مرز جامد موجب افزایش بازده گردیده است. همچنین اگر بتوان هوای هجومی به سمت شعله را بصورت کنترل شده و از جهت پایین (زیر مشعل) به جت نزدیک کرد بازده بطور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. پس از دستیابی به مناسب‌ترین طرح جهت بهترین عملکرد و بیشترین بازده مشعل، با انجام آزمایشات عملی میزان آلاینده‌های ناشی از قرار دادن طرح نیز اندازه‌گیری گردید که نتایج قابل قبول بودند.

تاریخ دریافت مقاله:

۸۸/۸/۲۳

تاریخ پذیرش مقاله:

۸۸/۱۰/۲

کلمات کلیدی:

بازده حرارتی، جت گرم، مشعل، دیواره‌ی موازی با جت، شعله، هوای هجومی

مقدمه

توسعه‌ی صنعتی و رشد روز افزون صنایع و تولید انبوه، نیاز به مصرف انرژی را روز به روز گسترش می‌دهد. رابطه‌ی دو سویه و تأثیر متقابل انرژی و توسعه باعث افزایش توجه به منابع محدود انرژی و کنترل مصرف آنها شده است. به گونه‌ای که نفوذ و اعمال کنترل بر منابع و بازار انرژی در سالیان اخیر همواره از عرصه‌های اصلی رقابت کشورها بوده است.

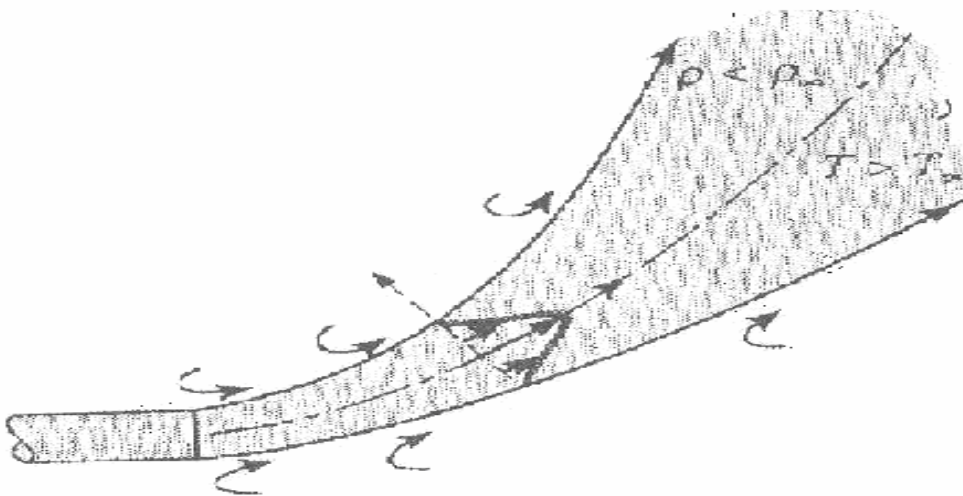
یکی از استفاده‌های انرژی در بخش خانگی که سهم قابل توجهی را بخصوص در سبد خانوارهای ایرانی شامل می‌شود، مصرف انرژی برای پخت و پز می‌باشد. حدود ۶ تا ۸ درصد کل انرژی مصرفی در بخش خانگی در بخش پخت و پز مصرف می‌شود و این در حالی است که پخت و پز تنها در خانه صورت نمی‌گیرد بلکه مکان‌های تفریحی، اقامتی، صنعتی، علمی آموزشی نظیر دانشگاه‌ها و بسیاری دیگر را که نیاز به تهیه غذا دارند نیز شامل می‌شود.

با توجه به اینکه پخت و پز سهم زیادی از مصرف انرژی در بخش خانگی را به خود اختصاص می‌دهد، بحث مربوط به بازده در وسایل مورد نیاز این بخش از اهمیت ویژه‌ای برخوردار گشته و مطالعه و تحقیق بر روی بازده حرارتی و میزان آلاینده‌ی شعله‌های اجاق گاز خانگی همواره مورد توجه بوده است.

بیشتر تحقیقات کاربردی که حدوداً از دهه ۸۰ میلادی تاکنون انجام شده بر افزایش راندمان مشعل گاز با در نظر گرفتن کاهش میزان آلاینده‌ی آن تأکید داشته و با حفظ ساختار کلی سیستم انتقال حرارت از مشعل به ظرف، سعی در بدست آوردن نسبت بهینه بین پارامترهای موثر را داشته است. چکیده مطالعات انجام شده در این زمینه را می‌توان در کتاب نیل جونز با نام "اصول کاربرد احتراق در طراحی اجاق گاز خانگی" ملاحظه کرد که در سال ۱۹۸۹ در انگلستان به چاپ رسیده است. این کتاب در ۷ فصل به چگونگی عملکرد انواع شعله‌های پیش مخلوط (بطور جزئی یا کامل) پرداخته و اصول اولیه و کاربردی را در طراحی مشعل‌های گاز خانگی بیان کرده است. تجدید چاپ این کتاب در سال ۲۰۰۵، اهمیت طراحی مناسب در اجاق گازهای خانگی را نشان می‌دهد. ایران تا قبل از دهه ۱۳۸۰ فعالیت‌های اندکی در جهت بهینه‌سازی مصرف انرژی در بخش خانگی انجام داده است اما در این دهه سازمان بهینه‌سازی مصرف سوخت کشور وابسته به شرکت ملی نفت ایران، با همکاری پژوهشکده علوم و فناوری انرژی شریف زیر نظر دانشگاه صنعتی شریف پژوهش نسبتاً کاملی در این زمینه انجام داده است.

از جمله مطالعات انجام شده‌ی دیگر در این زمینه می‌توان به تحقیقات کارزارجدی و همکارانش اشاره کرد [۶] که تأثیر پارامترهای مختلفی مانند ضریب هدایت حرارتی کف ظرف، سرعت ورودی گاز، دمای ورودی گاز و ... را بر میزان انتقال حرارت از برخورد یک جت گرم به ظرف، برای حالت‌های مختلف بررسی کرده‌اند.

برای مطالعه انتقال حرارت از مشعل گاز به ظرف غالباً آن را به صورت برخورد یک جت حرارتی به یک صفحه مدل می‌کنند. وقتی که یک جت گرم از دهانه یک نازل خارج می‌شود در اطراف جت خلا ایجاد شده و مقداری از هوای اطراف به سمت آن کشیده می‌شود. این عمل می‌تواند موجب سرد شدن جت شده و در نتیجه بازده حرارتی آن را کاهش دهد. اما جهت و نحوه‌ی هجوم هوا به سمت جت می‌تواند بر میزان اتلافات حرارتی آن موثر باشد.



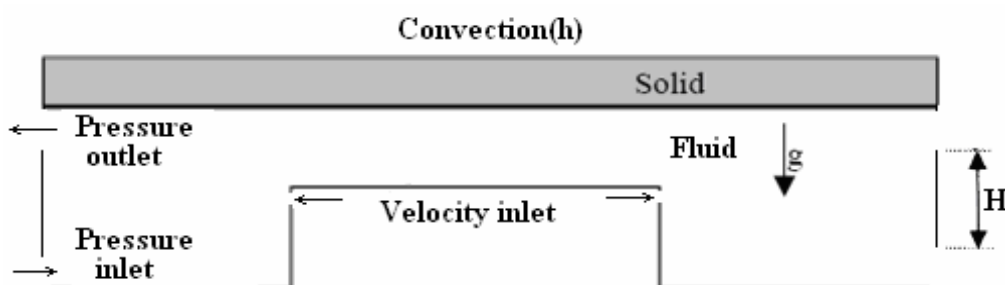
شکل ۱: جت افقی سیال گرم

در تحقیقات گذشته چندان به موضوع چگونگی هجوم هوا به سمت شعله و تاثیر آن بر میزان بازده حرارتی پرداخته نشده است در حالی که در این تحقیق با مدل‌سازی مشعل گاز، به منظور کاهش انتقال حرارت از شعله اجاق گاز به محیط اطراف و افزایش انتقال حرارت به ظرف، سعی شده با اعمال شرایطی بر پایه قوانین انتقال حرارت، مکانیک سیالات و ترمودینامیک، بازده انتقال حرارت از شعله به یک صفحه موازی با آن (کف ظرف)، با تغییر در مقدار و جهت هجوم هوا به سمت آن، مورد بررسی قرارگیرد. برای نیل به این هدف راهکارهای کاربردی زیر مورد بررسی قرار خواهد گرفت:

- ۱- جلوگیری از هجوم هوای اضافه به سمت شعله با ایجاد یک مرز جامد، بطوری که هوای مورد نیاز شعله از جهت مشخص شده‌ای تامین گردد، چرا که هوای اضافه باعث کاهش دمای شعله و در نتیجه کاهش بازده می‌شود.
- ۲- کاهش اتلافات انرژی با ایجاد مرز بین شعله و هوای اطراف به منظور کاهش نرخ تولید آنتروپی در اثر انتقال حرارت بین دو محیط با اختلاف دمای بسیار زیاد و در نتیجه دستیابی به بازده بالاتر.
- ۳- افزایش انتقال حرارت تشعشی به دیوار موازی با جت گرم (کف ظرف) با ایجاد سطح جامد در اطراف شعله.
- ۴- اندازه‌گیری مقدار آلاینده‌های ناشی از احتراق در طرح جدید (قرار دادن طوقه) و مقایسه آن با حالت قبل.

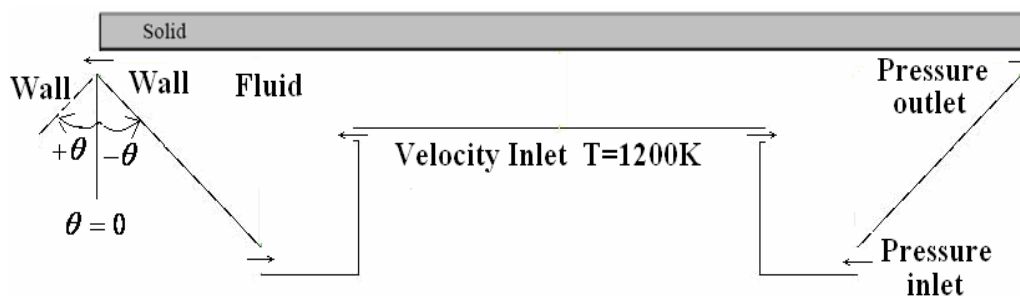
تئوری

یکی از اهداف اصلی طرح یعنی قراردادن مرز جامد، جلوگیری از هجوم هوای اضافه به سمت شعله به منظور افزایش بازده حرارتی عنوان شد. در اولین گام جهت اطمینان از موثر بودن این طرح، میزان تغییرات بازده حرارتی بر اساس مقدار هجوم هوای اضافه به سمت جت گرم (شعله) بررسی شده است. بدین منظور با قرار دادن یک دیوار جامد با ارتفاع متغیر H شکل (۲) در مسیر حرکت هوا به سمت شعله، مقدار هوای ورودی محدود می‌شود. با توجه به شکل ۲ مقدار فضای ورودی هوا متغیر و بر اساس تغییرات H تغییر می‌کند. جهت خروج گازهای گرم نیز یک حداقل مقدار جهت عملی بودن طرح (قراردادن مرز جامد) تعیین گردیده است (۵/۰ سانتیمتر).



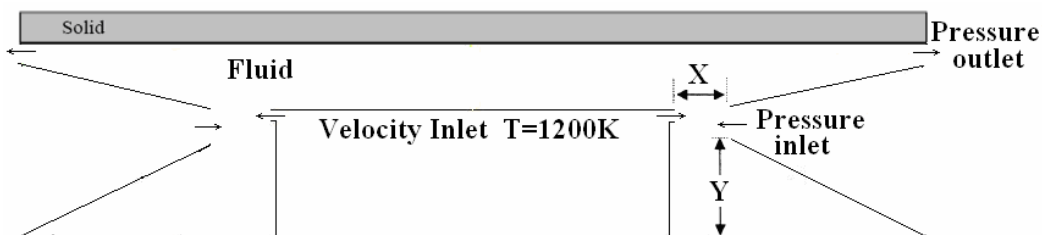
شکل ۲: هندسه مساله

جهت تعمیم مساله در اولین تغییرات اعمال شده مطابق شکل (۳) دیواره‌ها، مایل در نظر گرفته شده‌است. میزان مایل بودن دیواره بر اساس تغییرات زاویه θ انجام گرفته، بطوری که زاویه $\theta = 0$ برای حالت دیواره‌ی عمودی مطابق با شکل (۲) می‌باشد. دبی هوای هجومی به سمت شعله در ادامه برای کلیه حالت‌ها با تغییر در اندازه‌ی ورودی هوا ثابت نگه داشته شده است. این امر سبب مقایسه بهتر طرح‌های مورد نظر از جهت بازده حرارتی می‌گردد، چرا که تغییر اندک در مقدار هوای ورودی تاثیر بسزایی در بازده حرارتی دارد شکل (۷).



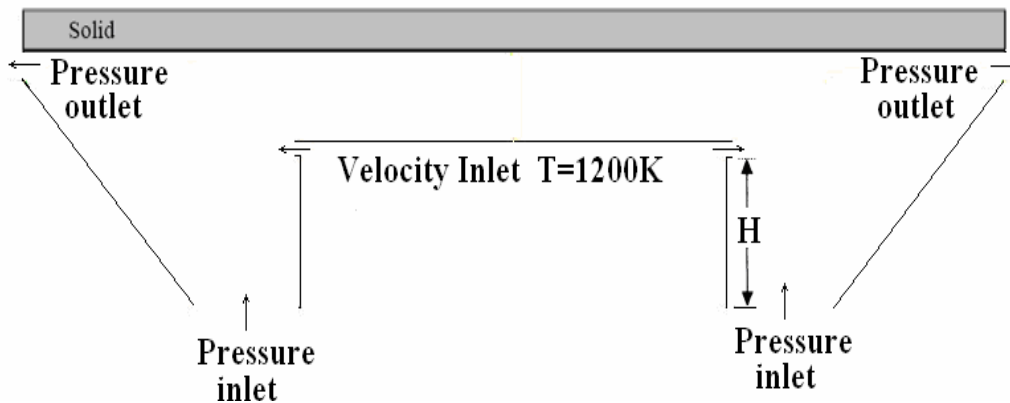
شکل ۳: هندسه مربوط به حالت دیواره مورب

در حالت بعدی ورودی هوا در نزدیکی شعله گرم قرار داده شده و تغییرات بازده محاسبه گردید. به منظور اعمال این تغییر، دیواره‌ها بصورت دو تکه در نظر گرفته شده‌است شکل (۴). در این حالت نیز جهت بررسی دقیق‌تر تاثیر محل ورودی هوا بر بازده حرارتی، دو متغیر X و Y بصورتی که در شکل (۴) مشخص گردیده تعریف شده است. در این حالت سعی شده که مقدار هوا از طریق شکل هندسی خاص دیواره‌ها محدود و مقید گردد.



شکل ۴: قرار دادن دیواره‌های دو تکه

در طرح بعدی هوای هجومی به طرف شعله از پایین به سمت آن هدایت شده است تا تاثیر کامل حرکت هوا از سمت پایین نیز بر بازده حرارتی به خوبی دیده شود. شکل (۵) ساختار کلی طرح جدید را نشان می‌دهد. در این حالت بخاطر ثابت ماندن دبی هوای ورودی و برابر شدن آن با مقدارهای قبلی، ورودی هوا در حدود $1/2$ سانتیمتر در نظر گرفته شده است.



شکل ۵: هجوم هوا از سمت پایین

فرضیات

فرضیات بکار رفته در حل مساله را می‌توان بصورت زیر برشمرد:

۱- به منظور اعمال تغییرات چگالی با دما از مدل گاز ایده‌آل استفاده شده است.

- ۲- جریان بصورت آرام در نظر گرفته شده و از اغتشاشات صرفنظر شده است.
- ۳- ضرایب جذب و تشعشع گاز از روش هاتل بصورت مخلوطی از بخار آب و گاز دی اکسید کربن محاسبه گردیده است.
- ۴- ضریب انتقال حرارت هدایتی، لزجت و گرمای ویژه بصورت توابعی از دما در نظر گرفته شده‌اند.

معادلات حاکم

بطور کلی می‌توان معادلات حاکم را در حالت تقارن محوری شامل معادلات پیوستگی مومنوم و انرژی دانست.

$$\frac{\partial}{\partial z}(\rho v_z) + \frac{\partial}{\partial r}(\rho v_r) + \frac{\rho v_r}{r} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial z}(r \rho v_z v_z) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v_r v_z) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \rho g_z \quad (2)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial z}(r \rho v_z v_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v_r v_r) = -\frac{\partial p}{\partial r} \quad (3)$$

$$\rho C_p \left(v_r \frac{\partial T}{\partial r} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = k \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] \quad (4)$$

برای مقایسه بین شرایط مختلف، بازده انتقال حرارت از ورودی سرعت به دیواره به صورت زیر تعریف شده‌است:

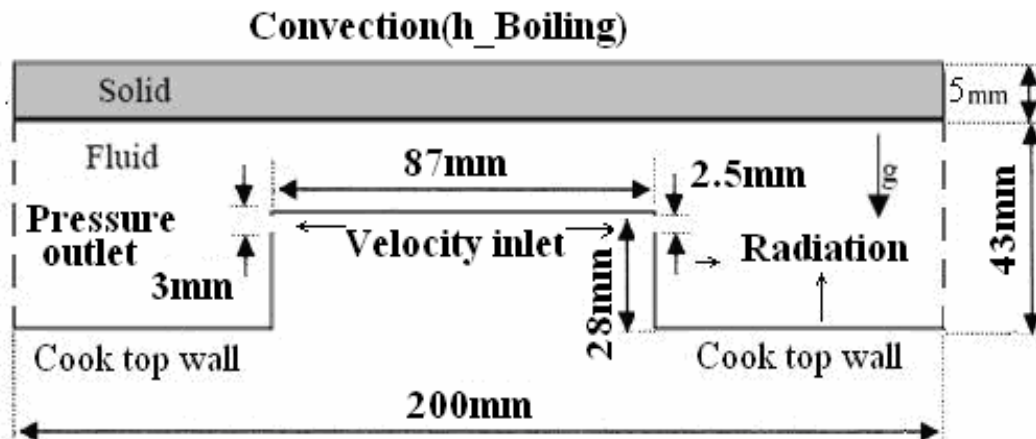
$$\eta = \frac{Q_{absorbed}}{Q_{in}} \quad (5)$$

که $Q_{absorbed}$ حرارت جذب شده توسط سطح موازی با جت و Q_{in} حرارت ورودی توسط جت گرم است.

شرایط مرزی

شرایط مرزی شامل انتقال حرارت جابجایی با سیال در حال تغییر فاز (دمای اشباع آب و ضریب جابجایی

جوشش $\bar{h} = 2500 W/m^2.K$) در سطح داخلی دیوار موازی با جت (کف ظرف)، شرط مرزی تشعشع (\mathcal{E}) برای دیواره‌های تحتانی، جانبی و فوقانی مشعل، شرط ورودی سرعت جهت منفذهای ورودی گاز (جت سیال با دمای ۱۲۰۰ درجه کلوین) و شرط مرزی توسعه یافته سرعت و فشار در طرفین فضای محاسباتی می‌باشد شکل (۶).



شکل ۶: شرایط مرزی

در شرط مرزی ورودی سرعت، سیال هوا با خواص متغیر با دما فرض شده است. بطوری که چگالی (ρ) با فرض گاز ایده آل بصورت متغیر با دما و فشار از رابطه:

$$P = \rho RT \quad (۶)$$

محاسبه گردیده است. گرمای ویژه (C_p) بصورت تابعی خطی با دما از رابطه:

$$C_p = 0.196T + 938.7 \quad (۷)$$

ضریب هدایت گرمایی (k) بصورت تابعی درجه چهار با دما از رابطه:

$$k = 3e - 14T^4 - 5e - 11T^3 + 3e - 107T^2 + 8.86e - 5T + 0.7908e - 3 \quad (۸)$$

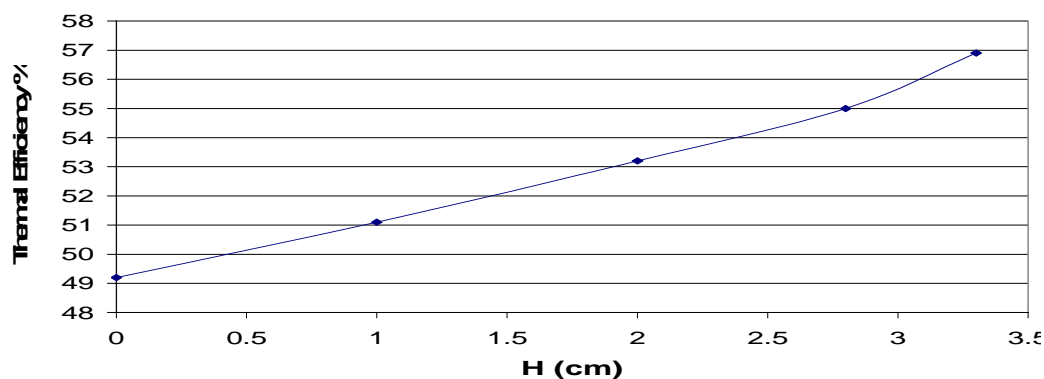
و ویسکوزیته (μ) از رابطه:

$$\mu = 1e - 14T^3 - 4e - 11T^2 + 6.83e - 8T + 1.112e - 6 \quad (۹)$$

برای محدوده دمایی ۳۰۰ تا ۱۲۰۰ درجه کلوین در نظر گرفته شده است [۷].

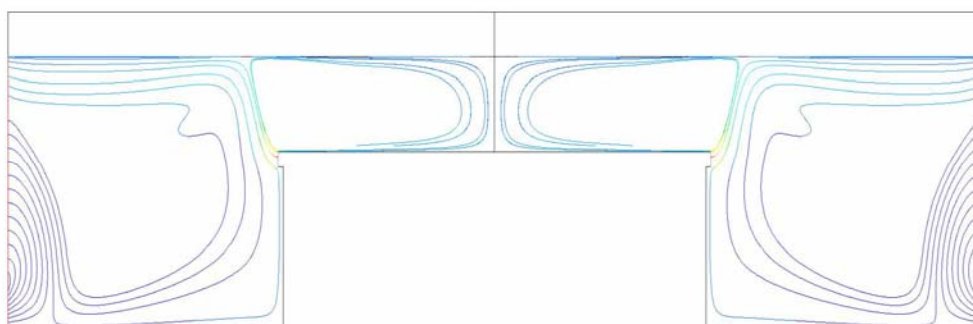
تحلیل و بررسی نتایج

شکل ۷ تغییرات بازده حرارتی را بر اساس ارتفاع دیوار جامد (H در شکل ۲) در حالت قائم ($\theta = 0$) نشان می دهد. منظور از ارتفاع صفر حالت بدون اعمال دیواره (حالت معمولی) در اطراف شعله می باشد. همانطور که از نمودار نیز مشخص است هر چقدر مقدار هوای ورودی به فضای اطراف شعله کمتر باشد بازده حرارتی بیشتر است.

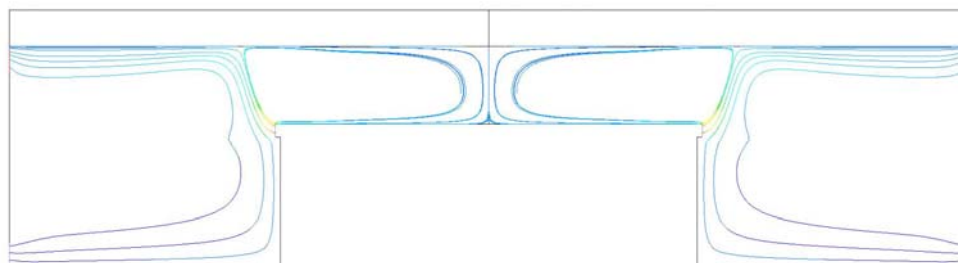


شکل ۷: تغییرات بازده حرارتی براساس ارتفاع دیواره (H)

شکل‌های (۸) و (۹) به ترتیب برای دو حالت معمولی (بدون اعمال دیواره) و قرار دادن دیواره با ورودی و خروجی هوای ۰/۵ سانتیمتر، خط مسیر جریان را بطور تقریبی نشان می‌دهند.



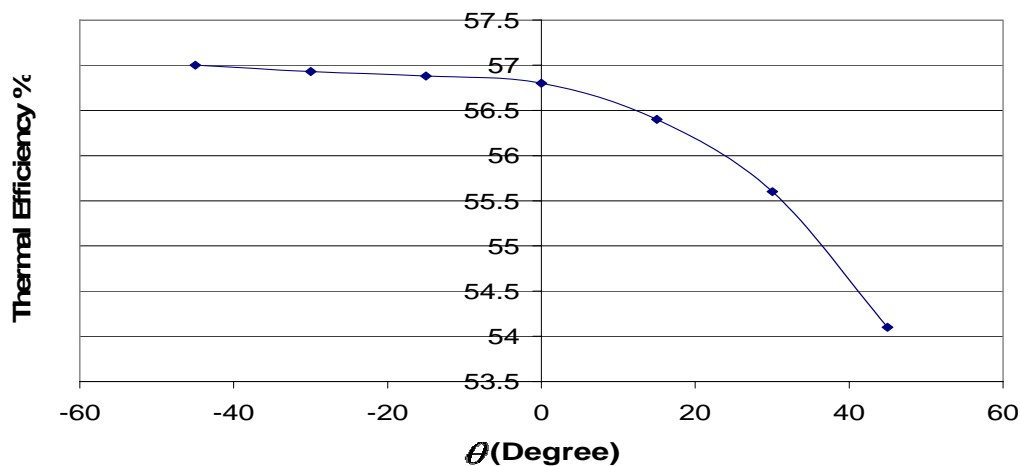
شکل ۸: خط مسیر جریان برای حالت معمولی



شکل ۹: خط مسیر جریان برای حالت قرار دادن دیواره (H)

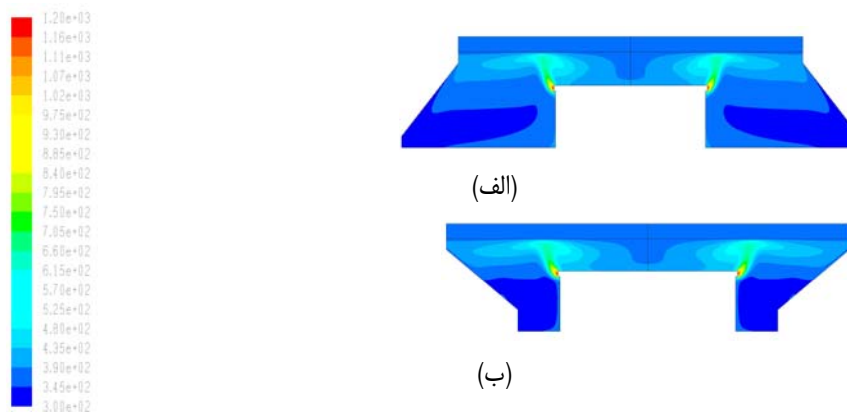
با مقایسه این دو شکل می‌توان گفت با قرار دادن دیوار جامد و محدود و مقید کردن مسیر حرکت جریان هوا مطابق با شکل (۹) تقریباً تمام هوایی که به دیواره‌ی موازی با جت برخورد می‌کند هوای داغ شده در اثر تماس با شعله گرم می‌باشد، اما در حالت معمولی مانند شکل (۸) مقداری از هوای محیط بدون تماس با جت گرم، به هوای خروجی برخورد کرده و موجب افت دمایی آن می‌شود. دلیل این امر را می‌توان هدایت هوای هجومی به شعله از سمت پایین دانست چرا که در حالت عادی هوا از بالا و در تماس با هوای خروجی وارد محفظه شده و بعد از افت دمایی که برای هوای بالا ایجاد می‌کند به سمت پایین هدایت شده و از پایین به شعله نزدیک می‌شود. البته دلیل دیگر افزایش بازده حرارتی با افزایش ارتفاع دیواره (H) را می‌توان ناشی از کاهش اتلافات انتقال حرارت تشعشی جت گرم به محیط نیز دانست.

شکل (۱۰) میزان تغییرات بازده حرارتی را بر اساس تغییرات زاویه θ شکل (۳) نشان می‌دهد. با توجه به نمودار بدست آمده هر چقدر زاویه θ کاهش یابد (منفی‌تر شود) بازده حرارتی افزایش می‌یابد، بطوری که در حالت زاویه $\theta = -45$ مقدار بازده حرارتی به حدود ۵۷ درصد رسیده است.



شکل ۱۰: میزان تغییرات بازده حرارتی بر اساس تغییرات زاویه θ

با افزایش زاویه θ یعنی متمایل شدن دیواره‌ها به سمت بیرون بازده کاهش یافته و به حدود ۵۴/۱ درصد رسیده است. در این حالت می‌توان گفت مایل بودن دیواره‌ها در زاویه‌های کمتر از $\theta = 0$ (زاویه‌های منفی) تاثیر بسیار کمی بر بازده حرارتی دارد چرا که با تغییر زاویه ۴۵ درجه دیواره یعنی از $\theta = 0$ تا $\theta = -45$ حداکثر تغییر در بازده تنها ۰/۲ درصد می‌باشد.



شکل ۱۱: کانتور دما (K)

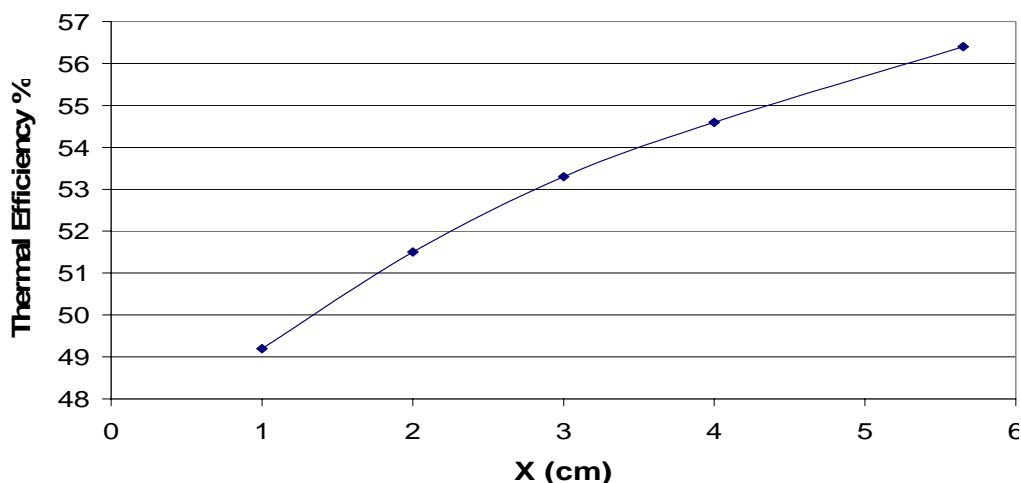
الف) در $\theta = +45$ ب) در $\theta = -45$

با دقت در شکل (۱۱) تفاوت اندک در توزیع دمایی دو حالت مرزی را می‌توان مشاهده کرد. همانطور که در این شکل مشخص است در حالت $\theta = -45$ مسیر حرکت هوای ورودی طوری است که بر افت دمایی گازهای خروجی کمترین تاثیر را دارد و همچنین سبب تمایل بیشتر گازهای خروجی از جت گرم به سمت دیوار موازی با جت می‌گردد. اما در حالت $\theta = +45$ هوای ورودی به دلیل تماس بیشتر با گازهای خروجی تقریباً سبب افت دمایی زیادی در آنها می‌شود. نکته دیگر که صحت بیشتر این مطلب را نمایان می‌کند، شیب نمودار در شکل (۱۰) در زوایای بزرگتر از صفر است که در این زوایا شیب نمودار تندتر از حالت‌هایی است که زوایا کوچکتر از صفر می‌باشد، بنابراین این افت بازده در زوایای مثبت چشمگیرتر به نظر می‌رسد.

در تغییر دیواره‌ها و مایل کردن آنها و پس از بررسی نتایج در حالت جدید به نظر می‌رسد نزدیک کردن ورودی هوا به شعله سبب افزایش تقریبی بازده می‌گردد. چرا که در هر دو حالت $\theta = -45$ و $\theta = +45$ سطح تبادل حرارت دیواره یکسان بوده و هوا نیز تقریباً از پایین به سمت شعله حرکت کرده است. بنابراین یکی از تفاوت‌های بین این دو حالت، در فاصله ورودی هوا تا شعله می‌باشد. به همین دلیل در طرح بعدی سعی شده است این نکته در نظر گرفته شود. در همین راستا در طرح بعدی ورودی هوا در نزدیکی شعله قرار داده شد و تغییرات بازده محاسبه گردید. به منظور اعمال این تغییر مطابق شکل (۴) دیواره‌ها بصورت دو تکه در نظر گرفته شده‌است.

در طرح‌های قبلی هوا پس از ورود به محفظه و طی یک مسافت به شعله نزدیک می‌شد، در این طرح این مسافت به کوتاه‌ترین مقدار ممکن تقلیل یافته است. شکل (۱۲) تغییرات بازده را بر اساس تغییر فاصله بین شعله و ورودی هوا (X) در

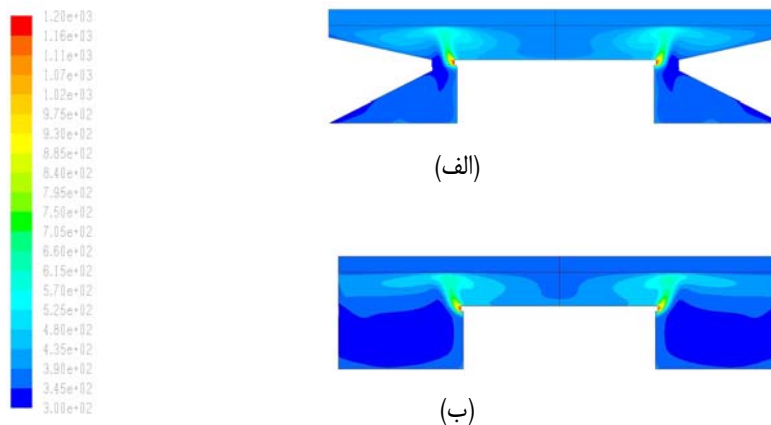
شکل (۴) نشان می‌دهد. همانطور که از نمودار مشخص است با دور شدن ورودی هوا از شعله بازده حرارتی افزایش یافته است بطوری که از فاصله یک سانتیمتر تا ۵/۶۵ سانتیمتر بازده ۷ درصد افزایش داشته است.



شکل ۱۲: تغییرات بازده بر اساس فاصله بین جت گرم و ورودی هوا (X)

شکل (۱۳) کانتور دما، در حالتی که $X=2$ سانتیمتر و $Y=2/3$ سانتیمتر و حالتی که $X=5/65$ سانتیمتر و $Y=2/3$ سانتیمتر است را نشان می‌دهد با توجه به شکل‌های (۴) و (۶). همانطور که از کانتورهای دما نیز مشخص است با قرار گرفتن قسمت بالایی دیواره در نزدیکی شعله و دیوار موازی با آن شکل (۱۳ - الف)، انتقال حرارت از دیواره زیاد شده و سبب افت دمایی گازهای خروجی گردیده بطوری که در لبه انتهایی دیوار موازی با جت، دمای گاز خروجی در حالت دوم ($X=5/65$ سانتیمتر) حدود ۱۵ درجه سانتیگراد بیشتر از حالت اول ($X=2$ سانتیمتر) است. یعنی با افزایش سطح دیواره سطح انتقال حرارت افزایش یافته و بازده حرارتی کاهش یافته است.

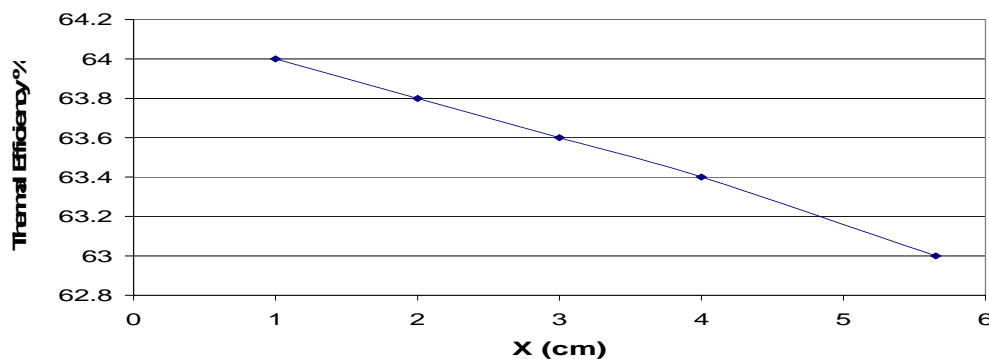
همانطور که بیان شد انتقال حرارت از دیواره‌ها به محیط، هم بصورت جابجایی و هم بصورت تشعشع در نظر گرفته شده است. به همین خاطر در شکل (۱۲) با افزایش X در واقع سطح دیواره‌ها و سطح انتقال حرارت کمتر شده و در نتیجه بازده افزایش یافته است. یعنی تاثیر مثبت نزدیکی ورودی هوا به شعله که در قسمت قبل اثبات شد، در این حالت تحت الشعاع افزایش سطح انتقال حرارت دیواره قرار گرفته است. دلیل این ادعا را می‌توان با رسم نمودار تغییرات بازده (شکل (۴۹)) در حالتی که دیواره‌ها عایق هستند بخوبی نشان داد. نکته دیگر افزایش انتقال حرارت تشعشعی از ورودی هوا در زمانی که فاصله X کم می‌باشد، است. چرا که با نزدیک شدن ورودی هوا به شعله میزان تشعشع گازهای داغ به هوای بیرون بخاطر ضریب دید بهتر افزایش می‌یابد.



شکل ۱۳: کانتور دما (K).

(الف) در حالت $X = 2$ سانتیمتر و $Y = 2/3$ سانتیمتر. (ب) در حالت $X = 5/65$ سانتیمتر و $Y = 2/3$ سانتیمتر

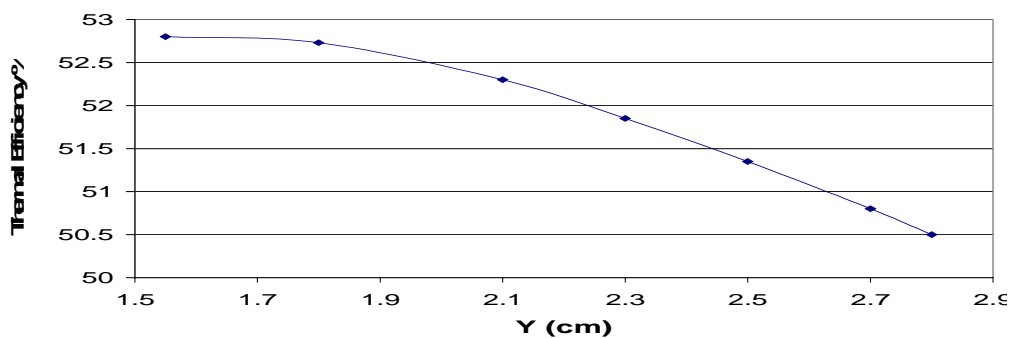
همانطور که از شکل (۱۴) مشخص است با عایق کردن دیواره‌ها روند تغییرات بازده با فاصله بین شعله و ورودی هوا معکوس گردیده، یعنی این بار با افزایش X بازده حرارتی کاهش یافته است. دلیل این امر را می‌توان متمایل شدن گازهای حاصل از شعله به سمت دیوار موازی با آن و خروج این گازها بدون تماس با هوای سرد دانست.



شکل ۱۴: تغییرات بازده بر اساس فاصله بین شعله و ورودی هوا (X) در حالت دیواره‌های عایق

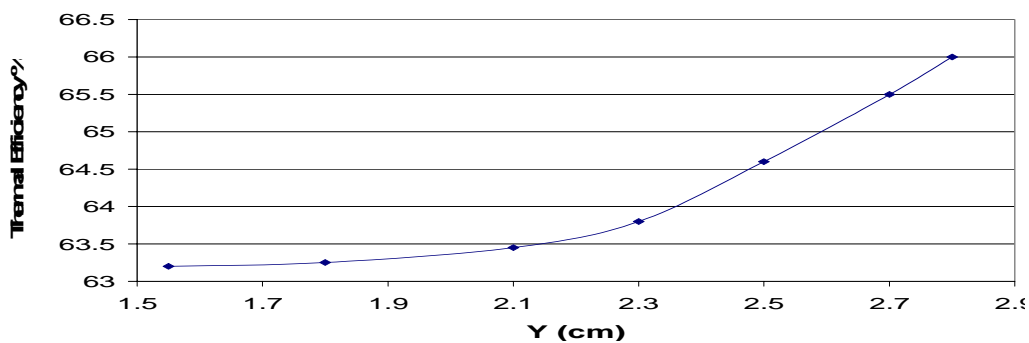
همچنین در این حالت با عایق کردن دیواره‌ها تفاوت بین دو مقدار ابتدایی ($X=1$ سانتیمتر) و انتهایی ($X = 5/65$ سانتیمتر) کاهش یافته است که همانگونه که بیان شد میزان اثرگذاری انتقال حرارت از دیواره بر بازده حرارتی را نشان می‌دهد. همچنین با عایق کردن دیواره‌ها بازده افزایش چشمگیری داشته که امری بدیهی است.

اگر متغیر X ثابت (در این حالت $X=2$ سانتیمتر) فرض شده و این بار تغییرات بازده حرارتی بر اساس تغییر فاصله ورودی هوا از شعله در راستای عمودی (Y در شکل (۴)) در نظر گرفته شود، می توان تاثیر جهت حرکت هوای سرد به سمت شعله را بر بازده حرارتی ارزیابی کرد. شکل (۱۵) تغییرات بازده را بر اساس تغییرات Y نشان می دهد. با توجه به نمودار هر چقدر ورودی هوا پایین تر از شعله باشد (Y کمتر) بازده حرارتی بیشتر است.



شکل ۱۵: تغییر فاصله ورودی هوا از شعله در راستای عمودی (Y)

نکته ای که در این حالت می توان به آن اشاره کرد، افزایش انتقال حرارت از دیواره ها با افزایش مقدار Y است. چرا که با نزدیک شدن دیواره بالایی به گازهای گرم خروجی مقدار انتقال حرارت از طریق دیواره بسیار افزایش می یابد. میزان این اثر گذاری را می توان با عایق کردن دیواره مشاهده کرد. شکل (۱۶) میزان تغییرات بازده حرارتی را بر اساس تغییرات Y در حالتی که دیواره ها عایق باشند، نشان می دهد. با توجه به نمودار، با عایق کردن دیواره ها روند تغییرات بازده معکوس حالت قبل گردیده است یعنی با افزایش ارتفاع ورودی هوا (Y) بازده حرارتی افزایش یافته است. همانطور که بیان شد دلیل این امر را می توان متمایل شدن گازهای حاصل از شعله به سمت دیواره موازی با آن و خروج این گازها بدون تماس با هوای سرد دانست. چرا که دیواره ها، عایق در نظر گرفته شده است.



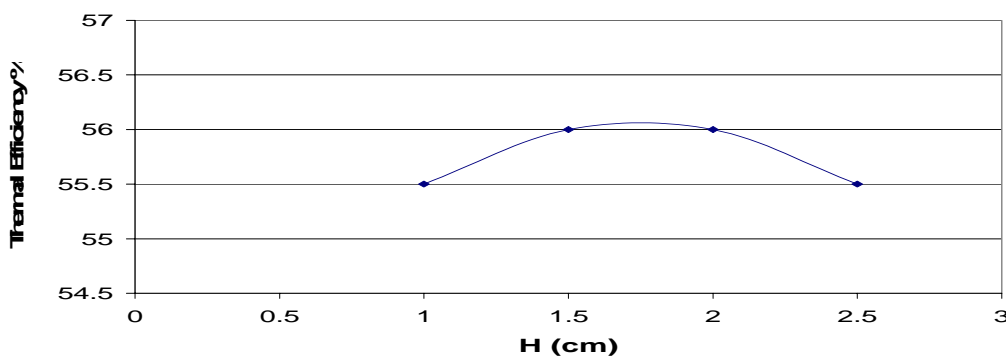
شکل ۱۶: تغییرات بازده حرارتی بر اساس تغییرات (Y) در حالت دیواره های عایق

با دقت و ارزیابی نتایج حاصل از طرح‌های ارائه شده می‌توان گفت بدون در نظر گرفتن عایق برای دیواره‌ها، بیشترین بازده مربوط به دیواره مایل در زاویه $\theta = -45^\circ$ می‌باشد. این نتیجه این نظریه را که اگر هوای مورد نیاز شعله از جهت پایین تامین گردد، موجب افزایش بازده می‌شود تقویت می‌کند. هجوم هوا از جهت پایین به سمت شعله موجب متمایل شدن شعله به سمت دیوار موازی با آن و در نتیجه افزایش انتقال حرارت به آن می‌شود. همچنین هوای ورودی بطور کامل با شعله تماس داشته و هیچگونه افت دمایی را برای گازهای داغ موجب نمی‌شود.

در همین راستا در طرح بعدی هوای مورد نیاز شعله از پایین به سمت آن هدایت شده‌است تا تاثیر کامل این نظریه نیز به خوبی دیده شود. شکل (۵) ساختار کلی طرح جدید را نشان می‌دهد. در این حالت نیز بخاطر افزایش مقدار هوای ورودی و برابر شدن آن با مقدار مرجع، ورودی هوا در حدود $1/2$ سانتیمتر در نظر گرفته شده است.

پس از حل عددی معادلات حاکم و شبیه سازی هندسه‌ی موردنظر، بازده حرارتی در این حالت بر اساس ارتفاع مشعل (H) بدست آورده شد که در شکل (۱۷) نشان داده شده‌است. همانطور که مشخص است در مقایسه با حالتی که هوای ورودی از جانب مشعل وارد می‌شد (شکل (۱۰) $\theta = -45^\circ$)، بازده مقداری کمتر شده است.

می‌توان دلیل این اختلاف تقریباً کم بازده را در میزان اتلافات حرارتی ناشی از تشعشع گازهای گرم، از ورودی هوا دانست، چرا که بخاطر ضریب دید بهتر جت گرم (شعله)، در حالت ورودی هوای پایین (شکل ۵) نسبت به زمانی که ورودی هوا جانب مشعل است (شکل (۳) $\theta = -45^\circ$)، انتقال حرارت تشعشعی از آن ورودی تقریباً دو برابر شده است.

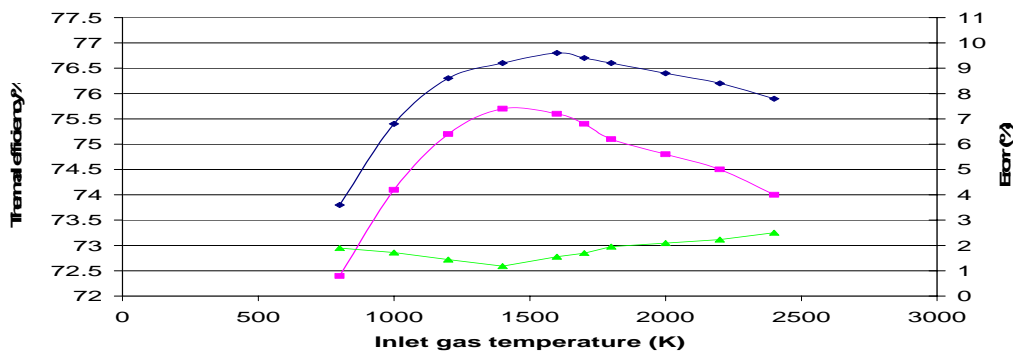


شکل ۱۷: تغییرات بازده حرارتی بر اساس ارتفاع (H)

با توجه به شکل (۱۷)، ارتفاع پایه مشعل در این حالت تاثیر چندانی بر روی بازده حرارتی ندارد، چرا که مقدار ورودی هوا در هر حالت یکسان بوده و تنها می‌توان کاهش سطح دیواره را دلیل بر افزایش اندک بازده حرارتی در ارتفاع‌های کم دانست که این امر نیز بر اثر افزایش انتقال حرارت تشعشعی از ورودی هوا در ارتفاع‌های خیلی کم، کاملاً بی اثر شده و حتی در این حالات بازده کاهش هم یافته است.

اعتبار سنجی

همانطور که بیان شد در این زمینه‌ی خاص (بررسی جهت هجوم هوا به سمت جت گرم) تحقیقات چندانی صورت نگرفته است، اما جهت ارزیابی روش حل، یکی از تحلیل‌های انجام شده در زمینه مدل‌سازی انتقال حرارت از مشعل به ظرف که توسط مهدی کارزارجدی و همکارانش در مقاله‌ای ارائه شده است [۶]، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بدست آمده با نتایج ارائه شده در این مقاله همخوانی داشته و اختلاف نتایج کمتر از ۳٪ می‌باشد. شکل (۱۸) این اختلاف را بطور کمی نشان می‌دهد.



شکل ۱۸: ارزیابی تحلیل در یک حالت خاص و مقدار خطا

اندازه‌گیری آلاینده‌ها

بعد از انجام تحلیل عددی و بررسی نتایج، بیشترین افزایش بازده و تاثیرگذارترین حالت مربوط به حالت دیواره‌های مایل و برای $\theta = -45$ بدست آمد. اما نکته حائز اهمیت در این جا اجرایی شدن طرح است. زمانی اعمال تغییر در ساختار مشعل جهت افزایش بازده می‌تواند مورد قبول واقع شود که موجب افزایش آلاینده‌های ناشی از احتراق نگردد. بطور کلی در تمامی طراحی‌هایی که در زمینه احتراق صورت می‌گیرد، رویکرد اصلی، افزایش بازده حرارتی در قبال افزایش نیافتن گازهای آلاینده می‌باشد.

در همین راستا با انجام آزمایش، اقدام به اندازه‌گیری گازهای آلاینده‌ی تولید شده برای دو حالت معمولی مشعل و حالت قرار دادن دیواره‌های مایل ($\theta = -45$) شده است. به این منظور از یک دستگاه اندازه‌گیری با ۶ سنسور حساس جهت اندازه‌گیری مقدار گازهای NO ، CO ، SO_2 ، NO_2 ، که در ارتفاع ۵۰ سانتیمتری بالای مشعل قرار داده شدند، استفاده شد.

در ابتدا مقدار گازهای آلاینده در محیط آزاد یعنی بدون هیچگونه شعله‌ی روشنی اندازه‌گیری شد سپس مشعل گاز روشن شده و بعد از قرار دادن ظرف بر روی آن پس از حدود ۱۵ دقیقه اقدام به اندازه‌گیری گردید. در نهایت با قرار دادن دیواره‌های مورد نظر بر روی مشعل مورد آزمایش در همان شرایط و پس از ۱۵ دقیقه اندازه‌گیری انجام شد برای این دو حالت نتایج در جدول (۱) آورده شده است.

جدول ۱: گازهای آلاینده (ppm) در دو حالت، عادی و قرار دادن دیواره

NO ₂	SO ₂	CO	NO	نوع گاز	حالت مشعل
۰/۰۴	۰/۲	۷/۸	۰		معمولی
۰/۰۴	۰/۲	۸/۲	۰		(دیواره) ($\theta = -45$)
۰/۰۴	۰/۲	۵	۰		هوای آزاد

همانطور که از جدول مشخص است با قرار دادن دیواره دور مشعل، مقدار گاز CO حدود ۵ درصد افزایش یافته است یعنی از حدود ۷/۸ ppm به ۸/۲ ppm رسیده است و مقدار بقیه گازهای آلاینده ثابت مانده است.

در فرایند سوختن گاز متان تنها امکان تولید دو نوع گاز آلاینده NO و CO وجود دارد. اگر شرایطی فراهم شود که دمای سوختن گاز متان بالا برود (حدود ۲۰۰۰ درجه سانتیگراد) احتمال تجزیه گاز N₂ (نیتروژن) به دو مولکول N و ترکیب آن با O (اکسیژن) بسیار زیاد می شود که این امر موجب تشکیل گاز سمی NO می گردد. احتمال دیگر برای تشکیل گاز NO، برخورد شعله با یک جسم جامد است. یعنی اگر جسم جامدی ضخامت شعله (طول ناحیه واکنش) را برهم بزند احتمال تشکیل گاز NO وجود دارد. بدین صورت که اگر جسم جامد در جهت کاهش ضخامت شعله حرکت کند مقدار NO افزایش می یابد و اگر در جهت افزایش ضخامت شعله حرکت کند مقدار NO کاهش می یابد. با این تفاسیر امکان تغییر در مقدار گاز آلاینده NO با قرار دادن دیواره بر روی مشعل اجاق گاز تقریباً وجود ندارد چرا که هم دمای احتراق و هم ارتفاع کف ظرف از شعله تقریباً ثابت مانده است.

امکان تشکیل گاز CO ارتباط مستقیم با مقدار هوای مورد نیاز شعله دارد. یعنی اگر اکسیژن کافی جهت فرایند سوختن در دسترس نباشد، احتراق ناقص شده و تولید گاز آلاینده CO به شدت افزایش می یابد. افزایش ۵ درصدی در میزان تولید گاز CO که با قرار دادن طوقه مشاهده شد، نشان می دهد که شعله در این حالت به هوای بیشتری جهت احتراق نیاز دارد. اما این مقدار هوای اندک را می توان از طریق افزایش هوای اولیه با تغییر در منفذ ورودی هوای لوله چپقی و یا با تغییر اندکی در شکل دیواره جهت افزایش هوای ثانویه، جبران کرد.

نکته دیگری که لازم است بدان اشاره گردد، استاندارد مقدار آلاینده CO است. بر طبق جداول استاندارد سازمان محیط زیست ایران، مقدار حد مجاز آلاینده CO برای ۸ ساعت کار در یک محیط ۹ ppm و بیشترین مقدار مجاز برای یک ساعت کار ۳۵ ppm می باشد. یعنی اگر در محیطی با هوای ساکن یا در حال تعویض، شخصی به مدت ۸ ساعت حضور داشته باشد مقدار متوسط گاز آلاینده CO در این فضا نباید از مقدار ۹ ppm بیشتر باشد این در حالی است که با توجه به محل قراردادن دستگاه، سنسورهای اندازه گیری در محلی که بیشترین تراکم گازهای آلاینده است قرارداده شده اند. بنابراین افزایش مقدار آلاینده CO به ۸/۲ ppm با قرار دادن دیواره، برای ۸ ساعت کار در یک محیط (مانند آشپزخانه) در محدوده استاندارد قرار دارد و نمی تواند خطری را برای انسان ایجاد کند.

نتیجه گیری

به طور کلی می‌توان گفت قرارداد یک مرز جامد بین محیط و فضای اطراف شعله موجب افزایش بازده حرارتی آن می‌گردد که کاهش اتلافات ناشی از انتقال حرارت جابجایی و تشعشع علت اصلی این افزایش است. همچنین در هر حالت میزان انتقال حرارت از دیواره‌ها بر بازده تاثیر زیادی گذاشته و عایق کردن مرز جامد موجب افزایش بازده می‌گردد.

حرکت هوا از سمت پایین به طرف جت گرم نیز در حالت کلی موجب تمایل بیشتر گازهای حاصل از شعله به سمت دیوار موازی با آن شده و بازده حرارتی افزایش می‌یابد. بیشترین بازده حرارتی مربوط به حالت دیواره‌های مایل و برای $\theta = -45^\circ$ بدست آمد که دلیل اصلی آن را می‌توان کاهش اتلافات ناشی از انتقال حرارت جابجایی و در مقایسه با حالت ورودی هوا از پایین (شکل (۵)) کاهش اتلافات حرارت تشعشعی دانست.

با اندازه‌گیری آلاینده‌های مربوط به دیواره با $\theta = -45^\circ$ مشخص گردید که تنها آلاینده CO و به میزان ۵ درصد با قرار دادن دیواره بر روی مشعل افزایش می‌یابد. این مقدار افزایش در محدوده‌ی استانداردهای سازمان محیط زیست است و مشکلی ایجاد نمی‌کند.

بنابراین اگر بتوان هوای موردنیاز شعله را از سمت پایین تامین کرد، مطمئناً میزان انتقال حرارت از شعله به کف ظرف افزایش می‌یابد.

منابع

- [1] Anderson, J., and Stresino E. (1963) "Heat transfer from flames impinging on flat and cylindrical surfaces," *Journal of Heat Transfer*, Vol. 85, pp. 49-54.
- [2] Beer, J., and Chigier N. (1968) "Impinging jet flames," *Journal of Combust Flame*, Vol. 12, pp. 575-86.
- [3] Berument, Hakan, and Tasci, Hakan, (2002), Inflationary effect of crude oil prices in Turkey, *Physica A*, 316, 568-580.
- [4] Chen, Shiu-sheng, (2008), Oil price pass-through into inflation, *Energy Economics* (August, 2008).
- [5] Hou, S. S., and KO, Y. C. (2004) "Effects of heating height on flame appearance temperature field and efficiency of an impinging laminar jet flame used in domestic gas stoves" *Journal of Energy Conversion and Management*, Vol. 45, pp. 1583-1595.
- [6] Jeddi, M. K., Hannani, S. K., and Farhanieh, B. (2004) "Study of mixed convection heat transfer from an impinging jet to a solid wall using a finit_element method _application to cooktop modeling," *Journal of Numerical Heat Transfer, Part B*. 46, pp. 1-11.
- [7] Incropera, F. P., and Dewitt, D. P. (1990) "Fundamental of Heat and Mass Transfer" John Wiley and Sons. New York.