

بررسی اثرات تغییر دمای هوای ورودی اولیه بر روی دمای شعله در محفظه احتراق میکرومتری

محمد صدیقی^۱، انور احمد خواه^۲

آزمایشگاه تحقیقاتی سوخت و سامانه های احتراقی - دانشگاه هوایی شهید ستاری

m_sedighi@iust.ac.ir

چکیده

۳/۵ cm

در این تحقیق پدیده احتراق در یک محفظه احتراق میکرومتری بصورت عددی مورد بررسی قرار گرفته است. مدل سازی عددی در حالت دو بعدی انجام شده و جنس پوشش دیواره های محفظه احتراق سیلیکون در نظر گرفته شده و توزیع دمای گاز و نرخ حرارتی دیواره مبنای مقایسه نتایج با نتایج تست تجربی قرار گرفته است. در اثر تغییر دمای اولیه مخلوط سوخت و هوا در ورود به محفظه احتراق میکرومتری و اثرات آن بر روی توزیع دما در امتداد پایین دست جریان بررسی شده است. نتایج حاصل از تحقیق نشان می دهد که پیش گرم کردن مخلوط سوخت و هوا باعث افزایش دمای اولیه سوخت و هوا گردیده و این امر امکان تشکیل شعله پایدار را در محفظه احتراق میکرومتری افزایش می دهد. همچنین توزیع دمای بدست آمده از روش عددی هم خوانی مناسبی را با نتایج تجربی موجود دارد.

واژه های کلیدی: محفظه احتراق میکرومتری - حل عددی - احتراق - مدل توربولانسی.

۱- مقدمه

۲/۵ cm

یکی از پارامترهای مهم شعله، پروفیل دمای شعله بوده که علاوه بر محاسبه پارامترهای دیگر شعله توسط آن، در طراحی محفظه های احتراقی میکرومتری نقش ویژه ای دارد. همان طور که مشخص است، با کاهش ابعاد محفظه احتراق افت گرما به دیواره ها درصد زیادی از گرمای تولید شده در منطقه واکنش را شامل گردیده، که باعث کاهش دمای شعله و در نتیجه خاموشی آن می شود به عبارتی با کاهش ابعاد محفظه احتراق، نسبت سطح به حجم افزایش یافته و اثرات بر هم کنش میان سطح و شعله بیشتر می شود.

مطالعه احتراق در مقیاس کوچک به دلیل این حقیقت که سوخت های هیدروکربنی می توانند ۵۰ الی ۱۰۰ برابر بیشتر از یک باطری با همان وزن انرژی ذخیره کنند اهمیت پیدا کرده است. این موضوع گرایش زیادی را در پیدا کردن راه های موثر، برای رهاسازی این انرژی و تبدیل آن به انرژی الکتریکی در یک سیستم با ابعاد میکرومتری ایجاد کرده است. حجم پایین، دمای بالا و اکسیداسیون محیط داخل موتور احتراق، استفاده از روش های مستقیم مثل ترموکوپلها [۱] و حسگرهای گازی [۲] را با مشکل مواجه می کند، بنابراین نیاز به ابزار تشخیص و اندازه گیری غیر مستقیم وجود دارد.

محفظه های احتراقی در ابعاد میکرومتری تفاوت های اساسی متعددی در مقایسه با احتراق در مقیاس معمولی دارند. چون هر قدر ابعاد محفظه کاهش می یابد، نسبت سطح به حجم افزایش می یابد که این باعث افزایش نسبت تلفات حرارتی به تولید انرژی می گردد. موتورهای احتراقی هر قدر کوچک تر گردند ناکارآمدتر می شوند چرا که بیشتر فرآیندهای اتلاف انرژی مثل

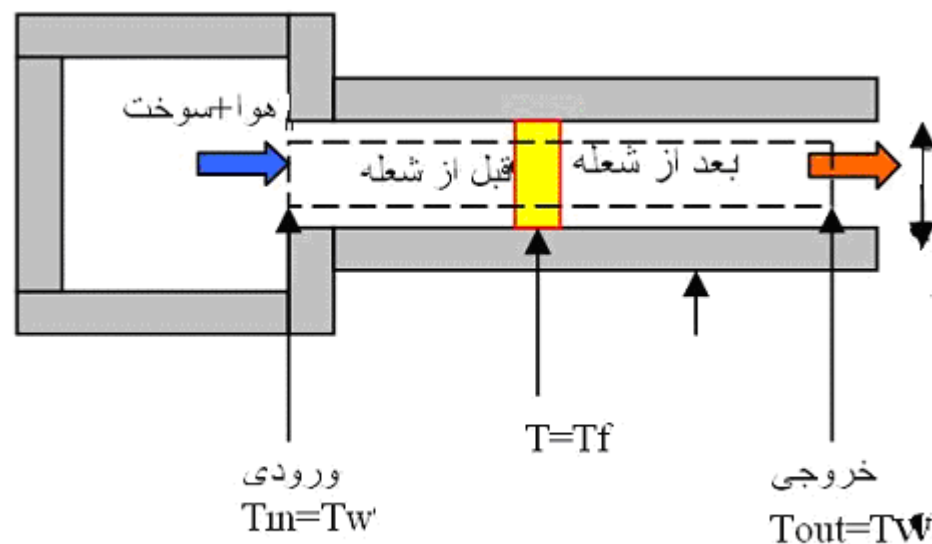
۱- استادیار، دانشگاه هوایی شهید ستاری

۲- کارشناس ارشد هوافضا، دانشگاه هوایی شهید ستاری

اصطکاک، تبادل گرمایی و تشعشع با سطح متناسب بوده، در حالی که تولید انرژی متناسب با حجم بوده و کاهش ابعاد محفظه احتراق نسبت سطح به حجم را افزایش می‌دهد و با کوچکتر شدن موتور، مسئله مهم فرآیند پایدارسازی شعله می‌شود. عمده موفقیت‌های مطالعات حل عددی در ارتباط با محفظه‌های میکرومتری بر اساس تطابق مناسب نتایج بدست آمده از هر دو روش استوار بوده و تلاش شده که در مدل سازی با روش عددی شرایط آزمایش تجربی مشابه سازی شده و نتایج بدست آمده تطابق قابل قبولی با یکدیگر داشته باشند. بکارگیری روشهای قدرتمند در حل عددی و الگوهای رایج در تست تجربی موجب جهش در ساخت انواع سوخت ها [3,4] تولید موادی با دمای اشتعال بیشتر و جلوگیری از شرایط نامطلوب و درک عمیق تر رفتار احتراق شده است.

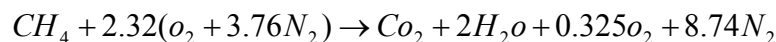
۲- مدل انتقال حرارت برای یک محفظه احتراق میکرومتری

برای شروع تحلیل یک مدل شماتیک از محفظه احتراق میکرومتری در شکل (۱) نشان داده شده است محفظه شامل دو دیواره موازی بوده و مخلوط سوخت و هوا مطابق شکل وارد کانال می‌شود. شرایط مرزی بر اساس میزان درجه حرارت در انتهای محدوده شعله اولیه و ثانویه تعیین شده است برای محدوده شعله اولیه شرایط مرزی شامل درجه حرارت ورودی و درجه حرارت جرقه در شعله جلویی است. به منظور انجام این آنالیز درجه حرارت جرقه باید نزدیک درجه حرارت آدیاباتیک شعله T_f فرض شود. شرایط مرزی برای محدوده شعله ثانویه این است که درجه حرارت گاز مساوی درجه حرارت جرقه در انتهای سمت چپ (شعله جلویی) باشد که درجه حرارت گاز مساوی درجه حرارت دیواره دور از انتهای سمت راست است. مشخص شده که یکسان دانستن پدیده سوختن و اختلاط در مدل سازی عددی مناسب نبوده و باید بین این دو تفاوت قائل شد. [5, 6]. بنابر این در انتخاب مدل توریولانسی و برهم کنش در حل عددی ضروری است در صورت وجود تشعشع باید اثرات آن در معادله گنجانده شود [7,8].



شکل ۱- محفظه احتراق میکرومتری

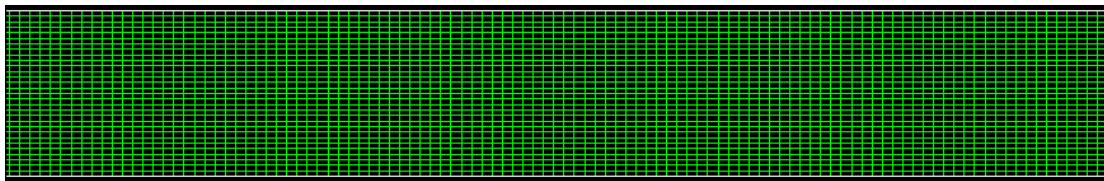
در این تحقیق سوخت مورد استفاده متان بوده و احتراق در محفظه میکرومتری برای $\phi = 0.86$ صورت پذیرفته است. با توجه به الگوی معادله واکنش در حالت مخلوط رقیق معادله موازنه شده احتراق بصورت زیر خواهد بود.



۳- شبکه محاسباتی

در تحلیل عددی جریان از نرم افزار Fluent نسخه ۶/۲ استفاده شده است. مدل استفاده شده با استفاده از مدل ساز Gambit نسخه ۲/۴ ساخته شده است. برای مش بندی مدل از مش بندی با سازمان (Structured) استفاده شده است. (شکل ۲) استفاده از این نوع مش بندی برای مدل های مختلف احتراق در حالت دو بعدی یک روش معمول است و به طور گسترده در حل عددی مسائل مربوط به احتراق مورد استفاده قرار گرفته است

جهت رسیدن به یک شبکه محاسباتی مناسب تعداد شبکه ها به حدود ۱۰۰۰۰ افزایش یافته و برای اجرای برنامه از یک کامپیوتر با دو پروسسور استفاده گردید. باید توجه داشت که نیازی به افزایش تعداد المانهای جهت افزایش دقت محاسبات نخواهد بود و هرچه تعداد المانهای مجاور بدنه ریزتر گردند (شکل ۲) نتایج تغییرات چندانی نخواهد کرد.



شکل ۲- شبکه محاسباتی با سازمان

۴- مدل اغتشاشی RSM

در حل عددی جریانهای احتراقی معادلات بقای جرم، مومنتم، انرژی پیشرفت واکنش و پارامترهای اغتشاشی با یستی حل شوند در این تحقیق مدل اغتشاشی مورد استفاده جهت حل معادلات جریان از نوع Reynolds Stress Model (RSM) می باشد.

در مدل سازی جریان اغتشاشی پارامتر سرعت در یک نقطه بصورت مجموعه یک سرعت متوسط (Time Average) و یک ترم نوسانی کوچک در نظر گرفته می شود.

$$u_i = \bar{u}_i + u'_i \quad (1)$$

با جایگزینی معادله سرعت (۱) در معادلات مومنتم و صرف نظر کردن از ترمهای متوسط و ساده سازی معادلات در نهایت معادله مومنتمی که جهت پیش بینی کردن جریان اغتشاشی حل می شود بدین فرم در خواهد آمد.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] - \left(\frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \right) - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho g_i + F_i + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u'_i u'_j) \quad (2)$$

در معادله (۲) رفتار اغتشاشی جریان از طریق پارامتر $\rho u'_i u'_j$ مدل خواهد شد. این فرم از معادله مومنتم همراه با مقادیر سرعتهای متوسطی که اثر اغتشاشی جریان نیز در آن گنجانده شده در ارتباط با مدل حل می گردد. جهت حل معادله (۲)، عبارت $\rho u'_i u'_j$ که معرف تنشهای رینولدز (Reynolds Stress) است، همراه با مقادیر سرعتهای متوسط از طریق مدل توربولانسی مرتبط می شوند. در روش RSM برای بدست آوردن پارامتر $\rho u'_i u'_j$ از معادله زیر در حالت سه بعدی استفاده می شود.

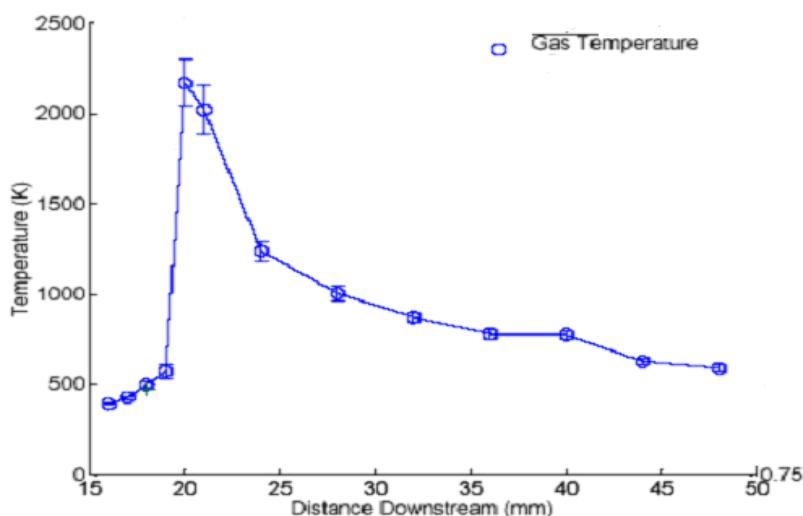
$$(3)$$

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial t}(\overline{u_i' u_j'}) + u_k \frac{\partial}{\partial x_k}(\overline{u_i' u_j'})}_{\text{convective term}} = \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_k} \left[\overline{u_i' u_j' u_k'} + \frac{p}{q}(\delta_{kj} u_i' + \delta_{ik} u_j') - \nu \frac{\partial}{\partial x_k}(\overline{u_i' u_j'}) \right]}_{\text{diffusive term}} - \underbrace{\left[\overline{u_i' u_k'} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \overline{u_j' u_k'} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right]}_{p_{ij} = \text{production}} + \underbrace{\frac{p}{q} \left[\frac{\partial u_i'}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j'}{\partial x_i} \right]}_{\phi_{ij} = \text{pressure strain}} - \underbrace{2\nu \left[\frac{\partial u_i'}{\partial x_k} \frac{\partial u_j'}{\partial x_k} \right]}_{\varepsilon_{ij} = \text{dissipation}} - \underbrace{2\Omega_k \left[\overline{u_j' u_m'} \varepsilon_{ikm} + \overline{u_i' u_m'} \varepsilon_{jkm} \right]}_{R_{jk} = \text{rotational term}} + \delta_{ij} + D_{ij}$$

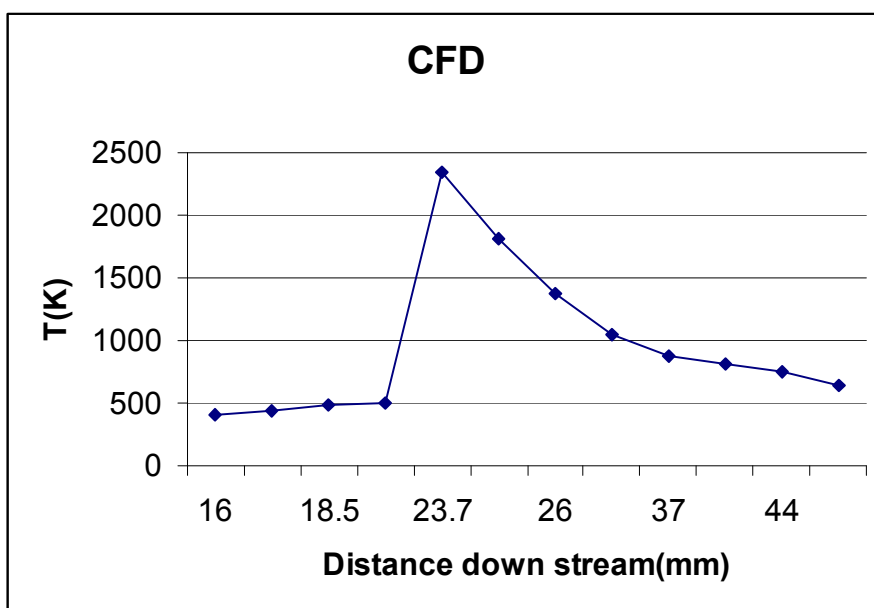
مقادیر δ_{ij} , D_{ij} مقادیر ثابتی هستند. در فرمول فوق (۳) عباراتی نظیر نرخ تغییرات تنش رینولدز، میزان جابجائی تنش، ضریب پخش متلاطم، تولید تنش، عبارت فشار - تغییر بعد (Pressure - Strain) و پراکندگی تنشهای رینولدز وجود دارند.

جهت محاسبه پخشندگی متلاطم D_{IJ} از مدل ساده شده دیفیوژن-گرادیان استفاده می شود [9] برای مدل کردن جمله فشار - تغییر بعد از مدل خطی شده ای که توسط گیبسون ولاندر ارائه شده، استفاده می گردد [10]. برای جمله پخش متلاطم از روش Kolmo grov استفاده خواهد شد. [11].

همگرا شدن مانده ها در حل عددی با استفاده از این روش خیلی به کندی صورت می گیرد و جهت تسریع آن بهتر است که برای حدس های اولیه مقادیر، از روشهایی آسانتر مانند $k - \varepsilon$ استفاده شود و در ادامه حل روش RSM بکار گرفته شود. چون در این روش ارتباط مابین معادلات مومنتم و مقادیر متغیرهای اغتشاشی با دقت بالایی صورت می گیرد. بنابراین همگرا شدن حل معادلات با مشکلات بیشتری نسبت به سایر روشهای دیگر نظیر $k - \varepsilon$ استاندارد یا RNG همراه خواهد بود و لازم است در طول پروسه حل عددی در مقادیر تجربی نرم افزار، تغییراتی داده شود. این مدل اغتشاشی در مقایسه با مدلهای مختلف توربولانسی $k - \varepsilon$ از جهت پیش بینی فیزیک جریان و حل معادلات اغتشاشی کاملتر است در این روش پیوستگی محکمی بین معادلات مومنتم جریان و پارامترهای اغتشاش جریان ایجاد می شود در نهایت پیش بینی فیزیک جریان با دقت بیشتری صورت خواهد گرفت [12-13]. برای انجام تحلیل عددی محفظه احتراق میکرومتری و امکان مقایسه نتایج حاصل از آن با نتایج آزمایشگاهی از داده های موجود در مرجع [14] که مربوط به نتایج تجربی حاصل از یک شعله پیش مخلوط برای سوختن متان و هوا با $\phi = 0.86$ و سرعت جریان 0.44 متر بر ثانیه می باشد استفاده شده است توزیع دما در امتداد جریان در شکل شماره ۳ که مربوط به آزمایش تجربی است نشان داده شده است. هندسه مورد استفاده در حالت دو بعدی جهت پیش بینی جریان متناسب با محفظه احتراق این آزمایش تجربی ایجاد شده است. در شکل ۳ داده های تجربی مورد استفاده در مرجع [14] نشان داده شده است. این منحنی توزیع دما در پایین دست جریان برای احتراق مخلوط متان و هوا با دمای اولیه 341 درجه کلوین در محفظه احتراق میکرومتری نشان می دهد.



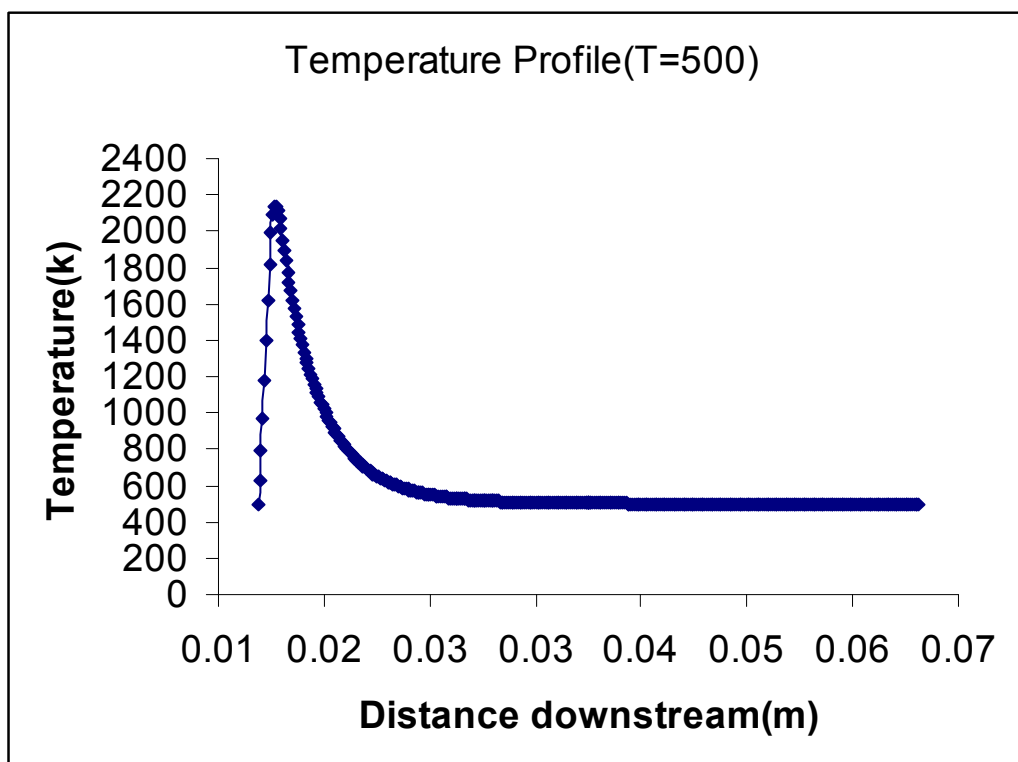
شکل ۳- منحنی توزیع دما در امتداد خط مرکزی - تست تجربی [14].



شکل ۴- منحنی توزیع دما در امتداد خط مرکزی دمای اولیه (k) ۳۴۱- CFD

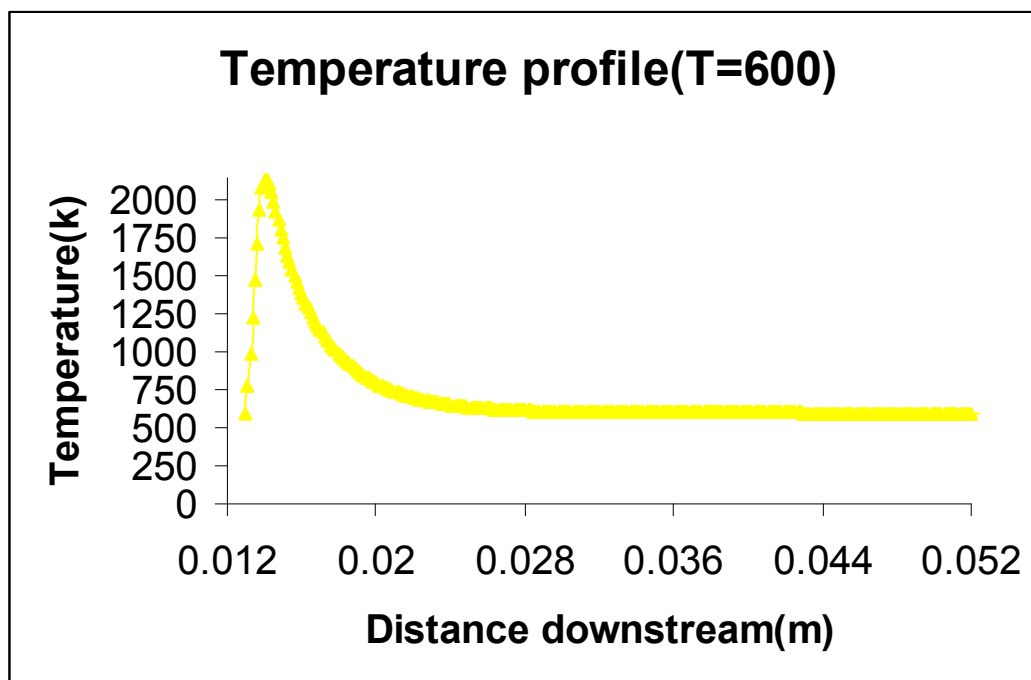
در شکل ۴ منحنی توزیع دما در امتداد طولی محفظه احتراق میکرومتری و روی خط مرکزی دیواره نشان داده شده است با توجه به شکل ملاحظه می گردد منحنی توزیع دما در امتداد جریان تابع طول محفظه بوده و متغیر است. بر اساس محاسبات حل عددی مکزیمم دما برابر $2056.47(k)$ می باشد. مقدار حداکثر دمای شعله برای احتراق استوکیومتری متان حدود $2120(k)$ می باشد. این اختلاف نشان دهنده این واقعیت است که متان در این مدل سازی بطور کامل محترق نشده است. موقعیت مکانی ماکزیمم دما نسبت به دهانه ورودی برابر 0.142205 متری می باشد. یکی از پارامترهای نامناسب برای احتراق یکنواخت بودن دمای شعله در امتداد طولی محفظه است. منطقی است که توزیع دما در امتداد طولی محفظه احتراق

بتدریج زیاد شده تا به دمای ماکزیمم شعله برسد و سپس بصورت توانی کاهش پیدا کند. با مقایسه شکل ۳ و ۴ در پیش بینی موقعیت طولی ماکزیمم دما و تطابق شیب منحنی توزیع دما تطابق قابل قبولی مشاهده می گردد.



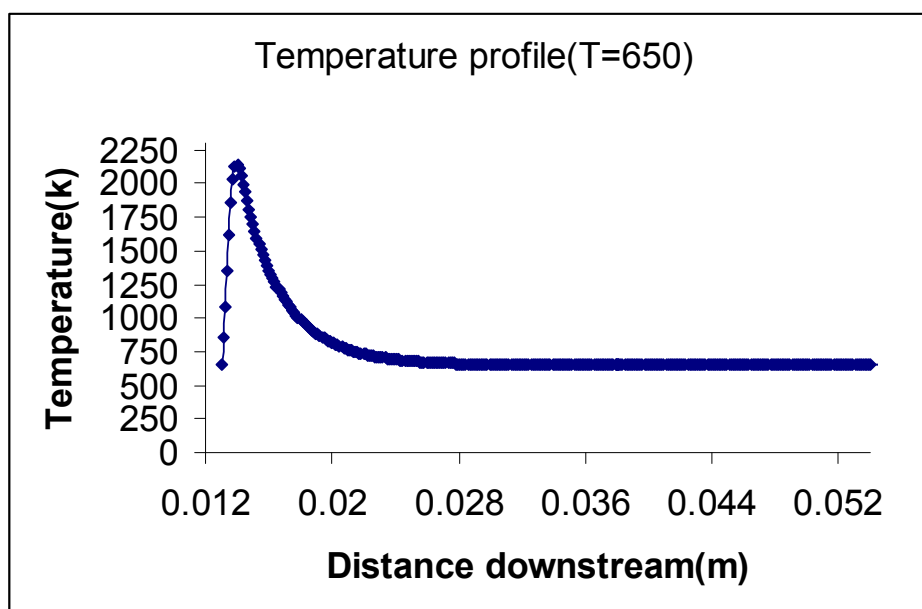
شکل ۵- منحنی توزیع دما در امتداد خط مرکزی دمای اولیه (k) ۵۰۰

در شکل منحنی توزیع دما در امتداد طولی محفظه احتراق میکرومتری نشان داده شده است در حل عددی دمای اولیه مخلوط سوخت و هوا (k) ۵۰۰ می باشد. بر اساس محاسبات حل عددی ماکزیمم دما برابر (k) ۲۱۳۸/۱۴ می باشد. موقعیت مکانی ماکزیمم دما نسبت به دهانه ورودی برابر ۳۰/۱۴۱۹ متری می باشد. با افزایش دمای اولیه مخلوط سوخت و هوا، ماکزیمم دمای شعله افزایش پیدا کرده و موقعیت طولی ماکزیمم دما در امتداد جریان به نتایج آزمایش تجربی به سمت دهانه ورودی نزدیکتر شده است.



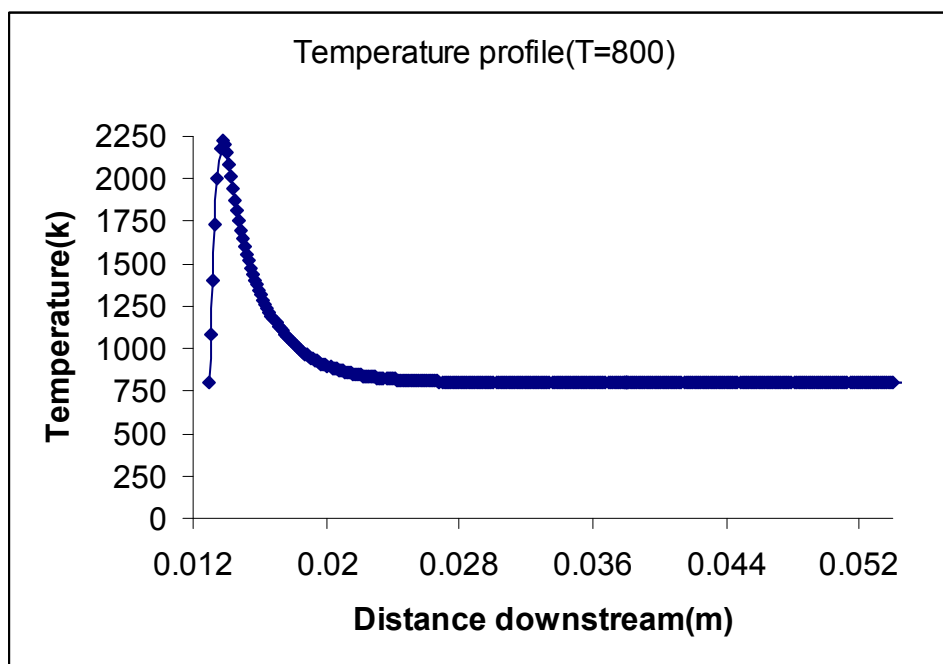
شکل ۶- منحنی توزیع دما در امتداد خط مرکزی دمای اولیه ۶۰۰(k)

در شکل منحنی توزیع دما در امتداد طولی محفظه احتراق میکرومتری نشان داده شده است در حل عددی دمای اولیه مخلوط سوخت و هوا ۶۰۰(k) می باشد. بر اساس محاسبات حل عددی ماکزیمم دما برابر ۲۱۳۸/۰۵ (k) می باشد. موقعیت مکانی ماکزیمم دما نسبت به دهانه ورودی برابر ۱۴۱۷۶/۰ متری می باشد.



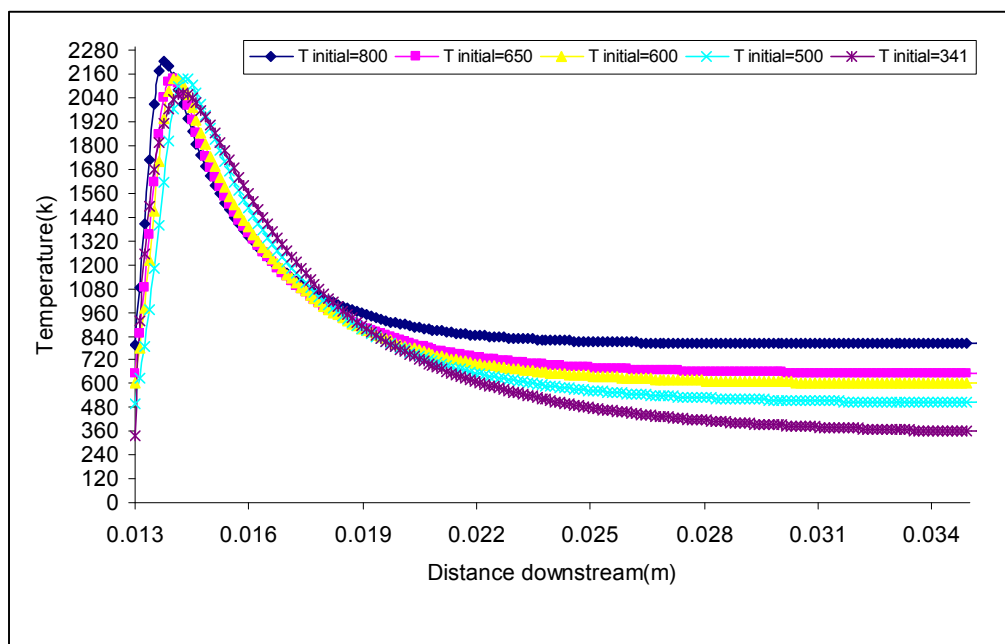
شکل ۷- منحنی توزیع دما در امتداد خط مرکزی دمای اولیه ۶۵۰(k)

در شکل منحنی توزیع دما در امتداد طولی محفظه احتراق میکرومتری نشان داده شده است در حل عددی دمای اولیه مخلوط سوخت و هوا 650 (K) می باشد. بر اساس محاسبات حل عددی مکزیمم دما برابر $2169/19\text{ (K)}$ می باشد. موقعیت مکانی ماکزیمم دما نسبت به دهانه ورودی برابر $138715/0$ متری می باشد.



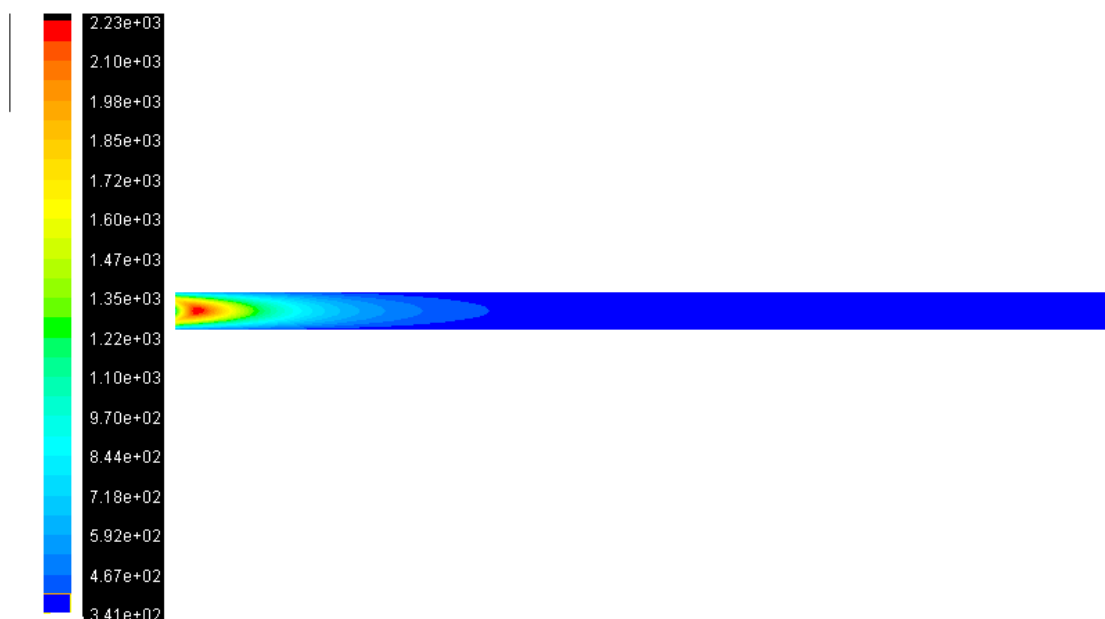
شکل ۸- منحنی توزیع دما در امتداد خط مرکزی دمای اولیه 800 (K)

در شکل منحنی توزیع دما در امتداد طولی محفظه احتراق میکرومتری نشان داده شده است در حل عددی دمای اولیه مخلوط سوخت و هوا 800 (K) می باشد. بر اساس محاسبات حل عددی مکزیمم دما برابر $2224/8\text{ (K)}$ می باشد. موقعیت مکانی ماکزیمم دما نسبت به دهانه ورودی برابر $13747/0$ متری می باشد.



شکل ۹- منحنی توزیع دما در امتداد خط مرکزی

در شکل منحنی توزیع دما در امتداد طولی محفظه احتراق در جهت پایین دست جریان با دماهای اولیه متفاوت نشان داده شده است. با مقایسه نتایج مشخص می شود که با افزایش دمای اولیه مخلوط سوخت و هوا ماکزیمم دمای شعله افزایش پیدا کرده است. همچنین موقعیت ماکزیمم دما به سمت دهانه ورودی حرکت کرده و شیب منحنی کاهش دما در امتداد طولی با کاهش دمای اولیه بیشتر می شود.



شکل ۱۰- کانتور توزیع دما در محفظه احتراق (T=350 K)

شکل ۱۰ کانتور دما در امتداد محفظه احتراق را نشان می دهد در شکل نحوه اثر گذاری جریان سیال داغ و سیال سرد در جهت طولی جریان مشاهده می گردد. همچنین موقعیت ماکزیمم دما در محفظه احتراق و پایداری آن را نشان می دهد.

۵-نتیجه گیری

همانطوریکه ملاحظه گردید تحلیل عددی انجام شده در زمینه توزیع دما در امتداد طول محفظه احتراق میکرومتری مورد مطالعه تطابق خوبی با نتیجه گیری موجود در نتایج تست تجربی را دارا بوده و رفتار منحنی دما شباهت زیادی با رفتار منحنی دما در حالت تجربی دارد. همچنین نتایج تحلیل انجام شده در این تحقیق مبین این است که پیش گرم کردن مخلوط سوخت و هوا باعث افزایش ماکزیمم دمای شعله گردیده و اختلاف دمای نتایج تجربی و عددی در قسمت دهانه ورودی محفظه احتراق میکرومتری کاهش می یابد. به عبارتی پیش گرمایش باعث افزایش دمای اولیه مخلوط سوخت و هوا گردیده و این امر امکان تشکیل شعله موفق پایدار را در محفظه احتراق افزایش می دهد. یکی از مشکلات حائز اهمیت در محفظه های احتراق میکرومتری عدم امکان تشکیل اشتعال اولیه و در پی آن فقط پایداری شعله می باشد که پیش گرم کردن تا حدودی این مشکل را مرتفع می سازد.

مراجع

- 1-A. F. Bicen, D.G.N. Tse and J. H. Whitelaw, Combustion characteristics of a model can type combustor, Combustion and Flame, 1990, 80, pp 111-125
- 2- W. P. Shih, J. G. Lee and D. A. Santavicca, Stability and Emission Characteristics of a Lean Premixed Gas Turbine Combustor, Proceedings of the Combustion Institute, 1996, 26 pp 2771-2778.
- 3- S.Adachia, A. Iwamoto, S. Hayashib, H. Yamadab and S. Kaneko Emission in Combustion of Lean Methane-air and biomass air mixtures supported by Primary hot burned gas in a multi-stage gas turbine combustor. proceedings of the Combustion Institute. Volume 31, Number 2, pages 3131-3138, 2007
- 4- C. Syred, W. Fick, A. J. Griffiths and N. Syred. Cyclone gasifier and Cyclone combustor for the use of biomass derived gas in the operation of a Small gas turbine in cogeneration Plants, Fuel. Volume 83, Issues 17-18, pages 2381-2392, 2004
- 5-Coelho, P. J., Peters, N.: Combust. Flame; 124:503 (2001)
- 6-Christo, F. C., Dally, B. B.; Combust. Flame; 142:117 (2005)
- 7-Galletti, C., Parente, A., Tognotti, L.: ECCOMAS Thermatic Conference on Computational Combustion, Lisbon, Portugal (2005)
- 8-Advanced Thermodynamics for Engineers
Desmond E Winterbone 1997 NEWYORK DE Winterbone
FE ng , BSc, PhD, DSc, FIMechE, MSAE
- 9-Marcum, D. L., Generation of Unstructured Grid for Viscous Flow Applications, AIAA paper 95-0212, Jan. 1995
- 10-lien F. S., and Ileschziner M. A., Assessment of Turbulent Transport models Including Non-linear RNG Eddy-viscosity formulation and second-moment closure computer and fluid. 1994.
- 11-Gibson M. M., and Launder B. E., Ground Effects on pressure fluctuation in Atmospheric boundary layer. Journal of Fluid Mechanics, 1978.
- 12-Kolmogorov A. N., local structure of turbulence in incompressible viscous fluid for very large reynolds number. Doklady AN. SSSR. Vol 30
- 13-Launder B. E., and Spalding D. B., Lecture in Mathematical Methods of Turbulence. Academic Press, London, England, 1972.
- 14-Veeraragavan, A., Heat Transfer for Improved In-Situ Infrared Temperature Diagnostics in Microcombustor,