

تحلیل عددی ریز احتراق در ریزمحفظه‌های استوانه‌ای پله‌ای با سوخت همگن هیدروژن-هوا و متان-هیدروژن-هوا

حمید شمس^۱، سجاد رحمتیان^۲، آیت اله قره قانی^{۳*}، مصطفی میرسلیم^۴

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

avataallah@aut.ac.ir

چکیده

در این مقاله احتراق در ریزمحفظه‌ها، از طریق تحلیل عددی، مورد مطالعه قرار گرفته است. به این صورت که احتراق مخلوط‌های از قبل آمیخته شده‌ی هیدروژن-هوا و متان-هیدروژن-هوا در ریزمحفظه‌های استوانه‌ای، توسط نرم‌افزار فلوئنت تحلیل شده است. به همین منظور تأثیر پارامترهای مختلفی از قبیل: سرعت (دبی)، سوخت ورودی، نسبت سوخت به هوا و خصوصیات حرارتی دیواره روی ویژگی‌های احتراق بررسی گردیده است. همچنین تأثیر اضافه کردن هیدروژن به متان، به عنوان سوخت، بر روی خصوصیات احتراق، مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که پارامترهای فوق بر روی ویژگی‌های احتراق تأثیرگذار بوده اما میزان تأثیرگذاری آن‌ها متفاوت می‌باشد. با افزایش ضریب تشعشع و ضریب رسانش حرارتی، سرعت شعله و دمای دیواره کم می‌شود. همچنین با افزایش سرعت ورودی و نسبت هم‌ارزی، سرعت شعله و دمای دیواره افزایش می‌یابد. اضافه کردن هیدروژن به متان منجر به افزایش سرعت شعله و پایداری احتراق می‌شود.

واژه‌های کلیدی: مدل‌سازی عددی- ریزاحتراق- مکانیک سیالات- انتقال حرارت- خصوصیات حرارتی

۱- مقدمه

امروزه استفاده از ریزماهوره‌ها و ریز پرنده‌ها، رایانه‌ها و موبایل‌ها، ریزسامانه‌های الکترومکانیکی، ریز موتورهای احتراق داخلی، ریز توربین‌های گازی و ریز سیستم‌های فوتوولتائیک بطور گسترده‌ای افزایش یافته است. یکی از راه‌های تأمین انرژی مورد نیاز برای این وسایل استفاده از ریز احتراق می‌باشد. در تعریف علمی، ریز احتراق به واکنش‌های گفته می‌شود که در آن‌ها ابعاد محفظه‌ی احتراق کمتر از قطر خاموشی شعله می‌باشد [1]. اما در تعریفی ساده و عامیانه‌تر به احتراقی که در محفظه‌هایی بسیار کوچکتر از محفظه‌های معمولی (عموماً در ابعادی به اندازه‌های زیر میلی‌متر، میلی‌متر و سانتی‌متر) انجام می‌شود، ریزاحتراق گفته می‌شود. به دنبال کاهش ابعاد محفظه احتراق‌ها، اندازه‌گیری پارامترهای جریان از قبیل دما و غلظت اجزا در یک ریز محفظه احتراق با مشکل مواجه شده است. زیرا که حسگرها و دستگاه‌های اندازه‌گیری معمولی نسبت به ابعاد طولی این وسایل بسیار بزرگ می‌باشند ولی مطالعات عددی مقدار متوسطی از اطلاعات جزئی پارامترهای جریان را در احتراق‌هایی با حجم کم در اختیار می‌گذارند. بنابراین این نوع تحقیق به‌طور گسترده‌ای در مطالعه‌ی مشخصه‌های جریان‌های ریزاحتراق به کار برده می‌شود. ریموند^۴ و همکارانش [2] شعله‌ی از قبل مخلوط شده‌ی متان و هوا را داخل یک میکرو کانال با در نظر گرفتن

۵- کارشناسی، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۲- کارشناسی، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۳- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۴- هیأت علمی، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

لغزش دما و ناپیوستگی غلظت اجزا در فصل مشترک دیواره و گاز، بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که در شرایط خاصی از قبیل پیش گرمایش^۱ (دمای مخلوط سوخته نشده در ورودی برابر ۱۰۰۰ درجه‌ی سانتیگراد) و ایزوله کردن شعله‌ی مخلوط متان و هوا می‌تواند در رآکتورهای کوچک پایدار بماند. کاراگیانیس^۲ و همکارانش [3] جریان‌های احتراقی مخلوط پیش آمیخته‌ی متان و هوا را داخل ریزرآکتورهایی با دیواره‌ی کاتالیزوری مدل کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که محدوده‌ی پایداری شعله در ریزرآکتورهای کاتالیزوری وسیع‌تر از ریزرآکتورهای کاتالیز نشده می‌باشد. به علاوه نشان داده شد که افزایش فشار، به علت افزایش در واکنش پذیری، منجر به افزایش اشتعال پذیری می‌شود. نورتون^۳ و ولاکوس^۴ [4,5] احتراق پیش آمیخته‌ی متان با هوا و پروپان با هوا را در یک محفظه احتراق با صفحات موازی به همراه در نظر گرفتن مکانیزم واکنش تک مرحله‌ای، مورد مطالعه قرار دادند و نتیجه این شد که رسانایی گرمایی دیواره یک عامل مهم در تعیین محدوده‌ی اشتعال پذیری از طریق کنترل کردن مقدار گرمای بازگردانی (به طریق رسانش گرمایی در داخل دیواره) جهت پیش گرمایش مخلوط سوخته نشده‌ی بالا دست می‌باشد. کایسار^۵ [6] یک مطالعه‌ی پارامتری جهت تعیین ابعاد بهینه‌ی محفظه احتراق (طول محفظه، ضخامت دیواره، عرض کانال و ...) انجام دادند. آن‌ها نشان دادند که نتایج مدل‌های عددی یک بعدی فقط برای دیواره‌هایی با رسانایی گرمایی خیلی کم نسبت به مدل‌های عددی دو بعدی منحرف می‌شود. به این معنا که فرض یک بعدی بودن برای جریان‌های ریزمحفظه با وجود طبیعت دو بعدی جریان در آن قابل قبول می‌باشد. همچنین کایسار و همکارانش عملکرد یک ریزآتش‌زنه را با کاتالیزور پلاتینیوم برای محترق کردن پروپان و هوا تحلیل کردند. معلوم شد که در مقایسه با محفظه احتراق یکسان و بدون کاتالیزگر ریزمحفظه احتراق‌های کاتالیزوری پایدارتر بوده و می‌تواند در دمای دیواره‌ی پایین‌تر و با موادی با عایقیت بیشتر عمل کنند. علاوه بر سوخت‌های هیدروکربنی از قبیل متان و پروپان، هیدروژن نیز عموماً در ریزتولیدکننده‌های توان استفاده می‌شود. احتراق یک مخلوط از قبل آمیخته شده‌ی هیدروژن و هوا در محفظه احتراق‌هایی با اندازه‌های مختلف از میلی‌متر تا میکرون توسط هوا^۶ و همکارانش [7] به طور عددی مورد مطالعه قرار گرفت. باید توجه داشت که اندازه‌ی محفظه احتراق و اتلافات گرمایی از طریق دیواره عوامل کلیدی هستند که باید برای رسیدن به شعله‌ی پایدار داخل یک ریزمحفظه مدیریت شوند. اگر چه این مطالعات عددی عمدتاً در مورد تأثیرات اتلافات گرمایی و نابودی رادیکال‌ها بر روی پایداری شعله در ریزمحفظه‌هایی با هندسه‌ی ساده (کانال‌های صفحه موازی و استوانه‌ای) می‌باشد اما نتایج به دست آمده می‌تواند در مورد محفظه احتراق‌هایی با ساختار پیچیده‌تر الگو قرار گیرند.

در این مقاله مسأله‌ی مورد نظر به ریز محفظه‌هایی با دیواره‌هایی با شرایط متغیر مربوط می‌شود که سوخت با شرایط متفاوت به داخل آن تزریق می‌گردد. هدف از این مقاله شناخت نحوه‌ی توزیع دما و میدان سرعت، جهت درک بیشتر از ساختمان شعله می‌باشد. به همین منظور اثر پارامترهای مختلف بر روی ویژگی‌های احتراق بررسی شده است.

۲- بررسی عددی احتراق مخلوط از قبل آمیخته شده‌ی هیدروژن-هوا در ریزمحفظه‌ی استوانه‌ای:

به طور عمده در مطالعات عددی انجام شده روی ریزاحتراق‌ها به مسأله‌ی تأثیر پارامترهای مختلف بر محدوده‌ی پایداری شعله توجه شده است. این در حالی است که میزان درک از ساختمان شعله، توزیع دما و میدان سرعت در ریزاحتراق نسبتاً کافی نیست. روش‌های عددی به عنوان ابزارهای قدرتمند می‌توانند فضاهای کوچکی را که معمولاً دسترسی به آن توسط وسایل اندازه‌گیری امکان پذیر نیست تحلیل کنند و اطلاعاتی جزئی از پارامترهای مورد نظر را در اختیار بگذارند. به همین منظور در این مقاله احتراق در ریزمحفظه‌هایی با هندسه‌های مختلف (استوانه‌ای و صفحه‌ای) و اندازه‌های متفاوت مورد بررسی قرار گرفته و اثر پارامترهایی از قبیل، نسبت سوخت به هوا، سرعت ورودی و خصوصیات فیزیکی و گرمایی دیواره، بر

¹Preheating

²Karagiannidis

³Norton

⁴Vlachos

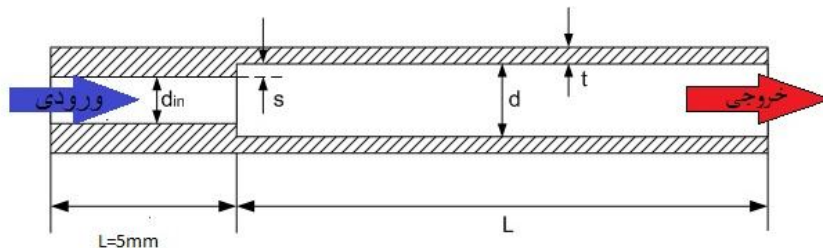
⁵Kaisare

⁶Hua

احتراق بررسی شده است. دلایل اصلی انتخاب هیدروژن به عنوان سوخت، یکی ساده تر بودن مکانیزم های واکنشی هیدروژن نسبت به سوخت های هیدروکربنی و دیگری پایدارتر بودن شعله ی هیدروژن- هوا در ریزاحتراق ها می باشد و همچنین بالا بودن ارزش حرارتی، سرعت نفوذ، سرعت تبخیر و سرعت شعله هیدروژن نسبت به سایر سوخت ها است.

شرح مدل عددی:

شکل ۱ تصویری از مقطع طولی محفظه ی احتراق را نشان می دهد. این محفظه ی از نوع استوانه ای و پله دار می باشد که در آن هیدروژن به همراه هوا وارد محفظه ی احتراق شده و احتراق به صورت پایا^۱ صورت می گیرد. به دلیل آن که مدل دو بعدی است، از دو مختصه جهت تعیین نقاط مختلف استفاده می شود. مختصه ی X نشانگر محور طولی و مختصه های r نشانگر فاصله ی شعاعی از خط مرکزی محفظه می باشد. فرضی که باعث شده است مدل دوبعدی گردد، صفر بودن سرعت در راستای شعاعی و مقارن بودن جریان نسبت به خط مرکزی است.



شکل 1 مقطع طولی ریز محفظه

با در نظر گرفتن فرضیاتی منطقی از قبیل پایدار و دو بعدی بودن جریان، نیوتونی بودن سیال، آرام گرفتن جریان به دلیل کوچک بودن عدد رینولدز و همچنین صرف نظر کردن از نیروی وزن، انرژی جنبشی و کار نیروهای فشاری و اصطکاکی در معادله ی انرژی، معادلات حاکم (انرژی و اجزاء) بر سیستم به شرح زیر می باشند:

$$\frac{\partial}{\partial x}(ruh) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(rvhr) = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_g \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(k_g \frac{\partial T}{\partial r} r \right) - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r r \sum_{i=1}^N Y_i h_i V_i \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left(r \sum_{i=1}^N Y_i h_i U_i \right) + S_h \quad (I)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(ruY_i) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(rvrY_i) = \frac{\partial}{\partial x} \left[D_i \frac{\partial(rY_i)}{\partial x} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[D_i r \frac{\partial(rY_i)}{\partial r} \right] + R_i \quad (II)$$

که در آن ها:

$$S_h = - \sum_i \frac{h_i^0}{M_i} R_i \quad (III)$$

$$R_i = M_{w,i} \sum_{r=1}^{r=N_g} \hat{R}_{i,r} \quad (IV)$$

¹Steady State

$$\hat{R}_{i,r} = \Gamma(n_{i,r}'' - n_{i,r}') \left(k_{f,r} \prod_{j=1}^N [C_{j,r}]^{n_{j,r}'} - k_{b,r} \prod_{j=1}^N [C_{j,r}]^{n_{j,r}''} \right) \quad (1)$$

شرایط مرزی:

شرایط مرزی در ورودی به صورت زیر است:

$$T = 300K, U_x = 1, 2, 4, 8 m/s, U_r = 0, Y_{H_2} = 0.002, Y_{H_2O, H_2O_2, OH, HO_2, H_2O_2} = 0, f = 0.6, 0.8, 1 \quad (2)$$

شرایط مرزی روی خط مرکزی به فرم زیر می باشد:

$$\frac{\partial V_x}{\partial r} = 0, \frac{\partial T}{\partial r} = 0, \frac{\partial Y_i}{\partial r} = 0, V_r = 0 \quad (3)$$

شرایط مسأله در فصل مشترک دیواره با سیال یعنی در $r = R_1$ به صورت زیر می باشد:

$$V_x = 0, V_r = 0, \frac{\partial Y_i}{\partial r} = 0, \frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad (4)$$

و شرایط گرمایی آن به صورت کوپل^۱ در نظر گرفته شده است. یعنی شار حرارتی در فصل مشترک دیواره و سیال با این فرض که دما و شار حرارتی در این محل پیوسته بوده، با استفاده از قانون فوریه محاسبه می شود.

شرایط مرزی روی دیواره ی خارجی ($r = R_2$) که با هوا در تماس است نیز به شکل زیر است:

$$q_w = h_{air} (T_{wo} - T_o) + \epsilon \sigma (T_{wo}^4 - T_o^4) \quad (5)$$

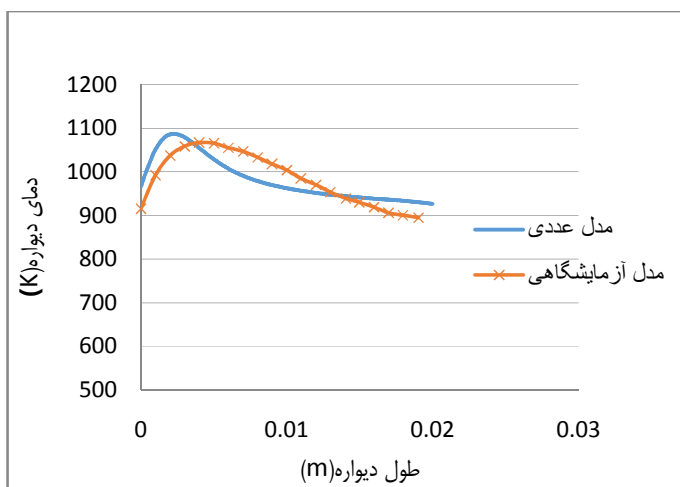
برای حل معادلات از نرم افزار فلوئنت استفاده شده است. معادلات به کمک الگوریتم فشار-مینای ساده گسسته و به صورت عددی حل شده اند. جهت کاهش زمان محاسبات و به دلیل وجود تقارن تنها نیمه ی بالایی ریزمحفظه مورد تحلیل قرار گرفته است. لازم به ذکر است با افزایش شبکه از ۴۰۰ گره به ۵۰۰ گره اختلاف نسبتاً زیادی در پاسخ به وجود می آید ولی با افزایش تعداد گره ها از ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ تغییر محسوسی مشاهده نمی شود. بنابراین در تمامی مدل های مورد بررسی تعداد گره ها در راستای طولی برابر ۵۰۰ در نظر گرفته شده اند، زیرا با افزایش تعداد گره تنها بر زمان حل می افزاییم، در صورتی که تقریباً تغییری در پاسخ صورت نمی گیرد.

۳- نتایج و تحلیل داده ها:

صحت سنجی مدل:

حل عددی یک ابزار مفید برای پی بردن به درستی نتایج آزمایشگاهی و به دست آوردن بینشی عمیق تر نسبت به فرایند احتراق و انتقال حرارت داخل ریزاحتراق ها می باشد. لذا برای درستی این ادعا در شکل ۲ مقایسه ای بین نتایج بدست آمده از یک نمونه ی آزمایشگاهی [8] با نتایج عددی صورت گرفته است. در هر دو حالت شرایط ورودی ابعاد محفظه و خصوصیات حرارتی دیواره یکسان در نظر گرفته شده اند. همان طور که در شکل زیر دیده می شود داده ها با خطایی کمتر از ۵٪ و شکل کلی مناسب، تطبیق خوبی بر نمونه ی آزمایشگاهی دارند.

¹Coupled Wall

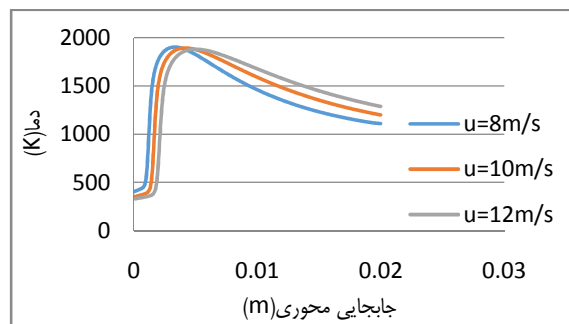


شکل ۲ مقایسه‌ی مدل عددی با مدل آزمایشگاهی

تأثیر سرعت ورودی بر ریزاحتراق:

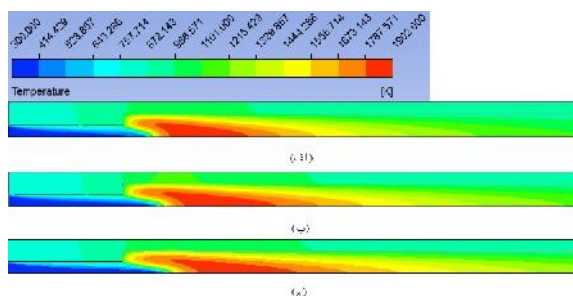
سرعت ورودی بر دمای احتراق، شکل شعله، مکان شعله و ... تأثیر خواهد گذاشت. البته باید خاطر نشان کرد که به دلیل استفاده از محفظه‌ی پلکانی مکان قله‌ی دمای شعله تغییر چندانی نخواهد کرد ولی با افزایش سرعت شکل شعله گسترده‌تر خواهد شد.

در تمامی این مدل‌ها مقدار k ثابت و برابر با $5W/m.K$ ، مقدار h برابر با $10W/m^2.K$ ، طول محفظه 20 میلی‌متر و قطر آن 2 میلی‌متر فرض شده است. ارتفاع پله نیز برابر با 0.5 میلی‌متر در نظر گرفته شده است. شکل ۳ تأثیر افزایش سرعت بر دمای محور محفظه را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با افزایش سرعت دمای محفظه افزایش می‌یابد. شایان ذکر است که فرایند احتراق با افزایش سرعت در نقطه‌ی دورتری آغاز می‌شود. به همین دلیل در ابتدای امر مشاهده می‌شود که دمای محفظه با ورودی $8m/s$ بیش تر است.



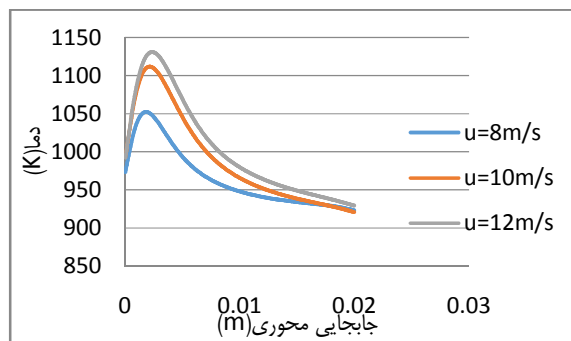
شکل ۳ تأثیر سرعت ورودی بر دمای شعله روی خط مرکزی ریزمحفظه

شکل ۴ توزیع دمای گازهای داخل محفظه و دمای روی دیواره را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش سرعت ورودی، علاوه بر افزایش دما، شکل شعله را نیز کشیده تر می‌کند.



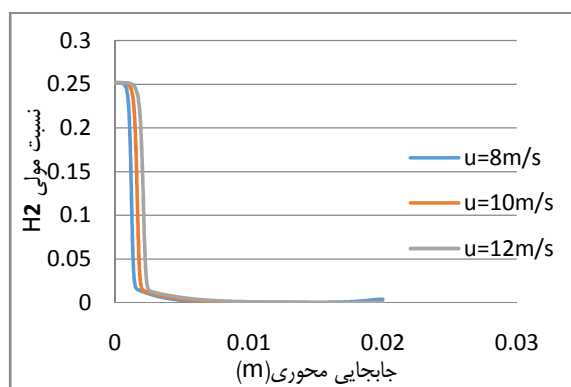
شکل ۴ تاثیر افزایش سرعت بر دمای محفظه احتراق - (الف) سرعت ورودی = ۸ متر بر ثانیه، (ب) سرعت ورودی = ۱۰ متر بر ثانیه، (ج) سرعت ورودی = ۱۲ متر بر ثانیه

تغییر دمای شعله مشخصا بر دمای دیواره نیز تاثیر می گذارد و همان گونه که در شکل ۵ دیده می شود، با افزایش سرعت دمای دیواره افزایش می یابد. البته این شکل نشان می دهد که درصد تغییرات دمای دیواره از ۸ متر بر ثانیه تا ۱۰ متر بر ثانیه بیش تر از تغییر این مقدار بین ۱۰ تا ۱۲ متر بر ثانیه است.



شکل ۵ تاثیر سرعت ورودی بر دمای دیواره

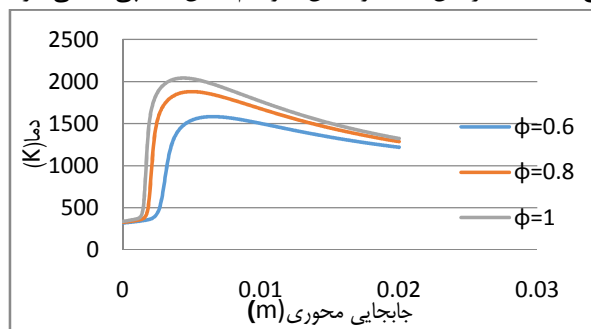
شکل ۶ آغاز فرایند احتراق را بهتر نمایش می دهد. همان گونه که در این شکل مشاهده می شود با افزایش سرعت مصرف H_2 در نقطه ی دورتری آغاز می گردد.



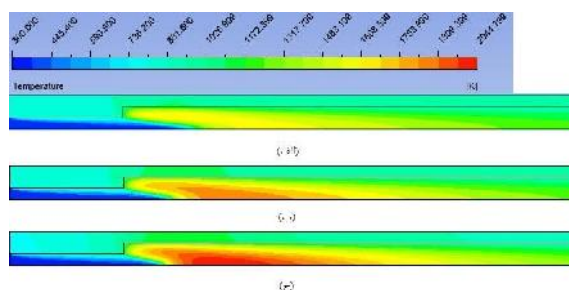
شکل ۶ تاثیر سرعت ورودی بر نقطه آغاز واکنش ها

تأثیر هوای اضافه بر ریزاحتراق:

مطمئناً دمای شعله تحت تأثیر میزان هوای اضافه قرار می‌گیرد. بنابراین در این بخش ϕ از ۰.۶ تا ۱ تغییر داده شده است و با ثابت نگه داشتن بقیه‌ی شرایط از جمله سرعت ورودی تأثیر تغییر ϕ بر شعله بررسی شده است. در شکل ۷ و شکل ۸ دیده می‌شود که با کاهش هوای اضافه دمای شعله بالاتر می‌رود. یعنی با تغییر ϕ از ۰.۶ تا ۱ قله‌ی دمای شعله از ۱۶۰۰ تا ۲۱۰۰ تغییر می‌کند. کاملاً واضح است که افزایش تعداد واکنش‌ها و کم شدن آنتالپی اضافی هوا باعث افزایش دما می‌شود.

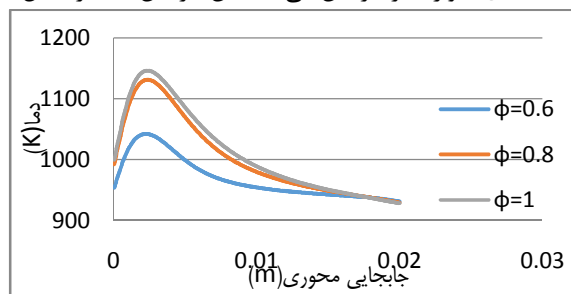


شکل ۷ تأثیر هوای اضافه بر دمای محور تقارن محفظه



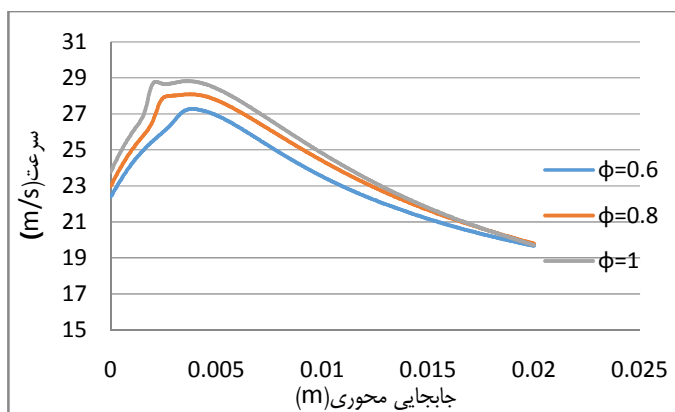
شکل ۸ تأثیر هوای اضافه بر دمای محفظه احتراق - (الف) $\phi=0.6$, (ب) $\phi=0.8$, (ج) $\phi=1$

مشخصاً با افزایش دمای شعله، دمای دیواره نیز افزایش می‌یابد. این افزایش دما در شکل ۹ قابل مشاهده است.



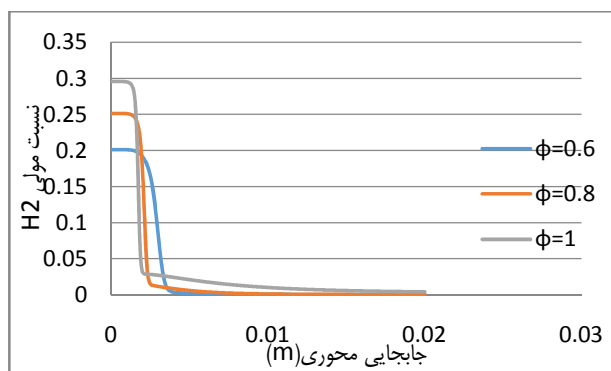
شکل ۹ تأثیر هوای اضافه بر دمای دیواره

سرعت شعله نیز تابع ϕ می‌باشد. با افزایش میزان ϕ همان گونه که در شکل ۱۰ دیده می‌شود، سرعت شعله افزایش پیدا می‌کند.



شکل ۱۰ تاثیر هوای اضافه بر سرعت شعله روی محور تقارن محفظه

نکته‌ی جالب توجه این است که با افزایش مقدار ϕ و یا به عبارت دیگر کاهش هوای اضافی احتراق در نقطه‌ی نزدیک-تری نسبت به ورودی آغاز می‌شود. در شکل ۱۱ این پدیده قابل مشاهده است.

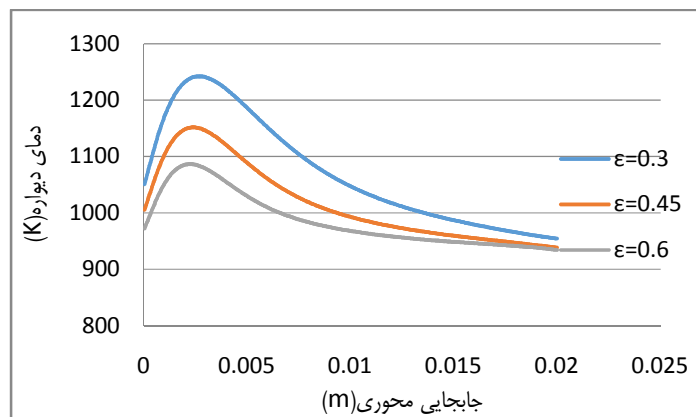


شکل ۱۱ تاثیر هوای اضافه بر نقطه‌ی آغاز احتراق

تاثیر ضریب گسیل تشعشعی بر ریزاحتراق:

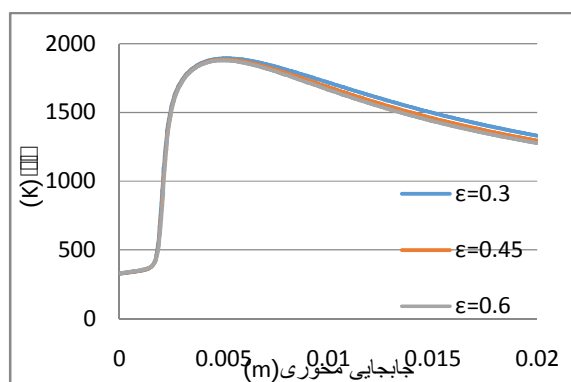
یکی از کاربردهای مهم ریزمحفظه‌ها استفاده از آن‌ها برای تولید الکتریسیته است. بدین گونه که با نصب سلول‌های فتوولتاییک^۱ از تشعشع در اطراف محفظه الکتریسیته تولید می‌شود. از این رو بررسی تاثیر ضریب تشعشعی بسیار بااهمیت است. در این قسمت از مطالعه، با تغییر ϵ از ۰.۳ تا ۰.۶، تغییر پارامترهای احتراق بررسی می‌شود. لازم به ذکر است که مقدار k ثابت و برابر با $5W/m.K$ ، مقدار h برابر با $10W/m^2.K$ ، طول محفظه ۲۰ میلی‌متر و قطر آن ۲ میلی‌متر فرض شده است. ارتفاع پله نیز برابر با ۰.۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. همان‌گونه که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، دمای دیواره به شدت از مقدار ϵ تاثیر می‌پذیرد. با افزایش ضریب گسیل تشعشعی، مقاومت گرمایی دیواره کم شده و باعث کاهش دمای دیواره می‌شود که این یک ویژگی منفی محسوب می‌شود. از طرف دیگر با تغییر ϵ از ۰.۳ تا ۰.۶، دمای دیواره تغییرات کم‌تری را به خود می‌بیند. بدین معنی که دیواره دمای تقریباً ثابتی را دارد و در طول آن میزان تشعشع یکسان است، که این یک ویژگی مثبت محسوب می‌شود. بنابراین می‌بایست با توجه به کاربرد، حالتی بهینه را برای آن یافت.

¹PV cell



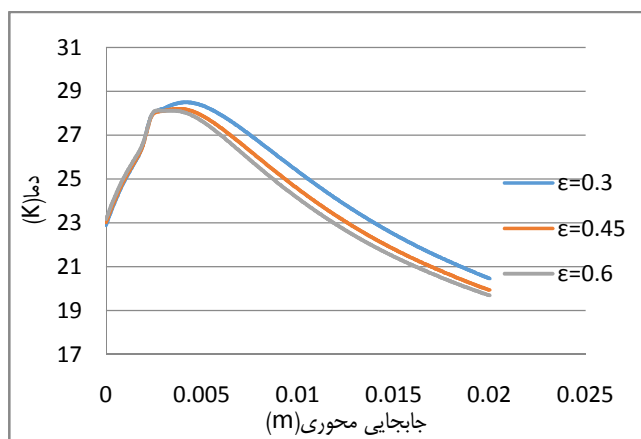
شکل ۱۲ تاثیر ε بر دمای دیواره

تغییر دمای دیواره بر دمای گازهای محفظه احتراق و سرعت شعله تاثیرگذار است. همان گونه که در شکل ۱۳ دیده می-شود، با افزایش ε و متعاقباً کاهش دمای دیواره، دمای شعله نیز کم تر می شود. البته این تغییر دمای شعله از ε=0.3 تا ε=0.45 مشهودتر است.



شکل ۱۳ تاثیر ε بر دمای محور محفظه احتراق

این تغییر دما باعث تغییر در سرعت شعله نیز می شود. در شکل ۱۴ دیده می شود که با افزایش ε، سرعت شعله کم تر می شود.

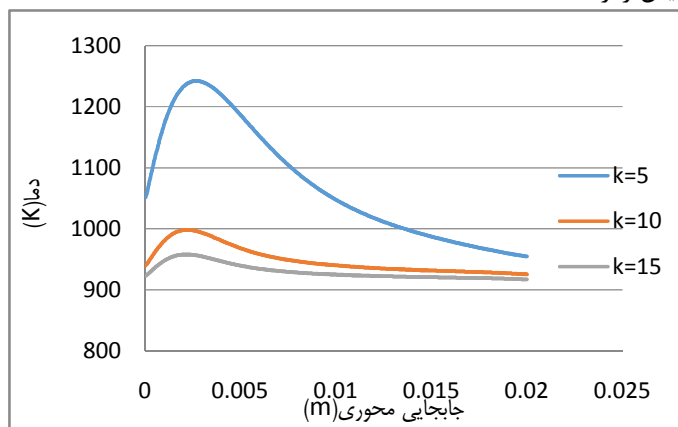


شکل ۱۴ تاثیر ε بر سرعت شعله

تاثیر ضریب رسانش گرمایی دیواره بر ریزاحتراق:

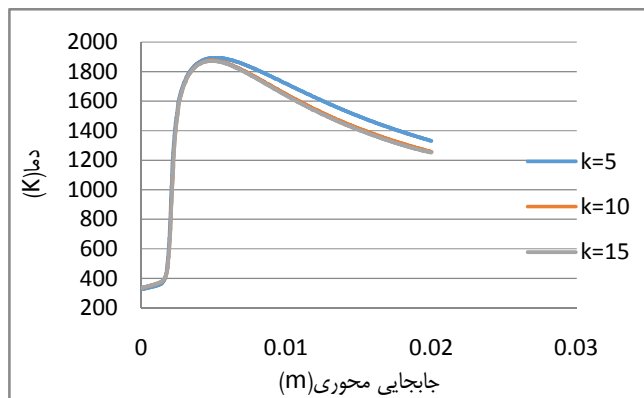
رسانش گرمایی دیواره یک پارامتر اصلی در تعیین توزیع دمای دیواره می‌باشد. اکثر مراجع و کتاب‌ها مقدار عددی رسانش گرمایی را برای فولاد زنگ نزن در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد 25 W/m.K در نظر می‌گیرند اما به علت دمای بالای دیواره، سطح داخلی محفظه احتراق در طول زمان اکسید شده و ضریب رسانش گرمایی آن کاهش می‌یابد. چون که ضخامت دیواره ناچیز است، خواص آن به طور قابل ملاحظه‌ای تغییر می‌یابد و دیگر نمی‌توان از ضریب رسانش گرمایی 20 W/m.K استفاده نمود. برای بررسی تاثیر تغییر k بر پاسخ در این قسمت با تغییر ضریب رسانش گرمایی از ۵ تا ۱۵ نتایج حاصله از نرم‌افزار فلوئنت برداشت شده و مقایسه می‌گردند.

با افزایش میزان k مقاومت حرارتی محفظه کاهش می‌یابد. این کاهش مقاومت حرارتی باعث انتقال حرارت بیش‌تر شده و دمای دیواره را کاهش می‌دهد. همچنین این افزایش باعث می‌گردد که دمای نقاط روی دیواره به یکدیگر نزدیک‌تر شوند و به نوعی گرادیان دما در دیواره کاهش یابد. شکل ۱۵ به خوبی این تغییرات را نمایش می‌دهد. البته در این شکل دیده می‌شود که تاثیر افزایش k از ۵ تا ۱۰ بیش‌تر از ۱۰ تا ۱۵ است.



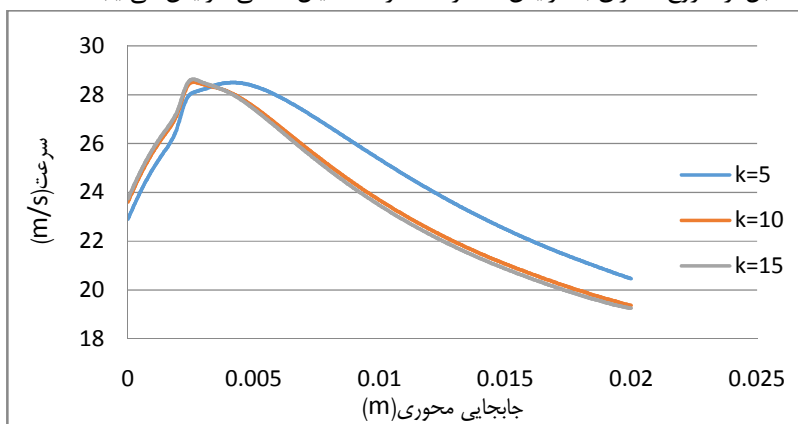
شکل ۱۵ تاثیر افزایش k بر دمای دیواره

همانند تاثیر ε ، با افزایش k دمای شعله کاهش و سرعت آن نیز افت می‌کند. شکل ۱۶ تاثیر k بر دمای محفظه و شکل بعد از آن تاثیر آن را بر سرعت شعله نمایش می‌دهد. مشاهده می‌شود که با تغییر k از ۱۰ تا ۱۵ تغییرات بسیار ناچیزی در دما و سرعت شعله اتفاق می‌افتد.



شکل ۱۶ تاثیر افزایش k بر دمای محور تقارن محفظه

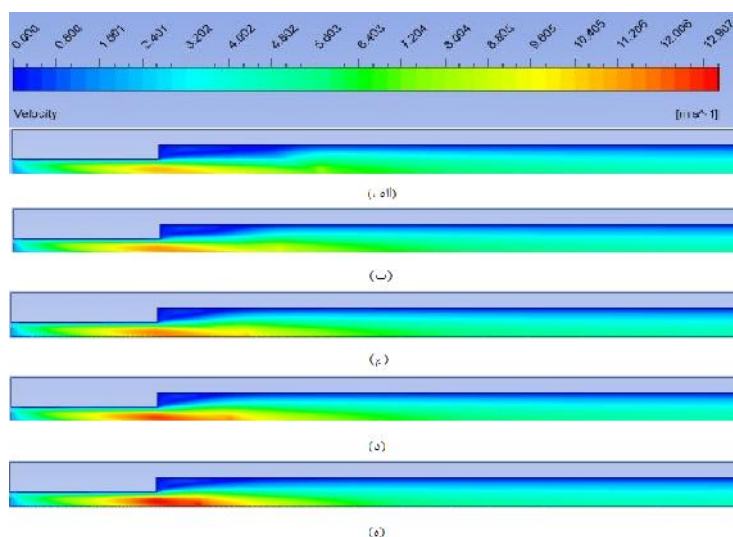
در شکل ۱۷ مشاهده می شود که با افزایش ضریب هدایت حرارتی دیواره، سرعت سیال بعد از احتراق کاهش میابد. این در حالی است که قبل از شروع احتراق با افزایش k سرعت حرکت سیال اندکی افزایش می یابد.



شکل ۱۷ تاثیر افزایش k بر سرعت روی محور تقارن محفظه

۴- اثر افزودن هیدروژن به متان:

تغییرات سرعت در محفظه احتراق در اثر افزودن هیدروژن به متان در شکل ۱۹ آورده شده است. با افزودن مقدار هیدروژن به متان، سرعت شعله افزایش می یابد که معیاری از پایداری شعله نیز محسوب می شود. این افزایش سرعت و همچنین کم شدن انرژی فعال سازی واکنش ها به خاطر وجود هیدروژن، باعث می شود که شروع احتراق به نقطه ای نزدیک تر نسبت به ورودی منتقل شود. همچنین با افزایش درصد هیدروژن موجود در سوخت، دمای شعله و در نتیجه دمای سیال داخل ریز محفظه کاهش می یابد. دلیل آن به تفاوت در ضریب استوکیومتری اکسیژن در واکنش با هیدروژن و متان مربوط می شود. با افزایش هیدروژن با توجه به تفاوت در ضریب استوکیومتری، مقدار هوای باقیمانده از واکنش بیشتر شده و در نتیجه دمای گازهای حاصل از احتراق کاهش می یابد.



شکل ۱۱ تاثیر جابجایی هیدروژن به جای متان بر سرعت شعله ی محفظه. (الف) درصد حجمی هیدروژن به حجم سوخت = ۰٪. (ب) درصد حجمی هیدروژن به حجم سوخت = ۷.۵٪. (ج) درصد حجمی هیدروژن به حجم سوخت = ۱۲.۵٪. (د) درصد حجمی هیدروژن به حجم سوخت = ۲۵٪. (ه) درصد حجمی هیدروژن به حجم سوخت = ۳۷.۵٪

۵- نتیجه گیری:

(۱) با کاهش ارتفاع پله، طول شعله بیشتر شده و دمای آن افزایش می‌یابد. افزایش طول شعله، جهت حداکثر استفاده از سوخت و داشتن دمایی متوسط در خروجی نیاز به ریزمحفظه‌ی طولی‌تری ایجاد می‌شود. در ضمن سرعت انتشار شعله با کاهش ارتفاع پله زیاد می‌شود.

(۲) با افزایش ضریب تشعشع، دما در طول دیواره کاهش می‌یابد. این تفاوت بیشتر در ماکزیمم دمای دیواره خود را نشان می‌دهد. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش ضریب تشعشع دما یکنواخت‌تر شده، اما هرچه قدر که ضریب تشعشع افزایش یابد تفاوت دمایی با نمونه‌ی قبلی کمتر می‌شود به طوری که افزایش بیش از حد ضریب تشعشع مورد نیاز نبوده و ممکن است به صرفه نباشد. همچنین، با افزایش ضریب تشعشع دمای شعله تغییر نکرده اما دمای خروجی از ریزمحفظه به طور نسبتاً کمی کاهش می‌یابد و همچنین به علت کاهش سرعت شعله به خاطر افزایش ضریب تشعشع، پایداری شعله کم می‌شود.

(۳) با افزایش سرعت، شروع واکنش‌ها و در نتیجه احتراق در نقطه‌ی دورتری نسبت به ورودی اتفاق می‌افتد. لذا دقت به طول ریزمحفظه‌ی مورد نیاز جهت اطمینان از ایجاد احتراق در داخل ریزمحفظه لازم است. همچنین باید در نظر داشت، با افزایش سرعت ورودی، دمای سیال داخل ریزمحفظه قبل از نقطه‌ی احتراق و همچنین ماکزیمم دمای شعله کاهش می‌یابد، اما به دلیل افزایش سرعت، شعله نسبت به سرد شدن و خاموشی مقاوم‌تر شده و طول آن پس از تشکیل بیشتر می‌شود. این امر باعث می‌گردد که با زیاد شدن سرعت در ورودی، دمای سیال داخل ریزمحفظه پس از اشتعال افزایش یافته و نتیجتاً دمای دیواره بیشتر شود. اما با افزایش بیشتر سرعت در ورودی، تغییر قابل ملاحظه‌ای در دمای دیواره مشاهده نمی‌گردد.

(۴) با افزایش هوای اضافی، مقدار غلظت سوخت در ریزمحفظه کاهش یافته و در نتیجه احتراق در نقطه‌ی دورتری نسبت به ورودی ایجاد می‌شود. همچنین با افزایش ϕ ، شعله با سرعت بیشتری پیشروی می‌کند. اما با افزایش ϕ از 0.8 به ۱ تفاوت قابل ملاحظه‌ای مشاهده نمی‌شود.

(۵) با افزایش ضریب رسانش حرارتی دیواره، مقاومت حرارتی دیواره کاهش یافته و اتلافات حرارتی زیاد می‌شود. در نتیجه دمای شعله در طول ریز محفظه اندکی کم می‌شود. این تفاوت دمایی در خروجی قابل ملاحظه‌تر است. تأثیر تغییر ضریب رسانش حرارتی در دمای دیواره بیشتر نمایان می‌باشد، به طوری که با افزایش آن دمای دیواره به صورت قابل ملاحظه‌ای مخصوصاً در نقطه‌ی ماکزیمم کاهش می‌یابد و همچنین دما یکنواخت‌تر می‌شود.

(۶) با اضافه کردن هیدروژن به سوخت، سرعت انتشار شعله افزایش می‌یابد. این افزایش سرعت و همچنین کم شدن انرژی فعال سازی واکنش‌ها به خاطر وجود هیدروژن، باعث می‌شود که شروع احتراق به نقطه‌ای نزدیک‌تر نسبت به ورودی منتقل شود.

مراجع

- [1] H. Davy; *Some researches on flame*, Transactions of the Royal Society of London, 1817
- [2] S. Raimondeau, D. Norton, D.G Vlachos, R.I Masel; "Modeling of high temperature microburners", *Proceedings of the combustion institute*, 2002
- [3] S. Karagiannidis, J. Mantzaras, G. Jackson; "hetero/homogeneous combustion and stability maps in methane-fueled catalytic microreactors", *Proceedings of the Combustion Institute*, 2007
- [4] D.G. Norton, D.G Vlachos; "A CFD study of propane-air microflame", *Combustion and Flame*, 2004
- [5] D.G. Norton, D.G Vlachos; "Combustion and characteristic and flame stability at the microscale", *Chemical Engineering Science*, 2003
- [6] Kaisare NS, Vlachos DG. Optimal reactor dimensions for homogeneous combustion in small channels. *Catal Today* 2007;120: 96-106.
- [7] J.S. Hua, M. Wu, K.Kumar; "Numerical simulation of the combustion of hydrogen-air mixture in micro-scaled chambers", *Chemical Engineering Science*, 2005
- [8] Li, S.K. Chou, W.M. Yang, Z.W. Li; "Experimental and numerical study of the wall temperature of cylindrical micro combustors", *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2009