

## بررسی عددی و تجربی اثرات پارامترهای مختلف در مشعل محیط متخلخل همراه با چرخش، بر روی احتراق و ایجاد آلاینده‌ها

امیر ملکی

دانشجو کارشناسی ارشد- دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی  
amir.maleki.ms2012@gmail.com

رضا ابراهیمی

استاد- دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی  
rebrahimi@kntu.ac.ir

### چکیده

ورودی بهتر انجام می شود و در نتیجه سرعت شعله افزایش می یابد. ثاباً، دفع حرارت از ناحیه واکنش بهبود می یابد و از افزایش موضعی درجه حرارت جلوگیری می کند و به طبع آن از افزایش NOx جلوگیری می کند. همچنین چون محیط متخلخل سبب می شود که فرصت کافی برای احتراق وجود داشته باشد میزان انتشار CO و هیدروکربن های نسوخته نیز به میزان چشمگیری کاهش می یابند.

یکی دیگر از تکنیک های به کار رفته در محفظه های احتراق جهت بهبود احتراق، پایدارسازی شعله و کاهش انتشار آلاینده ها، تزریق جریان چرخشی به درون محفظه احتراق می باشد. امروزه در صنعت استفاده از احتراق پایا چرخشی در مشعل های نیروگاه های برق، محفظه احتراق توربین گاز و... شایع است. مکانیزم و مزایای احتراق پایدار چرخشی به خوبی شناخته شده است [۱].

هدف از این پژوهش بررسی اثرات نسبت هوای اضافی، دبی ورودی و تغییر دمای دیواره مشعل محیط متخلخل در حال های جریان ورودی همراه با چرخش و جریان ورودی بدون چرخش میباشد. که بدین منظور با افزودن مکانیزم چرخش بر محیط متخلخل نمونه آزمایشگاهی موجود در آزمایشگاه دانشکده هوافضا و مقایسه با نتایج عددی پرداخته خواهد شد.

### ۲- ساختار محیط متخلخل و جریان سیال در آنها

منظور از یک محیط متخلخل موادی است که یک ماتریس جامد را تشکیل می دهد. این ماتریس جامد دارای خلل و فرج می باشد و خلل و فرج ها (سوراخها) این امکان را فراهم می سازند که سیال بتواند از درون این سوراخها عبور نماید. به طور کلی محیط های متخلخل به دو دسته طبیعی و مصنوعی تقسیم می شوند، شن های ساحلی، سنگ های آهکی، چوب و ریه انسان مثال هایی از محیط متخلخل طبیعی می باشند. در مقابل فوم های سرامیکی، فویل های فلزی، فیبر های لایه ای  $Al_2O_3$  نمونه های از محیط های متخلخل مصنوعی می باشند. در شکل ۱ نمونه های از این مواد نشان داده شده است.

جریان سیال در محیط متخلخل به صورت درهم و دارای افت فشار بیشتری نسبت به جریان در محیط آزاد می باشد، که باعث تبادل انرژی بین فاز جامد و گاز می گردد. ضریب تخلخل یک محیط متخلخل به صورت حجم فضاهای خالی تقسیم بر حجم کل بیان می شود. بنابراین بخشی از ماتریس متخلخل است که توسط ماده جامد اشغال شده است. به عنوان نمونه در بسترهای سنگریزه ای مقدار ضریب تخلخل بین ۰,۳۵ تا ۰,۴۵ می باشد.

در مشعل های محیط متخلخل، احتراق گازهای پیش مخلوط سوخت و هوا در داخل یک محیط متخلخل انجام می شود. این مشعل ها دارای مزایای متعددی می باشند که از آن جمله می توان به کاهش انتشار آلاینده ها، بالا بودن نرخ حرارت آزاد شده و توانایی سوختن با مخلوط گازهایی که دارای ارزش حرارتی پایین هستند (بدون مشکل پایداری) اشاره نمود. هدف اصلی این تحقیق بررسی اثرات نسبت هوای اضافی، دبی ورودی و تغییر دمای دیواره مشعل محیط متخلخل در حالت های جریان ورودی همراه با چرخش و جریان ورودی بدون چرخش میباشد. بدین منظور از نمونه آزمایشگاهی محفظه احتراق متخلخل موجود در دانشکده هوافضا دانشگاه خواجه نصیر الدین طوسی استفاده شده است، برای مشاهده اثر چرخش پره حلزون گونه ساخته شده و در مسیر جریان ورودی قرار داده شده است تا جریان پیش آمیخته به صورت چرخشی وارد محفظه شود و پس از نصب پره به شبیه سازی جریان احتراقی در این بستر توسط نرم افزار فلوئنت پرداخته شده است. نتایج نشان می دهد افزایش نسبت هوای ورودی باعث کاهش دمای ماکزیمم و همچنین افزایش دبی ورودی باعث کاهش دمای ماکزیمم و افزایش میزان انتشار آلاینده NOx می گردد.

**کلمات کلیدی:** دبی ورودی، چرخش، محیط متخلخل، نسبت هوای اضافی

### ۱- مقدمه

امروزه کاهش مصرف سوخت و میزان انتشار آلاینده های خروجی از دستگاه های احتراقی در جهت حفظ منابع طبیعی و پاکیزگی محیط زیست یکی از اهداف دولتها به شمار می رود، لذا در طراحی دستگاه های احتراقی، پارامتر های فوق الذکر از اهمیت فوق العاده ای برخوردارند. در این راستا در دهه اخیر تکنیک های متعددی ابداع شده است. یکی از این روشها تکنیک احتراق در محیط متخلخل می باشد. این تکنیک در ابتدا به منظور بهبود فرآیند انتقال حرارت در مشعل ها ابداع شد، چراکه در شعله های پیش مخلوط آزاد آرام، سرعت شعله و در نتیجه پایداری شعله و نرخ حرارت رها شده بر واحد سطح ورودی در یک سوخت معین، وابسته و محدود به هدایت حرارتی و تشعشع حرارتی بین مخلوط گاز می باشد. همچنین به دلیل ناکافی بودن امر سبب افزایش تشکیل NOx می شود. از آنجایی که انتقال حرارت به روش هدایت در جامدات بهتر از گازها انجام می شود، با قرار دادن یک ماتریس متخلخل جامد (موادی که سیال بتواند از آن عبور نماید) در محفظه احتراق اول، انتقال حرارت به پیش مخلوط

عبور از خلل و فرج مواد متخلخل به واسطه انتقال حرارت جابجایی پیش گرم شده و به دمای اشتعال نزدیک می شوند. در این هنگام مخلوط وارد ناحیه C می شود و واکنش شیمیایی اتفاق می افتد و انتالپی احتراق آزاد می شود، قسمتی از گرمای واکنش به وسیله انتقال حرارت تشعشی، جابجایی و هدایت به پایین دست جریان انتقال می یابد. گاز های سوخته شده نهایتاً وارد مبدل حرارتی شده و گرمای خود را به آب در حال گردش در مبدل حرارتی می دهند.

۳- معادلات حاکم

در یک محیط متخلخل روش معمول برای بدست آوردن متغیرهای ماکروسکوپی، متوسط گیری بر روی یک حجم یا مساحت مخصوص می باشد. برای متوسط گیری دو روش فضائی و آماری وجود دارد. در روش فضائی ابتدا یک حجم به نام حجم بنیادی معروف در داخل ناحیه جریان انتخاب می شود. پس از انتخاب حجم بنیادی معرف، متغیر ماکروسکوپی با متوسط گیری تقریبی در داخل این حجم بدست می آید. با این عمل مقادیر متغیرها در مرکز حجم تعیین می شوند. اما در روش آماری متوسط گیری بر روی تعدادی از سوراخها انجام می شود.

۳-۱- سرعت داری و معادله پیوستگی

بر مبنای روش حجم بنیادی معرف مدل پیوسته ای برای محیط متخلخل ارائه شده است. فرض می شود که المان حجمی به اندازه کافی در مقایسه با سوراخها بزرگ باشد، تا متوسط حجمی بدست آمده قابل اطمینان و مستقل از انتخاب المان حجمی باشد. متوسط سرعت سیال بر روی حجم  $V_m$  (المان حجمی شامل مواد جامد و سیال) را با  $V=(u,v,w)$  نشان می دهند. متوسط سرعت سیال بر روی حجم  $V_f$  (حجمی که فقط شامل سیال باشد) را با  $V$  نشان می دهند و به آن سرعت متوسط ذاتی می گویند و رابطه بین این دو سرعت به صورت  $v=\phi V$  می باشد. حال می توانیم معادلات بقائی را با به کار بردن داری به راحتی به دست آوریم. بنابراین معادله پیوستگی مطابق رابطه ۲ بیان می شود

$$\phi \frac{\partial \rho_f}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f v) = 0$$

در این رابطه  $\rho_f$  چگالی سیال است.

۳-۲- معادله مومنتوم

در معادله مومنتوم از نیروهای حجمی مانند نیروی گرانش صرف نظر می شود و در عوض ترمهای مناسبی به آن اضافه می گردد. ودینگ [۳] از اولین محققانی است که در زمینه انتقال حرارت جابجایی در محیط متخلخل تحقیق نموده است وی معادله مومنتوم را به صورت معادله ۳ بیان نمود

$$\rho_f \left[ \frac{\partial v}{\partial t} + (v \cdot \nabla) v \right] = -\nabla p - \frac{\mu}{k} v$$

از آنجایی که  $v=\phi V$  می باشد معادله بالا به صورت معادله ۴ اصلاح می شود. این معادله به وسیله مقایسه با معادله نویر استوکس به دست آمده است

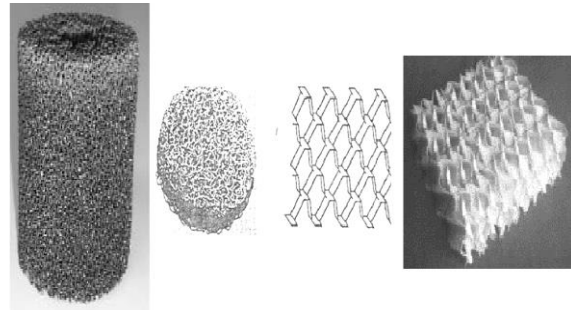
$$\rho_f \left[ \phi^{-1} \frac{\partial v}{\partial t} + \phi^{-2} (v \cdot \nabla) v \right] = -\nabla p - \frac{\mu}{k} v$$

معادله داری نسبت به سرعت داری خطی است و این حالت فقط برای سرعتهای کم مناسب می باشد. از آنجایی که ترم فشاری در محیط

بابکین و همکارانش [۲] نشان دادند که برای انتشار شعله در مواد متخلخل باید عدد پکله بزرگتر از یک مقدار معین باشد. که توسط رابطه ۱ بیان می شود.

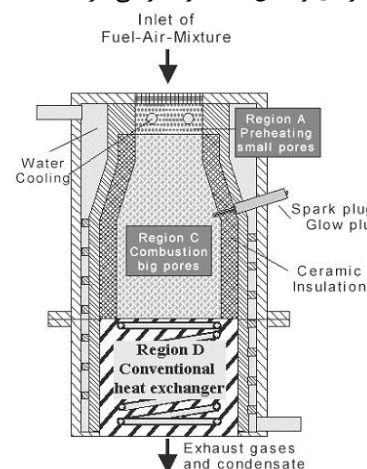
$$pe = \frac{S_l d_m c_p \rho}{\lambda} \tag{1}$$

در این رابطه  $S_l$  سرعت شعله آرام و  $d_m$  قطر مشخصه می باشد. برای



شکل ۱- نمونه هایی از مواد متخلخل

احتراق متان عدد پکله باید بزرگتر از ۶۵ باشد تا پایداری شعله در محفظه احتراق انجام گردد. شماتیک ساختار یک مشعل متخلخل نمونه، که به یک مبدل حرارتی متصل می باشد و به منظور تولید آبگرم برای مصارف خانگی ساخته شده است، در شکل ۲ نشان داده شده است. این مشعل از سه قسمت اصلی تشکیل شده است، ناحیه A از سوراخهایی با قطر کوچک تشکیل شده است و در آن شعله منتشر نمی شود و تنها وظیفه پیش گرم کردن مخلوط را دارد. ناحیه C از سوراخهایی با قطر بزرگتر تشکیل شده است و احتراق در این ناحیه اتفاق می افتد. به عبارت دیگر ترکیب این مشعل به گونه ای انتخاب شده است که در ناحیه پیش گرمایش عدد پکله کوچکتر از ۶۵ و در ناحیه احتراق عدد پکله بزرگتر از ۶۵ باشد. دور تا دور ناحیه احتراق به وسیله یک عایق سرامیکی با هدایت حرارتی بسیار کم، عایقکاری شده است. این عمل به دلیل جلوگیری از کاهش بیش از حد درجه حرارت در این ناحیه و برای داشتن احتراق دائمی و جلوگیری از افزایش انتشار CO و هیدروکربن های نسوخته در نزدیکی دیواره های محفظه احتراق انجام می شود. ناحیه D یک مبدل حرارتی است که این ناحیه نیز از مواد متخلخل تشکیل شده و شعله در آن تشکیل نمی شود. در این ناحیه گرمای واکنش به آب واگذار می گردد.



شکل ۲- شماتیک ساختار یک مشعل متخلخل نمونه [۴]

پیش مخلوط سوخت و هوا ابتدا وارد ناحیه A می شود. چون دمای مواد جامد بالاتر از دمای گازهای ورودی است، گازهای پیش مخلوط در حین

متخلخل تابعی از سرعت سیال، ویسکوزیته و ظریب تخلخل می‌باشد، ترم فشاری در معادله ۴ به صورت معادله ۵ بیان می‌شود

$$(\rho c)_m = (1 - \varphi)(\rho c)_s + \varphi(\rho c_p)_f \quad (10)$$

$$(11)$$

$$q'''_m = (1 - \varphi)q'''_s + \varphi q'''_f$$

که مقادیر فوق به ترتیب ظرفیت گرمایی کلی و حرارت تولید شده کلی بر واحد حجم می‌باشد. برای محاسبه  $\lambda_{eff}$  روش‌های مختلفی ارائه شده است که در ذیل به برخی از آنها اشاره می‌شود.

### ۳-۴- هدایت حرارتی موثر محیط متخلخل

به طور کلی هدایت حرارتی کلی محیط متخلخل (اشکال پیچیده) وابسته به هندسه محیط می‌باشد. اگر هدایت حرارتی در فازهای جامد و سیال به صورت موازی اتفاق بیافتد، یعنی اگر سیال از بین لایه‌های جامد عبور نماید (شار حرارتی در راستای لایه‌ها) هدایت حرارتی کلی  $\lambda_A$  متوسط حسابی وزنی هدایت‌های  $\lambda_s$  و  $\lambda_f$  است و به صورت معادله ۱۲ بیان می‌گردد

$$(12)$$

$$\lambda_A = (1 - \varphi)\lambda_s + \varphi\lambda_f$$

### ۳-۵- تاثیرات واکنش شیمیایی

در اثر واکنش شیمیایی یک مقدار حرارت آزاد می‌شود و نتیجه این عمل تبدیل واکنش دهنده‌ها به محصولات احتراق می‌باشد. بنابراین در یک المان علاوه بر تولید انرژی، تغییرات اجزا شیمیایی را نیز خواهیم داشت. این تغییرات اجزا شیمیایی بستگی به سرعت واکنش دارد. آزمایش نشان داده است که سرعت انجام واکنش به غلظت اجزا شیمیایی ربط دارد و ضریب این تناسب، ثابت‌های واکنش می‌باشند که خود تابعی از دما هستند. چون دما و فشار گازها به هم وابسته است، ثابت‌های به طور غیر مستقیم به فشار بستگی دارند. علاوه بر این حضور کاتالیست و مانع شونده نیز روی نرخ واکنش اثر می‌گذارد. به طور کلی نرخ واکنش برای یک واکنش شیمیایی ساده به غلظت واکنش‌دهنده‌ها، درجه حرارت، اثرات تشعشعی و ... بستگی دارد. به عنوان مثال برای واکنش مقدماتی ساده که توسط رابطه ۱۳ بیان شده است، طبق قانون رفتار جرم نرخ واکنش از رابطه ۱۴ بدست می‌آید

$$\sum_{k=1}^{ns} v_k' B_k \rightarrow \sum_{k=1}^{ns} v_k'' B_k \quad (13)$$

$$(14)$$

$$RR = \kappa \prod C_j^{v_j}$$

در این رابطه ثابت نرخ واکنش می‌باشد و از معادله آرنیوس که توسط رابطه ۱۵ بیان شده است پیروی می‌کند

$$\kappa = AT^\beta \exp\left(\frac{E_a}{R_u T}\right) \quad (15)$$

$$\nabla p = -\frac{\mu}{k} v - c_f k^{-0.5} \rho_f |v| v$$

که  $C_f$  ضریب دراگ بی بعد می‌باشد. ترم دوم معادله فوق را ترم فورهیمر می‌گویند. البته پارامتر  $k^{-0.5} \rho$  بعداً توسط همکاران وی اضافه شد. وی ضریب  $C_f$  را یک ثابت عمومی با مقدار تقریبی ۰.۵۵ در نظر گرفت، لیکن بعدها متوجه شد که  $C_f$  وابسته به طبیعت محیط متخلخل است و برای فیبرهای فلزی فوم شکل می‌تواند کمتر از ۰.۱ باشد که رابطه ۶ را برای  $C_f$  ارائه کرد

$$(6)$$

$$C_f = 0.55 \left(1 - 5.5 \frac{\delta}{D_e}\right)$$

در معادله بالا  $\delta$  قطر کره‌ها و  $D_e$  قطر موثر بستر است.

### ۳-۳- معادله انرژی

در این قسمت بر روی معادلاتی که قانون اول ترمودینامیک در محیط متخلخل را بیان می‌کنند، متمرکز می‌شویم. ابتدا محیط را ایزوتروپ فرض کرده و از اثرات پخش لزج و کار انجام شده به وسیله فشار صرف نظر می‌کنیم. با متوسط‌گیری بر روی المان حجمی محیط متخلخل به دو معادله ۷ و ۸ خواهیم رسید.

برای فاز جامد داریم:

$$(7)$$

$$(1 - \varphi)(\rho c)_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = (1 - \varphi) \nabla \cdot (\lambda_s \nabla T_s) + (1 - \varphi) q_s'''$$

برای فاز گاز داریم:

$$(8)$$

$$(1 - \varphi)(\rho c_p)_f \frac{\partial T_f}{\partial t} + (\rho c_p)_f v \cdot \nabla T_f = (1 - \varphi) \nabla \cdot (\lambda_f \nabla T_f) + (1 - \varphi) q_f'''$$

که در این معادلات زیر نویس  $f$  و  $s$  به ترتیب به فاز سیال و جامد اشاره دارد.  $C$  گرمای ویژه جامد،  $c_p$  گرمای ویژه سیال،  $\lambda$  هدایت حرارتی و  $q'''$  تولید حرارت در واحد حجم است. مقدار عبارت  $-\lambda_s \nabla T_s$  شار حرارتی هدایتی در جامد می‌باشد. بنابراین  $\nabla \cdot (\lambda_s \nabla T_s)$  نرخ خالص هدایت حرارتی بر واحد حجم جامد می‌باشد. در معادله ۷ این مقدار در ضریب  $(1 - \varphi)$  ضرب شده است، که این ضریب برای لحاظ کردن نسبت حجم اشغال شده توسط جامد به حجم کل محیط می‌باشد. در معادله ۸ مقدار  $v \cdot \nabla T_f$  نرخ تغییر دما در المان حجمی را نشان می‌دهد که ناشی از جابجایی سیال به داخل المان حجمی است. به همین دلیل در  $(\rho c_p)_f$  ضرب شده است تا نرخ تغییر انرژی حرارتی بر واحد حجم سیال ناشی از جابجایی به دست آید.

اگر  $T_s = T_g = T$  در نظر گرفته شود، با توجه به معادلات فوق الذکر خواهیم داشت:

$$(\rho c_p) \frac{\partial T}{\partial t} + (\rho c_p)_f v \cdot \nabla T = \nabla \cdot (\lambda_{eff} \nabla T) + q_m''' \quad (9)$$

(۲۱)

$$S = \frac{2}{3} \left[ \frac{1 - \left(\frac{R_1}{R_2}\right)^3}{1 - \left(\frac{R_1}{R_2}\right)^2} \right] \times \tan(\alpha)$$

عموما چرخش در جریان سیال را به کمک مجموعه‌ای از پره‌ها حول یک محور ثابت و یا چرخنده ایجاد می‌کنند. زاویه پره‌ها نسبت به محور اصلی معمولا بین ۰ تا ۷۰ درجه انتخاب می‌شود. و زوایای بیشتر به دلیل محدودیت حداقل ضخامت پره‌ها معمولا امکان پذیر نیست، از جمله نکات مهم در طراحی پره‌ها میزان افت فشار در قطعه چرخاننده است که به زاویه پره‌ها و همچنین طراحی خود پره‌ها مربوط است.

#### ۵- تست تجربی مشعل متخلخل - چرخشی

مشعل محیط متخلخل موجود در آزمایشگاه سوخت و احتراق دانشکده هوافضا دانشگاه خواجه نصیر، توسط دکتر محمد شفیع دهج [۴] در سال ۱۳۸۶ طراحی و ساخته شد. به دلیل هزینه بالا و همچنین وقت گیر بودن ساخت مجدد مشعل متخلخلی که با پروژه حاضر همخوانی داشته باشد، از ساخت آن صرف نظر شد. در نهایت تصمیم بر آن شد که پره‌های چرخاننده جریان را در ورودی همین مشعل قرار دهیم، هرچند که به دلیل کوچک بودن قطر ورودی نتایج کاملا مطلوبی از آن انتظار نمی‌رود. شکل ۳ میز آزمایش مشعل متخلخل - چرخشی را نشان می‌دهد که بخش‌های مختلف بر روی شکل نشان داده شده‌اند.

همان طور که اشاره شد در این احتراق از جریان پیش آمیخته متان - هوا استفاده شده است. بنابراین جریان هوا و سوخت ورودی به میز باید پیش از ورود به مشعل باهم مخلوط شوند و این فرآیند باید به گونه‌ای انجام شود که هرچه بیشتر اختلاط سوخت و اکسیدکننده صورت گیرد تا احتراق با کیفیت بهتری داشته باشیم. در این پژوهش به دلیل استفاده از گاز لوله کشی شهری و فشار کم آن استفاده از مخلوط‌کن‌های متداول وجود ندارد. به این دلیل با الگوبرداری از سوخت‌پاش‌های مورد استفاده در

مشعل‌های



شکل ۳- میز آزمایش مشعل متخلخل - چرخشی

در این معادله عبارت  $AT^\beta$  بیان کننده تناوب برخورد مولکولها با یکدیگر است و ترم نمایی معرف کسری از برخورد ها است که دارای انرژی بیش از انرژی فعال سازی هستند. کمیات  $A$ ،  $\beta$  و  $E_a$  تابع طبیعت واکنش مقدماتی هستند و بستگی به غلظت و درجه حرارت ندارند. حال می توان تغییرات غلظت یک جز شیمیایی را بر مبنای قانون رفتار جرم و بقای جرم به صورت معادله ۱۶ نوشت

(۱۶)

$$\dot{\omega}_k = \frac{dC_k}{dt} = [v_k' - v_k''] \times RR$$

برای محاسبه نرخ تغییرات غلظت اجزا شیمیایی مکانیزم های مختلفی ارائه شده است. ساده ترین روش مکانیزم واکنش عمودی تک قدمی می باشد، که برای محاسبه نرخ واکنش تنها از یک معادله برگشت ناپذیر استفاده می شود. مکانیزم های دقیق تری نیز وجود دارد که شامل چند صد واکنش و چند ده جز شیمیایی می باشد.

#### ۴- مشخصات جریان چرخشی

فرآیند چرخش عموماً در جریان های ورودی به کوره های صنعتی و محفظه های احتراق با کاربرد های مختلف جهت بالا بردن ثبات و پایداری شعله، کنترل میزان اختلاط بین سوخت و اکسیژن، میزان آزادسازی انرژی بر اساس نوع فرآیند احتراق و در مورد استفاده بهینه و حد اقل از طول محفظه احتراق بر اساس هندسه شعله به کار برده می شود. نخستین برداشتی که از چرخش نتیجه می شود اغتشاشات در مخلوط جریان است. معمولا مشخصات جریان چرخشی بیشتر به وسیله عدد بدون بعد که عدد چرخش می نامند تعیین می‌شود، که اولین بار توسط آرتور لوفورد در سال ۱۹۸۳ تعریف شد و در رابطه ۱۷ به آن اشاره شده است

(۱۷)

$$S = \frac{G_\theta}{G_x d / 2}$$

$G_\theta$  شار محوری مومنوم چرخشی می باشد و  $G_x$  شار محوری مومنوم مماسی می باشد که توسط روابط ۱۸ و ۱۹ بیان شده اند

(۱۸)

$$G_\theta = \int_0^x (\rho U W + \overline{\rho U' W'}) . r^2 dr$$

(۱۹)

$$G_x = \int_0^x (\rho U^2 + \overline{\rho U'^2} + (p - p_\infty)) . r dr$$

در رابطه بالا  $p$  فشار استاتیکی می‌باشد. برای حالت دانسیته ثابت عدد چرخش می تواند به صورت پارامتری تابع هندسه بیان گردد، معمولا عدد چرخش هندسه یک یا بزرگتر می‌باشد. که توسط رابطه ۲۰ بیان می‌گردد

$$S_g = \frac{\pi D_e D}{4 A_f} \quad (20)$$

$S_g$  عدد چرخش هندسه،  $D_e$  قطر خروجی مشعل،  $D$  قطر مشعل و -  $A_f$  سطح مماسی مشعل می باشد. در عمل برای تولید اعداد چرخش مختلف می توان با تغییر در قسمت های متحرک عامل تولید کننده چرخش، مثلا پره ها به این مهم دست یافت. بر همین اساس فرم ساده تری از عدد چرخش که با زاویه پره در ارتباط می باشد به این صورت بیان می شود

گازوئیلی وسیله جدیدی به نام مخلوط کن اجکتوری به وسیله دکتر شفیعی و همکارانش طراحی و ساخته شد که تصویر آن در شکل ۴ آورده شده است.



شکل ۴- اجکتور گازی در محل اختلاط سوخت و هوا

$$(22) \quad HR = \dot{m} \times HV \Rightarrow \dot{m} = \frac{HR}{HV}$$

مشعل متخلخل موجود برای توان ۲ تا ۱۰ کیلووات طراحی شده است. اگر ارزش حرارتی سوخت مورد استفاده را  $9067,063 \text{ Kcal/m}^3$  در نظر بگیریم و این که  $HR$  گرمای آزاد شده در واحد زمان یا همان توان مشعل است. با توجه به رابطه بالا دبی در توان ۲ کیلووات محاسبه می‌گردد که برابر  $3,1662 \text{ Lit/min}$  سوخت می‌باشد، بنابراین با توجه به دبی حجمی سوخت دبی هوای مورد نیاز احتراق  $30,142 \text{ Lit/min}$  بدست می‌آید.

#### ۶- حل عددی مشعل متخلخل - چرخشی

برای شبیه سازی جریان احتراقی در محیط متخلخل از بسته نرم افزاری v15 Fluent استفاده شده است، بدین گونه که ابتدا به مدل سازی ۳ بعدی مشعل و پره چرخاننده جریان در محیط نرم‌افزاری Solid Work پرداخته و پس از ایجاد هندسه به مش‌زنی با الگوی مناسب پرداخته شده است و در انتها با حل سه بعدی جریان در بسته نرم افزاری Fluent بررسی جریان احتراقی خواهیم پرداخت.

برای ایجاد هندسه ۳ بعدی از نرم افزار Solid Work استفاده شده است، سالیید ورکز یک مدل ساز برای مدلسازی جامدات است که مبتنی بر پارا سالیید بوده و از رویکرد پارامتری مبتنی بر ویژگی برای ساخت مدلها و مونتاژها استفاده می‌کند. هندسه مورد مطالعه مشعل، به همراه بخش بالایی مشعل که شامل پره چرخاننده است می‌باشد در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵- نمای ایزومتریک مشعل متخلخل

در شکل ۶ نمای ایزومتریک پره چرخاننده جریان نشان داده شده است. پس از ایجاد هندسه قدم دوم در تحلیل عددی میدان جریان، شبکه بندی میدان حل می‌باشد. این مرحله یکی از اساسی ترین قسمت های فرآیند مدل سازی پیش از شروع حل عددی و پس از تعیین حوزه محاسباتی می‌باشد. برای شبکه بندی میدان محاسباتی از محیط Ansys meshing استفاده شده است، به منظور کنترل کیفیت شبکه بندی از پارامتر تابیدگی المان‌ها کمک گرفته، از آنجایی که می‌دانیم میزان تابیدگی المان‌ها نباید از مقدار ۹ تجاوز نماید لذا شبکه بندی ایجاد شده را از این منظر چک کرده و میزان

#### ۵-۱- طراحی و ساخت پره چرخاننده جریان

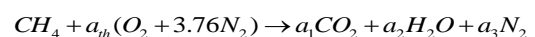
با توجه به کوچک بودن قطر ورودی مشعل امکان ایجاد تغییرات و یا جزئیات خاصی در پره مورد نظر نبود، در نتیجه هدف ساخت چرخاننده جریان با ۴ پره و زاویه نصب پره بالا برای ایجاد چرخش زیاد با طول کم بود. قطعه مورد نظر از طریق فرآیند ریخته‌گری توسط مهندس افشار قاسمی [۵] ساخته شد. برای این منظور با توجه به مشخص بودن قطر خارجی رزوه‌ها (۲۶ میلی‌متر) و نیاز به اعداد چرخش بیش از ۰.۶ در مرحله اول پره ای با گام مربعی به عمق ۹ میلی‌متر و طول گام ۴۵ میلی‌متر طراحی شد. به این ترتیب قطر محور پره ها ۸ میلی‌متر، قطر خارجی پره ها ۲۶ میلی‌متر و ارتفاع پره ها ۱۷ میلی‌متر و زاویه نصب پره ها  $61,09$  درجه است که با استفاده از این داده ها می‌توان به عدد چرخش ۱,۲۹۵ رسید.

در مرحله بعد امکان مقایسه تاثیرات عدد چرخش بر کارکرد مشعل و همچنین با توجه به محدودیت عدم امکان کمتر کردن طول از پره با گام مربع به عمق ۹ میلی‌متر و طول گام ۶۰ میلی‌متر استفاده شده است، عدد چرخش متناظر برابر با ۰,۹۷۷ گردید.

#### ۵-۲- محاسبه دبی مورد نیاز احتراق

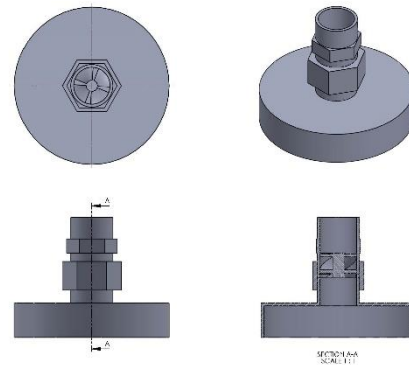
همان طور که می‌دانیم محدوده شعله‌وری گاز لوله‌کشی شهری را بین ۵ تا ۱۵ درصد حجمی در هوا در نظر می‌گیرند و در حالت استوکیومتری این مقدار را تا ۱۰ درصد گزارش می‌کنند، که از رابطه زیر ناشی می‌شود. چنانچه معادله احتراق کامل گاز متان را مطابق زیر بنویسیم خواهیم داشت:

$$(22)$$



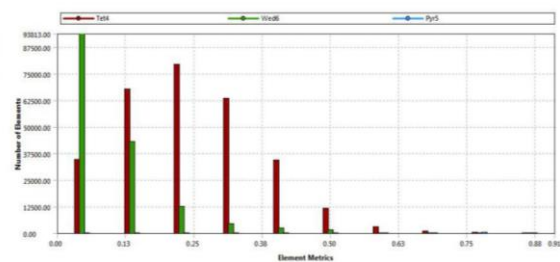
که  $a_{th}$  هوای استوکیومتری یا تئوری می‌باشد، که بیان گر حداقل اکسید کننده کافی برای یک احتراق کامل است. چنانچه سوخت و هوا را در حالت ایده‌آل در نظر بگیریم، می‌توان معادله مولی بالا را به صورت معادله حجمی فرض کرد، چراکه حجم مولی گازها در شرایط استاندارد برابر و مساوی ۲۲,۴ لیتر فرض می‌شود با این احتساب در نسبت هم ارزی  $\phi = 1$  به از هر حجم متان  $12.5(1 + 3.76)$  حجم هوا نیاز است. حال با محاسبه دبی حجمی سوخت، دبی حجمی هوا نیز محاسبه می‌شود. دبی حجمی سوخت توسط رابطه ۲۳ بیان می‌گردد

برای هر دو حلگر مورد استفاده، معادلات حاکم غیر خطی باید برای هر سلول به صورت خطی در آیند. پس از آن، دستگاه معادلات خطی حل شده و مقادیر متغیرها بر اساس حل جدید به روز رسانی می شوند. خطی سازی معادلات را می توان به دو روش صریح و یا ضمنی انجام داد. در روش ضمنی، برای مقادیر مورد نظر، رابطه‌ای نوشته می شود که در آن هم مقادیر معلوم و هم مقادیر مجهول وجود دارند. در روش صریح، مقادیر نامعلوم توسط روابطی حساب می شوند که در آنها از مقادیر معلوم استفاده می شود. حلگر فشار مینا یک میدان تک متغییره را به طور همزمان برای کل سلول ها حل کرده و مقادیر متغیر مورد نظر را برای کل سلول ها محاسبه می کند. سپس میدان تک متغییره دیگری برای کل سلول ها حل می شود و روند مذکور برای کل متغیرها ادامه می یابد.



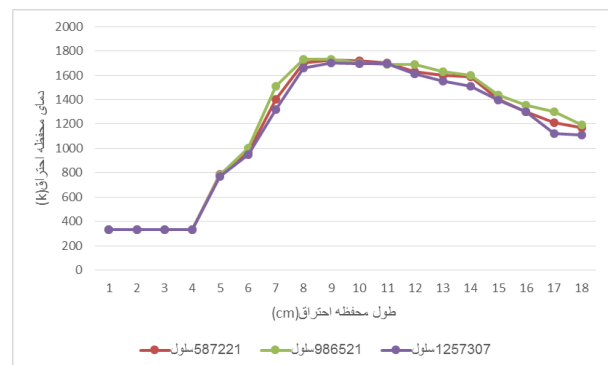
شکل ۶- نمای ایزومتریک پره چرخاننده جریان

حداکثر تابیدگی در المان ها ۰,۸۸ بوده که قابل قبول است، این پارامتر توسط شکل ۷ به خوبی قابل ملاحظه می باشد.



شکل ۷- پراکندگی تابیدگی المان ها

برای بررسی استقلال از شبکه در این پژوهش از سه شبکه مختلف با تعداد سلول های ۵۸۷۲۲۱، ۹۸۶۵۲۱ و ۱۲۵۴۳۰۷ استفاده شده است. شکل ۱۰ نمایش دهنده بررسی استقلال از شبکه می باشد، برای استقلال از شبکه مقدار دما در خط مرکزی در راستای ارتفاع محفظه رسم شده است. همان گونه که در شکل ۸ رسم شده است در سلول های ذکر شده محاسبات صورت گرفته و تغییرات دما در خط مرکزی محفظه همراه با چرخش (عدد چرخش ۱,۲۵) ترسیم شده است. نتایج حاصل از محاسبات برای شبکه ها تفاوت زیادی با هم نداشته است. بنابراین با توجه به محدودیت های زمانی از ۵۸۷۲۲۱ سلول برای محاسبات عددی استفاده شده است.



شکل ۸- بررسی استقلال از شبکه دما در خط مرکزی محفظه برای جریان همراه با چرخش

در این پژوهش حلگر پایای مبتنی بر فشار مورد استفاده قرار گرفته است و الگوریتم SIMPLE برای همزمانی سرعت و فشار مورد استفاده قرار گرفته است. مدل تشعشی P-1 همچنین برای محاسبه شار حرارتی و مدل EDC برای محاسبه نرخ احتراق مورد استفاده قرار گرفته است.

#### ۱-۶- شرایط مرزی

تعیین شرایط مرزی مناسب در نرم افزار فلوئنت بسیار مهم می باشد، چنانچه شرایط مرزی تعیین شده در نرم افزار با شرایط واقعی مسئله متفاوت باشد، در حل کردن جریان توسط نرم افزار شکی نیست و قطعاً خروجی مطابق با آن شرایط مرزی را نیز نرم افزار می دهد ولی با مسئله واقعی بسیار متفاوت خواهد بود لذا در وارد کردن شرایط مرزی باید دقت کافی به خرج برد. در شبیه سازی حاضر از سه نوع شرط مرزی استفاده شده است. در ورود از شرط مرزی دبی ورودی استفاده شده است دلیل استفاده از این شرط این بود که با توجه به نمونه آزمایشگاهی در ورود به مشعل همانطور که می دانیم از یک رواتر جهت تعیین دبی ورودی سوخت و هوا استفاده شده است و به همین خاطر دبی ورودی به دستگاه را می دانستیم و از همین شرط استفاده شده است. در خروج از شرط فشار خروجی استفاده شده است، دلیل استفاده از این شرط دانستن فشار خروجی می باشد. لازم به ذکر است که دیگر بخش های هندسه جریان را از شرط مرزی دیواره با دمای ثابت استفاده شده است.

#### ۲-۶- گسسته سازی و ضرایب زیر تخفیف

در نرم افزار فلوئنت، برای تبدیل معادلات حاکم به معادلات جبری قابل حل عددی از روش حجم کنترل استفاده می شوند. در این روش، هر معادله حاکم روی تمام حجم کنترل ها اعمال می شود و معادلات گسسته شده ای به وجود می آید که هر کمیت را بر مبنای حجم کنترل بیان می کنند.

نرم افزار فلوئنت، مقدار گسسته کمیت اسکالر  $\phi$  را در مرکز سلول ذخیره کرده، به همین سبب و به کمک روش روبه باد برای محاسبه  $\phi$  از میانبایی بین مقادیر مرکز سلول ها استفاده شود. در روش روبه باد، مقدار  $\phi$  با استفاده از مقادیر موجود در بالا دست (نسبت به جهت حرکت سیال) محاسبه می شود. در روش روبه باد در درجه اول فرض می شود که مقدار هر متغیر در مرکز سلول، مقدار متوسط آن متغیر برای کل سلول بوده و این مقدار متوسط برای سر تا سر سلول در نظر گرفته می شود. بنابر این هنگامی که از روش روبه باد بهره گرفته می شود مقدار متغیر مورد نظر بر روی وجه سلول برابر با مقدار مرکزی این متغیر برای سلول بالا دست است.

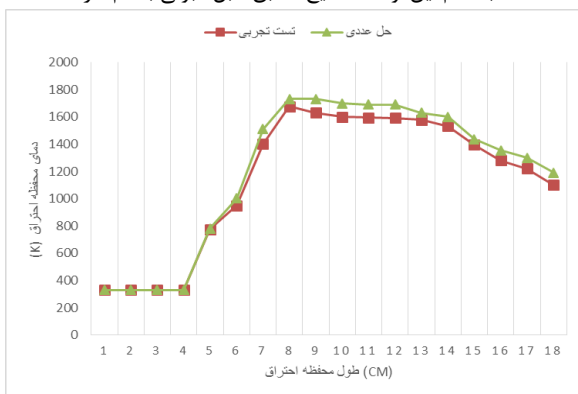
به علت غیر خطی بودن معادلات حل، لازم است تا مقادیر متغیرهای محاسبه شده  $\phi$  کنترل شوند. این عمل کنترل را می توان به کمک ضریب زیر تخفیف انجام داد. ضریب زیر تخفیف باعث می شوند که در هر



شکل ۱۰- توزیع دما در جریان بدون چرخش

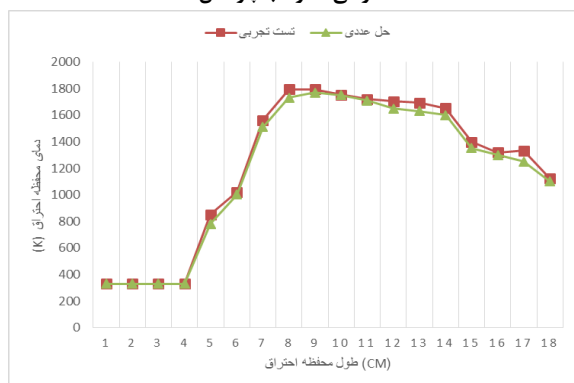
همان طور که مشاهده شد با افزودن چرخش دمای بیشینه محفظه احتراق به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافت این کاهش را می‌توان به سبب ایجاد ترم مماسی در ترم سرعت جریان چرخشی و آمیختگی بهتر سوخت و اکسید کننده یافت و علاوه بر آن چنانچه مشاهده می‌شود به دلیل چرخش شعله عریض تر گشته و انتقال حرارت بهتری به دیواره‌ها انجام می‌شود. البته از این موضوع نباید غافل گشت که در جریان چرخشی آشفته‌گی جریان بالاتر بوده و طبق روابط بیان شده در انتقال حرارت ضریب انتقال حرارت جابجایی تابع عدد رینولدز و به همان نسبت میزان اغتشاش جریان می‌باشد و به همین دلیل گازهای حاصل از احتراق به خوبی توانایی تبادل حرارت با محیط متخلخل درون محفظه را دارند و بخشی از دمای خود را از دست می‌دهند.

در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نتایج حاصل از چرخش در حل عددی با نتایج ثبت شده از تست تجربی در آزمایشگاه مقایسه گردیده است. همچنان که از مقایسه نتایج تست تجربی با نمونه حل عددی در شکل‌های بالا مشاهده می‌شود تفاوت زیادی بین حل عددی با نمونه تست تجربی مشاهده نشد و تفاوت دما در حد ۴۰ درجه اختلاف را نشان می‌دهد که هم می‌تواند ناشی از خطاهای آزمایش که به صورت خطاهای دستگاه، خطاهای فردی و خطای محیط است اشاره کرد و هم به خطاهای ناشی از حل عددی دانست، که با تمام این اوصاف نتایج تطابق قابل قبولی با هم دارند.



شکل ۱۱-مقایسه توزیع دما در تست تجربی با نمونه حل عددی در جریان

احتراقی همراه با چرخش



شکل ۱۲-مقایسه توزیع دما در تست تجربی با نمونه حل عددی در جریان

احتراقی بدون چرخش

۷-۱- بررسی پارامتریک

۷-۱-۱- بررسی نسبت هوای اضافی

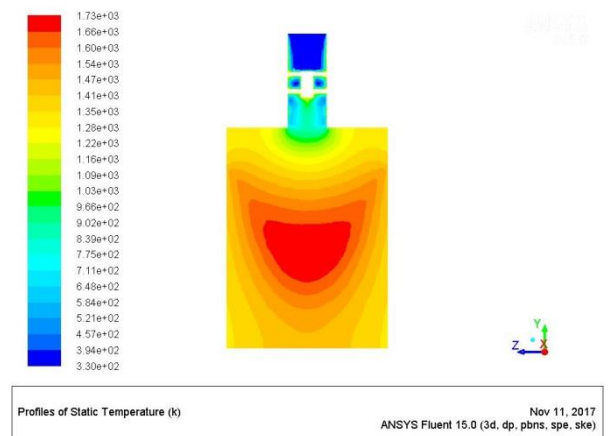
همانطوری که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود با افزایش نسبت هوای اضافی مقدار دمای ماکزیمم کاهش پیدا می‌کند [۶] علت این امر را می‌توان این-

تکرار، میزان تغییرات متغییر محاسبه شده  $\phi$  کاهش بیابد. در صورت تغییر شدید  $\phi$  در هر تکرار امکان بیشتر شدن تغییر و ناپایدار شدن حل وجود دارد که به کمک ضریب زیر تخفیف مقدار جدید متغییر برای هر سلول بر اساس مقدار قدیمی آن محاسبه می‌شود.

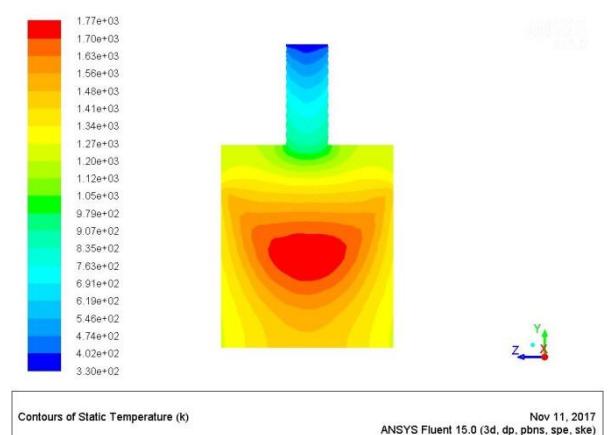
در پژوهش حاضر به دلیل حساسیت مسئله به تغییرات شدید مقادیر ضرایب زیر تخفیف پیش فرض موجود در فلونتت کاهش داده شده است تا واگرایی مسئله را به همراه نداشته باشد، با پیش روی مسئله و جهت تسریع در حل، این مقادیر کمی افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است که کاهش ضرایب مربوط به معادله انرژی و اغتشاش نقش مهمی در همگرایی مسئله حاضر دارند.

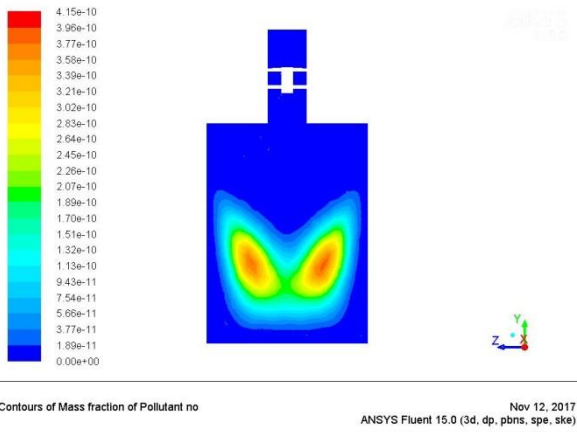
۷- نتیجه گیری

نتایج کار حاضر در چند بخش ارائه می‌شود. در قسمت اول توزیع دما در محفظه احتراق در جریان همراه با چرخش و جریان بدون چرخش در تست تجربی و مدلسازی عددی ارائه میگردد. برای مدل‌سازی جریان احتراقی از مدل spices transport استفاده کردیم، این مدل قادر است توزیع دما در محفظه احتراق را به خوبی نشان دهد و از بیان پارامترهایی نظیر سرعت آرام شعله و یا سرعت آشفته شعله غافل است، البته می‌دانیم که در تست آزمایشگاهی در آزمایشگاه، ما به دنبال توزیع دما در محفظه بوده‌ایم و از شکل شعله و یا سرعت آن بی‌خبر بوده‌ایم. به همین منظور استفاده از این مدل در مدل‌سازی عددی معقول به نظر می‌رسد. در شکل‌های ۹ و ۱۰ نتایج حاصل از حل عددی جریان همراه با چرخش و بدون چرخش ارائه شده است.

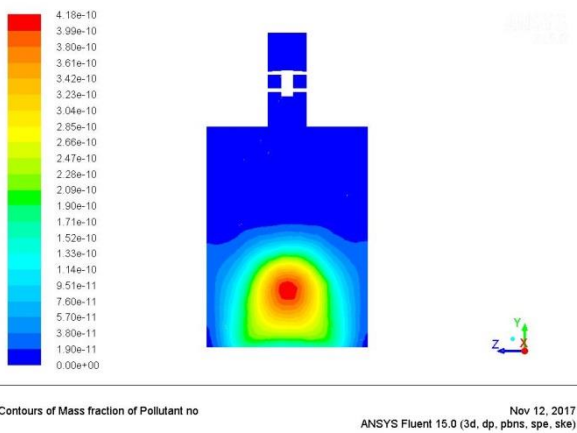


شکل ۹- توزیع دما در جریان همراه با چرخش (عدد چرخش ۱,۲۵)

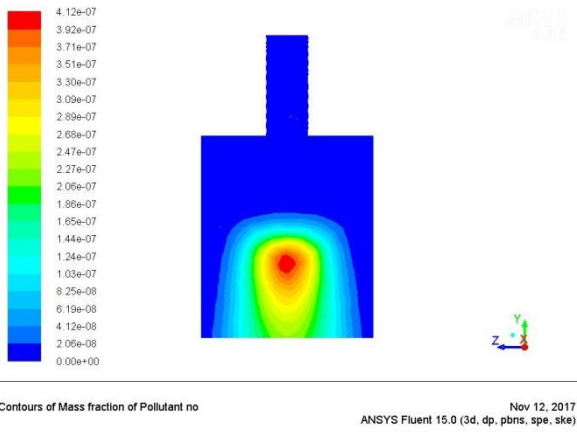




شکل ۱۵- توزیع  $NO_x$  در جریان احتراقی همراه با چرخش (دبی ورودی 33 lit/min)



شکل ۱۶- توزیع گونه شیمیایی  $NO_x$  در جریان احتراقی همراه با چرخش (دبی ورودی 42 lit/min)



شکل ۱۷- توزیع گونه شیمیایی  $NO_x$  در جریان احتراقی بدون چرخش (دبی ورودی 33 lit/min)

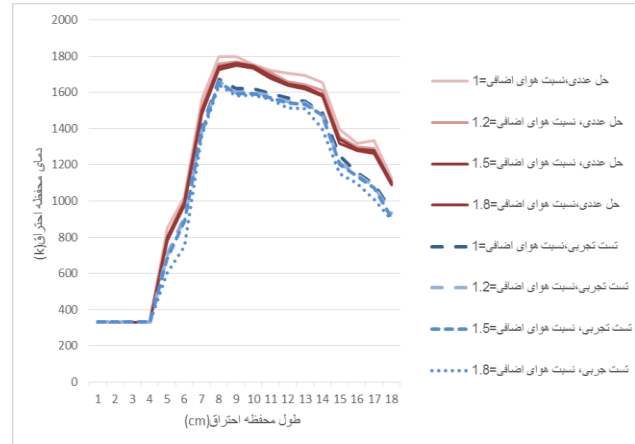
۷-۳-۱- بررسی اثرات تغییر دمای دیواره

همانطور که در شکل ۱۹ دیده می‌شود با افزایش دمای دیواره ماکزیمم دمای محفظه احتراق افزایش پیدا می‌کند. علت این امر را می‌توان اینگونه توضیح داد که با افزایش دمای دیواره مشعل به مقدار آدیاباتیک خود نزدیکتر می‌شود و انتقال حرارت کمتری توسط دیواره انتقال پیدا کرده و دمای گاز کمتر خنک می‌شود و در نتیجه مقدار دمای ماکزیمم افزایش

گونه بیان کرد، با افزایش نسبت هوای اضافی، نرخ جریان اکسیدکننده افزایش پیدا می‌کند و این امر باعث می‌شود مواد متخلخل در بالادست جریان بهتر خنک شوند و سبب میشود جبهه‌ی شعله به سمت پایین دست جریان حرکت کند و مقدار دمای ماکزیمم کاهش پیدا کند. باتوجه به اینکه افزایش نسبت هوای اضافی دمای ماکزیمم شعله را کاهش میدهد، بنابراین میزان تولید  $NO_x$  حرارتی نیز کاهش پیدا می‌کند.

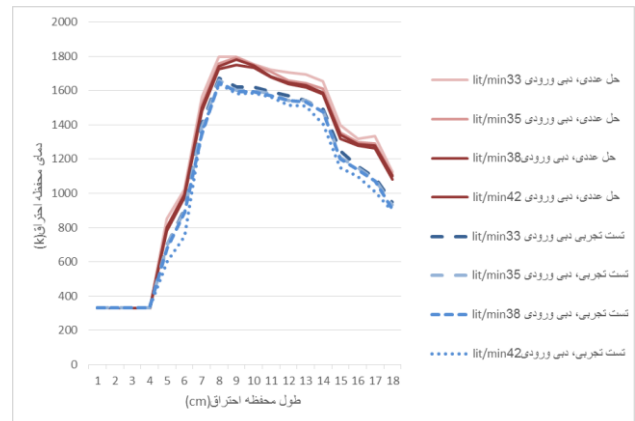
۷-۲-۱- بررسی اثرات دبی جریان ورودی

همانطور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود با افزایش دبی ورودی، دمای محفظه احتراق کاهش پیدا میکند. و به تبع آن میزان انتشار  $NO_x$  افزایش



شکل ۱۳-مقایسه توزیع دما در تست تجربی با نمونه حل عددی در جریان احتراقی همراه با چرخش

پیدا می‌کند. تولید بیشتر  $NO_x$  در سرعت‌های بالاتر را می‌توان اینگونه بیان کرد که در سرعت‌های بالاتر چون فرصت کافی برای مکانیزم‌های برگشت وجود ندارد، سبب میشود که میزان انتشار این آلاینده در خرجی افزایش پیدا کند. از آنجایی که تغییرات  $NO_x$  در تست تجربی قابل اندازه‌گیری نبود نتایج حل عددی توسط شکل ۱۵ و ۱۶ نشان داده شده است.



شکل ۱۴-مقایسه توزیع دما در تست تجربی با نمونه حل عددی در جریان احتراقی همراه با چرخش

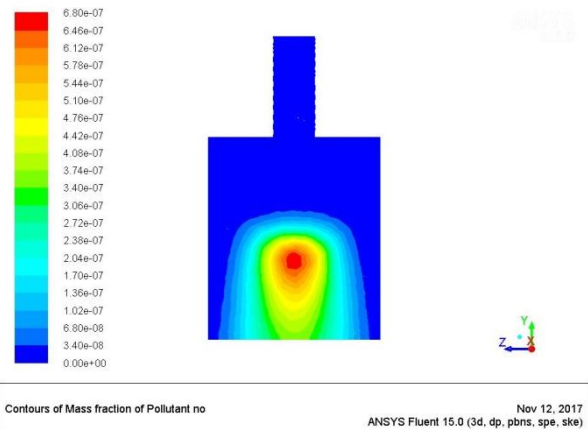


دومین کنفرانس سوخت و احتراق ایران ۱۳۸۶

پیدا می‌کند و به همین ترتیب میزان انتشار گونه شیمیایی NOx نیز افزایش پیدا میکند.

[۵] افشار قاسمی، کیوان، ابراهیمی، رضا؛ "بررسی اثر چرخش بر احتراق یک نمونه مشعل ترکیبی متخلخل چرخشی"، دانشکده هوافضا خواجه نصیر، ۱۳۹۵.

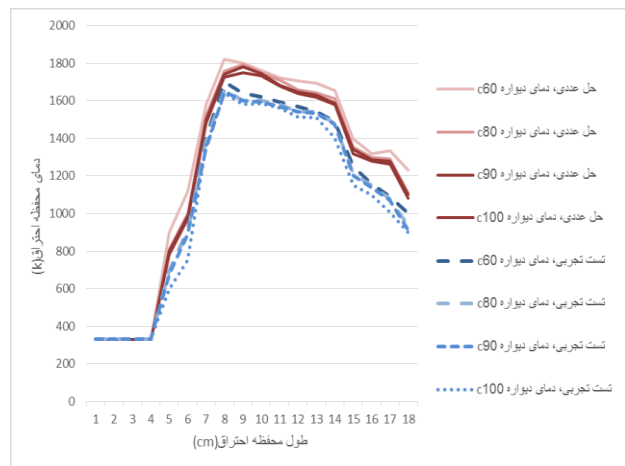
[۶] ایمان محمدی، کیوان، سیامک حسین پور؛ "بررسی عددی اثرات پارامترهای مختلف در مشعل‌های محیط متخلخل همراه با تخلخل متغییر، بر روی احتراق و ایجاد آلاینده‌ها در حالت دو بعدی و متقارن محور"، چهارمین کنفرانس سوخت و احتراق ایران ۱۳۹۰



شکل ۱۸- توزیع گونه شیمیایی NOx در جریان احتراقی بدون چرخش (دبی ورودی 42 lit/min)

[۱] Yoshizawa, Y., Sasaki, K., and Echigo, *Analytical study of the structure of the radiation controlled flame*, Int. J. Heat transfer, Vol. 31 1988

[۳] Peters, J, James, perira, *Experimental and numerical simulation on methanol flame speed in porouse, energy, sience J Vol 11 P23*, 2007



شکل ۱۹- مقایسه توزیع دما در تست تجربی با نمونه حل عددی در جریان احتراقی همراه با چرخش

۸- نتیجه‌گیری

همان گونه که در بخش قبل مشاهده شد، افزایش نسبت هوای اضافی باعث کاهش دمای محفظه احتراق گردید و مشاهده گردید که جبهه شعله به سمت پایین دست جریان حرکت کرد. که این امر باعث کاهش آلاینده NOx نیز گردید. از طرف دیگر مشاهده گردید که با افزایش دبی جریان ورودی به محفظه احتراق دمای ماکزیمم کاهش پیدا کرد ولی باوجود کاهش دمای ماکزیمم میزان انتشار آلاینده NOx افزایش پیدا کرد، که علت این افزایش میزان انتشار NOx عدم تعادل حرارتی در دبی‌های بالاتر می‌باشد. شایان ذکر است که در مشعل غیر چرخشی افزایش دبی باعث ناپایداری شعله گشته و منجر به خاموشی شعله گردید. همچنین با افزایش دمای دیواره به علت نزدیک شدن به حالت آدیاباتیک، دمای ماکزیمم افزایش یافته که این امر به نوبه خود منجر به افزایش انتشار آلاینده NOx میگردد.

۹-مراجع

[۴] شفیع دهج، محمد، ابراهیمی، رضا، فرزانه، میثم، حقیق تجربی بر روی احتراق در یک مشعل محیط متخلخل،