

بررسی تاثیر رطوبت نسبی موجود در هوای ورودی به محفظه احتراق در احتراق غیر پیش آمیخته متان/ هوا بر میزان ماکزیمم دما و انتشار آلودگی NO_x

صالح توده فلاح^{۱*}، محمد صادق ولی پور^۲

دانشگاه سمنان، دانشکده مکانیک

(* نویسنده مخاطب: Toudehfallah@gmail.com)

چکیده

به دلیل افزایش سختگیری در معیارهای استاندارد آلودگی هوا، تلاش های فراوانی برای کاهش آلاینده NO_x صورت می پذیرد. در این تحقیق اثر رطوبت نسبی موجود در هوا با دو دمای مختلف در ورود به محفظه احتراق و در فشار ۱ اتمسفر بر روی ماکزیمم دمای ایجاد شده در محفظه احتراق و در پی آن تاثیر بر روی انتشار NO_x مورد بررسی قرار گرفته است که برای این منظور از محفظه احتراق استوانه ای دارای تقارن محوری استفاده شده است. از مدل آشفستگی $k - \epsilon$ برای مدلسازی آشفستگی جریان استفاده شده است. برای مطالعه احتراق غیر پیش آمیخته متان/هوا از ترکیب مدل اضمحلال ادی و روش آرنیوس (Eddy Dissipation/Finite Rate) استفاده شده است. با استفاده از ترکیب مدل اضمحلال ادی و روش آرنیوس اثر سینتیک و اختلاط، توامان در نرخ انجام واکنش در نظر گرفته می شود. مکانیزم های حرارتی و فوری برای مدلسازی تشکیل اکسید نیتروژن به کار بسته شده است. معادلات با تقریب مرتبه دوم گسسته سازی شده اند و برای کوپل کردن فشار و سرعت از الگوریتم سیمپل بهره گرفته شده است. نتایج عددی نشان می دهد که با افزایش رطوبت نسبی در هوای ورودی، ماکزیمم دمای داخل محفظه کاهش می یابد و به دنبال آن مقدار انتشار NO_x کاهش چشم گیری می یابد. همچنین با افزایش دمای ورودی، قابلیت هوا در میزان جذب رطوبت افزایش می یابد و به مراتب ماکزیمم دما و مقدار NO_x ، کاهش بیشتری پیدا می کند.

واژه های کلیدی: احتراق غیر پیش آمیخته- رطوبت نسبی- متان- آلاینده اکسید نیتروژن- فلونت

۱- مقدمه

جریان سیال درون محفظه احتراق شامل پیچیدگی های فرآیندهای احتراق، آشفستگی، انتقال حرارت، تغییر فاز و انتقال جرم می باشد. به همین دلیل شناخت دقیق و صحیح میدان جریان نیاز به مدل سازی دقیق جریان درون محفظه احتراق دارد. در این راستا یک محفظه احتراق به صورت دو بعدی برای انجام حل عددی، شبیه سازی شده است. به مرور زمان سختگیری سازمان های استاندارد جهانی درباره معیارهای آلودگی محیط زیست افزایش یافته است و امروزه در جهت کاهش نشر آلاینده های ناشی از احتراق تلاشهای زیادی صورت می گیرد. افزایش آلودگی محیط زیست، تلاش برای رسیدن به شعله های صنعتی با آلاینده های پایین تر را افزایش داده است. یکی از این آلاینده ها اکسید های نیتروژن می باشد. آلاینده اکسید نیتروژن NO_x که تشکیل شده از (NO , NO_2 , N_2O) منجر به تشکیل باران های اسیدی، مه های فتوشیمیایی و سوراخ شدن لایه اوزون می شود. کاهش دمای احتراق، کاهش زمان ماندن گازها در شعله و جلوگیری از تشکیل نقاط

۱- کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، گرایش تبدیل انرژی

۲- استادیار مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، دانشکده مکانیک

موضعی با دمای بالا از اقدامات اولیه برای کاهش اکسید های نیتروژن می باشد . در یک تحقیق عددی ماگل و همکارانش (Magel et al) به مطالعه احتراق غیر پیش مخلوط در یک محفظه احتراق استوانه ای با توان $600 kW$ با بکارگیری مدل توربلانسی $k - \epsilon$ و مدل احتراق EDC (Eddy Dissipation Concept) پرداخته اند و غلظت اکسیژن ، مونوکسید و دی اکسید کربن را در موقعیت های مختلف محفظه احتراق بدست آورده اند [۱] و همچنین در تحقیق دیگری برای همان محفظه احتراق و با در نظر گرفتن تشعشع ، غلظت NO_x را در موقعیت های مختلف محفظه بدست آورده اند [۲] . در شبیه سازی مشابه کار حاضر ، سیلوا و همکارانش (Silva et al) به تحلیل توزیع دما و غلظت اجزاء شیمیایی درون محفظه احتراق با استفاده از مدل توربلانسی $k - \epsilon$ استاندارد و مدل احتراقی E-A (Eddy Breakup-Arrhenius model) پرداخته اند [۳] . NO_x اساسا با سه مکانیزم تشکیل می شود . اصلی ترین مکانیزم تولید NO_x در گاز طبیعی Thermal NO_x یا NO_x حرارتی است . NO_x حرارتی هنگامی ایجاد می شود که جدایش مولکولی N_2 و O_2 در اثر حرارت و الحاق آن ها با یکدیگر رخ می دهد . بیشترین NO_x حرارتی تولید شده در ناحیه ای که بالاترین حرارت وجود دارد ، نزدیک شعله بوجود می آید . دومین مکانیزم ، NO_x فوری یا Prompt NO_x نامیده می شود که از واکنش مولکول های نیتروژن در هوا با رادیکال های آزاد هیدروکربن موجود در سوخت ایجاد می شوند . سومین مکانیزم ، NO_x سوخت یا Fuel NO_x نام دارد ، که حکایت از ترکیب نیتروژن موجود در سوخت با اکسیژن دارد . اگر با سوخت هایی سروکار داشته باشیم که میزان نیتروژن موجود در آنها پایین باشد اساسا میزان اینگونه NO_x پایین خواهد بود . محققان مکانیزم های متعددی برای احتراق متان ارائه کرده اند . اگرچه مکانیزم های دقیقی برای این منظور ارائه شده است ، اما استفاده از این مکانیزم ها ، مستلزم صرف وقت زیاد و حجم بالای حافظه کامپیوتر می باشد . به همین علت در کاربردهای علمی مهندسی ، بکاربردن مکانیزم های کاهش یافته بر استفاده از مکانیزم های دقیق ترجیح داده می شود . در کار حاضر یک شبیه سازی عددی از احتراق غیر پیش مخلوط متان/هوا ، شامل یک واکنش شیمیایی دو مرحله ای داخل محفظه احتراق استوانه ای مشابه آزمایش گریتون و سیمونین (Garreton and Simonin) [۴] با استفاده از مدل توربلانسی $k - \epsilon$ و مدل احتراقی ED/FR (Eddy Dissipation/Finite Rate) انجام شده است و تاثیر رطوبت نسبی و دمای هوای ورودی به محفظه احتراق بر روی میزان آلودگی NO_x و ماکزیمم دمای داخل محفظه احتراق مورد بررسی قرار گرفته است .

۲- معادلات حاکم

به منظور تحلیل عددی مدل مورد نظر، نیاز به حل معادلات بقاء جرم ، اجزاء شیمیایی ، ممنتوم و انرژی می باشد. معادلات مورد استفاده برای این منظور عبارتند از :

معادله بقاء جرم:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

معادله بقاء اجزاء شیمیایی برای جزء n ام و در جهت i :

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho Y_n + \frac{\partial}{\partial x_i} \rho u_i Y_n = - \frac{\partial J_{ni}}{\partial x_i} + R_n \quad (2)$$

R_n نرخ خالص تولید یا مصرف جزء n ام بوسیله واکنش شیمیایی ، Y_n کسر جرمی محلی جزء n ام ، J_{ni} جریان نفوذی جزء n ام که به علت گرادیان غلظت و دما بوجود آمده است .

معادله بقاء ممنتوم در جهت i :

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho u_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \rho u_i u_j = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (3)$$

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \quad (4)$$

p فشار استاتیک ، μ ویسکوزیته مولکولی ، τ_{ij} تانسور تنش است که توسط معادله (۴) تعریف شده است .

معادله بقاء انرژی در جهت i :

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho E + \frac{\partial}{\partial x_i} u_i \rho E + P = \frac{\partial}{\partial x_i} k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_i} - \sum_n \dot{Q}_n J_n + u_j \tau_{ij, eff} + S_h \quad (5)$$

$$E = \dot{Q} - \frac{P}{\rho} + \frac{u_i^2}{2} \quad (6)$$

$$\dot{Q} = \sum_n Y_n \dot{Q}_n \quad (7)$$

$$\dot{Q}_n = \int_{T_{ref}}^T C_{p,k} dt \quad (8)$$

S_h شامل حرارت واکنش شیمیایی و هر منبع حرارتی موجود دیگر، k_{eff} ضریب هدایت حرارتی موثر که برابر مجموع ضریب هدایت حرارتی و ضریب هدایت حرارتی توربلانسی می باشد، $\tau_{ij, eff}$ تانسور تنش موثر که مشابه ضریب هدایت حرارتی موثر تعریف می شود. در معادله (۸) برابر $298/15 K$ می باشد. تمام معادلات در حالت پایا و برای جریان غیر قابل تراکم حل می شوند.

۲-۱- مدل سازی آشفتهگی

برای حل دستگاه معادلات ناویر- استوکس، مدل توربلانسی مناسب مورد نیاز است که در این تحقیق از مدل $k - \epsilon$ استاندارد استفاده شده که توسط جانز و لاندرا (Jones and Launder) در سال ۱۹۷۲ معرفی شده است. این مدل بر پایه این فرض است که ترم های تنش های رینولدز به گرادیان های سرعت متوسط با استفاده از ویسکوزیته توربلانسی (μ_t) ارتباط دارد، که به صورت زیر بیان می شود:

$$-\overline{\rho u_i' u_j'} = \mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \rho k + \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \delta_{ij} \right) \quad (9)$$

که در آن k انرژی جنبشی آشفتهگی می باشد:

$$k = \frac{1}{2} \overline{u_i' u_i'} \quad (10)$$

مدل $k - \epsilon$ شامل دو معادله انتقالی، یکی برای انرژی جنبشی آشفتهگی و یکی برای نرخ استهلاک ϵ است:

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_k - \rho \epsilon \quad (11)$$

$$\rho \frac{D\epsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right) + \frac{\epsilon}{k} C_{1\epsilon} G_k - C_{2\epsilon} \rho \epsilon \quad (12)$$

که در آن G_k به عنوان تولید انرژی جنبشی توربلانسی به علت گرادیان های سرعت متوسط ارائه می شود، $C_{1\epsilon}$ و $C_{2\epsilon}$ به صورت تجربی تعریف می شوند، σ_k و σ_ϵ اعداد پراوتل توربلانسی به ترتیب برای k و ϵ هستند که به صورت تجربی تعیین می شوند. ویسکوزیته توربلانسی (μ_t) به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\mu_t = \rho c_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (13)$$

که در آن c_μ به صورت تجربی بدست می آید. همه ثابت های استفاده شده برای مدل $k - \epsilon$ توسط جانز و لاندرا (Jones and Launder) در جدول (۱) معرفی شده است.

جدول ۱- ضرایب ثابت مورد استفاده در مدل $k - \epsilon$

۰/۰۹	۱/۴۴	۱/۹۲	۱	۱/۳
------	------	------	---	-----

۲-۲- مدل سازی احتراق

در کار حاضر یک مکانیزم دو مرحله ای برای سوختن متان توسط وستبروک (Westbrook) و درایر (Dryer) به صورت رابطه (۲۱) و (۲۲) ارائه شده است [۵]. واکنش های مورد نظر شامل ۶ جزء شیمیایی می باشند.



برای مدل سازی آزاد سازی انرژی از ترکیب مدل اضمحلال ادی (به عنوان یک مدل با فرض شیمی سریع) و روش آرنیوس (برای اعمال شیمی محدود)، ED/FR (Eddy Dissipation/Finite Rate) استفاده شده است تا همزمان اثر آشفستگی و سینتیک بر احتراق اعمال شود. در این مدل، نرخ واکنش بر اساس مینیمم مقدار نرخ مخلوط کنترل شده بوسیله مقیاس زمانی ادی های بزرگ و نرخ آرنیوس (Arrhenius) کنترل شده بوسیله سینتیک شیمیایی، محاسبه می شود. در مدل اضمحلال ادی فرض اساسی این است که نرخ اضمحلال گردابه های آشفستگی با کسر ϵ/k متناسب است که در آن ϵ اضمحلال انرژی آشفستگی و k انرژی جنبشی آشفستگی می باشد [۶].

۲-۲-۱- مدل نرخ محدود (Finite Rate)

به علت اینکه دو مکانیزم واکنشی مورد استفاده، شامل واکنش های برگشت نمی باشند، در نوشتن معادلات از نرخ ثابت واکنش برگشت ($k_{b,r}$) صرف نظر می شود.

نرخ واکنش مولی مصرف یا تولید جزء i ام در واکنش r به صورت زیر تعریف می شود:

$$\hat{R}_{i,r} = \nu''_{i,r} - \nu'_{i,r} k_{f,r} \prod_{j=1}^{N_r} C_{j,r}^{\eta'_{j,r}} \quad (۱۴)$$

به ترتیب ضریب استوکیومتری برای جزء واکنش دهنده و تولید شده i ام در واکنش r ، $k_{f,r}$ نرخ ثابت واکنش رفت، $C_{j,r}$ غلظت مولی هر جزء واکنش دهنده و محصول j ام در واکنش r ، $\eta'_{j,r}$ نرخ نمای واکنش رفت برای هر جزء واکنش دهنده و محصول j ام در واکنش r ، N_r تعداد اجزاء شیمیایی در واکنش r است. در معادله بالا نرخ ثابت واکنش رفت توسط رابطه آرنیوس بیان می شود:

$$k_{f,r} = A_r T^{\beta_r} e^{-\frac{E_r}{RT}} \quad (۱۵)$$

A_r پیش فاکتور نمایی، E_r انرژی فعال سازی، R ثابت جهانی گازها (8313 J kmol.k)، T دما، β_r توان دما می باشد، این ضرایب برای مکانیزم واکنشی مورد بررسی، در جدول (۲) نشان داده شده است.

جدول ۲- ضرایب مورد نیاز مدل نرخ محدود برای واکنش های (۲۱) و (۲۲) با واحدهای [m],[s],[J],[K],[kmol]

واکنش (r)	E_r [J/kmol]	A_r	β_r	$\eta'_{1,r}$	$\eta'_{2,r}$	$\eta'_{3,r}$	$\eta'_{4,r}$	$\eta'_{5,r}$
r=۱			۱/۳	۱/۳	-	-	-	-
r=۲				۰/۲۵	۱	-	-	-

و در نهایت نرخ واکنش برای هر جزء از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$R_i = M_{w,i} \sum_{r=1}^{N_R} \hat{R}_{i,r} \quad (۱۶)$$

$M_{w,i}$ وزن مولکولی جزء i ام، N_R تعداد مکانیزم های واکنشی می باشد [۷].

۲-۲-۲- مدل اضمحلال ادی (Eddy Dissipation)

این مدل نرخ واکنش را توسط دو معادله زیر پیش بینی می کند که در نهایت مینیمم مقدار این دو معادله به عنوان نرخ واکنش برای مدل اضمحلال ادی در نظر گرفته می شود .

$$R_{i,r} = v'_{i,r} M_{w,i} A \rho \frac{\varepsilon}{k} \min_R \frac{Y_R}{v'_{R,r} M_{w,R}} \quad (17)$$

$$R_{i,r} = v'_{i,r} M_{w,i} A B \rho \frac{\varepsilon}{k} \frac{\sum P Y_P}{\sum_j v'_{j,r} M_{w,j}} \quad (18)$$

k انرژی جنبشی توربلانسی ، ε نرخ اضمحلال انرژی توربلانسی ، Y_P و Y_R کسر جرمی اجزاء ، $M_{w,i}$ وزن مولکولی و زیر نوشت های P و R به ترتیب معرف محصولات و واکنش دهنده ها می باشند . مقادیر A و B به ترتیب برابر ۴ برای واکنش دهنده ها و ۵ برای محصولات می باشند [۸].

۲-۳-۳- مدل سازی اکسید های نیتروژن

برای بدست آوردن میزان تولید NO_x به یک معادله انتقال برای غلظت NO نیازمندیم . این معادله بر مبنای داده های بدست آمده از جریان حل شده ، نوشته و حل می شود . به عبارت دیگر NO_x یک پس پردازنده از جریان شبیه سازی شده است . حل دقیق و درست جریان احتراقی برای محاسبه مقدار NO_x بسیار اهمیت دارد . معادله انتقال جرم برای NO بصورت زیر نوشته می شود [۹] :

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho Y_{NO} + \rho \vec{v} Y_{NO} = \nabla \cdot \rho D \nabla Y_{NO} + S_{NO} \quad (19)$$

Y_{NO} نسبت جرمی در فاز گازی است . S_{NO} هم ترم چشمه است که برای مکانیزم های مختلف تشکیل NO_x به صورت جداگانه محاسبه می شود . برای دخیل کردن آشفتگی در معادلات تشکیل NO_x ، از تابع PDF - با تاثیر نوسانات دمایی استفاده شده است ، این در حالی است که از نوسانات اجزاء صرف نظر شده است [۷] .

۲-۳-۱- مکانیزم NO_x حرارتی

واکنش های اساسی حاکم بر تولید NO_x حرارتی یا همان واکنش های زلدویچ (Zeldovich) توسعه یافته که از واکنش نیتروژن موجود در هوا به وجود می آید بدین صورت است :



زیر نویس f برای واکنش های رفت و r برای واکنش های برگشتی است . این مکانیزم در مواقعی که دمای محفظه بالا باشد (بالتر از ۱۸۰۰ کلوین) نقش غالب را در تولید اکسید های نیتروژن ایفا می کند . تشکیل اکسید های نیتروژن به دلیل پیوند سه گانه موجود بین اتم های نیتروژن نیاز به انرژی زیادی دارد . نرخ خالص تشکیل NO برای واکنش های زلدویچ توسعه یافته را با فرض حالت شبه پایدار برای غلظت نیتروژن بدست می آوریم . این فرض برای مخلوط رقیق سوخت ، که در آن نرخ مصرف اتم آزاد نیتروژن برابر است با نرخ تشکیل آن ، می تواند استفاده شود . این فرض برای اکثر احتراق ها بجز برای مخلوط به شدت غنی ، مناسب است . نرخ خالص تشکیل NO به صورت زیر تعریف می شود :

$$\frac{d NO}{dt} = 2k_{f1} O N_2 \frac{1 - \frac{k_{r1} k_{r2} NO^2}{k_{f1} N_2 k_{f2} O_2}}{1 + \frac{k_{r1} NO}{k_{f2} O_2 + k_{f3} OH}} \quad (20)$$

که نرخ های ثابت واکنش به صورت زیر بدست می آید ، تمامی واکنش ها دارای واحد $m^3/kmol.s$ است .

$$k_{f,1} = 1.8 \times 10^{11} \exp \frac{-38370}{T} \quad (21)$$

$$k_{f,2} = 1.8 \times 10^7 \exp \frac{-4680}{T} \quad (22)$$

$$k_{f,3} = 7.1 \times 10^{10} \exp \frac{-450}{T} \quad (23)$$

$$k_{r,1} = 3.8 \times 10^{10} \exp \frac{-425}{T} \quad (24)$$

$$k_{r,2} = 3.8 \times 10^6 \exp \frac{-20820}{T} \quad (25)$$

$$k_{r,3} = 1.7 \times 10^{11} \exp \frac{-24560}{T} \quad (26)$$

از معادله بالا واضح است که نرخ تشکیل NO با افزایش غلظت اکسیژن افزایش می یابد . بنابراین غلظت اتم O با فرض محاسبات شبه تعادلی به صورت زیر محاسبه می شود [۱۰] .

$$O = 36.64T^{0.5} O_2^{0.5} e^{-27123/T} \quad (27)$$

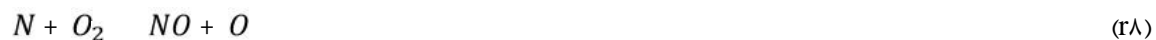
ترم چشمه برای NO_x حرارتی توسط معادله زیر بدست می آید .

$$S_{thermal,NO} = M_{w,NO} \frac{dNO}{dt} \quad (28)$$

که در آن $M_{w,NO}$ وزن مولکولی NO است و $\frac{dNO}{dt}$ توسط معادله محاسبه می شود .

۲-۳-۲- مکانیزم فوری NO_x

مکانیزم فوری که توسط فنیمور شناسایی شد ، براین مبنا که رادیکال های هیدروکربن در ناحیه ابتدایی احتراق با مولکول های نیتروژن واکنش می دهند . این نوع مکانیزم از مکانیزم حرارتی پیچیده تر است و در هنگامی که دمای محفظه احتراق پایین باشد و یا احتراق به صورت غنی انجام شود ، نقش عمده ای در تولید اکسید نیتروژن ایفا می کند . در مکانیزم فوری مولکول های نیتروژن هوا با رادیکال های CH که در جبهه شعله به صورت میان واکنش تشکیل می شوند واکنش می دهند و جزء سیانید نیتروژن را تشکیل می دهند (HCN) که در مرحله بعد با نیتروژن واکنش می دهند و اکسید نیتروژن را تشکیل می دهند . این واکنش ها به صورت زیر بیان می شوند :



نرخ خالص تشکیل NO در حالت فوری برای بیشتر هیدروکربن ها توسط معادله زیر بیان می شود .

$$\frac{dNO}{dt} = f k_{prompt} O_2^a N_2^b FUEL e^{-E_a/RT} \quad (34)$$

$$k_{prompt} = 1.2 \times 10^7 RT^a P^{a+1} \quad (35)$$

$$E_a = 251040 J/gmol \quad (36)$$

$$f = 4.75 + 0.0819n - 23.2\phi + 32\phi^2 - 12.2\phi^3 \quad (37)$$

a مرتبه واکنش ، R ثابت جهانی گاز ، f فاکتور تصحیح ، n تعداد اتم های کربن ، ϕ نرخ هم ارزی (Equivalence) می باشند . و در نهایت ترم چشمه برای مکانیزم NO_x سریع به صورت زیر حاصل می شود :

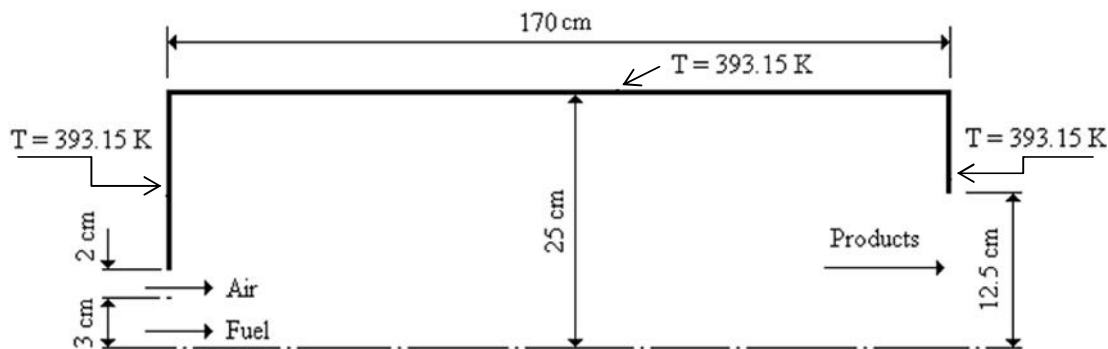
$$S_{prompt,NO} = M_{w,NO} \frac{d[NO]}{dt} \quad (33)$$

۴-۲- روش محاسباتی

به منظور حل معادلات حاکم و به دلیل پیچیدگی و تنوع در شرایط حاکم بر مسئله، بسته نرم افزاری ANSYS FLUENT v.14 که مبتنی بر روش حجم محدود در مرکز سلول است، مورد استفاده قرار گرفته است. برای گسسته سازی ترم های معادلات، تقریب مرتبه ۲ به کار برده شده و کوپل کردن ترم های فشار و سرعت توسط الگوریتم سیمپل (SIMPLE) صورت گرفته است. معیار همگرایی 10^{-7} برای ترم های دیفیوژنی می باشد.

۳- هندسه و شرایط مرزی

شکل هندسی محفظه احتراق همانند کار گریتون و سیمونین (Garretton and Simonin) [۴] که به تحلیل آزمایشگاهی آن پرداخته اند، انتخاب شده است. محفظه احتراق استوانه ای به صورت تقارن محوری مدل شده و دارای طول 170 cm و قطر 5.0 cm می باشد، در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱- شکل هندسی محفظه احتراق

شبکه مورد استفاده برای تحلیل عددی این محفظه احتراق دارای 24000 هزار سلول محاسباتی می باشد که این مقدار پس از مستقل کردن حل از شبکه بدست آمده است. برای ورود سوخت از گاز متان استفاده شده است که جزء اصلی گاز طبیعی را تشکیل می دهد. توان مشعل مورد استفاده برابر 600 kw می باشد که بر روی خط تقارن محوری قرار گرفته است. با در نظر گرفتن 5% سوخت اضافی، دبی جرمی ورودی سوخت که دارای دمای $313/15 \text{ k}$ می باشد، 0.125 kg/s است. دبی جرمی هوای ورودی برابر 0.1186 kg/s می باشد که برای اعتبار سنجی از دمای ورودی $323/15 \text{ k}$ استفاده شده است و سپس برای تکمیل فرآیند تحقیق، نتایج برای دمای $343/15 \text{ k}$ نیز محاسبه شده اند. با توجه به این دبی های جرمی، سرعت ورود سوخت و هوا به ترتیب برابر $7/76 \text{ m/s}$ و $36/29 \text{ m/s}$ می باشند. عدد رینولدز متوسط در ورودی محفظه برابر 17900 می باشد. اجزاء هوای ورودی با در نظر گرفتن رطوبت نسبی و فشار 1 اتمسفر در جدول (۳) نشان داده شده است. از اثرات بویانسی صرف نظر شده است. برای شروع احتراق از گزینه *patch* استفاده شده است که مانند جرقه عمل می کند و در یک لحظه دمای محفظه را به 2000 k می رساند. در خروجی از شرط فشار ثابت استفاده شده است. دیوار های محفظه احتراق مانند آزمایش انجام شده توسط گریتون و سیمونین در دمای ثابت $393/15 \text{ k}$ ، قرار گرفته است. در تمام دیوارها از شرط

مرزی عدم لغزش و نفوذ ناپذیری استفاده شده است. پروفیل غلظت اجزاء در ورودی به صورت یکنواخت در نظر گرفته شده است. شدت توبلانس (I) ۶٪ و ۱۰٪ بترتیب برای جریان های هوا و سوخت (و مقیاس طولی توبلانس (l) $0.04 m$ و $0.03 m$ بترتیب برای جریان های هوا و سوخت) انتخاب شده است.

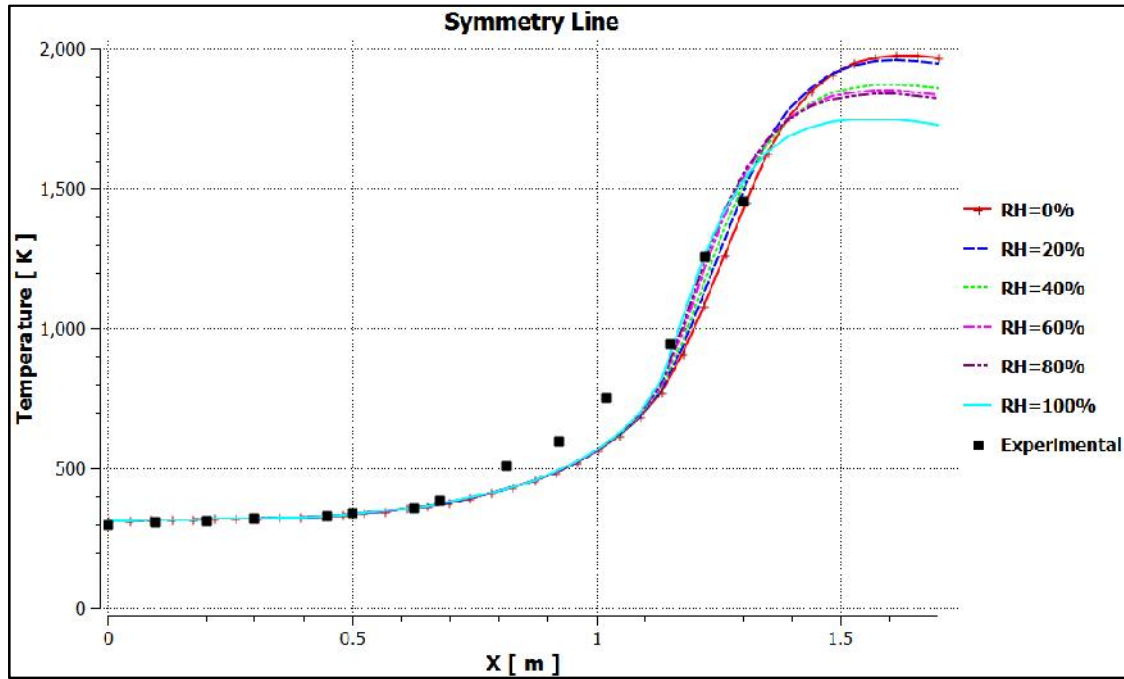
جدول ۳- کسر جرمی اجزاء هوا در فشار ۱ اتمسفر با در نظر گرفتن رطوبت نسبی

رطوبت نسبی %	دمای هوای ورودی	فشار جزئی بخار kPa	رطوبت مطلق	کسر جرمی	کسر	کسر جرمی N_2
۰	۳۲۳/۱۵	۰	۰	۰	۰/۲۳	۰/۷۷
	۳۴۳/۱۵	۰	۰	۰	۰/۲۳	۰/۷۷
۲۰	۳۲۳/۱۵	۲/۴۷	۰/۰۱۶	۰/۰۱۶	۰/۲۳	۰/۷۵۴
	۳۴۳/۱۵	۶/۲۴	۰/۰۴	۰/۰۳۸	۰/۲۲	۰/۷۴
۴۰	۳۲۳/۱۵	۴/۹۴	۰/۰۳۲	۰/۰۳۱	۰/۲۲	۰/۷۵
	۳۴۳/۱۵	۱۲/۴۸	۰/۰۸۷	۰/۰۸	۰/۲۱	۰/۷۱
۶۰	۳۲۳/۱۵	۷/۴۱	۰/۰۵	۰/۰۴۸	۰/۲۲	۰/۷۳۲
	۳۴۳/۱۵	۱۸/۷۲	۰/۱۴۱	۰/۱۲	۰/۲	۰/۶۸
۸۰	۳۲۳/۱۵	۹/۸۸	۰/۰۶۷	۰/۰۶	۰/۲۲	۰/۷۲
	۳۴۳/۱۵	۲۴/۹۶	۰/۲	۰/۱۷	۰/۱۹	۰/۶۴
۱۰۰	۳۲۳/۱۵	۱۲/۳۵۱	۰/۰۸۷	۰/۰۸	۰/۲۱	۰/۷۱
	۳۴۳/۱۵	۳۱/۲	۰/۲۸	۰/۲۲	۰/۱۸	۰/۶

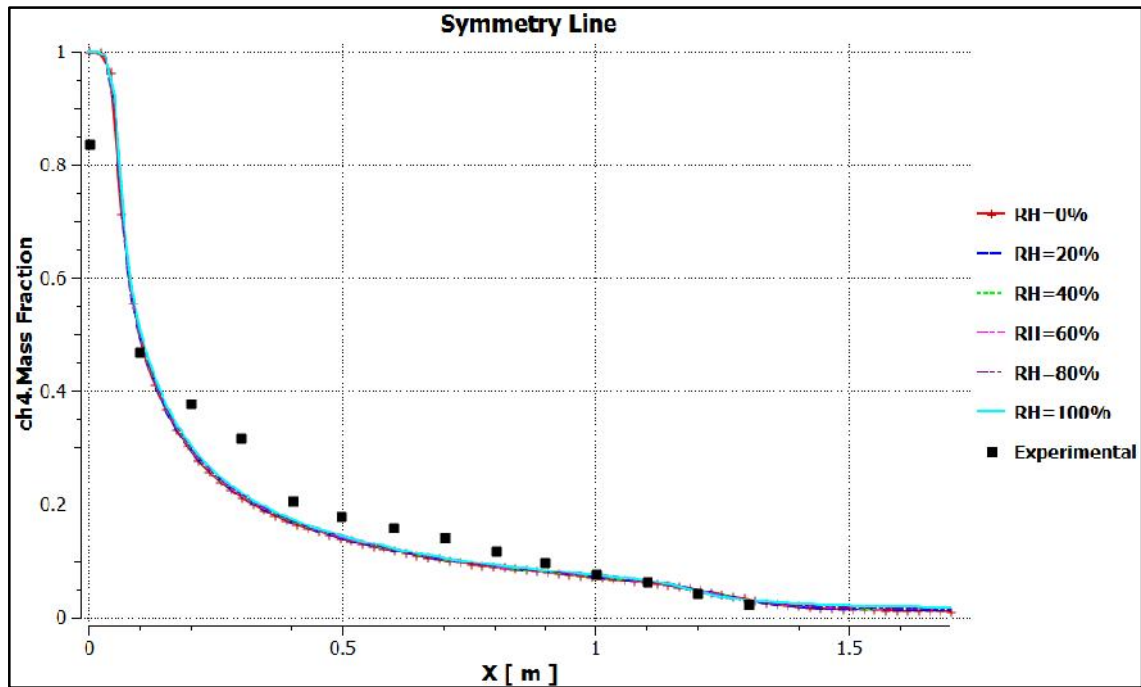
H رطوبت مطلق، P_g فشار بخار در حالت اشباع، P_v فشار جزئی بخار هوا، P_{amb} فشار ۱ اتمسفر، m_v جرم بخار، m_a جرم هوا می باشد.

۴- نتایج

ابتدا صحت و درستی محفظه احتراق مدل شده با مقایسه نتایج آن با نتایج آزمایشگاهی تایید شده است. در این راستا برای دمای هوای ورودی k ۳۲۳/۱۵ مدل سازی محفظه احتراق در رطوبت نسبی های ۰، ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰، ۱۰۰ درصد، انجام گرفته است و نتایج بدست آمده در راستای خط تقارن محوری با نتایج آزمایشگاهی که توسط گریتون و سیمونین (Garretton and Simonin) [۴] انجام شده، مقایسه شده است که در شکل (۲) برای توزیع دما و در شکل (۳) برای کسر جرمی CH_4 ، قابل مشاهده می باشند. همانطور که از نمودارها مشخص است، تطابق خوبی بین مدل سازی عددی و نتایج آزمایشگاهی مشاهده می شود. این تطابق برای رطوبت نسبی ۱۰۰ درصد کاملاً مشهود است که صحت نتایج را با توجه به جزئیات آزمایش انجام شده توسط گریتون و سیمونین نشان می دهد. همچنین در شکل (۲) علاوه بر اعتبار سنجی، روند کاهش دما بر روی خط تقارن محوری با افزایش رطوبت نسبی کاملاً مشهود می باشد. در شکل (۳) نیز کسر جرمی CH_4 روند مشابهی را برای رطوبت نسبی های مختلف طی می کند.

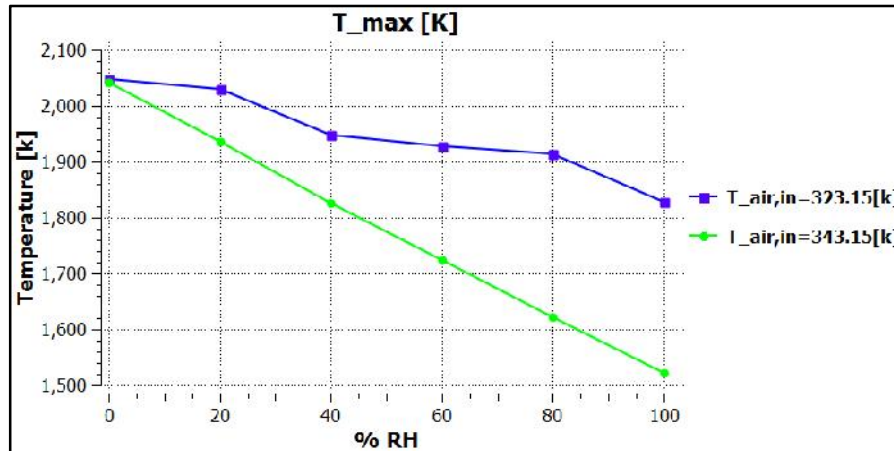


شکل ۲- توزیع دما بر روی خط تقارن محوری (که تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد)



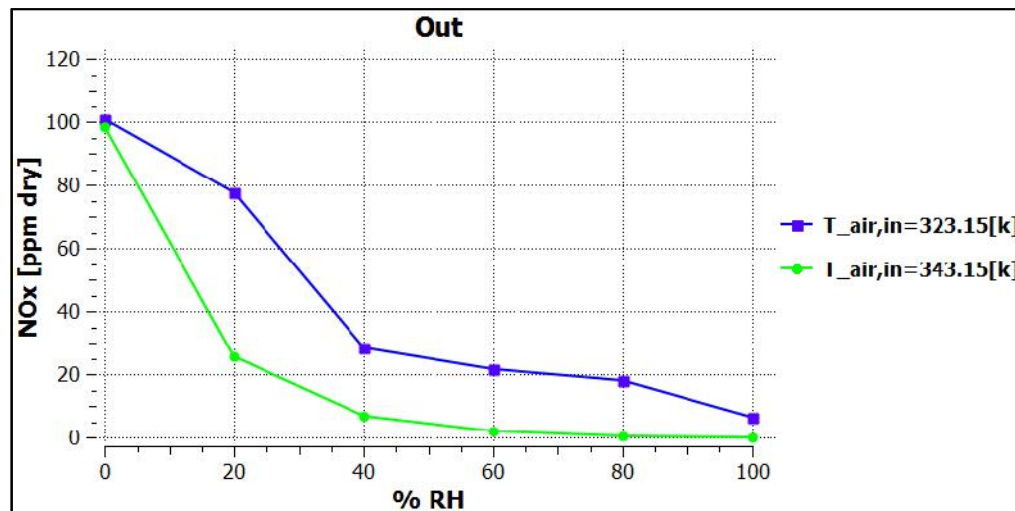
شکل ۳- کسر جرمی CH₄ در طول محور مرکزی محفظه احتراق (تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی مشاهده می شود)

در شکل (۴) روند کاهش ماکزیمم دمای داخل محفظه را برای دو دمای مختلف هوای ورودی به محفظه احتراق و در رطوبت نسبی های مشخص می توان مشاهده کرد .



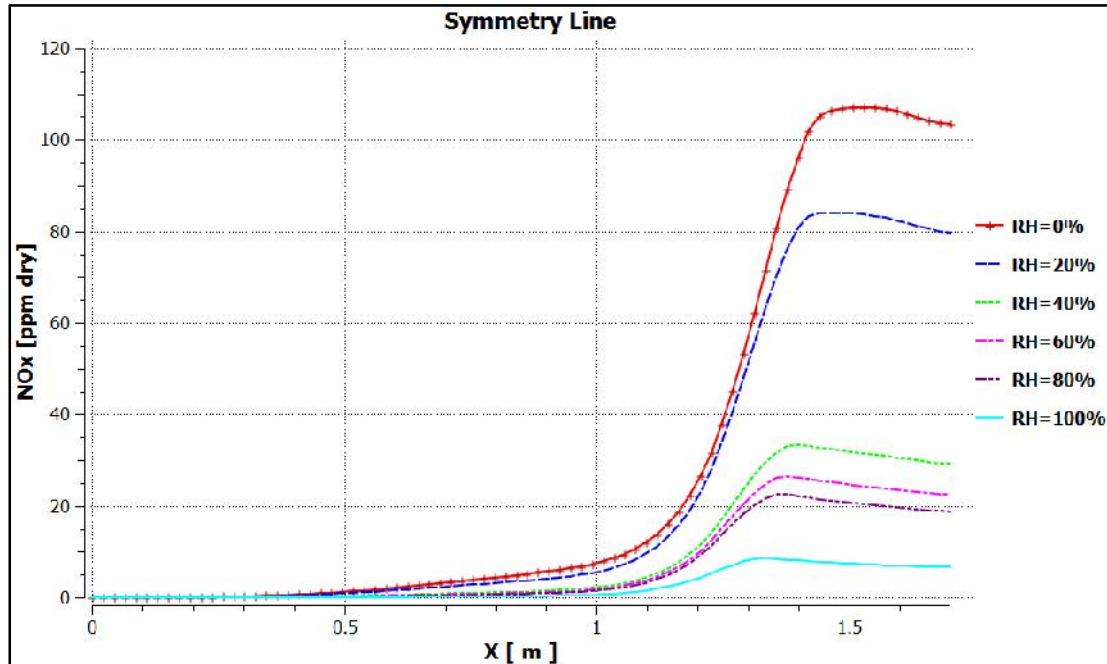
شکل ۴ - ماکزیمم دمای داخل محفظه ، در دو دمای مختلف و به همراه رطوبت نسبی های مختلف هوای ورودی

همانطور که از شکل (۴) مشخص است با افزایش رطوبت نسبی ، دمای ماکزیمم داخل محفظه احتراق کاهش چشمگیری پیدا کرده است . همچنین با افزایش دمای هوای ورودی به محفظه که منجر به افزایش قابلیت جذب رطوبت بیشتر در هوا می شود ، این کاهش دمای ماکزیمم ، بیشتر اتفاق افتاده است . همین کاهش دمای ماکزیمم داخل محفظه سبب کاهش شدیدی در مقدار انتشار NO_x می شود که مقدار این انتشار در خروجی محفظه ، در شکل (۵) قابل مشاهده است .



شکل ۵- مقدار انتشار NO_x نسبت به دما و رطوبت نسبی هوای ورودی

بخاطر وابستگی شکست مولکولی نیتروژن به دمای بالا و سپس ترکیب N با O و ایجاد NO_x ، کاهش دمای حداکثری تاثیر خود را بر روی تولید NO_x گذاشته است و این روند کاهشی در کنار افزایش رطوبت نسبی کاملاً مشهود است. روند تولید NO_x در داخل محفظه نیز برای دمای ۳۲۳/۱۵ K در شکل (۶) نمایش داده شده است.



شکل ۶ - روند تغییر انتشار NO_x نسبت به رطوبت نسبی هوا در داخل محفظه و بر روی خط تقارن محوری در دمای ۳۲۳/۱۵ K

۵- نتیجه گیری

با افزایش رطوبت نسبی هوای ورودی به محفظه احتراق، مقدار دمای ماکزیمم داخل محفظه کاهش چشمگیری پیدا می کند و این کاهش دمای ماکزیمم، سبب کاهش شدیدی در مقدار انتشار NO_x می شود. همچنین با پیش گرم کردن هوای ورودی، قابلیت جذب رطوبت هوا افزایش پیدا کرده و این افزایش رطوبت، کاهش دمای ماکزیمم و کاهش تولید NO_x بیشتری را به دنبال دارد. به طوری که برای دمای هوای ورودی ۳۲۳/۱۵ کلوین این مقدار تولید NO_x از ۱۰۰ ppm به ۶/۵ و دمای ماکزیمم از ۲۰۴۷ به ۱۸۲۸ کلوین رسیده است. همچنین برای دمای هوای ورودی ۳۴۳/۱۵ کلوین، این مقدار NO_x تولیدی از ۹۸ ppm به زیر ۱ ppm و دمای ماکزیمم از ۲۰۴۲ به ۱۵۲۲ کلوین رسیده است.

مراجع

- 1- Magel, H.C., Schnell, U., and Hein, K.R.G., "Modeling of hydrocarbon and nitrogen chemistry in turbulent combustor flows using detailed reaction mechanisms" In 3rd Workshop on Modeling of Chemical Reaction Systems, The Combustion Institute, Heidelberg, 1-10, (1996).
- 2- Magel, H.C., Schnell, U., and Hein, K.R.G., "Simulation of detailed chemistry in a turbulent combustor flow" Proc. Combust. Instit., 26, 67, (1996).
- 3- Da Silva, C. V., Vielmo, H. A., França, F. H. R., "Numerical simulation of the combustion of methane and air in a cylindrical chamber" Thermal Engineering, Vol. 5 - N° 01 - July 2006



پنجمین کنفرانس سوخت و احتراق ایران

تهران - دانشگاه علم و صنعت ایران - بهمن ماه ۱۳۹۲



- 4- Garre´ton, D. and Simonin, O., “Aerodynamics of steady state combustion chambers and furnaces” In ASCF Ercoftac Cfd Workshop, Org: EDF Chatou, France, (1994).
- 5- Westbrook , C., Dryer, F., “Simplified Reaction Mechanisms for the Oxidation of Hydrocarbon Fuels in Flames”, Combustion Science and Technology, 1981, Vol. 27, pp.31-43
- 6- Peters, N., “Turbulent Combustion”, Cambridge University Press,2000 .
- 7- Ansys Fluent Inc. User’s Guide , Version v.14,(2011).
- 8- Magnussen, B.F. and Hjertager, B.H., “On mathematical models of turbu-lent combustion with special emphasis on soot formation and combustion” Proc. Combust. Instit., 16, 719,(1976).
- 9- Versteeg and w. Malasekera “An Introduction to Computational Fluid Dynamics, The Finite Volume Method” Longman,1995 .
- 10- Hanson, R. K., and Salimian, S., “Survey of Rate constants in the N/H/O System”, Longman, 1996.