

تحلیل احتراق حاصل از مشعل گازسوز به روش عددی و مقایسه با نتایج تجربی

سپهر صنایع^۱، جواد محمودی مهر^۲، سهیلا خوشنویسان^۳

دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی مکانیک، آزمایشگاه بهینه سازی سیستمهای انرژی
j_mahmoudimehr@mecheng.iust.ac.ir

چکیده

محفظه داخلی بویلر آب گرمی که احتراق در آن به وسیله مشعلی گازی که از هوا به عنوان اکسیدکننده واز پروپان به عنوان سوخت استفاده می کند، به دو صورت آزمایشگاهی و مدلسازی عددی مورد بررسی قرار گرفته است. با فرض قابل قبولی، واکنش دهنده ها در هنگام ورود به محفظه احتراق، پیش اختلاط در نظر گرفته شده اند. شبکه بندی و حل عددی مسئله به کمک نرم افزارهای *Fluent&Gambit* صورت گرفته است. پس از مروری بر معادلات حاکم، نحوه مدلسازی واکنشها و تشعشع، به تحلیل و بررسی میدانهای دما، گونه های شیمیایی و نرخهای واکنش حاصل از حل عددی پرداخته می شود. در ادامه، نتایج حاصل از حل عددی با نتایج تجربی در توان سوخت 140.73 کیلو وات مقایسه می شود که این مقایسه توافق قابل قبولی را بین آنها نشان می دهد.

واژه های کلیدی: بررسی آزمایشگاهی-حل عددی- شعله پیش آمیخته آشفته- مدل finite rate/eddy dissipation

1- مقدمه

بیش از نود درصد انرژی مصرفی جهان از احتراق سوخته های فسیلی تهیه می شود. نیاز فزاینده جهان به انرژی، محدود بودن و کاهش سریع منابع سوخته های فسیلی و مشکلات زیست محیطی این سوخته ها موجب شده است که طراحی وسایل احتراق تمیز با بازده بالا مورد توجه بسیاری از پژوهشگران و طراحان سیستم های احتراقی قرار گیرد. مشعل به عنوان بخش اصلی سیستم های احتراق صنعتی، سوخت و اکسید کننده را با نسبتی صحیح، شعله ور می سازد. اهداف اصلی در طراحی مشعل، افزایش کارایی احتراق و به حداقل رساندن تولید آلودگی هایی نظیر NO_x ، CO می باشد. امروزه، استفاده از مدلسازی عددی (CFD)، به منظور کاهش در زمان طراحی و سایر هزینه ها، در بررسی عملکرد تولیدات جدید مشعل های صنعتی و همچنین کاهش خطرات آزمایشگاهی، به صورت ابزاری ضروری در آمده است [1]. به علت رشد سطح اطلاعات شبیه سازی های عددی، هدایت از جانب آزمایش خیلی دقیق، یک ضرورت است. دلیل اول برای مقایسه با آزمایش آن است که ممکن است کشف واکنش های شیمیایی یا فیزیک قبلا مجهول پدیدار شود. از طریق تکرار مقایسه بین شبیه سازیها و آزمایشات است که پیشرفت حاصل می شود. دلیل دوم آنکه، در علاقه به حصول جوابهای تقریبی در یک زمان قابل قبول، لازم است شبیه سازیها بر اساس دسته معادلات مدلسازی شده انجام شود، که در آنها ترمهایی استادانه حذف و یا ساده سازی شده است. با آزمایش، مطلع می شویم که کدام ترمها با اطمینان از اینکه سهم آنها در جنبه های مورد علاقه ناچیز است، می توانند حذف شوند [2].

1- دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک

2- دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی مکانیک

3- کارشناس ارشد مکانیک

2- مطالعه آزمایشگاهی

مسئله حاضر، بویلر آب گرم تغذیه شده به وسیله یک مشعل گاز سوز را شامل می شود. سوخت و اکسید کننده قبل از رسیدن به سر مشعل، با جریاناتی در جهات عمود بر هم به یکدیگر ملحق می شوند. برای در نظر گیری اختلاط پیش آمیخته لازم است که سوخت و اکسید کننده در سطوح مولکولی با یکدیگر اختلاط پیدا کنند. تلاقی عمود بر هم سوخت و اکسید کننده و تعداد سوراخهای دایروی نسبتاً بالای سر مشعل کمک می کند تا با تقریب خوبی، اختلاط پیش آمیخته در نظر گرفته شود. نمای کلی از مشعل مورد استفاده در شکل (1-الف) و نمایی از سر مشعل در شکل (1-ب) نشان داده شده است.



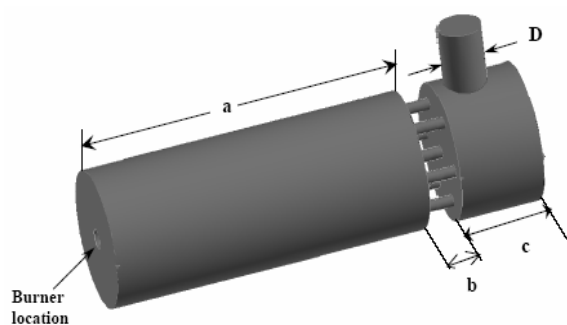
(ب)



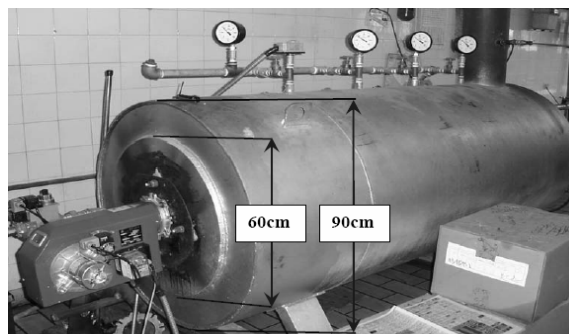
(الف)

شکل 1- الف) نمای کلی مشعل (ب) هندسه سر مشعل در نمایی نزدیکتر

بویلر آب گرم مسئله حاضر، محفظه ای استوانه ای دو جداره است که در پوسته بیرونی آن آب جریان داشته و بخش داخلی آن، محفظه احتراق را تشکیل می دهد. آب جریان یافته بر روی محفظه احتراق سیرکوله نمی شود بلکه از یک سمت وارد شده و از سمت دیگر خارج می شود. در شکل (2-الف) نمای کلی بویلر، قطر محفظه احتراق و قطر خارجی پوسته مشاهده می شود. محفظه احتراق، خود به دو بخش تقسیم می شود. بخش اول قسمتی است که احتراق در آن صورت می گیرد، سپس محصولات احتراق با عبور از لوله هایی به بخش دوم وارد شده و از آنجا به دودکش وارد می شوند. البته این بخش ها به علت وجود پوسته قابل رویت نیستند. شکل (2-ب) به منظور دیدن این بخش ها، با برداشتن پوسته از روی محفظه احتراق، ترسیم شده است. در این شکل، a طول محفظه اول، b طول لوله های رابط بین دو محفظه، c طول محفظه دوم و D قطر دودکش را نشان می دهند. همانطور که قبلاً نیز ذکر شد، شکل (2-ب) بخش داخلی بویلر است و پوسته ای از آب، محفظه اول، دوم و بخش رابط را در برمی گیرد و بدین وسیله موجب خنک کاری آن می شود. بخش رابط به همراه دیواره جلویی و عقبی آن، به یکدیگر متصل بوده و اصطلاحاً دیوار پشتی (Rear wall) نامیده می شود.



(ب)



(الف)

شکل 2- الف) نمای کلی بویلر (ب) نمای داخلی بویلر با برداشتن پوسته خارجی

یک روش که اغلب در بازرسیهای احتراق برای اندازه گیری ترکیب مواد استفاده می شود، نمونه گیری به وسیله میل سنجش های درون رو است، که در آن یک لوله مکش به داخل سیستم وارد شده و سپس نمونه بدست آمده برای تعیین اجزاء

شیمیایی آن تجزیه می شود. همچنین میدانهای دما به وسیله ترموکوپلهایی که زوجهای اتصالات بین فلزات مختلف می باشند، اندازه گیری می شود. یک ولتاژ، که تقریباً متناسب با اختلاف دمای بین دو اتصال است، القاء می شود (اثر ترموالکتریک) و بدین ترتیب مقدار دما به دست می آید.

3- معادلات حاکم و مدلسازی

مدلسازی احتراق صنعتی، نوعاً شامل حل جریانات آشفته، انتقال حرارت، انتقال گونه های شیمیایی و واکنشهای شیمیایی می شود و استفاده از روشهای متوسط گیری رینولدز به همراه یک مدل آشفستگی مناسب در آن معمول است. معادلات اضافی، نظیر انتقال تابش، و یا مدلهای احتراقی خاص نیز در صورت لزوم، مورد استفاده قرار می گیرد.

3-1- پیوستگی

معادله پیوستگی در فاز گازی به صورت رابطه (1) می باشد.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho) + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = S_m \quad (1)$$

که در رابطه فوق، ρ متوسط رینولدز چگالی مخلوط، \vec{V} متوسط رینولدز بردار سرعت، و S_m منابع جرمی خارجی که به عنوان مثال می تواند نتیجه انتقال جرم از فازهای دیگر مثل قطرات ریز مایع و یا ذرات جامد باشد.

3-2- ممنتوم

متوسط رینولدز فاز گازی معادله ممنتوم به صورت رابطه (2) می باشد.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{V}) + \nabla \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) = \nabla \cdot ((\mu + \mu_t) \nabla \vec{V}) + \vec{F} \quad (2)$$

که در رابطه فوق، μ_t ویسکوزیته آشفته است که به وسیله مدل آشفستگی به دست می آید. در این مقاله برای مدلسازی آشفستگی از مدل معروف k, ϵ استاندارد استفاده شده است. \vec{F} مولفه هایی از ترم تنش که به طور صریح مشخص نیستند، از جمله نیروی دراگ (drag) حاصل از فازهای مجزا، را شامل می شود.

3-3- معادله انرژی

انتقال حرارت به وسیله معادله بقا انرژی که در رابطه (3) نشان داده شده، محاسبه می شود.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\rho \vec{V} E) = \nabla \cdot ((k + K_t) \nabla T) + \nabla \cdot (\tau \cdot \vec{V}) - \nabla \cdot (P \vec{V}) + S_r + S_h \quad (3)$$

در معادله فوق k ضریب هدایت حرارتی، K_t ضریب هدایت آشفته که از مدل آشفستگی به دست می آید، τ تانسور تنش، P فشار و E انرژی کل است که به صورت $E = e(T) + \frac{V \cdot V}{2}$ تعریف می شود و در آن، e انرژی درونی بر واحد جرم است. در رابطه (3)، S_r چشمه حرارتی تابشی و S_h ترم چشمه انرژی مربوط به واکنش است و در صورت وجود فازهای مجزا، این ترم انتقال حرارت بین فازهای پیوسته و مجزا را نیز در بر می گیرد.

3-4- مدلسازی تابش

در بسیاری از فرایندهای احتراق، نه تنها تابش مکانیزم غالب انتقال انرژی است، بلکه یکی از مشکل ترین مسائل موجود

در احتراق است. درستی محاسبات تابشی، وابسته به ترکیبی از درستی روش محاسباتی و درستی خواصی است که برای دیواره های احاطه کننده و محیط واسطه در نظر گرفته می شود [3]. معادله انتقال تابش برای یک محیط جذب کننده، گسیل کننده، و متفرق کننده در مکان \vec{r} و جهت \vec{s} به صورت رابطه (4) می باشد.

$$\frac{dI(\vec{r}, \vec{s})}{ds} + (a + \sigma_s)I(\vec{r}, \vec{s}) = a \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}') \Phi(\vec{s}, \vec{s}') d\Omega' \quad (4)$$

در رابطه (4)، \vec{s}' بردار جهت متفرق سازی، s طول مسیر، a ضریب جذب، σ_s ضریب متفرق سازی، I شدت تابش و σ ثابت استفان-بولتزمن (Stefan-Boltzmann constant)، T دمای محلی، Φ تابع فاز (Phase function) و Ω' زاویه فضایی (Solid angle) می باشند.

در بسیاری از سیستمهای احتراقی استفاده از مدل تشعشعی P1 مفید می باشد. مدل تابشی p1 ساده ترین مدل از مدل کلی تر تابشی P-N است که بر اساس بسط شدت تابش به سریهای اورتوگونال هارمونیک کروی می باشد. اگر تنها از چهار ترم در سریها استفاده شود، معادله زیر برای فلاکس تابشی q_r به دست می آید:

$$q_r = -\frac{1}{3(a + \sigma_s) - C\sigma_s} \nabla G \quad (5)$$

که در آن، G تابش برخوردی (Incident Radiation) و C ضریب خطی غیر ایزوتروپیک تابع فاز (Linear-anisotropic phase function coefficient) است. با تعریف تابع Γ به صورت $\Gamma = \frac{1}{3(a + \sigma_s) - C\sigma_s}$ معادله فوق به صورت زیر رابطه زیر در می آید:

$$q_r = -\Gamma \nabla G \quad (6)$$

و معادله انتقال برای G عبارتست از:

$$\nabla \cdot (\Gamma \nabla G) - aG + 4a\sigma T^4 = 0 \quad (7)$$

با حل این معادله، شدت تابش محلی مشخص میشود. با تلفیق معادلات فوق، معادله زیر بدست می آید.

$$-\nabla \cdot q_r = aG - 4a\sigma T^4 \quad (8)$$

عبارت $-\nabla \cdot q_r$ می تواند مستقیماً در معادله انرژی به عنوان چشمه یا چاه های حرارتی تابشی جایگزین شود. ضرائب جذب می توانند ثابت در نظر گرفته شده و یا تابعی از غلظت های محلی بخار آب و دی اکسید کربن باشد. در فلوتنت می توان از مدل WSGGM (Weighted sum of gray gases) [4] برای محاسبات بر اساس ضریب جذب متغیر استفاده نمود. این مدل توافقی منطقی بین مدل بسیار ساده گاز خاکستری و مدل کاملی که باندهای جذب مخصوص را به حساب می آورد برقرار کرده است.

5-3-مدلسازی واکنشها به همراه تقابلات شیمی و آشفستگی

می توان اختلاط و انتقال گونه های شیمیایی را با حل نمودن معادلات بقا برای هر جزء شیمیایی از ترکیب که توصیف کننده دیفیوژن، جابجایی و منابع واکنش می باشد، مدل نمود. برای حل معادلات بقا برای اجزاء شیمیایی، کسر جرمی محلی هر گونه شیمیایی (Y_i) از طریق معادله جابجایی-پخش برای گونه آم حل می شود. معادله بقا شکل کلی زیر را دارد:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_i) = -\nabla \cdot \vec{J}_i + R_i + S_i \quad (9)$$

که R_i نرخ خالص تولید گونه آم از طریق واکنش شیمیایی، S_i ترم منبع گونه آم به واسطه تولید از فازهای دیگر و \vec{J}_i فلاکس دیفیوژن جزء آم است که به خاطر گرادیان های غلظت به وجود می آید. اگر اثرات نوسانات آشفته صرف نظر شده و نرخهای واکنش با استفاده از عبارات آرنیوس محاسبه می شوند. این مدل برای شعله های آرام دقیق است، اما به طور کلی به خاطر ویژگی غیر خطی سینیتیک شیمیایی آرنیوس، برای شعله های آشفته صحیح نمی باشد. چشمه خالص گونه شیمیایی i

ام بر اساس واکنش، (R_i)، برابر است با مجموع چشمه های واکنشی آرنیوس در تعداد N_R واکنش که گونه شیمیایی در آن شرکت می کند که در رابطه (10) نشان داده شده است.

$$R_i = M_{w,i} \sum_{r=1}^{N_R} \hat{R}_{i,r} \quad (10)$$

$M_{w,i}$ وزن مولکولی گونه ام و $\hat{R}_{i,r}$ نرخ تشکیل و یا نابودی گونه ام در واکنش r می باشد. Γ امین واکنش را می توان به شکل کلی رابطه (11) نوشت:

$$\sum_{i=1}^N v'_{i,r} M_i \xrightleftharpoons[k_{b,r}]{k_{f,r}} \sum_{i=1}^N v''_{i,r} M_i \quad (11)$$

که N ، تعداد گونه های شیمیایی موجود در سیستم، $v'_{i,r}$ ضریب استوکیومتری واکنشگر ام در واکنش r و $v''_{i,r}$ ضریب استوکیومتری محصول ام در واکنش r می باشد. و $k_{f,r}$ ثابت نرخ پیشروی و $k_{b,r}$ ثابت نرخ پسروی برای واکنش r ام است. نرخ مولی تولید یا نابودی جزء ام در واکنش r ام از طریق رابطه (12) به دست می آید:

$$\hat{R}_{i,r} = \Gamma (v''_{i,r} - v'_{i,r}) \left(k_{f,r} \prod_{j=1}^{N_r} [C_{j,r}]^{\eta'_{j,r}} - k_{b,r} \prod_{j=1}^{N_r} [C_{j,r}]^{\eta''_{j,r}} \right) \quad (12)$$

که N_r تعداد گونه های شیمیایی در واکنش r ام، $C_{j,r}$ غلظت مولی واکنشگر و یا محصول r ام در واکنش r ام، $\eta'_{j,r}$ توان نرخ پیشروی و $\eta''_{j,r}$ توان نرخ پسروی هر واکنشگر و یا محصول r ام در واکنش r ام می باشند. $k_{f,r}$ با استفاده از عبارت آرنیوس محاسبه می شود به صورت رابطه (13):

$$k_{f,r} = A_r T^{\beta r} e^{-E_r / RT} \quad (13)$$

که βr توان دما و E_r انرژی فعالسازی واکنش می باشند و R ثابت جهانی گازهاست. در صورت برگشت پذیر بودن واکنش، ثابت نرخ پسروی برای واکنش r ام، به صورت $k_{b,r} = \frac{k_{f,r}}{K_r}$ محاسبه می شود که K_r ثابت تعادل برای واکنش r ام است.

اکثر سوخت ها سریع می سوزند و نرخ کلی واکنش در آنها با اختلاط آشفته کنترل می شود. در چنین مواردی گفته می شود که احتراق توسط اختلاط محدود می شود و نرخهای جنبشی شیمیایی پیچیده و اغلب نامعلوم، می توانند به طور صحیحی نادیده گرفته شوند. بر اساس تلاشهای مگنوسن (Magnussen) و هر تاگر (Hjertager) [5] یک مدل برای در نظر گیری تقابلات شیمی و آشفستگی در اختیار است که مدل اتلاف گردابه ای (eddy dissipation model) نامیده می شود. نرخ خالص تولید گونه ام، در واکنش r ام، توسط عبارت با مقدار کوچکتر از میان دو رابطه (14) و (15) به دست می آید:

$$R_{i,r} = v'_{i,r} M_{w,i} A \rho \frac{\varepsilon}{k} \min\left(\frac{Y_R}{R}, \frac{Y_R}{v'_{R,r} M_{w,R}}\right) \quad (14)$$

$$R_{i,r} = v'_{i,r} M_{w,i} A B \rho \frac{\varepsilon}{k} \frac{\sum_p Y_p}{\sum_j v''_{j,r} M_{w,j}} \quad (15)$$

Y_p جزء جرمی هر یک از محصولات، Y_R جزء جرمی واکنشگر ام، A و B مقادیر ثابت تجربی می باشند. در معادلات فوق، نرخ واکنش شیمیایی توسط مقیاس زمانی اختلاط ادی های بزرگ، $\frac{k}{\varepsilon}$ ، کنترل می شود. و هر جا که آشفستگی موجود باشد ($\frac{k}{\varepsilon} > 0$) احتراق رخ می دهد. این مطلب معمولاً برای شعله های غیر پیش آمیخته قابل قبول است. اما در شعله های پیش آمیخته، واکنشگرها به محض ورود به محدوده محاسباتی می سوزند. برای غلبه بر این مشکل، مدلی به نام اتلاف گردابه ای/نرخ محدود (Finite rate/eddy dissipation) در فلوئنت موجود است که در آن، هم نرخ واکنش آرنیوس (معادله 12) و هم نرخهای واکنش اتلاف گردابه ای (معادلات (14) و (15)) محاسبه می شوند و کمترین مقدار آنها به عنوان نرخ واکنشی

خالص در نظر گرفته می شود. در واقع، نرخ آرنیوس به صورت یک سوئیچ عمل می کند که مانع به وجود آمدن احتراق قبل از نگهدارنده شعله می شود. وقتی که شعله روشن می شود، نرخ واکنش اتلاف گردابه ای معمولاً کوچکتر از نرخ آرنیوس است و واکنشها توسط اختلاط محدود و معین می شوند.

3-6-مدلسازی تولیدات NO_x

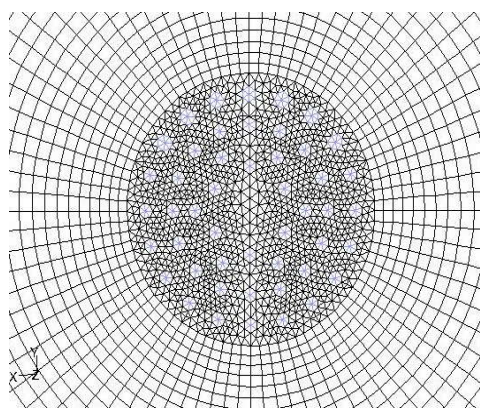
در این مقاله از دو مکانیزم تشکیل NO_x حرارتی (Thermal NO_x) و تشکیل NO_x آنی (Prompt NO_x)، برای پیش بینی تولیدات استفاده شده است و بدین منظور یک معادله انتقال برای غلظت NO حل می شود. مکانیزم اول با اکسیداسیون نیتروژن اتمسفریک موجود در هوای احتراق تشکیل شده و به وسیله یک سری واکنشهای شیمیایی شدیداً وابسته به دما تحت عنوان مکانیزم زلدوویچ بسط یافته، تعیین می گردد. نرخ تشکیل NO_x در دماهای بالا (بیش از 1800 کلوین) حائز اهمیت است، زیرا لازمه تشکیل آن شکستن پیوند سه گانه و قوی N_2 است. مکانیزم دوم در پیشانی شعله و توسط واکنشهای سرعت بالا تولید می شود و اولین بار توسط فنیمور (Fenimore) شناسایی و تشکیل NO_x آنی نامیده شد. معادلات انتقال NO_x بر پایه میدان جریان و احتراق به دست آمده حل می شوند. بنابراین لازمه پیش بینی صحیح آن، حل صحیح احتراق می باشد. فلونت معادله انتقال جرم که جابجایی، دیفیوژن، تولید و مصرف NO و گونه های مربوطه را در نظر میگیرد را برای NO حل می کند. معادله انتقال NO به صورت رابطه (16) می باشد..

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_{NO}) + \nabla \cdot (\rho v Y_{NO}) = \nabla \cdot (\rho D \nabla Y_{NO}) + S_{NO} \quad (16)$$

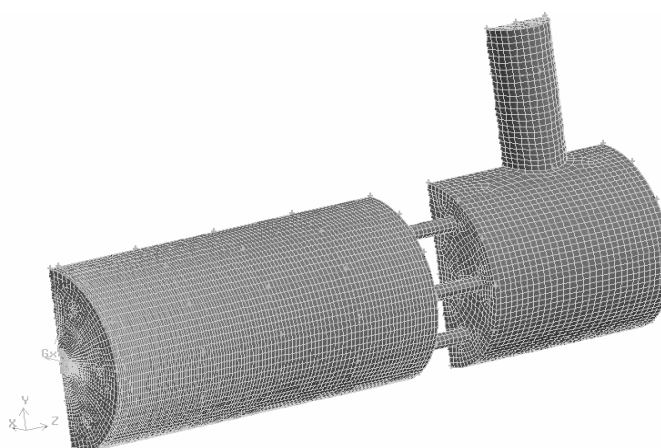
S_{NO} ترم چشمه است که به وسیله مدل‌های مربوط به مکانیزمهای مختلف تشکیل NO مشخص می شود [6].

4- شبکه بندی مسئله در Gambit و مدل‌های مورد استفاده در Fluent 6.2

به علت وجود تقارن، به منظور کاهش زمان محاسباتی تنها نیمی از هندسه مسئله ساخته و شبکه بندی می شود. نمای ایزومتریک شبکه بندی در شکل (3-الف) نشان داده شده است که شامل 349572 سلول محاسباتی که ترکیبی از سلولهای شش وجهی (Hexahedron) و گوه ای (Wedge) است، می باشد. سر مشعل دارای 48 سوراخ دایروی به قطر 5.2 میلی متر می باشد. در سر مشعل از شبکه بندی با سلولهای گوه ای استفاده شده است. بخشی از نمای روبروی شبکه بندی که ناحیه سر مشعل را نیز شامل می شود در شکل (3-ب) نشان داده شده است.



(ب)



(الف)

شکل 3- الف (نمای ایزومتریک شبکه بندی سه بعدی ب) بخشی از نمای روبرو

مدلهای مورد استفاده برای مدلسازی مسئله حاضر در نرم افزار Fluent 6.2 ، در جدول 1 نشان داده شده است:

جدول 1- مدل‌های مورد استفاده برای مدل‌سازی عددی

Segregated	روش فرمول بندی حل
implicit	روش خطی سازی معادلات
Simple	الگوریتم اصلاح فشار
P-1	مدل تشعشع
WSGGM	روش محاسبه ضریب جذب محیط واسطه در مدل تشعشعی
Standard k, ϵ	روش مدل‌سازی آشفنگی
Species Transport & Single step mechanism	روش مدل‌سازی احتراق
Finite rate/Eddy dissipation model	روش در نظرگیری تقابل شیمی و آشفنگی
Prompt&thermal NOx	مدلهای مورد استفاده برای پیش بینی تولید NO_x

5- استخراج و بررسی نتایج حل عددی و مقایسه آن با نتایج آزمایشگاهی در توان 140.73KW

یکی از ملاکهای همگرایی حل عددی، بالانس انرژی در سیستم است. به منظور بالانس انرژی در سیستم، باید مجموع نرخ انرژی های ورودی به سیستم برابر با مجموع نرخ انرژی های خارج شده از سیستم باشد. جدول 2- بالانس انرژی را نشان می دهد. همانطور که در این جدول مشاهده می شود توافق نسبتا خوبی میان توان سوخت و مجموع نرخ حرارت خروجی از سیستم برقرار است.

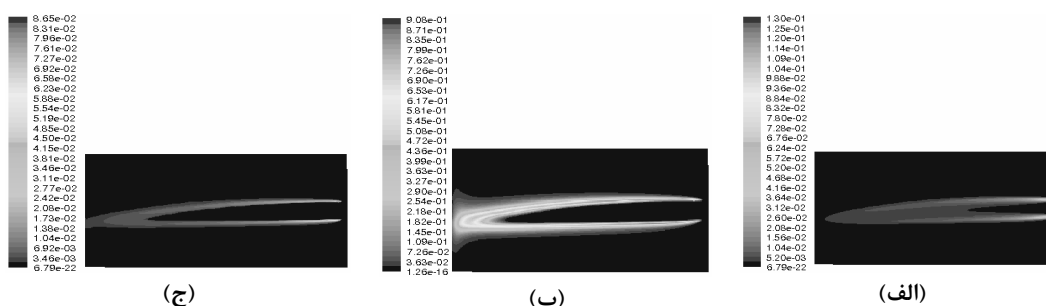
جدول 2- بالانس انرژی

توان سوخت ورودی (KW)	مجموع نرخ انتقال حرارت به خارج از سیستم (KW)	نرخ اتلاف حرارت تابشی از ورودی ها و خروجی (KW)	نرخ اتلاف انرژی محسوس به واسطه خروج گازهای داغ از دودکش (KW)	نرخ انتقال حرارت از دیواره ها به خارج (KW)
140.73	138.57	0.86	47.61	90.1

در اینجا در ابتدا به بررسی نتایج حاصل و سپس به مقایسه نتایج به دست آمده با نتایج تجربی پرداخته می شود.

1-5- نرخ واکنش

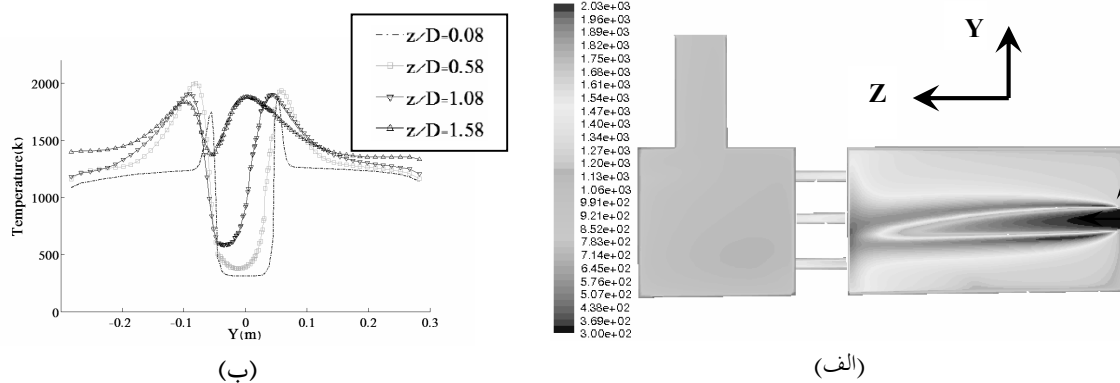
با توجه به اینکه از مدل finite rate/eddy dissipation برای مدل‌سازی احتراق استفاده شده است، همانطور که قبلا ذکر شد، این مدل نرخ واکنش را بر اساس کمترین مقدار دو عبارت نرخ واکنشی آشفته و نرخ واکنشی آرنیوس در نظر می گیرد تا در شعله های پیش آمیخته، قبل از نگهدارنده شعله احتراق صورت نگیرد. شکل 4- ، کانتورهای نرخ های واکنشی آشفته، آرنیوس و نرخ واکنش حاصل را نشان می دهد.



شکل 4- الف) کانتور نرخ واکنشی آشفته ب) آرنیوس ج) نرخ واکنش حاصل ($kgmol / m^3.s$)

دما-5-2

کانتورهای دمای به دست آمده از حل عددی در صفحه تقارن به همراه پروفیل های دما در عرض محفظه احتراق و در فواصل محوری مختلف در شکل 5-رسم شده است.

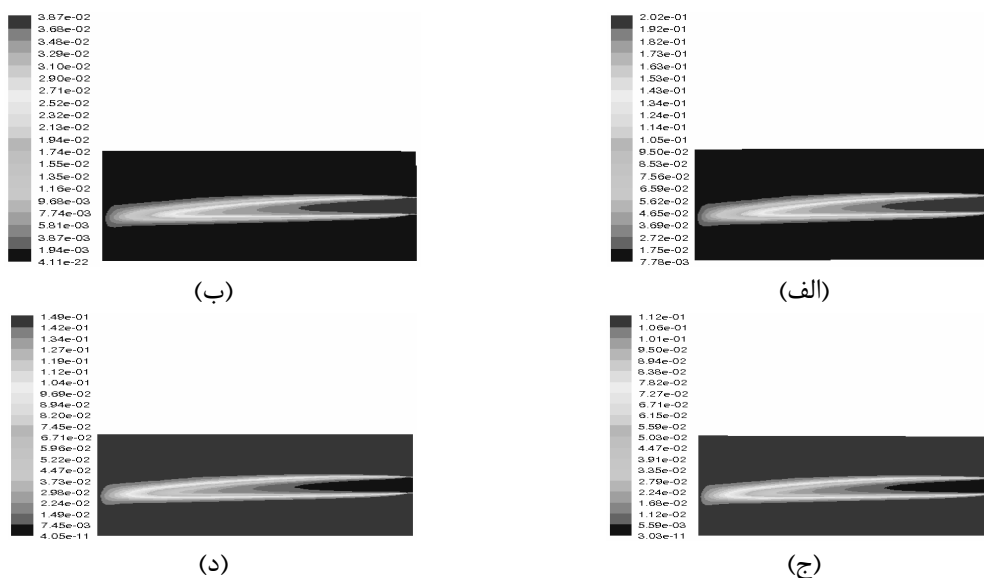


شکل 5- الف) کانتور دما بر صفحه تقارن (K) ب) پروفیل های دما در عرض محفظه احتراق و در فواصل محوری مختلف (D: قطر بویلر)

جهت محورهای یکه مختصاتی در شکل (5-الف) نشان داده شده است. مبدا مختصات نیز در مرکز سر مشعل قرار دارد. در شکل (الف و ب) نواحی مخلوط گازهای سرد تازه، پیش گرم و واکنشی قابل مشاهده هستند. همانطور که مشخص است، با دور شدن از خط مرکزی در جهت شعاعی، مخلوط های تازه به واسطه انتقال گرمای واکنش به آنها به وسیله مکانیزمهای دیفیوژن و تشعشع پیش گرم شده، تا جایی که به منطقه واکنشی رسیده و در آنجا مشتعل می شوند. به همین ترتیب اگر بر روی خط مرکزی در جهت محوری نیز حرکت کنیم، شاهد چنین اتفاقی هستیم، به طوریکه با افزایش فاصله محوری، دما روی خط مرکزی افزایش یافته تا اینکه به ناحیه واکنشی رسیده و گازها در پیشانی شعله مشتعل می گردند.

3-5- کسر مولی گونه های شیمیایی

کانتورهای کسر مولی گونه های شیمیایی در صفحه تقارن محفظه اصلی در شکل (6) نشان داده شده است.

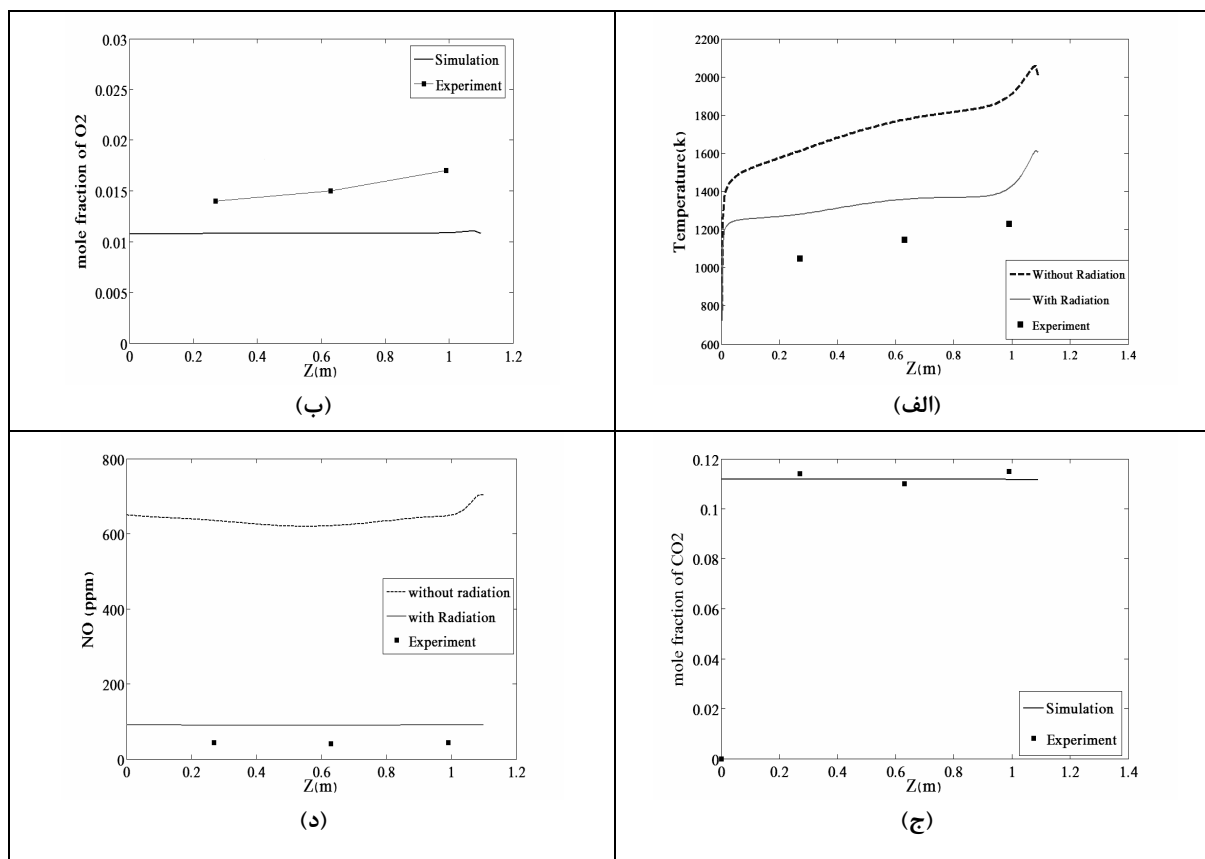


شکل 6- کانتورهای کسر مولی گونه های شیمیایی (الف) O_2 (ب) C_3H_8 (ج) CO_2 (د) H_2O

همانطور که انتظار می رود، مقادیر کسر مولی واکنشگرها (سوخت و اکسید کننده) قبل از احتراق، بالا می باشد و عکس این حالت برای محصولات احتراق صادق است و مقادیر کسر مولی آنها بعد از ناحیه واکنشی بالاست. به واسطه مکانیزمهای پخش-دیفیوژن، مقداری محصولات احتراق در نواحی قبل از ناحیه واکنشی نیز مشاهده می شود که این مقادیر با افزایش فاصله محوری بیشتر نیز می شود.

4-5- مقایسه نتایج تجربی و حل عددی

مقایسه ای میان مقادیر به دست آمده از حل عددی و مقادیر اندازه گیری شده به صورت تجربی برای دما، کسر مولی CO_2 ، کسر مولی O_2 و مقدار NO_x بر حسب ppm در صفحه تقارن و بر روی خط $Y = 15cm$ صورت گرفته است. این مقایسه در نمودارهای شکل (7) نمایش داده شده است.



شکل 7- مقایسه حل عددی و نتایج تجربی الف) دما (K) ب) کسر مولی CO_2 ج) کسر مولی O_2 د) NO_x بر حسب

با توجه به شکل (7-الف) در می یابیم که در صورت صرف نظر از تشعشع، دماهای پیش بینی شده بسیار بالاتر از حدود مورد انتظار است، اما اگر حل معادلات انتقال تشعشع نیز به سایر معادلات اضافه شود دماهای پیش بینی شده وضعیت مطلوب تری پیدا می کند، اما هنوز مقادیر پیش بینی شده از مقادیر تجربی بالاتر است. در کنار منابع خطای اندازه گیری می توان به دلایل دیگری اشاره نمود. در دمای شعله آدیباتیک حاصل از سوختن هیدروکربن ها (حدود 2000 کلوین)، مقادیر محسوسی از CO_2 ، H_2O در تعادل با CO_2 وجود دارند که موجب کاهش گرمای واکنش و دمای شعله آدیباتیک می شود. بنابراین فرض تک مرحله ای بودن واکنش می تواند منجر به پیش بینی دماهای کمتر از مقدار واقعی شود. از طرفی با مشاهده نمودار شکل (7-ب) در می یابیم که مقادیر پیش بینی شده کسر مولی O_2 کمتر از مقادیر تجربی است. این اتفاق می تواند به علت عدم اندازه گیری دقیق دبی هوای ورودی باشد، بطوریکه دبی واقعی هوای ورودی می تواند بالاتر از مقادیر اندازه گیری شده

باشد. این احتمال با دماهای تجربی مشاهده شده که کمتر از نتایج حل عددی است نیز سازگار است زیرا دماهای بالای شعله در نواحی نزدیک به حالت استوکیومتری رخ می دهد و درصدهای هوای اضافی بالاتر موجب کاهش دمای شعله می شود. مقادیر کسر مولی CO_2 توافق خوبی را با نتیجه تجربی به دست آمده نشان می دهد. البته نتایج تجربی اندکی با نوسان همراه است که این می تواند به علت عدم اختلاط کامل محصولات قبل از ورود به کوره باشد، اما به طور کلی توافق خوبی مشاهده می شود و نشان میدهد فرض پیش اختلاط انجام شده دور از واقعیت نبوده است. در نمودارهای کسر مولی CO_2 و کسر مولی O_2 ، نتایج حل عددی مربوط به حالات بدون در نظرگیری تشعشع و همراه با در نظرگیری تشعشع بسیار نزدیک به هم بوده و تقریباً بر روی هم می افتند، به همین علت تنها نتایج حاصل از حل کامل (با تشعشع) برای کسرهای مولی CO_2 و O_2 ، با مقادیر تجربی مقایسه شده است. در نمودار شکل (7-د) مقادیر تولید NO_x بر حسب ppm با نتایج به دست آمده در آزمایشگاه مقایسه شده است. همانطور که در شکل (7-د) مشاهده می شود، مقادیر NO_x به دست آمده در حالت بدون در نظرگیری تشعشع به علت دماهای بالای پیش بینی شده در آن، به علت وابستگی بالای تولید NO_x به دما، بسیار بالاتر از نتایج تجربی است. در حالت در نظرگیری تشعشع، این مقادیر به مقادیر تجربی نزدیک شده اما هنوز بالاتر است. همان طور که قبلاً اشاره شد، با توجه به مقایسه پروفیل های دما و کسر مولی O_2 با مقادیر تجربی احتمال داده ایم که مقدار دبی هوای ورودی و در نتیجه O_2 و N_2 بیش از مقدار اندازه گیری شده در آزمایشگاه باشد. اگر این احتمال صحیح باشد، مقادیر O_2 و N_2 نیز در ورودی بالاتر است که خود می تواند عاملی برای افزایش NO_x باشد. اما از آنجایی که NO_x در دماهای بالا شدیداً وابسته به دماست، بنابراین بالاتر بودن دماهای حاصل از حل عددی که در شکل (7-الف) مشخص است، بالاتر بودن NO_x نسبت به حالت تجربی را توجیه می کند. و بنابراین احتمال دبی بالاتر هوا در ورودی هنوز به قوت خود باقی است.

6- جمع بندی و نتیجه گیری

به علت تلاقی عمود بر هم سوخت و اکسیدکننده قبل از رسیدن به سر مشعل و همچنین تعداد سوراخهای بالای سر مشعل، فرض پیش آمیختگی واکنشگرها در ورود به محفظه احتراق فرضی قابل قبول بوده است که توافق نسبتاً خوب نتایج حل عددی و آزمایشگاهی این مطلب را تایید می کند.

وقتی که در فلونت برای حل مسئله احتراق از روشهای Generalized finite rate که به معنی حل معادلات بقای گونه های شیمیایی برای هر گونه می باشد استفاده شود به منظور در نظرگیری اثرات آشفستگی بر نرخ واکنش در شعله های پیش آمیخته آشفته باید از مدل finite rate/eddy dissipation استفاده نمود که در آن هم نرخ واکنش آرنیوس و هم نرخهای واکنش اتلاف گردابه ای محاسبه می شوند و کمترین مقدار آنها به عنوان نرخ واکنشی خالص در نظر گرفته می شود. در واقع، نرخ آرنیوس به صورت یک سوئیچ عمل می کند که مانع به وجود آمدن احتراق قبل از نگهدارنده شعله می شود. وقتی که شعله روشن می شود، نرخ واکنش اتلاف گردابه ای معمولاً کوچکتر از نرخ آرنیوس است و واکنشها توسط اختلاط محدود و معین می شوند.

شکل و ساختار منطقی شعله به دست آمده از حل عددی که شامل مواردی همچون کانتورهای کسر مولی، کانتورهای دما و نرخهای واکنش می شود و همچنین بالانس مطلوب انرژی، حل عددی صحیح را تایید می کنند (Verification) و توافق نسبتاً خوب میان نتایج تجربی و حل عددی موجب اعتبار بخشی به نتایج حل عددی می شود (Validation).

عدم در نظرگیری تشعشع در حل عددی منجر به بسیار بالاتر از حد پیش بینی نمودن دما و در پی آن مقادیر NO_x به علت وابستگی شدید آن به دما می شود. به علت اینکه انتقال حرارت تابشی در فرایندهای دما بالایی همچون احتراق نقش عمده ای در انتقال حرارت به دیواره ها و کاهش دمای درون محفظه احتراق ایفا می کند.

دماهای حاصل از حل عددی کامل (با در نظرگیری تشعشع)، بیش از مقادیر تجربی به دست آمده است. در کنار خطای اندازه گیری می توان به دلایل دیگری اشاره نمود. در دمای شعله آدیاباتیک حاصل از سوختن هیدروکربن ها (حدود 2000 کلوین)، مقادیر محسوسی از CO, H_2 در تعادل با H_2O, CO_2 وجود دارند که موجب کاهش گرمای واکنش و دمای شعله

آدیباتیک می شود. بنابراین فرض تک مرحله ای بودن واکنش می تواند منجر به پیش بینی دماهای کمتر از مقدار واقعی شود. از طرفی مشاهده شد که مقادیر پیش بینی شده کسر مولی O_2 کمتر از مقادیر تجربی است. این اتفاق می تواند به علت عدم اندازه گیری دقیق دبی هوای ورودی باشد، بطوریکه دبی واقعی هوای ورودی می تواند بالاتر از مقادیر اندازه گیری شده باشد. این احتمال با دماهای تجربی مشاهده شده که کمتر از نتایج حل عددی است نیز سازگار است زیرا دماهای بالای شعله در نواحی نزدیک به حالت استوکیومتری رخ می دهد و درصدهای هوای اضافی بالاتر موجب کاهش دمای شعله می شود. بالا بودن مقادیر NO_x در حل عددی نسبت به نتایج تجربی را می توان به دماهای بالاتر پیش بینی شده در حل عددی نسبت داد.

مراجع

- 1- Charles, E. Baukal, Jr. Vladimir Y. Gershtein, Xianming Li, Computational Fluid Dynamics In Industrial Combustion; Boca Raton, CRC press, 2000.
- 2- J. Warnatz, U. Mass, R. W. Dibble. COMBUSTION: Physical and Chemical Fundamentals, Modeling and Simulation, Experiments, Pollutant formation.
- 3- R. Vuthaluru, H. B. Vuthaluru, Modelling of a wall fired furnace for different operating conditions using FLUENT, Fuel Processing Technology. 87(2006)633-639
- 4- H. C. Hottel, A. F. Sarofim, Radiation Transfer, McGraw-Hill, New York, 1967.
- 5- B. F. Magnussen and B. H. Hjertager. On mathematical models of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion. In 16th Symp on combustion. The Combustion Institute, 1976
- 6- FLUENT, FLUENT 6.2 Users Guide, 2005, Lebanon, USA