

شبیه‌سازی عددی میدان جریان چرخشی - احتراقی درون محفظه‌ی احتراق

محمد مهدی علیشاهی (استاد)
مسعود خواجه (کارشناس ارشد)
دانشکده‌ی فنی، بخش مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز

در این تحقیق با استفاده از یک برنامه‌ی رایانه‌ی، میدان جریان و احتراق ناشی از مخلوط سوخت و هوا که سرعت چرخشی دارند از طریق حل معادلات جریان، انرژی و اجزاء محاسبه شده‌اند. برای مدل‌سازی تنش‌های آشفته از فرضیه‌ی بوزینسک توسعه داده شده در جریان چرخشی استفاده شده است. جریان مغشوش توسط مدل $k - \epsilon$ مدل‌سازی شده و احتراق توسط دو مدل معروف آرنیوس دومولکولی^۲ و شکست گردابه^۳ (EBU) شبیه‌سازی شده است. هر دو نرخ واکنش به دست آمده از این دو مدل با یکدیگر مقایسه می‌شوند و کوچک‌ترین آنها - از نظر قدر مطلق - به عنوان نرخ کنترل مؤثر در محاسبات استفاده می‌شود. روش عددی به کار رفته در این تحقیق حجم محدود است. نتایج حاصله از شبیه‌سازی عددی اتاق احتراق با نتایج تجربی موجود برای توزیع سرعت و توزیع درجه حرارت مقایسه شده است. این مقایسه نشانگر تطبیق قابل قبولی بین نتایج عددی و تجربی است. در این تحقیق با متغیر قرار دادن خواص سیال نتایج بهتری به دست آمد. نتایج نشان می‌دهند که وجود دو عامل چرخش و احتراق، هر دو، باعث کوتاه‌تر شدن ناحیه‌ی بازگشتی جریان می‌شوند. نتایج به دست آمده از مدل $k - \epsilon$ استاندارد نیز طول ناحیه‌ی بازگشتی کوتاه‌تری را، نسبت به آنچه از مدل $k - \epsilon$ به دست می‌آید، پیش‌بینی می‌کند.

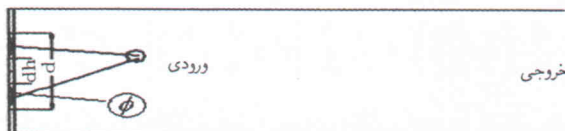
مقدمه

در گذشته برای مطالعه‌ی احتراق معمولاً از نتایج تجربی استفاده می‌شده است. اما با توجه به زمان‌بری و هزینه‌ی بالای آزمایشات تجربی، طراحان همواره به استفاده‌ی وسیع‌تر از روش‌های محاسباتی و عددی تمایل دارند، چرا که با استفاده از این روش‌ها به راحتی می‌توانسته‌اند پارامترهای گوناگون طراحی از قبیل: هندسه، دبی، نوع سوخت و ... را تغییر دهند. آمون پروینسکی با استفاده از حل تحلیلی معادلات لایه‌ی مرزی، تأثیر عدد چرخش را بر طول شعله پیدا کرد.^[۱] همچنین دیوید ج. لایلی با استفاده از یک روش عددی بر پایه‌ی حل اختلاف محدود و مدل PML^۴ طول شعله‌ی جریان چرخشی آشفته را پیش‌بینی کرده است.^[۲] این محقق در تحقیق دیگری از مدل آشفته‌گی دو معادله‌ی $k - \epsilon$ به همراه یک مدل ساده‌ی احتراقی برای محاسبه‌ی سرعت و فشار جریان‌های چرخشی سیستم احتراقی کمک گرفت.^[۳] معمولاً برای مدل‌سازی احتراق از دو مدل رایج نرخ واکنشی مدل آرنیوس و مدل EBU استفاده می‌شود.^[۴،۵] از مطالعات تجربی چنین برآورد می‌شود که چرخش، تأثیر بسیار زیادی بر میدان جریان دارد. معمولاً از جریان چرخشی، به علت کنترل بیشتر پایداری، طول و شکل شعله، در طراحی محفظه‌های احتراق کوره‌های صنعتی استفاده می‌شود.^[۶-۷] کوتاه‌تر بودن طول شعله سبب کوتاه‌تر شدن طول محفظه‌ی احتراق می‌شود. مقدار چرخش را می‌توان به وسیله‌ی عدد بی بعد چرخش کنترل کرد. عدد چرخش از تقسیم شار محوری اندازه‌ی حرکت زاویه‌ی شار اندازه

حرکت محوری به دست می‌آید.^[۶] این مقدار را نیز می‌توان بر حسب هندسه‌ی ورودی جریان شکل ۱ و از رابطه‌ی زیر به دست آورد.^[۸]

$$S = \frac{2}{3} \left[\frac{1 - (d_h/d)^2}{1 - (d_h/d)^4} \right] \tan \phi \approx \frac{2}{3} \tan \phi \quad (1)$$

معمولاً از جریان آشفته برای سوختن بهتر و پایداری شعله استفاده می‌شود.^[۷،۵،۴] در این تحقیق سعی می‌شود یک محفظه‌ی احتراق مدل شود، به گونه‌ی که بتوان علاوه بر کسب اطمینان از صحت نرم افزار حل معادلات، تأثیر پارامترهای گوناگون از قبیل خصوصیات جریان (چرخش‌های متفاوت)، خواص فیزیکی سیال (ظرفیت گرمایی ویژه و ...) و اثر تغییر آنها بر میدان جریان و توزیع درجه حرارت را نیز به دست آورد.^[۹] برای پیش‌بینی نرخ واکنش در جریان آرام، معمولاً مدل واکنشی آرنیوس استفاده می‌شود.^[۲،۷،۵] ولی با توجه به آشفته بودن جریان واقعی درون اتاق احتراق لازم است از مدل واکنشی مناسبی که بر پایه‌ی مشخصه‌های آشفته‌گی استوار باشد استفاده شود. مدل واکنشی استهلاك گردابه^۵ دارای این خصوصیات است.^[۲،۷،۵]



شکل ۱. مدل محاسبه‌ی چرخش

معادلات حاکم

با توجه به این‌که مدل‌های استفاده شده در این تحقیق دوبعدی متقارن محوری به همراه چرخش‌اند، معادلات بقائی مورد استفاده بایستی در دستگاه مختصات استوانه‌یی نوشته شوند.

معادله‌ی بقاء جرم

معادله‌ی بقاء جرم (پیوستگی) در مختصات استوانه‌یی برای حالت دوبعدی متقارن محوری چنین است:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial r}(\rho v) + \frac{\rho v}{r} = 0 \quad (2)$$

معادله‌ی بقاء اندازه حرکت

معادله‌ی بقاء اندازه حرکت در دستگاه مختصات استوانه‌یی و در دو جهت محوری و شعاعی طبق رابطه‌ی ۳ و ۴ هستند. معادله‌ی اندازه حرکت در جهت محوری، x :

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x}(r \rho u u) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v u) = \\ - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} \left[r \mu \left(2 \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \vec{V}) \right) \right] \\ + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \mu \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] \end{aligned} \quad (3)$$

معادله‌ی اندازه‌ی حرکت در جهت شعاعی، r :

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x}(r \rho u v) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v v) = - \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{r} \\ \frac{\partial}{\partial x} \left[r \mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial r} \right) \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \mu \left(2 \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{2}{3} \right. \right. \\ \left. \left. (\nabla \cdot \vec{V}) \right) \right] - 2 \mu \frac{v}{r^2} + \frac{2}{3} \frac{\mu}{r} (\nabla \cdot \vec{V}) + \rho \frac{w^2}{r} \end{aligned} \quad (4)$$

در معادله‌ی فوق، $\nabla \cdot \vec{V}$ به قرار زیر است:

$$\nabla \cdot \vec{V} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{v}{r} \quad (5)$$

با توجه به اینکه مدل مورد استفاده در این تحقیق چرخش نیز دارد، معادله اندازه حرکت باید در جهت مماسی (محیطی) حل شود. معادله‌ی بقاء اندازه حرکت مماسی برای جریان‌های چرخشی دوبعدی چنین است:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho w) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x}(r \rho u w) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v w) = \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} \left(r \mu \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[r^2 \mu \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{w}{r} \right) \right] - \frac{\rho v w}{r} \end{aligned} \quad (6)$$

دقت شود که در معادلات فوق فرضیه‌ی متقارن محوری جریان یعنی صفر بودن تغییرات در جهت θ اعمال شده است.

معادله‌ی بقاء انرژی

انتالپی استاتیک، h ، طبق رابطه‌ی ۷ تعریف شده است:

$$h = \sum_{i'} m_{i'} h_{i'} \quad (7)$$

که در آن $m_{i'}$ جرم جزء i' و $h_{i'}$ چنین تعریف می‌شود:

$$h_{i'} = \int_{T_{ref}}^T c_{p,i'} dT \quad (8)$$

T_{ref} درجه حرارت مرجع، $C_{p,i'}$ گرمای ویژه‌ی جزء i' در فشار ثابت است. معادله‌ی انرژی بر حسب h چنین است:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i h) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) \\ - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\sum_{j'} h_{j'} J_{j'} \right) + \frac{\partial p}{\partial t} + u_i \frac{\partial p}{\partial x_i} + \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + S_h \end{aligned} \quad (7-1)$$

$J_{j'}$ شار نفوذی جزء j' و S_h ترم چشمه معادله انتالپی، شامل اثرات واکنش شیمیایی، تشعشع و ... است. τ_{ij} تانسور تنش برشی در رابطه‌ی ۸-۱ تعریف شده است:

$$\tau_{ij} = \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \delta_{ij} \quad (8-1)$$

برای حالتی که تنش‌های ناشی از لزجت، τ_{ij} ، زیاد باشند، ترم حرارتی لزجت نیز، $\tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$ ، در معادله‌ی ۷-۱ بایستی در نظر گرفته شود.

مدل آشفتگی

جریان‌های واکنشی آشفته در بسیاری از طرح‌ها و کاربردهای صنعتی به‌خاطر کنترل طول و پایداری شعله استفاده می‌شود. معمولاً این جریان‌ها به‌وسیله‌ی مقدار انحناء خطوط جریان و ساختار گردابه مشخص می‌شوند. به‌عنوان مثال، جریان‌های چرخشی آشفته غیرمتجانس و ناهمگون‌اند. بنابراین بایستی مدل آشفته‌ی دو معادله‌یی $k-\epsilon$ استاندارد را برای این نوع جریان‌ها بهبود بخشید. برای این منظور از مدل آشفتگی دو معادله‌یی $k-\epsilon$ RNG که جریان‌های چرخشی و نیز جریان‌های با انحناء زیاد خطوط جریان را بهتر از مدل آشفته $k-\epsilon$ استاندارد مدل می‌کند، استفاده شده است. تأثیر آشفتگی توسط «تنش‌های رینولدز»، $\rho u_i' u_j'$ ، بر اساس فرضیه‌ی لزجت مؤثر بوزینسک محاسبه می‌شود. [۹-۱۲]

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

در حالی‌که k انرژی جنبشی و μ_t لزجت آشفتگی است:

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

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (11)$$

ν_t لزجت آشفته و مقدار آن $(\nu_{eff} - \nu_{mol})$ است. α معکوس عدد پرانتل برای انتقال آشفته است که از طریق معادله ۱۹ به دست می آید:

$$\frac{\left| \frac{\alpha - 1,3929}{\alpha_0 - 1,3929} \right|^{0,6221}}{\left| \frac{\alpha + 2,3929}{\alpha_0 + 2,3929} \right|^{0,3679}} = \frac{\nu_{mol}}{\nu_{eff}} \quad (19)$$

$\alpha_0 = 1$

نرخ کرنش R چنین است:

$$R = 2\nu_{mol} S_{ij} \frac{\partial u'_i}{\partial x_i} \frac{\partial u'_j}{\partial x_j} \quad (20)$$

این ترمها در مدل $k - \epsilon$ RNG به شکل معادله ۲۱ خواهند بود:

$$R = \frac{C_\mu \eta^\tau (1 - \eta/\eta_0) \epsilon^\tau \epsilon^\tau}{1 + \beta \eta^\tau} \frac{\epsilon^\tau}{k} \quad (21)$$

$$S^\tau = 2S_{ij} S_{ij} \quad \text{و} \quad \beta = 0,12 \quad \text{و} \quad \eta_0 = 4,38$$

$$\eta = \frac{Sk}{\epsilon} \quad \text{و}$$

مدول تانسور نرخ کرنش است. تئوری $k - \epsilon$ RNG ثابتها را چنین گزارش می کند:

$$\alpha = 1/39; \quad C_{1\epsilon} = 1/42; \quad C_{2\epsilon} = 1/68$$

معادلات انتقال اجزاء شیمیایی

معادله بقاء برای اجزاء شیمیایی در حالت کلی به صورت زیر است:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho m_{i'}) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i m_{i'}) = - \frac{\partial}{\partial x_i} (J_{i',i}) + R_{i'} + S_{i'} \quad (22)$$

$m_{i'}$ نسبت جرمی جزء i' ، $R_{i'}$ نرخ جرمی تولید شده یا کم شده به وسیله واکنش شیمیایی است. معادله فوق برای $N-1$ جزء شیمیایی حل می شود (N تعداد کل اجزاء شیمیایی سیال در سیستم مورد نظر است). $J_{i',i}$ شار نفوذی جزء i' ام است که مقدار آن در جریانهای آشفته از معادله ۲۳ محاسبه می شود:

$$J_{i',i} = - \left(\rho D_{i',m} + \frac{\mu_t}{S_{ct}} \right) \frac{\partial m_{i'}}{\partial x_i} \quad (23)$$

S_{ct} عدد اشویت آشفته و برابر با $\frac{\mu_t}{\rho D_t}$ است که برابر $0,7$ در نظر گرفته می شود.

نرخ واکنش

نرخهای واکنشی که در ترم چشمه معادله انتقال اجزاء نشان داده شده به وسیله عبارت نرخ آرنیوس^[۷]، یا فرضیهی استهلاک گردابه مگنزویون

C_μ ثابت تجربی و معمولاً برابر $0,09$ در نظر گرفته می شود. مقادیر k و ϵ برای محاسبه μ_t از معادلات بقائی و به شکل زیر محاسبه می شوند.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_k - \rho \epsilon \quad (12)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right) + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} G_k - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^\tau}{k} \quad (13)$$

$$C_{1\epsilon} = 1,44; \quad C_{2\epsilon} = 1,92; \quad C_\mu = 0,09;$$

$$\sigma_k = 1; \quad \sigma_\epsilon = 1,3$$

$C_{1\epsilon}$ و $C_{2\epsilon}$ و C_μ ضرایب ثابت تجربی اند. G_k نرخ تولید انرژی جنبشی چنین است:

$$G_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (14)$$

معادلات مدل $k - \epsilon$ RNG

مانند مدل $k - \epsilon$ استاندارد، مدل $k - \epsilon$ RNG از معادلات ناوبر استوکس متوسط گیری شده رینولدز (معادلات RANS) به همراه تنشهای اغتشاش متوسط گیری شده و نیز از طریق فرضیهی لزجت مؤثر حاصل می شود: [۱۰-۱۲]

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_i u_j) = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu_{eff} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (15)$$

لزجت مؤثر مورد نیاز برای معادله اندازه حرکت از طریق شکل ديفرانسیلی معادله زیر که توسط تئوری $k - \epsilon$ RNG آماده شده حاصل می شود:

$$C_\mu = 0,0854, \nu_{eff} = \nu_{mol} \left[1 + \sqrt{\frac{C_\mu}{\nu_{mol}}} \frac{k}{\sqrt{\epsilon}} \right]^\tau \quad (16)$$

نظریه $k - \epsilon$ RNG معادلات انتقال برای k و ϵ را چنین ارائه می دهد: [۱۰-۱۲]

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \nu_t S^\tau - \epsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha \nu_t \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) \quad (17)$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + u_i \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} = C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} \nu_t S^\tau - C_{2\epsilon} \frac{\epsilon^\tau}{k} - R + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\alpha \nu_t \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right) \quad (18)$$

M_p نفوذ جرمی هر جزء محصول M_R ، p نفوذ جرمی هر جزء واکنش A ، B و R ثابت‌های تجربی و به ترتیب برابر مقادیر ۴ و ۵/۰ است. در این تحقیق به علت مغشوش بودن جریان هر دو مقدار فوق یعنی نرخ واکنشی آرنیوس و نرخ واکنشی استهلاک گردابه E. D. محاسبه می‌شود و بعد از مقایسه، کم‌ترین مقدار این دو برای محاسبه‌ی قسمتی از ترم چشمه معادله‌ی انرژی و اجزاء شیمیایی به‌کار می‌رود.

خصوصیات محفظه‌ی احتراق

برای نشان دادن صحت محاسبه‌ی نرم‌افزار، احتراق درون یک اتاق احتراق به قطر ۷۶ میلی‌متر و طول ۳۳۰ میلی‌متر (شکل ۱) محاسبه شده است، تا بتوان نتایج را با نتایج تجربی موجود مقایسه کرد. شبکه‌ی تولید شده برای اتاق احتراق در شکل ۲ نشان داده شده است.

با توجه به تقارن محوری محفظه‌ی احتراق، مدل دوبعدی متقارن محوری برای این محفظه‌ی احتراق در نظر گرفته شده است. دو شبکه‌ی ۵۲×۴۱ و ۱۵۰×۷۶ برای این محفظه تولید شد. شبکه‌ی تولید شده برای این منظور، در ورودی سوخت و نزدیکی دیوارها دارای تمرکز است. سوخت مورد استفاده در این حالت مخلوط پروپان و هوا است. برای ایجاد چرخش در جریان مخلوط پروپان و هوا از میان پره‌های ثابتی عبور می‌کنند و سپس وارد محفظه‌ی احتراق می‌شوند، و در نهایت در احتراق شرکت می‌کنند. شرایط ورودی جریان و شرایط مرزی مربوطه در ادامه آمده است:

$$u = 22 \frac{m}{s}$$

$$T = 600 K$$

$$Pressure = 1 \text{ Atmospher}$$

$$\phi = 0.15$$

$$\theta = 45^\circ \text{ Swirl Angle}$$

سرعت‌های u ، v و w بر روی دیواره صفر هستند. با توجه به اینکه احتراق دارای درجه حرارت بالایی است. تأثیر انتقال حرارت تشعشع مهم بوده و در این مثال در نظر گرفته شده است. به‌علت وجود جریان چرخشی و بازگشتی بودن جریان در ابتدای محفظه‌ی احتراق مدل اصلی مورد استفاده مدل $k - \epsilon$ RNG است.



شکل ۲. هندسه‌ی شبکه‌بندی شده اتاق احتراق.

و هجرتاگر^[۷]، تعیین می‌شوند. این نوع مدل‌ها برای گستره‌ی وسیعی از کاربردها شامل سیستم‌های واکنشی آرام و آشفته و نیز احتراق از پیش مخلوط شده یا نفوذ شعله مناسب است و به راحتی به‌کار می‌روند.

نرخ واکنش معادله‌ی اجزاء شیمیایی از رابطه‌ی ۲۴ محاسبه می‌شود:

$$R_{i'} = M_{i'} \sum_{k=1}^{N_R} R_{i',k} \quad (24)$$

$M_{i'}$ جرم مولکولی جزء i' ام و $R_{i',k}$ نرخ مولی تولید یا کاهش جزء i' ام در واکنش k ام است. در واکنش k ام، $R_{i',k}$ ، به‌وسیله‌ی معادله‌ی نرخ انرژی آرنیوس یا به‌وسیله‌ی روش استهلاک گردابه کنترل می‌شود.

نرخ آرنیوس

نرخ واکنش به شکل رابطه‌ی ۲۵ برای واکنش k ام تعریف می‌شود:

$$R_{i',k} = \Gamma (v_{i',k}'' - v_{i',k}') \left[k_{f,k} \prod_{j'=1}^N [C_{j'}]^{n_{j',k}} \right] \quad (25)$$

$C_{j'}$ تمرکز مولی جزء واکنش یا اجزاء محصولی، $n_{j',k}$ نرخ افزایش اجزاء واکنشی j' در واکنش k ، $k_{f,k}$ ثابت نرخ رو به جلو برای واکنش k ، Γ تأثیر خالص جسم سوم در نرخ واکنش است و مطابق رابطه‌ی ۲۶ است:

$$\Gamma = \sum_{j'} \gamma_{j',k} C_{j'} \quad (26)$$

$\gamma_{j',k}$ ضریب جسم سوم در جزء j' ام در واکنش k ام است. ثابت $k_{f,k}$ با استفاده از عبارت نرخ واکنشی آرنیوس، که برای جریان آرام کاربرد دارد، محاسبه می‌شود.

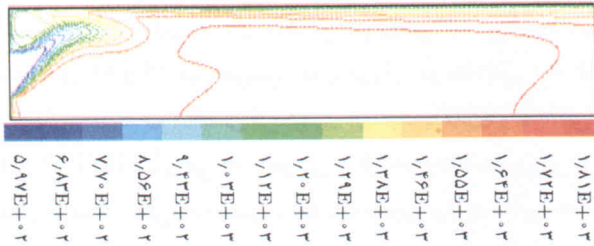
$$k_{f,k} = A_k T^{\beta_k} \exp(-E_k/RT) \quad (27)$$

مدل واکنشی استهلاک گردابه

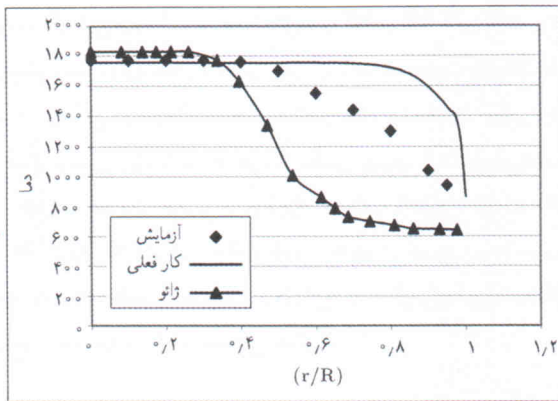
نفوذ اغتشاش بر نرخ واکنش توسط مدل مگنزیون و هجرتاگر محاسبه می‌شود.^[۲۱-۲۵] در این مدل نرخ واکنش، $R_{i',k}$ ، کم‌ترین مقدار دو معادله‌ی ۲۸ و ۲۹ را داراست:

$$R_{i',k} = v_{i',k}' M_{i'} A \rho \frac{\epsilon}{k} \frac{M_R}{v_{R,k}'} \quad (28)$$

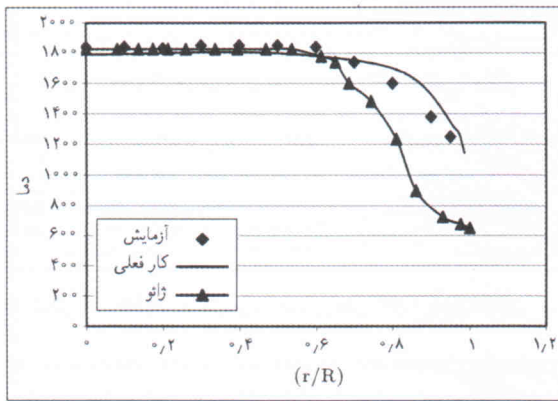
$$R_{i',k} = v_{i',k}' M_{i'} A B \rho \frac{\epsilon}{k} \frac{\sum_P M_P}{\sum_{j'} v_{j',k}'' M_{j'}} \quad (29)$$



شکل ۶. توزیع درجه حرارت برای عدد چرخش ۰٫۷۲.



شکل ۷. توزیع درجه حرارت در فاصله ۱۱۵ میلی متری از ورودی سوخت و هوا.



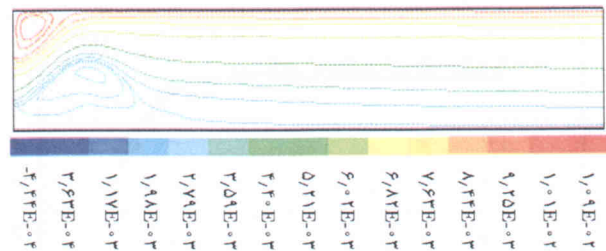
شکل ۸. توزیع درجه حرارت در فاصله ۲۱۰ میلی متری از ورودی سوخت و هوا.

همچنین مسئله برای چرخش‌های مختلف حل شد و نتایج زیر حاصل شد. چنان‌که در شکل‌های ۹ تا ۱۳ مشاهده می‌شود، چرخش‌های بالاتر منطقه‌ی بازگشتی کوچک‌تری را گزارش می‌کنند. به‌عنوان مثال طول منطقه بازگشتی برای عدد چرخش ۰٫۷۲ در حالت بدون احتراق از طول منطقه‌ی بازگشتی عدد چرخش ۰٫۵۴ کم‌تر است. این مسئله طراحان را به طراحی محفظه‌های احتراق با طول کوچک‌تر هدایت می‌کند. همچنین قابل ذکر است که در مقایسه‌ی دو مدل با عدد چرخش یکسان بدون و با احتراق، به‌ترتیب شکل‌های ۹ و ۱۲، طول منطقه‌ی بازگشتی مدل همراه با احتراق کوتاه‌تر است. اثر تغییر مدل

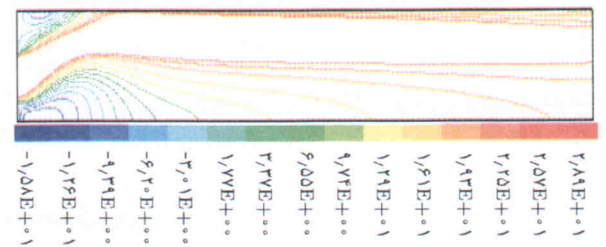
نتایج

خطوط جریان در شکل ۳، و خطوط سرعت محوری ثابت (u) و خطوط سرعت چرخشی ثابت (w) به‌ترتیب در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است. توزیع درجه حرارت و نیز مقایسه‌ی آن برای دو مقطع مختلف با نتایج تجربی و اندازه‌گیری شده [۵] به ترتیب در شکل‌های ۶، ۷ و ۸ نشان داده شده است. چنان‌که در شکل‌های ۷ و ۸ مشاهده می‌شود، نتایج حاصل از نرم‌افزار با نتایج آزمایشگاهی و حل ژائو [۵]، برای توزیع درجه حرارت در دو فاصله‌ی ۱۱۵ و ۲۱۰ میلی متری مقایسه شده است. تفاوت زیاد درجه حرارت در ابتدای اتاق احتراق ممکن است به علت تأثیر چرخش و نوسانات شعله باشد. این نتایج نسبت به حل ژائو، در حالت کلی تطبیق نسبتاً بهتری را نشان می‌دهد. در این مسئله بر روی تغییر پارامترهای شبکه، جریان و خواص سیال مطالعاتی انجام گرفت. نتایج حاصل از این مطالعه به قرار زیر است:

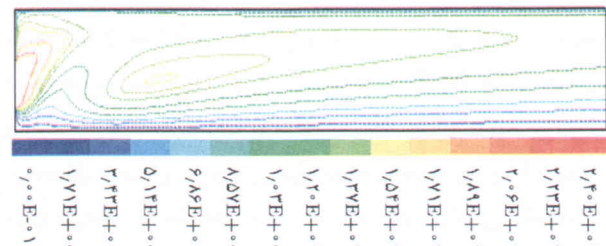
این مدل برای دو شبکه‌ی 52×41 و 150×76 محاسبه شد که با افزایش تعداد شبکه از 150×76 به بالاتر تغییر چندانی در نتایج حاصل نشد. لذا شبکه‌ی 150×76 برای مطالعات بعدی در نظر گرفته شد.



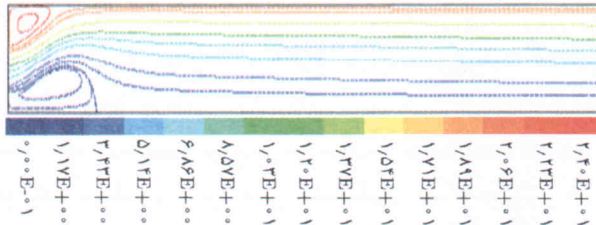
شکل ۳. خطوط جریان برای عدد چرخش ۰٫۷۲.



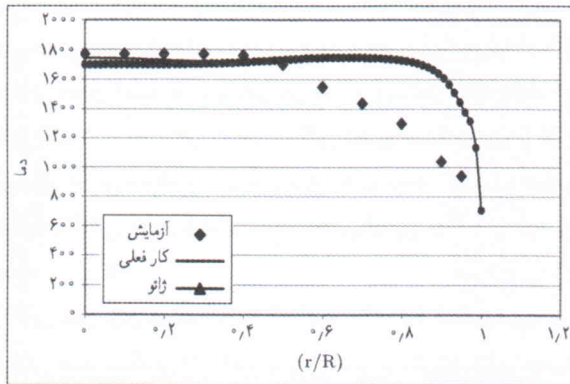
شکل ۴. خطوط سرعت محوری u ثابت برای عدد چرخش ۰٫۷۲.



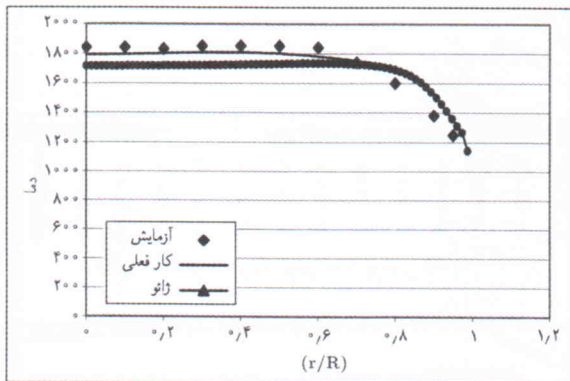
شکل ۵. خطوط سرعت چرخشی w ثابت برای عدد چرخش ۰٫۷۲.



شکل ۱۴. خطوط جریان برای عدد چرخش 0.72° همراه با احتراق مدل $k - \epsilon$ استاندارد.



شکل ۱۵. توزیع درجه حرارت در فاصله ۱۱۵ میلی متری از ورودی سوخت و هوا.



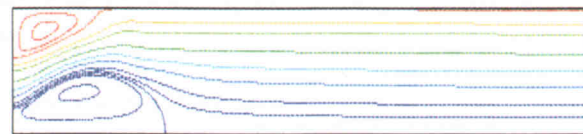
شکل ۱۶. توزیع درجه حرارت در فاصله ۲۱۰ میلی متری از ورودی سوخت و هوا.

نتیجه گیری

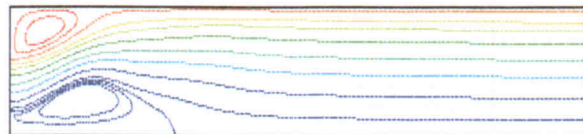
در این تحقیق جریان متقارن محوری همراه با چرخش در یک اتاق احتراق با دو مدل احتراقی به دست آمد. نشان داده شد که خصوصیات مختلف سیال مثلاً ظرفیت گرمایی ویژه بر روی میدان جریان و توزیع درجه حرارت تأثیر زیادی دارند. مدل $k - \epsilon$ RNG طول منطقه‌ی بازگشتی بزرگ‌تری را نسبت به مدل $k - \epsilon$ استاندارد نتیجه می‌دهد. اثر احتراق بر میدان جریان نیز طول منطقه‌ی بازگشتی کوچک‌تری را نشان می‌دهد. چرخش‌های بیشتر طول منطقه‌ی بازگشتی کوتاه‌تری را نشان می‌دهند.

آشفتنگی بر روی طول ناحیه‌ی بازگشتی نیز بررسی شد. چنان که در شکل‌های ۱۲ و ۱۴ دیده می‌شود، مدل فیزیکی دو معادله‌ی $k - \epsilon$ استاندارد طول ناحیه بازگشتی کوچک‌تری را نسبت به مدل دو معادله‌ی $k - \epsilon$ RNG نشان می‌دهد. خواص سیال خصوصیات فیزیکی از قبیل ظرفیت گرمایی ویژه، ضریب هدایت حرارتی و لزجت تغییر داده شده و نتایج زیر به دست آمده است:

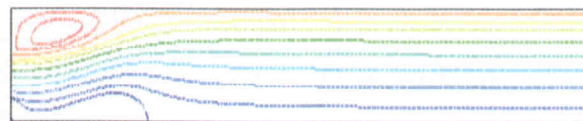
در مسئله‌ی احتراق، مهم‌ترین پارامتر از پارامترهای فیزیکی سیال، ظرفیت گرمایی ویژه است. در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ تأثیر ثابت بودن ظرفیت گرمایی ویژه سیال یا متغیر بودن آن با درجه حرارت برای تک‌تک اجزاء شیمیایی در دو مقطع مختلف نشان داده شده است. متغیر بودن ظرفیت گرمایی ویژه با درجه حرارت تطبیق بهتری را نشان می‌دهد. ضریب هدایت حرارتی برای اجزاء مختلف با درجه حرارت متغیر در نظر گرفته شد. در این حالت تغییر زیادی در توزیع درجه حرارت ظاهر نشد. در ادامه با متغیر قرار دادن لزجت سیال برای اجزاء مختلف توزیع درجه حرارت تغییر چندانی نداشت.



شکل ۹. خطوط جریان برای عدد چرخش 0.72° بدون احتراق.



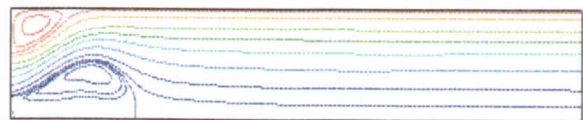
شکل ۱۰. خطوط جریان برای عدد چرخش 0.54° بدون احتراق.



شکل ۱۱. خطوط جریان برای عدد چرخش 0.36° بدون احتراق.



شکل ۱۲. خطوط جریان برای عدد چرخش 0.72° با احتراق $k - \epsilon$ RNG.



شکل ۱۳. خطوط جریان برای عدد چرخش 0.54° با احتراق.

پانوشت

1. renormalization group
2. bi-molecular arrhenius relation
3. Eddy Break Up
4. prandtl mixing length
5. eddy dissipation
6. eddy

منابع

1. Chervinsky, A. "Turbulent swirling Jet diffusion flame", *AIAA Journal*, **7** (10) (Oct. 1969).
2. Lilley, David. G. "Turbulent swirling flame prediction", *AIAA Journal*, **12** (2) (Feb. 1974).
3. Lilley, David. G. "Primitive pressure-velocity cod for the computation of strongly swirling flows", *AIAA Journal*, **14** (6) (June 1976).
4. Visser, J.A. and Mathews, E.H. "Numerical modelling of combustion", *ICAS Proceedings 1990*, **1** (1990).
5. Zhao, J.X. "Numerical modelling of confined swirler stabilised premixed flames", *ICAS Proceedings 1990*, **1** (1990).
6. Osgerby, I.T. "Literature review of turbine combustor modeling and emissions", *AIAA Journal*, **12** (6), June (1974).
7. study of turbulent reacting flow Bai, Xue-Song, "Sensitivity modeling in gas turbine combustors", *AIAA Journal*, **33** (10) (Oct. 1995).
8. Lilley, David G. "Swirl flows in combustion: a review", *AIAA Journal*, **15** (8) (Aug. 1977).
9. Khajeh, M. "Numarical simulation of flow field with combustion in a gas turbine combustor", Ms. Thesis, Shiraz University (2001).
10. Ree, Gwang Hoon and Sung, Hyung Jin "A nonlinear low- reynolds-number $k - \epsilon$ model for turbulent separated and reattaching flows-II. thermal field computations", *Int. Jou. Heat Mass Transfer*, **39** (16) (1996).
11. verview of turbulence modeling Celik, B., Ismail, "Workbook' for industrial applications", West Virginia University, (Dec. 1999).
12. Burmeister, Louise C., *Convective Heat Transfer*, John Wiley and Sons, Inc, Second Edition, (1993).

