

تجزیه و تحلیل تولید آنتروپی پدیده احتراق در کوره‌های متان - هوا

جواد ابوالفضلی اصفهانی¹، سید محمد جوادی²

دانشکده مهندسی - دانشگاه فردوسی مشهد - 1111-91775
Jaesfahani@gmail.com

چکیده

در این مطالعه ابتدا به بررسی اثر کسر جرمی اکسیژن موجود در هوای ورودی به محفظه احتراق بر میزان تولید آنتروپی ناشی از اصطکاک و انتقال حرارت، نرخ انجام واکنش، توزیع کسر جرمی گونه‌ها و توزیع دما داخل محفظه پرداخته شده است. سپس با بررسی اثر پخش گونه‌ها و نرخ انجام واکنش شیمیایی معادلات تولید آنتروپی بوسیله این دو عامل در جریان آشفته مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین تولید آنتروپی ناشی از اصطکاک، انتقال حرارت، پخش گونه‌ها محاسبه و برای مقادیر هوای اضافه مختلف با هم مقایسه می‌شود. نتایج نشان می‌دهد تولید آنتروپی ناشی از اصطکاک و پخش گونه‌ها در مقابل سهم ناشی از انتقال حرارت و نرخ انجام واکنش شیمیایی قابل صرف نظر می‌باشد. همچنین نرخ انجام واکنش شیمیایی بیشترین سهم در تولید آنتروپی در جریان آشفته را دارد. نتایج فوق با نتایج حاصل از تحلیل انرژی شعله‌های پخشی در جریان آرام و آشفته شده و توافق خوبی نشان می‌دهند.

واژه‌های کلیدی: احتراق، تولید آنتروپی، نرخ واکنش، پخش گونه‌ها

1- مقدمه

احتراق قدیمی‌ترین فناوری بشر است که در حال حاضر حدود 90٪ پشتیبانی انرژی سراسر جهان ما به وسیله احتراق انجام می‌شود. در گذشته پژوهش احتراق بیشتر از جهت ترمودینامیک که شامل آزاد شدن حرارت کلی به وسیله واکنش شیمیایی بود مورد مطالعه قرار می‌گرفت. این آزاد شدن حرارت، اغلب با فرض واکنش بینهایت سریع بیان می‌شد. با پیشرفت کاربردهای احتراق، مطالعه رفتار گذرای آن مانند افروزش و فرونشانی یا مطالعه آلاینده‌های حاصل از احتراق و روشهای کاهش آن در خلال احتراق سوخته‌های فسیلی احساس نیاز گردید [1]. امروزه مطالعه بر روی عوامل موثر بر میزان تولید آلاینده‌های احتراق و روشهای کاهش آن به عنوان عوامل مخرب محیط زیست از اهمیت خاصی برخوردار است. یکی دیگر از دیدگاههای مهم در مطالعه پدیده احتراق (مخصوصاً احتراق سوخته‌های فسیلی)، دیدگاه مدیریت منابع انرژی است. شاید کمیته‌های عددی مختلفی برای تحلیل مدیریت منابع انرژی پیشنهاد شود. متغیرهایی مانند راندمان، قابلیت کاردهی، تولید آنتروپی، انرژی مفاهیمی است که برای ارزیابی و مقایسه بین روشهای مختلف تولید انرژی بکار گرفته می‌شوند. از تحلیل آنتروپی سیستمها می‌توان بعنوان موضوعی جدید در ارزیابی طرحهای صنعتی مختلف و حتی بهینه سازی تجهیزات و طرحهای صنعتی با هدف حداقل سازی تولید آنتروپی نام برد. تولید آنتروپی مفهومی وسیع است که در حیطه مسایل اجتماعی، فرهنگی، مهندسی، فیزیک و سایر علوم مورد مطالعه قرار گرفته است. در فرایندهای مهندسی می‌توان به حداقل سازی تولید آنتروپی در جریان داخل لوله‌های انتقال گاز و آب، انتقال حرارت و مخصوصاً مبدلهای حرارتی، سیستمهای ذخیره انرژی، سیستمهای گرمایش

1 دانشیار - مهندسی مکانیک

2 دانشجوی دکتری مکانیک - تبدیل انرژی

خورشیدی، خشک کن‌های محصولات غذایی و احتراق سوخته‌های مایع و گاز نام برد. از Bejan (1986) بعنوان یکی از اولین محققینی که فرایند تولید آنتروپی در پدیده‌های مختلف مهندسی را در مجموعه‌ای منظم گردآوری نمود، می‌توان نام برد. با وجود شناخت مفهوم آنتروپی و مطالعه آن از حدود یک قرن پیش، مطالعات انجام شده در زمینه احتراق می‌توان به مطالعات Stanciu و همکارانش که تولید آنتروپی بدلیل انجام واکنش شیمیایی در فرایند احتراق و پخش گونه‌ها را برای اولین بار بصورت منظم بررسی نمودند، اشاره نمود. همچنین Yapici و Kayatas اثر پارامترهای مختلف بر تولید آنتروپی ناشی از اصطکاک و انتقال حرارت در فرایند احتراق را بررسی نمودند. در این مقاله به بررسی اثر مقدار هوای اضافه و کسر اکسیژن موجود در هوا بر تولید آنتروپی ناشی از اصطکاک، انتقال حرارت و پخش گونه‌ها و نرخ انجام واکنش با استفاده از روابط ارائه شده توسط Stanciu پرداخته شده است.

2- مدل فیزیکی

هدف اصلی این مقاله تخمین نرخ تولید آنتروپی بر اثر پدیده احتراق در کوره‌های متان- هوا به کمک روشهای عددی می‌باشد. برای این هدف احتراق متان - هوا در یک کوره با تقارن محوری مورد بررسی قرار گرفته است. همانطور که شکل (1) نشان می‌دهد در کوره مورد بررسی سوخت و هوا بصورت محوری از دو لوله هم محور وارد محفظه احتراق می‌شود. جریان جرمی سوخت با در نظر گرفتن ظرفیت کوره و ارزش حرارتی سوخت محاسبه می‌شود، سپس مقدار هوای مورد نیاز با توجه به جرم سوخت ورودی، کسر جرمی اکسیژن موجود در هوا γ و میزان هوای اضافه ϕ محاسبه می‌شود. محفظه احتراق مورد مطالعه، استوانه ای به طول 0.5m و شعاع 0.05m است که سوخت از لوله‌ای روی محور استوانه به قطر 0.004m و هوا از لوله‌ای هم محور با آن به قطر خارجی 0.01m و قطر داخلی 0.006m وارد محفظه می‌شود. دیواره‌های جانبی کوره در معرض هوای محیط با چگالی $\rho_{Air} = 1.225 \text{ kg/m}^3$ و دمای 300k و ضریب جابجایی $h_{amb} = 10 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ و بقیه دیواره‌ها عایق فرض شده است [3]. خواص حرارتی گونه‌ها (μ, λ, Cp) تابع جبری درجه 4 از دما در نظر گرفته شده که در جدول (1) مقادیر آن آورده شده است. برای محاسبه مقادیر سرعت ورودی بر حسب جرم سوخت، جرم هوای ورودی و سطح مقطع ورود آنها، داریم:

$$U_f = \frac{\dot{m}_f}{A_f \cdot \rho_f} \quad (1)$$

و

$$U_{air} = \frac{\dot{m}_{air}}{A_{air} \cdot \rho_{air}} \quad (2)$$

ظرفیت حرارتی کوره نیز $\dot{Q} = 10 \text{ kw}$ در نظر گرفته شده است.

3- مدل ریاضی

جریان داخل محفظه احتراق مورد بررسی از نوع جریان آشفته همراه با تغییر غلظت گونه‌های شیمیایی ناشی از احتراق می‌باشد. معادلات حاکم بر پدیده معادلات بقای جرم، اندازه حرکت، توربولنسی، انتقال گونه‌ها و انرژی در سیستم مختصات استوانه ای با فرض تقارن محوری و پایدار نسبت به زمان می‌باشند. جهت مدلسازی عبارتهای ناشی از توربولنسی از مدل RNG k-ε و برای مدلسازی جریان احتراقی و محاسبه انتقال گونه‌ها از مدل Eddy-Dissipation استفاده شده است. معادلات انتقال گونه‌ها (به تعداد N-1 معادله که N تعداد گونه‌ها می‌باشد) عبارتند از:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i m_{i'}) = - \frac{\partial}{\partial x_i} J_{i',i} + R_{i'} \quad (3)$$

که در آن :

$$J_{i^*,i} = - \left(\rho D_{i^*,m} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \frac{\partial m_{i^*}}{\partial x_i}, \quad (4)$$

و ضریب پخش گونه ها در مخلوط بصورت زیر محاسبه می شود:

$$D_{i^*,m} = (1 - X_{i^*}) / \sum_{j^*, j^* \neq i^*} X_{j^*} / D_{i^*,j^*}, \quad (5)$$

همچنین معادله اندازه حرکت به فرم زیر در نظر گرفته شده است:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}, \quad (6)$$

که تانسور تنش عبارتست از:

$$\tau_{ij} = \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \delta_{ij} \quad (7)$$

معادله بقای انرژی در پدیده با واکنش شیمیایی (احتراق) عبارتست از:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} [u_i (\rho E + P)] = \quad (8)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_i} - \sum_{j^*} h_{j^*} J_{j^*} + u_j (\tau_{ij})_{eff} \right) + S_h \quad (9)$$

که S_h ترم چشمه ناشی از حرارت آزاد شده از واکنش شیمیایی می باشد. همچنین

$$E = h - \frac{P}{\rho} + \frac{u_i^2}{2}, \quad (10)$$

که h از تعریف گاز ایده آل بصورت زیر محاسبه می شود:

$$h = \sum_{j^*} m_{j^*} h_{j^*}, \quad (11)$$

و

$$h_{j^*} = \int_{T_{ref}}^T C_{p,j^*} dT \quad (12)$$

ضریب هدایت حرارتی موثر که ضریب هدایت حرارتی سیال و اثرات توربولنسی بر آن می باشد، با استفاده از مدل توربولنسی RNG k- ϵ بصورت زیر محاسبه می شود:

$$\lambda_{eff} = \alpha \cdot C_p \cdot \mu_{eff}, \quad (13)$$

برای محاسبه اثرات آشفتگی بر خواص جریان و محاسبه ضریب هدایت حرارتی موثر و ویسکوزیته موثر از دو معادله کمکی k و ϵ استفاده شده است:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_k - \rho \epsilon, \quad (14)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\alpha_\epsilon \mu_{eff} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right) + \frac{\epsilon}{k} (C_{1\epsilon} G_k - C_{2\epsilon} \rho \epsilon) - \chi \quad (15)$$

مقادیر ثابتهای فوق در مرجع [1] آورده شده است.

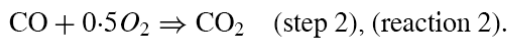
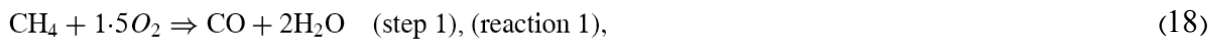
با محاسبه مقادیر k و ϵ ویسکوزیته توربولنسی و ویسکوزیته موثر از روابط زیر محاسبه می شود:

$$\mu_t = \rho C_\mu (k^2 / \epsilon) \quad (16)$$

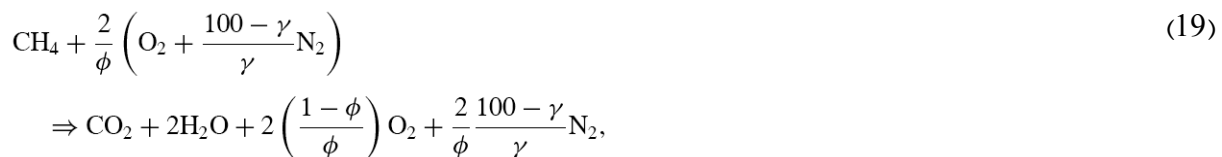
$$\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t, \quad (17)$$

1-3- احتراق متان - هوا

در این مطالعه احتراق متان - هوا با مکانیزم احتراق دو مرحله ای به شکل زیر در نظر گرفته شده است:



بر اساس این مکانیزم از اکسیداسیون متان گاز منوکسید کربن و بخار آب تشکیل می‌شود. در مرحله بعد اکسیداسیون منوکسید کربن سبب تشکیل دی اکسید کربن می‌شود. در مخلوط های رقیق و در احتراق با هوای اضافه، بدلیل اکسیداسیون کامل متان معادله احتراق بصورت زیر می‌باشد:



در این معادله ϕ نسبت مقدار هوای استکیومتریکی به مقدار هوای واقعی و γ درصد اکسیژن موجود در هوا بوده که در حالت طبیعی حدود 22٪ می‌باشد. این معادله در محدوده $0 \leq \phi \leq 1.0$ معادله حاکم بر احتراق کامل با هوای اضافه می‌باشد.

جرم سوخت ورودی (mf) بر حسب ظرفیت حرارتی سوخت (LCV)، جرم مولی (Mf) و ظرفیت حرارتی کوره (\dot{Q}) محاسبه می‌شود:

$$\dot{m}_f = \dot{Q} \cdot M_f / \text{LCV} \quad (20)$$

که LCV بر حسب آنتالپی محصولات احتراق (HP) و آنتالپی واکنش دهنده ها (HR) محاسبه می‌شود:

$$\text{LHV} = \sum H_P - \sum H_R \quad (21)$$

و

$$\text{LCV} = -\text{LHV} \quad (22)$$

2-3- مدل احتراق Eddy-Dissipation

در جریان های آشفتنه همراه با واکنشهای شیمیایی نرخ واکنش از مدل Eddy-Dissipation محاسبه و در ترم چشمه معادله انتقال گونه‌ها استفاده می‌شود. در این مطالعه نرخ واکنش از مدل Eddy-Dissipation بر پایه مدل مگنسن-هرتاگر [4] استفاده شده است. ترم چشمه گونه i در واکنش بر حسب تعداد مراحل واکنش k بصورت زیر محاسبه می‌شود:

$$R_{i^i} = M_{i^i} \sum_{k=1}^{N_R} \widehat{R}_{i^i,k} \quad (23)$$

اثر توربولنسی بر روی نرخ انجام واکنش بر مبنای مدل مگنسن-هرتاگر بصورت حداقل عبارات زیر محاسبه می‌شود:

$$R_{i^i,k} = v_{i^i,k}^1 M_{i^i} A \rho \frac{\varepsilon}{k} \frac{m_R}{v_{R,k}^1 M_R}, \quad (24)$$

$$R_{i^i,k} = v_{i^i,k}^1 M_{i^i} A B \rho \frac{\varepsilon}{k} \frac{\sum_P m_P}{\sum_{j^i}^N v_{j^i,k}^1 M_{j^i}} \quad (25)$$

که در آن $v_{i^i,k}^1$ ضریب استکیومتریکی گونه i در واکنش k می‌باشد. [4]

3-3- نرخ تولید آنتروپی

در جریان سیال، بازگشت ناپذیریها به انتقال حرارت و ویسکوزیته سیال مربوط می‌شوند. در این مجموعه، با مشخص بودن توزیع درجه حرارت و سرعت سیال نرخ تولید آنتروپی بصورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$\dot{S}_{gen}''' = (\dot{S}_{gen}''')_{heat} + (\dot{S}_{gen}''')_{fric} \quad (26)$$

که هر ترم بصورت زیر محاسبه می‌شود:

ترم ناشی از حرارت:

$$(\dot{S}_{gen}''')_{heat} = (\lambda_{eff}/T^2) \cdot [(\partial T/\partial x)^2 + (\partial T/\partial r)^2] \quad (27)$$

ترم ناشی از اصطکاک:

$$(\dot{S}_{gen}''')_{fric} = \mu_{eff}/T \cdot \Phi \quad (28)$$

که Φ از عبارت زیر محاسبه می‌شود:

$$\Phi = 2 \cdot \left[\left(\frac{\partial u_x}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_r}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{u_r}{r} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial u_x}{\partial r} + \frac{\partial u_r}{\partial x} \right)^2 \quad (29)$$

اما نتایج مطالعات بر روی شعله‌های پخشی نشان می‌دهد در پدیده احتراق علاوه بر اصطکاک و انتقال حرارت، بخشی از تولید آنتروپی بخاطر پخش گونه‌ها و بخش مهم دیگر بخاطر نرخ انجام واکنش می‌باشد [1] Stanciu. [1] نشان داد سهم تولید آنتروپی ناشی از پخش گونه‌ها از رابطه:

$$\left(\dot{S}_{gen}^{(\Omega)} \right)_D = \sum_{i=1}^N \rho D_{im} \left[\frac{R_i}{p} \frac{\partial Y_i}{\partial x_\alpha} \frac{\partial P}{\partial x_\alpha} + \frac{R_i}{Y_i} \frac{\partial Y_i}{\partial x_\alpha} \frac{\partial Y_i}{\partial x_\alpha} \right] > 0 \quad (30)$$

و سهم تولید آنتروپی ناشی از نرخ انجام واکنش از رابطه:

$$\left(\dot{S}_{gen}^{(\Omega)} \right)_{CH} = \frac{A\omega}{T} = \frac{\omega}{T} \sum_{i=1}^N (v_i' - v_i'') \mu_{M,i} > 0 \quad (31)$$

محاسبه می‌شود. ω نرخ انجام واکنش و $\mu_{M,i}$ پتانسیل شیمیایی مولی برای گونه i می‌باشد. v_i' ضریب گونه i در سمت واکنش دهنده‌ها و v_i'' ضریب همان گونه در سمت محصولات احتراق می‌باشد.

برای محاسبه نرخ تولید آنتروپی در کل محفظه احتراق با فرض یک محفظه استوانه‌ای داریم:

$$\dot{S}_{gen} = \oint_V \dot{S}_{gen}''' \partial \theta \cdot \partial r \cdot \partial x \quad (32)$$

4- مدل سازی عددی

جهت محاسبات عددی میدان جریان از نرم افزار Fluent6.0 و برای محاسبه آنتروپی از برنامه رایانه‌ای به زبان فرترن که بر اساس معادلات تولید آنتروپی نوشته شده است، استفاده گردیده است. بهترین نتایج از شبکه مستطیلی 100×400 بدست آمده است.

5- بررسی نتایج و بحث

هوای اضافی در پدیده احتراق بر توزیع دما داخل محفظه احتراق بخصوص بیشترین دمای محفظه تاثیر زیادی دارد. در شکل‌های 2 (الف-د) توزیع دما داخل محفظه احتراق نشان داده شده است. از مقایسه توزیع دما برای یک کسر اکسیژن مشخص دیده می‌شود با افزایش میزان هوای ورودی (کاهش ϕ) به محفظه احتراق، دمای ماکزیمم محفظه کاهش می‌یابد. همچنین موقعیت دمای ماکزیمم شعله به دهانه ورودی نزدیکتر می‌شود. از طرفی در میزان هوای ثابت، با افزایش کسر اکسیژن

در هوای ورودی دمای محفظه احتراق افزایش چشمگیری می‌یابد اما روند توزیع دما و موقعیت دمای ماکزیمم محفظه تغییر چشمگیری نشان نمی‌دهد.

در شکل‌های 3 (الف-د) توزیع آلاینده CO در داخل محفظه احتراق نشان داده شده است. واضح است در احتراق استکیومتریکی میزان تولید آلاینده CO بسیار زیاد بوده یا به عبارتی تمام CO تولید شده به CO₂ تبدیل نمی‌شود. در احتراق با هوای اضافه میزان آلاینده CO در خروجی تقریباً صفر است.

در شکل‌های 4 (الف-د) توزیع آنتروپی در محفظه احتراق نشان داده شده است. همانطور که از معادلات تولید آنتروپی واضح است با افزایش درجه حرارت تولید آنتروپی حرارتی و اصطکاکی شدیداً کاهش می‌یابد.

اثر کسر اکسیژن بر نرخ واکنش به عنوان یک عامل موثر تولید آنتروپی در شکل 5 نشان داده شده است. مشاهده می‌شود با افزایش کسر اکسیژن توزیع متغیر نرخ واکنش در جهت محور کوره منقبض و در جهت شعاع مقدار کمی منبسط می‌شود.

در شکل 6 سهم تولید آنتروپی در داخل محفظه کوره ناشی از اصطکاک، انتقال حرارت، پخش گونه‌ها و نرخ انجام واکنش نشان داده شده است. مشاهده می‌شود سهم تولید آنتروپی ناشی از اصطکاک و پخش گونه‌ها بسیار کم بوده و قابل صرفنظر است. با تحلیل ابعادی می‌توان به سادگی نشان داد سهم پخش گونه‌ها با کاهش ابعاد کوره به شدت افزایش خواهد یافت. از طرفی سهم تولید آنتروپی بر اثر انتقال حرارت با افزایش درصد اکسیژن هوای ورودی به دلیل افزایش دمای محفظه احتراق کاهش نسبی نشان می‌دهد.

همانطور که در شکل 6 نشان داده شده تولید آنتروپی بر اثر نرخ واکنش بیشترین سهم و پخش گونه‌ها کمترین سهم در تولید آنتروپی را دارد. تغییر هر پارامتری که بتواند نرخ واکنش را کاهش دهد می‌تواند سبب کاهش این بخش از تولید آنتروپی شود.

6- جمع‌بندی

در این مقاله میزان تولید آنتروپی در کوره‌های متان - هوا بر اثر پدیده احتراق محاسبه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود تولید آنتروپی بر اثر نرخ واکنش بیشترین سهم تولید آنتروپی نسبت به اصطکاک، انتقال حرارت و پخش گونه‌ها را شامل شده است که توسط محققین قبلی محاسبه نشده است. در نتایج حاصل با نتایج موجود از تحلیل شعله‌های پخشی تطابق خوبی نشان می‌دهد [1]. همچنین تولید آنتروپی محاسبه شده بواسطه اصطکاک و انتقال حرارت در کوره فوق با نتایج موجود توافق خوبی دارد [2].

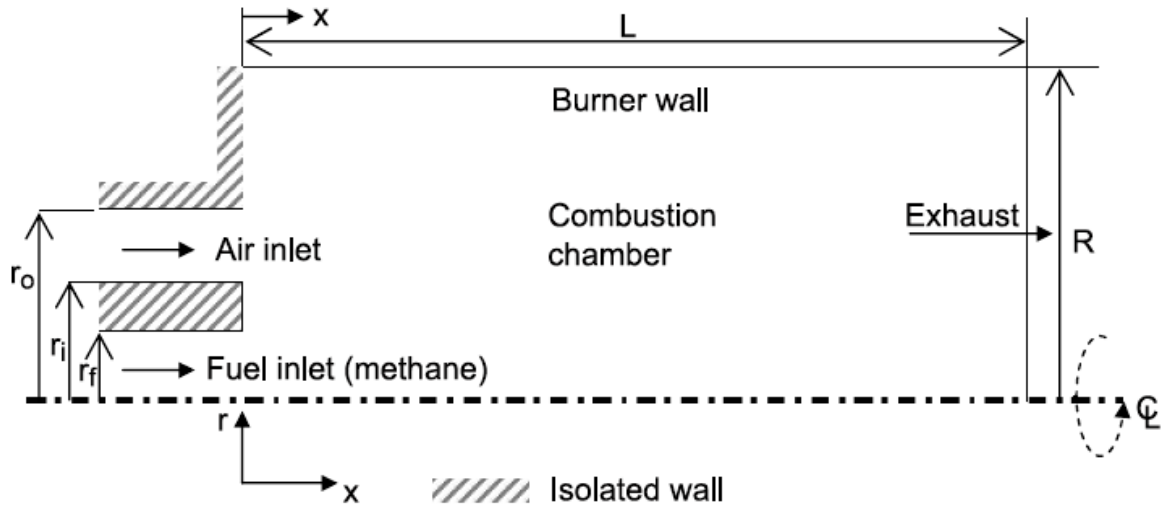
مراجع

- [1]. Stanciu D, Isvoranu D, Marinescu M, "Second Law Analysis of Diffusion Flames", Int.J. Applied Thermodynamics, Vol.4, No.1, pp.1-18, 2001 .
- [2]. Yapici H, Bas G, Kayatas N , "Numerical study on transient local entropy generation in pulsating turbulent flow through an externally heated pipe", J. Sadhana , Vol. 30, Part 5, pp. 625-648, 2005.
- [3]. Yapici H, Bas G, Kayatas N , "Numerical study of effect of oxygen fraction on local entropy generation in a methane-air burner", Sadhana Vol. 29, pp. 641-667, 2004.
- [4]. Magnussen B F, Hjertager B H, On mathematical models of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion. In 16th Int. Symposium on Combustion (Philadelphia, PA: The Combustion Institute), 1976.
- [5]. Yakhot V, Orszag S A ,Renormalization group analysis of turbulence: I. Basic theory. J. Sci.Comput. 1: 1-51, 1986.
- [6]. Datta A, " Effects of gravity on structure and entropy generation of confined laminar diffusion flames", Int. J. of Thermal Sciences, V. 44, pp 429-440, 2005.

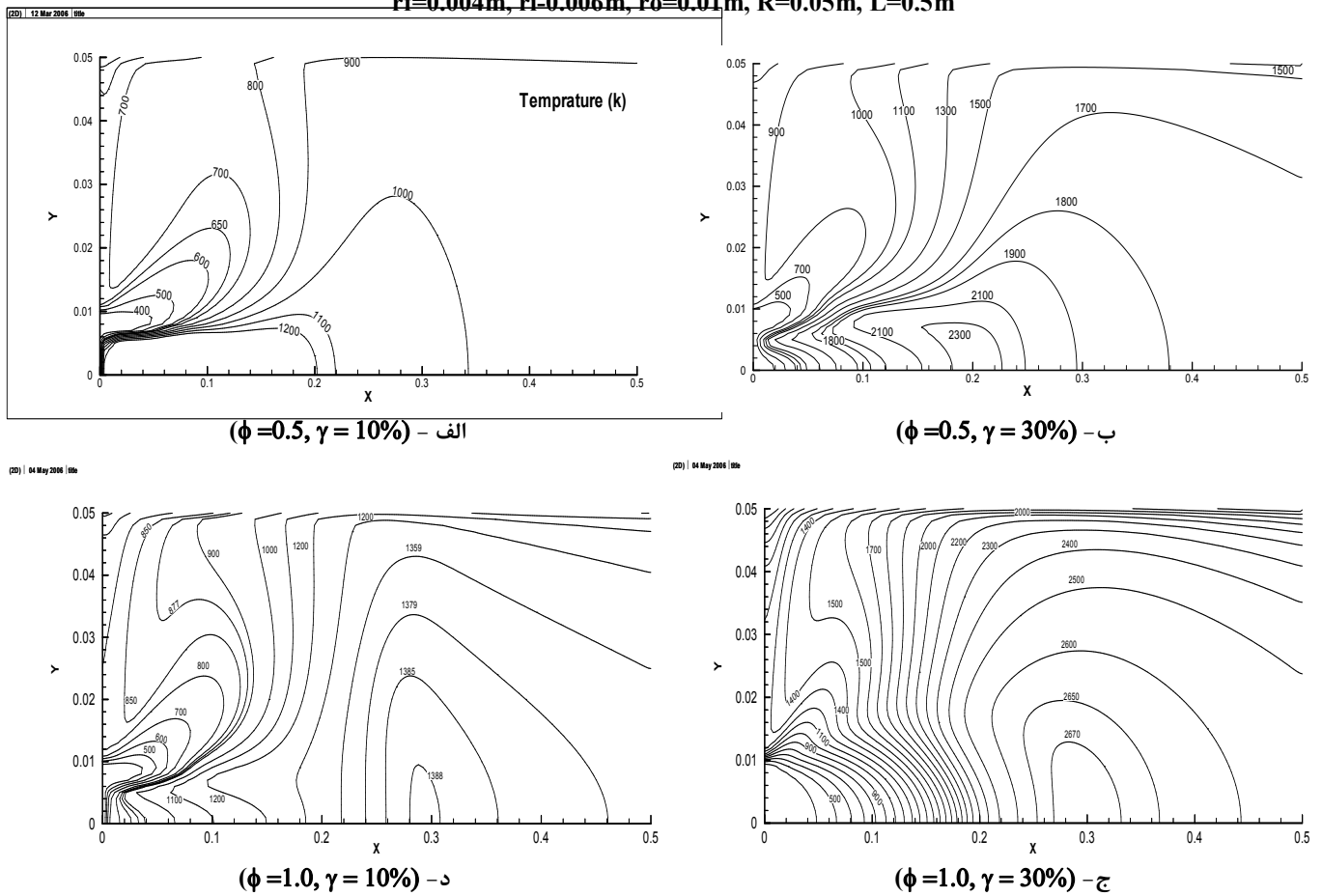
جدول 1- ضرایب توابع چند جمله‌ای درجه 4 مربوط به خواص حرارتی گونه‌ها بر حسب دما

	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	
CH ₄	C_P	$4.03585 \cdot 10^{2a}$	9.05734	$-1.44200 \cdot 10^{-2}$	$1.58052 \cdot 10^{-5}$	$-6.34305 \cdot 10^{-9}$
	λ	$8.72467 \cdot 10^{2b}$	5.30547	$-2.00829 \cdot 10^{-3}$	$3.51665 \cdot 10^{-7}$	$-2.33391 \cdot 10^{-11}$
	μ	$3.32000 \cdot 10^{-2}$	0	0	0	0
O ₂	C_P	$1.08700 \cdot 10^{-5}$	0	0	0	0
	C_P	$8.34827 \cdot 10^2$	$2.92958 \cdot 10^{-1}$	$-1.49564 \cdot 10^{-4}$	$3.41389 \cdot 10^{-7}$	$-2.27836 \cdot 10^{-10}$
	λ	$9.60752 \cdot 10^2$	$1.59413 \cdot 10^{-1}$	$-3.27089 \cdot 10^{-5}$	$4.61277 \cdot 10^{-9}$	$-2.95283 \cdot 10^{-13}$
CO ₂	C_P	$3.92175 \cdot 10^{-3}$	$8.08121 \cdot 10^{-5}$	$-1.35409 \cdot 10^{-8}$	$2.22044 \cdot 10^{-12}$	$-1.41614 \cdot 10^{-16}$
	μ	$7.87943 \cdot 10^{-6}$	$4.92495 \cdot 10^{-8}$	$-9.85155 \cdot 10^{-12}$	$1.52741 \cdot 10^{-15}$	$-9.42567 \cdot 10^{-20}$
	C_P	$4.29929 \cdot 10^2$	1.87447	$-1.96649 \cdot 10^{-3}$	$1.29725 \cdot 10^{-6}$	$-3.99996 \cdot 10^{-10}$
CO	λ	$8.41377 \cdot 10^2$	$5.93239 \cdot 10^{-1}$	$-2.41517 \cdot 10^{-4}$	$4.52273 \cdot 10^{-8}$	$-3.15313 \cdot 10^{-12}$
	μ	$1.45000 \cdot 10^{-2}$	0	0	0	0
	μ	$1.37000 \cdot 10^{-5}$	0	0	0	0
H ₂ O	C_P	$1.10160 \cdot 10^3$	$-4.80700 \cdot 10^{-1}$	$1.09600 \cdot 10^{-3}$	$-6.03400 \cdot 10^{-7}$	$7.12600 \cdot 10^{-11}$
	λ	$2.50000 \cdot 10^{-2}$	0	0	0	0
	μ	$1.75000 \cdot 10^{-5}$	0	0	0	0
N ₂	C_P	$1.56308 \cdot 10^3$	1.60376	$-2.93278 \cdot 10^{-3}$	$3.21610 \cdot 10^{-6}$	$-1.15683 \cdot 10^{-9}$
	λ	$1.23323 \cdot 10^3$	1.41052	$-4.02914 \cdot 10^{-4}$	$5.54277 \cdot 10^{-8}$	$-2.94982 \cdot 10^{-12}$
	μ	$-7.96800 \cdot 10^{-3}$	$6.88133 \cdot 10^{-5}$	$4.49046 \cdot 10^{-8}$	$-9.09994 \cdot 10^{-12}$	$6.17331 \cdot 10^{-16}$
N ₂	μ	$-4.41894 \cdot 10^{-6}$	$4.68764 \cdot 10^{-8}$	$-5.38943 \cdot 10^{-12}$	$3.20286 \cdot 10^{-16}$	$4.91918 \cdot 10^{-22}$
	C_P	$9.79043 \cdot 10^2$	$4.17964 \cdot 10^{-1}$	$-1.17628 \cdot 10^{-3}$	$1.67439 \cdot 10^{-6}$	$-7.25630 \cdot 10^{-10}$
	λ	$8.68623 \cdot 10^2$	$4.41630 \cdot 10^{-1}$	$-1.68723 \cdot 10^{-4}$	$2.99679 \cdot 10^{-8}$	$-2.00439 \cdot 10^{-12}$
N ₂	μ	$4.73711 \cdot 10^{-3}$	$7.27194 \cdot 10^{-5}$	$-1.12202 \cdot 10^{-8}$	$1.45490 \cdot 10^{-12}$	$-7.87173 \cdot 10^{-17}$
	μ	$7.47331 \cdot 10^{-6}$	$4.08369 \cdot 10^{-8}$	$-8.24463 \cdot 10^{-12}$	$1.30563 \cdot 10^{-15}$	$-8.17794 \cdot 10^{-20}$

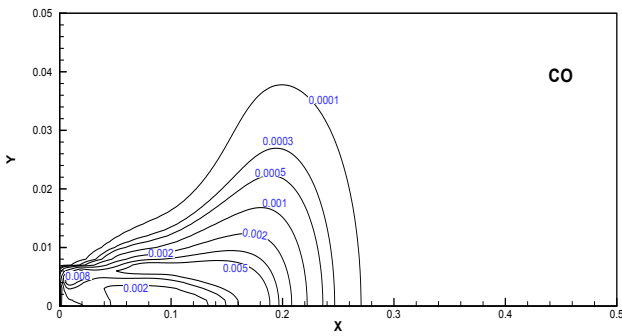
*Polynomial functions are defined as $\psi(T) = a_0 + a_1T^1 + a_2T^2 + a_3T^3 + a_4T^4$, ^avalid for temperature interval 300–1000 K; ^bvalid for temperature interval 1000–5000 K



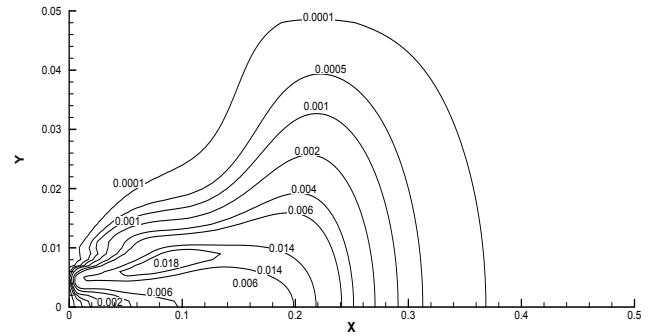
شکل 1- هندسه و شرایط مرزی کوره مورد بررسی با ظرفیت کوره 10kw
 $r_f=0.004m, r_i=0.006m, r_o=0.01m, R=0.05m, L=0.5m$



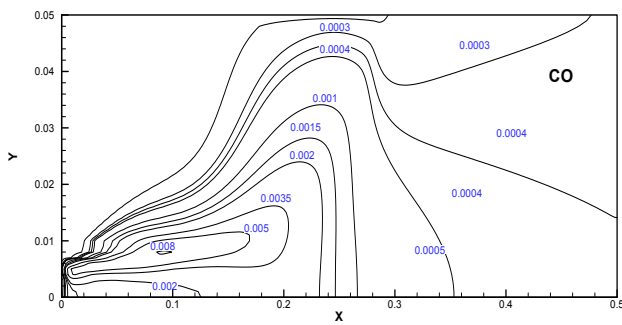
شکل 2- توزیع دما در شرایط مختلف هوای ورودی
 $(\phi=0.5, 1.0), (\gamma=10\%, 30\%)$



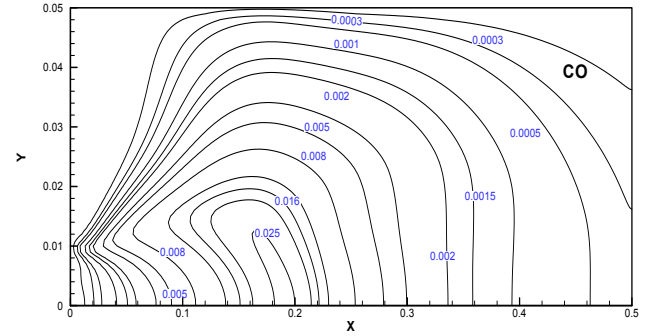
الف - $(\phi=0.5, \gamma=10\%)$



ب - $(\phi=0.5, \gamma=30\%)$

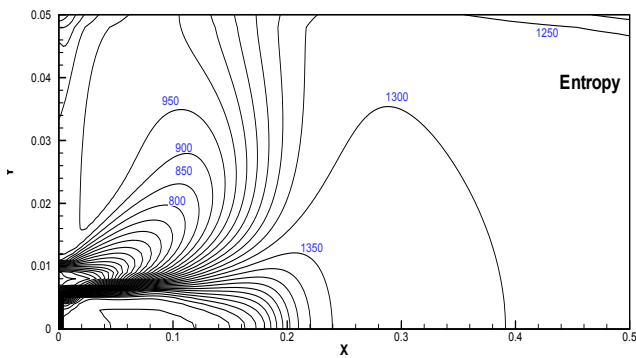


د - $(\phi=1.0, \gamma=10\%)$

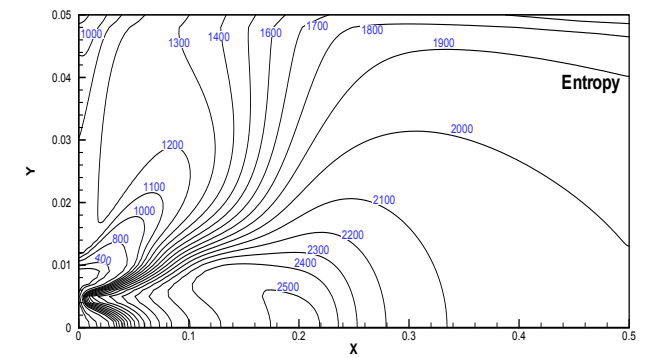


ج - $(\phi=1.0, \gamma=30\%)$

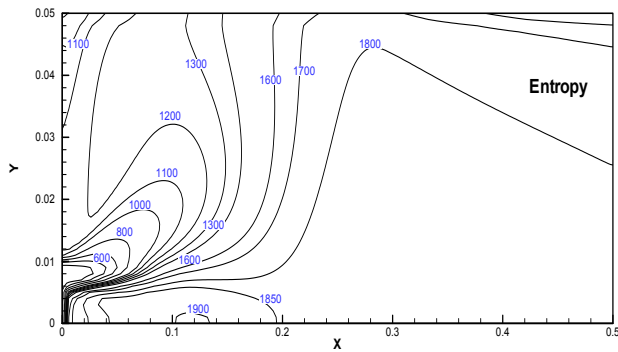
شکل 3- کسر جرمی آلاینده CO در محفظه احتراق در شرایط مختلف هوای ورودی
 $(\phi=0.5, 1.0), (\gamma=10\%, 30\%)$



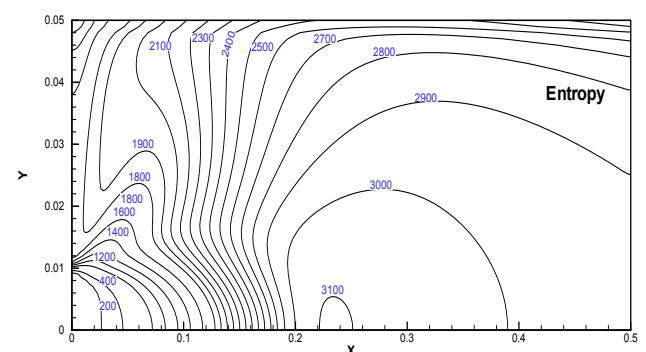
الف - $(\phi=0.5, \gamma=10\%)$



ب - $(\phi=0.5, \gamma=30\%)$

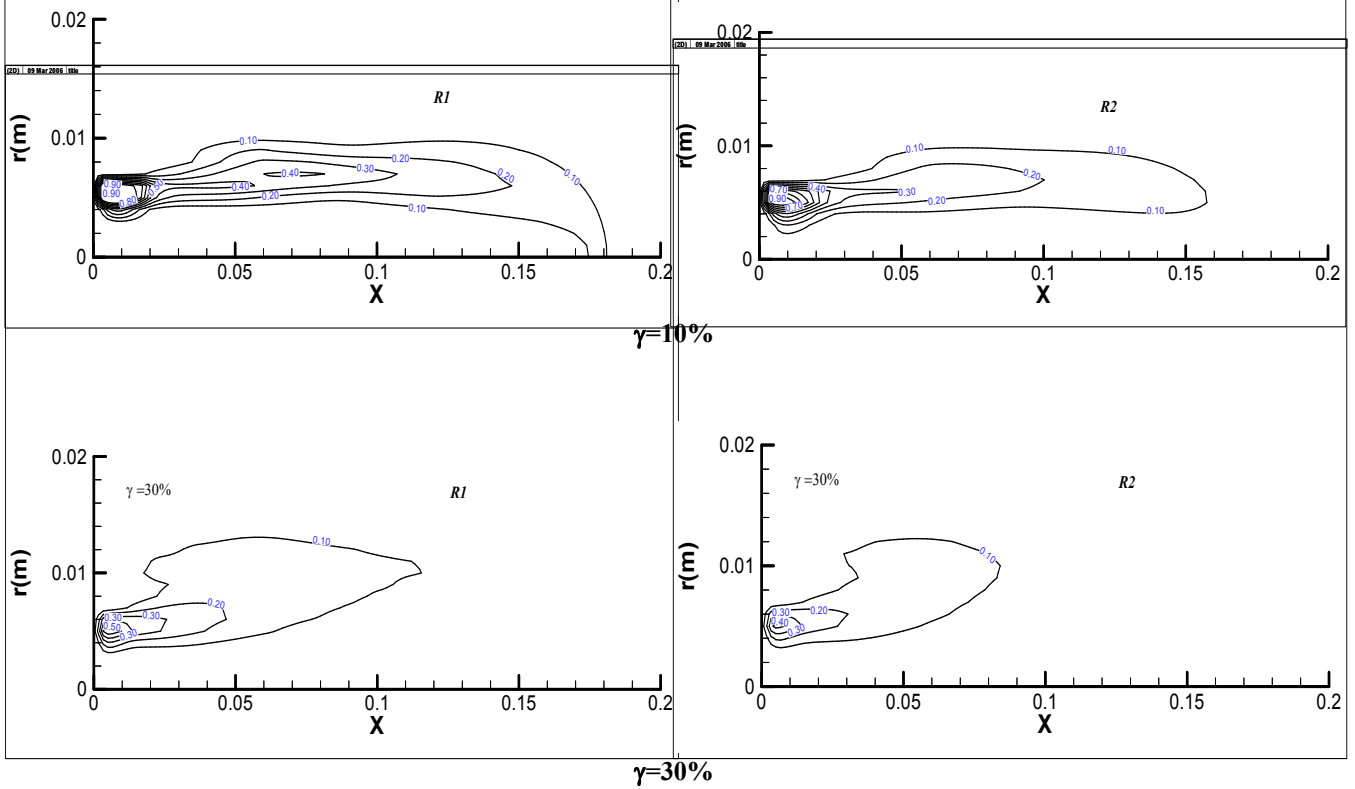


د - $(\phi=1.0, \gamma=10\%)$

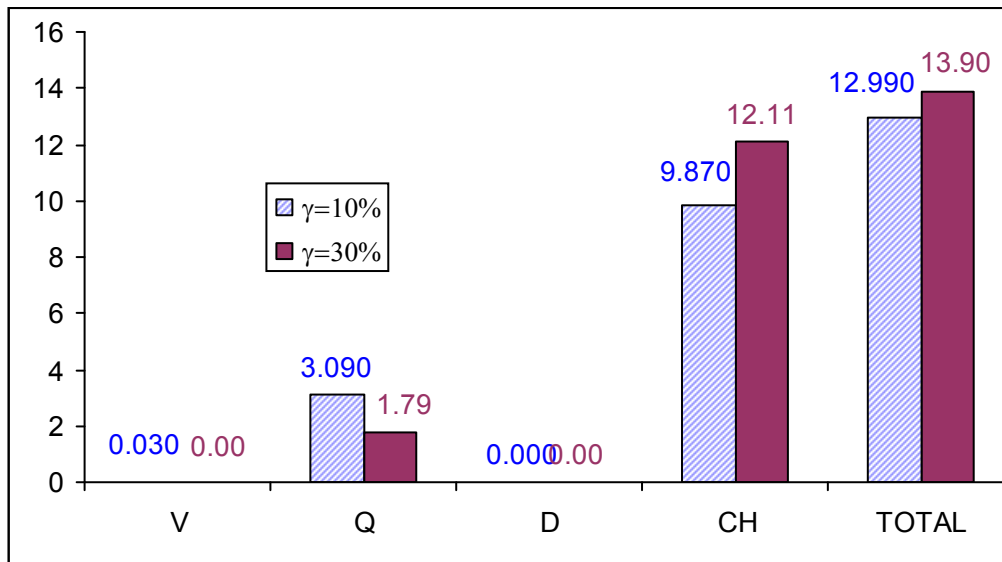


ج - $(\phi=1.0, \gamma=30\%)$

شکل 4- توزیع آنترپی در محفظه احتراق در شرایط مختلف هوای ورودی
 $(\phi=0.5, 1.0), (\gamma=10\%, 30\%)$



شکل 5- اثر کسر اکسیژن بر نرخ انجام واکنشها



شکل 6- توزیع لگاریتمی تولید آنتروپی در محفظه احتراق در شرایط مختلف هوای ورودی
($\phi=0.5$), ($\gamma=10\%$, 30%)