



اصلاح مدل آرنسیوس برای شبیه‌سازی شعله‌های آشفته سوخت مایع

قدرت قصابی^۱, سید هادی پورحسینی حصاری^۲, محمد مقیمان^۳

^۱دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد؛ gh.ghassabi@gmail.com

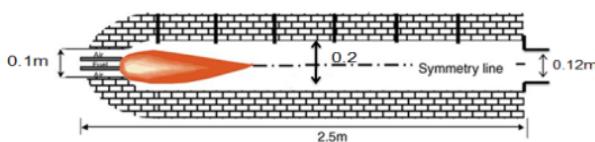
^۲دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد؛ hadipoorhoseini@gmail.com

^۳استاد گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد؛ mmoghiman@yahoo.com

نوسانات دمای گاز منجر به واکنش سریع‌تر و کاهش جرم بیشتر ذرات سوخت می‌شود. تاثیر نوسانات دما و غلظت گونه‌ها در تشکیل آلاینده NO نیز بسیار حائز اهمیت است. زیرا در دمای‌های نزدیک ۲۰۰ درجه کلوین، به ازای هر ۹۰ درجه افزایش دما، تولید NO حرارتی دو برابر می‌شود [۲]. ژو و همکاران [۴] مدلی را برای شبیه‌سازی تشکیل NO بر اساس متوسط زمانی نرخ واکنش لحظه‌ای آرنسیوس ارائه کردند. نتایج آنها نشان داد این مدل نسبت به مدل تابع احتمال دانسیته (pdf) تطابق بهتری با نتایج آزمایشگاهی دارد. همچنین ژنگ اچ و ژنگ جی [۵] اثر نوسان دمای گاز را روی میزان آزادسازی NO از ذرات ذغال مورد مطالعه قرار دادند. نتایج این بررسی نشان داد که نوسان دمای گاز منجر به آزادسازی سریع‌تر NO می‌شود. در این مقاله، اصلاح مدل آرنسیوس با استفاده از یک تابع زمانی سینوسی برای محاسبه اثر نوسانات دمایی ناشی از آشفتگی جریان انجام شده است.

مدل سازی عددی

در این مقاله شبیه‌سازی عددی، توسط برنامه دو بعدی و با تقارن محوری اسپرینت، انجام شده است. معادلات حاکم با استفاده از روش حجم کنترل و الگوریتم سیمپل حل می‌شوند. برای کمک به همگرایی از ضریب تخفیف ۰/۱ استفاده شده و معیار همگرایی 1×10^{-5} است. در شرایط مورد مطالعه، پاشش ذرات سوخت مایع با دمای ورودی ۳۳۰ کلوین، قطر ۳۰ میکرون و دبی 0.0005 kg/s صورت گرفته و هوا با سرعت $3/45 \text{ m/s}$ دمای ۶۰۰ کلوین و عدد چرخش ۰/۲۵. به کوره وارد شده و نسبت هم ارزی ۰/۴۴ است. هندسه کوره و ابعاد آن در شکل ۱ نشان داده است. کوره دارای طول $2/5$ متر و قطر $2/0$ متر می‌باشد. هوا از حلقه‌ای به قطر خارجی $1/0$ متر وارد کوره می‌شود و سوخت از نازلی در وسط مجرای ورودی پاشش می‌شود. قطر خروجی کوره $1/2$ متر می‌باشد.



شکل ۱: هندسه کوره و ابعاد آن

چکیده
مدل آرنسیوس از جامع‌ترین مدل‌های احتراق برای محاسبه شعله‌های آرام می‌باشد. در اکثر کاربردهای مهندسی احتراق، جریان آشفته است، بنابراین محققین سعی در بهبود این مدل برای جریان آشفته نموده‌اند. در این مقاله، اصلاح مدل آرنسیوس برای شبیه‌سازی جریان‌های احتراقی آشفته مورد مطالعه قرار گرفته است. اصلاح مدل با استفاده از یک تابع زمانی سینوسی برای محاسبه اثر نوسانات دما بر نرخ واکنش انجام شده است. مقایسه نتایج بدست آمده با نتایج آزمایشگاهی، نشان دهنده توانایی مدل اصلاح شده آرنسیوس برای شبیه‌سازی شعله‌های آشفته است. همچنین این مدل در پیش‌بینی منوکسیدکربن بهتر از مدل اتلاف گرددابهای عمل می‌کند.

کلمات کلیدی: مدل آرنسیوس اصلاحی، نوسانات دما، نرخ واکنش

مقدمه

کاربرد وسیع جریان‌های احتراقی آشفته در صنعت، سبب شده تا شبیه‌سازی شعله‌های آشفته همواره مورد توجه محققین باشد. مدل اتلاف گرددابهای که توسط بسیاری از محققین استفاده شده است بر مبنای آشفتگی جریان و میزان اختلاط سوخت و هوا می‌باشد و اثر دما و جنبش‌های شیمیایی در آن لحاظ نگردیده است. به همین دلیل این مدل، برای واکنش‌های چند مرحله‌ای مناسب نبوده و نمی‌تواند گونه‌های میانی را به درستی پیش‌بینی کند [۱]. از طرفی مدل آرنسیوس یکی از مدل‌های رایج و پرکاربرد برای شبیه‌سازی آرام است و با وجود اینکه مکانیزم واکنش‌های چند مرحله‌ای بر اساس نرخ آرنسیوس بوده [۲] و این مدل بسیاری از پارامترهای احتراق، از جمله دما، انرژی فعال‌سازی و غلظت واکنش دهنده‌ها را در نظر می‌گیرد، اما توانایی لازم را برای شبیه‌سازی شعله‌های آشفته نداشته و نیاز به اصلاح دارد. زیرا نوسانات ناشی از آشفتگی جریان بر نرخ واکنش، دما و غلظت آلاینده‌ها بسیار موثر است. در همین راستا محققین مختلفی تلاش نموده‌اند تا با اصلاح این مدل، آن را مناسب شبیه‌سازی شعله‌های آشفته نمایند. ژنگ و همکاران [۳] اثر نوسانات دمای گاز را روی نرخ واکنش لحظه‌ای مدل آرنسیوس در احتراق سوخت جامد مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد

$$\frac{T'}{\bar{T}} = \partial_n f(t) \quad (10)$$

در رابطه فوق ∂_n دامنه نوسانات و $f(t)$ تابع زمانی در بازه بین ۱ و $T = \bar{T} + T'$ خواهیم داشت:

$$\frac{Y}{\bar{Y}} = \frac{T}{\bar{T}} = 1 + \partial_n f(t) \quad (11)$$

طبق مدل آرنسپس نرخ واکنش با فرض دمای لحظه‌ای و متوسط با استفاده از روابط زیر بدست می‌آید:

$$R_f(T, \bar{C}) = A \exp(-E/RT) \bar{C}^\alpha \bar{C}^\beta \quad (12)$$

$$R_f(\bar{T}, \bar{C}) = A \exp(-E/RT) \bar{C}_{o_2}^\alpha \bar{C}_{fu}^\beta$$

با تقسیم دو رابطه فوق، خواهیم داشت:

$$\frac{R_f(T, \bar{C})}{R_f(\bar{T}, \bar{C})} = \exp \left\{ \left(\frac{E}{RT} \right) \left[1 - \left(\frac{\bar{T}}{T} \right) \right] \right\} \quad (13)$$

برای نوسانات کوچک از رابطه ۱۱ داریم:

$$1 - \frac{\bar{T}}{T} = \frac{[\partial_n f(t)]}{[1 + \partial_n f(t)]} \approx \partial_n f(t) \quad (14)$$

بنابراین رابطه ۱۳ بصورت زیر نوشته می‌شود:

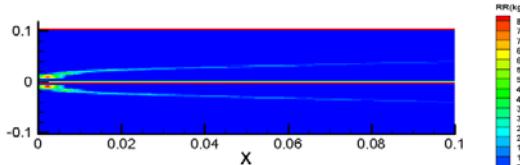
$$\frac{R_f(T, \bar{C})}{R_f(\bar{T}, \bar{C})} = \exp \left\{ \left(\frac{E}{RT} \right) \partial_n f(t) \right\} \quad (15)$$

با فرض تابع نوسانات زمانی سینوسی $f(t) = \sin t$ و متوسط گیری زمانی از رابطه ۱۵، نرخ واکنش متوسط مدل آرنسپس اصلاح شده به صورت زیر خواهد بود [۶]:

$$\bar{R}_f(T) = R_f(\bar{T}) \left[1 + \left(\frac{1}{4} \right) \left(\frac{E}{RT} \partial_n \right)^2 \right] \quad (16)$$

نتایج

در شکل ۲، ۳ و ۴ توزیع نرخ واکنش اکسیژن به ترتیب برای مدل آرنسپس اصلاحی، مدل اتفاف گردابهای و مدل آرنسپس استاندارد در ناحیه ورودی نشان داده شده است. مشاهده می‌شود در مدل آرنسپس اصلاحی و مدل اتفاف گردابهای واکنش با ورود سوخت و هوا صورت گرفته است. این در حالی است که در مدل آرنسپس استاندارد واکنش با کمی فاصله از مقطع ورودی صورت می‌گیرد. علت این است که در ورودی کوره، بدليل انبساط ناگهانی و چرخش هواي ورودي، ميزان آشفتگی جريان و اختلاط سوخت و هوا زياد است و در مدل آرنسپس اصلاحی برخلاف مدل آرنسپس استاندارد، اثر نوسانات دمای ناشی از آشفتگی جريان و اختلاط سوخت و هوا در نظر گرفته شده است.



شکل ۲: توزیع نرخ واکنش اکسیژن برای مدل آرنسپس اصلاحی

معادلات حاکم

معادلات پیوستگی، منتووم و انرژی حاکم بر فاز گاز به ترتیب بصورت زیر است:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rv) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{1}{r} \left[\frac{\partial}{\partial x} (r \rho_{uu}) + \frac{\partial}{\partial r} (r \rho_{uv}) \right] = - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \nabla^2 u \quad (2)$$

$$- \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho u' v') - \frac{\partial}{\partial x} (\rho u' u') \quad (3)$$

$$\frac{1}{r} \left[\frac{\partial}{\partial x} (r \rho_{uv}) + \frac{\partial}{\partial r} (r \rho_{vv}) - \rho v^2 \right] = - \frac{\partial p}{\partial r} + \mu (\nabla^2 v + \frac{v}{r^2}) \quad (4)$$

$$- \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho v' v') - \frac{\partial}{\partial x} (\rho u' v') - \frac{1}{r} \rho w' w' \quad (5)$$

$$\frac{1}{r} \left[\frac{\partial}{\partial x} (r \rho_{uw}) + \frac{\partial}{\partial r} (r \rho_{vw}) + \rho v w \right] = \mu (\nabla^2 w - \frac{w}{r^2}) \quad (6)$$

$$- \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho v' w') - \frac{\partial}{\partial x} (\rho u' w') - \frac{1}{r} \rho v' w' \quad (7)$$

$$\frac{1}{r} \left[\frac{\partial}{\partial x} (r \rho_{uh}) + \frac{\partial}{\partial x} (r \rho_{vh}) \right] = \Gamma_h \nabla^2 h \quad (8)$$

$$- \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho v' h') - \frac{\partial}{\partial x} (\rho u' h') + S_h \quad (9)$$

مدل‌سازی توربوولنسی

برای بدست آوردن تنش‌های رینولدز در این مقاله از مدل تنش جبری (ASM)^۱ استفاده شده است. این مدل علاوه بر حل معادلات دیفرانسیل برای بدست آوردن مقدار k و ϵ که در روابط ۶ و ۷ نشان داده شده است. برای تعیین هریک از مولفه‌های تنش‌های رینولدز، یک معادله جبری طبق رابطه ۹ نیز حل می‌کند.

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \epsilon \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_1 \frac{\epsilon}{k} (G_k) - C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k} - R_\epsilon \quad (7)$$

$$\mu_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (8)$$

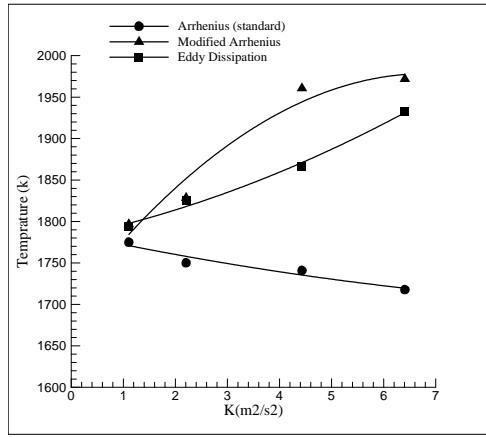
$$C_\mu = \frac{2}{3} \frac{1-C_2}{C_1} [1 - \frac{1}{C_1} (1 - C_2 \frac{P}{\epsilon})] / [1 + \frac{1}{C_1} (\frac{P}{\epsilon} - 1)]^2 \quad (9)$$

در رابطه فوق C_1 و C_2 به ترتیب 0.4 و 0.15 می‌باشند.

مدل‌سازی احتراق

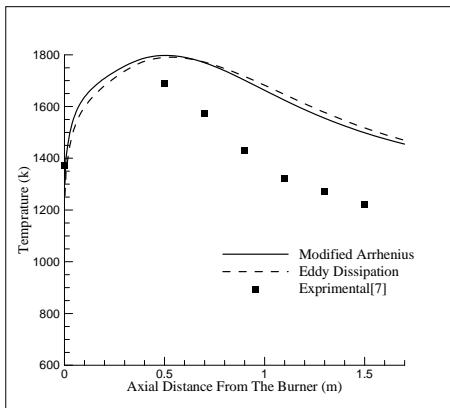
در این مقاله از مدل آرنسپس برای شبیه‌سازی احتراق استفاده شده است. برای در نظر گرفتن اثر نوسانات دما بر مدل آرنسپس، فرض می‌شود نوسانات دما با زمان حول مقدار میانگین به صورت زیر تغییر می‌کند [۶]:

که باعث می‌شود تا دمای ماکریتم روند صعودی پیدا کند. اما مدل آرنیوس استاندارد به دلیل اینکه آشفتگی جریان و اختلاط سوخت و هوا را در نظر نمی‌گیرد به خوبی نمی‌تواند تغییرات دمای ماکریتم را با تغییر انرژی جنبشی اغتشاش ورودی پیش بینی کند.



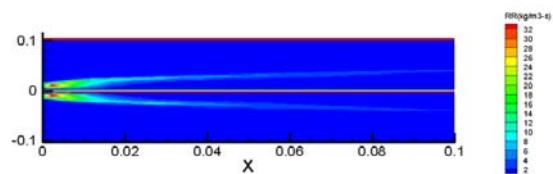
شکل ۶: مقایسه دمای ماکریتم کوره برای مدل‌های احتراقی بر حسب انرژی جنبشی اغتشاش ورودی

در شکل ۷ توزیع دمای محوری مدل آرنیوس اصلاحی و مدل اتلاف گردابهای با نتایج آزمایشگاهی مرجع [۷] مقایسه شده است. مشاهده می‌شود که مدل آرنیوس اصلاحی رفتاری مشابه مدل اتلاف گردابهای داشته و تطابق خوبی را با نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد.

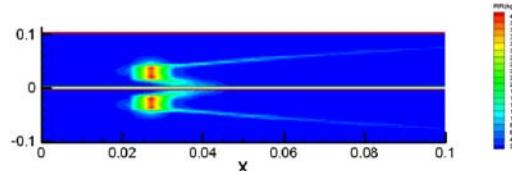


شکل ۷: مقایسه توزیع دمای محوری حاصل از مدل آرنیوس اصلاحی و مدل اتلاف گردابهای با نتایج آزمایشگاهی

در شکل ۸ تغییرات دما و کسر جرمی منوکسیدکربن خروجی کوره بر حسب نسبت همارزی برای مدل آرنیوس اصلاحی و اتلاف گردابهای نشان داده شده است. مشاهده می‌شود با افزایش نسبت هم ارزی تا $0/6$ ، در هر دو مدل، دمای خروجی به دلیل کامل شدن احتراق افزایش می‌یابد. همچنین همانطور که انتظار داریم در مدل آرنیوس اصلاحی، کسر جرمی منوکسیدکربن با افزایش نسبت هم ارزی تا $0/6$ ، کاهش می‌یابد در مدل اتلاف گردابهای، بدون تغییر است که نشان دهنده ضعف این مدل در پیش‌بینی منوکسیدکربن به عنوان گونه واسطه است.

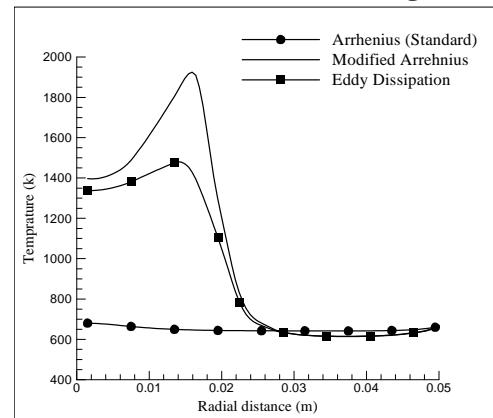


شکل ۳: توزیع نرخ واکنش اکسیژن برای مدل اتلاف گردابهای



شکل ۴: توزیع نرخ واکنش اکسیژن برای مدل آرنیوس استاندارد

در شکل ۵ توزیع دمای شعاعی برای مدل‌های آرنیوس استاندارد، آرنیوس اصلاحی و اتلاف گردابهای در مقطع ورودی مقایسه شده است. مشاهده می‌شود که مدل آرنیوس استاندارد به دلیل عدم در نظر گرفتن اختلاط سوخت و هوا و نوسانات دما، تغییرات دما در راستای شعاع کوره را به خوبی پیش بینی نمی‌کند. در حالیکه مدل آرنیوس اصلاحی رفتاری مشابه مدل اتلاف گردابهای دارد.

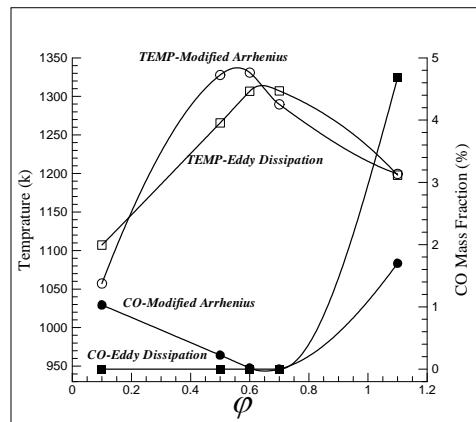


شکل ۵: مقایسه توزیع دمای شعاعی برای مدل‌های آرنیوس استاندارد، آرنیوس اصلاحی و اتلاف گردابهای در مقطع ورودی

در شکل ۶ تغییرات دمای ماکریتم کوره بر حسب انرژی جنبشی اغتشاش ورودی که با تغییر سرعت ورودی هوا صورت گرفته برای سه مدل آرنیوس استاندارد، آرنیوس اصلاحی و اتلاف گردابهای نشان داده شده است. مشاهده می‌شود با افزایش انرژی جنبشی اغتشاش ورودی که در واقع افزایش آشفتگی جریان است، مدل آرنیوس استاندارد از مدل اتلاف گردابهای فاصله می‌گیرد در حالیکه مدل آرنیوس اصلاحی رفتار مشابه مدل اتلاف گردابهای دارد. علاوه بر این ملاحظه می‌شود که در هر دو مدل آرنیوس اصلاحی و اتلاف گردابهای، با افزایش انرژی جنبشی اغتشاش ورودی، دمای ماکریتم افزایش می‌یابد. علت این امر است که افزایش آشفتگی جنبشی اغتشاش ورودی، سبب افزایش آشفتگی جریان و اختلاط بهتر سوخت و هوا شده و درنتیجه افزایش نرخ واکنش را به همراه دارد.

مراجع

- [1] Brink, A., Muller, C., Kilpinen, P., and Hupa, M., 2000. "Possibilities and Limitations Of The Eddy Break-Up Model". *Combustion and Flame*, 123(1), pp. 275–279.
- [2] Fluent Inc., 2006. *Fluent 6.3 User's Guide*
- [3] Shang, Q., Zhang, J., and Zhou, L., 2005. "Effects of Gas Temperature Fluctuation on The Instantaneous Char Reaction of Pulverized Coal Particle". *Fuel*, 84(16), pp. 2071–2079.
- [4] Zhou, L.X., Chen, X.L., Zheng, C.G., and Yin, J., 2000. "Second-Order Moment Turbulence Chemistry Models For Simulating NO_x Formation in Gas Combustion". *Fuel*, 79(11), pp. 1289–1301.
- [5] Zhang, H., Zhang, J., 2010. "Effects of Gas Temperature Fluctuation on the NO Release From Pulverized Coal Particle During Char Combustion". *Fuel*, 89(5), pp. 1177–1180.
- [6] Glassman, I., 1996. *Combustion*. Academic Press.
- [7] Kim, H.S., Shin, M.S., Jang, D.S., Choi, Y.C., and Lee, J.G., 2005. "Numerical Study For the Combustion Characteristics of Orimulsion Fuel in a Small-Scale Combustor". *Applied Thermal Engineering*, 25(17), pp. 2998–3012.



شکل ۸: مقایسه نتایج مدل‌های آرنیوس اصلاحی و اتلاف گردابهای برای منوکسیدکربن و دمای خروجی در نسبت هم‌ارزی‌های مختلف

نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

مدل آرنیوس اصلاحی رفتاری مشابه مدل اتلاف گردابهای داشته و تطابق خوبی را با نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد و در پیش‌بینی منوکسیدکربن بهتر از مدل اتلاف گردابهای عمل می‌کند.

فهرست علائم

ترم تولید برشی توربولنس	G_K
انرژی جنبشی اغتشاش	k
ترم چشممه معادله انرژی	S_h
علائم یونانی	
اتلاف انرژی جنبشی اغتشاش	ϵ
ویسکوزیته مغشوش	μ_t
چگالی	ρ