

## مدل سازی احتراق مغشوش با استفاده از مدل واکنشگاه اختلاط ایده آل اصلاح شده

هادی پاسدارشهری

استادیار مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی-دانشگاه تربیت مدرس  
 pasdar@modares.ac.ir

علی شهانقی

کارشناسی ارشد مکانیک گرایش تبدیل انرژی-دانشگاه تربیت مدرس  
 shahanaghi.ali@gmail.com

### چکیده

در این مقاله به بررسی اثر اعمال تاثیر میدان جریان در رابطه محاسبه تغییرات گونه در مدل برهم کنش احتراق و اغتشاشات واکنشگاه اختلاط ایده آل (PSR) پرداخته شده است. تئوری این مدل به همراه اصلاح انجام گرفته بیان گردیده و نتایج مدل اصلاح شده با نتایج مدل واکنشگاه اختلاط ایده آل مقایسه و تحلیل گردیده است. مدل احتراقی مورد استفاده در این مقاله مدل اتلاف گردابه بوده و میدان سیال مغشوش با استفاده از مدل k-ε استاندارد شبیه سازی گردیده است. هندسه مورد استفاده هندسه متقارن محوری شعله همراه با پایلوت سرعت بالای سوخت متان، شعله سنديا D، می باشد. سینتیک در نظر گرفته شده برای شبیه سازی واکنش ها سینتیک ۱۹ مرحله ای DRM بوده و کلیه شبیه سازی ها به وسیله نرم افزار شبیه سازی عددی این فوم انجام گرفته و مدل احتراقی و مدل برهم کنش احتراق و اغتشاشات به صورت جداگانه برای این نرم افزار توسعه یافته است. در نهایت نتایج بدست آمده با استفاده از نتایج تجربی صحت سنجی و مقایسه گردیده است.

**کلمات کلیدی:** مدل برهم کنش احتراق و توربولانس، شعله سنديا، مدل اتلاف گردابه، احتراق مغشوش، شبیه سازی عددی

### مقدمه

احتراق و جریان مغشوش هر دو پدیده ای پیچیده به شمار می روند. لذا شبیه سازی برهم کنش این دو پدیده به عنوان چالش اصلی در زمینه مدل سازی احتراق مغشوش به حساب می آید. با توجه به این مساله که در بازه وسیعی از مسائل صنعتی و کاربردی احتراق میدان جریان موجود، میدان جریان مغشوش می باشد، مدل سازی برهم کنش احتراق و توربولانس حائز اهمیت می باشد. یکی از مهمترین ویژگی های احتراق مغشوش وقوع پدیده خاموشی محلی است که در صورت افزایش این نواحی به خاموشی کلی شعله می انجامد. به طور کلی برای شبیه سازی پدیده خاموشی دو روش مستقیم و ضمنی اتخاذ می گردد در روش ضمنی یک محدوده از شرایط، وابسته به مدل احتراقی انتخاب می شود و در صورتی که این شرایط در ناحیه ای از میدان محاسباتی حاکم گردد به صورت صریح نرخ واکنش در آن ناحیه صفر خواهد شد این مدل ها به طور معمول دارای تقریب بوده و به هندسه و شرایط مساله وابسته می باشند. پژوهش های متعددی در این زمینه انجام گرفته و در نتیجه محدوده های خاموشی متناسب با مدل احتراقی تعریف شده اند [۱-۳]. در پژوهش پیشین انجام گرفته توسط نویسندگان این مقاله به بررسی نتایج مدل خاموشی صریح و ضمنی پرداخته شد و مشاهده شد نتایج مدل خاموشی با توجه به استفاده از سینتیک کاهش یافته و حجم پایین محاسبات قابل قبول می باشد [۴]. در روش ضمنی این پدیده به صورت ضمنی توسط مدل برهم کنش شبیه سازی می گردد.

روش های پیش بینی پدیده برهم کنش شعله و اغتشاشات به سه دسته کلی روش های اختلاط آشفته، آنالیز هندسی مانند مدل فلیملت [۵] و مدل های آماری [۶] تقسیم بندی نمود. در این مقاله از روش اختلاط آشفته برای شبیه سازی این برهم کنش استفاده گردید. در این روش سلول محاسباتی به عنوان یک واکنشگاه بی درو و فشار ثابت در نظر گرفته می شود و معادله بقای گونه برای این واکنشگاه نوشته می شود و در صورتیکه زمان مشخصه جریان عبوری از واکنشگاه کمتر از ماند این واکنشگاه گردد خاموشی رخ خواهد داد.

در سال ۱۹۸۵ مگنسن و همکاران با اضافه این مدل به مدل احتراقی اتلاف گردابه [۷] مدل مفهوم اتلاف گردابه [۱] را توسعه دادند که در ادامه مقاله تئوری این دو مدل بیان گردیده است. هدف این مقاله بررسی اعمال اثر میدان جریان مغشوش در معادله تغییرات گونه مدل برهم کنش همراه با مدل احتراقی اتلاف گردابه در هندسه شعله سنديا D است. علت انتخاب این هندسه دو ویژگی اختلاط ایجاد شده در ورودی نازل به محفظه احتراق و رینولدز بالای آن می باشد که وجود این دو ویژگی این هندسه را به هندسه ای مناسب برای شبیه سازی احتراق مغشوش می نماید.

### شبیه سازی عددی

در این بخش به بررسی روش حل و پیش بینی میدان جریان، مغشوش، مدل احتراقی مورد استفاده و مدل برهم کنش احتراق و توربولانس، سینتیک مورد استفاده، هندسه شبیه سازی شده پرداخته شده و در انتها نتایج بدست آمده پرداخته خواهد شد.

### معادلات حاکم

معادلات حاکم معادلات متوسط گیری شده برای جریان بوده و از مدل توربولانسی k-ε استاندارد استفاده گردیده است. معادله پیوستگی و بقای مومنتوم و گونه و انرژی به شرح زیر می باشند:

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} u_j) = 0 \quad (1)$$

(۲)

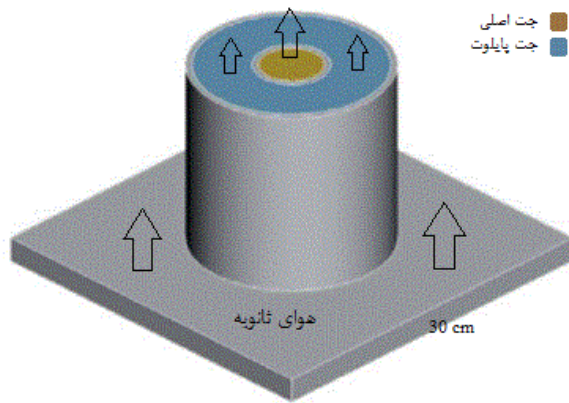
$$\frac{\partial}{\partial t} (\bar{\rho} \phi) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} u_j \phi) =$$

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\tau}_{ij} - \bar{\rho} u_i u_j) + \bar{\rho} f_i$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\bar{\rho} Y_k) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} Y_k u_j)$$

$$= \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \bar{\rho} D \frac{\partial Y_k}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} Y_k u_j) + \bar{\omega}_k \quad (3)$$

$$k = 1 \dots N_{\text{species}}$$



شکل ۱: هندسه مورد استفاده برای شبیه‌سازی با مدل احتراقی اتلاف‌گردابه و مدل

اغتشاشی k-ε

شرایط مرزی مربوط به ورودی شعله سنديا D و مورد استفاده در شبیه‌سازی در جدول ۱ آورده شده است :

جدول ۱: مشخصات جریان در ورودی شعله

مشخصه	سرعت ورودی (متر بر ثانیه)	دمای ورودی (کلوین)
جت اصلی	۴۹,۶	۲۹۴
جت پایلوت	۱۱,۴	۱۸۸۰
هوای ثانویه	۰,۹	۲۹۱

### مدل احتراقی اتلاف گردابه

مدل احتراقی اتلاف‌گردابه توسط مگنسن و همکاران در سال ۱۹۷۶ ارائه شده و در طی زمان توسعه یافته است [۷]. این مدل یک تعریف برای نرخ متوسط واکنش ارائه می‌دهد. (رابطه ۳). این مدل فرض می‌کند که واکنش‌های شیمیایی در محلی که اضمحلال توربولانس رخ می‌دهد صورت می‌گیرد که این ناحیه ریزساختار نامیده می‌شود و طول مشخصه آن از مرتبه مقیاس کولموگروف می‌باشد. این ساختارها بخشی از جریان را اشغال نموده‌اند. در نوشتار زیر  $\bar{\omega}_k^*$  مربوط به ریزساختار و  $\bar{\omega}_k^0$  مربوط به محیط و  $\bar{\omega}_k$  به متوسط کمیت در شبکه محاسباتی می‌باشد [۱].

$$\gamma = \left( \frac{3C_{D2}}{4C_{D1}^2} \right)^{\frac{1}{4}} \left( \frac{v^* \theta}{k^{\%}} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (10)$$

$$n\bar{\omega}_k^* = \left( \frac{3}{C_{D2}} \right)^{\frac{1}{2}} \left( \frac{\theta}{v^*} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

$$(12)$$

$$-\bar{\omega}_k = \frac{\bar{\rho} \gamma^2 n\bar{\omega}_k^*}{1 - \gamma^*} (Y_k^{\circ} - Y_k^*) \quad k = 1 \dots N_{species}$$

که در آن  $\gamma$  نسبت جرم نواحی ریزساختار به جرم کل بوده و  $n\bar{\omega}_k^*$  نرخ انتقال جرم بین این ناحیه ۲ ناحیه و  $C_{D1} = 0.134$  و  $C_{D2} = 0.5$  و  $\gamma^* = \gamma^3$  می‌باشد.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\bar{\rho} h_k^{\%}) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} h_k^{\%} u_j^{\%}) = \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left( \bar{\rho} D \frac{\partial h_k^{\%}}{\partial x_j} - \bar{\rho} h_k^{\%} u_j^* \right) + \bar{S}_h$$

که در آن  $\bar{p}$  فشار و  $\bar{t}_{ij}$  تنش ویسکوز و  $f_k^{\%}$  نیروی حجمی بوده و D ثابت نفوذ جرمی و  $\bar{\omega}_k$  نرخ تولید گونه k و  $\bar{S}_h$  ترم تولید انرژی درونی می‌باشد. ترم تنش رینولدزی و  $\bar{\rho} \bar{Y}_i^* u_j^*$  و  $\bar{\rho} \bar{h}^* u_j^*$  مطابق روابط زیر مدل می‌شوند:

$$(5)$$

$$\bar{\rho} u_i u_j^* = -\mu_t \left( \frac{\partial u_j^{\%}}{\partial x_j} + \nu \frac{\partial u_j^{\%}}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k^{\%}}{\partial x_k} \right) + \frac{2}{3} \bar{\rho} k^{\%} \delta_{ij}$$

$$-\bar{\rho} u_i Y_k^* = \frac{\mu_t}{Sc_t} \frac{\partial Y_k^{\%}}{\partial x_i} \quad (6)$$

$$-\bar{\rho} h^* u_j^* = \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial h^{\%}}{\partial x_j} \quad (7)$$

هم‌چنین ۲ معادله انتقال برای انرژی جنبشی توربولانسی و نرخ اضمحلال توربولانسی حل خواهد شد:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\bar{\rho} k^{\%}) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} u_j^{\%} k^{\%}) = \quad (8)$$

$$+ \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k^{\%}}{\partial x_j} \right) + G - \bar{\rho} \theta k^{\%} \quad (9)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\bar{\rho} \theta) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} u_j^{\%} \theta) =$$

$$+ \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\theta} \right) \frac{\partial \theta}{\partial x_j} \right) + C_{\epsilon 1} \frac{\theta}{k^{\%}} G - C_{\epsilon 2} \bar{\rho} \frac{\epsilon^{\%}}{k^{\%}}$$

که  $C_{\epsilon 1}$  و  $C_{\epsilon 2}$  و  $\sigma_k$  و  $\sigma_\theta$  ثابت مدل می‌باشند و همچنین

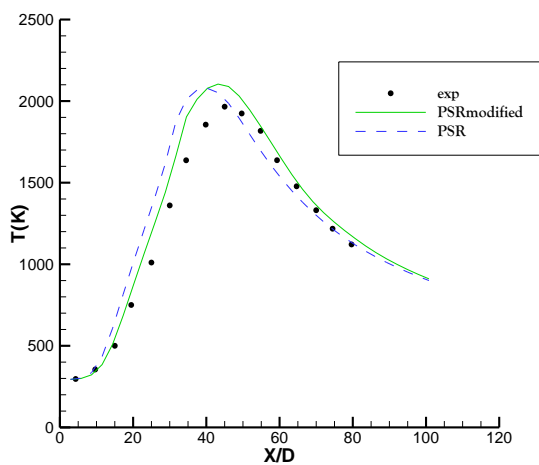
$$G = -\bar{\rho} u_i u_j^* \frac{\partial u_i^{\%}}{\partial x_j}$$

### هندسه شبیه‌سازی و شرایط مرزی

هندسه شبیه‌سازی شده یک قطاع متقارن محوری از شعله سنديا D است. قطر داخلی نازل ۷,۲ میلی‌متر و قطر پایلوت ۷,۷ میلی‌متر در نظر گرفته شده، هم‌چنین قطر خارجی پایلوت برابر ۱۸,۲ میلی‌متر است. هم‌چنین در شبیه‌سازی عددی طول محفظه ۳۰۰ برابر قطر و شعاع آن ۲۰,۸۳ برابر قطر نازل در نظر گرفته شد. که شمای کلی آن در شکل ۱ قابل مشاهده است. تعداد شبکه ۴۰۰۰۰ در نظر گرفته شد. و استقلال از شبکه در این تعداد بدست آمد.

آنچه به وضوح قابل مشاهده است بهبود نتایج مدل اتلاف گردابه با اعمال اثر اختلاط در معادله تغییرات گونه مدل برهم کنش احتراق و توربولانسی واکنشگاه اختلاط ایده آل نسبت به همان مدل بدون استفاده از این اثر است. در مجموع استفاده سینتیک کامل دقیق ترین نتایج را نسبت به نتایج تجربی بدست می دهد و اختلاف بین نتایج و نتایج تجربی با احتساب استفاده از سینتیک کاهش یافته قابل قبول می باشد. در راستای محور تقارن دمای ماکزیمم هردو روش مقداری بیش تر از نتایج تجربی را نشان می دهد و همچنین با توجه به این مساله که عبارت مورد بررسی در مدل برهم کنش احتراق و اغتشاشات، معادله تغییرات گونه می باشد. لذا توزیع گونه ها نیز بر روی محور تقارن مورد بررسی واقع شده اند.

در شکل ۲ تغییرات دما بر روی محور شعله مورد بررسی واقع گردیده است و با نتایج تجربی مقایسه شده است.



شکل ۲: نمودار دما بر روی محور تقارن شعله سنديا D مدل اتلاف گردابه با مدل برهم کنش احتراق و اغتشاشات واکنشگاه اختلاط ایده آل (خطچین) و مدل اصلاح شده (خط) و نتایج تجربی (نقطه)

مدل اصلاح شده محل ماکزیمم دمای شعله که محل ایجاد اختلاط بر روی محور شعله می باشد را بهتر از مدل اصلی پیش بینی نموده است و همچنین نتایج پیش بینی شده به نتایج تجربی نزدیک تر می باشند. با توجه به این مساله که معادلات حل شده میدان جریان مغشوش برای هر دو مدل یکسان است، علاوه بر اینکه نرخ آزاد شدن حرارت بهتر پیش بینی شده است در نظر گرفتن اثر جریان باعث بهتر پیش بینی شدن محل وقوع شعله گردیده است. در شکل ۳ نمودار تغییرات سرعت بر محور شعله قابل مشاهده است.

### مدل برهم کنش احتراق و اغتشاشات واکنشگاه اختلاط ایده آل

مگنسن به منظور در نظر گرفتن واکنش های شیمیایی در مدل سازی احتراق آشفته و پراش جدیدی از مدل اتلاف گردابه را ارائه نمود به عبارت دیگر در این مدل هم تأثیر اختلاط مولکولی بر نرخ احتراق و هم تأثیر واکنش های شیمیایی بر روی آن دیده شده است.

معادلات اصلی تشکیل دهنده این مدل مانند مدل اصلی است به این منظور که معادلات کسر حجمی ریزساختارها و نحوه محاسبه نرخ انتقال جرم بین ریزساختار و محیط و همچنین رابطه نرخ واکنش مانند حالات پیشین است تفاوت در نحوه محاسبه کسر جرمی گونه ها در ناحیه ریزساختار است.

در این مدل برای محاسبه کسر جرمی هریک از گونه ها با توجه به فرض ناحیه ریزساختار به عنوان یک واکنشگاه اختلاط ایده آل معادلات حاکم بر این واکنشگاه حل می گردد. یک جریان ثابت از واکنش دهنده ها از ورودی با ترکیب و دمای مشخص وارد می گردد. شار جرمی ورودی با شار جرمی خروجی مساوی است و همچنین فشار در هر سلول ثابت در نظر گرفته می شود. معادلات واکنشگاه اختلاط ایده آل نا پایا به شکل زیر بیان می شود.

$$\frac{dp^*}{dt} = 0 \quad (13)$$

$$\frac{dh^*}{dt} = 0 \quad (14)$$

$$\frac{dY_k^*}{dt} = \omega_k^* \quad (15)$$

### مدل واکنشگاه اختلاط ایده آل اصلاح شده

در این مقاله به بررسی تاثیر اعمال ترم مربوط به اختلاط مولکولی در معادله تغییرات گونه با زمان در این دستگاه معادلات پرداخته شده است لذا در این مدل نیز فرض بی دررو و فشار ثابت بودن این واکنشگاه اعمال شده اما برای محاسبه ترم تغییرات گونه با زمان از رابطه ی زیر استفاده گردیده است.

$$(16)$$

$$\frac{dY_k^*}{dt} = \omega_k^* + m^* (Y_k^* - Y_k^*) \quad k = 1, \dots, N$$

جمله  $\omega_k^*$  که بیانگر نرخ تولید یا مصرف گونه  $k$ ام در واکنشگاه ریزساختار است از محاسبات سینتیکی به دست می آید. باید توجه داشت که زمان اقامت در این چنین واکنشگاهی برابر  $\tau^*$  است و اگر این زمان مشخصه کمتر از زمان مشخصه شیمیایی باشد. واکنش ها خاموش می شوند و این گونه تأثیر اغتشاشات بر احتراق اعمال می گردد.

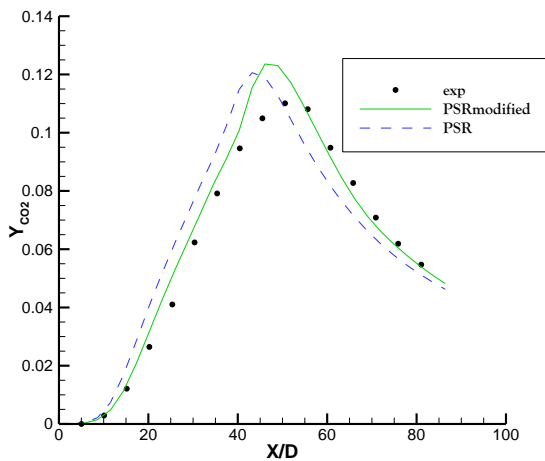
حل این دستگاه معادلات دیفرانسیل معمولی تشکیل شده از نظر عددی بسیار دشوار است. در پژوهش حاضر برای حل این دستگاه معادلات از حل گر با الگوریتم RADAU5 استفاده گردید [۸].

### سینتیک شیمیایی

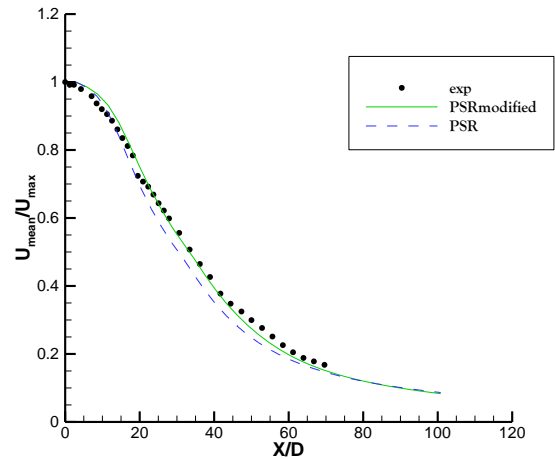
سینتیک مورد استفاده در این شبیه سازی، سینتیک کاهش یافته ۱۹ مرحله ای احتراق متان می باشد. [۴].

### نتایج و بحث روی نتایج

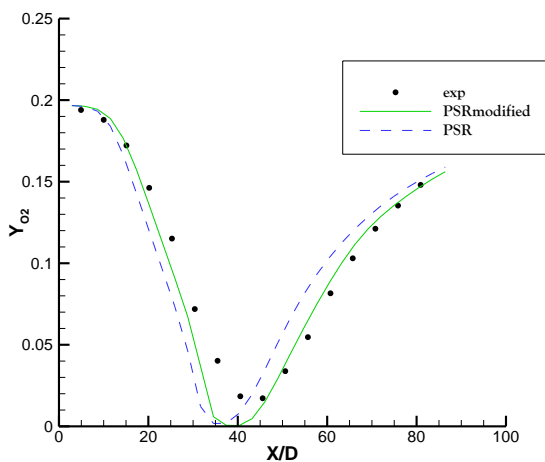
نتایج بدست آمده از شبیه سازی شعله سنديا D با استفاده از مدل اغتشاشی تنش رینولدزی k-ε و مدل احتراق مغشوش اتلاف گردابه با مدل های برهم کنش احتراق و اغتشاشات واکنشگاه اختلاط ایده آل برای سینتیک ۱۹ مرحله ای کاهش یافته احتراق متان مقایسه شده و در نهایت با نتایج تجربی [۹] بر روی محور تقارن مقایسه گردیدند.



شکل ۵: مقایسه تغییرات کسر جرمی گونه CO<sub>2</sub> در راستای محور شعله

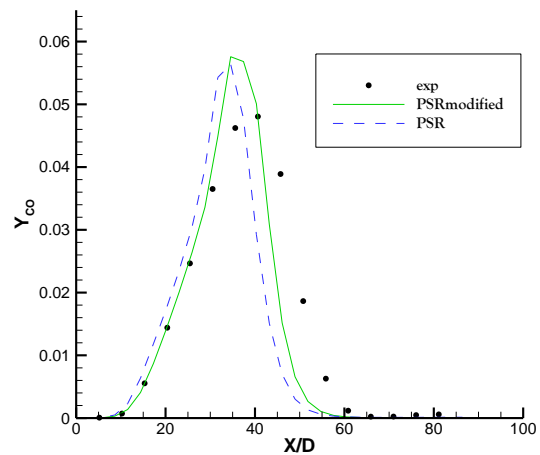


شکل ۳: مقایسه تغییرات سرعت بر روی محور هندسه با نتایج تجربی

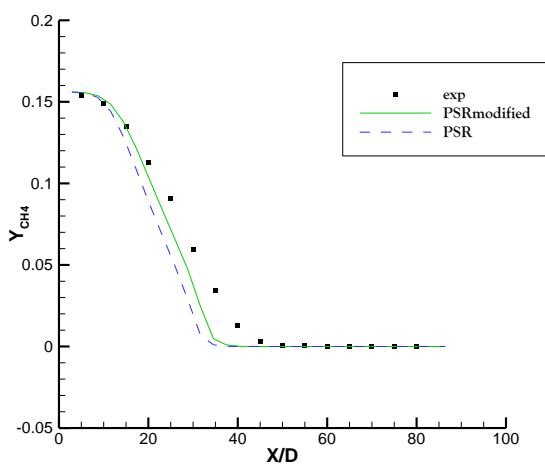


شکل ۶: مقایسه تغییرات کسر جرمی گونه O<sub>2</sub> در راستای محور شعله

همان‌طور که مشاهده می‌شود، نتایج مدل اصلاح شده به نتایج تجربی نزدیک‌تر می‌باشد پیش‌تر ذکر گردید به دلیل یکسان بودن معادلات میدان جریان تفاوت این دو مدل اندک می‌باشد و اختلاف جزئی به دلیل تاثیر متقابل میدان سرعت و دما بر یکدیگر می‌باشد. در ادامه و در شکل‌های ۴-۷ توزیع گونه‌های شرکت‌کننده در واکنش در راستای محور شعله قابل مشاهده است.



شکل ۴: مقایسه تغییرات کسر جرمی گونه CO در راستای محور شعله



شکل ۷: مقایسه تغییرات کسر جرمی گونه CH<sub>4</sub> در راستای محور شعله

همان‌طور که قابل مشاهده است مدل اصلاح شده توزیع گونه‌ها در راستای

<p><math>k</math></p> <p><b>بالانویس‌ها</b></p> <p>*</p> <p>0</p> <p>مراجع</p> <p>[۱] S. Byggstøyl and B. Magnussen, "A model for flame extinction in turbulent flow," in <i>Turbulent Shear Flows 4</i>, ed: Springer, 1985, pp. 381-395.</p> <p>[۲] S. Vilfayeau, "Large eddy simulation of fire extinction phenomena," UNIVERSITY OF MARYLAND, COLLEGE PARK. ۲۰۱۵ ,</p> <p>[۳] B. Lilleberg, D. Christ, I. S. Ertesvåg, K. E. Rian, and R. Kneer, "Numerical simulation with an extinction database for use with the eddy dissipation concept for turbulent combustion," <i>Flow, turbulence and combustion</i>, vol. 2, pp. 319-346, 2013.</p> <p>[۴] ع. شهانقی. ه. پاسدارشهری, "شبیه‌سازی عددی خاموشی محلی در شعله پیش‌آمیخته " هفدهمین کنفرانس دینامیک شاره‌ها، شاهرود، دانشگاه صنعتی شاهرود FD2017 1396</p> <p>[۵] N. Peters, "Laminar diffusion flamelet models in non-premixed turbulent combustion," <i>Progress in energy and combustion science</i>, vol. 10, pp. 319-339, 1984.</p> <p>[۶] J. Xu and S. B. Pope, "PDF calculations of turbulent nonpremixed flames with local extinction," <i>Combustion and Flame</i>, vol. 123, pp. 281-307, 2000.</p> <p>[۷] B. F. Magnussen and B. H. Hjertager, "On mathematical modeling of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion," in <i>Symposium (International) on Combustion</i>, 1977, pp. 719-729.</p> <p>[۸] G. Wanner and E. Hairer, "Solving ordinary differential equations II," <i>Stiff and Differential-Algebraic Problems</i>, 1991.</p> <p>[۹] R. Barlow and J. Frank, "Effects of turbulence on species mass fractions in methane/air jet flames," in <i>Symposium (International) on Combustion</i>, 1998, pp. 1087-1095.</p>	<p>محور شعله را بهتر پیش‌بینی نموده است مهم‌ترین دلیل اختلاف بین نتایج این مدل‌ها و اندازه‌گیری‌های تجربی استفاده از سینتیک کاهش یافته در این مقاله است. زیرا استفاده از سینتیک کامل منجر به بهتر پیش‌بینی شدن خواص سیال و در نتیجه حل دقیق‌تر معادلات میدان جریان می‌گردد هم‌چنین بیشتر پیش‌بینی شدن گونه‌هایی مانند CO در محل شعله، که اختلاط جریان می‌باشد، به دلیل عدم وجود واکنش‌های مصرف‌کننده این گونه‌ها در سینتیک در نظر گرفته شده است که منجر به بیش‌تر پیش‌بینی شدن دمای شعله در این ناحیه می‌گردد. هم‌چنین با توجه به این مساله که اصلاح مدل بر روی تغییرات گونه در مدل واکنشگاه اختلاط ایده‌آل می‌باشد مشاهده می‌گردد با اعمال این مدل پیش‌بینی مدل برهم کنش بهبود یافته است.</p> <p><b>نتیجه‌گیری</b></p> <p>شبیه‌سازی دقیق برهم‌کنش اغتشاشات و احتراق با توجه به پیچیدگی ذاتی هردو پدیده و هم‌چنین کاربرد وسیع این پدیده در صنایع، حائز اهمیت می‌باشد، لذا شبیه‌سازی این پدیده با دقت مناسب ضروری است. در نظر گرفتن تاثیر اغتشاشات جریان بر روی احتراق، تاثیر بسزایی بر افزایش دقت و صحت نتایج شبیه‌سازی دارد. یکی از روش‌های شبیه‌سازی این پدیده استفاده از مدل برهم‌کنش اختلاط ایده‌آل (PSR) می‌باشد. اثر میدان جریان مغشوش را با در نظر گرفتن سلول محاسباتی به عنوان یک واکنشگاه فشار ثابت بی‌دررو برمدل احتراق آشفته اعمال می‌گردد و به وسیله پارامتر زمان ماند واکنشگاه به تاخیر افتادن شعله را بهتر پیش‌بینی نموده و پروفیل دما روی محور مرکز شعله را نسبت به نتایج مدل اتلاف گردابه با احتراق سریع، دقیق‌تر محاسبه می‌نماید. شبیه‌سازی شعله سنندیا D با استفاده از مدل احتراقی اتلاف‌گردابه به همراه استفاده از مدل برهم‌کنش اصلاح‌شده با توجه به در نظر گرفتن تاثیر میدان جریان مغشوش بر تغییرات گونه‌ها، باعث بهبود نتایج می‌گردد، اما هم‌چنان می‌توان گفت استفاده از سینتیک کامل دقیق‌ترین پاسخ‌ها را به همراه دارد. علت این امر بهتر پیش‌بینی شدن خواص سیال با توجه به در نظر گرفتن صحیح‌تر گونه‌های موجود در میدان محاسبات و هم‌چنین بهبود پیش‌بینی توزیع گونه‌های واکنش‌دهنده و به دنبال آن نرخ واکنش و سپس توزیع دما، است.</p> <p><b>فهرست علائم</b></p> <p><math>Y_k^*</math> کسر جرمی گونه</p> <p><math>m^*</math> نرخ انتقال جرم</p> <p><math>h^*</math> انتالپی کل</p> <p><math>p^*</math> فشار</p> <p><math>k^{\%}</math> انرژی جنبشی توربولانسی</p> <p><math>G</math> ترم تولید انرژی جنبشی توربولانسی</p> <p><b>فهرست علائم یونانی</b></p> <p><math>\omega_k^*</math> نرخ تغییرات گونه</p> <p><math>\gamma</math> نسبت جرم ناحیه ریزساختار به جرم سلول</p> <p><math>\mathcal{G}</math> نرخ اضمحلال توربولانسی</p> <p><math>\nu^*</math> ویسکوزیته سینماتیکی</p> <p><math>\bar{\rho}</math> چگالی سیال</p> <p><math>\delta_{ij}</math> دلتای کرونکر</p> <p><b>زیرنویس‌ها</b></p>
--	---