



## مطالعه عددی اثرات مدل های توربولانس در شعله پایدار شده توسط Bluff-Body

ناصر سراج مهدیزاده<sup>۱</sup>، سید احسان نائینیان<sup>۲</sup>، علی لهراسبی نیچکوهی<sup>۳\*</sup>  
تهران - دانشگاه صنعتی امیرکبیر - دانشکده مهندسی هوافضا - قطب هوافضای محاسباتی  
\*nichkoochi@aut.ac.ir

### چکیده

یکی از مهمترین معضلات سیستمهای احتراقی غیر پیش مخلوط با سرعت بالا، پایداری شعله می باشد، که به صورت جدا شدن شعله از دهانه مشعل Blow off ظاهر می شود. یکی از روشهای پایدار سازی شعله های پس مخلوط، استفاده از جسم مانع Bluff Body می باشد. جسم مانع، جسمی صلب می باشد که با قرار گرفتن در بین جت سوخت و اکسید کننده و ایجاد ناحیه به گردش در آمده، باعث اختلاط بهتر بین سوخت و اکسید کننده می شود. در این مقاله، محاسبات مربوط به معادلات RANS شعله پایدار شده محفظه احتراق مجهز جسم مانع Bluff-Body در سه مدل مختلف توربولانس  $k-\epsilon$  (استاندارد، RNG و Realizable) با مدل شیمیایی ثابت فلیم لت برای سوخت متان/ هیدروژن صورت پذیرفته است. نتایج در سه ناحیه مختلف به گردش در آمده، گلوگاهی و جت مانند بررسی شده است، و تاثیر مدل توربولانس بر روی نتایج مورد بررسی قرار گرفته است. مدل فلیم لت مطالعات بر پایه مکانیزم شیمیایی GRI2.11، ۴۹ ذره انجام شده است. در مدل فلیم لت شیمی واکنش سریع می باشد.

واژه‌های کلیدی: نفوذی-جسم مانع- تابع دانسیته احتمال- نرخ محدود- فلیم لت- اختلاط- جدا شدن شعله- مدل توربولانس

### ۱- مقدمه

محفظه احتراق مجهز به جسم مانع، یک طرح برای تحقیقات احتراق توربولانس می باشد [1]. شعله پایدار شده توسط جسم مانع دارای یک ناحیه به گردش درآمده بعد از جسم مانع می باشد، که در آنجا میدان توربولانس پیچیده ای ایجاد شده و مشابه آن در مشعلهای صنعتی یافت می شود. ضمناً شرایط مرزی این شعله ها آسان بوده و به خوبی قابل تعریف می باشد. به این دلیل شعله پایدار شده توسط جسم مانع یک نمونه مناسب و ایده آل برای مشاهدات درهم کنش بین توربولانس و واکنشهای شیمیایی می باشد و پلی بین مسائل تئوری و کاربردهای مهندسی می باشد. ماسری و همکارانش (Masri et.al.) [10,3] و دالی و همکارانش (Dally et.al.) [2] بررسی های تجربی جامعی روی سریهای مختلف جسم مانع انجام داده اند (از سوختن کامل شعله تا نمایش دادن مکان خاموشی شعله)، ساختارهایی از میدان جریان و ساختارهای اسکالر به خوبی اثر شیمیایی با توربولانس، از قبیل مکان خاموشی شعله، دوباره به اشتعال در آمدن و میزان انتشار  $NO_x$  بررسی شده است. شعله مطالعه شده در این آزمایش از نوع پس مخلوط می باشد.

ارتباط بین ترکیب توربولنت و نرخ محدود واکنش شیمیایی اثر شدیدی به سوختن در این شعله ها دارد. برای مدل سازی از نتایج بدست آمده توسط سیدنی (Sydney) استفاده شده و بسیاری از محققین شبیه سازی شعله های جسم مانع را با توربولانسها و مدل‌های احتراقی مختلف انجام داده اند. دالی و همکارانش (Dally et.al.) [8] کارایی مدل  $k-\epsilon$  و مدل تنش های

۱- دانشیار دانشکده مهندسی هوافضای دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۲- کارشناس ارشد هوافضا

۳- دانشجوی دکتری دانشگاه صنعتی امیرکبیر



FCCI2010-1200

## سومین کنفرانس سوخت و احتراق ایران

تهران - دانشگاه صنعتی امیرکبیر - اسفند ماه ۱۳۸۸



دانشگاه صنعتی امیرکبیر  
دانشکده مهندسی هوافضا

رینولدز را روی شعله جسم مانع مورد بررسی قرار داده اند و روی اصلاح مقدار ثابت اختلاف در روی معادلات انتقال بحث می کنند و آنها را عامل موثر روی میدان جریان می دانند.

مرسی و همکارانش (Merci et.al.) [5] کارایی یک مدل جدید مکعبی غیر خطی  $k-\epsilon$  را با استفاده از پیش فرض  $\beta$ -PDF (تابع چگالی احتمال  $\beta$ ) مدل سازی شیمیایی کرده اند. آنها به این نکته پی بردند که تأیید مدل توربولانس در محاسبات معتبر است و مدل مکعبی غیر خطی  $k-\epsilon$  پیشبینی ساختار جریان را بهبود می بخشد.

لی و همکارانش (Liu et.al.) [7] قابل اجرا بودن مدل (RSMS) را روی شعله های پیچیده بررسی کرده است. آنها پی به این مساله بردند که بیشتر مدل های (RSMS) نمی تواند رضایت کافی را برای پیش بینی شعله های مورد تردید جلب کند و همچنین مدل (RSMS) رفتار مختلفی روی جریان کیس های احتراقی و غیر احتراقی دارد. تعادل شیمیایی و فرض شکل  $\beta$ -PDF وسیله ای است که برای کیس های احتراقی مورد استفاده قرار می گیرد. حسین و همکارانش (Hossein et.al.) [13] با استفاده از مدل  $k-\epsilon$  با مدل نگه داشتن شعله به بررسی تأثیرات انتقال حرارت تشعشعی پرداخته اند. آنها پی بردند که اثر انتقال حرارت تشعشعی روی دما و ذرات مهم برای شعله هیدروژن/متان ناچیز است، و داخل نشدن انتقال حرارت تشعشعی تأیید مهمی برای بهتر پیش بینی کردن نسبت جرمی OH می باشد. کیم و همکارانش (Kim et.al.) [11,12] یک مدل CMC (Conditional Moment Closure) را با مکانیزم GRI 2.11 و GRI 3.0 برای شعله جسم مانع مدل کرده اند. آنها ثابت کردند که پیش بینی CMC برای دما و ذرات مهم نتیجه خوبی می دهند. ذرات OH و NO از این روش غیر قابل پیش بینی است که این مربوط به مکانیزم GRI 2.11 و GRI 3.0 است. در همه روش های بالا مدل توربولانس وابسته به لحظه است و رفتار احتراق شیمیایی وابسته به نسبت مخلوط است، و مطالعات شعله مکان خاموشی شعله را نشان نمی دهد. حال امروز مدل سازی بر پایه نسبت مخلوط نمی تواند محل خاموشی شعله و مکان دوباره مشتعل شده را به ما نشان دهد. روش PDF برای جریان احتراقی این مزیت را دارد که منبع های غیر خطی با ابعاد بالا را با بالا رفتن واکنش های شیمیایی در یک شکل بسته تحلیل می کند [7]. برای رسیدن به این مزیت پیشنهاد می شود که معادلات به صورت حالت تک اسکالر بقایی باشند.

ایکسو و پاپ و همکارانش (Xu & Pope et.al.) [4] پیوستن سرعت - فرکانس و اختلاط روش PDF را برای یک شعله پیلوت جت اجرا کردند. نتایج بدست آمده توسط آنها نه تنها برای داده های تجربی که یک سری نقاط ناپیوسته خوب بود، بلکه مکان خاموشی و دوباره به انتقال در آمدن را برای شعله نشان می داد. موفقیت بدست آمده برای این روش PDF باعث شد که این روش بسیار توسعه پیدا کند و به صورت خیلی زیاد بازده محاسبات شیمیایی بالا رود.

### ۲- مدل کردن احتراق

برای مدل کردن احتراق لازم است که نرخ انجام واکنش های شیمیایی مشخص شود. علاوه بر این بایستی که نوع واکنشها و تعداد آنها نیز مشخص باشد. همچنین در نتیجه تداخل توربولانس و سینیتیک شیمیایی، بایستی اثرات واکنش شیمیایی بر شعله نیز روشن شود. در این تحقیق از نتایج تجربی بدست آمده توسط و دالی و همکارانش (Dally et.al.) [1-3]، استفاده شده است.

### ۳- روش PDF

در طی سالیان اخیر با توجه به مسائل زیست محیطی و توسعه سیستم های احتراقی، فعالیتهای زیادی در زمینه های احتراق توربولنت صورت پذیرفته است. یکی از روشهایی که در زمینه های تئوری سینیتیک و مکانیک آماری معمول شده استفاده از تابع چگالی احتمال می باشد [8]. در این روش بجای آنکه معادلات بقای اجزا برای ذرات مختلف حل شوند، غلظت اجزا از میدان کسر جرمی مخلوط بدست می آید. در مدل تابع دانسیته احتمال، می توان خواص ترموشیمیایی را با توجه به کسر مخلوط (mixture fraction) تعریف نمود. کسر مخلوط بصورت زیر تعریف می شود:



$$f = \frac{Z_i - Z_{i,ox}}{Z_{i,fuel} - Z_{i,ox}} \quad (1)$$

که در آن  $Z$ ، جزء جرمی المان سوخت یا اکسید کننده است. معادله متوسط کسر مخلوط بصورت زیر است:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{f}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \bar{f}) = \nabla \cdot \left( \frac{\mu_i}{\sigma_i} \nabla \bar{f} \right) + S_m + S_{user} \quad (2)$$

رابطه کسر مخلوط و نسبت تعادل نیز بصورت زیر بیان می شود:

$$F + r Q \rightarrow (1+r) P \quad (3)$$

$$f = \frac{\phi}{\phi + r} \quad (4)$$

از خصوصیات  $f$  این است که به کمک آن روابط شیمیایی به یک یا دو معادله بقای جزء جرمی تبدیل شده و تمام خصوصیات ترمودینامیکی به کسر مخلوط مربوط می شوند. اگر مدل آدیاباتیک باشد جزء جرمی، دانسیته و دما تابعی از کسر مخلوط است.

$$\phi_i = \phi_i(f) \quad (5)$$

برای سیستمهای غیر آدیاباتیک رابطه کسر مخلوط با خواص ترمودینامیکی به صورت زیر نوشته می شود:

$$\phi_i = \phi_i(f, H^*) \quad (6)$$

$$H^* = \sum_j m_j H_j = \sum_j m_j \left[ \int_{T_{ref,j}}^T c_{p,j} dT + h_j^0(T_{ref,j}) \right] \quad (7)$$

از خواص مهم دیگر تابع چگالی احتمال این است که مقادیر متوسط زمانی متغیرهایی مانند کسر مولی اجزا یا دما، با توجه به رابطه زیر بدست می آید:

$$\bar{\phi}_i = \int_0^1 p(f) \phi_i(f) df \quad (8)$$

ولی همانطور که قبلاً ذکر شده است، شکل تابع چگالی احتمال بایستی مشخص باشد. یکی از توابعی که برای شکل تابع PDF را نشان می دهد تابع  $\beta$  می باشد. این تابع بصورت زیر بیان می شود:

$$p(f) = \frac{f^{\alpha-1} (1-f)^{\beta-1}}{\int_0^1 f^{\alpha-1} (1-f)^{\beta-1} df} \quad (9)$$

$$\alpha = \bar{f} \left[ \frac{\bar{f}(1-\bar{f})}{\bar{f}^2} - 1 \right] \quad (10)$$

$$\beta = (1-\bar{f}) \left[ \frac{\bar{f}(1-\bar{f})}{\bar{f}^2} - 1 \right] \quad (11)$$

در روابط فوق،  $(\bar{f})$  میانگین،  $(\bar{f}^2)$  واریانس متغیرها می باشد [3].

#### ۴- مدل‌های توربولانسی

##### ۴-۱- مدل $k - \varepsilon$ استاندارد

انرژی جنبشی توربولانت  $k$  و نرخ اتلافات  $\varepsilon$  از معادلات انتقال زیر به دست می آید.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k U_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - \gamma_M + S_k \quad (12)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon U_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon$$

در این معادلات،  $G_k$  بیانگر انرژی جنبشی توربولانت تولید شده ناشی از متوسط گرادبانهای سرعت و  $G_b$  انرژی جنبشی توربولانت تولید شده ناشی از شناوری و  $\gamma_M$  بیانگر نوسانات تاخیر در توربولانت تراکم پذیر می باشد و اثرات تراکم پذیری را بیان می کند.  $C_{1\varepsilon}$ ،  $C_{2\varepsilon}$  و  $C_{3\varepsilon}$  ثابتهای مدل می باشد.  $\sigma_k$  و  $\sigma_\varepsilon$  به ترتیب اعداد پرانتل  $k$  و  $\varepsilon$  می باشد.  $S_k$  و  $S_\varepsilon$  ترمهای منبع می باشد که توسط کاربر تعریف می شود.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (13)$$

تعریف برای مقادیر ثابت به صورت زیر است:

$$C_{1\varepsilon} = 1.44, \quad C_{2\varepsilon} = 1.92, \quad C_\mu = 0.09, \quad \sigma_k = 1.0, \quad \sigma_\varepsilon = 1.3 \quad (14)$$

##### ۴-۲- مدل $k - \varepsilon$ RNG

در این مدل اعداد پرانتل توسط رابطه ای به معادلات متصل شود که در خلال حل به دست می آید و همچنین با ارائه مدلی برای ویسکوزیته موثر در اعداد رینولدز پایین نیز می توان از آن استفاده نمود. مدل  $k - \varepsilon$  RNG شبیه به مدل  $k - \varepsilon$  استاندارد می باشد:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k U_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon - \gamma_M + S_k \quad (15)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon U_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R\varepsilon + S_\varepsilon$$

$G_k$  بیانگر انرژی جنبشی توربولانت تولید شده ناشی از متوسط گرادبانهای سرعت،  $G_b$  انرژی جنبشی توربولانت تولید شده ناشی از شناوری و  $\gamma_M$  بیانگر نوسانات تاخیر در توربولانت تراکم پذیر می باشد و اثرات تراکم پذیری را بیان می کند.  $C_{1\varepsilon}$ ،  $C_{2\varepsilon}$  و  $C_{3\varepsilon}$  ثابت های مدل می باشد.  $\alpha_k$  و  $\alpha_\varepsilon$  به ترتیب معکوس اعداد پرانتل توربولانت می باشند. ویسکوزیته موثر در اعداد رینولدز پایین به صورت زیر مدل می شود:

$$d \left( \frac{\rho^2 k}{\sqrt{\varepsilon \mu}} \right) = 1.72 \frac{\hat{v}}{\sqrt{\hat{v}^3 - 1 + C_V}} d\hat{v} \quad (16)$$

$$\hat{v} = \mu_{eff/\mu}, \quad C_V \approx 100$$

برای اعداد رینولدز بالا ویسکوزیته موثر ( $\mu_{eff}$ ) به  $\mu_t$  تغییر می کند.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (17)$$

$$C_\mu = 0.0845$$



FCCI2010-1200

## سومین کنفرانس سوخت و احتراق ایران

تهران - دانشگاه صنعتی امیرکبیر - اسفند ماه ۱۳۸۸



دانشگاه صنعتی امیرکبیر  
دانشکده مهندسی هوافضا

معکوس اعداد توربولانت را در این مدل می توان به صورت زیر محاسبه نمود:

$$\left| \frac{\alpha - 1.3929}{\alpha_0 - 1.3929} \right|^{0.6321} \left| \frac{\alpha + 2.3929}{\alpha_0 + 2.3929} \right|^{0.3679} = \frac{\mu_{mol}}{\mu_{eff}} \quad (18)$$

درحالی که  $\alpha_0 = 1.0$  و برای اعداد رینولدز بالا می باشد.

$$\alpha_k = \alpha_\varepsilon \approx 1.393 \left( \frac{\mu_{mol}}{\mu_{eff}} \ll 1 \right) \quad (19)$$

اختلاف اساسی در مدل  $k - \varepsilon$  استاندارد با RNG در اضافه شدن ترم  $R_\varepsilon$  در معادله  $\varepsilon$  می باشد:

$$R_\varepsilon = \frac{C_\mu \rho \eta^3 (1 - \eta / \eta_0) \varepsilon^2}{1 + \beta \eta^3} k \quad (20)$$

در حالی که  $\eta = \frac{Sk}{\varepsilon}$  ،  $\eta_0 = 4.38$  و  $\beta = 0.012$  می باشد.

$$C_{2\varepsilon}^* = C_{2\varepsilon} + \frac{C_\mu \eta^3 (1 - \eta / \eta_0)}{1 + \beta \eta^3} \quad (21)$$

در معادله  $\varepsilon$  مقدار  $C_{2\varepsilon}^*$  از  $C_{2\varepsilon}$  در فرم استاندارد می باشد که این منجر به کاهش مقدار توزیع  $\varepsilon$  می شود. ثابت های مدل مطابق با تعریف فلونتت به صورت زیر می باشد:

$$\begin{aligned} C_{1\varepsilon} &= 1.42 \\ C_{2\varepsilon} &= 1.68 \end{aligned} \quad (22)$$

### ۳-۴ مدل $k - \varepsilon$ Realizable

این مدل شامل فرمول بتدی جدیدی برای ویسکوزیته توربولانس می باشد و معادله انتقال جدیدی برای نرخ اتلافات  $\varepsilon$  بر پایه متوسط ریشه دوم نوسانات ورتیسیتته بنا شده است.

معادلات انتقال برای  $k$  و  $\varepsilon$  در مدل  $k - \varepsilon$  Realizable به صورت زیر می باشد:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k U_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - \gamma_M + S_k \quad (23)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon U_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_{1\varepsilon} S \varepsilon - \rho C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{v \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon$$

در حالی که:

$$C_1 = \max \left[ 0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right] \quad (24)$$

$$\eta = S \frac{k}{\varepsilon}$$

$$S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}}$$

$G_k$  بیانگر انرژی جنبشی توربولانت تولید شده ناشی از متوسط گرادپانه های سرعت،  $G_b$  انرژی جنبشی توربولانت تولید شده ناشی از شناوری و  $\gamma_M$  بیانگر نوسانات تاخیر در توربولانت تراکم پذیر می باشد و اثرات تراکم را بیان می کند.  $C_{1\varepsilon}$ ،  $C_{2\varepsilon}$  ثابت های مدل می باشد و  $\sigma_\varepsilon$ ،  $\sigma_k$  اعداد پرائنتل توربولانت می باشند.  $S_\varepsilon$ ،  $S_k$  ترمهای منبع هستند که توسط کاربرد تعریف می شود. معادله  $k$  همان معادله استفاده شده در فرم استاندارد و RNG می باشد ولی در معادله  $\varepsilon$ ، ترم دوم از عبارت سمت راست، عبارت تولید از ترم  $k$  حذف شده است و به عبارتی یعنی طیف انتقال انرژی بهتر بیان شده است.

مطابق با فرمهای دیگر  $k - \varepsilon$  ویسکوزیته توربولانت مطابق زیر محاسبه شده است:



$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

(۲۴)

تفاوت این روش با مدل‌های دیگر در این است که  $C_\mu$  ثابت نمی باشد.

$$C_\mu = \frac{1}{\Lambda_o + \Lambda_s \frac{kU^*}{\varepsilon}}$$

$$U^* = \sqrt{S_{ij}S_{ij} + \tilde{\Omega}_{ij}\tilde{\Omega}_{ij}}$$

(۲۴)

$$\tilde{\Omega}_{ij} = \Omega_{ij} - Z\varepsilon_{ij}K\omega_k$$

$$\Omega_{ij} = \bar{\Omega}_{ij} - \varepsilon_{ij}K\omega_k$$

در حالی که  $\bar{\Omega}_{ij}$  تانسور متوسط نرخ دوران مشاهده شده در حالت مرجع با سرعت زاویه ای  $\omega_k$  می باشد.  $\Lambda_o, \Lambda_s$  ثابت‌های مدل می باشند که در زیر بیان شده است:

$$\Lambda_o = 4.04, \quad \Lambda_s = \sqrt{6}C_\mu \Phi$$

$$\Phi = \frac{1}{3}C_\mu^{-1}(\sqrt{6}w), \quad w = \frac{S_{ij}S_{jk}S_{ki}}{\tilde{S}^3}, \quad \tilde{S} = \sqrt{S_{ij}S_{ij}}$$

(۲۴)

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial U_j}{\partial X_i} + \frac{\partial U_i}{\partial X_j} \right)$$

ثابت های مدل به صورت زیر بیان شده است:

$$C_{1\varepsilon} = 1.44 \quad C_2 = 1.9 \quad \sigma_k = 1.0 \quad \sigma_\varepsilon = 1.2$$

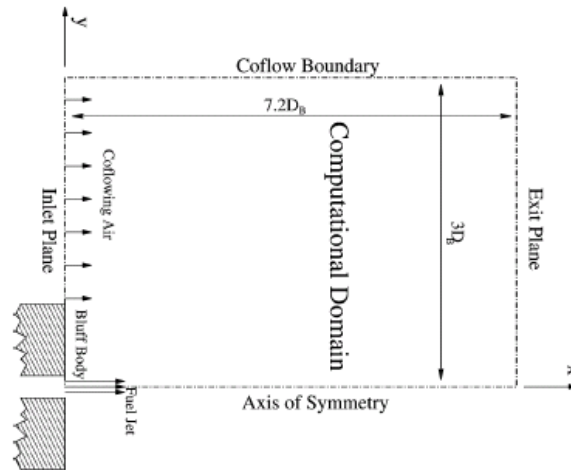
(۲۴)

## ۵- سینتیک شیمیایی با واکنشهای چند مرحله ای

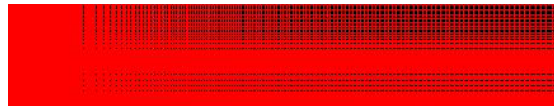
همانطوریکه قبلاً ذکر شد، در شعله های توربولنت رادیکالهای فعال نقش مهمی در ساختار شعله و فرایند احتراق بازی می کنند. در احتراق هیدروکربنها ممکن است شامل چند هزار واکنش بنیادی باشد. اما فقط چند واکنش وجود دارند که نقش مهم در فرایند احتراق بازی می کنند [9]. در این مقاله از واکنش اسکلتی سانگ و همکارانش استفاده می شود. لازم به ذکر است که از مکانیزم اسکلتی با تحلیل PDF استفاده می شود. این مکانیزم دارای ۱۹ اجزا و ۱۵ مرحله واکنش بنیادی می باشد.

## ۶- مدل فیزیکی مسأله

شکل (۱) ناحیه مورد نظر در تحلیل عددی را نشان می دهد. در حقیقت ناحیه مورد مطالعه یک لوله حلقوی که توسط دیواره هایی جریان سوخت و اکسید کننده از هم جدا شده اند، می باشد. این ناحیه شامل ورودی هوا، ورودی سوخت، دیواره جدا کننده ناحیه سوخت و هوا با دمای ثابت و خروجی که در پایین دست ناحیه قرار دارد. نواحی که در امتداد ورودی سوخت و اکسید کننده می باشند بصورت ریزتری مش بندی می شوند. چون ناحیه حل بصورت متقارن می باشد، لذا بمنظور کاهش حجم محاسباتی در حل عددی، تحلیل فقط برای نیمه بالایی مدل صورت می پذیرد. نمونه ای از شبکه تولید شده در این تحلیل در شکل (۲) آورده شده است.



شکل ۱- ناحیه فیزیکی مورد مطالعه



شکل ۲- شبکه تولید شده در فضای فیزیکی

## ۷- همگرایی شبکه ها

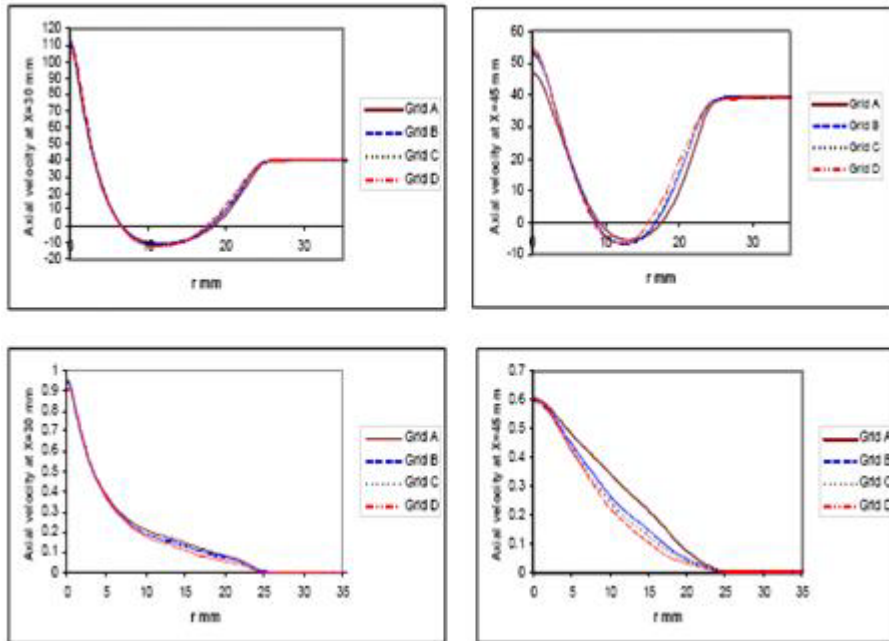
یکی از خطاهای عددی در الگوریتمهای محاسباتی گسسته سازی فضایی می باشد. خطای گسسته سازی فضایی، از گسسته سازی فضایی در روش نرخ محدود و همچنین شالوده تخمین زدن و میان یابی ناشی از اندازه سلولهای شبکه نتیجه می شود. شبکه های مستطیلی غیر هم شکل مطابق با جدول (۱) در فضای محاسباتی شکل (۳) گسترده شده اند،

جدول ۱- شبکه های استفاده شده برای مطالعه همگرایی شبکه ها

	شبهه A	شبهه B	شبهه C	شبهه D
Nx	۱۲۰	۹۶	۷۲	۴۸
Ny	۱۶۰	۱۲۸	۹۶	۶۴
ناحیه a	۲۱	۱۷	۱۳	۸
ناحیه b	۲۸	۲۳	۱۷	۱۱
ناحیه c	۸۶	۶۸	۵۲	۳۵

؛ (a)  
؛ (b)  
؛ (c)  
nm

این شبکه ها در ناحیه به گردش در آمده و گلوگاهی غلظت بیشتری دارند، و در ناحیه انتشار یافته جت مانند در فاصله شعاعی ناحیه جدا شده بین جریان هوای کنار گذر و جسم مانع غلظت بیشتری دارد. جزئیات مربوط به مشهای استفاده شده در این بخش در جدول ۱ نمایش داده شده است و با مطالعه جزئیات فوق می توان دریافت که دقت نتایج محاسبات با افزایش سلولهای شبکه ها (یا هم ارز با هزینه محاسبات) افزایش می یابد. به عبارت دیگر افزایش ضریب منطری سلولها تاثیر مخالفی روی همگرایی از حل برای یکبار تکرار دارد. ماکزیمم ضریب منطری در نظر گرفته برای شبکه ها کمتر از ۴۰ می باشد.



شکل ۴- مطالعه همگرایی شبکه ها: پروفایل شعاعی متوسط سرعت محوری و نسبت ترکیب در فواصل مختلف محوری از جسم مانع در شکل (۳) همگرایی شبکه ها برای چهار شبکه مختلف جدول (۱) برای شعله هیدروژن و متان با مدل شیمیایی فلیم لت و مدل توربولانس Realizable k-ε مشاهده می شود. در این شکل مقادیر متوسط سرعت محوری، متوسط نسبت ترکیب و متوسط واریانس نسبت ترکیب در فاصله  $x=30$  mm ،  $x=45$  mm از جسم مانع نمایش داده شده است. در شکل (۳) اختلاف نتایج شبکه D با سه شبکه دیگر به وضوح دیده می شود. خطا در شبکه A کمتر از 3%، در شبکه B کمتر از 8% و در شبکه C کمتر از 13% می باشد.

## ۸- شرایط مرزی مسأله

- شرایط مرزی مسأله شامل مرز ورودی سوخت و هوا، مرز خروجی، مرزهای دیواره و مرز آزاد به قرار زیر می باشد.
- ۱- مرز ورودی سوخت :  
فرض می شود که متان و هوا بصورت استوکیومتریک و محوری وارد محفظه شوند. و پروفیل سرعت ورودی یکنواخت و برابر با  $118 \text{ m/s}$  باشد. بعلاوه کسر جرمی متان و هیدروژن برابر با  $Y_{CH_4} = 0.889, Y_{H_2} = 0.111$  می باشد.
  - ۲- مرز ورودی اکسید کننده:  
سرعت هوای ورودی به محفظه در حدود  $40 \text{ m/s}$  است. بعلاوه کسر جرمی اکسیژن ورودی برابر با  $Y_{O_2} = 0.2226$  و کسر جرمی نیتروژن ورودی برابر با  $Y_{N_2} = 0.7774$  می باشد.
  - ۳- مرز خروجی :  
فرض می شود خروجی در فاصله ای از ناحیه بالادستی شعله قرار داشته باشد که اثرات آن بر ساختار شعله ضعیف باشد که در این مقاله برابر با  $360 \text{ mm}$  در نظر گرفته شده است. در این مرز گرادیان تمام متغیرها در جهت محوری صفر می باشد.
  - ۴- مرز دیواره و جسم مانع:  
فرض می شود که دیواره بصورت نفوذ ناپذیر می باشد و  $(T_{wall} = 298 \text{ K})$ . همچنین شرط عدم لغزش در آن برقرار می باشد.
  - ۵- مرز محور:  
در این مرز فرض می شود که گرادیان شعاعی همه متغیرها صفر باشد.

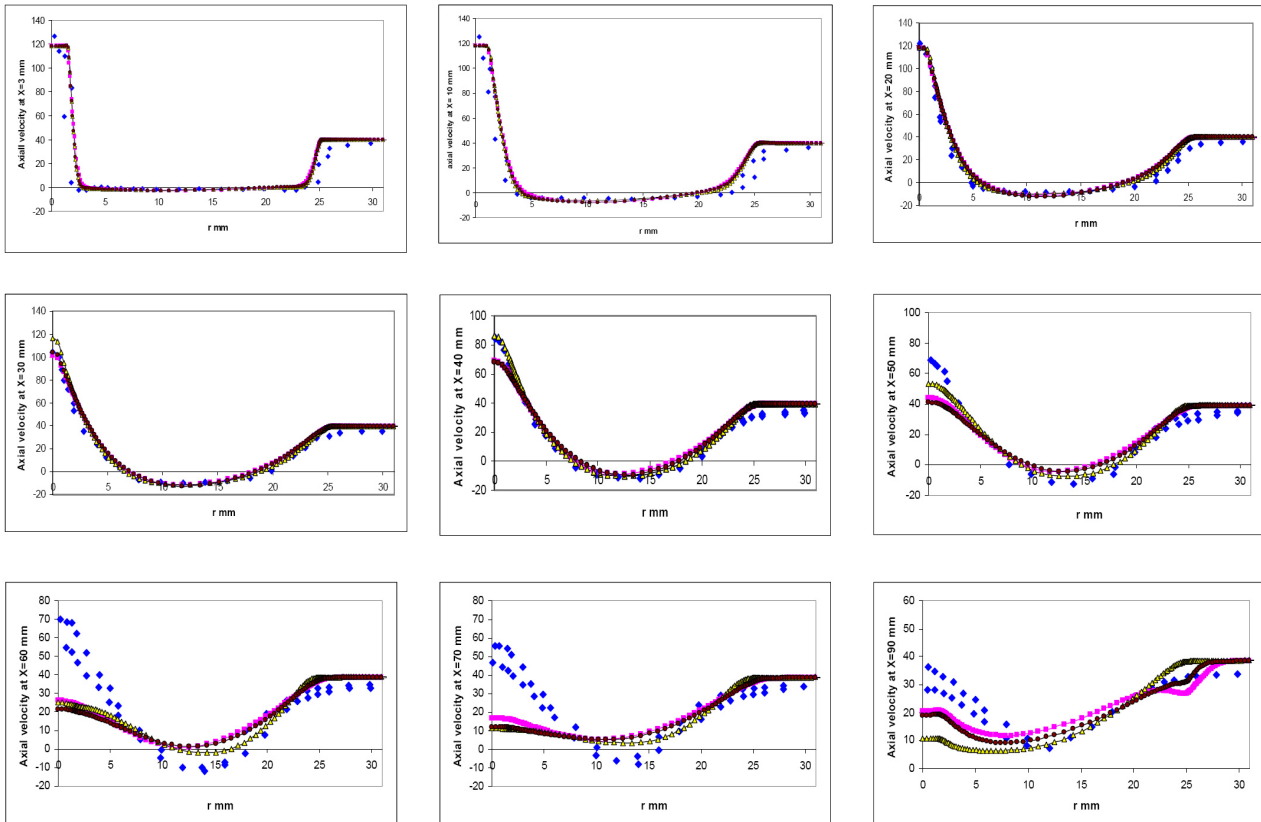


## ۹- روش حل معادلات حاکم

- برای شبیه سازی جریان از شکل عمومی معادلات حاکم که در مرجع [10] آمده، استفاده شده است. فر ضیاتی که برای نوشتن معادلات حاکم، لحاظ شده عبارتست از:
- ۱- جریان بصورت Steady state در نظر گرفته می شود.
  - ۲- فرض می شود که جریان بصورت تراکم ناپذیر باشد.
  - ۳- از قوانین فیگ، نیوتن و معادله حالت گاز در این تحلیل استفاده می شود.
  - ۴- فرض می شود که جریان بصورت توربولنت است. از مدل شیمیایی فلیم لت و سه مدل توربولانس مختلف دو معادله ای  $k-\epsilon$  استاندارد،  $k-\epsilon$  RNG و  $k-\epsilon$  Realizable استفاده شده است.
  - ۵- روش حجم محدود برای گسسته سازی معادلات حاکم استفاده می شود.

## ۱۰- بررسی نتایج عددی

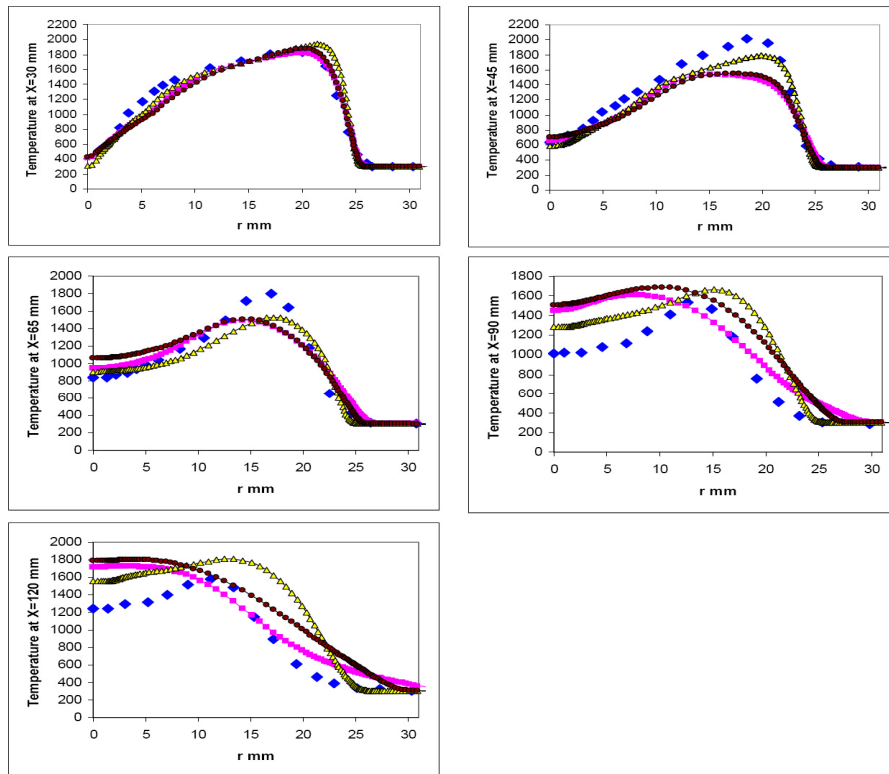
مطابق نتایج تجربی بدست آمده توسط ماسری و دالی شعله پایدار شده جسم مانع به سه ناحیه تقسیم می شود: ناحیه به گردش در آمده (Recirculation zone)، ناحیه گلوگاهی (Neck zone) و ناحیه مانند جت (Jet like zone). اثرات مدل های مختلف توربولانس در این سه ناحیه بررسی می شود. با توجه به شکل متقارن محفظه احتراق (۱۵۰\*۳۶۰) و مقایسه خطوط سرعت ثابت تجربی و تئوری بدست آمده در این آزمایش فواصل محوری فوق از جسم مانع می تواند به عنوان این نواحی در نظر گرفته شود. ( $x=1: 65$  mm ناحیه به گردش در آمده،  $x=65: 90$  mm ناحیه گلوگاهی،  $90: 360$  mm  $x=$  ناحیه مانند جت). در ابتدا متوسط سرعت های شعاعی بدست آمده از حل معادلات RANS در فواصل مختلف از جسم مانع (X) توسط مدل شیمیایی فلیم لت و سه مدل توربولانس مختلف ( $k-\epsilon$  استاندارد،  $k-\epsilon$  RNG و  $k-\epsilon$  Realizable) به ترتیب در شکل (۵) نمایش داده شده است و نتایج محاسبات با نتایج تجربی بدست آمده توسط ماسری و دالی مقایسه شده است. لازم به ذکر است که در شکل های زیر نقاط لوزی: مقادیر تجربی، نقاط مربع:  $k-\epsilon$  استاندارد، نقاط دایره:  $k-\epsilon$  RNG، نقاط مثلث:  $k-\epsilon$  Realizable را نشان می دهند



شکل ۵- پروفایل شعاعی مقادیر متوسط سرعت محوری محاسبه شده در فواصل مختلف محوری از جسم مانع

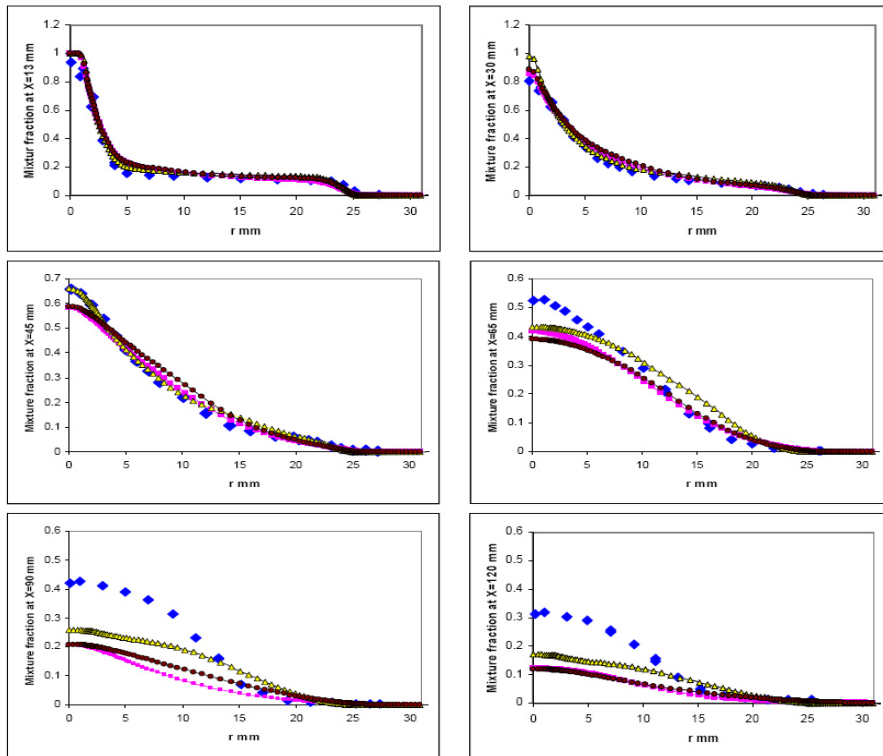
با توجه به شکل (۵) مدل توربولانس ( $k - \epsilon$  Realizable) نتایج محاسباتی نزدیکتری نسبت به سایر مدلها در مقایسه با جوابهای تجربی دارا می باشد و می توان گفت در نواحی به گردش در آمده ( $x=3, 10, 20, 30, 40, 50$ ) نتایج محاسباتی بر نتایج تجربی منطبق می باشد.

متوسط دمای استاتیک از حل معادلات RANS، در فواصل مختلف از جسم مانع ( $x$ ) توسط مدل شیمیایی فلیم لت و سه مدل توربولانس مختلف ( $k - \epsilon$  استاندارد،  $k - \epsilon$  RNG و  $k - \epsilon$  Realizable)، در شکل (۶) نمایش داده شده است، در دو ناحیه به گردش در آمده و گلوگاهی مدل  $k - \epsilon$  Realizable پیش بینی مناسبتری نسبت به دو مدل دیگر دارد و این موضوع به علت چرخش جریان در این نواحی می باشد. در ناحیه انتشار یافته مانند جت مدل  $k - \epsilon$  استاندارد نتایج نزدیکتری نسبت به نتایج تجربی دارد اما مدل  $k - \epsilon$  Realizable روند نتایج تجربی را بهتر دنبال می شود.

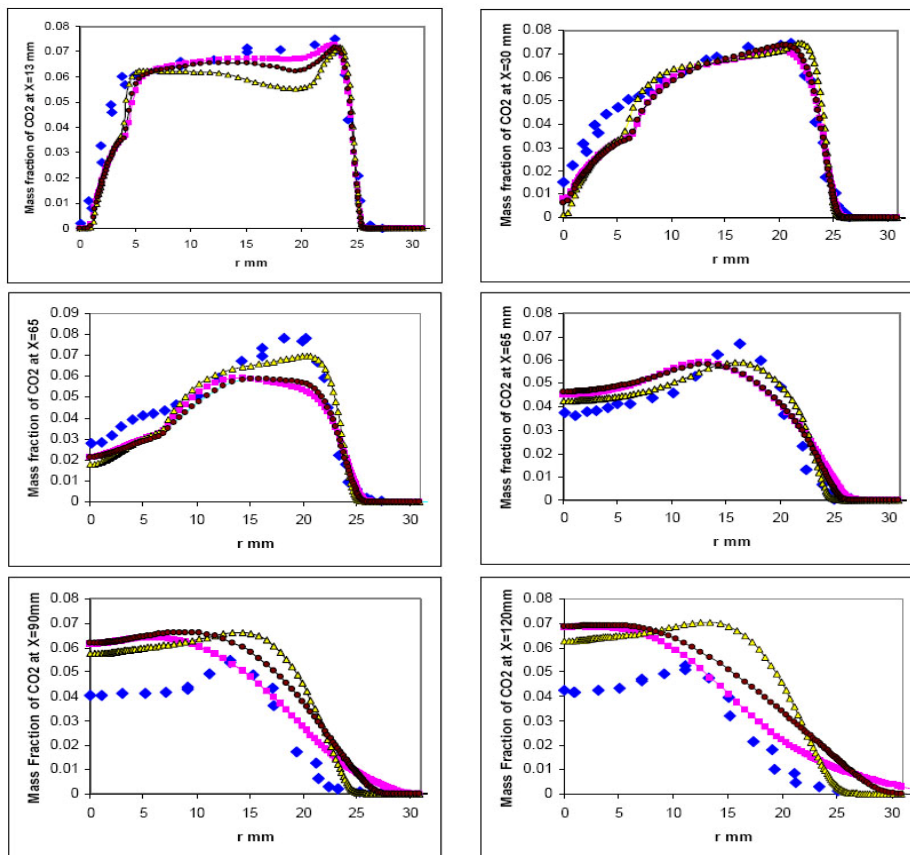


شکل ۶- پروفایل شعاعی دمای متوسط محاسبه شده در فواصل مختلف محوری از جسم مانع

در شکل (۷) متوسط نسبت اختلاط در فواصل مختلف محوری (X) از جسم مانع توسط مدل شیمیایی فلیم لت و سه مدل مختلف توربولانس ( $k-\epsilon$  استاندارد،  $k-\epsilon$  RNG و  $k-\epsilon$  Realizable) نمایش داده شده است و در هر سه ناحیه (به گردش در آمده، گلوگاهی و انتشار یافته مانند جت) مدل توربولانس  $k-\epsilon$  Realizable پذیرفته شده است و نتایج محاسباتی نزدیکتری به نتایج تجربی دارد. همچنین متوسط نسبت جرمی  $\text{CO}_2$  در فواصل مختلف از جسم مانع (X) توسط مدل شیمیایی فلیم لت و سه مدل توربولانس مختلف ( $k-\epsilon$  استاندارد،  $k-\epsilon$  RNG و  $k-\epsilon$  Realizable) در شکل (۸) نمایش داده شده است. در شکل (۸) در ناحیه به گردش در آمده (به غیر از  $x=13\text{mm}$ ) مدل  $k-\epsilon$  Realizable پیش بینی مناسبی از متوسط نسبت جرمی دی اکسید کربن دارد. در نواحی گلوگاهی و انتشار یافته مانند جت، مدل  $k-\epsilon$  استاندارد نتایج نزدیکتری به مقادیر تجربی دارد اما از لحاظ دنبال نمودن نتایج و روند افت و خیز نمودار باز هم مدل  $k-\epsilon$  Realizable بیشتر قابل پذیرش می باشد.



شکل ۷- پروفایل شعاعی مقادیر متوسط نسبت اختلاط محاسبه شده در فواصل مختلف محوری از جسم مانع



شکل ۸- پروفایل شعاعی مقادیر متوسط نسبت جرمی دی اکسید کربن محاسبه شده در فواصل مختلف محوری از جسم مانع



## نتیجه گیری

در این مقاله احتراق سوخت متان/هیدروژن و هوا در شرایط استوکیومتریکی به صورت عددی و به روش حجم محدود مورد مطالعه قرار گرفته شده است. برای مدلسازی احتراق از سه مدل مختلف توربولانس ( $k - \epsilon$  استاندارد،  $k - \epsilon$  RNG و  $k - \epsilon$  Realizable) و همچنین از تابع چگال احتمال و پیش فرض فلیم لت، به مطالعه ساختار شعله دیفیوژن پرداخته شده است. در مدل‌های  $k - \epsilon$  استاندارد و  $k - \epsilon$  RNG تاثیر چرخش خطوط جریان (Stream line curvature) در جریان توربولانت، پدیده اختلاط (Mixing) در جریان توربولانت (که مانند تاثیر چرخش خطوط جریان می باشد) و ناهمسانی در نسبت‌های رینولدز نرمال نمی تواند توصیف شود، ولی در مدل ( $k - \epsilon$  Realizable) تاثیر چرخش خطوط جریان و پدیده اختلاط در قالب‌های چرخش و دوران در مدل مطرح شده است و این مدل در ناحیه به گردش در آمده پیش بینی خوبی را می تواند ارائه دهد. اما در نواحی که مساله چرخش خطوط جریان و ترکیب زیاد مطرح نشود (ناحیه انتشار یافته مانند جت) این مدل در رقابت از مدل  $k - \epsilon$  استاندارد عقب می افتد و مدل  $k - \epsilon$  استاندارد در ناحیه انتشار یافته مانند جت می تواند نتایج مطلوبتری را ارائه کند. در ناحیه گلوگاهی نیز تا حدی اثرات چرخش خطوط جریان باقی مانده است و به این علت مدل  $k - \epsilon$  Realizable نسبت به سایر مدلها می تواند نتایج مطلوبتری ارائه دهد.

## مراجع

- 1- B.B.Dally, A. R. Marsi, R. S. Barlow, G. J. Fiechtner, " *Instantaneous and Mean Compositional Structure of Bluff-body Stabilized Nonpremixed Flames* ", Combustion And Flame 114:119-148 1998.
- 2- A.R. Masri, J. B. Kelman, B. B. Dally, " *The Instantaneous Spatial Structure of the Recirculation Zone in Bluff-body Stabilized Flames* ", NSW, 2006.
- 3- A.R. Masri, R.W. Dibble and R.S. Barlow, " *Raman-rayleigh measurements in bluff-body stabilised flames of hydrocarbon fuels symposium (International) on Combustion* ", Volume 24, Issue 1, 1992, Pages 317-324.
- 4- B. Merci, E. Dick, J. Vierendeels, T. W. J. Peters, D. Roekarts , " *Application of a New Cubic Turbulence Model to Piloted and Bluff-Body Diffusion Flames* ", Combustion And Flame 126:1533-1556 2001.
- 5- B. Merci, D. Roekaerts, B.Naud, S.B.Pope, " *Comparative study of micromixing models in transposed scalar PDF simulations of turbulent nonpremixed bluff-body flames* ", Combustion And Flame 146:109-130 2006.
- 6- Sung et.al., C. T., Hanson, Davidson, D. F., Gardiner, W. C., Jr., Lissianski, V., Smith, G. P., Golden, D. M., Frenklach, M., and Goldenberg, M., [http://www.me.berkeley.edu/gri\\_mech/](http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/).
- 7- K. Liu, S.B. Pope, D. A. Caughey, " *Calculations of bluff-body stabilized flames using a joint probability density function model with detailed chemistry* ", Combustion and Flame 141 89-117 2005.
- 8- A.R. Masri , " *Computation of Bluff-Body Stabilised Jets and Flames* ", TNF-5 The University of Sydney NSW, 2006.
- 9- B.B. Dally, D.F. Fletcher and A.R. Masri, " *Modelling of Turbulent Flames Stabilised on a Bluff-Body* ", Combustion Theory and Modelling, Vol. 2, 1998, pp. 193-219.
- 10- B. Pope, " *PDF Method For Turbulent Flows* ", Energy Combust. Sci. 1985, Vol. 11, pp. 119 192.
- 11- S. H. Kim, K. Y. Huh, " *Application of the Elliptic Conditional Moment Closure Model to a Two-Dimensional Nonpremixed Methanol Bluff-Body Flame* ", Combustion And Flame 120:75-90 2000.
- 12- S. H. Kim , H. Pitsch , " *Mixing characteristics and structure of a turbulent jet diffusion flame stabilized on a bluff-body* ", Center for Turbulence Research Annual Research Briefs 2005.
- 13- Hossain, M., Jones, J.C. and Malalasekera, W., " *Modelling of a Bluff-Body Nonpremixed Flame Using A Coupled Radiation/Flamelet Combustion Model* ", Flow Turbulence and Combustion, 67, 217-234, 2001, ISSN 1386-6184.