

## استفاده از مدل احتراقی تولید فلیملت منیفلود در شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ آتش استخری و مقایسه با نتایج مدل احتراقی دیگر

محمد صفرزاده<sup>1</sup>، قاسم حیدری نژاد<sup>2</sup>، هادی پاسدار شهری<sup>3\*</sup>

1- دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، m.safarzadeh@modares.ac.ir

2- استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، gheidari@modares.ac.ir

3- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، pasdar@modares.ac.ir

\* نویسنده مخاطب

(تاریخ دریافت: 1400/02/19، دریافت آخرین اصلاحات: 1400/05/17، پذیرش: 1400/05/24)

**چکیده:** از میان مطالعات تجربی و عددی که در زمینه آتش انجام شده است، آتش استخری بیش از سایر سناریوهای آتش، مورد استقبال قرار گرفته است. در این مقاله، به منظور بررسی تأثیر مدل‌های احتراقی مختلف بر نتایج شبیه‌سازی آتش، آتش استخری مطالعه می‌شود. به این منظور مدل احتراقی تولید فلیملت منیفلود به کار گرفته شده و نتایج آن با سه مدل احتراقی سینتیک بسیار سریع، اضمحلال گردابه و مفهوم اضمحلال گردابه مقایسه می‌شود. با مقایسه‌ی نتایج متوسط سرعت و نوسانات آن، مشاهده می‌شود که دقت مدل احتراقی تولید فلیملت منیفلود، بدون در نظر گرفتن اثر تشعشع، در پیش‌بینی پدیده‌ی پوفینگ و فرکانس آن، متوسط مجذور نوسانات سرعت عمودی و انرژی جنبشی اغتشاشی بهتر از سایر مدل‌های احتراقی است. به عنوان مثال، نتایج مدل احتراقی تولید فلیملت منیفلود در پیش‌بینی فرکانس پوفینگ کمتر از 3 درصد، خطای نسبی با نتایج تجربی دارد؛ اما سایر مدل‌های احتراقی بیشتر از 10 درصد خطا دارند. در پیش‌بینی میدان سرعت، مدل احتراقی اضمحلال گردابه، دقت بالاتری نسبت به مدل تولید فلیملت منیفلود دارد.

**کلیدواژگان:** مدل احتراقی، شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ، تولید فلیملت منیفلود، اضمحلال گردابه، سینتیک سریع.

### مقدمه

آتش استخری به عبارت خیلی ساده آتشی است که از منبع سوخت در مجاورت هوا شکل بگیرد. اصولاً آتش استخری در مواردی تعریف می‌شود که یک منبع سوخت در معرض اکسیژن قرار گیرد و پس از انجام واکنش احتراق، شعله‌های آتش به صورت عمودی رشد پیدا کنند (البته گاهی اوقات به علت جریان باد، ممکن است شعله منحرف شود). آتش استخری ابتدا با جرقه و یا عامل دیگر شکل گرفته و در اطراف منبع سوخت شروع به اشتعال می‌کند و از آنجا که در اطراف منبع سوخت، نسبت سوخت به هوا زیاد است؛ احتراق غنی از سوخت شکل می‌گیرد. در مرحله بعد، گازهای داغ حاصل از فرآیند احتراق به دلیل نیروهای شناوری به سمت بالا حرکت می‌کنند. در واقع در این مرحله شعله شکل می‌گیرد [1].

با شکل‌گیری شعله و رشد آن، به تدریج جریان هوایی را از محیط اطراف با خود همراه می‌کند که این سبب می‌شود شعله‌های آتش کمی کشیده شوند و سرانجام، این کشیدگی منجر به شعله‌های گسسته در انتهای آتش می‌شود [2]. نمونه‌هایی از آتش استخری در آتش‌سوزی‌های روزمره اتفاق می‌افتد. آتش حاصل از آتش‌سوزی در منابع سوخت در پالایشگاه‌ها [3] نمونه‌ی بارز آتش استخری است که با استفاده از شبیه‌سازی عددی می‌توان چالش‌ها، روش اطفاء و طراحی مناسب در زمینه‌ی جلوگیری از آتش‌سوزی را فراهم کرد [4].

نحوه‌ی مدل‌سازی اغتشاش و احتراق از جمله مباحث بسیار مهم در شبیه‌سازی عددی آتش است. در مدل‌سازی‌های اولیه‌ی آتش از روش متوسط‌گیری رینولدز<sup>1</sup> به‌منظور مدل‌سازی اغتشاش در آتش استفاده می‌شد [5]؛ اما مک‌گراتان [6] اولین مطالعه‌ی عددی در زمینه‌ی استفاده از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ در شبیه‌سازی آتش در فضای باز و بسته را انجام داد و در ابتدای سال 2000 میلادی نرم‌افزار FDS بر مبنای روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ عرضه شد و همچنین حلگر فایرفوم<sup>2</sup> که بر اساس کتابخانه‌های نرم‌افزار اپن‌فوم<sup>3</sup> تهیه شده بود نیز، به‌منظور مدل‌سازی آتش با استفاده از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ استفاده می‌شد که این امر باعث شد تحقیقات مختلف عددی در زمینه‌ی آتش با استفاده از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ انجام شود.

علاوه بر مدل اغتشاشی، مدل احتراقی نیز یکی دیگر از مباحث موردنیاز در شبیه‌سازی عددی آتش است. در تحقیقات عددی اولیه از مدل‌های ابتدایی نظیر منبع گرمایی حجمی<sup>4</sup> [7] استفاده می‌شد که در این مدل احتراقی، در واقع واکنش‌های احتراقی دیده نمی‌شود و نمی‌توان گونه‌های واکنشی را به‌دست آورد. به‌تدریج مدل‌های احتراقی نظیر شکست گردابه<sup>5</sup>، اضمحلال گردابه<sup>6</sup> و سینتیک بسیار سریع<sup>7</sup> [8] نیز در شبیه‌سازی عددی آتش مورد استفاده قرار گرفت. هر یک از این مدل‌های احتراقی در سناریوی خاصی جوابگوست و می‌توان گونه‌های محدودی را شبیه‌سازی کرد. به‌عنوان مثال، حیدری‌نژاد و همکاران [9] با استفاده از مدل احتراقی اضمحلال گردابه و سینتیک بسیار سریع، تنها قادر به مدل‌سازی گونه‌های کربن مونواکسید، کربن دی‌اکسید و بخار آب بودند. همچنین با توجه به استفاده از مدل‌های احتراقی بر پایه‌ی سینتیک سریع، نتایج سرعت مقداری از نتایج تجربی (در نزدیکی شعله) فاصله دارد.

به‌مرور زمان و با توجه به نیاز به مدل‌سازی گونه‌های متفاوت در شبیه‌سازی آتش، توجه تحقیقات عددی در زمینه‌ی آتش به سمت استفاده از مدل احتراقی نظیر فلیملت آرام<sup>8</sup>، معطوف شد [10, 11]. با استفاده از این مدل احتراقی، می‌توان سینتیک کامل و کاهش یافته را در شبیه‌سازی عددی به‌کار برد [12] و به‌این ترتیب تمام گونه‌های حاصل از احتراق را مدل‌سازی کرد [13]. نکته‌ی مثبت این مدل‌های احتراقی، داشتن زمان محاسباتی بسیار کم، در مقایسه با مدل‌های احتراقی دیگر است. به‌گونه‌ای که گاهی مدل‌سازی با استفاده از سینتیک کامل توسط مدل احتراقی همچون مفهوم اضمحلال گردابه<sup>9</sup> در هندسه‌هایی که تعداد شبکه‌ی محاسباتی زیاد باشد، عملاً غیرممکن است.

لی و همکاران [14]، مدل احتراقی مفهوم اضمحلال گردابه و فلیملت آرام را در شبیه‌سازی آتش به‌کار بردند. آن‌ها از سینتیک GRI3.0 برای فلیملت آرام و سینتیک تک‌مرحله‌ای برای مفهوم اضمحلال گردابه استفاده کردند. نتایج دمای متوسط در خط مرکزی و محوری، برتری نسبی مدل احتراقی مفهوم اضمحلال گردابه را نشان می‌دهد (به‌طور نسبی نتایج این مدل احتراقی در حدود 20 درصد به نتایج تجربی نزدیک‌تر است). لی و همکاران [14] به‌منظور اصلاح مدل احتراقی فلیملت آرام و اعمال تأثیر تشعشع، دو روش ارائه می‌دهند. در روش اول، از معادله انتقال آنالپی استفاده می‌شود و در روش دوم، تأثیر تشعشع در تشکیل کتابخانه اعمال می‌شود. در نهایت مشاهده می‌شود که اعمال تشعشع نتایج را بهتر می‌کند. همچنین، آن‌ها استفاده از مدل احتراقی فلیملت ناپایا، به‌علت سازگاری با پدیده‌ی خاموشی و اشتعال مجدد، را پیشنهاد می‌کنند.

از جمله محدودیت‌های دیگر مدل احتراقی فلیملت آرام، عدم شبیه‌سازی خاموشی در احتراق است که کارایی این مدل را در سناریوهایی نظیر اتاق محبوس، محدود می‌سازد. مدل احتراقی تولید فلیملت منیفولد<sup>10</sup> از دسته مدل‌های احتراقی فلیملت است که امکان شبیه‌سازی خاموشی در احتراق را داراست و همچنین امکان استفاده از سینتیک کاهش یافته و کامل را داراست و هزینه‌ی محاسباتی پایینی به نسبت سایر مدل‌های احتراقی غیر فلیملت دارد [15].

با توجه به مرور مطالعات، می‌توان دریافت که با توجه به این که یکی از مخاطرات آتش، نشر گونه‌های سمی حاصل از احتراق است؛ بنابراین، مدل‌سازی دقیق گونه‌ها، یکی از دغدغه‌های مهم در شبیه‌سازی آتش است. از این رو در مطالعات عددی اخیر به سمت مدل‌های

1. Reynolds Averaged Navier Stokes (RANS)
2. FireFoam
3. OpenFOAM
4. Volumetric Heat Source (VHS)
5. Eddy Brake Up (EBU)
6. Eddy Dissipation Model (EDM)
7. Infinite Fast Chemistry combustion model (IFC)
8. Steady Laminar Flamelet
9. Eddy Dissipation Concept (EDC)
10. Flamelet Generated Manifold (FGM)

احتراقی فلیملت تمایل پیدا شده است. از بین مدل‌های فلیملت، مدل احتراقی تولید فلیملت منیفولد با داشتن مزایایی همچون، مدل‌سازی خاموشی آتش، داشتن زمان محاسباتی پایین و امکان استفاده از سینتیک با دقت بالاتر، به‌عنوان یکی از مدل‌های احتراقی بسیار معتبر در شبیه‌سازی آتش مورد استفاده قرار می‌گیرد. بررسی نتایج این مدل در سناریوهای مختلف آتش می‌تواند کارایی این مدل احتراقی را بیش‌ازپیش، نمایان سازد؛ بنابراین لزوم مقایسه‌ی نتایج مدل‌های احتراقی مختلف با مدل احتراقی تولید فلیملت منیفولد در سناریویی مرجع، ازجمله خلأهای مطالعات پیشین است. در این مطالعه با استفاده از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ و مدل احتراقی تولید فلیملت منیفولد که مدل احتراقی کاملی است و جزئیات دقیق گونه‌های خطرناک در آتش را پیش‌بینی می‌کند، میدان سرعت و اغتشاشی در سناریوی آتش استخری، موردبررسی قرار می‌گیرد و نتایج این مدل احتراقی با مدل‌های احتراقی سینتیک خیلی سریع، اضمحلال گردابه و مفهوم اضمحلال گردابه مقایسه می‌شود.

## معادلات حاکم

آتش یک جریان احتراقی غیر پیش آمیخته است. با استفاده از روش فیلترگیری فاوره<sup>1</sup>، می‌توان معادلات مربوط به جریان واکنشی نظیر پیوستگی، تکانه، انرژی، کسر مخلوط و معادلات اغتشاش را فیلترگیری کرد و در شبیه‌سازی استفاده نمود. معادلات موردنیاز برای مدل‌سازی آتش در صورتی که مدل‌های احتراقی سینتیک خیلی سریع، اضمحلال گردابه و مفهوم اضمحلال گردابه استفاده شود، به‌صورت روابط 1 الی 4 می‌شود.

$$\frac{\partial(\bar{\rho})}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{\rho}\bar{u}_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1) \text{ پیوستگی}$$

$$\frac{\partial(\bar{\rho}\bar{u}_j)}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{\rho}\bar{u}_i\bar{u}_j)}{\partial x_i} = -\frac{\partial\bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial\bar{\tau}_{ij}}{\partial x_i} - \frac{\partial(\bar{\tau}_{u_i u_j})}{\partial x_i} + (\bar{\rho} - \rho_{ref})g_i \quad (2) \text{ تکانه}$$

$$\frac{\partial(\bar{\rho}\bar{h}_s)}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{\rho}\bar{u}_i\bar{h}_s)}{\partial x_i} = \frac{D\bar{p}}{Dt} - \frac{\partial\bar{q}_i}{\partial x_i} + \frac{\partial\bar{\tau}_{u_i T}}{\partial x_i} + \bar{\omega}_\tau + S_{rad} \quad (3) \text{ انرژی}$$

$$\frac{\partial(\bar{\rho}\bar{\phi})}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{\rho}\bar{u}_i\bar{\phi})}{\partial x_i} = -\frac{\partial\bar{q}_\phi}{\partial x_i} + \frac{\partial\bar{\tau}_{u_i\phi}}{\partial x_i} + S_\phi \quad (4) \text{ گونه}$$

در صورتی که از مدل احتراقی تولید فلیملت منیفولد استفاده شود، روابط (5) الی (7) جایگزین رابطه‌ی (4) می‌شود.

$$\frac{\partial(\bar{\rho}\bar{Z})}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{\rho}\bar{u}_i\bar{Z})}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \bar{\rho}(D + D_i) \frac{\partial\bar{Z}}{\partial x_i} \right) \quad (5) \text{ کسر مخلوط}$$

$$\frac{\partial(\bar{\rho}\bar{Z}''^2)}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{\rho}\bar{u}_i\bar{Z}''^2)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \bar{\rho}D_t \frac{\partial\bar{Z}''^2}{\partial x_i} \right) + 2\bar{\rho}D_t \left( \frac{\partial\bar{Z}''}{\partial x_i} \right)^2 - \bar{\rho}\bar{\chi} \quad (6) \text{ واریانس کسر مخلوط}$$

$$\frac{\partial(\bar{\rho}\bar{y}_p)}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{\rho}\bar{u}_i\bar{y}_p)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \bar{\rho}D_y \frac{\partial\bar{y}_p}{\partial x_i} \right) + \bar{\omega}_{y_p} \quad (7) \text{ تابع پیشرفت واکنش}$$

در روابط (1) تا (7)،  $\rho$  چگالی مخلوط،  $u_i$  سرعت،  $p$  فشار،  $g$  شتاب گرانش زمین،  $h$  آنالپی و  $Z$  کسر مخلوط‌اند.  $Z''^2$ ،  $\bar{y}_p$  و  $D$  به‌ترتیب واریانس کسر مخلوط، تابع پیشرفت واکنش و ضریب نفوذاند و  $\bar{\chi}$  در رابطه‌ی (6)، متوسط اتلاف اسکالر کسر مخلوط و معرف

نرخ اضمحلال نوسانات کسر مخلوط است.  $\omega_t$  نرخ حرارت تولیدشده در اثر احتراق است. عبارت  $S_{rad}$  نیز نرخ انتقال حرارت تابشی است. در روابط (3) و (4) تانسور تنش‌های لزجی و بردار شار حرارتی با استفاده از قوانین نیوتن و فوریه در مرجع [16] مدل‌سازی می‌شوند.

### مدل زیرشبکه‌ی تک معادله‌ای

در این مطالعه، از مدل زیرشبکه‌ی تک معادله‌ای استفاده شد. در این مدل طبق روابط (8) تا (12)، معادله‌ی انتقال برای انرژی جنبشی اغتشاشی حل می‌شود و مقدار لزجت گردابه‌ای ( $\mu_t^{SGS}$ ) با توجه به انرژی جنبشی اغتشاشی تعیین می‌شود [17]. در مدل زیر شبکه، اگرچه به علت اضافه شدن یک معادله انتقال به مجموع معادلات انتقال (1) تا (7)، زمان محاسباتی زیادتر می‌شود؛ اما دقت محاسباتی نیز بالاتر می‌رود.

$$\mu_t^{SGS} = \bar{\rho} C \Delta \sqrt{k_{sgs}} \quad (8)$$

$$\frac{\partial(\bar{\rho} k_{sgs})}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{\rho} \tilde{u}_i k_{sgs})}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \bar{\rho} C_{\alpha k} \Delta \sqrt{k_{sgs}} \frac{\partial k_{sgs}}{\partial x_i} \right) + P_{k_{sgs}} - D_{k_{sgs}} + B_{k_{sgs}} \quad (9)$$

$$P_{k_{sgs}} = -\tau_{ij} \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} \quad (10)$$

$$D_{k_{sgs}} = C_* \frac{\bar{\rho} k_{sgs}^{3/2}}{\Delta} \quad (11)$$

$$B_{k_{sgs}} = -\frac{C}{\sigma_\rho} \Delta \sqrt{k_{sgs}} \left( \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial x_j} \cdot g_j \right) \quad (12)$$

$k_{sgs}$  انرژی جنبشی اغتشاشی است. در این روابط عبارت  $\Delta$  معرف اندازه‌ی فیلتر است که به صورت  $\Delta = (\Delta x \Delta y \Delta z)^{1/3}$  به دست می‌آید و همچنین معرف لزجت اغتشاشی است که به عبارتی اثرات اغتشاش گردابه‌های کوچک این گونه وارد معادلات می‌شود. در معادلات مربوط به مدل زیر شبکه‌ی تک معادله‌ای ضریب  $C$  را معمولاً 0/069،  $C_{\alpha k} = C / \sigma_k$  و مابقی ضرایب را 1 انتخاب می‌کنند [17].

### مدل احتراقی سینتیک بسیار سریع

مدل احتراقی سینتیک بسیار سریع بر این فرض استوار است که انجام واکنش‌های شیمیایی بسیار سریع‌تر از مقیاس زمانی نفوذ و انتقال جریان بوده و در نتیجه به محض ارتباط سوخت و اکسیدکننده، احتراق صورت می‌گیرد. در این صورت می‌توان نرخ انجام واکنش سوخت که در قالب ترم منبع در معادله‌ی مربوط به انتقال جرم سوخت ظاهر می‌شود را به صورت رابطه‌ی (13) مدل نمود.

$$\bar{\omega}_F'' = \bar{\rho} \frac{\min(\tilde{Y}_F, \tilde{Y}_O / s)}{C_c \Delta t} \quad (13)$$

در رابطه‌ی (13)،  $C_c$ ،  $\Delta t$  به ترتیب گام زمانی و ضریب ثابت این مدل‌اند.

### مدل احتراقی اضمحلال گردابه

در این مدل احتراقی برخلاف مدل احتراقی قبلی، زمان مشخصه، گام زمانی نیست و با استفاده از مشخصات اغتشاشی جریان، زمان مشخصه هم اصلاح می‌شود. در این صورت، نرخ مصرف سوخت از رابطه‌ی (14) محاسبه می‌شود.

$$\overline{\dot{\omega}}_F^n = \bar{\rho} \frac{\min(\tilde{Y}_F, \tilde{Y}_{O_2} / s)}{\tau_{mix}} \quad (14)$$

در رابطه‌ی (14)،  $\tilde{Y}_F, \tilde{Y}_{O_2}$  به ترتیب کسر جرمی اکسیدکننده و سوخت هستند و  $S$  نسبت جرمی استوکیومتری هوا به سوخت

است. پارامتر مهم در رابطه‌ی (14)،  $\tau_{mix}$  است که توسط رابطه‌ی (15) به دست می‌آید.

$$\tau_{mix} = \min \left( \frac{k_{sgs}}{C_{EDM} \varepsilon_{sgs}}, \frac{\Delta^2}{C_{diff} \alpha} \right), C_{EDM} = 4, C_{diff} = 2 \quad (15)$$

$\tau_{turb} \quad \tau_{lam}$

### مدل احتراقی مفهوم اضمحلال گردابه

مگناسن و هجارتاگر [18] با ایده گرفتن از روش ارائه شده توسط اسپالدینگ [19]، مدل احتراقی اضمحلال گردابه را ارائه دادند. مدل اضمحلال گردابه همچون مدل شکست گردابه با این فرض ارائه می‌شود که ناحیه‌ی واکنشی به صورت مجموعه‌ای از بسته‌های واکنشی است که با گردابه‌های اغتشاشی منتقل می‌شوند و در واقع ناحیه‌ای که اختلاط واکنش‌دهنده‌ها و احتراق در آن صورت می‌گیرد مقدار جزئی از کل حجم مخلوط است (بسیار جزئی و در حد گردابه‌های کوچک است) و در آن گردابه‌ها، اضمحلال صورت می‌گیرد و از این روست که این روش به اضمحلال گردابه معروف شده است. در این مدل احتراقی، نرخ مصرف سوخت از رابطه‌ی (16) محاسبه می‌شود.

$$\overline{\dot{\omega}}_F^m = \bar{\rho} \frac{\gamma^2 \chi}{\tau(1-\gamma^3 \chi)} \min \left( \tilde{Y}_F, \frac{\tilde{Y}_{O_2}}{s} \right) \quad (16)$$

در رابطه‌ی (16)،  $\gamma$  اندازه‌ی ساختارهای کوچک<sup>1</sup> است،  $\chi$  هم قسمتی از ساختار کوچک است که در آن احتراق شکل می‌گیرد و  $\tau$  هم زمان مشخصه مربوط به این روش است [20].

### مدل احتراقی تولید فلیملت منیفولد

در مدل احتراقی تولید فلیملت منیفولد سعی می‌شود، متغیرهایی نظیر کسر جرمی و دما بر اساس مقدار کسر مخلوط و متغیر پیشرفت واکنش استخراج شوند. به این منظور با استفاده از مدل‌سازی معادلات معروف به فلیملت (معادلات جرم، گونه و آنتالپی در فضای شعله) متغیرهای کسر جرمی و دما را بر اساس کسر مخلوط و متغیر پیشرفت واکنش به دست می‌آورند. در این دیدگاه، یک مسیر برای انتقال اطلاعات، بر اساس ساختار شعله یک‌بعدی ایجاد کرده و از این طریق اطلاعات مربوط به احتراق را منتقل می‌کنند [21]. در این مدل احتراقی مطابق با شکل 1، با استفاده از تبدیلات کروکو [22]، محاسبات سه‌بعدی مربوط به احتراق شعله، در راستای عمود بر سطح شعله که گرادیان غالب است، تبدیل به فضای یک‌بعدی می‌شود و به نام معادلات فلیملت شناخته می‌شوند. با استفاده از حل این معادلات، کتابخانه‌ی مربوط به مدل احتراقی تولید فلیملت منیفولد شکل می‌گیرد. معادلات فلیملت در حالت پایدار برای مختصات صفحه‌ای دوبعدی متقارن محوری (با تابعیت  $x$ ) به صورت معادله‌های (17) تا (20) اند [23].

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} = G(x) \quad (17)$$

$$H - \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{FG}{\rho} \right) + 2 \frac{G^2}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{G}{\rho} \right) \right) = 0 \quad (18)$$

$$\rho u \frac{\partial T}{\partial x} - \frac{1}{c_p} \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\rho}{c_p} \sum_k c_{pk} Y_k V_k \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{1}{c_p} \sum_k h_k \dot{\omega}_k = 0 \quad (19)$$

$$\rho u \frac{\partial Y_k}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho Y_k V_k) - \dot{\omega}_k W_k = 0 \quad k = 1, \dots, K \quad (20)$$

در معادلات (17) تا (20)،  $u, \rho, x$  به ترتیب مختصات فیزیکی، چگالی مخلوط و سرعت مخلوط گاز اند.  $G$  و  $F$  به ترتیب دو پارامتری هستند که به صورت  $\rho v / y$ ،  $\rho u$  تعریف می‌شوند و در واقع  $G$  و  $F$  به ترتیب معرف تکانه و کشیدگی شعله<sup>1</sup> اند.  $\mu, c_p, \lambda, \dot{\omega}, Y_i$  به ترتیب کسر جرمی گونه‌ی  $i$  ام، شدت واکنش، ضریب هدایت حرارتی، ضریب گرمای ویژه در فشار ثابت و ویسکوزیته دینامیکی اند. پس از حل این معادلات، کتابخانه‌ی این مدل احتراقی در شرایط مختلف استخراج شده و در نهایت داده‌هایی نظیر کسر جرمی گونه‌ها، دما و خواص ترموفیزیکی بر اساس کسر مخلوط و متغیر پیشرفت واکنش، ذخیره می‌شوند [24].

به منظور حل این معادلات، جریان متقابل برای سوخت متان با دمای 274 و هوا با دمای 278 کلوین استفاده شده است. همچنین فشار، 81 کیلو پاسکال لحاظ شد. به منظور تشکیل کتابخانه‌ی مدل احتراقی تولید فلیملت منیفولد، معادله‌های (17) تا (20) برای جریان متقابل با فواصل مختلف حل شد (از فاصله‌ی خیلی زیاد برای حالت تعادلی شروع شده و به تدریج با کاهش فاصله‌ی بین سوخت و اکسیدکننده در جریان متقابل، به حالت خاموشی نزدیک شده). با توجه به مرجع [25]، متغیر پیشرفت واکنش به صورت  $Y_p = Y_{H_2O}$  تعریف شده است. البته در مرجع [26]، از ترکیب‌های دیگر نیز استفاده شده است.

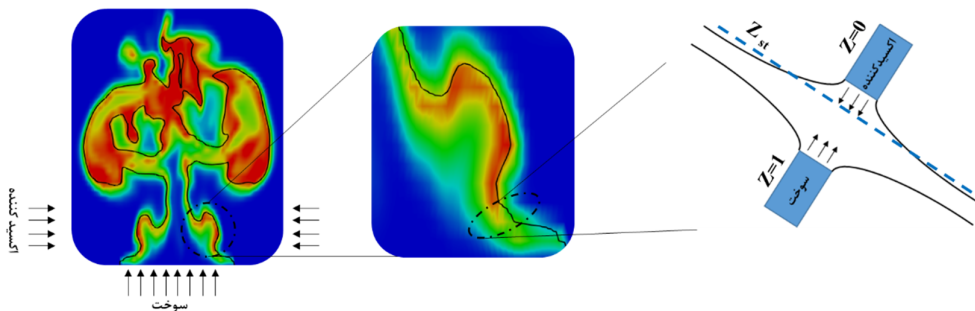


Figure 1- convert three to one-dimensional space in FGM combustion model

شکل 1- نحوه‌ی تبدیل فضای سه‌بعدی به یک‌بعدی در مدل احتراقی تولید فلیملت منیفولد

### مدل تشعشعی

تأثیر تشعشع در مدل احتراقی تولید فلیملت منیفولد مورد بررسی قرار نگرفته است؛ بنابراین از مدل تشعشعی نیز استفاده نشده است؛ اما در سایر مدل‌های احتراقی (سینتیک خیلی سریع، اضمحلال گردابه و مفهوم اضمحلال گردابه)، معادله‌ی انتقال حرارت در حضور تشعشع، مطابق با معادله‌ی (3)، حل می‌شود. مدل تشعشعی که مورد استفاده قرار می‌گیرد، مدل جهات گسسته<sup>2</sup> است. اثر تشعشع توسط رابطه‌ی (21) در معادله‌ی انرژی اعمال شده است [27].

$$S_{rad} = -4\bar{K}_a E_b + \sum_{i=1}^{n_{rad}} w_i \bar{K}_a \bar{I}_i (\hat{s}_i) \quad (21)$$

در رابطه‌ی (21)،  $w_i$ ،  $I_i$  و  $K_a$  به ترتیب، ضرایب وزنی، جهت‌های گسسته سازی و ضریب تشعشع در معادله‌ی تشعشع اند.

1. Flame Stretch  
2. Discrete Ordinate Method (DOM)

## حل عددی

سوخت مورد استفاده متان در نظر گرفته شد و روش‌های گسسته سازی برای تمامی عبارتهای جابجایی در معادلات اندازه حرکت، انرژی جنبشی زیر شبکه، انتقال انرژی، گونه، انتقال تابع پیشرفت واکنش، کسر مخلوط و واریانس آن از تقریب مرتبه دو و برای عبارت مشتق زمانی در تمام معادلات از روش اویلری استفاده شد. پیمپل<sup>1</sup> به عنوان الگوریتم اعمال وابستگی بین سرعت، فشار، دما و پارامترهای کسر مخلوط و واریانس آن در نظر گرفته شد. در مدل‌های احتراقی سینتیک خیلی سریع، اضمحلال گردابه و مفهوم اضمحلال از سینتیک تک-مرحله‌ای استفاده و در مدل احتراقی تولید فلیملت منیفولد، سینتیک GRI3.0 به کار گرفته شد. به این ترتیب در مدل احتراقی تولید فلیملت منیفولد، 53 گونه مدل می‌شوند؛ اما در سایر مدل‌های احتراقی تنها 5 گونه شبیه‌سازی می‌شوند که این موضوع یکی از برتری‌های مدل تولید فلیملت منیفولد نسبت به سایر مدل‌های احتراقی است (البته موضوع مهم دیگر، دقت این مدل احتراقی است که در این مقاله مورد بررسی قرار می‌گیرد). برای تشکیل کتابخانه‌ی مدل احتراقی تولید فلیملت منیفولد از نرم‌افزار کمکین<sup>2</sup> استفاده شده است.

میزان باقیمانده برای سرعت، فشار، دما و گونه کمتر از  $10^{-6}$  قرار داده شد و بیشینه عدد کورانت  $0/8^3$  لحاظ شد. برای شبیه‌سازی حالت‌های مورد بررسی از نرم‌افزار این فوم استفاده شده است که مدل‌های احتراقی سینتیک خیلی سریع و اضمحلال گردابه در خود این نرم‌افزار موجود است؛ اما مدل احتراقی مفهوم اضمحلال گردابه و تولید فلیملت منیفولد به این نرم‌افزار اضافه شده است. هر یک از این دو مدل احتراقی در تحقیقات دیگری از نویسندگان حاضر [24, 28]، اعتبارسنجی شده است. در حالت کلی، 20 ثانیه زمان سپری می‌شود تا آتش به حالت شبه پایدار برسد و در مدت 15 ثانیه نتایج متوسط گیری شده و با نتایج تجربی مقایسه می‌شوند.

شرط مرزی سرعت برای ورودی سوخت به صورت سرعت ثابت لحاظ شد و مقدار سرعت با توجه به دبی سوخت ورودی  $0/066$  کیلوگرم بر مترمربع ثانیه اعمال شد. توان حرارتی آتش در این حالت  $2/7$  مگاوات است. شرط مرزی دیواره‌ها عدم لغزش لحاظ شد و ورودی بستر سوخت هم شرط مرزی سرعت در نظر گرفته شد. هوای اطراف هم به صورت شرط مرزی با فشار محیط  $81$  کیلو پاسکال فرض شد. شرط مرزی حرارتی و گونه‌ی محیط اطراف، هوا (ترکیبی از اکسیژن و نیتروژن) با دمای  $278$  کلوین و دمای سوخت ورودی  $274$  کلوین لحاظ شد.

## هندسه و فضای محاسباتی

شبیه‌سازی بر اساس آزمایش تیژن و همکارانش [29] برای آتش استخری با سوخت متان با قطر سوخت ورودی یک متر انجام شده است. در مطالعه‌ی تجربی مرجع [29]، میزان سرعت‌های متوسط و پارامترهای اغتشاشی در صفحه مرکزی ارائه شده است. میزان دقت اندازه‌گیری برای سرعت‌های افقی بیشتر از  $0/2$  متر بر ثانیه و سرعت عمودی بیشتر از  $1$  متر بر ثانیه،  $\pm 20$  درصد است. دقت اندازه‌گیری با کاهش سرعت از مقادیر فوق، کاهش می‌یابد. مشخصه‌های جریان مغشوش نیز در مقادیر بیش از  $0/3$  مترمربع بر مجذور ثانیه برای  $\overline{u^2}$  و  $0/5$  مترمربع بر مجذور ثانیه برای  $\overline{v^2}$  دارای خطای اندازه‌گیری  $\pm 20$  درصد است.

برای شبیه‌سازی مسئله تشریح شده، ناحیه محاسباتی طبق شکل 2 در نظر گرفته شد. در انتخاب ناحیه‌ی محاسباتی باید توجه کرد که اندازه‌ی فضای محاسباتی، میدان حل را تحت الشعاع خود قرار ندهد؛ در انتخاب ابعاد ناحیه‌ی محاسباتی، ارتفاع مهم‌تر از طول و عرض است؛ چراکه آتش در جهت ارتفاع رشد پیدا می‌کند؛ بنابراین طول و عرض ابعاد هندسی 3 در 3 مترمربع در نظر گرفته شد و ارتفاع حدود 7 متر، کمی بیشتر از ارتفاع آتش، لحاظ شد تا به این ترتیب به آتش اجازه‌ی رشد داده شود و بتوان مقیاس‌های اصلی آتش استخری مورد نظر را لحاظ کرد (البته در مرجع [30] ابعاد  $3 \times 3 \times 3$  لحاظ شده است و در مرجع [31] ابعاد  $3 \times 3 \times 7$  را به عنوان فضای محاسباتی انتخاب کرده است). همان‌طور که در شکل 2 مشاهده می‌شود، شبکه‌بندی  $100 \times 200 \times 100 = N_x \times N_y \times N_z$  برای فضای هندسی لحاظ شده است.

1. Pimple  
2. CHEMKIN  
3. Courant Number

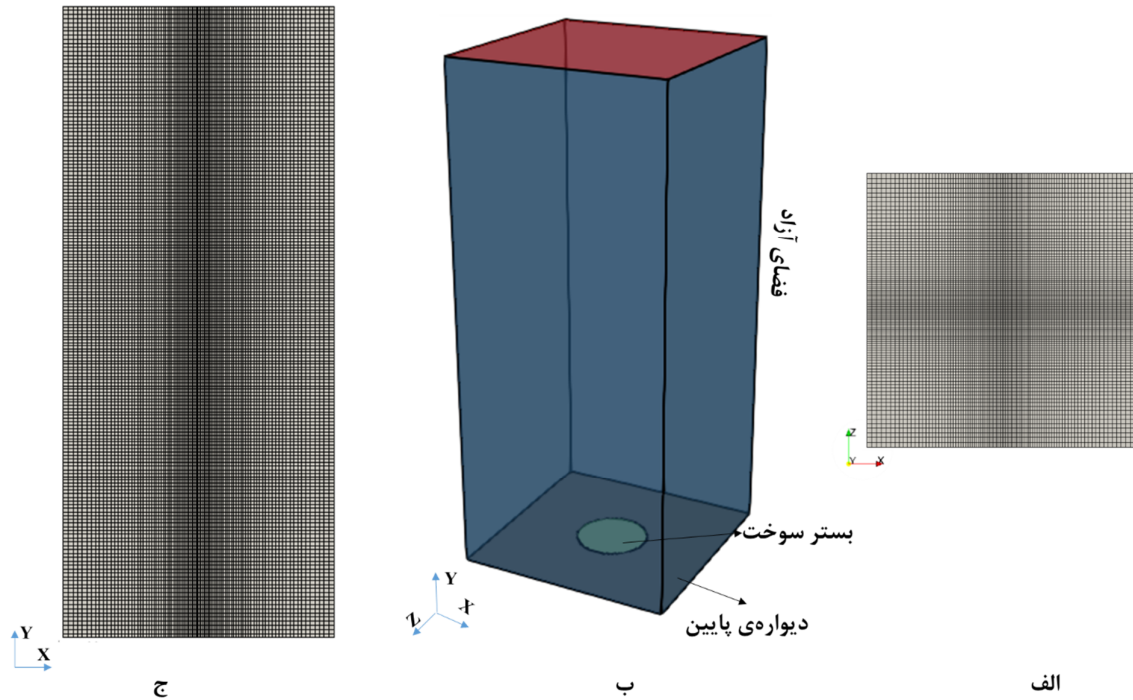


Figure 2 - a) mesh top view, b) geometry studied and c) mesh side view  
 شکل 2- الف) مش از نمای بالا، ب) هندسه مورد بررسی و ج) مش از نمای جانبی

## نتایج

در قسمت نتایج ابتدا شبکه‌ی محاسباتی بررسی می‌شود، سپس دقت مدل‌های احتراقی در آتش استخری مقایسه می‌شود.

### بررسی شبکه‌ی محاسباتی

زمانی که از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ استفاده می‌شود، پارامتری به نام شاخص کیفیت روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ<sup>1</sup> که به صورت تقسیم مقدار انرژی جنبشی مدل‌سازی بر انرژی جنبشی اغتشاشی کل تعریف می‌شود، اتخاذ می‌شود تا کیفیت شبکه بررسی شود. از این پارامتر در مراجع متفاوتی از جمله [9, 20, 32] در مدل‌سازی آتش استفاده شده است. این درصد به صورت رابطه (22) تعریف می‌شود.

$$LES_{IQ} = \frac{k_{Resolved}}{\underbrace{k_{Resolved} + k_{SGS}}_{k_{total}}} \quad (22)$$

در رابطه‌ی (22)، مقدار انرژی جنبشی اغتشاشی مدل شده به طور مستقیم توسط روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ و  $k_{SGS}$  انرژی جنبشی اغتشاشی زیرشبکه است. شاخص کیفیت روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ توسط پوپ ارائه شد [20] و نیاز است که در فضای محاسباتی بالاتر از 80 درصد باشد تا شبکه کیفیت مورد نیاز را داشته باشد.

در شکل 3 نتایج شاخص کیفیت مربوط به سه نوع شبکه‌بندی 1000000، 2000000 و 3000000 در مقطع  $y = 0/4$  متر در صفحه‌ی میانی ( $z=0$ ) با یکدیگر مقایسه شده‌اند؛ همان‌گونه که مشاهده می‌شود نتایج شبکه‌ی 1000000 از مقداری در حدود 0/75 شروع شده و تا به مقداری نزدیک 0/97 می‌رسد؛ اما نتایج شاخص کیفیت دو شبکه‌ی دیگر تقریباً در کل راستای X بیشتر از 0/9 است

1. Large Eddy Simulation Index Quality (LESiq)



که در واقع دقت مطلوب این شبکه‌بندی را نشان می‌دهد. اگرچه شبکه‌ی 1000000 نیز کیفیت موردنظر را داراست؛ اما در تحلیل نتایج از شبکه‌ی 2000000 استفاده شده است.

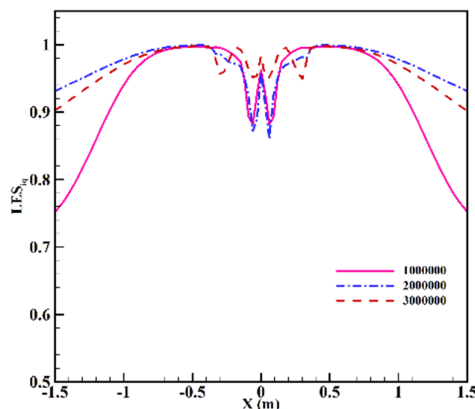


Figure 3 - LESiq results

شکل 3- نتایج شاخص کیفیت روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ

### فرکانس پوفینگ<sup>1</sup>

در مدل‌سازی آتش استخری با استفاده از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ نتایج به‌صورت متناوب تغییر می‌کنند که علت عمده‌ی آن پدیده‌ی پوفینگ است. به‌منظور بررسی فرکانس پدیده‌ی پوفینگ در مراجع مختلف با آنالیز فرکانسی سرعت در یک نقطه‌ی خاص و در طول یک دوره‌ی زمانی متشکل از چندین دوره‌ی تناوب، فرکانس آن را به‌دست می‌آورند. در نتایج تجربی مرجع [29] فرکانس پوفینگ با استفاده از تغییرات لحظه‌ای سرعت عمودی در ارتفاع 0/505 متری از سطح منبع سوخت در خط مرکزی ( $x=z=0$ ) حدود 1/65 گزارش شده است.

در نتایج عددی به‌منظور آوردن فرکانس پوفینگ، نتایج سرعت عمودی پس از رسیدن به حالت شبه‌پایدار به مدت 15 ثانیه در ارتفاع 0/505 متری خط مرکزی ( $x=z=0$ ) در هر گام زمانی محاسباتی ذخیره می‌شود و سپس با استفاده از تحلیل فرکانس فوریته<sup>2</sup>، فرکانس‌های حاکم استخراج می‌شود. به‌منظور تحلیل نتایج مدل احتراقی تولید فلیملت منیفولد، نتایج این مدل احتراقی با دو مدل احتراقی مرسوم در شبیه‌سازی‌های رایج (که در حلگر فایرفوم و نرم‌افزار اف.دی.اس استفاده می‌شود) مقایسه می‌شود.

شکل 4، تحلیل فرکانسی داده‌های سرعت عمودی توسط روش‌های مختلف در نقطه‌ی مذکور را نشان می‌دهد. با توجه به این نمودارها، نتایج مربوط به فرکانس غالب که نشان‌دهنده‌ی فرکانس پوفینگ است در جدول 1 آمده است. با توجه به نتایج جدول 1، مدل‌های احتراقی مفهوم اضمحلال گردابه و سینتیک سریع با داشتن خطای 15 و 17 درصدی، به‌ترتیب، دقت پائین‌تری نسبت به سایر مدل‌های احتراقی دارد و مدل احتراقی اضمحلال گردابه فرکانس پوفینگ را با دقت بالاتری به نسبت مدل احتراقی سینتیک سریع، پیش‌بینی کرده است (میزان خطای این مدل احتراقی 11٪ است)؛ اما نتایج مدل احتراقی تولید فلیملت منیفولد به نسبت دو مدل احتراقی قبلی خیلی بهتر است و با داشتن خطای 3٪، با نتایج تجربی مطابقت بسیار خوبی دارد.

مدل شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ بر این فرض استوار است که گردابه‌های بزرگ را به‌صورت مستقیم مدل کرده و اثرات گردابه‌های کوچک را با استفاده از مدل‌های زیر شبکه مدل کند [33]. انرژی از گردابه‌های بزرگ‌مقیاسی که در حد طول مشخصه‌ی اصلی جریان تشکیل شده‌اند، به‌تدریج به گردابه‌های کوچک‌تر منتقل می‌شوند تا اینکه در نهایت به گردابه‌های موسوم به کولموگوروف انتقال پیدا می‌کند و انرژی خود را از دست می‌دهد. در این میان این انتقال انرژی از گردابه‌های بزرگ‌مقیاس به گردابه‌های کولموگوروف<sup>3</sup> موسوم

1. Puffing Frequency  
2. Fast Fourier Transform (FFT)  
3. Kolmogorov

به آبشار انرژی است. با انتقال انرژی از گردابه های بزرگمقیاس به کولموگوروف، به تدریج انرژی اغتشاشی اولیه کاهش پیدا می کند و به عبارتی هرچه گردابه کوچک تر می شود، مقدار انرژی که در گردابه وجود دارد نیز، کمتر می شود.

در شکل 5، نتایج طیف انرژی برحسب فرکانس، مربوط به نقطه ای در ارتفاع 0/505 متری خط مرکزی ( $x=z=0$ ) که در قسمت قبل آنالیز فرکانسی آن انجام شد، رسم شده است. همان گونه که در شکل 5 مشاهده می شود، در فرکانس هایی که اندازه ی سرعت در نمودار تحلیل فرکانس فوریه، افزایش یافته است و مقدار چگالی طیفی توان<sup>1</sup> هم زیاد شده است و در فرکانس پوفینگ که گردابه ی غالب است، مقدار چگالی طیفی توان به مقدار بیشینه ی خود رسیده است.

در محدوده ای که انرژی از گردابه های بزرگمقیاس به گردابه های کوچکمقیاس انتقال می یابد، گردابه های موسوم به گردابه های مقیاس تیلور وجود دارند [34]. در این محدوده طیف انرژی تابعی از توان  $-5/3$  عدد موج است که متناسب با عکس اندازه ی گردابه و به طریق دیگر متناسب با فرکانس هم است. در شکل 5، شیب  $-5/3$  بر روی نمودار نشان داده شده است؛ همان طور که مشاهده می شود این شیب با شیب خط چگالی طیفی توان مربوط به نتایج شبیه سازی نزدیک است؛ اگرچه شیب خط چگالی طیفی توان مربوط به شبیه سازی به مقداری جزئی بیشتر از شیب  $-5/3$  است.

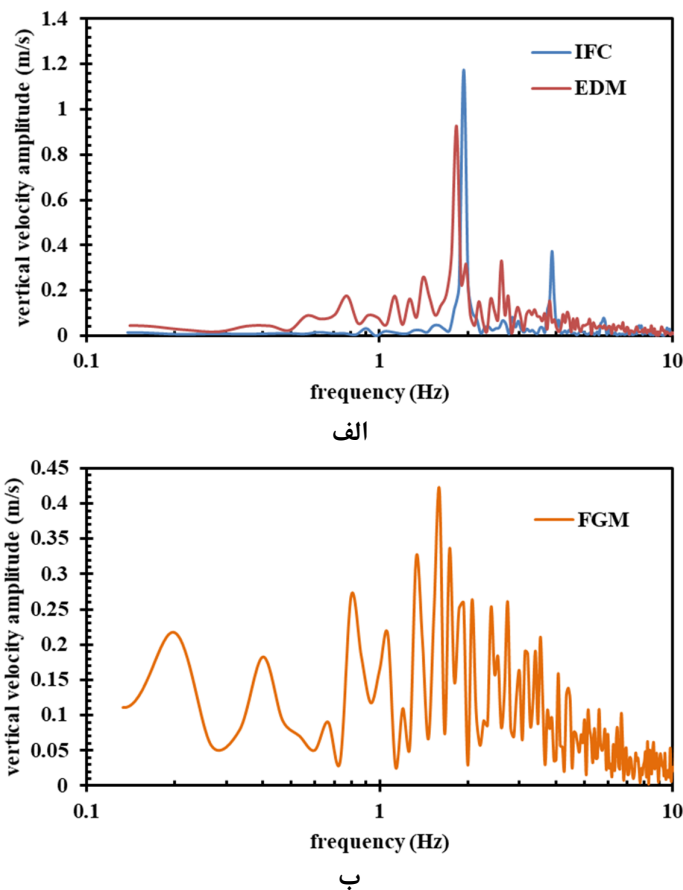


Figure 4 - Frequency analysis of vertical velocity at a height of 0.505 m of the center line ( $x = z = 0$ ) for a) the conventional combustion model (IFC and EDM) and b) the FGM combustion model

شکل 4- تحلیل فرکانسی داده های سرعت عمودی در ارتفاع 0/505 متری خط مرکزی ( $x=z=0$ ) برای الف) مدل احتراقی مرسوم در شبیه سازی ها و ب) مدل احتراقی تولید فیلمت منیفلد

1. Power Spectral Density (PSD)

جدول 1- فرکانس پوفینگ مدل‌های احتراقی مختلف

Table 1- Puffing frequency of different combustion models

	Experimental results	IFC combustion model	EDM combustion model	FGM combustion model	EDC combustion model
Puffing frequency	1.65	1.93	1.83	1.6	1.9
Relative error	-	17%	11%	3%	15%

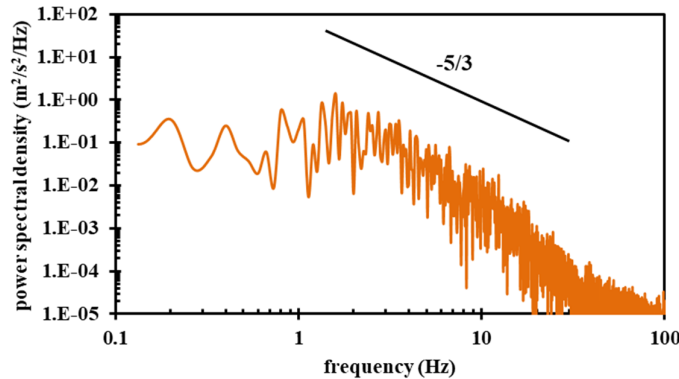


Figure 5 - Frequency analysis of power spectral density related to vertical velocity data at a height of 0.505 m centerline ( $x = z = 0$ ) for the FGM combustion model

شکل 5- تحلیل فرکانسی چگالی طیفی توان مربوط به داده‌های سرعت عمودی در ارتفاع 0/505 متری خط مرکزی ( $x=z=0$ ) برای مدل احتراقی تولید فلیملت منیفولد

### مقایسه‌ی نتایج سرعت و نوسانات اغتشاشی آن

ساختار جریان شناوری به سه ناحیه تقسیم می‌شود: ناحیه‌ی اول، ناحیه‌ای که توسط تکانه کنترل می‌شود و مشابه جریان جت ساده است که معروف به جریان غیر شناوری است؛ ناحیه‌ی دوم، ناحیه‌ای که علاوه بر تکانه، نیروی شناوری نیز مهم می‌شود، معروف به ناحیه میانی؛ ناحیه‌ی سوم، ناحیه‌ی شناوری و یا پلوم<sup>1</sup> است که در این ناحیه نیروی شناوری مهم و نیروی تکانه کم‌اهمیت می‌شود. در ناحیه‌ی اول و دوم، دما بالاتر از ناحیه‌ی سوم است و واکنش‌های احتراقی با سرعت بالاتری انجام می‌شود. از این رو مفهوم فلیملت که بر اساس فرض انجام واکنش سریع، شکل گرفته است، در این دو ناحیه به نسبت ناحیه‌ی سوم، اعتبار بیشتری دارد. نکته‌ی دیگر این‌که در ناحیه‌ی سوم که پلوم شکل می‌گیرد و به کشیدگی شعله منجر می‌شود، خاموشی اتفاق می‌افتد که برخی از مدل‌های فلیملت نظیر فلیملت آرام در این ناحیه، از اعتبار پایین‌تری برخوردار است. البته لازم به ذکر است که در تحقیقات پیشین [35-37]، در تمام این نواحی از فرض فلیملت استفاده کرده‌اند.

نتایج تجربی مرجع [29]، برای نواحی نزدیک بستر سوخت (تا ارتفاع 1 متر از بستر سوخت) که در محدوده‌ی ناحیه‌ی اول است، گزارش شده است. به‌منظور بررسی نواحی دیگر آتش استخری، با استفاده از روابط تجربی، نتایج سرعت و دمای متوسط در ناحیه‌ی سوم که از جمله‌ی نواحی پراهمیت در مطالعه‌ی آتش است، بررسی می‌شود. ناحیه‌ی سوم که معروف به ناحیه‌ی پلوم است طبق رابطه‌ی (23)، برای این سناریوی موردبررسی، از حدود 4/65 متر شروع می‌شود.

$$Y / Q^{2/5} > 0.20 \quad (23)$$

در رابطه‌ی (19)،  $Y$  ارتفاع از بستر سوخت و  $Q$  میزان آزادسازی انرژی (کیلووات) است. مقدار سرعت متوسط عمودی در محدوده‌ی پلوم آتش، طبق روابط (24) الی (26) با سه رابطه‌ی تجربی هسکستاد [38]، ژاکوسکی [39] و مک‌کافری [40] پیش‌بینی شده است.

$$U = 3.4 \left( \frac{g}{C_p \rho_0 T_0} \right)^{1/3} Q_c^{1/3} (Y - Y_0)^{-1/3} \quad [24] \text{ هسکستاد [38]}$$

$$Q_c = 0.7Q$$

$$Y_0 = -1.02D + 0.083Q^{2/5}$$

$$U = 3.87 \sqrt{gY} \left( \frac{Q}{\rho_0 C_p T_0 Y^2 \sqrt{gY}} \right)^{1/3} \quad [25] \text{ ژاکوسکی [39]}$$

$$\frac{U}{Q^{1/5}} = 1.1 \left( \frac{Y}{Q^{2/5}} \right)^{-1/3} \quad [26] \text{ مک کافری [40]}$$

در رابطه‌های (24) تا (26)،  $Q_c$  میزان انرژی آزادشده انتقال حرارت همرفت،  $T_0$  دمای محیط اطراف،  $C_p$  گرمای ویژه و  $\rho_0$  چگالی محیط اطراف است.

در شکل 6، نمودار سرعت عمودی متوسط در راستای عمودی خط مرکزی ( $x=z=0$ )، رسم شده است. در شکل 6، نتایج تجربی مرجع [29] تا ارتفاع 0/9 متر نمایش داده شده است (نتایج تجربی تا این ارتفاع گزارش شده است) و رابطه‌های تجربی هسکستاد [38]، ژاکوسکی [39] و مک کافری [40] برای مقایسه نتایج عددی آورده شده است.

طبق شکل 6، سرعت عمودی ابتدا از مقدار نزدیک صفر (حدود 0/1 متر بر ثانیه که سرعت سوخت ورودی است) شروع شده و به تدریج سرعت عمودی افزایش می‌یابد تا ارتفاع حدود 4 تا 5 متر به حداکثر مقدار خود می‌رسد. سپس با اتمام شعله آتش، سرعت عمودی متوسط کاهش می‌یابد. نتایج رابطه‌های تجربی محدوده پلوم، نتایج سرعت عمودی در راستای عمودی را به صورت نزولی با شیب کند، پیش‌بینی کرده است در مدل‌های احتراقی مختلف (به جز تولید فلیلمت منیفلود) نیز در ناحیه‌ی پلوم، شیب سرعت عمودی را نزولی به دست آورده‌اند.

آن‌طور که در شکل 6 نشان داده شده است، نتایج عددی پیش‌بینی شده توسط مدل‌های مختلف احتراقی در محدوده‌ی نتایج تجربی قرار دارند و تقریباً تمام مدل‌ها یک‌روند را برای سرعت عمودی در راستای محور مرکزی پیش‌بینی کرده‌اند. بین نتایج عددی حاضر، مدل احتراقی اضمحلال گردابه نتایج را در محدوده‌ی نتایج تجربی و روابط تجربی مدل‌سازی کرده است. نتایج مدل‌های احتراقی سینتیک بسیار سریع، مفهوم اضمحلال گردابه و اضمحلال گردابه، در نزدیکی‌های بستر سوخت کمتر از 5 درصد با نتایج تجربی اختلاف دارد؛ اما مدل احتراقی تولید فلیلمت منیفلود به نسبت سایر مدل‌های احتراقی، اختلاف بیشتری با نتایج تجربی دارد (کمتر از 10 درصد خطا). در حالت کلی تا ارتفاع حدود 2/5 متر در راستای خط مرکزی (ناحیه‌ی اول جریان شناوری)، نتایج مدل‌های احتراقی مختلف به جز تولید فلیلمت منیفلود، با هم تفاوت چندانی ندارند و اختلاف مدل‌های احتراقی مختلف، از ارتفاع حدود 3 متر به بعد شروع می‌شود تا اینکه در ارتفاع‌های بین 3-5 متر بیشترین اختلاف با یکدیگر را دارند. در کل، نتایج سرعت عمودی مدل‌های احتراقی مختلف در راستای خط مرکزی در محدوده‌ی نتایج تجربی و روابط تجربی است.

با توجه به نتایج سرعت در ناحیه‌ی پلوم مشاهده می‌شود که مدل احتراقی تولید فلیلمت منیفلود برخلاف سایر مدل‌ها، در ناحیه‌ی پلوم که شعله کشیده می‌شود و خاموشی اتفاق می‌افتد، روند تغییرات سرعت را افزایشی مدل کرده است. ذکر این نکته لازم است که با استفاده از سینتیک GRI3.0 در مدل تولید فلیلمت منیفلود، انتظار می‌رفت که دقت نتایج در این مدل بهبود یابد. به‌عنوان مثال در مطالعه‌ی یوان و همکاران [16]، استفاده از سینتیک GRI3.0 در مدل احتراقی فلیلمت آرام (با لحاظ کردن اثر تشعشع)، حدود 15 درصد دقت نتایج را بهبود داده است؛ اما باز مشاهده می‌شود که در این شبیه‌سازی، نتایج این مدل به‌طور مشهودی بهتر نشده است و بلکه در مواردی (همچون نتایج سرعت)، دقت کاهش یافته است؛ بنابراین می‌توان گفت نقش در نظر گرفته نشدن تشعشع در این مدل احتراقی، بر سینتیک غالب شده است.

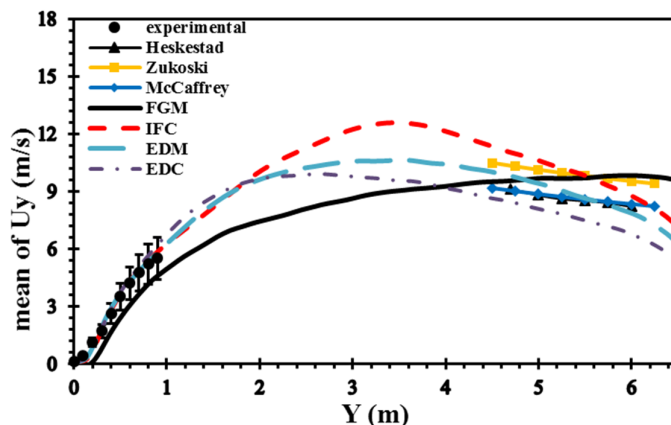


Figure 6 - Comparison of mean vertical velocity results along the center line with experimental results and experimental correlation

شکل 6- مقایسه‌ی نتایج سرعت عمودی متوسط در راستای خط مرکزی با نتایج تجربی و روابط تجربی

میدان دما بر تشعشع، چگالی و سرعت تأثیر می‌گذارد؛ بنابراین، میدان دما یکی از پارامترهای بسیار مهم در بررسی آتش استخری است. در نتایج تجربی مرجع [29]، میدان دما آورده نشده است؛ اما رابطه‌های تجربی‌ای وجود دارند که نتایج دما در ناحیه‌ی پلوم را برای خط مرکزی گزارش کرده‌اند. مقدار دمای متوسط در محدوده‌ی پلوم آتش، طبق روابط (27) الی (29) با سه رابطه‌ی تجربی هسکستاد [38]، ژاکوسکی [39] و مک‌کافری [40] ارائه شده است.

$$\Delta T = 9.1 \left( \frac{T_0}{C_p \rho_0^2 g} \right)^{1/3} Q_c^{2/3} (Y - Y_0)^{-5/3} \quad (27) \text{ هسکستاد [38]}$$

$$Q_c = 0.7Q$$

$$Y_0 = -1.02D + 0.083Q^{2/5}$$

$$\frac{\Delta T}{T_0} = 9.115 \left( \frac{Q}{\rho_0 C_p T_0 Y^2 \sqrt{gY}} \right)^{2/3} \quad (28) \text{ ژاکوسکی [39]}$$

$$\frac{2g\Delta T}{T_0} = \left( \frac{1.1}{0.9} \right)^2 \left( \frac{Y}{Q^{2/5}} \right)^{-5/3} \quad (29) \text{ مک‌کافری [40]}$$

با توجه به روابط تجربی در شکل 7، دمای ناحیه‌ی پلوم در محدوده‌ی بین 400-800 درجه‌ی کلوین پیش‌بینی شده است. در این محدوده به علت فاصله گرفتن از شعله‌ی آتش، دما به صورت نزولی است. سه رابطه‌ی تجربی هسکستاد [38]، ژاکوسکی [39] و مک‌کافری [40]، دما در این ناحیه را با حداکثر 20 درصد اختلاف، شبیه به هم پیش‌بینی کرده‌اند. رابطه‌ی تجربی هسکستاد، دما را بالاتر و مک‌کافری کمتر از سایر روابط تجربی گزارش می‌کنند.

در حالت کلی، نتایج دمای متوسط نیز همچون سرعت متوسط تا ارتفاع حدود 3-4 متر در راستای خط مرکزی (ناحیه‌ی اول جریان شناوری)، به تدریج افزایش می‌یابد تا به حداکثر مقدار خود می‌رسد. سپس با اتمام شعله آتش، دمای متوسط کاهش می‌یابد. نتایج رابطه‌های تجربی محدوده پلوم، نتایج دمای متوسط در راستای خط مرکزی را به صورت نزولی با شیب کند، پیش‌بینی کرده‌اند. نتایج مدل احتراقی تولید فلیملت منیفولد به مقادیر روابط تجربی، نزدیک‌تر از سایر مدل‌های احتراقی است. نتایج مدل احتراقی سینتیک بسیار سریع نیز، مقادیر دما در ناحیه‌ی پلوم حرارتی را بیشتر از سایر مدل‌ها به دست آورده است و بیشترین اختلاف را با نتایج روابط تجربی دارد.

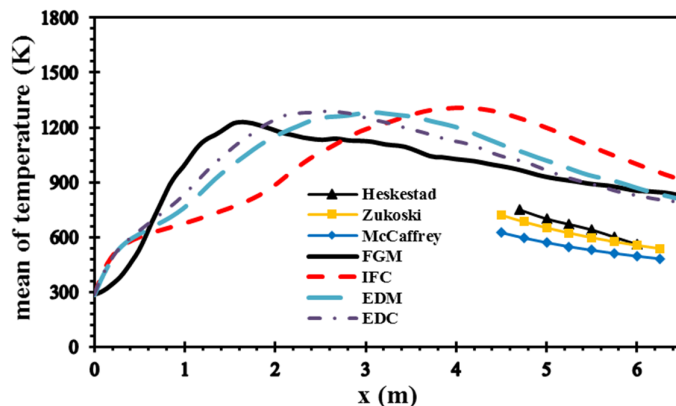


Figure 7 - Comparison of mean temperature results along the center line with experimental correlation

شکل 7- مقایسه‌ی نتایج دمای متوسط در راستای خط مرکزی با روابط تجربی

در شکل 8، نتایج سرعت عمودی متوسط در راستای افقی بر روی خطوط  $y = 0/3$  متر برای مدل‌های احتراقی سینتیک بسیار سریع، مفهوم اضمحلال گردابه و اضمحلال گردابه، نمایش داده شده است. نتایج سرعت عمودی از مقدار صفر در دو انتها شروع شده و سپس به تدریج که به مرکز نزدیک می‌شود، سرعت عمودی افزایش یافته و به مقدار بیشینه‌ی خود در حدود  $2/2$  متر بر ثانیه در  $-0/15$  و  $0/15$  متر رسیده و سپس کاهش می‌یابد تا در مرکز به مقدار  $1/9$  متر بر ثانیه می‌رسد.

با توجه به شکل 8، دو قله‌ای که در نمودار سرعت عمودی در مقطع  $y = 0/3$  متر دیده می‌شود، به علت عبور از شعله است که در مکانی که شعله است، دمای گازها بیشتر از سایر نواحی است؛ بنابراین، چگالی پایین‌تری داشته و تحت تأثیر نیروی شناوری بیشتری قرار گرفته و در نتیجه سرعت بالاتری دارد.

با توجه به شکل 8، نتایج مدل احتراقی اضمحلال گردابه به نتایج تجربی نزدیک‌تر است و نتایج مدل احتراقی سینتیک بسیار سریع به نسبت سایر مدل‌ها، سرعت عمودی متوسط را بیشتر از سایر مدل‌ها به دست آورده است و در نزدیکی نواحی شعله، نسبت به نتایج تجربی انحراف دارد. مدل احتراقی تولید فلیلمت منی‌فولد نیز بیشترین انحراف را به نسبت سایر مدل‌های احتراقی، نسبت به نتایج تجربی دارد؛ اما در حالت کلی، مدل‌های احتراقی سینتیک بسیار سریع، مفهوم اضمحلال گردابه و اضمحلال گردابه، سرعت عمودی متوسط را با دقت خوبی مدل کرده است و در فواصل مختلف به‌جز نواحی  $0/1 < |x| < 0/2$  متر، در محدوده‌ی نتایج تجربی است.

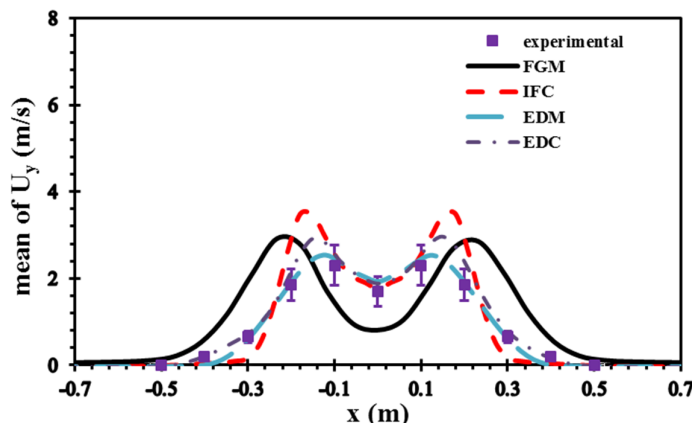


Figure 8 - Comparison of the mean vertical velocity along the horizontal line ( $y = 0.3$  m) with the experimental results

شکل 8- مقایسه‌ی نتایج سرعت عمودی متوسط در راستای خط افقی ( $y = 0/3$  متر) با نتایج تجربی

در شکل 9، نتایج مقایسه‌ی متوسط مجذور نوسان‌های سرعت افقی در مقطع  $y = 0/3$  متر آورده شده است. با توجه به نتایج تجربی متوسط مجذور نوسان‌های سرعت افقی، در دو انتهای دامنه به علت آرام بودن جریان، مقدار متوسط مجذور نوسان‌های سرعت افقی

نزدیک صفر است؛ اما هرچه به مرکز ( $x=0$ ) نزدیک شده، مقدار متوسط مجذور نوسانات سرعت افقی به مقدار بیشینه‌ی آن (در نواحی شعله) نزدیک می‌شود و دوباره در مرکز، این مقدار به‌علت کاهش مقدار آزادسازی حرارت و سرعت افقی، کاهش می‌یابد.

در شکل 9، نتایج مدل‌های مختلف در پیش‌بینی متوسط مجذور نوسان‌های سرعت افقی دیده می‌شود؛ نتایج تمامی این مدل‌ها به‌جز مدل احتراقی تولید فلیلمت منیفولد، کمتر از مقدار نتایج تجربی است و تنها نتایج مدل احتراقی تولید فلیلمت منیفولد در نواحی دور از شعله ( $|x| > 0/3$  متر)، بیشتر از نتایج تجربی است. از میان این چهار مدل احتراقی، نتایج مدل احتراقی اضمحلال گردابه و مفهوم اضمحلال گردابه شبیه یکدیگر است و در نواحی دور از شعله ( $|x| > 0/3$  متر)، با نتایج تجربی هم‌خوانی دارد؛ اما در نواحی داخلی شعله ( $|x| < 0/2$  متر) از نتایج تجربی فاصله می‌گیرد و کمتر از نتایج تجربی می‌شود؛ اما نتایج مدل احتراقی تولید فلیلمت منیفولد و مدل احتراقی سینتیک بسیار سریع برخلاف دو مدل دیگر در نواحی داخلی شعله ( $|x| < 0/2$  متر) با نتایج تجربی هم‌خوانی دارد.

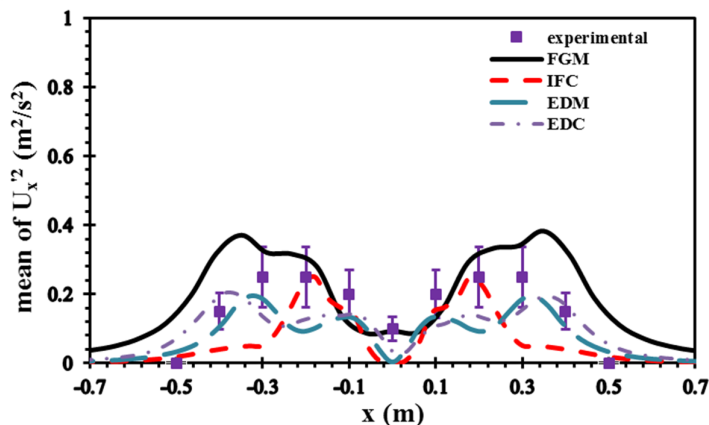


Figure 9 - Comparison of the mean square of horizontal velocity along the horizontal line ( $y = 0.3$  m) with the experimental results

شکل 9- مقایسه‌ی نتایج متوسط مجذور نوسان‌های سرعت افقی در راستای خط افقی ( $y = 0/3$  متر) با نتایج تجربی

در شکل 10، مقایسه‌ی نتایج متوسط مجذور نوسان‌های سرعت عمودی در مقطع  $y = 0/3$  متر آورده شده است. نتایج متوسط مجذور نوسانات سرعت عمودی نیز همچون متوسط مجذور نوسان‌های سرعت افقی، در دو انتهای دامنه به‌علت آرام بودن جریان، نزدیک صفر است؛ اما هرچه به مرکز ( $x=0$ ) نزدیک شده، متوسط مجذور نوسان‌های سرعت عمودی ابتدا افزایش می‌یابد اما سپس کاهش می‌یابد تا در مرکز به کمینه‌ی خود می‌رسد. مدل‌های مختلف این روند (افزایش-کاهش) را پیش‌بینی کرده‌اند؛ اما نتایج تمامی این مدل‌ها در نواحی  $0/15 < |x| < 0/25$  متر، بیشتر از مقدار نتایج تجربی به‌دست‌آمده است. همچنین در این ناحیه، مدل احتراقی سینتیک بسیار سریع، به نسبت سایر مدل‌ها انحراف بیشتری دارد. از مابین این چهار مدل احتراقی، نتایج مدل احتراقی تولید فلیلمت منیفولد در نواحی داخلی شعله ( $|x| < 0/2$  متر)، به نتایج تجربی نزدیک‌تر است و انحراف کمتری به نسبت سایر مدل‌ها دارد (نتایج متوسط مجذور نوسان‌های سرعت افقی نیز این‌گونه بود).

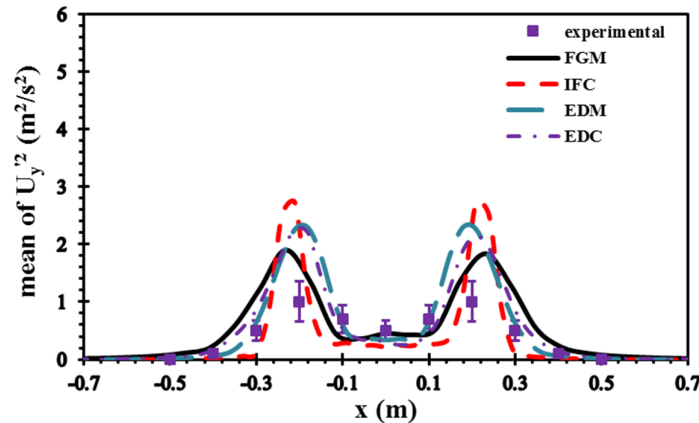


Figure 10 - Comparison of the mean square of vertical velocity along the horizontal line ( $y = 0.3$  m) with the experimental results  
 شکل 10- مقایسه‌ی نتایج متوسط مجذور نوسان‌های سرعت عمودی در راستای خط افقی ( $y = 0/3$  متر) با نتایج تجربی

به‌منظور بررسی انرژی جنبشی اغتشاشی، همچون بررسی متوسط نوسان‌های سرعت، تأثیر زیر شبکه نیز لحاظ شد. در شکل 11، نتایج متوسط انرژی جنبشی اغتشاشی در مقطع  $y = 0/3$  متر برای مدل‌های احتراقی مختلف آورده شده است. از آنجاکه متوسط انرژی جنبشی اغتشاشی، بیشتر از متوسط مجذور نوسان‌های سرعت عمودی (به‌علت غالب بودن نوسانات در این راستا) پیروی می‌کند؛ بنابراین، روند تغییرات متوسط انرژی جنبشی اغتشاشی همچون نتایج متوسط مجذور نوسان‌های سرعت عمودی، در دو انتهای دامنه به‌علت آرام بودن جریان، نزدیک صفر است؛ اما هرچه به مرکز ( $x=0$ ) نزدیک می‌شویم، متوسط انرژی جنبشی اغتشاشی ابتدا افزایش می‌یابد و سپس کاهش یافته تا در مرکز به‌علت کاهش آزاد شدن حرارت، کاهش می‌یابد.

با توجه به شکل 11، مدل‌های مختلف این روند را پیش‌بینی کرده‌اند؛ اما نتایج تمامی این مدل‌ها در نواحی که مقدار متوسط انرژی جنبشی اغتشاشی بیشینه است، از مقدار نتایج تجربی بیشتر پیش‌بینی شده است و از میان این چهار مدل احتراقی، نتایج مدل احتراقی تولید فلیم‌ت منیفولد به مقادیر تجربی نزدیک‌تر است و به نسبت سایر مدل‌ها در نقاط بیشینه، انحراف کمتری نسبت به نتایج تجربی دارد.

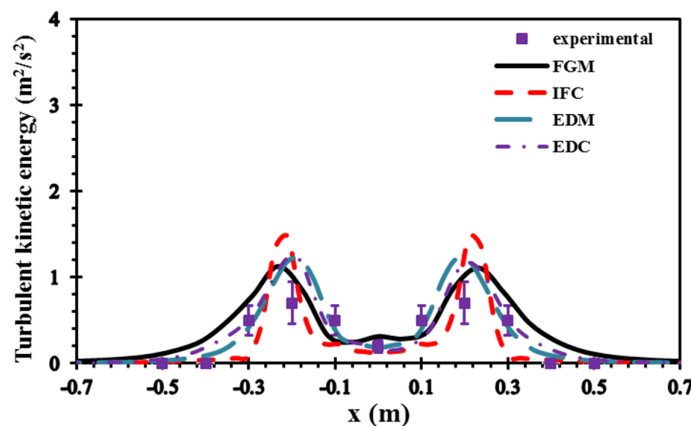


Figure 11 - Comparison of the mean turbulence kinetic energy along the horizontal line ( $y = 0.3$  m) with the experimental results  
 شکل 11- مقایسه‌ی نتایج انرژی اغتشاشی متوسط در راستای خط افقی ( $y = 0/3$  متر) با نتایج تجربی

## نتیجه‌گیری

در این مقاله، با هدف بررسی تأثیر مدل احتراقی در شبیه‌سازی عددی حریق، آتش استخری با دبی سوخت ورودی 0/066 کیلوگرم بر مترمربع ثانیه در نظر گرفته شد و نتایج مدل احتراقی تولید فلیم‌ت منیفولد، با نتایج مدل‌های احتراقی رایج همچون سینتیک بسیار



سریع، اضمحلال گردابه و مفهوم اضمحلال گردابه مقایسه شد. در حالت کلی، با مقایسه‌ی نتایج متوسط سرعت و نوسان‌های آن در سناریوی آتش استخری، مشاهده می‌شود که دقت مدل احتراقی تولید فلیملت منیفولد در پیش‌بینی پدیده‌ی پوفینگ و فرکانس آن، متوسط مجذور نوسان‌های سرعت عمودی و انرژی جنبشی اغتشاشی بهتر از سایر مدل‌های احتراقی مرسوم در شبیه‌سازی آتش است؛ اما در پیش‌بینی میدان سرعت، مدل احتراقی اضمحلال گردابه دقت بالاتری داشت. به‌گونه‌ای که نتایج این مدل احتراقی، کمتر از 10 درصد خطای نسبی با نتایج تجربی دارد؛ اما سایر مدل‌های احتراقی بیشتر از 10 درصد خطا دارند. نکته‌ای که در این شبیه‌سازی‌ها باید دقت کرد، در تمامی مدل‌های احتراقی مورد استفاده به‌جز تولید فلیملت منیفولد، از مدل تشعشع استفاده شده است و از آنجاکه، یکی از عوامل مهم تأثیرگذار در بهبود نتایج مدل احتراقی تولید فلیملت منیفولد، اعمال تأثیر تشعشع در این مدل احتراقی است، ضروری است که اثر تشعشع بر مدل احتراقی تولید فلیملت منیفولد بررسی شود (ذکر این نکته لازم است که سینتیک استفاده شده در مدل تولید فلیملت منیفولد، با سایر مدل‌ها متفاوت است).

## منابع

1. M. Safarzadeh, G. Heidarinejad, and H. Pasdarsahri, "Evaluation of LES sub-grid scale models and time discretization schemes for prediction of convection effect in a buoyant pool fire," *Heat and Mass Transfer*, 57, 2020, pp. 1-16.
2. N. T. Wimer, M. S. Day, C. Lapointe, A. S. Makowiecki, J. F. Glusman, J. W. Daily, et al., "High-Resolution Numerical Simulations of a Large-Scale Helium Plume Using Adaptive Mesh Refinement," arXiv preprint arXiv:1901.10554, 2019
3. O. Ahmadi, S. B. Mortazavi, H. Pasdarsahri, H. A. Mahabadi, and K. Sarvestani, "Modeling of boilover phenomenon consequences: Computational fluid dynamics (CFD) and empirical correlations," *Process Safety and Environmental Protection*, 129, 2019, pp. 25-39.
4. O. Ahmadi, S. B. Mortazavi, H. Pasdarsahri, and H. A. Mohabadi, "Consequence analysis of large-scale pool fire in oil storage terminal based on computational fluid dynamic (CFD)," *Process Safety and Environmental Protection*, 123, 2019, pp. 379-389.
5. W. Chow and R. Yin, "A new model on simulating smoke transport with computational fluid dynamics," *Building and Environment*, 39, 2004, pp. 611-620.
6. K. McGrattan, R. Rehm, and H. Baum, "Fire-driven flows in enclosures," *Journal of Computational Physics*, 110, 1994, pp. 285-291.
7. H. Xue, J. Ho, and Y. Cheng, "Comparison of different combustion models in enclosure fire simulation," *Fire Safety Journal*, 36, 2001, pp. 37-54.
8. Y.-L. Huang, H.-R. Shiu, S.-H. Chang, W.-F. Wu, and S.-L. Chen, "Comparison of combustion models in cleanroom fire," *Journal of Mechanics*, 24, 2008, pp. 267-275.
9. G. Heidarinejad, H. Pasdarsahri, and m. safarzadeh, "The Importance of Using the Combustion and Sub-grid Model in Modelling of Large Pool Fire Flow Field," *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 52, 2019, pp. 2425-2442. (in Persian)
10. G. Yeoh, R. Yuen, S. Chueng, and W. Kwok, "On modelling combustion, radiation and soot processes in compartment fires," *Building and Environment*, 38, 2003, pp. 771-785.
11. S. Cheung, G. H. Yeoh, A. Cheung, R. Yuen, and S. M. Lo, "Flickering behavior of turbulent buoyant fires using large-eddy simulation," *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 52, 2007, pp. 679-712.
12. A. Yuen, T. Chen, C. Wang, W. Wei, I. Kabir, J. Vargas, et al., "Utilising genetic algorithm to optimise pyrolysis kinetics for fire modelling and characterisation of chitosan/graphene oxide polyurethane composites," *Composites Part B: Engineering*, vol. 182, 2020, p. 107619.
13. A. Yuen, G. Yeoh, V. Timchenko, S. Cheung, and T. Barber, "Importance of detailed chemical kinetics on combustion and soot modelling of ventilated and under-ventilated fires in compartment," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 96, 2016, pp. 171-188.
14. V. M. Le, A. Marchand, S. Verma, R. Xu, J. White, A. Marshall, et al., "Simulations of a turbulent line fire with a steady flamelet combustion model coupled with models for non-local and local gas radiation effects," *Fire Safety Journal*, 106, 2019, pp. 105-113.
15. C. Han and H. Wang, "A comparison of different approaches to integrate flamelet tables with presumed-shape PDF in flamelet models for turbulent flames," *Combustion Theory and Modelling*, 21, 2017, pp. 603-629.
16. A. C. Y. Yuen, G. H. Yeoh, V. Timchenko, S. C. P. Cheung, and T. J. Barber, "Importance of detailed chemical kinetics on combustion and soot modelling of ventilated and under-ventilated fires in compartment," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 96, 2016, pp. 171-188.
17. H. Pasdarsahri, G. Heidarinejad, and K. Mazaheri, "Large eddy simulation on one-meter methane pool fire using one-equation sub-grid scale model," *7<sup>th</sup> Mediterranean Combustion Symposium*, Sardinia, Italy, 2011.
18. B. F. Magnussen and B. H. Hjertager, "On mathematical modeling of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion," *international Symposium on Combustion*, 16, 1977, pp. 719-729.
19. D. Spalding, "Mixing and chemical reaction in steady confined turbulent flames," *International Symposium on combustion*, 1971, 13, pp. 649-657.

20. G. Maragkos, T. Beji, and B. Merci, "Advances in modelling in CFD simulations of turbulent gaseous pool fires," *Combustion and Flame*, 181, 2017, pp. 22-38.
21. J. v. Oijen and L. D. Goey, "Modelling of premixed laminar flames using flamelet-generated manifolds," *Combustion Science and Technology*, 161, 2000, pp. 113-137.
22. N. Peters, "Laminar flamelet concepts in turbulent combustion," *International Symposium on Combustion*, 21, 1988, pp. 1231-1250.
23. S. Pohl, G. Frank, M. Pfitzner, J. Matheis, and S. Hickel, "Flamelet generated manifolds for modeling turbulent non-premixed combustion in OpenFOAM," SFB/TRR40 Annual Report, 2014, pp.209-216,.
24. M. Safarzadeh, G. Heidarinejad, and H. Pasdarshahri, "Numerical Investigation of Compartment Fire under Maximum and Minimum of Natural Ventilation using FGM Combustion Model," *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 53, 2021, pp. 1-15. (in Persian)
25. H. Atoof and M. D. Emami, "Numerical simulation of laminar premixed CH<sub>4</sub>/air flame by flamelet-generated manifolds: A sensitivity analysis on the effects of progress variables," *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 60, 2016, pp. 287-293.
26. S. Zadsirjan, S. Tabejamaat, E. Abtahizadeh, and J. van Oijen, "Large eddy simulation of turbulent diffusion jet flames based on novel modifications of flamelet generated manifolds," *Combustion and Flame*, 216, 2020, pp. 398-411.
27. S. C. P. Cheung and G. H. Yeoh, "A fully-coupled simulation of vortical structures in a large-scale buoyant pool fire," *International Journal of Thermal Sciences*, 48, 2009, pp. 2187-2202.
28. M. Safarzadeh, G. Heidarinejad, and H. Pasdarshahri, "Evaluation of the efficiency of eddy dissipation combustion model based on large eddy simulation in large scale pool fire modeling," *27th Annual International Conference of the Iranian Society of Mechanical Engineering*, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran 2019. (in Persian)
29. S. Tieszen, T. O'hern, R. Schefer, E. Weckman, and T. Blanchat, "Experimental study of the flow field in and around a one meter diameter methane fire," *Combustion and Flame*, 129, 2002, pp. 378-391.
30. G. Yeoh, S. Cheung, J. Tu, and T. Barber, "Comparative Large Eddy Simulation study of a large-scale buoyant fire," *Heat and mass transfer*, 47, 2011, pp. 1197-1208.
31. G. Maragkos and B. Merci, "Large Eddy simulations of CH<sub>4</sub> fire plumes," *Flow, Turbulence and Combustion*, 99, 2017, pp. 239-278.
32. J. White, S. Vilfayeau, A. Marshall, A. Trouve, and R. J. McDermott, "Modeling flame extinction and reignition in large eddy simulations with fast chemistry," *Fire safety journal*, 90, 2017, pp. 72-85.
33. S. De, A. K. Agarwal, S. Chaudhuri, and S. Sen, *Modeling and simulation of turbulent combustion*, Singapore, Springer, 2018.
34. R. O. Fox and A. Varma, *Computational models for turbulent reacting flows*: United States, Cambridge Univ. Press, 2003.
35. S. C. Cheung and G. Yeoh, "A fully-coupled simulation of vortical structures in a large-scale buoyant pool fire," *International Journal of Thermal Sciences*, 48, 2009, pp. 2187-2202.
36. P. E. DesJardin, T. M. Smith, and C. J. Roy, "Numerical simulations of a methanol pool fire," *Proc. 39th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, USA, 2001.
37. R. Demarco, *Modelling thermal radiation and soot formation in buoyant diffusion flames*, PhD Thesis, Aix-Marseille University, France, 2012.
38. G. Heskestad, "Engineering relations for fire plumes," *Fire Safety Journal*, 7, 1984, pp. 25-32.
39. E. E. Zukoski, T. Kubota, and B. Cetegen, "Entrainment in fire plumes," *Fire Safety Journal*, 3, 1981, pp. 107-121.
40. B. K. Dhurandher, R. Kumar, A. K. Dhiman, A. Gupta, and P. K. Sharma, "An experimental study of vertical centreline temperature and velocity profile of buoyant plume in cubical compartment," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 39, 2017, pp. 1813-1822.

## English Abstract

# Large Eddy Simulation of Pool Fire using FGM Combustion Model and Compared with Other Combustion Models

M. Safarzadeh<sup>1</sup>, G. Heidarinejad<sup>2</sup>, H. Pasharshahi<sup>3\*</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, m.safarzadeh@modares.ac.ir

2- Faculty of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, gheidari@modares.ac.ir

3- Faculty of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, pasdar@modares.ac.ir

\*Corresponding author

(Received: 2021.05.09, Received in revised form: 2021.08.08, Accepted: 2021.08.15)

Among the experimental and numerical studies conducted in the field of fire, the pool fire has been welcomed more than other fire scenarios. In this paper, pool fire is studied to investigate the effect of different combustion models on the fire simulation. For this purpose, the combination model of flamelet generated manifold (FGM) is used and its results are compared with three infinite fast chemistry (IFC), eddy dissipation (EDM) and eddy dissipation concept (EDC) combustion models. By comparing the mean velocity results and its fluctuations, it is observed that the accuracy of the FGM combination model, regardless of radiation effect, is better than other combustion models in predicting of the puffing phenomenon and its frequency, the mean square of vertical velocity, mean turbulence kinetic energy. For example, the FGM combustion model has less than 3% relative error with experimental results in prediction of the puffing frequency; but other combustion models are more than 10% relative error. In the prediction of the mean velocity field, the EDM combustion model has a higher accuracy than the FGM.

**Keywords:** Combustion model, Large eddy simulation, Flamelet generated manifold, Eddy dissipation, Infinite chemistry