

## شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ اختلاط هوا و سوخت در یک محفظه احتراق گردابه در بند - بررسی اثر نسبت طول به عمق حفره

رضا شریف‌زاده<sup>۱</sup> و اصغر افشاری<sup>۲\*</sup>

۱- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران، reza.sharifzade@ut.ac.ir

۲- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران، afsharia@ut.ac.ir

\* نویسنده مخاطب

(تاریخ دریافت: ۹۷/۵/۲۸، دریافت آخرین اصلاحات: ۹۷/۸/۰۵، پذیرش: ۹۷/۸/۰۹)

**چکیده:** اختلاط هوا و سوخت در یک محفظه احتراق گردابه در بند با استفاده از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ کوپل شده با تابع توزیع جرمی فیلترشده مطالعه شده است. در این پژوهش، اثر نسبت طول به عمق حفره ( $L/D$ ) به عنوان یک پارامتر هندسی تأثیرگذار بر کیفیت اختلاط هوا و سوخت در جریان غیراحتراقی ارزیابی می‌شود. ساختار گردابه‌ای در داخل حفره به همراه معیارهای کمی مختلف همانند نسبت هم‌ارزی میانگین حفره و نسبت هم‌ارزی استوکیومتریکی، توزیع کلی سوخت و منحنی‌های اختلاط به منظور بررسی نحوه تغییرات کیفیت اختلاط مورد استفاده قرار گرفته‌اند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که با افزایش نسبت طول به عمق حفره از ۰/۶۰ به ۰/۸۵ به دلیل افزایش حجم گردابه اصلی، کیفیت اختلاط در داخل حفره افزایش می‌یابد. با افزایش بیشتر این نسبت تا نزدیکی ۰/۹۳ کیفیت اختلاط در داخل حفره موقتاً افت می‌کند و سپس در نزدیکی ۱/۰۰ مجدداً روند بهبود کیفیت ادامه پیدا می‌کند. اما، بهترین بازدهی اختلاط در همان نسبت طول به عمق حفره ۰/۸۵ رخ می‌دهد، به طوری که این نسبت دارای بیشترین تمرکز جرم سوخت در محدوده نسبت هم‌ارزی میانگین حفره و نسبت هم‌ارزی استوکیومتریکی است. یافته‌ها با شواهد برخاسته از ساختار گردابه‌ای جریان در داخل حفره هم‌خوانی دارد.

**کلیدواژگان:** محفظه احتراق گردابه در بند، اختلاط هوا و سوخت، نسبت طول به عمق حفره، شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ

### مقدمه

محفظه احتراق گردابه در بند (TVC)<sup>۱</sup> هندسه‌ای جدید برای محفظه احتراق است که عملکردی پایدار در محدوده وسیع‌تری از نسبت‌های هم‌ارزی در مقایسه با محفظه‌های کنونی از خود نشان می‌دهد. این نوع محفظه احتراق یک گردابه متشکل از سوخت و هوای در حال احتراق را به صورت پایدار در داخل یک حفره در مجاورت جریان اصلی نگه می‌دارد و از آن برای گسترش اشتعال به جریان اصلی استفاده می‌کند. این شیوه پایدارسازی شعله محفظه احتراق را قادر می‌سازد که در مخلوط‌های پیش‌آمیخته رقیق با پایداری بیشتری به عملکرد مطلوب خود ادامه دهد [۱]. اولین پژوهش روی TVC توسط سو و همکاران [۲] روی یک محفظه حلقوی انجام شد. نتایج آن‌ها نشان داد که TVC دارای چند مزیت نسبت به محفظه‌های متداول با پایدارسازی چرخشی است، از جمله: (الف) بهبود قابل توجه در اشتعال، جلوگیری از خاموشی و قابلیت روشن‌سازی مجدد در ارتفاع، (ب) کاهش قابل توجه در تولید آلاینده NO<sub>x</sub>، (ج) محدوده عملکردی وسیع‌تر همراه با بازدهی احتراق تا ۹۹ درصد. پس از این پژوهش، تحقیقات زیادی به موضوع TVC عمدتاً برای کاربردهای توربین گاز پرداخته‌اند.

1. Trapped Vortex Combustor (TVC)

کیفیت اختلاط هوا و سوخت در داخل محفظه احتراق اثرات قابل ملاحظه‌ای بر بازدهی احتراق و تولید آلاینده‌ها دارد. در صورت عدم اختلاط مناسب هوا و سوخت، واکنش به‌طور کامل صورت نمی‌گیرد و در این شرایط احتراق با تولید آلاینده‌هایی مانند هیدروکربن‌های نسوخته و مونواکسیدکربن همراه خواهد بود. همچنین، موقعیت شعله به‌طور مستقیم تحت تاثیر توزیع سوخت در داخل محفظه است. درجه اختلاط ضعیف باعث می‌شود شعله به‌طور کامل در داخل حفره قرار نگیرد و بخش بزرگتری از آن در داخل کانال خروجی تشکیل شود. در نتیجه، نواحی دمابالا به پایین دست جریان منتقل می‌شوند که موجب افزایش تولید NOx می‌شود [۳]. طراحی ابعاد حفره، به نحوی که یک گردابه پایدار در داخل آن تشکیل شود و هوا و سوخت تزریق شده با کیفیت مناسبی مخلوط شوند، از اهمیت فوق‌العاده‌ای برخوردار است.

نخستین پژوهش مرتبط با اختلاط هوا و سوخت در TVC مطالعه عددی استون و منون [۳] است. در این مطالعه، اثر عدد رینولدز بر اختلاط هوا و سوخت و مشخصات احتراق یک TVC با هندسه متقارن محوری با استفاده از شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ (LES) <sup>۱</sup> بررسی شده است. آن‌ها در پژوهش خود از سرعت فیلترگیری شده و ریشه میانگین مربعات (RMS) <sup>۲</sup> نوسانات سرعت برای بررسی کیفیت اختلاط بهره‌گرفتند. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش رینولدز ورودی کیفیت اختلاط در هر دو جریان احتراقی و غیراحتراقی بهبود می‌یابد و در نتیجه این بهبود، واکنش‌های شیمیایی به‌طور کامل در داخل حفره اتفاق می‌افتد. دومین پژوهش مرتبط با اختلاط هوا و سوخت در TVC مطالعه عددی میشر و سودهارشان [۴] بر روی یک TVC دوبعدی دو حفره‌ای است. در این تحقیق، اثر نسبت طول به عمق حفره و سرعت جریان اصلی بر اختلاط در ابعاد مولکولی <sup>۳</sup> با استفاده از معیار شدت جدایی <sup>۴</sup> مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد که لبه گردابه و لایه برشی حفره بیشترین اختلاط را دارند و به این دلیل است که در این دو ناحیه شدت اغتشاش بالایی وجود دارد. همچنین، نتایج نشان داد که با افزایش نسبت طول به عمق حفره و سرعت جریان اصلی، مکش جریان اصلی به داخل حفره و در نتیجه، اختلاط هوا و سوخت تسهیل می‌شود. در پژوهشی دیگر، آگاروال و همکاران [۵] مطالعه‌ای تجربی روی یک TVC تک‌حفره‌ای انجام دادند. در پژوهش آن‌ها برای تسهیل اختلاط جریان حفره با جریان اصلی از پره راهنمای جریان و نصب ستون‌های مورب در مسیر حرکت سیال استفاده شد. آن‌ها از ضریب الگوی دما به‌عنوان معیار اختلاط بهره‌گرفتند. مشاهدات تجربی اختلاط خوبی بین جریان اصلی و جریان حفره در محفظه احتراق نشان داد. به‌نحوی که، ضریب الگو در خروجی TVC حدود ۰/۱ و بازدهی احتراق حدود ۹۶ درصد به‌دست آمد. در پژوهشی جدیدتر، کریشنا و راولیکریشنا [۶] به‌شیوه آزمایشگاهی به‌بررسی اثر نسبت شار تکانه <sup>۵</sup>، یعنی نسبت تکانه جریان‌های تزریق شده به حفره به تکانه جریان اصلی، بر کیفیت اختلاط و ساختار گردابه در یک TVC تک‌حفره‌ای پرداختند. در این پژوهش نیز، به‌منظور پایداری بیشتر جریان، یک پره راهنما در نزدیکی لبه راهنمای حفره نصب و فقط سوخت به داخل حفره تزریق شد. هدف اصلی آزمایش آن‌ها بررسی کیفیت اختلاط از طریق معیار پارامتر کسر مخلوط در جریان غیراحتراقی و بررسی ساختار گردابه در جریان احتراقی بود. مشاهدات جریان غیراحتراقی نشان داد که با کاهش نسبت شار تکانه، اختلاط هوا و سوخت بهبود می‌یابد. مشاهدات همچنین نشان داد میدان جریان تنها تابع نسبت شار تکانه است، که بیانگر اهمیت این پارامتر در مطالعه TVC است. توزیع چرخش نشان داد، با کاهش نسبت شار تکانه، اندازه چرخش و در نتیجه کیفیت اختلاط افزایش می‌یابد.

لیو و همکاران [۷] در مطالعه‌ای عددی به‌بررسی اثر نحوه تزریق سوخت و هوا بر عملکرد TVC پرداختند. آن‌ها اثر تزریق سوخت از دیواره بالادستی حفره (FWF) <sup>۶</sup> و دیواره پایین‌دستی حفره (BWF) <sup>۷</sup> بر مشخصات احتراقی یک TVC دوبعدی تک‌حفره‌ای را بررسی کردند. مشاهدات نشان داد که شیوه BWF، که در آن محل تزریق سوخت دور از جریان اصلی است،

1. Large Eddy Simulation
2. Root mean square
3. Micro-mixing
4. Intensity of segregation
5. Momentum Flux Ratio (MFR)
6. Front-Wall-Fueling (FWF)
7. Back-Wall-Fueling (BWF)

بازده احتراقی بیشتری نسبت به FWF، که در آن محل تزریق سوخت نزدیک جریان اصلی است، دارد. مطالعه دیگری، که اثر محل تزریق سوخت بر کیفیت اختلاط را در نظر گرفت، پژوهش چن و همکاران [۸] است. در پژوهش آن‌ها یک TVC با هندسه تقارن محوری مربوط به یک میکرومجت به شیوه عددی به منظور بررسی اثر محل تزریق سوخت بر اختلاط هوا و سوخت و پایداری شعله مطالعه شد. چهار پیکربندی مختلف برای محل تزریق سوخت با هدف ارتقای اختلاط هوا و سوخت مورد آزمایش قرار گرفت. سه پیکربندی اول سوخت را به درون حفره تزریق می‌کردند، در حالی که پیکربندی چهارم سوخت را به داخل جریان بالادستی حفره تزریق می‌کرد. نتایج نشان داد، مواردی که سوخت را مستقیماً به داخل حفره تزریق می‌کنند، به دلیل تشکیل یک ناحیه غنی از سوخت نمی‌توانند شعله‌ای پایدار در داخل حفره تشکیل دهند، ولی تزریق سوخت به داخل جریان اصلی می‌تواند باعث افزایش کیفیت اختلاط شود.

استفاده از معیاری دقیق برای کیفیت اختلاط در تحقیقات قبلی کمتر مشاهده می‌شود و بازدهی اختلاط بیشتر بر مبنای پایداری شعله و بازدهی احتراق سنجیده شده است. همچنین، اثر نسبت طول به عمق حفره تاکنون تنها بر اختلاط در ابعاد مولکولی و پایداری شعله بررسی شده است، در حالی که تغییرات کارایی اختلاط بر حسب نسبت طول به عمق حفره به صورت دقیق و برای نسبت‌های مختلف و متنوع بررسی نشده است. در پژوهش حاضر اختلاط آشفته هوا و سوخت در یک محفظه احتراق گردابه در بند با استفاده از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ کوپل‌شده با روش تابع توزیع جرمی فیلترشده (FMDF)<sup>۱</sup> مطالعه می‌شود. روش ترکیبی LES/FMDF تاکنون برای تحلیل جریان‌های مختلف همچون جریان جت آزاد و جت در جریان متقاطع استفاده شده است، ولی برای اولین بار در این پژوهش، به منظور تحلیل جریان در TVC مورد استفاده قرار می‌گیرد. محفظه احتراق گردابه در بند مورد مطالعه دارای هندسه‌ای دوبعدی و تک‌حفره‌ای است که حفره آن دارای یک جت تزریق سوخت پروپان در قسمت پایین دیواره بالادستی و یک جت تزریق هوا در قسمت بالای دیواره پایین‌دستی است. برای این محفظه اثر نسبت طول به عمق حفره بر درجه اختلاط در جریان غیراحتراقی به منظور پیش‌بینی برخی از رفتارهای جریان احتراقی با هزینه محاسباتی پایین‌تر بررسی می‌شود. به منظور کمی‌سازی کیفیت کلی و موضعی اختلاط از چهار معیار به نام‌های توزیع کلی سوخت، ناکارایی اختلاط مکانی، پارامتر مخلوط‌شدگی و مخلوط‌نشده‌گی مکانی بهره گرفته می‌شود.

## معادلات حاکم و روش عددی

روش LES/FMDF یک سیستم ترکیبی از رویکردهای اوپلری و لاگرانژی است که برای میدان جریان و میدان اسکالر (کسر جرمی سوخت) به طور هم‌زمان حل می‌شوند. این معادلات به صورت جداگانه در دو بخش ارائه خواهند شد.

### معادلات LES حاکم

معادلات LES فیلترشده فاوَره<sup>۲</sup> تراکم‌پذیر را می‌توان به صورت زیر خلاصه و در مختصات عمومی بیان کرد [۹]:

$$\frac{\partial}{\partial t}JU + \frac{\partial \bar{F}}{\partial \xi} + \frac{\partial \bar{G}}{\partial \eta} + \frac{\partial \bar{H}}{\partial \zeta} = J\bar{S} \quad (1)$$

عملیات فیلترگیری مکانی به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۰]:

$$\bar{f}(\mathbf{x}, t) = \langle f(\mathbf{x}, t) \rangle_{\ell} = \int_{-\infty}^{+\infty} f(\mathbf{x}', t) \mathcal{H}(\mathbf{x}, \mathbf{x}') d\mathbf{x}' \quad (2)$$

که  $\mathbf{x}$  بردار موقعیت،  $\mathcal{H}$  تابع فیلترگیری و  $\langle f(\mathbf{x}, t) \rangle_{\ell}$  نشان‌دهنده مقدار فیلترشده متغیر  $f(\mathbf{x}, t)$  است. در جریان‌های تراکم‌پذیر استفاده از مقدار فیلترشده فاوَره مفیدتر است:  $\langle f(\mathbf{x}, t) \rangle_L = \langle \rho f \rangle_{\ell} / \langle \rho \rangle_{\ell}$ . در معادلات بالا،  $t$  نشان‌دهنده زمان،  $\xi$ ،  $\eta$  و  $\zeta$  مختصات در دستگاه عمومی و  $J$  ژاکوبین تبدیل دستگاه مختصات است. همچنین  $JU$  نشان‌دهنده بردار پاسخ است. شارهای  $\bar{F}$ ،  $\bar{G}$  و  $\bar{H}$  به صورت زیر تعریف می‌شوند:

1. Filtered Mass Density Function (FMDF)  
2. Favre-filtered equations

$$\begin{aligned} \hat{F} &= J[\xi_t U + \xi_x(F - F_v) + \xi_y(G - G_v) + \xi_z(H - H_v)] \\ \hat{G} &= J[\eta_t U + \eta_x(F - F_v) + \eta_y(G - G_v) + \eta_z(H - H_v)] \\ \hat{H} &= J[\zeta_t U + \zeta_x(F - F_v) + \zeta_y(G - G_v) + \zeta_z(H - H_v)] \end{aligned} \quad (3)$$

در معادله بالا،  $\xi_t$ ،  $\xi_x$ ، ...،  $\zeta_z$  ضرایب متریک‌اند.  $F$ ،  $G$  و  $H$  نشان‌دهنده شارهای غیرلزج و  $F_v$ ،  $G_v$  و  $H_v$  نشان‌دهنده شارهای لزج‌اند [۹].

در کار پژوهشی حاضر، به دلیل اینکه تنها جریان غیرواکنشی مورد مطالعه قرار می‌گیرد، جمله چشمه برابر با صفر است. گرانروی زیرشبکه مؤثر  $\mu_e$  به صورت زیر درمی‌آید:

$$\mu_e = \mu + \bar{\rho} \nu_t \quad (4)$$

در معادله بالا،  $\mu$  گرانروی دینامیک مولکولی است. لزجت سینماتیک زیرشبکه ( $\nu_t$ ) با استفاده از مدل لزجت گردابی موضعی تطبیق‌یافته برای دیواره [۱۱] محاسبه می‌شود. شار انتالپی کل زیرشبکه ( $H_{ij}^{sgs}$ ) به صورت زیر مدل می‌شود [۳، ۱۲]:

$$H_{ij}^{sgs} = -(\bar{\rho} \nu_t / Pr_t)(\partial \tilde{H} / \partial x_i), \quad \tilde{H} = \tilde{E} + \bar{p} / \bar{\rho} \quad (5)$$

مشتقات مکانی با استفاده از روش تفاضل محدود فشرده مرتبه شش<sup>۲</sup> به دست می‌آیند. به منظور انتگرال‌گیری زمانی یک روش رانج-کوتا<sup>۳</sup> سه مرحله‌ای با پایداری قوی و حافظه مورد نیاز پایین [۱۵] استفاده شده است. اغتشاشات تولیدشده به وسیله رشد خطاهای عددی در فرکانس‌های بسیار بالا با اعمال فیلترگیری مکانی ضمنی مرتبه بالا حذف می‌شوند [۱۳].

### تابع توزیع جرمی فیلترشده (FMDF)

با تعریف آرایه‌ای از اسکالرها به صورت  $\phi(x, t) \equiv [\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_\sigma]$ ، تابع توزیع جرمی فیلترشده (FMDF) که با نماد  $F_L$  نمایش داده می‌شود، به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۶]:

$$F_L(\psi; x, t) \equiv \int_{-\infty}^{+\infty} \rho(x', t) \zeta[\psi, \phi(x', t)] G(x' - x) dx' \quad (6)$$

$$\zeta[\psi, \phi(x, t)] = \delta[\psi - \phi(x, t)] \equiv \prod_{\alpha=1}^{\sigma} \delta[\psi_\alpha - \phi_\alpha(x, t)] \quad (7)$$

معادله انتقال حاکم بر تابع توزیع جرمی فیلترشده را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\frac{\partial F_L}{\partial t} + \frac{\partial[\tilde{u}_i F_L]}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ (\gamma + \gamma_t) \frac{\partial(F_L)}{\partial x_i} \right] + \frac{\partial}{\partial \psi_\alpha} [\Omega_m(\psi_\alpha - \tilde{\phi}_\alpha) F_L] - \frac{\partial[\tilde{S}_\alpha F_L]}{\partial \psi_\alpha} \quad (8)$$

این معادله به منظور محاسبه تمام اطلاعات مرتبط با میدان اسکالر (یعنی دما و کسر جرمی اجزای شیمیایی) حل می‌شود. در این معادله  $\Omega_m$  و  $\psi_\alpha$  به ترتیب آرایه اسکالر، میدان ترکیبی آرایه اسکالر و فرکانس اختلاط در داخل زیرشبکه‌اند. میدان‌های سرعت و فشار در معادله (۸) نامعلوم‌اند و با حل معادلات فیلترشده LES با استفاده از روش‌های تفاضل محدود اویلری محاسبه می‌شوند. یک روش لاگرانژی مونت کارلو برای حل معادله FMDF مورد استفاده واقع شده است. در این روش، هر ذره مونت کارلو در فضای فیزیکی با سرعت فیلترشده به اضافه اثرات ترکیبی پخش مولکولی و زیرشبکه و بر اساس معادله دیفرانسیل آماری زیر جابه‌جا می‌شود [۱۵]:

$$dX_i(t) = \left( \tilde{u}_i + \frac{1}{\bar{\rho}} \frac{\partial(\gamma + \gamma_t)}{\partial x_i} \right) dt + \sqrt{2(\gamma + \gamma_t) / \bar{\rho}} dW_i(t) \quad (9)$$

1. Wall-adapting local eddy-viscosity (WALE)  
2. High order, compact-differencing  
3. Runge-kutta

در رابطه بالا،  $X_i$  موقعیت لاگرانژی هر ذره، و  $W_i$  فرایند وینر است [۱۷]. مقدار ترکیبی هر ذره مونت-کارلو در نتیجه اختلاط و واکنش شیمیایی بر طبق معادله دیفرانسیل آماری (SDE) <sup>۱</sup> زیر تغییر می کند:

$$\frac{d\phi_\alpha^+}{dt} = -C_\Omega \frac{\gamma + \gamma_t}{\bar{\rho}} (\phi_\alpha^+ - \bar{\phi}_\alpha) + \hat{S}_\alpha(\phi^+) \quad (10)$$

که  $\phi_\alpha^+ = \phi_\alpha(X(t), t)$  مقدار اسکالر ذره مونت-کارلویی است که در موقعیت لاگرانژی  $X_i$  قرار دارد. ذره مونت-کارلو شماره  $n$  اطلاعاتی شامل موقعیت ذره  $x^n(t)$ ، سرعت ذره  $u^n(t)$  و مقدار اسکالر  $\phi^n(t)$  را برای  $n = 1, 2, \dots, N_p$  دربر دارد. بر طبق تقریب اویلر-مارویاما [۱۷]، انتگرال گیری از معادله SDE یعنی  $dx = Ddt + EdW$  به معادله زیر می انجامد:

$$x_i^n(t_{k+1}) = x_i^n(t_k) + D_i^n(t_k)\Delta t + E^n(t_k)(\Delta t)^{\frac{1}{2}}\xi_i^n(t_k), \quad i = 1, 2, 3 \quad (11)$$

در رابطه بالا،  $\xi_i^n(t_k)$  متغیرهای تصادفی گاوسی مستقل استانداردسازی شده اند. برای توضیحات بیشتر در مورد روش LES/FMDF خوانندگان می توانند به مراجع [۹] و [۱۶] مراجعه کنند.

اسکالر کسر جرمی سوخت را می توان تنها با استفاده از روش FMDF محاسبه کرد و ضرورتی به حل معادله اویلری برای به دست آوردن میدان اسکالر نیست. اما یک معادله اسکالر ابقایی نیز با استفاده از روش های اویلری (تفاضل محدود) تنها به منظور اثبات سازگاری بین روش های اویلری و لاگرانژی حل می شود. اگرچه شبیه سازی FMDF منحصراً از طریق روش های مونت-کارلو امکان پذیر است، عملی ترین رویه استفاده از روش ترکیبی تفاضل محدود و مونت-کارلو است. رابطه روش LES رایج و FMDF در شکل ۱ نشان داده شده است. این فلوجارت همچنین متغیرهای مشترک و سازگاری لازم بین بخش های تفاضل محدود و مونت کارلو حل گر ترکیبی LES/FMDF را نشان می دهد. با چنین روش ترکیبی، برخی از کمیت ها به وسیله تفاضل محدود، برخی به وسیله مونت کارلو و برخی به وسیله هر دو محاسبه می شوند. یعنی یک اشتراک در تعیین برخی کمیت ها وجود دارد. در حالت کلی تمام معادلات کمیت های فیلترشده را می توان به وسیله تفاضل محدود حل کرد که در این معادلات همه عبارت های غیربسته همانند عبارت های چشمه به وسیله روش لاگرانژی مونت کارلو تعیین می شوند [۹].

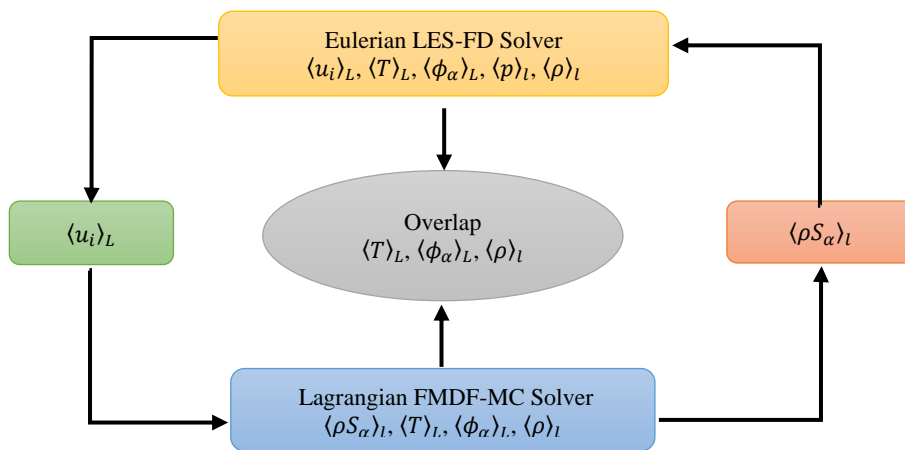


Figure 1- The attributes of LES/FMDF methodology and its LES/FD and FMDF/MC subcomponents [9]

شکل ۱- نسبت های روش ترکیبی LES/FMDF و بخش های تفاضل محدود و مونت-کارلو [۹]

### هندسه جریان و شرایط مرزی

در پژوهش حاضر، یک هندسه رایج برای TVC های دوبعدی تک حفره ای [۶،۵] مطابق شکل ۲-الف در نظر گرفته شده است. نسبت طول به عمق حفره  $(L/D)$  بین ۰/۶۰ تا ۱/۰۰ متغیر است. در حالت کلی پایداری شعله یک TVC دوبعدی تک حفره ای

1. Stochastic differential equation (SDE)

به پارامترهای هندسی مختلف از جمله نسبت طول به عمق حفره، نسبت ارتفاع دیواره پایین دستی به ارتفاع دیواره بالادستی و نسبت ارتفاع کانال ورودی جریان اصلی به عمق حفره بستگی دارد. طبق تحقیقات صورت گرفته، برای TVC های سرعت پایین که در آنها ارتفاع دیواره های بالادستی و پایین دستی یکسان است، حفره ای با نسبت طول به عمق حفره زیر یک دارای احتراقی پایدارتر با افت فشار پایین تر است و نسبت های  $L/D$  بزرگتر از یک بیشتر برای جریان های احتراقی مافوق صوت همانند رمجت ها<sup>۱</sup> و اسکرمجت ها<sup>۲</sup> کاربرد دارد [۱۹، ۱۸، ۲]. در پیکربندی حاضر، یک جت سوخت پروپان از دیواره بالادستی حفره و یک جت هوا از دیواره پایین دستی تزریق می شود. جریان اصلی یک مخلوط رقیق هوا و سوخت با نسبت هم آرمزی ۰/۱۵ است. بر اساس سرعت جت ها، نسبت هم آرمزی متوسط برای حفره برابر با ۱/۸۵ و نسبت هم آرمزی کلی ۰/۴۴ است، که مقادیر تقریباً رایجی برای TVC هستند. شکل ۲-ب هندسه و ابعاد ورودی جت های سوخت و هوا را روی دیواره های بالادستی و پایین دستی حفره نشان می دهد. فرض می شود که جریان در جهت محور  $Z$  تکرار پذیر است.

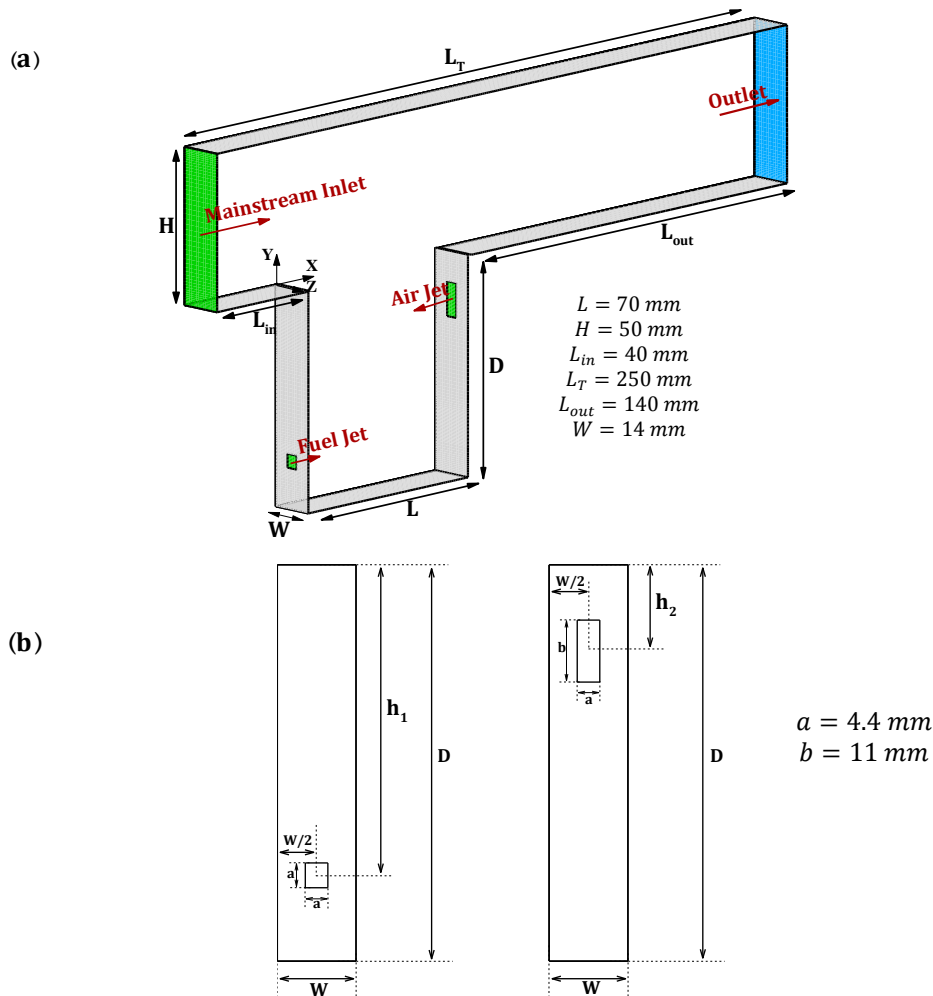


Figure 2- (a) Geometry and dimensions of the considered typical trapped vortex combustor, (b) Fuel jet entrance geometry on the cavity forebody (left) and air jet entrance geometry on the cavity afterbody (right)

شکل ۲- (الف) هندسه و ابعاد محفظه احتراق و موقعیت جریان های ورودی و خروجی، (ب) ابعاد مجرای ورودی جت سوخت روی دیواره بالادستی (سمت چپ) و جت هوا روی دیواره پایین دستی (سمت راست)

1. Ramjets  
2. Scramjets

در این پژوهش، پنج مقدار برای نسبت  $L/D$  در نظر گرفته شده که به همراه موقعیت جت‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. در این پنج نسبت مختلف  $L/D$ ، طول حفره ( $L$ ) ثابت نگه داشته می‌شود و عمق حفره ( $D$ ) تغییر داده می‌شود. موقعیت جت‌ها نیز متناسب با عمق حفره تغییر داده می‌شود، اما ابعاد مجرای ورودی جت‌ها ثابت است.

جدول ۱- موقعیت جت‌های هوا و سوخت برای پیکربندی‌های در نظر گرفته شده

Table 1- Fuel and air jet positions for considered configurations

Configuration No.	$L/D$	$h_1(mm)$	$h_2(mm)$
1	0.60	91.7	25.0
2	0.70	78.6	21.4
3	0.85	64.7	17.6
4	0.93	59.1	16.1
5	1.00	55.0	15.0

در ورودی‌ها شرط مرزی مشخصه‌ای جریان ورودی به همراه پروفیل سرعت دارای نوسانات ولی با میانگین یکنواخت اعمال شده است [۹]. مقادیر سرعت، دما و غلظت سوخت در مرزهای ورودی در جدول ۲ ارائه شده است. برای مرز خروجی شرط مرزی مشخصه کوپل شده با شرط مرزی جابه‌جایی اعمال شده است. برای دیواره‌ها نیز شرط عدم لغزش و عایق حرارتی و نفوذناپذیری جرمی اعمال می‌شود. همچنین با توجه به تکرارپذیری جریان در جهت عرضی (محور  $z$ )، شرط مرزی متناوب برای دیواره‌های جانبی در نظر گرفته شده است. هدف اصلی پژوهش پیش‌رو مطالعه و ارزیابی اختلاط هوا و سوخت با استفاده از معیارهای کمی اختلاط در هریک از پنج پیکربندی مذکور و بررسی نحوه تغییرات کیفیت اختلاط با نسبت  $L/D$  است.

جدول ۲- شرایط سرعت، دما و غلظت سوخت در مرزهای ورودی

Table 2- Inlet parameters for mainstream, fuel jet and air jet inlets

Boundary	Reynolds Number	Velocity ( $m/s$ )	Fuel Mass Fraction
Mainstream Inlet	29000	8.4	0.01
Fuel Jet Inlet	2200	7.1	1.00
Air Jet Inlet	10200	23.6	0.00

## نتایج

حل گر جریان مورد استفاده در این پژوهش قبلاً با شبیه‌سازی مستقیم و شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ جریان‌های احتراقی و غیراحتراقی متعددی همانند جریان‌های حفره‌ای، جت‌های آشفته دایره‌ای و صفحه‌ای، جت در جریان متقاطع، موتورهای احتراق داخلی، جریان‌های آشفته رینولدز بالا در محفظه‌های احتراق با انبساط ناگهانی در مقطع جریان و آشفته‌گی همسان گرد اعتبارسنجی شده است و صحت آن مورد بررسی و تأیید قرار گرفته است [۹، ۱۸].

## ارزیابی دقت شبکه

به منظور اجرای استراتژی چندبلوکی، یک شبکه محاسباتی با دو بلوک که از طریق یک مرز مشترک اطلاعات جریان را با یکدیگر تبادل می‌کنند، تولید شده است. شبکه محاسباتی به منظور تحلیل دقیق تر جریان و محاسبه دقیق تر گرادیان‌ها در محل تشکیل لایه‌های برشی همانند ورود جت‌ها و در مجاورت دیواره‌ها دارای دقت بیشتری است. برای شبکه محاسباتی مرجع کوچک‌ترین اندازه سلول‌ها در هر سه جهت  $0.3$  میلی‌متر است و بزرگ‌ترین اندازه سلول‌ها  $5$  برابر بزرگ تر است. نتایج برای دقت‌های شبکه مختلف تغییرات بسیار کمی را نشان می‌دهد. در پژوهش حاضر، به منظور بررسی کیفیت شبکه محاسباتی و حصول اطمینان از دقت کافی شبکه، از معیار پوپ [۲۸] استفاده می‌شود. بر اساس این معیار شبکه‌ای دارای کیفیت کافی برای مدل‌سازی LES با استفاده از روش مورد استفاده در پژوهش حاضر است که حداقل  $80$  درصد از انرژی جنبشی اغتشاشی

جریان را حل کند. به عبارت دیگر، در یک شبکه با دقت کافی، حداکثر ۲۰ درصد از انرژی جنبشی اغتشاشی مدل می‌شود. دقت اغتشاش در معیار پوپ مطابق با رابطه (۱۲) تعریف می‌شود.

$$M_{popo} = \frac{k_{sgs}}{k_{sgs} + k_{res}}, \quad k_{res} = \frac{1}{2} \langle u'_i u'_i \rangle \quad (12)$$

در رابطه بالا،  $k_{res}$  و  $k_{sgs}$  به ترتیب بخش زیرشبکه<sup>۱</sup> (مدل شده) و بخش حل شده<sup>۲</sup> انرژی جنبشی اغتشاشی اند. طبق معیار پوپ مقدار این کسر برای تمامی نقاط شبکه باید زیر ۰/۲ باشد. انرژی جنبشی زیرشبکه با استفاده از رابطه (۱۳) تقریب زده می‌شود [۲۹].

$$k_{sgs} = \frac{(v_{sgs}^2)}{\left(\sqrt{\frac{2}{3}} \frac{A}{\pi K_0^3} \Delta\right)^2}, \quad A = 0.44, \quad K_0 = 1.4 \quad (13)$$

توزیع گره‌های شبکه روی مقادیر مختلف دقت اغتشاش در تحلیل جریان پیکربندی  $L/D = 1.00$  در شکل ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تمام گره‌های شبکه دارای دقت اغتشاشی کمتر از ۰/۲ و بخش عمده‌ای از گره‌ها دارای دقتی در محدوده ۰/۰۱ هستند.

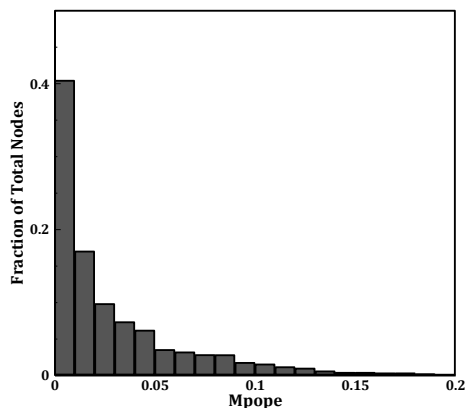


Figure 3- The nodes distribution over turbulence resolution for  $L/D = 1.00$

شکل ۳- توزیع نقاط شبکه روی مقادیر مختلف دقت اغتشاش برای گره‌های شبکه در جریان  $L/D = 1.00$

معیار دیگری، که به منظور ارزیابی دقت شبکه استفاده شده است، معیار فروهلیش [۳۰] است. طبق این معیار دقت شبکه می‌بایست با مقایسه اندازه شبکه  $\Delta$  و تخمینی از مقیاس طولی کولموگروف  $\eta$  سنجیده شود. مقیاس کولموگروف را می‌توان با استفاده از نرخ اتلافات طبق رابطه (۱۴) محاسبه کرد:

$$\eta = \left(\frac{v^3}{\varepsilon}\right)^{\frac{1}{4}} \quad (14)$$

نرخ اتلافات،  $\varepsilon$ ، نیز با استفاده از رابطه (۱۵) تخمین زده می‌شود [۲۹]:

$$\varepsilon \approx \varepsilon_{sgs} = \frac{C_E}{\Delta} \left(\frac{v_{sgs}}{C_v \Delta}\right)^3 \quad (15)$$

در رابطه بالا،  $v_{sgs}$  گرانیروی سینماتیک زیرشبکه است و  $C_v$  و  $C_E$  دو ثابت عددی که به ترتیب برابر با ۰/۷ و ۰/۰۹۴ هستند. بر اساس تحقیقات فروهلیش [۳۰] اندازه شبکه موردنیاز برای تحلیل مقیاس‌های در حد و اندازه مقیاس‌های اتلافی حداکثر برابر با  $12\eta$  است. بنابراین، شبکه‌ای که شرط  $\Delta/\eta < 12$  است، برای محاسبات LES دقت کافی دارد. کانتور

1. Sub-grid part  
2. Resolved part



$\Delta/\eta < 12$  روی صفحه مرکزی TVC برای پیکربندی  $L/D = 1.00$  در شکل ۴ نشان داده شده است. مقادیر کانتور نشان می‌دهد که شبکه مورد استفاده شرط ذکر شده را رعایت می‌کند.

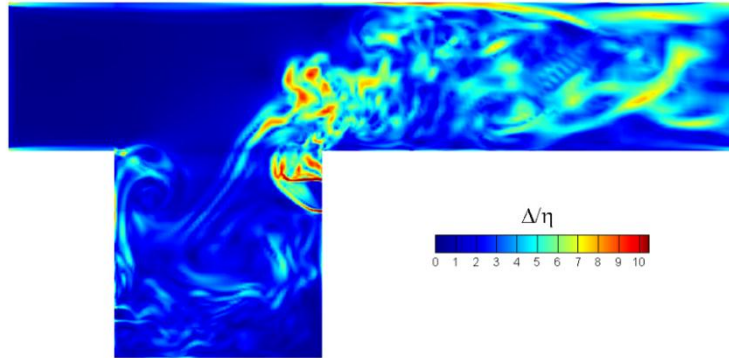


Figure 4-  $\Delta/\eta$  distribution on the TVC center-plane for  $L/D = 1.00$   
 شکل ۴ توزیع  $\Delta/\eta$  روی صفحه مرکزی TVC برای پیکربندی  $L/D = 1.00$

### بررسی سازگاری نتایج روش‌های اویلری و لاگرانژی

همان‌طور که قبلاً اشاره شد، در روش LES/FMDF میدان‌های اسکالر دما و کسر جرمی سوخت به هر دو روش تفاضل محدود اویلری و مونت-کارلو لاگرانژی قابل محاسبه است. در این قسمت میزان سازگاری نتایج این دو روش مورد بحث و بررسی قرار خواهند گرفت. از آنجایی که در جریان غیراحتراقی میدان دما موضوع بحث نیست، در اولین گام، می‌توان از کانتورهای کسر جرمی سوخت به منظور بررسی سازگاری بهره برد. شکل ۵ کانتورهای لحظه‌ای و متوسط کسر جرمی سوخت به دست آمده با روش تفاضل محدود اویلری و مونت-کارلو لاگرانژی را برای  $L/D = 0.85$  نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، سازگاری خوبی بین نتایج دو روش برقرار است. نتایج متوسط‌گیری شده سازگاری بهتری نسبت به نتایج لحظه‌ای از خود نشان می‌دهند.

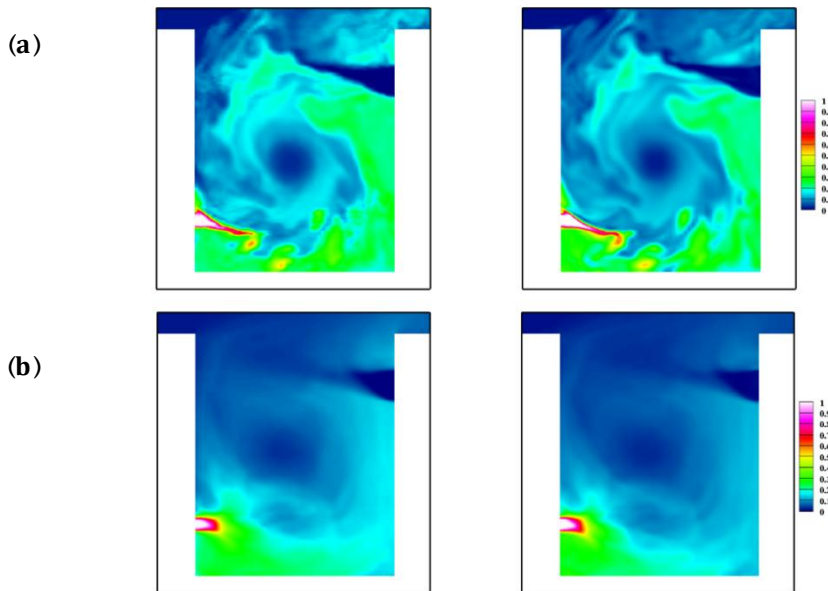


Figure 5- Fuel mass fraction on the center-plane of TVC for  $L/D = 0.85$  obtained by MC scheme (left) and FD scheme (right),  
 (a) Instantaneous field, (b) Time-averaged field

شکل ۵- کانتور غلظت (کسر جرمی) سوخت روی صفحه مرکزی TVC برای  $L/D = 0.85$  به دست آمده با روش مونت-کارلو (چپ) و تفاضل محدود (راست)، (الف) مقادیر لحظه‌ای، (ب) مقادیر متوسط‌گیری شده

به منظور بررسی دقیق تر سازگاری می توان از پروفیل های کسر جرمی سوخت استفاده کرد. بدین منظور برای جریان  $L/D = 0.60$  پروفیل ها در سه مقطع  $y/D = -0.21$ ،  $y/D = -0.50$  و  $y/D = -0.79$  رسم می شوند. همان طور که در شکل ۶ نشان داده شده است، این سه موقعیت مقاطعی اند که از نقطه مرکزی ورودی جت ها و از نقطه میانی روی دیواره های بالادستی و پایین دستی حفره به صورت افقی رسم می شوند.

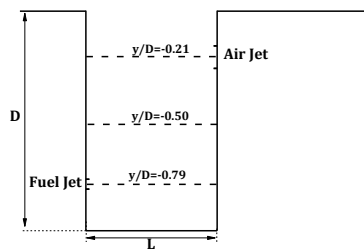


Figure 6- Considered sections for fuel mass fraction plots

شکل ۶- موقعیت های در نظر گرفته شده برای رسم پروفیل های غلظت سوخت

شکل ۷ پروفیل های لحظه ای کسر جرمی سوخت برای سه موقعیت عرضی اشاره شده را نشان می دهد.

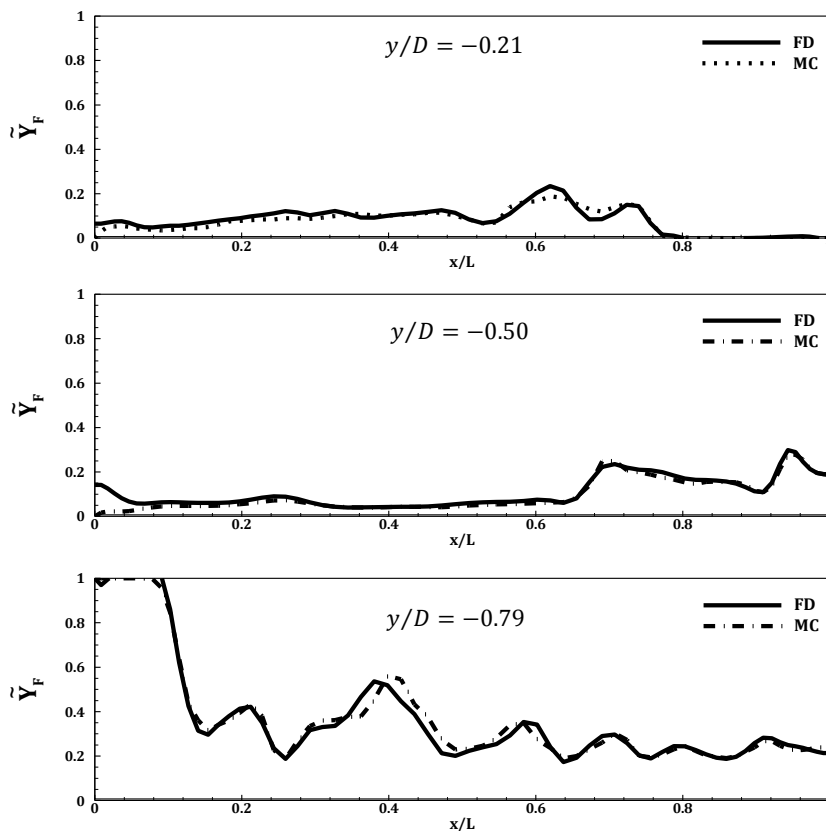


Figure 7- Instantaneous fuel mass fraction distribution at different locations for  $L/D = 0.60$

شکل ۷ پروفیل های لحظه ای غلظت سوخت در سه مقطع مختلف برای  $L/D = 0.60$

شکل ۸ نیز پروفیل‌های متوسط‌گیری شده کسر جرمی سوخت برای سه موقعیت عرضی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، برای جریان  $L/D = 0.60$  جت سوخت از نقطه ورود تا نزدیکی  $x/L = 0.1$  دارای غلظت صد درصدی است.

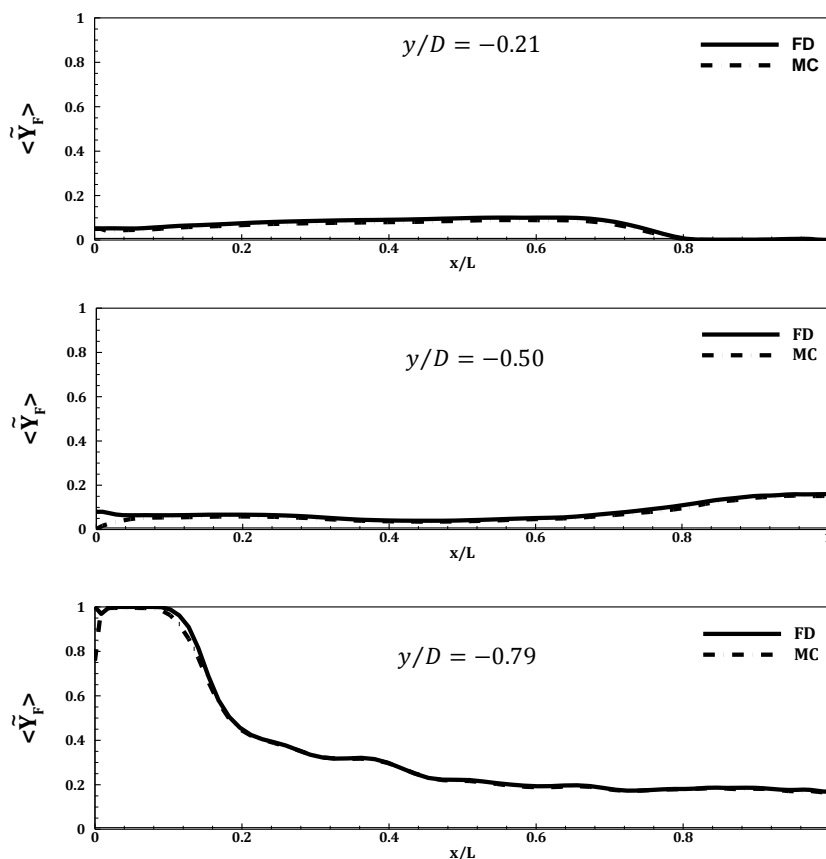


Figure 8- Time-averaged fuel mass fraction distribution at different locations for  $L/D = 0.60$   
 شکل ۸- پروفیل‌های متوسط‌گیری شده غلظت سوخت در سه مقطع مختلف برای  $L/D = 0.60$

به‌منظور ارزیابی کمی سازگاری، توزیع پراکندگی بین اسکالره‌های به‌دست آمده از روش‌های تفاضل محدود و مونت‌کارلو برای نقاط شبکه مربوط به جریان  $L/D = 0.85$  در شکل ۹ رسم شده است. ضریب همبستگی بین نتایج لحظه‌ای و متوسط‌گیری شده با استفاده از رابطه (۱۶) محاسبه می‌شود:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (16)$$

در رابطه بالا،  $x_i$  و  $y_i$  متغیرهای همبسته (اسکالره‌های به‌دست آمده از روش‌های تفاضل محدود و مونت‌کارلو) و  $n$  تعداد داده‌ها (تعداد نقاط شبکه) است.  $\bar{x}$  و  $\bar{y}$  مقادیر متوسط داده‌ها. محاسبه ضریب همبستگی برای شکل ۹ مقادیر  $0.99$  و  $0.98$  را به‌ترتیب برای اسکالره‌های لحظه‌ای و متوسط نشان می‌دهد.

### میدان جریان

بررسی میدان جریان در داخل حفره، به‌دلیل نقش حیاتی در کیفیت اختلاط هوا و سوخت، امری ضروری به‌نظر می‌رسد. مشخصات جریان همانند خطوط جریان و کانتورهای اندازه سرعت لحظه‌ای و متوسط به‌منظور به‌دست آوردن درک کلی از

میدان جریان و نحوه اختلاط سوخت-هوا بررسی می‌شوند. شکل ۱۰ توزیع اندازه سرعت لحظه‌ای بی‌بعد روی سطح مقطع مرکزی محفظه را برای جریان  $L/D = 1.00$  نشان می‌دهد. بی‌بعدسازی با استفاده از سرعت متوسط در ورودی جریان اصلی انجام شده است.

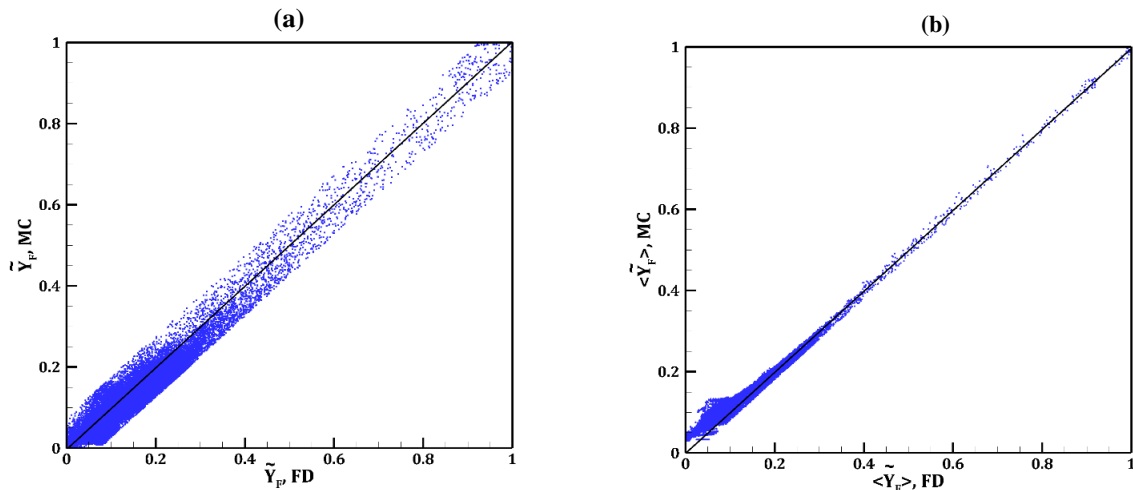


Figure 9- Scatter plots of fuel mass fraction obtained by MC and FD schemes for  $L/D = 0.85$  (a) instantaneous values, (b) time-averaged values

شکل ۹ توزیع پراکندگی اسکالر کسر جرمی سوخت به‌دست آمده از روش‌های مونت کارلو و تفاضل محدود برای  $L/D = 0.85$  (الف) مقادیر لحظه‌ای، (ب) مقادیر متوسط‌گیری شده

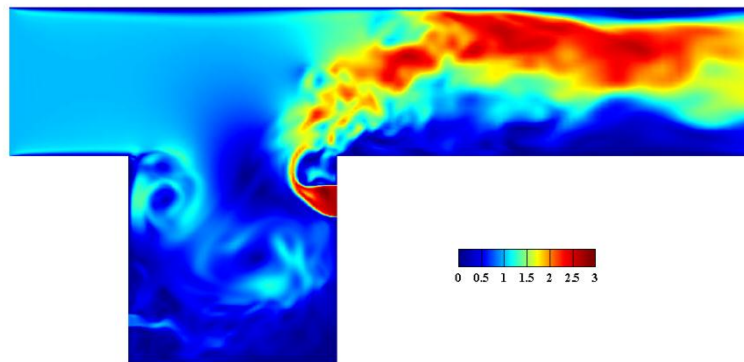


Figure 10- Normalized instantaneous velocity magnitude on the TVC center-plane for  $L/D = 1.00$

شکل ۱۰ توزیع اندازه سرعت لحظه‌ای بی‌بعد روی صفحه مرکزی محفظه برای جریان  $L/D = 1.00$

شکل ۱۱ نیز، توزیع اندازه سرعت متوسط و پروفیل‌های سرعت افقی بی‌بعد در مقاطع مختلف برای جریان  $L/D = 1.00$  را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه پروفیل سرعت در ورودی جریان اصلی یکنواخت است، توسعه جریان مرزی را روی دیواره‌های کانال ورودی می‌توان مشاهده کرد. همچنین، در طول کانال خروجی، پروفیل سرعت تغییر چندانی نمی‌کند. شکل ۱۲ توزیع اندازه چرخش<sup>۱</sup> برای پیکربندی  $L/D = 0.85$  را نشان می‌دهد. مطابق انتظار لایه برشی دهانه حفره و لایه‌های برشی ناشی از جت‌های سوخت و هوا دارای بیشترین اندازه چرخش‌اند.

1. Vorticity magnitude

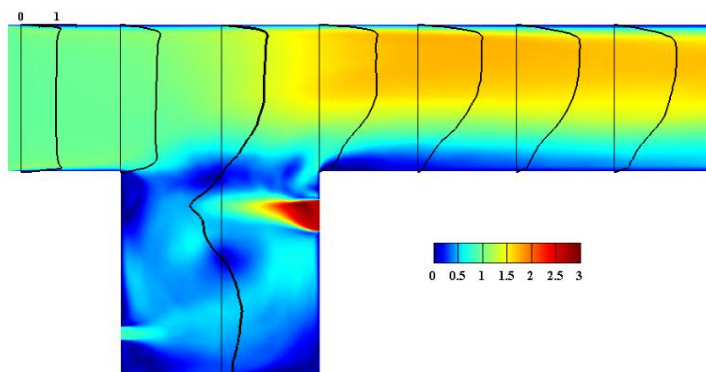


Figure 8- Normalized mean velocity magnitude along with longitudinal velocity profiles at different sections on the TVC center-plane for  $L/D = 1.00$

شکل ۱۱- کانتور اندازه سرعت متوسط بی بعد به همراه پروفیل های سرعت افقی در مقاطع مختلف محفظه برای جریان  $L/D = 1.00$

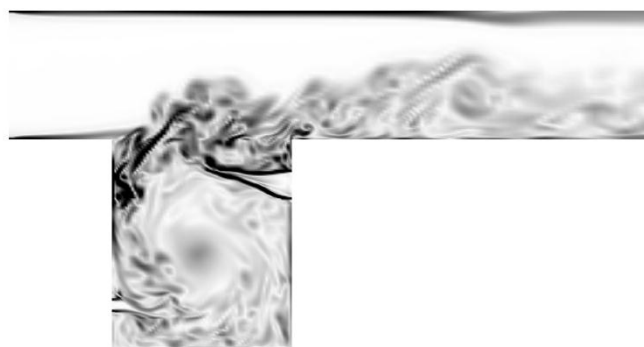


Figure 9- Instantaneous vorticity magnitude for  $L/D = 0.85$

شکل ۱۲- توزیع اندازه چرخش لحظه ای برای  $L/D = 0.85$

شکل ۱۳ خطوط جریان به همراه کانتور کسر جرمی متوسط سوخت را برای نسبت های مختلف  $L/D$  نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود، برای همه موارد در داخل حفره دو یا چند گردابه تشکیل می شود. گردابه اصلی نقش مهم تری در اختلاط هوا و سوخت درون حفره ایفا می کند. زیرا این گردابه می تواند با به حرکت درآوردن سوخت در داخل حفره موجب اختلاط هوا و سوخت شود. همان طور که در شکل ۱۳ (الف) و شکل ۱۳ (ب) مشاهده می شود، برای نسبت  $L/D = 0.60$  و  $L/D = 0.70$  یک گردابه بزرگ پادساعتگرد در مرکز حفره و دو گردابه در قسمت زیرین گردابه اصلی، ساختار کلی جریان را تشکیل می دهند. گردابه اصلی حاصل هم افزایی جت های سوخت و هواست، در حالی که گردابه های زیرین تحت تاثیر جدایش جریان ورودی از جت سوخت است. برای این دو مورد، گردابه اصلی مربوط به  $L/D = 0.70$  حجم بیشتری از حفره را اشغال می کند و تأثیر بیشتری بر جت سوخت دارد. با افزایش نسبت  $L/D$  از  $0.70$  به  $0.85$  و  $0.85$  به  $0.93$  و سپس  $1.00$  بزرگ و بزرگ تر می شود و حجم بیشتری را اشغال می کند، در حالی که گردابه اصلی کوچک تر می شود. به طور هم زمان، مکش جریان اصلی به داخل حفره بیشتر می شود. در کل می توان گفت که گردابه اصلی در

جریان  $L/D = 0.85$  بزرگترین کسر از حجم حفره را در بین همه نسبت‌های  $L/D$  اشغال می‌کند. علاوه بر این، توزیع کسر جرمی سوخت بیانگر آن است که جت سوخت برای  $L/D = 0.85$  در فاصله کمتری از ورودی جت تحت تاثیر ساختار گردابه‌ایی داخل حفره قرار می‌گیرد و انتظار می‌رود که اختلاط بهتری با جریان درون حفره داشته باشد.

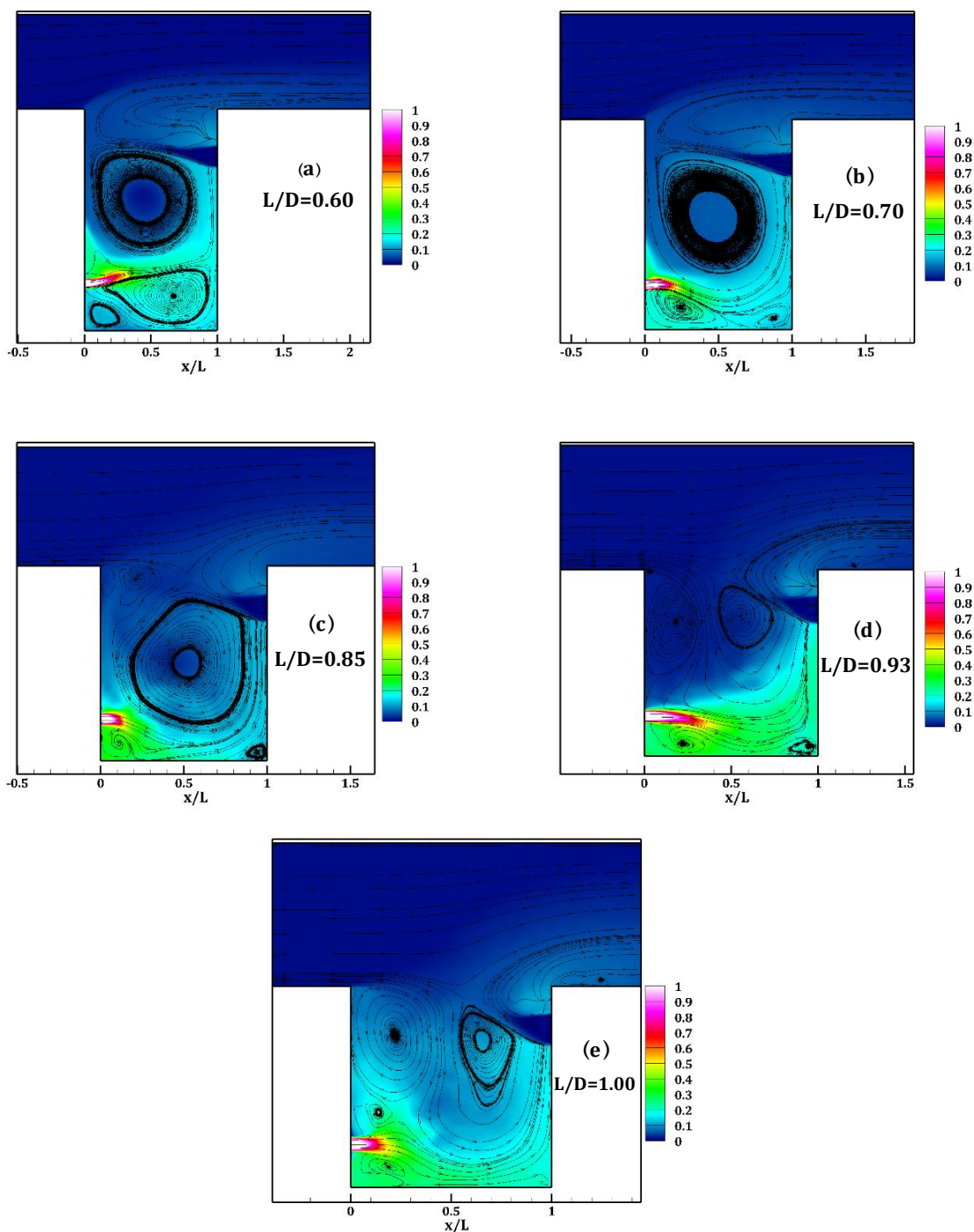


Figure 10- Mean flow streamlines along with time-averaged fuel mass fraction field for all  $L/D$ 's  
 شکل ۱۳ خطوط جریان متوسط به همراه کانتورهای غلظت سوخت متوسط برای نسبت‌های مختلف  $L/D$

## ارزیابی کیفیت اختلاط

یکنواختی مخلوط هوا و سوخت در داخل حفره به‌تنهایی نشان‌دهنده کیفیت اختلاط خوب نیست. کیفیت اختلاط بالا، همچنین، مستلزم توزیع مناسب سوخت در داخل حفره است، به‌نحوی که نسبت‌های هم‌ارزی در ناحیه بزرگی از حفره به یک عدد مطلوب نزدیک باشد. مقدار مطلوب برای نسبت هم‌ارزی می‌تواند نسبت هم‌ارزی متوسط حفره (MCER)<sup>۱</sup> یا نسبت‌های هم‌ارزی نزدیک استوکیومتری (NSER)<sup>۲</sup> باشد. نزدیک‌بودن توزیع سوخت به MCER نشان‌دهنده کیفیت بالای اختلاط است، اگرچه مخلوط داخل حفره غنی از سوخت است. از سوی دیگر، نواحی دارای نسبت هم‌ارزی در محدوده NSER دارای بازدهی احتراق بالاترند. سوخت یا هوای اضافی در داخل مخلوط دمای آدیاباتیک شعله را کاهش می‌دهد و حتی می‌تواند منجر به خاموشی شعله شود. برای دستیابی به یک شعله پایدار در داخل حفره مخلوطی با نسبت هم‌ارزی نزدیک به استوکیومتری مورد نیاز است [۸]. بنابراین، می‌بایست توزیع نسبت هم‌ارزی در داخل حفره و نزدیکی آن به MCER یا NSER برای مقادیر مختلف نسبت  $L/D$ ، ارزیابی شود. بدین‌منظور، معیار توزیع کلی سوخت (GFD)<sup>۳</sup>، که یکنواختی مخلوط هوا-سوخت در داخل حفره را کمی‌سازی می‌کند، مورد استفاده قرار گرفته است. این معیار نشان می‌دهد که سوخت با چه کیفیتی داخل حفره پخش شده است. توزیع کلی سوخت درصدی از کل جرم سوخت را که در بازه‌های مختلف نسبت هم‌ارزی قرار گرفته است، نشان می‌دهد [۳۱]. در این رابطه یک اختلاط باکیفیت زمانی رخ می‌دهد که مقدار میانگین توزیع کلی سوخت و درصد بالایی از جرم سوخت در بازه‌های نزدیک به MCER قرار گرفته باشد. اما، همان‌طور که پیش از این در مورد آن بحث شد، یک مقدار میانگین نزدیک به NSER منجر به احتراقی پایدار می‌شود.

شکل ۱۴ توزیع کلی سوخت در داخل حفره برای نسبت‌های مختلف  $L/D$  را نشان می‌دهد. در توزیع سوخت برای  $L/D = 0.60$  بیشینه توزیع در نزدیکی نسبت هم‌ارزی  $3/5$  قرار دارد، که مقدار مطلوبی نیست، زیرا، به محدوده MCER و NSER نزدیک نیست. در حالی که در نزدیکی نسبت هم‌ارزی  $1/00$  یعنی در محدوده NSER یک بیشینه نسبی مشاهده می‌شود. حدود  $13/5$  درصد از جرم کل سوخت در محدوده NSER (یعنی نسبت هم‌ارزی بین  $0/8$  و  $1/2$ ) و حدود  $6/6$  درصد در محدوده MCER (یعنی نسبت هم‌ارزی بین  $1/6$  تا  $2/00$ ) قرار دارد.

توزیع سوخت برای  $L/D = 0.70$  تقریباً مشابه  $L/D = 0.60$  است، با این تفاوت که این بار بیشینه توزیع در محدوده NSER قرار دارد و یک بیشینه نسبی در نزدیکی نسبت هم‌ارزی  $3/50$  مشاهده می‌شود. این مورد برای ناحیه MCER عملکرد ضعیفی دارد و تنها ۷ درصد از جرم کل سوخت در این محدوده قرار می‌گیرد، در حالی که ۱۷ درصد از جرم سوخت در محدوده NSER قرار گرفته است. برای دو مورد  $L/D = 0.60$  و  $L/D = 0.70$  بیش از ۶۰ درصد سوخت در محدوده بسیار غلیظ یعنی نسبت هم‌ارزی بزرگ‌تر از  $2/00$  قرار گرفته است. بنابراین، دو مورد اول توزیع سوخت مناسبی ایجاد نمی‌کنند.

برای  $L/D = 0.85$  شرایط کمی بهتر است، زیرا، اولاً، بر خلاف دو مورد قبلی، بخش عمده سوخت در محدوده نسبت هم‌ارزی کوچک‌تر از  $2/00$  قرار گرفته است. در درجه دوم محدوده‌های MCER و NSER وضعیت بهتری دارند. به‌نحوی که بیشینه‌های نسبی توزیع کلی سوخت نزدیک این دو محدوده رخ می‌دهد. به‌ترتیب ۱۹ و ۱۴ درصد از جرم سوخت در محدوده MCER و NSER واقع شده است و در کل ۴۰ درصد از جرم کل سوخت در محدوده نسبت هم‌ارزی بین  $1/00$  تا  $2/00$  قرار دارد. در حالی که تنها ۳۸ درصد از جرم سوخت در محدوده بزرگ‌تر از  $2/00$  قرار می‌گیرد. این ارقام همگی حاکی از آن است که این نسبت  $L/D$  مخلوطی نسبتاً یکنواخت ایجاد کرده است. برای  $L/D = 0.93$  بیش از ۷۶ درصد از جرم سوخت در محدوده نسبت هم‌ارزی بزرگ‌تر از  $2/00$  قرار گرفته است و تنها ۴ و  $4/1$  درصد از جرم سوخت در محدوده‌های MCER و NSER قرار می‌گیرد. بدیهی است که این مورد کیفیت اختلاطی به‌مراتب ضعیف‌تر از سه مورد قبل یعنی  $L/D = 0.60$ ،  $L/D = 0.70$  و  $L/D = 0.85$  دارد.

1. Mean cavity equivalence ratio (MCER)  
2. Near stoichiometric equivalence ratio (NSER)  
3. Global fuel distribution (GFD)

اگرچه، در جریان  $L/D = 1.00$  بیشینه توزیع سوخت در نزدیکی محدوده MCER رخ می‌دهد، ولی این بیشینه از نظر مقداری تفاوت چندانی با سایر محدوده‌ها ندارد و این نسبت  $L/D$  سوخت را بین نسبت‌های هم‌ارزی مختلف به‌نحو نامناسبی توزیع کرده است. به‌نحوی که ۶۶ درصد جرم سوخت در محدوده بسیار غلیظ یعنی بزرگ‌تر از نسبت هم‌ارزی ۲/۰۰ قرار گرفته است و تنها ۱۳ و ۶ درصد از جرم سوخت در محدوده MCER و NSER واقع می‌شوند. نتیجه کلی به‌دست آمده از توزیع کلی سوخت (GFD) نشان می‌دهد که نسبت  $L/D = 0.85$  هم از نظر تمرکز جرم سوخت در محدوده‌های MCER و NSER و هم از نظر یکنواختی مخلوط، در وضعیت بهتری قرار دارد. این نتیجه با نتایج به‌دست آمده از میدان جریان هم‌خوانی دارد.

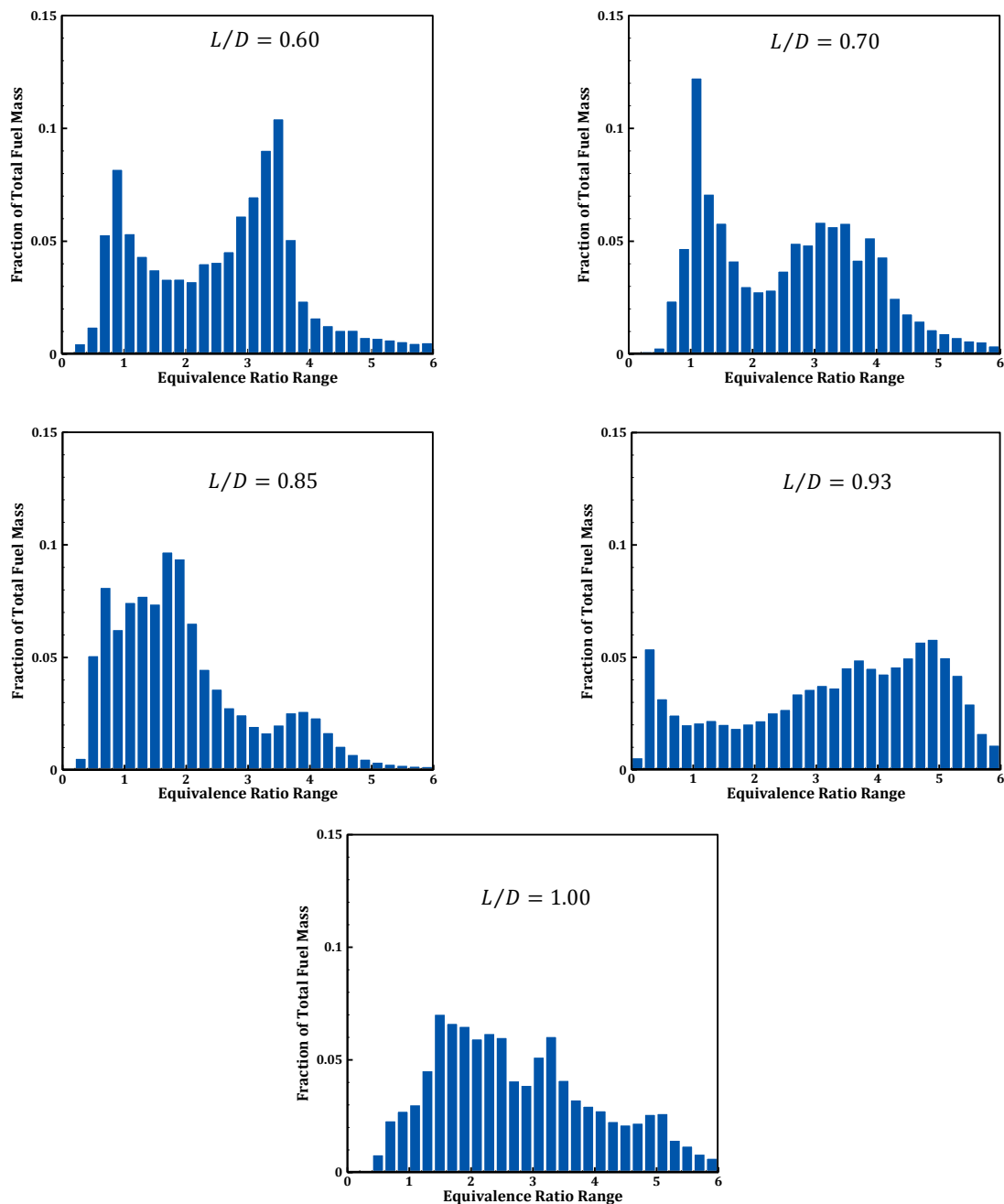


Figure 11- Plot of global fuel distribution (GFD) of in-cavity mixture for all  $L/D$ 's  
 شکل ۱۴- توزیع کلی سوخت پخش شده در داخل حفره برای نسبت‌های مختلف  $L/D$



معیار توزیع کلی سوخت تنها کیفیت کلی اختلاط در داخل حفره را در اختیار ما می‌گذارد. به منظور محاسبه کیفیت اختلاط به صورت موضعی از معیارهای دیگری که در ادامه معرفی خواهند شد، استفاده می‌شود. ناکارایی اختلاط مکانی<sup>۱</sup> یکی از این معیارهاست که باس [۳۲] آن را پیشنهاد داده است:

$$SMD = \frac{\left[ \frac{1}{D_y D_z} \iint (\langle \tilde{Y}_F \rangle - \overline{\langle \tilde{Y}_F \rangle})^2 dydz \right]^{\frac{1}{2}}}{\overline{\langle \tilde{Y}_F \rangle}} \quad (17)$$

$$\overline{\langle \tilde{Y}_F \rangle} = \frac{1}{D_y D_z} \iint \langle \tilde{Y}_F \rangle dydz \quad (18)$$

در رابطه بالا، فرض می‌شود که جریان اصلی در جهت محور  $x$  است و محورهای  $y$  و  $z$  در جهت عرضی اند.  $D_y$  و  $D_z$  ابعاد دامنه مستطیلی انتگرال گیری است. این معیار مشخص کننده میزان متوسط انحرافات اسکالر کسر جرمی سوخت از میانگین آن روی سطح مقطع موردنظر  $\langle \tilde{Y}_F \rangle$  است. این معیار توزیع اسکالر در نقاط یک صفحه را با مقدار متوسط روی همان صفحه (و نه مقدار متوسط کلی) مقایسه می‌کند. بر اساس این معیار، مقدار SMD کمتر روی یک صفحه به معنای اختلاط بهتر در آن صفحه است.

معیار بعدی، که در این قسمت استفاده شده است، پارامتر مخلوط‌شدگی است که توسط واگنر و همکاران [۳۳] پیشنهاد شده است:

$$M = 1 - \frac{\left[ \iint |\langle \tilde{Y}_F \rangle - \overline{\langle \tilde{Y}_F \rangle}| dydz \right]}{\left[ \iint |\langle \tilde{Y}_F \rangle - \overline{\langle \tilde{Y}_F \rangle}| dydz \right]_0} \quad (19)$$

$$\overline{\langle \tilde{Y}_F \rangle} = \frac{1}{D_y D_z} \iint \langle \tilde{Y}_F \rangle dydz \quad (20)$$

در این رابطه نیز انتگرال گیری روی صفحات عمود بر جهت جریان اصلی صورت می‌گیرد. انتگرال دارای اندیس صفر، ماگزیمم مقدار انتگرال در کل دامنه محاسباتی است و  $\overline{\langle \tilde{Y}_F \rangle}$  مقدار متوسط اسکالر روی صفحه انتگرال گیری است. این معیار مقدار متوسط انحرافات از میانگین در یک صفحه را با ماگزیمم مقدار متوسط انحرافات از میانگین در کل دامنه مقایسه می‌کند. بنابراین، اگر میانگین انحرافات در یک صفحه خاص (صورت کسر رابطه (۱۹)) برابر با صفر باشد، یعنی تمام مقادیر با مقدار متوسط برابرند و اختلاط بسیار عالی است ( $M = 1$ ). در نقطه مقابل اگر میانگین انحرافات در یک صفحه خاص برابر با ماگزیمم مقدار آن باشد، یعنی مقادیر اسکالر در آن صفحه فاصله زیادی با مقدار متوسط دارند و اختلاط بسیار ضعیف است ( $M = 0$ ). به عبارت دیگر، این معیار مقایسه‌ای بین مقادیر انحرافات و ماگزیمم مقادیر انحرافات انجام می‌دهد. معیار دیگر مخلوط‌شدگی مکانی است که توسط مولدون و آکاریا [۳۴] معرفی شده است.

$$U_s = \frac{\frac{1}{D_y D_z} \iint (\langle \tilde{Y}_F \rangle - C_{av})^2 dydz}{C_{av}(1 - C_{av})} \quad (21)$$

در معادله بالا،  $C_{av}$  کسر جرمی سوخت در شرایطی است که کل هوا و سوخت ورودی به طور کامل ترکیب شده باشند. بنابراین:

$$C_{av} = \frac{\dot{m}_{fuel}}{\dot{m}_{fuel} + \dot{m}_{air}} \quad (22)$$

این معیار مشخص کننده میزان متوسط انحرافات اسکالر از میانگین کلی آن است. به عبارت دیگر، این معیار توزیع اسکالر در نقاط یک صفحه را با مقدار متوسط کلی (و نه مقدار متوسط روی آن صفحه خاص) مقایسه می‌کند. پس انتظار می‌رود، نتایج دقیق تری نسبت به دو معیار قبلی ارائه دهد. بر اساس این معیار هرچه مقدار  $U_s$  روی یک صفحه کمتر باشد، اختلاط در آن صفحه بهتر صورت گرفته است.

1. Spatial mixing deficiency (SMD)

با استفاده از معیارهای معرفی شده می توان کیفیت اختلاط پنج پیکربندی مطرح در مسأله را با یکدیگر مقایسه کرد. به منظور قضاوت بهتر در مورد نتایج این معیارها، میانگین آن‌ها برای هر نسبت  $L/D$  در داخل حفره محاسبه و رسم می شوند. شکل ۱۵ نحوه تغییرات مقدار میانگین سه معیار پارامتر مخلوط‌شدگی، مخلوط‌نشدگی مکانی و ناکارایی اختلاط مکانی با نسبت  $L/D$  را برای مخلوط هوا و سوخت در داخل حفره نشان می دهد. از این منحنی‌ها می توان نتیجه گرفت که نسبت  $L/D = 0.93$  دارای بدترین کیفیت اختلاط در داخل حفره است، در حالی که نسبت  $L/D = 0.85$  از نظر کیفیت اختلاط در داخل حفره بهترین گزینه است. منحنی‌ها، همچنین، نشان می دهند، همان گونه که انتظار می رفت، با افزایش نسبت  $L/D$  کیفیت اختلاط بهبود می یابد، ولی این روند بهبود ادامه دار نیست. بلکه، با افزایش نسبت  $L/D$ ، کیفیت اختلاط داخل حفره در نزدیکی  $L/D = 0.93$  دچار کاهش ناگهانی می شود و سپس، دوباره، روند بهبود خود را ادامه می دهد.

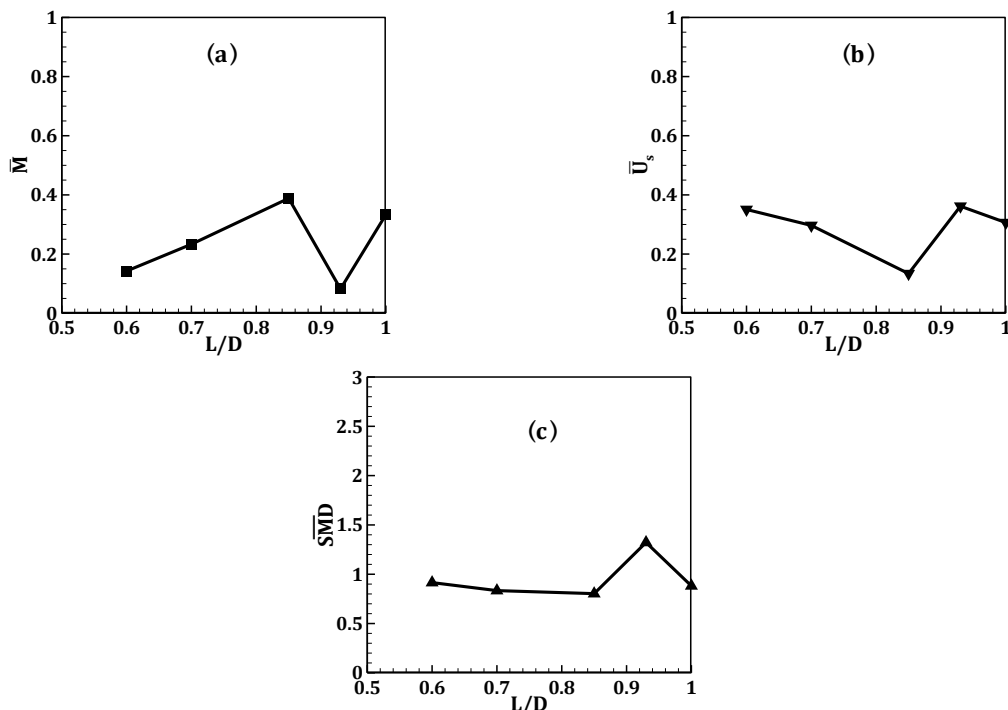


Figure 12- Variation of (a) mean value of mixedness parameter, (b) mean value of spatial unmixedness, (c) mean value of spatial mixing deficiency with  $L/D$  ratio

شکل ۱۵- منحنی تغییرات (الف) مقدار میانگین پارامتر مخلوط‌شدگی، (ب) مقدار میانگین مخلوط‌نشدگی مکانی، و (ج) مقدار میانگین ناکارایی اختلاط مکانی بر حسب نسبت طول به عمق حفره

به منظور بررسی نحوه تغییرات کیفیت موضعی اختلاط در داخل حفره، معیارهای پارامتر مخلوط‌شدگی و مخلوط‌نشدگی مکانی برای همه نسبت‌های  $L/D$  مطرح در این پژوهش در طول حفره محاسبه و منحنی تغییرات آن در شکل ۱۶ رسم شده است. مشاهده می شود، که کیفیت اختلاط در میانه حفره بالاتر است و دو انتهای حفره، به ویژه، انتهای چپ اختلاط ضعیفی دارند. این پدیده ناشی از اثر جت‌های سوخت و هواست.

همان طور که مشاهده شد، تمامی معیارها نشان می دهند که با افزایش نسبت  $L/D$  از ۰/۶۰ تا ۰/۸۵ اختلاط در داخل حفره بهبود می یابد. اما، در مورد نسبت‌های ۰/۹۳ و ۱/۰۰ رفتاری متفاوت قابل مشاهده است. تمامی معیارها نشان می دهند، که با افزایش نسبت  $L/D$ ، کیفیت اختلاط در داخل حفره در حوالی  $L/D = 0.93$  با افت ناگهانی مواجه می شود و سپس، دوباره، روند بهبود خود را باز می یابد. علت این پدیده را می توان با استفاده از الگوی جریان، که پیشتر ارائه شد، توضیح داد. از پیکربندی  $L/D = 0.60$  تا پیکربندی  $L/D = 0.85$  خطوط جریان به نحوی تغییر می کنند که با کم شدن عمق حفره، گردابه

اصلی حجم بیشتری از حفره را اشغال می‌کند. وجود یک گردابه واحد پایدار با حجم حداکثری در داخل حفره باعث به گردش در آمدن سوخت در کل نواحی حفره و نه فقط در یک ناحیه خاص می‌شود، که می‌تواند منجر به بهبود کیفیت اختلاط شود. بنابراین، طبیعی است که افزایش نسبت  $L/D$  از ۰/۶۰ تا ۰/۸۵، که منجر به افزایش حجم گردابه اصلی می‌شود، بهبود اختلاط در داخل حفره را در پی دارد. خطوط جریان برای  $L/D = 0.93$  و  $L/D = 1.00$  نشان می‌دهند که گردابه اصلی برای این موارد کاملاً منقبض شده و دارای کمترین حجم ممکن است. پس، انتظار می‌رود که این دو مورد در مقایسه با سه مورد قبلی کیفیت اختلاط پایین‌تری داشته باشند. این انتظار در مورد  $L/D = 0.93$  کاملاً برآورده می‌شود و این مورد دارای ضعیف‌ترین کیفیت اختلاط بین همه موارد است، ولی مورد  $L/D = 1.00$  رفتاری متفاوت از خود نشان می‌دهد. اگرچه این مورد دارای اختلاط ضعیف‌تری در مقایسه با  $L/D = 0.85$  است، ولی در مقایسه با سایر موارد کیفیت اختلاط بهتری دارد. علت این امر را می‌توان مشارکت گردابه ثانویه (گردابه تشکیل شده بر اثر جدایش در مجاورت لبه راهنما) در اختلاط و چرخش سوخت در داخل حفره دانست. گردابه ثانویه در  $L/D = 0.93$  به علت اندازه نسبتاً کوچک از جریان سوخت ایزوله است. در نتیجه، همان‌طور که از کانتورهای کسر جرمی سوخت پیداست، سوخت در نیمه پایینی حفره به دام می‌افتد و راهی برای توزیع هرچه بهتر نمی‌یابد. ولی، در  $L/D = 1.00$  گردابه ثانویه، که افزایش اندازه پیدا کرده است، سوخت را از طریق یک گردابه کوچک‌تر دریافت کرده و به گردش درمی‌آورد. در نتیجه، همان‌طور که کانتورهای کسر جرمی سوخت نشان می‌دهند، سوخت به طرز مناسب‌تری در داخل حفره توزیع می‌شود. به‌طور کلی، می‌توان نتیجه گرفت که نسبت  $L/D = 0.85$  دارای بهترین کیفیت اختلاط در داخل حفره است.

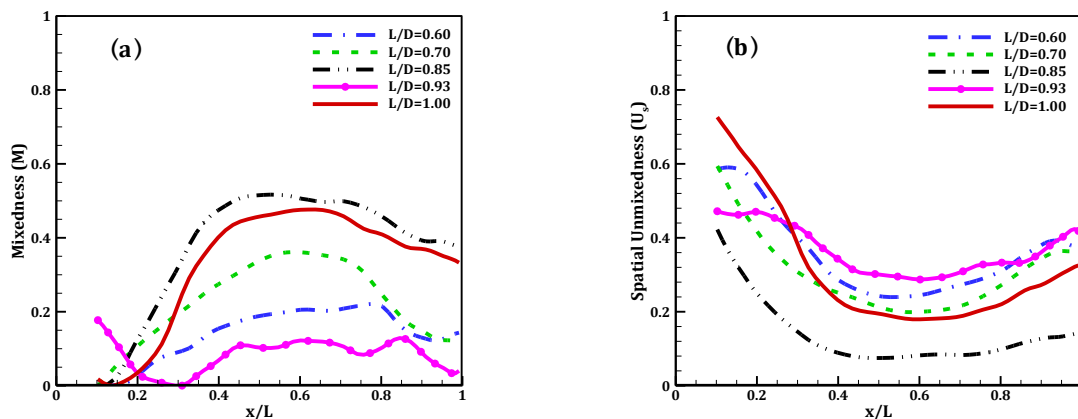


Figure 13- Variation of (a) mixedness parameter, (b) spatial unmixedness along the cavity for all  $L/D$ 's  
 شکل ۱۶- منحنی تغییرات (الف) مخلوط‌نشده‌گی مکانی، و (ب) پارامتر مخلوط‌شدگی در طول حفره برای نسبت‌های مختلف  $L/D$

### نتیجه‌گیری

اختلاط سوخت و هوا در یک محفظه احتراق گردابه در بند با روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ کوپل شده با روش تابع توزیع جرمی فیلتر شده مطالعه شده است. یک الگوریتم عددی بر مبنای تفاضل محدود مرتبه بالا به منظور حل عددی معادلات کوپل شده اوپلری-لاگرانژی مورد استفاده قرار گرفته است. شبیه‌سازی‌های جریان نشان می‌دهد که میدان‌های غلظت به دست آمده از روش‌های اوپلری و لاگرانژی کاملاً با یکدیگر سازگارند. در پژوهش حاضر اثر نسبت طول به عمق حفره بر کیفیت اختلاط در جریان غیراحتراقی با استفاده از معیارهای کمی ارزیابی شده است. ساختار جریان در داخل حفره به همراه معیارهای کمی مختلف همانند نسبت هم‌ارزی میانگین حفره و نسبت هم‌ارزی استوکیومتریکی، توزیع کلی سوخت، ناکارایی اختلاط مکانی، پارامتر مخلوط‌شدگی و مخلوط‌نشده‌گی مکانی به منظور بررسی نحوه تغییرات کیفیت اختلاط استفاده شده‌اند. نتایج تمام

معیارها نشان می‌دهد که با افزایش نسبت  $L/D$  از  $0/60$  تا  $0/85$  به دلیل افزایش حجم گردابه اصلی، اختلاط در داخل حفره بهبود می‌یابد. اما، در نزدیکی  $L/D = 0.93$ ، به دلیل کاهش ناگهانی حجم گردابه اصلی، کیفیت اختلاط با افت ناگهانی مواجه می‌شود. سپس، تا  $L/D = 1.00$ ، به دلیل مشارکت مؤثر گردابه ثانویه در گردش سوخت در داخل حفره، روند بهبودی کیفیت اختلاط مجدداً آغاز می‌شود. با مقایسه درجه اختلاط نسبت‌های مختلف  $L/D$ ، می‌توان دریافت که نسبت  $L/D = 0.85$  دارای بیشترین تمرکز جرم سوخت در محدوده MCER و NSER است و همچنین دارای بالاترین کیفیت اختلاط در داخل حفره است.

## منابع

1. D. Zhao, E. Gutmark, and P. de Goey, "A review of cavity-based trapped vortex, ultra-compact, high-g, inter-turbine combustors," *Prog. Energy Combust. Sci.*, 66, pp. 42–82, 2018.
2. K. Hsu, L. Gross, D. Trump, and W. Roquemore, "Performance of a trapped-vortex combustor," in *33rd aerospace sciences meeting and exhibit*, Reno, NV, AIAA 95-0810, 1995.
3. C. Stone and S. Menon, "Simulation of fuel-air mixing and combustion in a trapped-vortex combustor," in *38th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, Reno, NV, AIAA 2000-0478, 2000.
4. D. P. Mishra and R. Sudharshan, "Numerical analysis of fuel-air mixing in a two-dimensional trapped vortex combustor," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part G J. Aerosp. Eng.*, 224, no. 1, pp. 65–75, 2010.
5. K. K. Agarwal, S. Krishna, and R. V Ravikrishna, "Mixing enhancement in a compact trapped vortex combustor," *Combust. Sci. Technol.*, 185, no. 3, pp. 363–378, 2013.
6. S. Krishna and R. V Ravikrishna, "Optical diagnostics of fuel-air mixing and vortex formation in a cavity combustor," *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 61, pp. 163–176, 2015.
7. Y.-Y. Liu, R.-M. Li, H.-X. Liu, and M.-L. Yang, "Effects of Fueling Scheme on the Performance of a Trapped Vortex Combustor Rig," in *45th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, Denver, Colorado, AIAA 2009-4831, 2009.
8. S. Chen, R. S. M. Chue, J. Schlüter, T. T. Q. Nguyen, and S. C. M. Yu, "Numerical Investigation of a Trapped Vortex Miniature Ramjet Combustor," *J. Propuls. Power*, 31, no. 3, pp. 872–882, 2015.
9. A. Afshari, F. A. Jaber, and T. I. P. Shih, "Large-eddy simulations of turbulent flows in an axisymmetric dump combustor," *AIAA J.*, 46, no. 7, pp. 1576–1592, 2008.
10. G. Erlebacher, M. Y. Hussaini, C. G. Speziale, and T. A. Zang, "Toward the large-eddy simulation of compressible turbulent flows," *J. Fluid Mech.*, 238, pp. 155–185, 1992.
11. F. Nicoud and F. Ducros, "Subgrid-scale stress modelling based on the square of the velocity gradient tensor," *Flow, Turbul. Combust.*, 62, no. 3, pp. 183–200, 1999.
12. M. R. Visbal and D. V Gaitonde, "On the use of higher-order finite-difference schemes on curvilinear and deforming meshes," *J. Comput. Phys.*, 181, no. 1, pp. 155–185, 2002.
13. S. Gottlieb, C.-W. Shu, and E. Tadmor, "Strong stability-preserving high-order time discretization methods," *SIAM Rev.*, 43, no. 1, pp. 89–112, 2001.
14. C. W. Gardiner, "Handbook of stochastic methods for physics, chemistry and the natural sciences," *Appl. Opt.*, 25, p. 3145, 1986.
15. F. A. Jaber, P. J. Colucci, S. James, P. Givi, and S. B. Pope, "Filtered mass density function for large-eddy simulation of turbulent reacting flows," *J. Fluid Mech.*, 401, pp. 85–121, 1999.
16. A. Singhal and R. V Ravikrishna, "Single cavity trapped vortex combustor dynamics-Part-1: Experiments," *Int. J. spray Combust. Dyn.*, 3, no. 1, pp. 23–44, 2011.
17. B. H. H. Little and R. R. Whipkey, "Locked vortex afterbodies," *J. Aircr.*, vol. 16, no. 5, pp. 296–302, 1979.
18. M. Esmaeili, A. Afshari, and F. A. Jaber, "Turbulent mixing in non-isothermal jet in crossflow," *Int. J. Heat Mass Transf.*, 89, pp. 1239–1257, 2015.
19. S. B. Pope, "Ten questions concerning the large-eddy simulation of turbulent flows," *New J. Phys.*, 6, no. 1, pp. 35–36, 2004.
20. S. B. Pope and S. B. Pope, *Turbulent flows*, Second Edition, Cambridge university press, 2000.
21. J. Fröhlich, C. P. Mellen, W. Rodi, L. Temmerman, and M. A. Leschziner, "Highly resolved large-eddy simulation of separated flow in a channel with streamwise periodic constrictions," *J. Fluid Mech.*, 526, pp. 19–66, 2005.
22. N. Ramesh and J. M. Mallikarjuna, "Evaluation of in-cylinder mixture homogeneity in a diesel HCCI engine-A CFD analysis," *Eng. Sci. Technol. an Int. J.*, 19, no. 2, pp. 917–925, 2016.
23. J. Boss, "Evaluation of the homogeneity degree of a mixture," *Bulk solids Handl.*, 6, no. 6, pp. 1207–1215, 1986.
24. B. Wegner, Y. Huai, and A. Sadiki, "Comparative study of turbulent mixing in jet in cross-flow configurations using LES," *Int. J. Heat Fluid Flow*, 25, no. 5, pp. 767–775, 2004.
25. F. Muldoon and S. Acharya, "Direct numerical simulation of pulsed jets-in-crossflow," *Comput. Fluids*, 39, no. 10, pp. 1745–1773, 2010.

English Abstract

## Large eddy simulations of fuel-air mixing in a trapped vortex combustor- effect of cavity length to depth ratio

Reza Sharifzadeh<sup>1</sup> and Asghar Afshari<sup>2\*</sup>

1- School of Mechanical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran, reza.sharifzade@ut.ac.ir

2- School of Mechanical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran, afsharia@ut.ac.ir

\* Corresponding Author

(Received: 2018.10.31, Received in revised form: 2018.10. 27, Accepted: 2018.10. 19)

Turbulent mixing in a trapped vortex combustor is investigated using large eddy simulation coupled with filtered mass density function. The impact of cavity length-to-depth ratio ( $L/D$ ) as a crucial geometrical parameter on fuel-air mixing quality is evaluated under non-reacting flow conditions. The vortical structure analysis along with various quantitative measures such as mean cavity and near stoichiometric equivalence ratios, global fuel distribution and mixing efficiency curves are invoked to compare different  $L/D$  ratios. The predicted results show that increasing  $L/D$  ratio from 0.60 to 0.85 improves mixing quality within the cavity due to expanding the main vortex. Further increment of  $L/D$  ratio to 0.93 temporarily impairs the mixing quality, whereas more increasing this ratio to 1.00 leads to resumption of mixing quality improvement. Nevertheless,  $L/D = 0.85$  provides the best mixing curves and fuel distribution about mean cavity and near stoichiometric equivalence ratios, and consequently the best mixing quality. These findings are commensurate with expectations based on the vortical flow structures inside the cavity.

**Keywords:** Trapped vortex combustor, Fuel-air mixing, Length to depth ratio, Large eddy simulation