

بررسی عددی اثر نسبت انسداد بر عملکرد شعله نگهدار حلقوی برای شعله‌های نفوذی

جهانگیر جعفریان^۱، رضا ابراهیمی^۲، احسان جوکاری^۳

تهران-تهرانپارس- دانشکده مهندسی هوافضا دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
(aerospace_propulsion@yahoo.com)

چکیده

در تحقیق حاضر، به بررسی عددی اثر نسبت‌های انسداد انفرادی ۳۰ درصد، ۱۵ درصد و ۱۰ درصد (در یک نسبت انسداد کلی ثابت ۳۰ درصد) بر عملکرد شعله نگهدار حلقوی جسم مانع V شکل (Bluff-Body Vee-Gutter) در یک برنر دو بعدی متقارن محوری با سوخت متان و اکسنده هوا در حالت پایا با مدل احتراق Eddy-Dissipation و مدل آشفتگی $k-\epsilon$ استاندارد برای یک شعله نفوذی در سرعت هوای ورودی ۱۶۰ متر بر ثانیه (عدد ماخ ۰/۲۷۵) پرداخته شده است. نتایج نشان می‌دهد که در نسبت‌های انسداد انفرادی بالاتر، کارایی و عملکرد شعله نگهدار در مواردی نظیر اتصال شعله به شعله نگهدار، عرض شعله برای هر شعله نگهدار، دمای حداکثری شعله و بزرگی طول و عرض دنباله پشت شعله نگهدار بهتر است. در این تحقیق مشاهده گردید که دنباله پشت شعله نگهدار به دو ناحیه بازچرخشی (Recirculation Zone) و ناحیه اختلاط (Mixing Zone) تقسیم شده است. ناحیه بازچرخشی دنباله، ناحیه‌ای کم سرعت بوده که به عنوان منبع ایجاد جرقه یا اشتعال پیوسته برای شکل‌گیری احتراق و پایداری شعله عمل می‌نماید.

واژه‌های کلیدی: شعله نگهدار- نسبت انسداد- جسم مانع- دنباله- شعله نفوذی

۱- مقدمه

در تجهیزات پیشرانشی هوا-تنفسی یکی از مهمترین نکات، تثبیت یک فرآیند احتراق پایدار در جریان گازی است که در سرعتی بسیار بیشتر از نرخ سوزش معمولی در حرکت است. تثبیت احتراق بدین شکل باید از طریق پایداریسازی شعله توسط جرقه‌زنی مستمر در برخی نقاط جریان انجام گیرد. تحقیقات اولیه بیانگر این حقیقت بود که استفاده از اجسام مانع در جریان‌های احتراقی سرعت بالا منجر به پایداریسازی شعله‌ها می‌شود. کاربردهای متعارف شعله‌های پایدار شده توسط این اجسام شامل پس‌سوزهای توربوجت و توربو فن در هواپیماهای نظامی، موتورهای رم‌جت و موتورهای موشکی است [۱ و ۲]. پایداریسازی شعله در سرعت‌های بالا از طریق ایجاد ناحیه بازچرخشی همواره موضوع بسیار مهمی برای پژوهش و تحقیق بوده است. ایجاد ناحیه بازچرخشی می‌تواند از سه روش کلی جسم مانع (Bluff-Body)، روش آیرودینامیکی و روش پله‌ای (محفظه احتراق Dump) محقق شود [۳]. در این میان روش جسم مانع از نظر شکل هندسی به کار گرفته شده برای

۱- کارشناس ارشد هوافضا

۲- دانشیار دانشکده مهندسی هوافضا دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۳- کارشناس ارشد هوافضا

پایدارسازی شعله دارای انواع مختلفی است که یکی از متداولترین و کاراترین آنها استفاده از نوع V شکل (Vee-Gutter) حلقوی می‌باشد [۴]. استفاده از جسم مانع در میدان جریان باعث به وجود آمدن منطقه بزرگی از جریان چرخشی می‌شود که دقیقاً پشت این اجسام می‌باشد. به دلیل تشکیل این ناحیه مجموعه قابل توجهی از محصولات واکنش در دمای بالا در این ناحیه واقع می‌شود که در نقش یک منبع جرقه یا اشتعال پیوسته برای مخلوط سوخت و هوا عمل می‌کند [۵]. اثر شعله نگهدار همانند جسم مانع است که باعث بازچرخش گازهای داغ و محترق در ناحیه سایه پستی آن می‌شود. این ناحیه به عنوان منبع جرقه یا اشتعال پیوسته همانند شمع عمل می‌کند و درست مانند حالت شمع، ناحیه‌ای واگرا متشکل از مواد سوخته شده به وجود می‌آورد. از اینرو، شعله‌ای ساکن را در درون جریانی که سرعت میانگین آن بیشتر از سرعت شعله است، می‌توان نگه داشت و لازم نیست سرعت جریان در محفظه احتراق به کمی سرعت شعله باشد [۶].

زاکوسکی و مربل (Zukoski and Marble) [۱] دنباله پشت جسم مانع را به عنوان یک ناحیه اشتعال در نظر گرفتند که طول آن به وسیله اندازه ویژه پایدار کننده تعیین می‌شود. در حالتی که راندگی شعله (Blowoff) وجود دارد، گازهایی که از روی پایدار کننده جریان می‌یابند دارای زمان تماسی برابر با زمان اشتعال گازها می‌باشند. اسپالدینگ (Spalding) [۷] نیز ناحیه دنباله را به عنوان ناحیه‌ای با انتقال حرارت دائمی با واکنش شیمیایی در نظر گرفت.

حداکثر سرعت راندگی شعله برحسب تابعی از نسبت هوا-سوخت در نسبت استوکیومتریک باید رخ دهد. در سیستم‌های سوخت و هوای پیش-مخلوط مقدار حداکثر سرعت راندگی شعله در نسبت استوکیومتریک صورت می‌گیرد. لیکن در سیستم‌های واقعی، سوخت‌های مایع به بالادست شعله نگهدارها پاشش می‌گردد تا اختلاط امکان‌پذیر باشد. پایداری شعله در سیستم‌های سوخت مایع و هوا نشان می‌دهد که مقدار حداکثر سرعت راندگی شعله در سمتی که مخلوط رقیق است به دست می‌آید. این تمایل را به آسانی بدین ترتیب می‌توان توجیه کرد که قطرات ریز سوخت مایع بعد از پاشش به پایدار کننده برخورد نموده و دنباله را از نظر مخلوط غنی می‌نمایند. بنابراین به ازاء یک مخلوط مایع فقیر در بالادست جریان یک دنباله با نسبت استوکیومتریک به وجود می‌آید [۸].

ریخته‌گر نظامی [۹] در تحقیق خویش جریان تقارن محوری در یک محفظه احتراق به همراه نازل را مورد تحلیل جریان سرد قرار داده است. این تحلیل برای دو حالت شعله نگهدار مخروطی و حلقوی صورت گرفته است. نتیجه حاصل بیانگر این است که افزایش نسبت انسداد همواره به افزایش اندازه ناحیه بازچرخش منجر می‌شود. تغییر زاویه انسداد نتایج مختلفی به وجود می‌آورد که بستگی به اندازه نسبت انسداد در شعله نگهدار مخروطی و نسبت انسداد و نسبت قطر خارجی در شعله نگهدار حلقوی دارد.

۲- معادله انتقال اجزاء شیمیایی

شکل کلی این معادله به صورت زیر می‌باشد:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_i) = -\nabla \cdot \vec{J}_i + R_i + S_i \quad (1)$$

در رابطه بالا R_i نرخ خالص تولید به وسیله واکنش شیمیایی و S_i نرخ تولید جزء i در مخلوط از فاز گسسته و Y_i کسر جرمی محلی جزء شیمیایی است.

۳- مدل احتراق Eddy-Dissipation

برای مدل‌سازی احتراق گازی لازم است که ترم مولد شیمیایی R_i در معادله انتقال اجزاء شیمیایی مشخص شود. مدل تداخل آشفستگی- شیمی بر اساس کار مگنسن و هجرتاگر (Magnussen and Hjertager) [۱۰] تهیه شده است. این مدل Eddy-Dissipation نامیده می‌شود. نرخ خالص تولید جزء i به خاطر واکنش r یعنی $R_{i,r}$ ، مینیمم دو مقیاس زمانی اختلاط زیر می‌باشد:

$$R_{i,r} = v'_{i,r} M_{w,i} A \rho \frac{\varepsilon}{k} \min \left(\frac{Y_R}{v'_{R,r} M_{w,R}} \right) \quad (2)$$

$$R_{i,r} = v'_{i,r} M_{w,i} A B \rho \frac{\varepsilon}{k} \left(\frac{\sum_P Y_P}{\sum_j v'_{j,r} M_{w,j}} \right) \quad (3)$$

که Y_P کسر جرمی هر جزء محصول، Y_R کسر جرمی واکنش دهنده خاص، A و B ثوابت تجربی هستند که به ترتیب برابر ۴ و ۰/۵ می‌باشند. در این صورت ترم مولد شیمیایی R_i به دست خواهد آمد:

$$R_i = M_{w,i} \sum_{r=1}^{N_R} R_{i,r} \quad (4)$$

مدل Eddy-Dissipation از سینتیک واکنش چشم‌پوشی می‌کند و تنها از پارامترهای موجود نرخ اختلاط استفاده می‌نماید. این مدل نرخ واکنش را تحت فرضیاتی همچون سریع‌تر بودن سینتیک شیمیایی واکنش در مقایسه با ترکیب واکنش دهنده‌ها به دلیل نوسانات آشفته، محاسبه می‌کند. فرض می‌شود که نرخ‌های واکنش به وسیله آشفستگی کنترل می‌گردد، بنابراین از محاسبات سینتیک شیمیایی گران آرنیوس (Arrhenius) اجتناب می‌شود. مدل به طور محاسباتی ارزان است، اما برای نتایج واقع‌گرایانه تنها یک یا دو مرحله مکانیزم‌های گرمای آزاد شده باید استفاده گردد. در معادلات (۲) و (۳)، نرخ واکنش شیمیایی همانند مدل Eddy-Breakup اسپالدینگ [۱۱] از طریق مقیاس زمانی اختلاط Large-Eddy، k/ε حاکم می‌شود. مدل‌های Eddy-Breakup، مدل‌های تجربی برای نرخ واکنش متوسط در حالت شیمی سریع می‌باشند. در این حالت، نرخ اتلاف آشفته بر نرخ واکنش حاکم است (اختلاط شد می‌سوزد^۱). منطقه واکنش به عنوان مخلوطی از مناطق نسوخته و سوخته تشریح می‌شود. در قیاس با واپاشی انرژی آشفته، اسپالدینگ نرخ را بر پایه شکست گردابه‌های گاز نسوخته به Fragment‌های کوچکتر بیان کرد. این Fragment‌ها در تماس کافی با گازهایی که قبلاً سوخته شده‌اند، می‌باشند به طوری که دمای آنها به اندازه کافی بالا است و در نتیجه واکنش می‌کنند.

۴- مدل $k-\varepsilon$ استاندارد

برای فرم استاندارد انرژی جنبشی آشفته k ، و نرخ اتلاف آن ε ، به کمک روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M \quad (5)$$

و

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{2\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (6)$$

در رابطه (۵)، G_b نشانگر تولید انرژی جنبشی آشفته به دلیل اثر شناوری است. G_k انرژی جنبشی تولید شده در اثر گرادیان سرعت متوسط است. در جریان‌ات تراکم‌پذیر برای اعداد ماخ بسیار بالا، Y_M به عنوان اثر تراکم‌پذیری در آشفستگی، به معادله انرژی جنبشی اضافه می‌شود. σ_k و σ_ε به ترتیب عدد پراختل آشفته برای k و ε می‌باشد. لزجت آشفته μ_t نیز به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (7)$$

¹ Mixed is Burned

که C_μ مقداری ثابت است. مقادیر ثابت مدل $C_{1\varepsilon}$ ، $C_{2\varepsilon}$ ، C_μ ، σ_k و σ_ε عبارتند از:

$$C_{1\varepsilon} = 1.44 \quad C_{2\varepsilon} = 1.92 \quad C_\mu = 0.09 \quad \sigma_k = 1 \quad \sigma_\varepsilon = 1.3$$

۵- هندسه مسئله و شبکه بندی آن

محفظه احتراق مورد نظر یک برنر لوله ای شکل است که دارای طول ۱۰۰ سانتی متر و شعاع ۲۰ سانتی متر می باشد. ورودی سوخت به صورت یک حلقه در نظر گرفته شده که قطر داخلی حلقه ۰/۵ سانتی متر است. از سه شعله نگهدار V شکل تک حلقه ای، دو حلقه ای و سه حلقه ای که به ترتیب دارای نسبت های انسداد انفرادی ۳۰ درصد، ۱۵ درصد و ۱۰ درصد هستند استفاده شده است. برای هر سه حالت نسبت انسداد کلی ۳۰ درصد، نیم زاویه هر شعله نگهدار ۳۰ درجه و محل قرار گرفتن تمامی شعله نگهدارها در فاصله محوری ۲۵ سانتی متری ورودی برنر می باشد. شعله نگهدار تک حلقه ای دارای پهنای ۶ سانتی متر و طول بال ۶ سانتی متر، شعله نگهدار دو حلقه ای دارای پهنای ۳ سانتی متر و طول بال ۳ سانتی متر و شعله نگهدار سه حلقه ای دارای پهنای ۲ سانتی متر و طول بال ۲ سانتی متر می باشند.

برای هندسه مذکور شبکه بندی به سه منطقه زیر تقسیم بندی می شود:

- ۱- منطقه ورودی سوخت و اختلاط آنها با یکدیگر
- ۲- منطقه استقرار شعله نگهدار و شروع اولیه احتراق
- ۳- منطقه توسعه یافتن احتراق

با توجه به این که در منطقه استقرار شعله نگهدار، دنباله ای در پشت شعله نگهدار ایجاد خواهد شد که عامل اصلی ایجاد و پایداری شعله است به همین جهت شبکه بندی منطقه ای که شعله نگهدار در آن مستقر است را با یکنواختی مناسبی ریزتر خواهیم کرد. شبکه بندی انجام شده بر روی هندسه مذکور به صورت 100×400 است که تعداد کل شبکه برابر با ۴۰۰۰ خواهد شد. شبکه بندی هندسه مورد نظر در شکل های (۱)، (۲) و (۳) نشان داده شده است.

۶- شرایط مرزی مسئله

فشار سکون هوای ورودی به داخل برنر تقریباً در حدود ۰/۳bar (۲۸۷۲۸ پاسکال) و نسبت سوخت به هوا ۰/۰۳ است. کسر جرمی، دبی جرمی و دمای سکون متان و هوا در ورودی برنر در جدول زیر آورده شده است. به دلیل داشتن هندسه تقارن محوری، برای کمتر شدن حجم محاسبات فقط نصف هندسه مذکور حل می شود. فرض می شود که دیواره برنر و شعله نگهدار نفوذ ناپذیر هستند و همچنین در آنها شرط عدم لغزش برقرار است. چگالی هوا نیز تراکم پذیر در نظر گرفته می شود.

جدول ۱. شرایط مرزی مسئله در ورودی برنر

خواص	Y_{O_2}	Y_{CH_4}	\dot{m}_{Air} (kg/s)	\dot{m}_{CH_4} (kg/s)	$T_{t,Air}$ (K)	T_{t,CH_4} (K)
اکسنده	۰/۲۳۳	۰	۲/۷۵	۰	۹۵۰	-
سوخت	۰	۱	۰	۰/۰۸۳	-	۳۰۰

۷- نتایج

شکل های ۴، ۵ و ۶ به ترتیب کانتور دمای استاتیکی برنر با شعله نگهدار تک حلقه ای، دو حلقه ای و سه حلقه ای را نشان می دهد که دمای حداکثری در آنها ۲۷۶۰، ۲۶۳۰ و ۲۴۵۰ کلوین می باشد. همان گونه که مشاهده می شود شعله ای پایدار در پشت شعله نگهدار ایجاد شده است. این شعله های پایدار را می توان با توجه کانتور سرعت شکل های ۷، ۸ و ۹ که در آن

دنباله‌ای در پشت شعله نگهدار ایجاد شده است توجیه کرد. دنباله‌ای که در پشت شعله نگهدار ایجاد شده است یک ناحیه کم سرعت و بازچرخشی را تولید می‌کند. مقدار سرعت جریان در ناحیه بازچرخشی و طول ناحیه بازچرخشی برای شعله نگهدارهای تک حلقه‌ای، دو حلقه‌ای و سه حلقه‌ای به ترتیب از صفر تا ۶۳ متر بر ثانیه با طول ۱۵ سانتی‌متر، از صفر تا ۵۴ متر بر ثانیه با طول ۱۰ سانتی‌متر و از صفر تا ۵۸ متر بر ثانیه با طول ۶ سانتی‌متر است. این ناحیه کم سرعت و باز چرخشی عامل اصلی شکل‌گیری احتراق و پایداری شعله در این ناحیه از برنر خواهد بود. لذا این ناحیه کم سرعت و باز چرخشی که در آن یک شعله پایدار ایجاد شده، همانند یک منبع ایجاد جرقه یا اشتعال پیوسته عمل می‌کند. همچنین این شعله پایدار، سبب توسعه و تکامل احتراق در نواحی پایین دست برنر نیز خواهد شد.

در این قسمت جدولی که خلاصه نتایج را بر حسب متوسط وزنی^۱ در ورودی هوا و خروجی برنر برای فشار سکون، دمای استاتیکی، سرعت و عدد ماخ نشان می‌دهد، آورده شده است.

جدول ۲. نتایج مشخصات جریان بر حسب متوسط وزنی برای شعله نگهدار تک حلقه‌ای

خواص	فشار سکون (پاسکال)	دمای استاتیکی (کلوین)	سرعت (متر بر ثانیه)	عدد ماخ
ورودی هوا	۲۸۴۳۹	۹۳۵	۱۶۴	۰/۲۷۵۵
خروجی برنر	۲۶۰۷۹	۱۳۰۹	۲۷۹	۰/۴۲۴۸

جدول ۳. نتایج مشخصات جریان بر حسب متوسط وزنی برای شعله نگهدار دو حلقه‌ای

خواص	فشار سکون (پاسکال)	دمای استاتیکی (کلوین)	سرعت (متر بر ثانیه)	عدد ماخ
ورودی هوا	۲۸۸۹۴	۹۳۵	۱۶۳	۰/۲۷۳۱
خروجی برنر	۲۵۶۵۸	۱۴۲۲	۲۹۰	۰/۴۱۷۲

جدول ۴. نتایج مشخصات جریان بر حسب متوسط وزنی برای شعله نگهدار سه حلقه‌ای

خواص	فشار سکون (پاسکال)	دمای استاتیکی (کلوین)	سرعت (متر بر ثانیه)	عدد ماخ
ورودی هوا	۲۸۹۹۲	۹۳۵	۱۶۲	۰/۲۷۲۴
خروجی برنر	۲۵۷۳۴	۱۴۱۲	۲۹۰	۰/۴۱۹۰

¹ Mass-Weighted Average

میزان افت فشار سکون ناشی از احتراق و پسای دیواره شعله نگهدارها در خروجی برنر برحسب متوسط وزنی به ترتیب برای شعله نگهدار تک حلقه‌ای، دو حلقه‌ای و سه حلقه‌ای برابر با ۰/۰۸۳، ۰/۱۱۱۹ و ۰/۱۱۲۳ می‌باشد.

شکل ۱۰، ۱۱ و ۱۲ پروفیل‌های کسر مولی اجزاء شیمیایی را در خروجی برنر نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود کسر مولی اکسیژن در خروجی برنر دارای یک ناحیه حداقلی است و نیز کسر مولی نسوخته متان در خروجی برنر برای شعله نگهدارهای تک حلقه‌ای، دو حلقه‌ای و سه حلقه‌ای به ترتیب دارای یک نقطه حداکثری با مقدار ۰/۱۱، ۰/۱۷ و ۰/۱۳ می‌باشد که نشان می‌دهد احتراق هنوز کامل نشده است و به اندازه ۱۱، ۱۷ و ۱۳ درصد از کسر مولی کل محلی که شامل کسر مولی متان است مشتعل نشده و دست نخورده باقی مانده است. شکل ۱۳ نتایج تجربی کسر مولی اجزاء شیمیایی است که توسط هتل و هاوسورن (Hottel and Hawthorne) [۸] برای یک شعله نفوذی متان و هوا در کمی پائین‌دست‌تر از ورودی یک برنر به دست آمده است. با مقایسه کیفی نتایج تجربی شکل ۱۳ با نتایج عددی به دست آمده در شکل‌های ۱۰، ۱۱ و ۱۲ مشاهده می‌شود که تشابه بسیار بالایی بین پروفیل‌های کسر مولی اجزاء شیمیایی تجربی و عددی وجود دارد.

شکل‌های ۱۴، ۱۵ و ۱۶ بردار سرعت را برای شعله نگهدارهای تک حلقه‌ای، دو حلقه‌ای و سه حلقه‌ای نشان می‌دهد. در این شکل‌ها بازچرخش جریان در پشت شعله نگهدار به خوبی نشان می‌دهد که یک ناحیه گردابه‌ای ایجاد شده است که سرعت در آن بسیار کم است. این ناحیه بازچرخشی خود عاملی مهمی در اختلاط بهتر سوخت و اکسندگی می‌باشد.

۸- نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر، به بررسی عددی اثر نسبت‌های انسداد انفرادی ۳۰ درصد، ۱۵ درصد و ۱۰ درصد (در یک نسبت انسداد کلی ثابت ۳۰ درصد) بر عملکرد شعله نگهدار حلقوی جسم مانع V شکل (Bluff-Body Vee-Gutter) در یک برنر دو بعدی متقارن محوری با سوخت متان و اکسندگی هوا در حالت پایا با مدل احتراق Eddy-Dissipation و مدل آشفنگی $k-\epsilon$ استاندارد برای یک شعله نفوذی در سرعت هوای ورودی ۱۶۰ متر بر ثانیه (عدد ماخ ۰/۲۷۵) با استفاده از نرم افزار فلوئنت پرداخته شده است. جمع‌بندی این تحقیق در چند بند ارائه می‌شود:

۱- نتایج نشان می‌دهد که کارایی شعله نگهدار برای نسبت‌های انسداد بالا از جهات متصل بودن شعله به شعله نگهدار، عرض شعله، دمای حداکثری شعله و بزرگی طول و عرض دنباله پشت شعله نگهدار بهتر است. لذا شعله نگهدار تک حلقه‌ای نسبت به شعله نگهدارهای دو حلقه‌ای و سه حلقه‌ای از نظر شاخصه‌های جریان احتراقی دارای عملکرد بهتری است.

۲- دنباله پشت شعله نگهدار به دو ناحیه بازچرخشی و ناحیه اختلاط تقسیم می‌شود. این دو ناحیه به طور شماتیک در شکل ۱۷ نشان داده شده‌اند [۱۲]. ناحیه بازچرخشی دنباله، ناحیه‌ای کم سرعت بوده که به عنوان منبع ایجاد جرقه یا اشتعال پیوسته برای شکل‌گیری احتراق و پایداری شعله عمل می‌نماید.

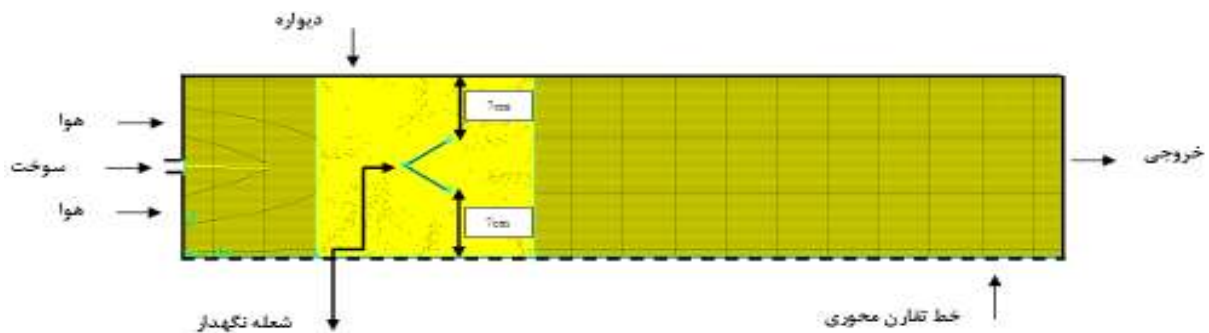
۳- با افزایش تعداد حلقه‌های شعله نگهدار در یک نسبت انسداد کلی ثابت، مقدار افت فشار سکون ناشی از پسای دیواره شعله نگهدار نیز افزایش می‌یابد. با این حال عرض و پهنای بیشتری از جریان داخل برنر محترق شده که در نتیجه آن عرض کلی شعله (مجموع عرض شعله‌های تمامی حلقه‌ها) افزایش می‌یابد.

۴- نتایج بیانگر این مطلب است که با به کارگیری شعله نگهدار در سرعت‌های بالای هوای ورودی به برنر، در صورت کارایی مناسب شعله نگهدار و پایداری شعله از این طریق، می‌توان یک احتراق کنترل شده از نظر وسعت و نیز دلخواه از نظر مکانی داشت. به این معنا که با قرار دادن شعله نگهدار در مکان‌های مورد نظر می‌توان شعله پایدار ایجاد کرد.

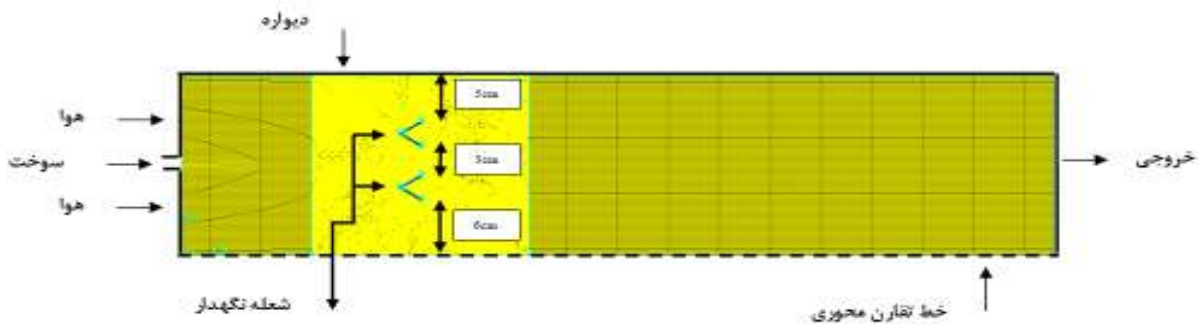
۵- در جبهه شعله غلظت سوخت و اکسندگی حداقل بوده، در حالی که غلظت محصولات احتراق حداکثر می‌باشد. البته این شرایط در اثر نفوذ به وجود می‌آیند؛ اعم از این که سوخت و اکسندگی در جهت عرضی جریان یابند. شعله‌های نفوذی خود را در سطح مشترک بین سوخت و اکسندگی ایجاد می‌کنند، شعله به وسیله نفوذ به دو طرف سوخت و اکسندگی دوام می‌یابد. شعله منتشر نمی‌شود و تنها حرکت می‌کند همان‌طور که سوخت و هوا به وسیله حرکت سیال جابجا می‌شوند (گاهی اوقات به حالت آشفته).

۹- مراجع

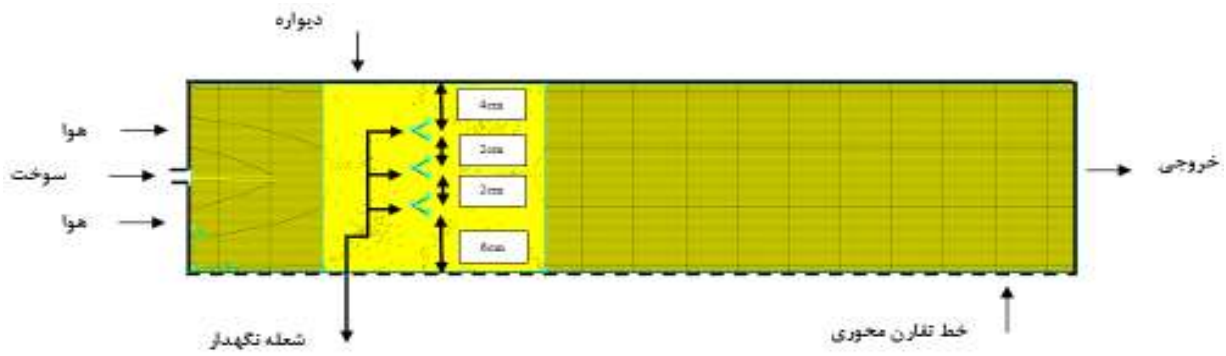
- 1- Longwell, J. P. , in *"Flame Stabilization and Flame Propagation in Ramjet Combustors"*, Sixth Symposium International on Combustion, 1955.
 - 2- Zukoski, E. E., and Marble, F. E., *"The Role of wake Transition in the Process of Flame Stabilization on Bluff-Bodies"*, Combustion Research and Reviews, Butterworth, London, pp. 167-180, 1955.
 - 3- Williams, F. A. , in *"Applied Mechanics Surveys"*, p. 1158 . Spartan Books , Washington, DC , 1966 .
 - 4- Henzel, J. G, Bryant, L., *"Investigation of Effect of Number and Width of Annular Flame Holder Gutters on Afterburner Performance"*, Lewis Flight Propulsion Laboratory, NACA RM E54C30.
 - 5- Bush, S. M., and Gunnark, E. J., *"Reacting and Non-Reacting Flow Field of a V-Gutter Stabilized Flame"*, 44th AIAA Aerospace Science Meeting and Exhibit, 9-12 January 2006, Reno, Nevada.
 - 6- G.Hill, P., Peterson, C. R., *"Mechanics and Thermodynamics of Propulsion"*, by Addison-Wesley Publishing Company Inc, 1992.
 - 7- Spalding, D. B. , *"Some Fundamentals of Combustion"*, Chap. 5, Butterworth , London , 1955.
 - 8- Glassman, I., Yetter, R. A., *"Combustion"*, Fourth Edition, Publication By Elsevier Inc, 2008.
- ۹- ریخته‌گر نظامی، ف.، "بررسی عددی میدان جریان سرد حول شعله نگهدار در موتور رجت سوخت مایع"، مجموعه مقالات هشتمین کنفرانس سالانه (بین‌المللی) انجمن هوافضای ایران، ۲۹ بهمن- ۱ اسفند، ۱۳۸۷.
- 10- Magnussen, B. F., Hjertager, B. H., *"On Mathematical Models of Turbulent With Combustion Special Emphasis on Soot Formation and Combustion"*, In 16th Symp. (Int'l.) on Combustion. The Combustion Institute, 1976.
 - 11- Spalding, D. B., *"Mixing and Chemical Reaction in Steady Confined Turbulent Flames"*, In 13th Symp. (Int'l.) on Combustion. The Combustion Institute, 1970.
 - 12- Mattingly, J. D., *"Aircraft Engine Design"*, Engine Component Design: Combustion Systems, Publication By AIAA, 2002.



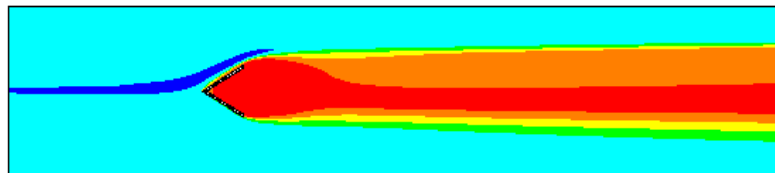
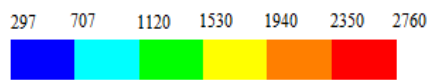
شکل ۱. هندسه و شبکه‌بندی برنر با شعله نگهدار تک حلقه‌ای



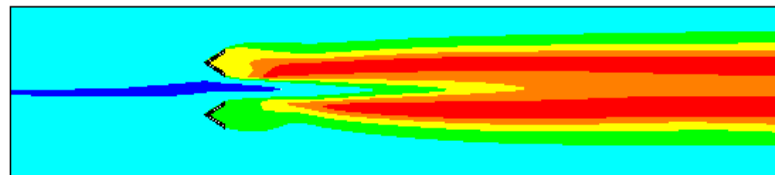
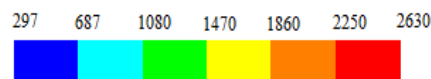
شکل ۲. هندسه و شبکه‌بندی برنر با شعله نگهدار دو حلقه‌ای



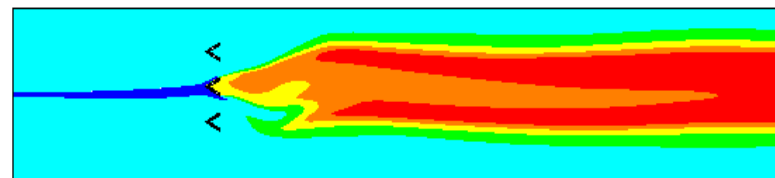
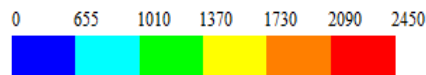
شکل ۳. هندسه و شبکه‌بندی برنز با شعله نگهدار سه حلقه‌ای



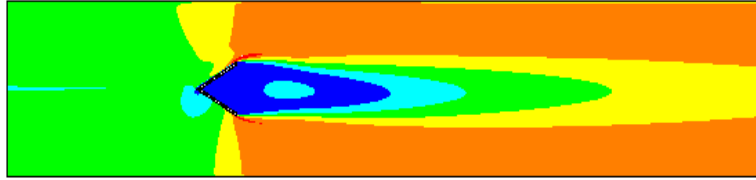
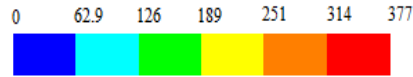
شکل ۴. کانتور دمای استاتیکی (کلوین)؛ شعله نگهدار تک حلقه‌ای با نسبت انسداد انفرادی ۳۰ درصد



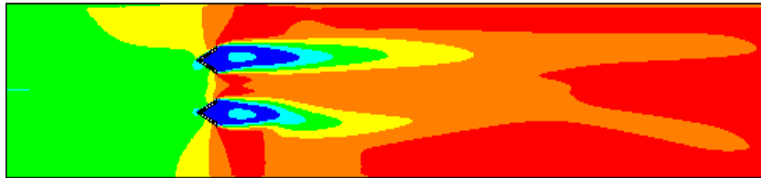
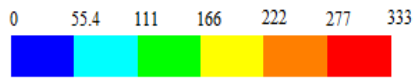
شکل ۵. کانتور دمای استاتیکی (کلوین)؛ شعله نگهدار دو حلقه‌ای با نسبت انسداد انفرادی ۱۵ درصد



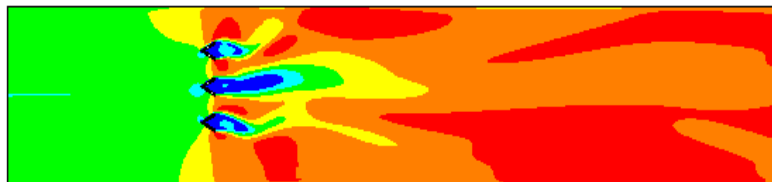
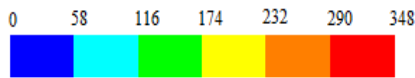
شکل ۶. کانتور دمای استاتیکی (کلوین)؛ شعله نگهدار سه حلقه‌ای با نسبت انسداد انفرادی ۱۰ درصد



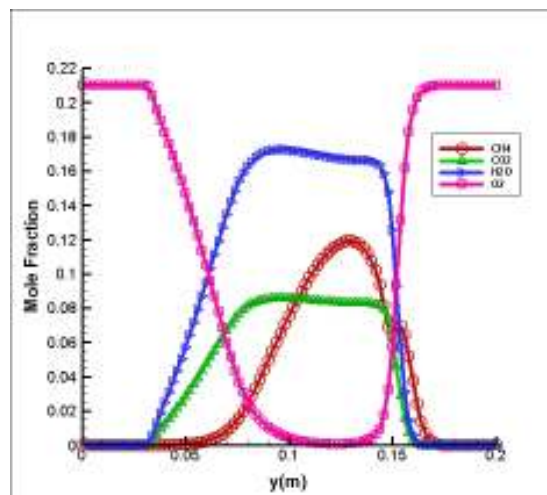
شکل ۷. کانتور سرعت (متر بر ثانیه)؛ شعله نگهدار تک حلقه‌ای با نسبت انسداد انفرادی ۳۰ درصد



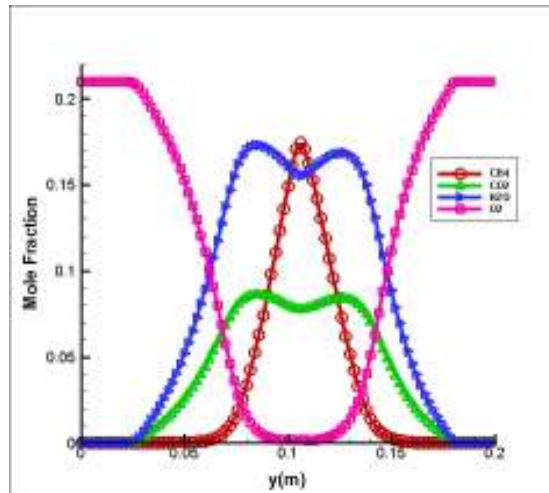
شکل ۸. کانتور سرعت (متر بر ثانیه)؛ شعله نگهدار دو حلقه‌ای با نسبت انسداد انفرادی ۱۵ درصد



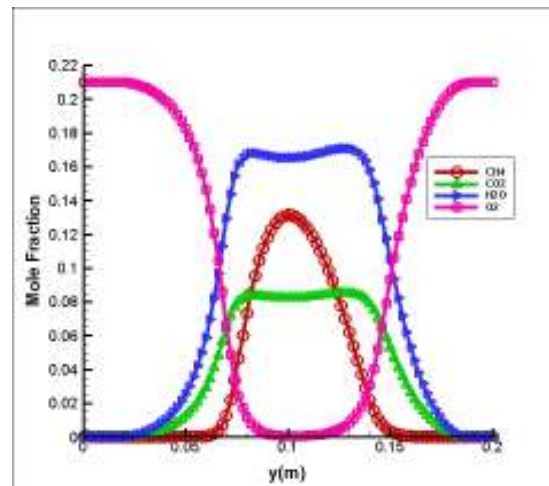
شکل ۹. کانتور سرعت (متر بر ثانیه)؛ شعله نگهدار سه حلقه‌ای با نسبت انسداد انفرادی ۱۰ درصد



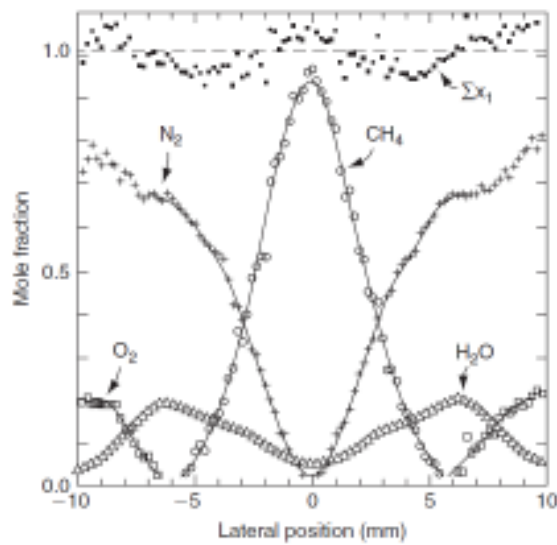
شکل ۱۰. پروفیل‌های کسر مولی اجزاء شیمیایی در خروجی برنر با شعله نگهدار تک حلقه‌ای



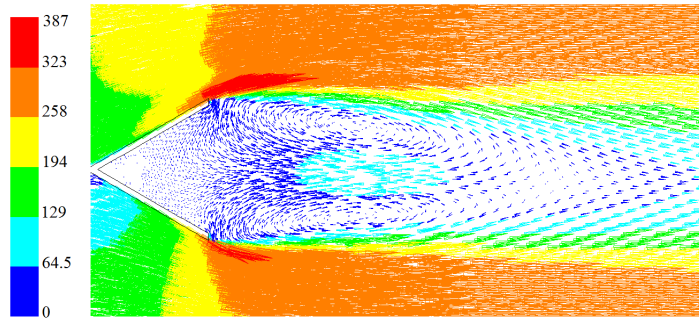
شکل ۱۱. پروفیل‌های کسر مولی اجزاء شیمیایی در خروجی برنر با شعله نگهدار دو حلقه‌ای



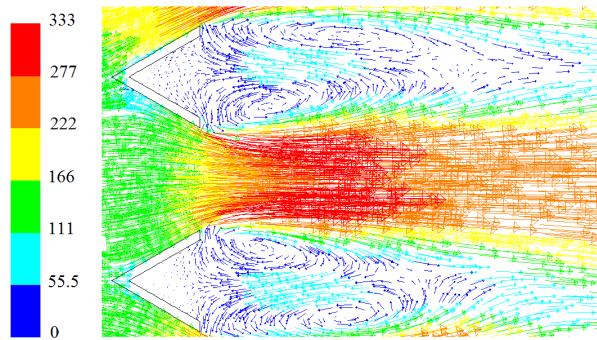
شکل ۱۲. پروفیل‌های کسر مولی اجزاء شیمیایی در خروجی برنر با شعله نگهدار سه حلقه‌ای



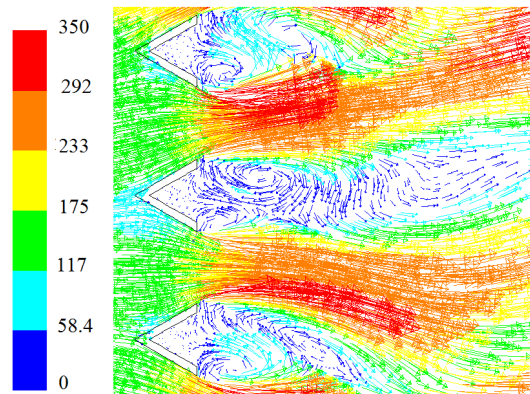
شکل ۱۳. نتایج تجربی کسر مولی اجزاء شیمیایی در شعله نفوذی متان-هوا [۸]



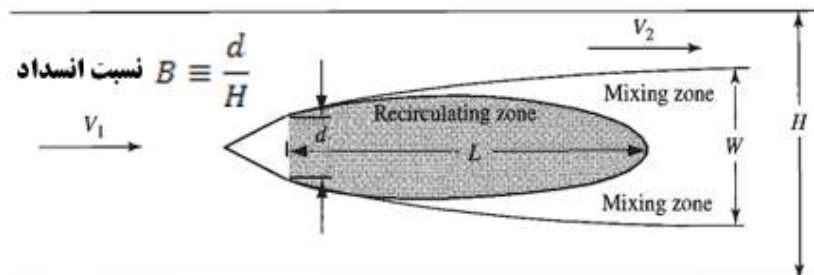
شکل ۱۴. بردار سرعت پشت شعله نگهدار تک حلقه‌ای (متر بر ثانیه)



شکل ۱۵. بردار سرعت پشت شعله نگهدار دو حلقه‌ای (متر بر ثانیه)



شکل ۱۶. بردار سرعت پشت شعله نگهدار سه حلقه‌ای (متر بر ثانیه)



شکل ۱۶. شماتیک دنباله پشت شعله نگهدار با ناحیه بازچرخشی و ناحیه اختلاط [۱۲]