

مطالعه عددی رژیم‌های مختلف شعله در اسپری جریان متقابل آرام

مراد هواسی^۱، فتح‌اله امی^{۲*} و فاطمه چیتگرها^۳

۱- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، m.hawasi@modres.ac.ir

۲- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، fommi@modares.ac.ir

۳- دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، chitgarha.mech@gmail.com

* نویسنده مخاطب

(تاریخ دریافت: ۹۹/۰۲/۲۱، دریافت آخرین اصلاحات: ۹۹/۰۸/۲۰، پذیرش: ۹۹/۰۹/۳۰)

چکیده: شبیه‌سازی عددی دوبعدی شعله اسپری تشکیل‌شده در یک پیکربندی جریان متقابل آرام، به‌منظور بررسی رژیم‌های شعله و تأثیر آن بر تغییرات گونه‌ها و رادیکال‌های مهم، انجام شده است. از اتانول به‌عنوان یک سوخت اسپری مایع استفاده شده و مکانیسم اسکلتی اتانول/هوا با ۴۰ گونه و ۱۸۰ واکنش مقدماتی برای واکنش‌های احتراق به‌کار گرفته شده است. قطرات سوخت با قطر یکسان و به‌صورت تصادفی با استفاده از یک کد UDF در ورودی هوا تزریق می‌شوند و حرکت قطرات براساس دیدگاه لاگرانژی محاسبه شده است. با توجه به نتایج در نسبت‌های هم‌ارزی بالا، نرخ‌های کرنش بالا و قطرهای بزرگ قطرات، رژیم غالب شعله به‌صورت غیرپیش‌آمیخته است. همچنین، در نواحی مرکز شعله، به‌دلیل صفرشدن مقدار کسر جرمی اکسیدکننده و کاهش مقدار کسر جرمی رادیکال OH در این ناحیه، واکنش‌های احتراقی فرونشاندن شده و همچنین مقدار عدد شاخص شعله صفر می‌شود که نشان‌دهنده احتراق گروه داخلی قطرات در این ناحیه است.

کلیدواژگان: پیکربندی جریان متقابل، احتراق اسپری، جریان آرام، رژیم پیش‌آمیخته، رژیم غیرپیش‌آمیخته

مقدمه

احتراق اسپری در تعدادی از کاربردهای مهندسی همچون تبدیل انرژی و تجهیزات نیروی محرکه به‌کار می‌رود. بنابراین، لازم است به‌طور دقیق رفتار احتراق اسپری را در طراحی و اجرای تجهیزات پیش‌بینی کنیم. با این حال، از آنجایی که احتراق اسپری پدیده‌ای پیچیده است، که در آن پراکندگی قطرات سوخت مایع، تبخیر آن‌ها و واکنش شیمیایی به‌طور متقابل در همان زمان رخ می‌دهد، فیزیک اساسی حاکم بر این فرایندها به‌خوبی شناخته نشده است [۱]. مطالعات شعله غیرپیش‌آمیخته جریان متقابل آرام اهمیت بیشتری دارد، زیرا ساختار شعله غیرپیش‌آمیخته مغشوش اغلب می‌تواند به‌عنوان یک گروه از شعله‌های آرام ساختاریافته توصیف شود [۲-۳].

یکی از حالت‌های مهم، که در نسبت‌های هم‌ارزی زیاد، نرخ‌های کرنش بالا و قطر قطرات بزرگ در احتراق اسپری اتفاق می‌افتد، احتراق گروهی قطرات است. این پدیده، که در آن قطرات به‌عنوان یک توده متراکم در کنار هم سوخته می‌شوند، به‌عنوان "احتراق گروهی قطره" شناخته می‌شود. طبق گفته‌های چیو و لئو [۴] و چیو و همکاران [۵]، چهار حالت در احتراق گروهی قطرات در شعله‌های اسپری وجود دارد: ۱- حالت احتراق یک قطره واحد که در آن تمام قطرات با شعله‌های پوششی سوزانده می‌شوند، ۲- حالت احتراق گروه داخلی که در آن شعله در داخل گروه قطره ظاهر می‌شود (قطرات درون شعله گروه قطره فقط بخار می‌شوند و قطرات در بیرون شعله گروهی با شعله پوششی می‌سوزند)، ۳- یک حالت احتراق گروه خارجی

قطره که در آن شعله گروهی کل گروه قطره را دربر گرفته است و ۴- حالت احتراق خارجی که در آن ناحیه غیرتبخیری (منطقه دمای پایین) در داخل منطقه تبخیر گروه قطره یافت می‌شود. این حالت‌ها را می‌توان در شکل ۱ مشاهده کرد.

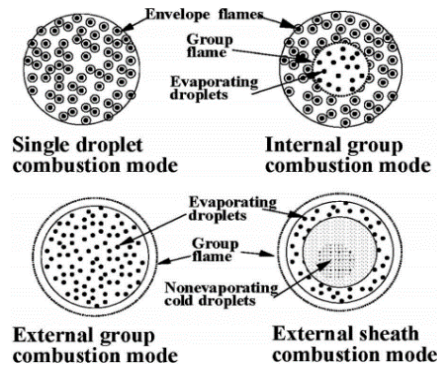


Figure 1- Group droplet combustion modes[4,5]

شکل ۱- حالت‌های احتراق گروهی قطرات [۵،۴]

از آنجا که احتراق اسپری یکی از مسائل مهم در شعله‌های اسپری است، به‌همین دلیل، مطالعات زیادی در این خصوص صورت گرفته است. گوسیل [۶] در رساله دکتری خود به بررسی شعله اسپری جریان متقابل مغشوش برای سوخت اتانول پرداخته که محاسبات آن هم برای نرخ‌های کرنش پایین و خیلی بالا بوده و هم قطر قطرات مختلف را لحاظ کرده است. استاپف و همکاران [۷] یک مدل برای بررسی تعاملات پیچیده بین دینامیک سیالات، اندازه، فضا و توزیع زمان قطرات و همچنین واکنش‌های احتراق در یک اسپری سوخت دیزل ارائه دادند. در کار آن‌ها، از یک مدل سینتیک دومرحله‌ای برای مدل‌سازی واکنش‌های احتراقی استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که اثرات احتراق گروهی قطرات بر تمام جنبه‌های احتراق اسپری اثر غالب دارد. کاندل و همکاران [۸] در طی یک کار عددی و تجربی سه حالت مختلف را مورد بررسی قرار دادند. در حالت اول، برای یک پیکربندی جریان متقابل آرام، ناحیه تبخیر و واکنش‌های احتراقی در اطراف گروه قطرات شکل می‌گیرد. در حالت دوم، احتراق یک توده قطره متراکم در یک اکسیدکننده داغ اتمسفریک در نظر گرفته شده است. در حالت سوم، اسپری به‌وسیله یک انژکتور شیر^۱ شکل می‌گیرد که با اکسیژن مایع و هیدروژن گاز تغذیه می‌شود. شعله ایجادشده در این پیکربندی به‌طور گسترده با روش‌های تشخیص نوری و تکنیک‌های پردازش تصویر مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهند که یک شعله مغشوش در اطراف قطرات متراکم شکسته‌شده ناشی از توده سیال ورودی تشکیل شده است. ناکامورا و همکاران [۹] با استفاده از شبیه‌سازی عددی مستقیم (DNS)^۲ در یک پیکربندی شعله جریان متقابل آرام رفتار احتراق گروه قطره را مورد بررسی قرار دادند. از دکان نرمال^۳ به‌عنوان یک سوخت اسپری مایع استفاده شده و یک واکنش یک‌مرحله‌ای برای مدل واکنش احتراق به‌کار گرفته شده است. نتایج نشان داده که احتراق گروه قطره در ناحیه غیرپیش‌آمیخته احتراق به‌وجود می‌آید. همچنین، احتراق گروه قطره باعث کاهش دمای گاز می‌شود. این مسئله عمدتاً توسط فرونشانی واکنش احتراق ناشی از کمبود اکسیژن و تا حدی توسط تبادل انرژی از طریق انتقال حرارت جابه‌جایی بین قطرات و فاز گازی ایجاد می‌شود. ناکامورا و همکاران [۱۰] با استفاده از آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی‌های عددی به بررسی رفتار احتراق اسپری در یک پیکربندی جریان متقابل آرام، که از یک درگاه قطرات سوخت دکان نرمال و از طرف مقابل مخلوط سوخت و گونه‌های گازی شکل وارد می‌شوند، پرداخته شده است. در نتایج تجربی، شعله‌های آبی و زبانه‌های زردرنگ شعله

1. injector shear
2. Direct Numerical Simulation
3. n-decane

دیده می‌شوند و همچنین ناپایداری در رفتار شعله وجود دارد. نتایج عددی نشان می‌دهد که ساختارهای شعله اسپری، بسته به مقادیر داده‌شده از اسپری سوخت مایع، متفاوت‌اند. علاوه بر این، ساختارهای شعله با نرخ کرنش بالا در مقایسه با ساختارهای شعله معمولی مشاهده‌شده در آزمایش انجام‌شده مطابقت دارند. واتانایب و همکاران [۱] یک شبیه‌سازی عددی دوبعدی از یک شعله اسپری تشکیل‌شده در یک پیکربندی جریان متقابل آرام ارائه کردند که در آن از مدل فلیملت استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش نسبت هم‌ارزی، نرخ کرنش و افزایش قطر اولیه قطرات، دمای مرکز شعله کاهش می‌یابد. هایاشی و همکاران [۱۱] یک شبیه‌سازی مستقیم عددی دوبعدی در پیکربندی شعله اسپری جریان متقابل با استفاده از مدل فلیملت آرام مورد بررسی انجام دادند. در این کار، از دکان نرمال به‌عنوان یک سوخت اسپری مایع استفاده شده و مکانیزم سینتیک شیمیایی دکان نرمال با ۱۱۲ گونه و ۸۸۳ واکنش عنصری به‌کار رفته است. نتایج نشان می‌دهد که قطر متوسط ستر قطرات به‌شدت بر روی منطقه و محل تشکیل دوده توسط اسپری سوخت تأثیر می‌گذارد. با افزایش قطر متوسط ستر اسپری سوخت، میانگین ناحیه تشکیل دوده به‌طور گسترده‌تر می‌یابد، در حالی که فرونشانی موضعی تشکیل دوده بلافاصله در شعله‌های اسپری، به‌دلیل گروه قطرات نسوخته، مشاهده می‌شود. اندازه ذرات دوده در قسمت بیرونی ناحیه انتشار در مقایسه با دوده در بخش داخلی بزرگ‌تر است، زیرا رشد سطحی ذرات دوده به‌طور قابل‌توجهی در مقایسه با انعقاد و اکسیداسیون افزایش می‌یابد. دارابی‌ها و همکاران [۱۴] در یک شعله اسپری جریان متقابل به بررسی عددی تأثیر قطر قطره بر ساختار شعله و همچنین اندازه‌گیری شدت انتشار رادیکال‌های OH و CH پرداختند که نتایج به‌دست‌آمده در مقایسه با کارهای تجربی مشابه مطابقت خوبی داشت. کارپیو و همکاران [۱۵] در یک پیکربندی جریان متقابل آرام به بررسی شعله اسپری ازت غیرپیش‌آمیخته با رویکرد اوایلر-لاگرانژی پرداخته و برای مدل‌سازی واکنش‌های احتراقی از مدل یک‌مرحله‌ای برگشت‌ناپذیر استفاده کردند. نتایج نشان می‌دهد که انواع مختلفی از رفتارهای احتراق می‌تواند در رژیم داخلی احتراق و در حضور تبخیر وجود داشته باشد. به‌طور خاص، شرایطی وجود دارد که در آن پدیده پسماند حتی در شرایطی که میزان واکنش شیمیایی فاز گاز بی‌نهایت سریع است، اتفاق می‌افتد که با افزایش میزان تبخیر اسپری در مخلوط همراه است. امین و روبرتز [۱۶] در یک پیکربندی جریان متقابل آرام و برای سوخت اتان به بررسی تأثیر محیط احتراق در انتشار دوده در موتورهای دیزل و توربین‌های گازی پرداخته‌اند. نتایج نشان می‌دهد که میانگین شعاع قطرات با افزایش فشار بزرگ‌تر می‌شود، در حالی که عدد چگالی ذرات اولیه به‌علت بهم‌آمیختگی قطرات کاهش می‌یابد و با توجه به نتایج انتشار دوده، با افزایش فشار رابطه مستقیمی دارد. جانانان و ویرتز [۱۷] یک شعله انتشار دوفازی جریان متقابل را با اسپری پلی‌دی‌اسپرز^۱، به‌صورت عددی در پیکربندی دوبعدی، با استفاده از رویکرد لاگرانژی برای فاز مایع و شیمی دقیق احتراق مورد مطالعه قرار داده است. نتایج یک ساختار شعله دوتایی بسیار پیچیده با شعله پیش‌آمیخته، غیرپیش‌آمیخته و نیز احتراق گروهی و تکی قطره را نشان می‌دهند. همچنین، به‌منظور تجزیه و تحلیل شعله پلی‌دی‌اسپرز و تأیید ارتباط قوی بین قطر قطره و رژیم شعله، شعله‌های دوفازی مونودی‌اسپرز^۲ نیز مورد بررسی قرار گرفته‌اند. برای قطرهای کوچک قطره، شعله همان ساختار را نسبت به شعله گازی در نسبت هم‌ارزی متفاوت دارد و با بزرگ‌تر شدن اندازه قطره، دمای شعله نیز افزایش می‌یابد. برای قطرات بزرگ‌تر، حالت رژیم پیش‌آمیخته غالب می‌شود و دمای کل شعله از دمای حداکثر شعله گازی بیشتر می‌شود.

با توجه به اینکه در کارهای قبلی تأثیر حالت‌های مختلف مانند نسبت‌های هم‌ارزی، نرخ‌های کرنش و قطرهای مختلف قطرات، به‌منظور تعیین نوع رژیم شعله در اسپری جریان متقابل آرام، برای حالت‌های مختلف بررسی نشده است، در کار حاضر شبیه‌سازی عددی در یک جریان ساده برای سوخت اتانول با استفاده از مکانیسم اسکلتی با ۴۰ گونه و ۱۸۰ واکنش مقدماتی به‌منظور مشخص کردن نوع رژیم شعله (پیش‌آمیخته/ غیرپیش‌آمیخته) و تحلیل آن براساس کسر جرمی گونه‌های مهم، به‌منظور به‌کاربردن مدل‌های احتراقی متناسب برای این رژیم‌ها در تحقیقات آینده، انجام شده است.

1. polydisperse
2. monodisperse

مدل فیزیکی و معادلات حاکم بر روش عددی

معادلات ریاضی حاکم بر احتراق اسپری

معادلات حاکم در نظر گرفته شده بر فاز گازی و پیوسته عبارت‌اند از: پیوستگی، تکانه، انرژی، کسر جرمی گونه‌ها و کسر مخلوط.

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

$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j + P \delta_{ij} - \sigma_{ij}) - \rho g_i = S_{ui} \quad (2)$$

$$\sigma_{ij} = 2\mu \left[\frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{1}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right] \quad (3)$$

$$\frac{\partial (\rho h)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\rho u_j h - \rho \lambda \frac{\partial h}{\partial x_j} + \sum_{k=1}^n h_k (\rho \lambda - \rho D_k) \frac{\partial Y_k}{\partial x_j} \right] = S_h \quad (4)$$

$$\frac{\partial (\rho Y_k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho u_j Y_k - \rho D_k \frac{\partial Y_k}{\partial x_j} \right) = S_{combu,k} + S_{Y_k} \quad (5)$$

که در آن به ترتیب u_i سرعت فاز گازی، ρ چگالی، μ گرانروی، P فشار استاتیک، g_i نیروی جاذبه، h آنتالپی کل، λ ضریب نفوذ گرمایی گاز، h_k ، Y_k و D_k به ترتیب آنتالپی مخصوص، کسر جرمی و ضریب انتشار جرمی گونه k ام هستند که به وسیله آزمایش‌های تجربی تعیین شده و در جداول مرجع ارائه می‌شود [۱۶]. δ_{ij} تابع دلتای کرونکر^۱ است. S_i نشان‌دهنده تعامل بین گاز و فازه پراکنده بوده و $S_{combu,k}$ عبارت منبع ناشی از احتراق است که در ادامه توضیح داده می‌شود. ρ چگالی فاز گازی است، که از معادله حالت برای گاز ایدئال محاسبه می‌شود [۱۷، ۱۸].

ترم چشمه، S_k ، با توجه به فعل و انفعال بین فازهای گازی و گسسته، با استفاده از تعداد کل قطرات، N ، که در حجم کنترل محاسبات فاز گازی وجود دارد، بیان شده است.

$$S_m = -\frac{1}{\Delta V} \sum^N \frac{dm_d}{dt} \quad (6)$$

$$S_{ui} = -\frac{1}{\Delta V} \sum^N \left[\frac{m_d f_1}{\tau_d} (u_i - u_{d,i}) + \frac{dm_d}{dt} u_{d,i} \right] \quad (7)$$

$$S_h = -\frac{1}{\Delta V} \sum^N \left[\frac{1}{2} \frac{d}{dt} (m_d u_{d,i} u_{d,i}) + Q_d + \frac{dm_d}{dt} h_{v,s} \right] \quad (8)$$

$$S_{Y_k} = -\frac{1}{\Delta V} \sum^N \frac{dm_d}{dt} \quad \text{برای سوخت} \quad (9)$$

$$S_{Y_k} = 0 \quad \text{برای گونه‌های شیمیایی دیگر} \quad (10)$$

$$S_m = -\frac{\phi}{\phi + Y_{O_2,air}} \left(\frac{1}{\Delta V} \sum^N \frac{dm_d}{dt} \right) \quad (11)$$

در اینجا، m_d جرم قطره، $u_{d,i}$ سرعت قطره، ΔV حجم کنترل برای محاسبه فاز گازی و $h_{v,s}$ آنتالپی بخار غلیظ تبخیر شده در سطح قطره است. Q_d انتقال حرارت جابه‌جایی، $Y_{O_2,air}$ کسر جرمی اکسیژن در هواست. $S_{combu,k}$ عبارت منبع بوده که در معادلات بقای گونه‌ها، با استفاده از نرخ واکنش احتراق در هر واحد حجم، R_F ، به صورت زیر بیان می‌شود:

$$S_{combu,k} = -\frac{n_k W_k}{n_F W_F} R_F \quad (12)$$

1. Kronecker

که در آن، n_K و n_F به ترتیب ضرایب استوکیومتری مولی گونه‌های k_{th} ، برای سوخت در واکنش‌های کلی تک‌مرحله‌ای (مثبت برای طرف محصولات) هستند. W_K و W_F به ترتیب وزن مولکولی در گونه‌های k_{th} و سوخت‌اند.

دیدگاه اویلر-لاگرانژی برای مدل‌سازی قطرات حاصل از جت سیال مورد استفاده قرار گرفته است که تنها قطرات سوخت به‌طور جداگانه به روش لاگرانژی پیگیری می‌شوند. فرض بر این است که چگالی قطرات بسیار بیشتر از تراکم فاز پیوسته است که فقط کشش و شتاب جاذبه قابل توجه‌اند. معادلات لاگرانژ قطره برای موقعیت $x_{d,i}$ ، سرعت $u_{d,i}$ دما T_d و جرم m_d داده شده است.

$$\frac{dx_{d,i}}{dt} = u_{d,i}, \quad (13)$$

$$\frac{dx_{d,i}}{dt} = \frac{f_i}{\tau_d} (u_i - u_{d,i}) + g_i, \quad (14)$$

$$\frac{dT_d}{dt} = \frac{Q_d + \dot{m}_d L_V}{m_d c_{p,d}} = \frac{N_u}{3Pr} \left(\frac{c_p}{c_{p,d}} \right) \left(\frac{f_2}{\tau_d} \right) (T - T_d) + \left(\frac{\dot{m}_d}{m_d} \right) \frac{L_V}{c_{p,d}}, \quad (15)$$

$$D_k = \frac{\mu}{\rho Pr Le}, \quad (16)$$

در اینجا، T دمای فاز گازی، c_p گرمای مخصوص مخلوط گاز، $c_{p,d}$ گرمای مخصوص فاز مایع، L_V گرمای نهان تبخیر در T_d و g کشش جاذبه است. زمان واکنش ذرات τ_d توسط رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\tau_d = \frac{\rho_d d_d^2}{18\mu}. \quad (17)$$

که در اینجا d_d قطر قطرات است [۹].

در مورد تبخیر قطرات از مدل تبخیر همرفت/انتشار کنترل‌شده^۱ موجود در نرم‌افزار فلوئنت استفاده شده است [۱۹]. تفاوت این مدل تبخیر با مدل‌های دیگر مثل لانگ‌مویر-کنادسن^۲ در نادیده گرفتن تأثیر دمای داخل قطره در فرایند تبخیر است که توسط رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\frac{dm_d}{dt} = A_p K_c \rho \ln(1 + B_m) \quad (18)$$

$$Sh_{AB} = \frac{K_c d_p}{D_{i,m}} = 2.0 + 0.6 Re_d^{1/2} Sc^{1/3} \quad (19)$$

$$B_m = \frac{Y_{i,s} - Y_{i,\infty}}{1 - Y_{i,s}} \quad (20)$$

که در اینجا، m_p جرم قطره، K_c ضریب انتقال جرم، A_p مساحت سطح قطره، ρ چگالی گاز، B_m عدد جرم اسپالدینگ، $D_{i,m}$ ضریب نفوذ گونه در محفظه احتراق، $Sc = \mu / \rho D_{i,m}$ عدد اش‌میت^۳، d_p قطر قطره، $Y_{i,s}$ کسر جرمی بخار در سطح و $Y_{i,\infty}$ کسر جرمی بخار در فضای گسترده گازی است [۲۰].

شرح میدان حل

شبیه‌سازی شعله‌های اسپری در یک پیکربندی جریان متقابل آرام با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت انجام شده و روش حل با کار عددی واتانایب و همکاران [۱] صحنه‌گذاری شده است. محدوده محاسباتی مورد نظر در این مطالعه در شکل ۲ نشان داده شده است. ابعاد دامنه (به‌وسیله قطر درگاه‌های مشعل L_p ، که در هر دو طرف بالایی و پایینی قرار دارند یکسان‌سازی شده‌اند) به ترتیب ۱ و ۲ در جهت x و y هستند. مبدأ دامنه در مرکز درگاه مشعل بالایی واقع شده است. از درگاه‌های بالا و پایینی هوای اتمسفریک ($T=300$ k، $P=0.1013$ MPa و کسر جرمی اکسیژن $Y_{O_2}=0.2357$) در محل L_p تزریق می‌شود و اسپری اتانول خالص در محل L_p ۰/۳ درگاه بالا پاشیده می‌شود. همچنین، سرعت جریان وارد شده از درگاه‌های بالا و پایینی یکسان است.

1. Convection/Diffusion Controlled
2. Langmuir-Knudsen
3. Schmidt

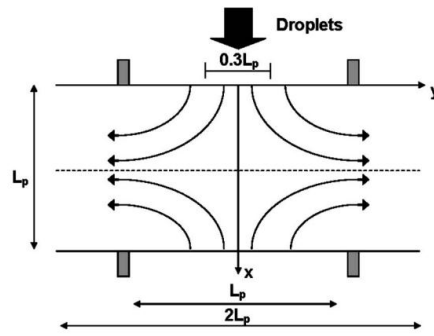


Figure 2- Computational domain for the numerical simulation

شکل ۲- دامنه محاسباتی برای شبیه‌سازی عددی

داده‌های محاسباتی

برای مدل واکنش احتراق در این مقاله، از یک مکانیسم اسکلتی اتانول/ هوا با ۴۰ گونه و ۱۸۰ واکنش مقدماتی استفاده شده است [۲۱]. در شکل ۴ فلوجارت واکنش‌های مهم اتانول آورده شده است. همچنین، برای صحنه‌گذاری بر روش حل، از یک مدل واکنش کلی یک‌مرحله‌ای دکان نرمال [۲۲] استفاده شده است.

معادلات حاکم بر فاز گازی (معادلات (۱) تا (۵)) به وسیله نرم‌افزار تجاری آنسیس-فلوئنت^۱ با روش حجم محدود و با استفاده از الگوریتم سیمپل حل می‌شوند. محدوده محاسبه $0 \leq x \leq 1$ و $-1 \leq y \leq 1$ با توجه به نتایج استقلال حل از شبکه محاسباتی (شکل ۳) به ترتیب در جهت x و y به 400×200 سلول به‌طور مساوی تقسیم شده است. حل تمامی معادلات از روش مرتبه دوم پادبادسو^۲ انجام می‌شود. قطر قطرات در لحظه پاشش یکسان است و در کار حاضر از تابع توزیع قطر استفاده نشده است، بلکه موقعیت پاشش قطرات به‌صورت تصادفی با استفاده از کد UDF در محل $L_p/3$ درگاه بالایی تعیین می‌شود و قطرات به‌صورت لاگرانژی دنبال می‌شوند.

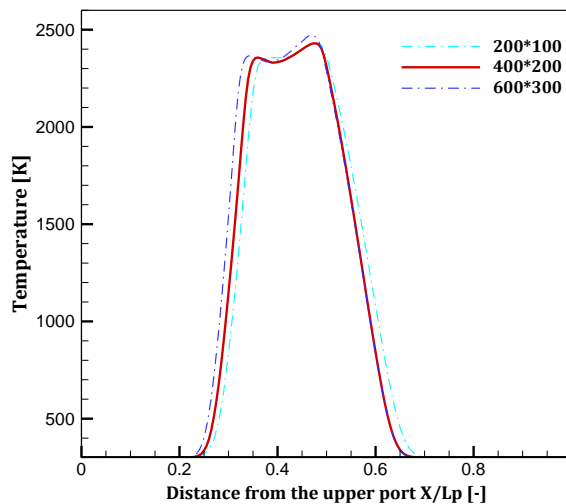


Figure 3- Temperature distribution diagram in the equivalence ratio of 1.26 to investigate the independence of the solution results from the computational network

شکل ۳- نمودار توزیع دما در نسبت هم‌ارزی ۱/۲۶ برای بررسی استقلال نتایج حل از شبکه محاسباتی

1. Ansys Fluent 18.2
2. Second order upwind

حالت پایه و دیگر شرایط تأمین قطره و گاز مورد مطالعه برای کار حاضر در جدول ۱ آورده شده است. فرمول کلی محاسبه نرخ کرنش به صورت نسبت سرعت گاز ورودی u_0 و فاصله بین درگاه بالا و پایین L_p ($a = 2u_0/L_p$) تعریف می‌شود. نسبت هم‌ارزی به‌عنوان نسبت جرم کل قطرات و هوای صادرشده از درگاه بالا ($\phi = s(\dot{m}_f/\dot{m}_o)$) تعریف می‌شود [۲۱]. برای بررسی اثر نسبت هم‌ارزی، محاسبات برای پنج نسبت هم‌ارزی ۰/۴۲، ۰/۶۳، ۰/۸۴، ۱/۲۶ و ۵ انجام می‌شود (به‌ترتیب موارد DE1، DE2، DE3، DE4، DE5). همچنین، محاسبات برای شش نرخ کرنش ۱۰، ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰ و 160 s^{-1} انجام می‌شود (به‌ترتیب حالت‌های DA1، DA2، DA3، DA4، DA5، DA6). علاوه بر این، برای بررسی اثر اندازه قطر اولیه قطره، محاسبات برای شش قطر ۱۵، ۳۰، ۷۴/۲، ۱۰۶/۷، ۱۳۷/۶ و ۱۴۸ میکرومتر انجام می‌شود (به‌ترتیب موارد DC1، DC2، DC3، DC4، DC5 و DC6). همچنین، سرعت اولیه قطرات برابر با همان سرعت جریان هوای ورودی است. عدد رینولدز براساس قطر درگاه مشعل ($L_p = 0/02\text{ m}$)، سرعت هوای ورودی ($u_0 = 0.4\text{ m/s}$) و خواص هوای اتمسفریک برای مورد DB، ۵۰۰ است. با توجه به اینکه از درگاه بالایی هوا و قطرات سوخت و از درگاه پایینی فقط هوا وارد می‌شود، می‌توان گفت که در کار حاضر یک نمونه واقعی از احتراق اسپری مورد بررسی قرار می‌گیرد.

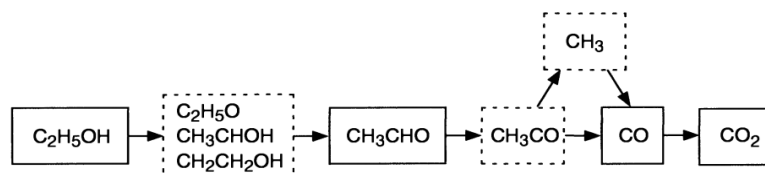


Figure 4- The main reactions in ethanol fuel[22]

شکل ۴- واکنش‌های اصلی در سوخت اتانول [۲۲]

جدول ۱- حالت‌های محاسباتی و شرایط تولیدکردن قطره

Table 1- The computation cases and the droplet supply conditions

	Case	Strain rate $a(\text{S}^{-1})$	Equivalence ratio(ϕ_1)	Sauter mean diameter SMD (μm)
General feature	DB	40	1.26	106.7
Effect of equivalence ratio	DE1	40	0.42	106.7
	DE2		0.63	
	DE3		0.84	
	DE4(DB)		1.26	
	DE5		5.00	
Effect of strain rate	DA1	10	1.26	106.7
	DA2	20		
	DA3(DB)	40		
	DA4	60		
	DA5	80		
	DA6	160		
Effect of initial droplet size	DC1	40	1.26	15
	DC2			30
	DC3			74.2
	DC4			106.7
	DC5(DB)			137.6
	DC6			148

صحه‌گذاری

برای انجام شبیه‌سازی‌های حل عددی از نرم‌افزار تجاری فلوئنت استفاده شده و به‌منظور صحه‌گذاری^۱، نتایج مدل‌سازی این نرم‌افزار با داده‌های منتشرشده در یک مقاله معتبر مقایسه شده است. نتایج اعتبارسنجی در ادامه بیان شده است.

1. Validation

اعتبارسنجی روش حل عددی

در کار حاضر، ابتدا روش حل با نتایج عددی واتانایب و همکاران [۱] صحت‌سنجی می‌شود. برای این کار شبیه‌سازی در دو نسبت هم‌ارزی ۰/۴۲ و ۱/۲۶ به ترتیب برای حالت‌های DE1 و DE2، که در جدول ۱ آورده شده است، با سوخت دکان نرمال انجام شد. نتایج شبیه‌سازی و مقاله مورد نظر را می‌توان در شکل ۵ مشاهده کرد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نتایج شبیه‌سازی تطابق خوبی با نتایج کار عددی واتانایب و همکاران دارد. خطای جزئی که در قسمت پیشینه دما مشاهده می‌شود به این دلیل است که روش حل کار حاضر در دو مورد با مرجع [۱] اختلاف دارد. یکی متفاوت بودن مدل تبخیر و دیگری در مدل احتراقی است، زیرا در کار حاضر از مدل احتراقی آرنیوس و در مرجع [۱] از مدل احتراقی فلیملت آرام استفاده شده است. لذا، اختلاف جواب‌های کار حاضر با مقاله مرجع به این دو دلیل است. همچنین، در مرجع [۲۳] هم، که از مرجع [۱] برای صحت‌گذاری بر روش حل استفاده کرده، به این نکات اشاره شده است. بعد از اطمینان از درست بودن روش حل، به بررسی رژیم‌های مختلف شعله برای سوخت اتانول به وسیله پارامتر شاخص شعله پرداخته شده است.

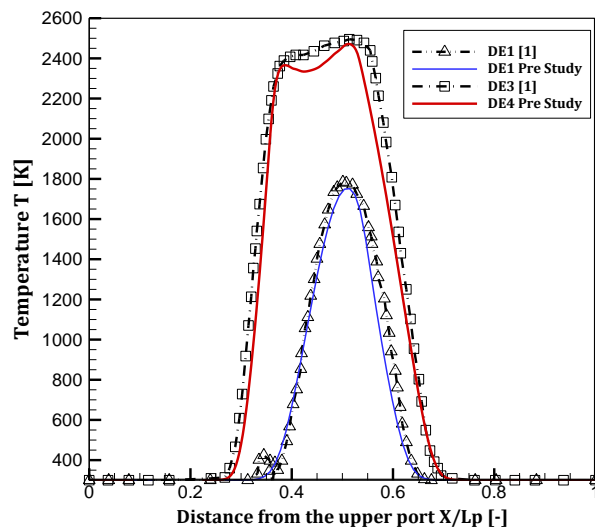


Figure 5- Comparison of temperature variations from simulation with reference paper [1] for the equivalent ratio of 0.42 and 1.26
 شکل ۵- مقایسه نمودار تغییرات دمای حاصل از شبیه‌سازی با مقاله مرجع [۱] برای نسبت‌های هم‌ارزی ۰/۴۲ و ۱/۲۶

نتایج و بحث

در کار حاضر، شبیه‌سازی عددی برای نسبت‌های هم‌ارزی، نرخ‌های کرنش و قطر قطره‌های مختلف برای سوخت اتانول انجام شده است. برای درک بهتر احتراق اسپری و شناسایی ناحیه رژیم‌های پیش‌آمیخته و غیرپیش‌آمیخته، نیاز به شناخت پارامترهایی همچون کسر مخلوط [۲۴] و پارامتر شاخص شعله [۲۵] وجود دارد که به ترتیب از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$F.I = \nabla Y_{C_{10}H_{22}} \cdot \nabla Y_{O_2} \quad (21)$$

$$Z = \frac{sY_F - Y_O + Y_O^0}{sY_F^0 + Y_O^0} \quad (22)$$

کسر مخلوط نسبت بین مخلوط بخار سوخت و هوا و پارامتر شاخص شعله حاصل ضرب عددی گرادیان سوخت و اکسیدکننده است. شاخص شعله مناطقی را شناسایی می‌کند که شعله‌های پیش‌آمیخته و شعله‌های غیرپیش‌آمیخته در آن قرار دارند. برای شعله پیش‌آمیخته مثبت است و برای شعله غیرپیش‌آمیخته منفی است. احتراق گروه قطره در مناطق غیرپیش‌آمیخته شعله رخ می‌دهد. همچنین، در نسبت‌های هم‌ارزی زیاد، نرخ‌های کرنش بالا و قطر قطرات بزرگ، به دلیل صفر شدن مقدار کسر جرمی اکسیدکننده، مقدار عددی شاخص شعله صفر می‌شود [۹].

اثر نسبت هم‌ارزی

محاسبات برای پنج نسبت هم‌ارزی مختلف ۰/۴۲، ۰/۶۳، ۰/۸۴، ۱/۲۶ و ۵ به ترتیب برای حالت‌های DE1، DE2، DE3، DE4 و DE5، که در جدول ۱ آورده شده است، انجام شد. برای همه حالت‌ها نرخ کرنش a ، $40 (s^{-1})$ و قطر قطرات متوسط ساتر $106/7$ میکرومتر است.

به منظور بررسی ساختار شعله اسپری، شاخص شعله F.I معرفی شده است. شاخص شعله مناطقی را شناسایی می‌کند که شعله‌های پیش‌آمیخته و شعله‌های غیرپیش‌آمیخته در آن قرار دارند. F.I برای شعله پیش‌آمیخته مثبت است و برای شعله غیرپیش‌آمیخته منفی است و مقدار مطلق آن به عنوان میزان سوخت و اکسیژن عرضه شده توسط انتشار مولکولی افزایش می‌یابد. بنابراین، شعله اسپری یک ساختار پیچیده دارد. بیشینه دما در شعله‌های اسپری بیشتر از شعله‌های گازی است که به دلیل وجود ناحیه شعله پیش‌آمیخته شده است. زیرا، رژیم پیش‌آمیخته و غیرپیش‌آمیخته هر دو در شعله اسپری وجود دارد [۹].

در شکل ۶، نتایج برای توزیع دما و رژیم‌های مختلف شعله در نسبت‌های هم‌ارزی مختلف نشان داده شده است. به دلیل پایین بودن انرژی آزاد شده سوخت اتانول نسبت به سوخت‌های دیگر، نظیر دکان نرمال، در حالت DE1 شعله تشکیل نمی‌شود. همان‌طور که در نمودار شاخص شعله مشاهده می‌شود، در ابتدای ورود، مقدار کمی از کسر جرمی قطرات سوخت با اکسیدکننده‌ها واکنش داده که منجر به احتراق پیش‌آمیخته جزئی می‌شود. البته در حالت DE2 این حالت برعکس است، یعنی ابتدا مقدار زیادی از کسر جرمی قطرات سوخت با اکسیدکننده‌ها واکنش داده و مقدار مثبت F.I ابتدا افزایشی است، زیرا برای نسبت‌های هم‌ارزی خیلی پایین در ابتدا شعله پیش‌آمیخته است و بعد ناحیه غیرپیش‌آمیخته شکل می‌گیرد. با توجه به شکل ۷، به دلیل اینکه در نسبت هم‌ارزی ۰/۶۳ بیشینه کسر مخلوط، H_2O و CO تقریباً در محدوده $0.5 \leq x \leq 0.55$ اتفاق می‌افتد و با توجه به شکل ۸ در این محدوده از مقدار O_2 کاسته می‌شود، به همین دلیل، مقدار F.I منفی شده و رژیم غالب شعله غیرپیش‌آمیخته است.

در نسبت‌های هم‌ارزی بالا، به دلیل زیادبودن کسر مخلوط (شکل ۷) و صفربودن مقدار کسر جرمی O_2 (شکل ۸) در بازه $0.42 \leq x \leq 0.5$ ، واکنش احتراق به کندی شکل می‌گیرد، زیرا همان‌طور که در شکل ۸ مشخص است، در نسبت‌های هم‌ارزی بالا، مقدار رادیکال OH در بازه $0.35 \leq x \leq 0.55$ صفر است. به این نکته در مراجع [۲۶] و [۲۷] نیز اشاره شده است. در حالت کلی، به این اتفاقات احتراق گروه قطره گفته می‌شود و به اصطلاح سرمایش در احتراق رخ می‌دهد [۹].

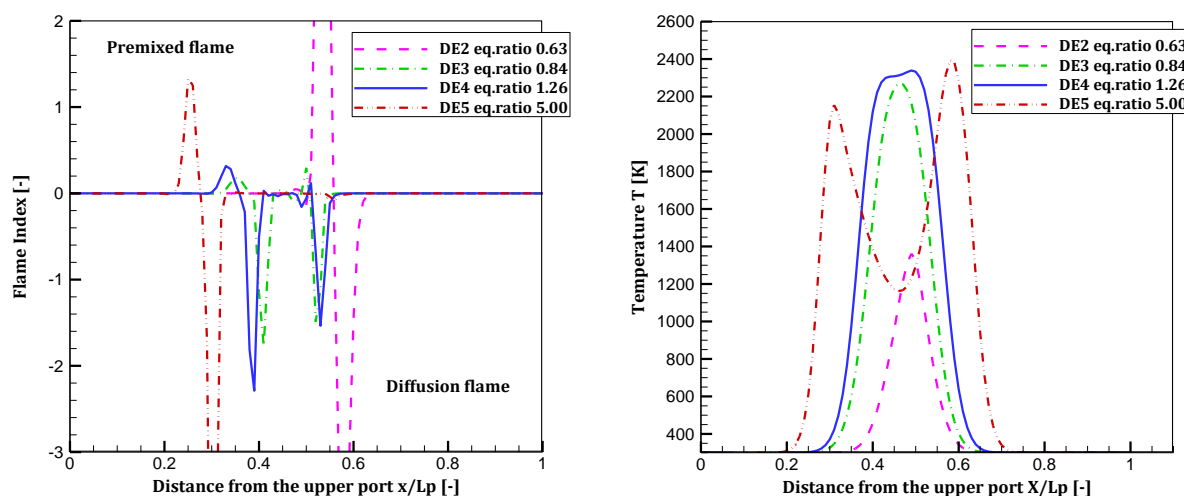


Figure 6- Temperature distribution and flame index diagram for various equivalence ratio

شکل ۶- نمودار توزیع دما و شاخص شعله برای نسبت‌های هم‌ارزی مختلف

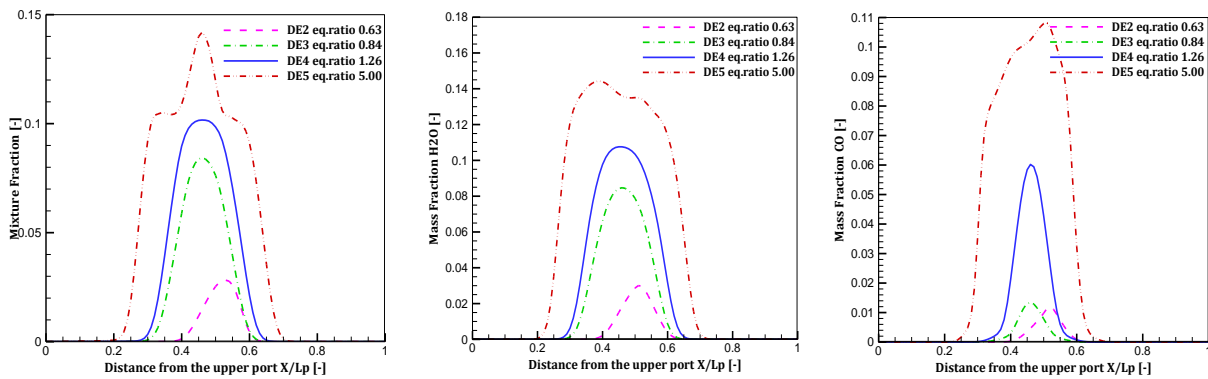


Figure 7- Variation of mixture fraction and mass fractions H₂O and CO in the various equivalence ratio

شکل ۷- نمودار تغییرات کسر مخلوط و کسر جرمی H₂O و CO در نسبت‌های هم‌ارزی مختلف

با توجه به شکل ۸، مشاهده می‌شود که با افزایش نسبت هم‌ارزی، کسر مخلوط افزایش یافته و احتراق گروهی قطرات شکل می‌گیرد که موجب احتراق ناقص و افزایش تولید گونه CO می‌شود و چون CO شامل اتم کربن C است، به همین دلیل، با افزایش CO و صفرشدن کسر جرمی O₂ در محدوده $0.4 \leq x \leq 0.55$ ، از مقدار کسر جرمی CO₂ کاسته می‌شود، زیرا CO قبل از CO₂ تشکیل می‌شود [۲۸].

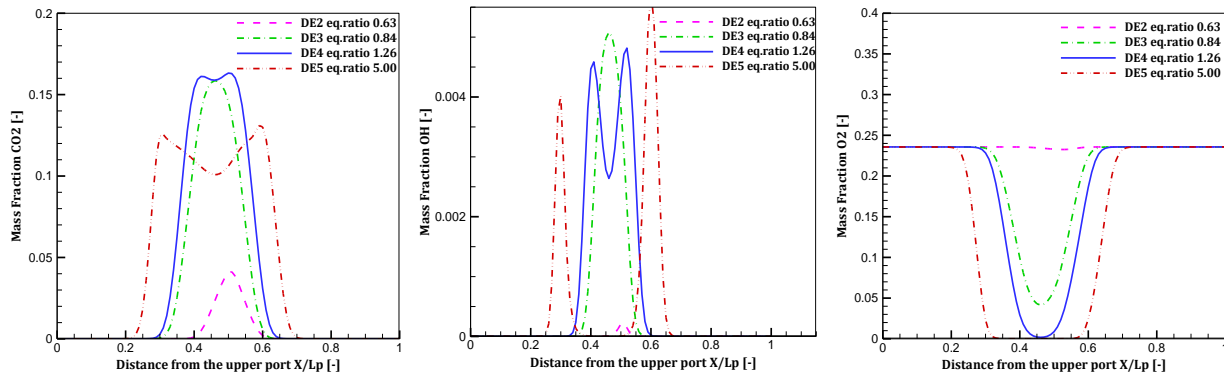


Figure 8- Variation of mass fractions O₂, CO₂ and OH in the various equivalence ratio

شکل ۸- نمودار تغییرات کسر جرمی O₂, CO₂ و OH در نسبت‌های هم‌ارزی مختلف

با توجه به شکل ۹-ب، با افزایش نسبت هم‌ارزی، به دلیل اینکه کسر مخلوط سوخت و هوا افزایش می‌یابد و در این حالت اکسیدکننده‌ها و رادیکال OH در فرایند واکنش‌های احتراقی مصرف می‌شود، بنابراین در این ناحیه احتراق شکل نمی‌گیرد و دمای مرکز شعله به شدت کاهش می‌یابد. همچنین، با توجه به شکل ۹-الف قسمت‌های سفیدرنگ ناحیه رژیم پیش‌آمیخته و ناحیه آبی‌رنگ نشان‌دهنده ناحیه شعله غیرپیش‌آمیخته است [۹].

اثر نرخ کرنش

اثر توزیع اندازه اولیه قطرات با انجام محاسبات برای شش نرخ کرنش مختلف ۱۰، ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰ و 160 s^{-1} به ترتیب برای حالت‌های DA1، DA2، DA3، DA4، DA5 و DA6، که در جدول ۱ آورده شده است، انجام شد. برای همه حالت‌ها قطر قطرات، قطر متوسط ساتر $106/7$ میکرومتر و نسبت هم‌ارزی $1/26$ است.

همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، برای نرخ‌های کرنش پایین مثل حالت DA1، به دلیل اینکه سرعت اولیه هوا و قطرات ورودی پایین است، شعله در ناحیه نزدیک‌تری از درگاه بالا شکل می‌گیرد. با توجه به اینکه قطر قطرات برای تمام این

حالت‌ها ۱۰۶/۷ میکرومتر است، بنابراین قطرات دیرتر تبخیر شده و این حالت موجب می‌شود که کسر جرمی سوخت (شکل ۱۱) در ناحیه قبل از شعله، کمتر از مقدار کسر جرمی اکسیدکننده (شکل ۱۲) باشد و این خود منجر به F.I مثبت یا همان احتراق پیش‌آمیخته به صورت جزئی می‌شود.

با افزایش نرخ کرنش، سرعت اولیه هوا و قطرات ورودی افزایش پیدا کرده و موجب می‌شود که تجمع قطرات در یک لایه از مرکز شعله افزایش یابد و مقادیر کسر مخلوط، CO و H₂O افزایش یافته (شکل ۱۱) و مقادیر O₂، OH و CO₂ کاهش می‌یابد (شکل ۱۲) و مقدار F.I در این حالت منفی می‌شود (شکل ۱۰) که نشان‌دهنده شکل‌گیری شعله غیرپیش‌آمیخته است. با افزایش کسر مخلوط و صفرشدن کسر جرمی اکسیدکننده، مقدار F.I، که حاصل ضرب عددی گرادیان سوخت و اکسیدکننده است، صفر می‌شود که به این حالت احتراق گروهی قطرات یا سرمایه‌ش در احتراق گفته می‌شود. به دلیل شکستن گونه‌های اکسیژن‌دار و واکنش با اتم‌های کربن و هیدروژن و تشکیل CO و H₂O، مقدار O₂ در محدوده $0.44 \leq x \leq 0.54$ صفر می‌شود و مقدار CO₂ و OH کاهش یافته که کاهش شدید OH موجب کندشدن واکنش‌های احتراقی شده است [۲۷،۲۸]. همچنین، دمای شعله، به دلیل عدم شکل‌گیری احتراق در این محدوده، کاهش می‌یابد.

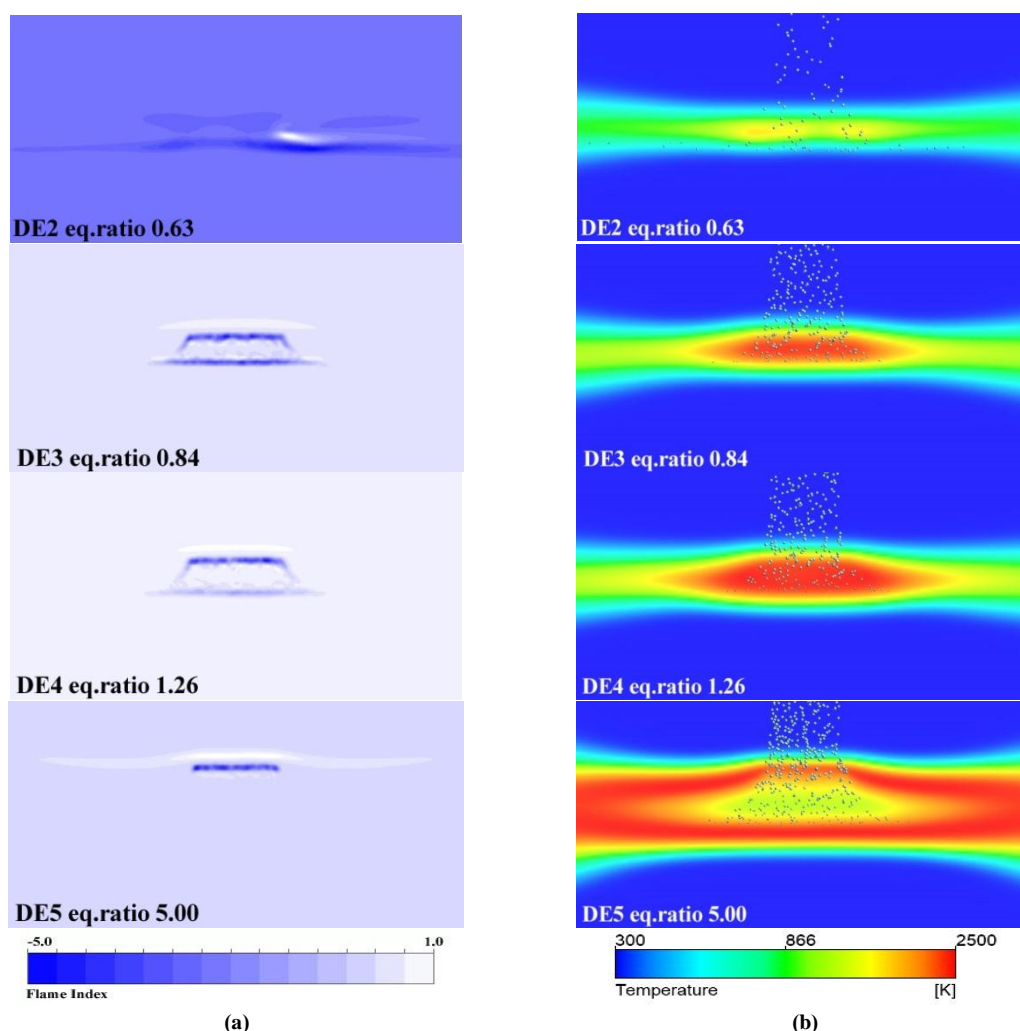


Figure 9- Instantaneous distributions the temperature and flame regime in various equivalence ratio, (a) flame index and (b) gas temperature

شکل ۹- توزیع لحظه‌ای دما و رژیم شعله در نسبت‌های هم‌ارزی مختلف، (الف) شاخص شعله و (ب) دمای گازها

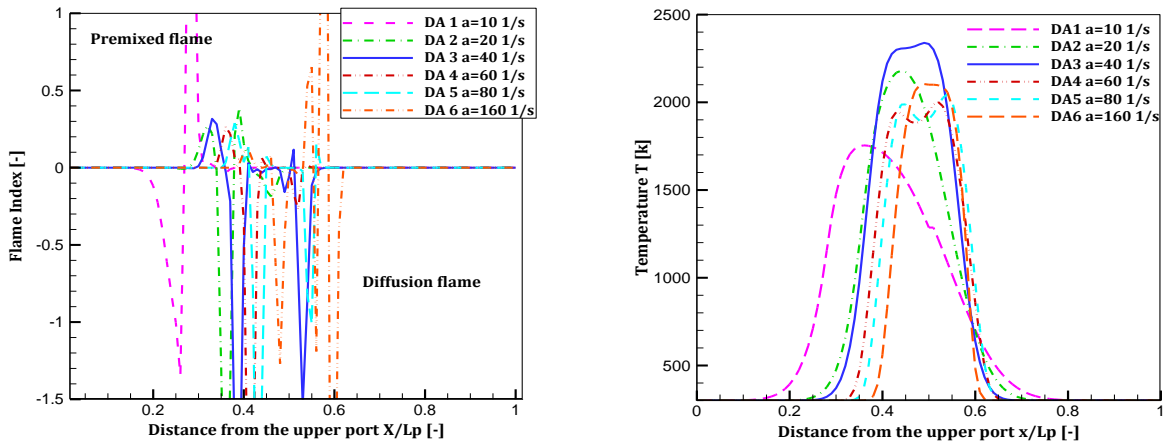


Figure 10- Temperature distribution and flame index diagram for various strain rate

شکل ۱۰- نمودار توزیع دما و شاخص شعله برای نرخ‌های کرنش مختلف

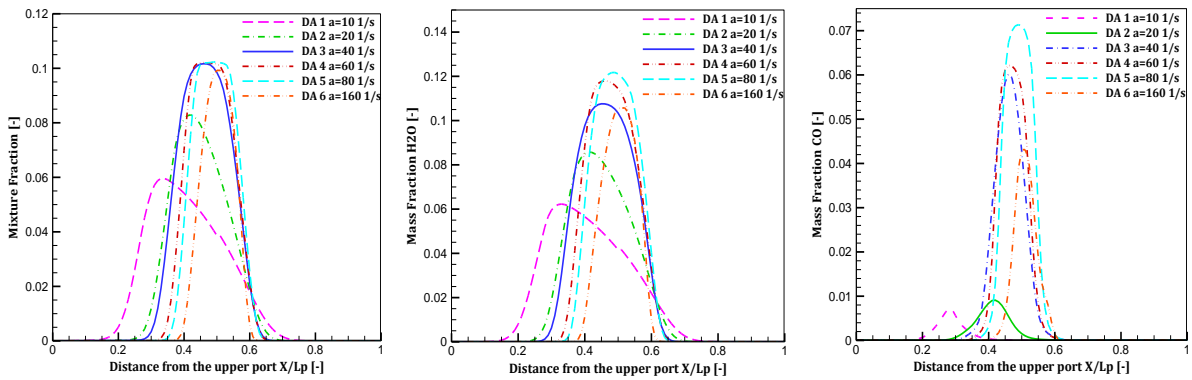


Figure 11- Variation of mixture fraction and mass fractions H2O and CO in the various strain rate

شکل ۱۱- نمودار تغییرات کسر مخلوط و کسر جرمی H₂O و CO در نرخ‌های کرنش مختلف

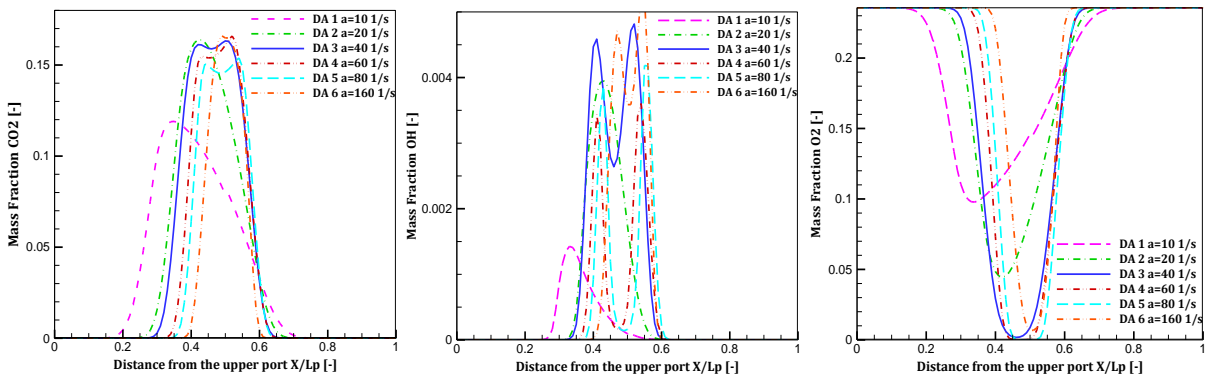


Figure 12- Variation of mass fractions O₂, CO₂ and OH in the various strain rate

شکل ۱۲- نمودار تغییرات کسر مخلوط و کسر جرمی O₂, CO₂ و OH در نرخ‌های کرنش مختلف

با افزایش نرخ کرنش، کسر جرمی سوخت در محدوده $0.4 \leq x \leq 0.6$ افزایش یافته و به دلیل صفرشدن مقدار F.I می‌توان گفت که احتراق گروهی قطرات شکل می‌گیرد که موجب احتراق ناقص و افزایش تولید گونه CO می‌شود. با توجه به اینکه گونه CO شامل اتم کربن C است، به همین دلیل، با افزایش CO (شکل ۱۱) و صفرشدن کسر جرمی O₂ در محدوده $0.4 \leq x \leq 0.5$ ، از مقدار کسر جرمی CO₂ کاسته می‌شود (شکل ۱۲)، زیرا CO قبل از CO₂ تشکیل می‌شود [۲۸].

همان طور که در شکل‌های ۱۰ و ۱۳ مشاهده می‌شود، با افزایش نرخ کرنش، به دلیل اینکه قطرات خیلی سریع به مرکز شعله می‌رسند، کسر مخلوط سوخت و هوا افزایش می‌یابد. در این حالت کسر جرمی اکسیدکننده‌ها و رادیکال OH در فرایند واکنش‌های احتراقی به صفر می‌رسد. به همین دلیل، در این ناحیه، احتراق شکل نمی‌گیرد و دمای مرکز شعله به شدت کاهش می‌یابد.

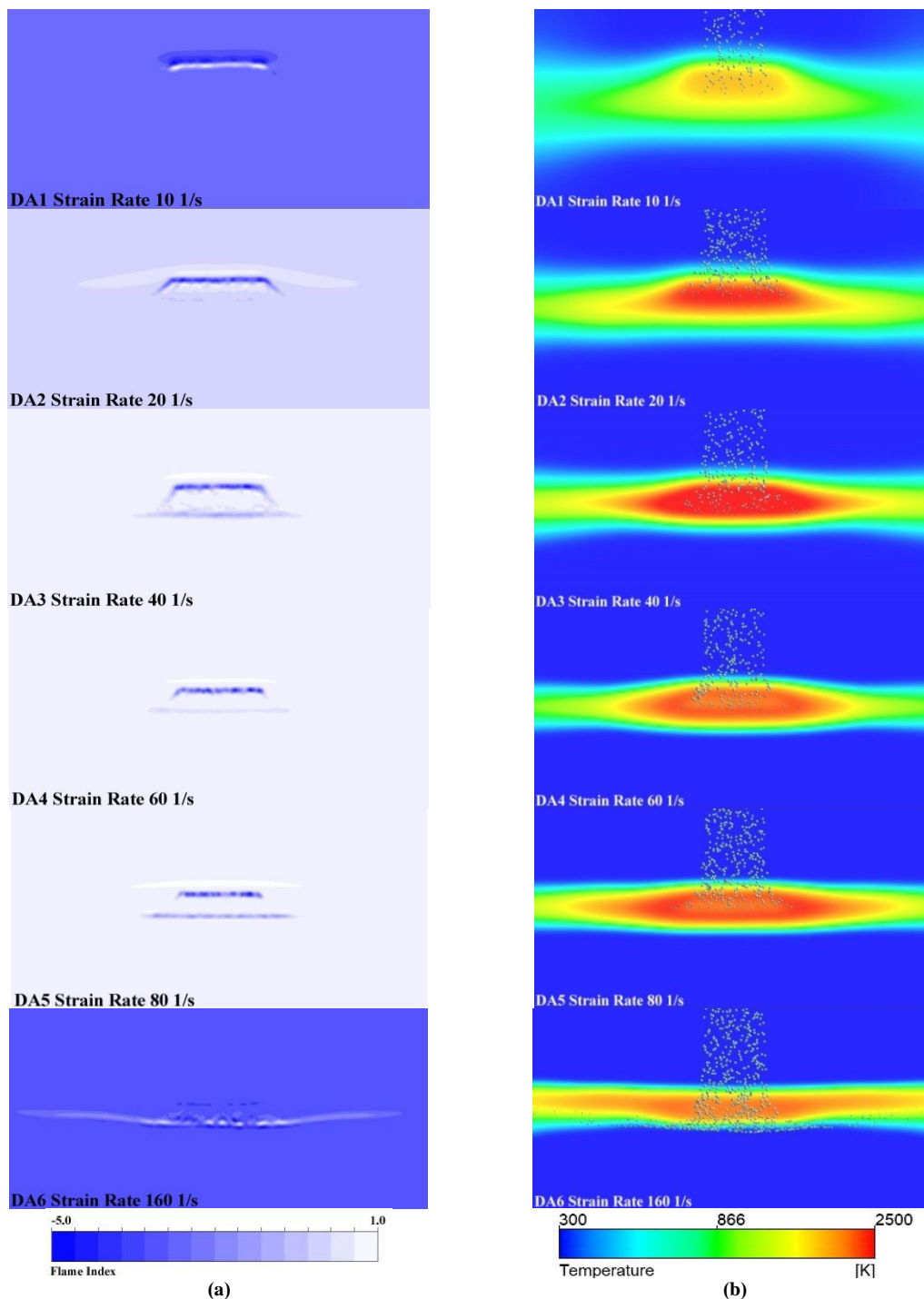


Figure 13- Instantaneous distributions the temperature and flame regime in various strain rate, (a) flame index and (b) gas temperature

شکل ۱۳- توزیع لحظه‌ای دما و رژیم شعله در نرخ‌های کرنش مختلف، (الف) شاخص شعله و (ب) دمای گازها

همچنین، با توجه به شکل ۱۳-الف، قسمت‌های سفیدرنگ ناحیه رژیم پیش‌آمیخته و ناحیه آبی‌رنگ نشان‌دهنده ناحیه شعله غیرپیش‌آمیخته است [۹].

اثر قطر قطرات

اثر توزیع اندازه اولیه قطرات با انجام محاسبات برای شش قطر قطره مختلف ۱۵، ۳۰، ۷۴/۲، ۱۰۶/۷، ۱۳۷/۶ و ۱۴۸ میکرومتر به ترتیب برای حالت‌های DC1، DC2، DC3، DC4، DC5 و DC6، که در جدول ۱ آورده شده است، انجام شد. برای همه حالت‌ها نرخ کرنش a ، 40 s^{-1} و نسبت هم‌ارزی ϕ_1 ۱/۲۶ است.

با توجه به نمودار شاخص شعله در شکل ۱۴، برای حالت DC1، پس از تزریق قطرات از دهانه بالا، قطرات به سرعت در این منطقه تبخیر می‌شود و در ابتدا یک منطقه منفی F.I نمایان می‌شود. دلیل منفی شدن F.I این است که قطرات به سرعت در نزدیکی شعله تبخیر می‌شوند و کسر مخلوط افزایش یافته و کسر جرمی اکسیدکننده کاهش می‌یابد که این محدوده به عنوان منطقه تبخیر سریع شناخته می‌شود. در سمت پایین منطقه تبخیر سریع، مناطق مثبت و منفی F.I هستند که به ترتیب نشان‌دهنده حضور شعله‌های پیش‌آمیخته و غیرپیش‌آمیخته است [۹].

با صفر شدن مقدار کسر جرمی O_2 در محدوده مرکز شعله، مقدار F.I صفر می‌شود که این بدین معنی است که احتراق گروه قطره یا سرمایش در احتراق از نوع "غیرپیش‌آمیخته" است. این ساختار شعله مبتنی بر F.I به خوبی با حالت‌های پیش‌آمیخته و غیرپیش‌آمیخته احتراق سازگاری دارد. با توجه به توزیع F.I، برای اندازه قطرات کوچک‌تر DC1، منطقه F.I منفی جلوتر از قسمت منطقه F.I مثبت رخ می‌دهد، زیرا در این ناحیه قطرات کوچک‌تر سریع تبخیر شده و همان‌طور که در شکل ۱۵ و ۱۶ مشاهده می‌شود، کسر مخلوط افزایش یافته و کسر جرمی O_2 کاهش پیدا می‌کند. تعدادی از قطرات که از این ناحیه عبور می‌کنند با اکسیدکننده‌های ورودی از درگاه پایینی برخورد کرده و تبخیر می‌شوند و به دلیل اینکه مقدار کسر جرمی O_2 در این ناحیه بیشتر از کسر جرمی سوخت است مقدار F.I مثبت بوده و در واقع یک شعله پیش‌آمیخته شکل می‌گیرد.

همان‌طور که در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود، با افزایش قطر اولیه قطرات، مقدار کسر مخلوط افزایش می‌یابد و همچنین با توجه به شکل ۱۶، تا زمانی که مقدار کسر جرمی رادیکال OH زیاد است واکنش‌های احتراقی سریع‌تر رخ داده و انرژی آزاد می‌شود و با افزایش قطر اولیه قطرات، از مقدار کسر جرمی O_2 و رادیکال OH در مرکز شعله کاسته می‌شود و در نهایت منجر به تضعیف واکنش‌های احتراقی می‌شود و دمای شعله، به دلیل عدم شکل‌گیری احتراق در این محدوده، کاهش می‌یابد که در مرجع [۲۸] به این نکته اشاره شده است.

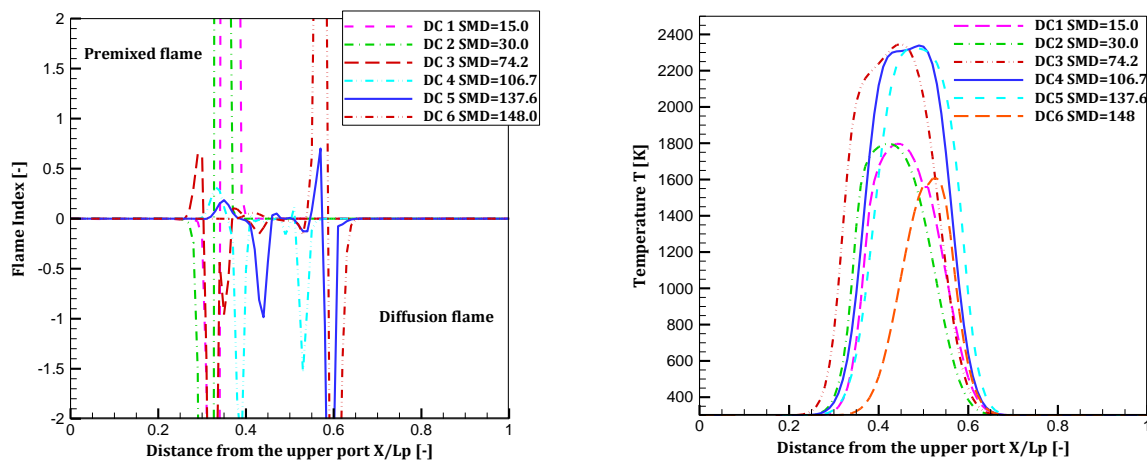


Figure 14- Temperature distribution and flame index diagram for various droplet diameters

شکل ۱۴- نمودار توزیع دما و شاخص شعله برای قطر قطرات مختلف

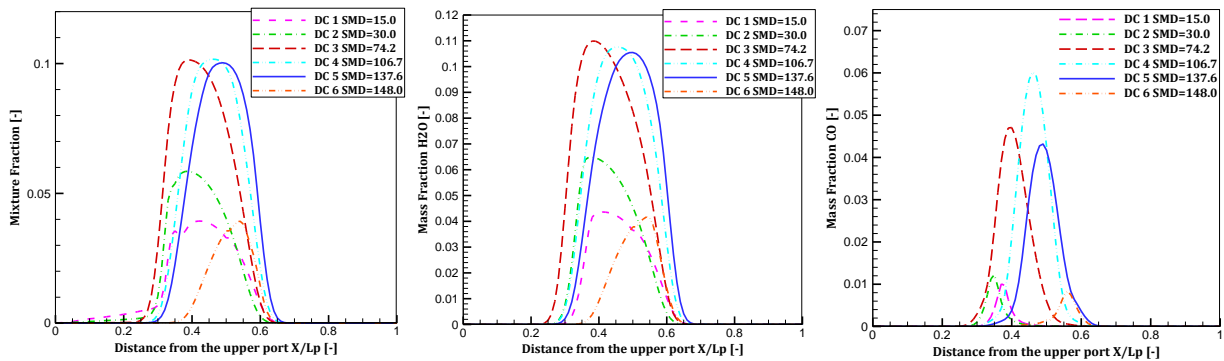


Figure 15- Variation of mixture fraction and mass fractions H₂O and CO in the various droplet diameters

شکل ۱۵- نمودار تغییرات کسر مخلوط و کسر جرمی H₂O و CO در قطر قطرات مختلف

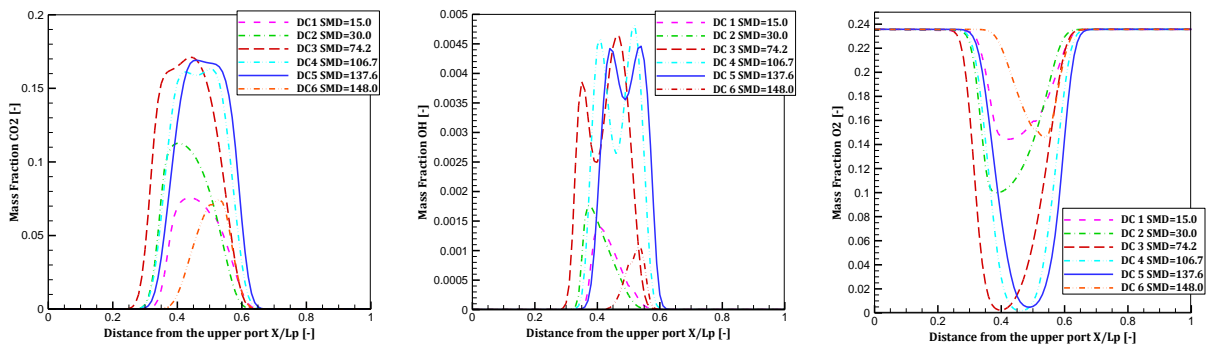


Figure 16- Variation of mass fractions O₂, CO₂ and OH in the various droplet diameters

شکل ۱۶- نمودار تغییرات کسر مخلوط و کسر جرمی O₂, CO₂ و OH در قطر قطرات مختلف

در قطر قطرات بالا، مثل حالت DC4، به دلیل اینکه سرعت تبخیر قطرات پایین است، از شعله عبور کرده و در لایه پایینی شعله تبخیر می‌شوند که موجب منفی شدن عدد F.I می‌شود که نشان‌دهنده رژیم غیرپیش‌آمیخته شعله است، زیرا در محدوده $0.45 \leq x \leq 0.55$ مقدار کسر جرمی O₂ (شکل ۱۶) نزدیک به صفر است ولی مقدار کسر مخلوط (شکل ۱۵) افزایش پیدا کرده است.

نکته قابل توجه در اینجا این است که هرچه نسبت هم‌ارزی و نرخ کرنش افزایش می‌یابد، مقدار CO، به دلیل تجمع زیاد قطرات در یک نقطه، افزایش می‌یابد (شکل ۷ و ۱۱). با افزایش قطر اولیه قطرات فقط تا قطر قطره ۱۰۶/۷ مقدار CO افزایشی است (شکل ۱۵) و در قطر قطره ۱۳۷/۶ مقدار CO کاهش می‌یابد که می‌تواند به دلیل تبخیر آرام قطره در مدت‌زمان بین درگاه بالا تا رسیدن به نزدیکی درگاه پایین باشد. با افزایش قطر قطرات زمان تبخیر و انرژی لازم برای تبخیر افزایش پیدا کرده و موجب می‌شود که قطره‌های با قطر بزرگ‌تر نتوانند به‌طور کامل در مرکز شعله تبخیر شوند و مقدار باقی‌مانده قطره از مرکز شعله عبور کرده و در برخورد با هوای ورودی از درگاه پایین تبخیر می‌شود و مانع از تجمع قطرات در مرکز شعله شده و از صفر شدن مقدار کسر جرمی O₂ و کاهش شدید OH یا به اصطلاح سرمایه‌ش در احتراق جلوگیری می‌کند. بنابراین، تفاوت در مقدار کسر جرمی CO و دیگر گونه‌ها برای قطرهای مختلف قطرات یک امر طبیعی است.

با توجه به شکل ۱۴ و ۱۷، نتیجه می‌گیریم که با افزایش قطر اولیه قطرات، مقدار اینرسی قطرات افزایش یافته و سرعت تبخیر آن‌ها کاهش می‌یابد و به دلیل کندبودن تبخیر، قطرات به سمت درگاه پایین حرکت می‌کنند. با افزایش کسر جرمی مخلوط در ناحیه مرکز شعله، تمام اکسیدکننده‌ها و رادیکال OH به‌وسیله واکنش‌های احتراقی در این ناحیه مصرف می‌شود و

دمای احتراق در این ناحیه به دلیل عدم شکل‌گیری احتراق کاهش پیدا می‌کند. همچنین، با توجه به شکل ۱۷-الف قسمت‌های سفیدرنگ ناحیه رژیم پیش‌آمیخته و ناحیه آبی‌رنگ نشان‌دهنده ناحیه شعله غیرپیش‌آمیخته است [۹].

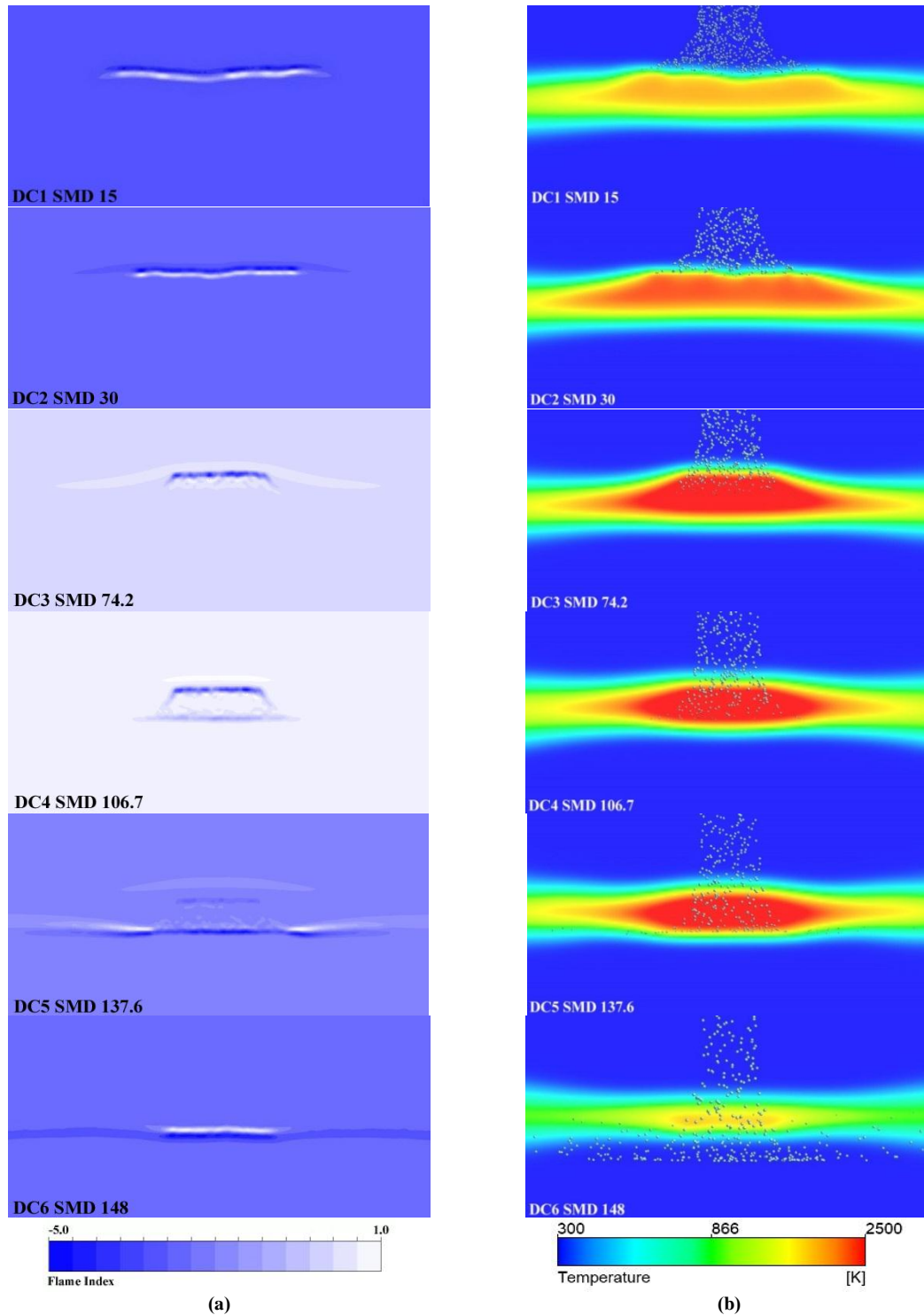


Figure 17- Instantaneous distributions the temperature and flame regime in various droplet diameters, (a) flame index and (b) gas temperature

شکل ۱۷- توزیع لحظه‌ای دما و رژیم شعله در قطر قطرات مختلف، (الف) شاخص شعله و (ب) دمای گازها

نتیجه گیری

شبیه سازی عددی دوبعدی در پیکربندی شعله اسپری جریان متقابل آرام، برای سوخت اتانول، به منظور شناسایی ناحیه تشکیل احتراق پیش آمیخته و غیرپیش آمیخته، برای نسبت های هم آرز، نرخ های کرنش و قطر قطره های مختلف انجام شد. نتایج اصلی به دست آمده در این مطالعه می تواند به شرح زیر خلاصه شود.

برای نسبت های هم آرز زیاد، نرخ های کرنش بالا و قطر های بزرگ قطرات مشاهده شد که کسر جرمی مخلوط در ناحیه مرکز شعله افزایش می یابد و به دلیل مصرف شدن اکسیدکننده و کاهش کسر جرمی رادیکال OH واکنش های احتراقی فرونشاندن می شوند و در این ناحیه احتراق شکل نمی گیرد. بنابراین، دمای احتراق در این ناحیه کاهش پیدا می کند و عدد شاخص شعله، به دلیل کاهش کسر جرمی اکسیدکننده، منفی شده و رژیم غالب شعله در این ناحیه غیرپیش آمیخته می شود. مشاهده شد که در نسبت های هم آرز زیاد، نرخ های کرنش بالا و قطر های بزرگ قطرات، مقدار شاخص شعله در ناحیه مرکز شعله صفر شد، زیرا شاخص شعله حاصل ضرب عددی گرادیان کسر جرمی سوخت و اکسیدکننده است و چون در ناحیه مرکز شعله اکسیدکننده به وسیله واکنش های احتراقی مصرف می شود، مقدار شاخص شعله در این ناحیه صفر است که نشان دهنده احتراق گروهی داخلی قطرات در این ناحیه است.

بنابراین، با توجه به نتایج حل عددی، رژیم شعله در کل محدوده شعله به جز لایه نازک بالا و پایین شعله به طور میانگین غیرپیش آمیخته است و با توجه به صفر شدن مقدار شاخص شعله در مرکز شعله، احتراق گروه داخلی قطرات نیز در مرکز شعله وجود دارد.

تشکر و قدردانی

در اینجا از راهنمایی های ارزشمند دکتر زهیر صیوحی و دکتر محمد صفرزاده کمال تشکر و قدردانی می شود.

منابع

1. H. Watanabe, R. Kurose, S. M. Hwang and F. Akamatsu, "Characteristics of flamelets in spray flames formed in a laminar counterflow," *Combustion and Flame*, 148, No. 4, 2007, pp. 234-48.
2. J. M. Card and F. A. Williams, "Asymptotic analysis with reduced chemistry for the burning of n-heptane droplets," *Combustion and flame*, 91, No. 2, 1992, pp. 187-99.
3. N. Peters, "Laminar diffusion flamelet models in non-premixed turbulent combustion," *Progress in energy and combustion science*, 10, No. 3, 1984, 319-39.
4. H. H. Chiu and T. M. Liu, "Group combustion of liquid droplets," *Combust. Sci. Technol.*, 17, No. 3-4, 1977, pp. 127-142.
5. H. H. Chiu, H. Y. Kim, and E. J. Croke, "Internal group combustion of liquid droplets," *Symp. Combust.*, 19, No. 1, 1982, pp. 971-980.
6. H. A. Olgún Astudillo, *Theoretical and Numerical Analysis of Laminar Spray Flames for Use in Turbulent Spray Combustion Modeling*, Doctoral dissertation, Karls University, 2015.
7. P. Stapf, H. A. Dwyer and R. R. Maly, "A group combustion model for treating reactive sprays in IC engines," *In Symposium (International) on Combustion*, Elsevier, 1998 Jan 1, 27, No. 2, pp. 1857-1864.
8. S. Candel, F. Lacas, N. Darabiha and J. C. Rolon, "Group combustion in spray flames," *Multiphase Science and Technology*, 11, No. 1, pp. 1-18, 1999.
9. M. Nakamura, F. Akamatsu, R. Kurose and M. Katsuki, "Combustion mechanism of liquid fuel spray in a gaseous flame," *Physics of Fluids*, 17, No. 12, 2005, 20123301.
10. M. Nakamura, F. Akamatsu, R. Kurose and M. Katsuki, "Experimental and numerical study on combustion mechanism of liquid fuel spray entering gaseous flame front," *JSME International Journal Series B Fluids and Thermal Engineering*, 49, No. 2, 2006, pp. 498-505.
11. J. Hayashi, H. Watanabe, R. Kurose and F. Akamatsu, "Effects of fuel droplet size on soot formation in spray flames formed in a laminar counterflow," *Combustion and Flame*, 158, No. 12, 2011, pp. 2559-68.
12. D. Alviso, J. C. Rolon, P. Scouflaire and N. Darabiha, "Experimental and numerical studies of biodiesel combustion mechanisms using a laminar counterflow spray premixed flame," *Fuel*, 153, 2015, pp. 154-65.
13. J. Carpio, D. Martínez-Ruiz, A. Liñán, A. L. Sánchez and F. A. Williams, "Hysteresis in the Vaporization-Controlled Inertial Regime of Nonpremixed Counterflow Spray Combustion," *Combustion Science and Technology*, 192, No. 3, 2020, pp. 1-24.

14. H. M. Amin and W. L. Roberts, "Investigating Soot Parameters in an Ethane/Air Counterflow Diffusion Flame at Elevated Pressures," *Combustion Science and Technology*, Published online: 17 Jan 2020, pp. 1-6.
15. J. Wirtz, B. Cuenot and E. Riber, "Numerical study of a polydisperse spray counterflow diffusion flame," *Proceedings of the Combustion Institute*, 38, No. 2, 2021, pp. 3175-3182.
16. R. King, editor, *Active Flow and Combustion Control 2014*, Springer International Publishing, Switzerland, 2015.
17. H. Pitsch "Unsteady flamelet modeling of differential diffusion in turbulent jet diffusion flames," *Combustion and Flame*, 123, No. 3, 2000, pp. 358-74.
18. H. Pitsch and N. Peters, "A consistent flamelet formulation for non-premixed combustion considering differential diffusion effects," *Combustion and flame*, 114, No. 1-2, 1998, pp. 26-40.
19. Fluent AN. "Ansys fluent theory guide," ANSYS Inc., USA, 2011 Nov, 15317, 724-46.
20. "ANSYS Fluent Theory Guide," no. January, 2017.
21. A. Vié, B. Franzelli, Y. Gao, T. Lu, H. Wang and M. Ihme, "Analysis of segregation and bifurcation in turbulent spray flames: A 3D counterflow configuration," *Proceedings of the Combustion Institute*, 35, No. 2, 2015, pp. 1675-83.
22. V. V. Lissianski, V. M. Zamansky and W. C. Gardiner, *Combustion chemistry modeling, InGas-phase combustion chemistry*, Springer, New York, NY, 2000.
23. Z. Manqi, *Diphasic Counterflow Flame: Parametric Study*, Internship at CERFACS, Toulouse, France, 2010.
24. S. R. Turns, *Introduction to combustion*, New York, McGraw-Hill Companies, 1996.
25. H. Yamashita, M. Shimada and T. Takeno, "A numerical study on flame stability at the transition point of jet diffusion flames," *InSymposium (International) on Combustion*, 26, No. 1, 1996, pp. 27-34.
26. M. Orain and Y. Hardalupas, "Droplet characteristics and local equivalence ratio of reacting mixture in spray counterflow flames," *Experimental thermal and fluid science*, 57, pp. 261-74, 2014.
27. G. Continillo and W. A. Sirignano, "Counterflow spray combustion modeling," *Combustion and Flame*, 81, No. 3-4, 1990, pp. 325-40.
28. C. Panagopoulos, *Theoretical and Numerical Analysis of Laminar Ethanol Spray Flames for the creation of a Spray Flamelet Library*, Master Thesis, Mechanical Engineeringat, Delft University of Technology, 2017.

English Abstract

Numerical study of different flame regimes in the laminar counterflow spray

Morad havasi¹, Fathollah ommi^{2*} and Fatemeh chitgarha³

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

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

3- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, chitgarha.mech@gmail.com

*Corresponding author

(Received: 2020.05.11, Received in revised form: 2020.11.11, Accepted: 2020.12.21)

The two-dimensional numerical simulation of the spray flame formed in a laminar counterflow configuration has been performed to investigate flame regimes and its effect on changes in important species and radicals. Ethanol is used as a liquid spray fuel and the skeletal mechanism of ethanol/air with 40 species and 180 preliminary reactions is used for combustion reactions. The Sauter mean diameter of fuel droplets and randomly injected into the air inlet are considered using a UDF code, and the motion of the droplets is calculated using the Lagrangian approach. The results show that the predominant flame regime is Non-Premixed in the high equivalences ratio, high strain rates and large droplet diameters. Also, the combustion reactions are suppressed in the center areas of the flame, due to the reduction of the oxidant fraction and the OH mass fraction, and the flame index is zero, which indicates the internal group of droplets in this area.

Keywords: Configuration of Counter-flow, Spray Combustion, Laminar Flow, premixed, non-premixed