



## شناسایی ناحیه تشکیل احتراق گروه قطره به‌وسیله پارامتر شاخص شعله در شعله اسپری جریان متقابل آرام

مراد هواسی<sup>۱</sup>، فتح‌اله امی<sup>۲\*</sup>، فاطمه چیتگرها<sup>۳</sup> و زهیر صبوحی<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

<sup>۲</sup> استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

<sup>۳</sup> دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

<sup>۴</sup> استادیار، پژوهشگاه هوافضا، تهران، ایران

یادداشت تحقیقاتی، تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۵/۲۶؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۰۳/۱۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۶/۲۶

### چکیده

شبیه‌سازی عددی دوبعدی شعله اسپری در پیکربندی جریان متقابل آرام انجام شده و ناحیه تشکیل احتراق گروهی قطرات به‌وسیله پارامتر شاخص شعله برای نرخ کرنش، نسبت هم‌ارزی و قطر قطرات مختلف در نسبت هم‌ارزی‌های بالا تعیین شده است. از *n-decane* ( $C_{10}H_{22}$ )، به‌عنوان یک سوخت اسپری مایع استفاده شده و یک واکنش کلی یک مرحله‌ای برای مدل واکنش احتراق به کار گرفته شده است. قطرات سوخت به‌صورت تصادفی با استفاده از یک برنامه UDF در ورودی هوا تزریق می‌شوند و حرکت قطره با روش لاگرانژ محاسبه شده است. با توجه به نتایج در نسبت هم‌ارزی‌های بالا، نرخ کرنش‌های بالا و قطرهای بزرگ قطرات، دمای مرکز شعله به دلیل سرکوب شدن واکنش شیمیایی ناشی از کاهش کسر جرمی اکسیدکننده، افت پیدا می‌کند و رژیم غالب شعله در این حالت‌ها به‌صورت غیر پیش‌آمیخته است. احتراق گروه خارجی قطره در لایه بالا و پایین شعله رخ داده و احتراق گروه داخلی در مرکز شعله اتفاق می‌افتد.

**کلمات کلیدی:** پیکربندی جریان متقابل؛ احتراق اسپری؛ احتراق گروه قطره؛ شاخص شعله.

## Identification of the Droplet Group Combustion Formation Region by the Flame Index Parameter in the Laminar Counterflow Spray

M. havasi<sup>1</sup>, F. ommi<sup>2\*</sup>, F. chitgarha<sup>3</sup>, Z. Saboohi<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Masters, Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Moaref University, Tehran, Iran.

<sup>2</sup> Professor, Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Moaref University, Tehran, Iran.

<sup>3</sup> Ph.D, Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Moaref University, Tehran, Iran.

<sup>4</sup> Assistant Professor, Aerospace Research Institute, Tehran, Iran.

### Abstract

A two-dimensional numerical simulation of the spray flame has been carried out in a smooth counterflow configuration, and the region of formation of droplets group combustion by the flame index parameter for strain rate, equivalence ratio and the diameter of different droplets. *n-decane* ( $C_{10}H_{22}$ ) is used as a liquid spray fuel, and a one-step global reaction is employed for the combustion reaction model. Fuel droplets are randomly injected using an UDF code in the air inlet and the droplet motion is calculated by Lagrange method. According to the results, in the ratio of high ratios, high strain rates and large droplet diameters, The temperature of the flame center decreases due to the suppression of the chemical reactions resulting from the reduction of oxidizing fractionation, and the dominant flame regime in these states is diffusion. The external group combustion of droplets occurs in the upper and lower layers of flame, and combustion of the internal group occurs at the center of the flame.

**Keywords:** Configuration of Counterflow; Combustion Spray; Combustion Droplet Group; Flame Index.

## ۱- مقدمه

احتراق اسپری در تعدادی از کاربردهای مهندسی همچون تبدیل انرژی و تجهیزات نیروی محرکه به کار می‌رود؛ بنابراین لازم است، به‌طور دقیق رفتار احتراق اسپری در طراحی و اجرای تجهیزات پیش‌بینی شود. باین‌حال، از آنجایی که احتراق اسپری پدیده‌ای پیچیده است که در آن قطرات پراکنده سوخت مایع، تبخیر و واکنش‌های شیمیایی آن‌ها به‌طور متقابل در همان زمان رخ می‌دهد، فیزیک اساسی حاکم بر این فرآیندها به‌خوبی شناخته نشده است [۴-۱].

در زمینه احتراق اسپری کارهای زیادی به‌صورت عددی [۵-۸] و تجربی [۹ و ۱۰] انجام شده است. یکی از حالت‌های مهم که در نسبت هم‌ارزی‌های زیاد، نرخ کرنش‌های 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 چپو و لئو [۱۱] و چپو و همکاران [۱۲]، چهار حالت در احتراق گروهی قطرات در شعله‌های اسپری وجود دارد، یعنی (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 داخل گروه قطره ظاهر می‌شود (قطرات درون شعله گروه قطره فقط بخار می‌شوند و قطرات در بیرون شعله گروهی با شعله‌پوششی می‌سوزند) (۳) یک حالت احتراق گروه خارجی قطره که در آن شعله گروهی کل گروه قطره را در بر گرفته است (۴) حالت احتراق خارجی که در آن ناحیه غیر تبخیری (منطقه دمای پایین) داخل منطقه تبخیر گروه قطره یافت می‌شود. این حالت‌ها را می‌توان در شکل ۱ مشاهده کرد. از آن‌جا که احتراق اسپری یکی از مسائل مهم در شعله‌های اسپری است؛ به همین دلیل، مطالعات زیادی در این خصوص صورت گرفته است. در سال ۱۹۹۸ استایف و همکاران [۱۳] که یک مدل در مورد تعاملات پیچیده بین دینامیک سیالات، اندازه، فضا و توزیع زمان قطرات و همچنین شیمی احتراق در یک اسپری سوخت دیزل ارائه شده است. از یک مکانیسم سینتیک شیمیایی دومرحله‌ای کلی برای مدل‌سازی واکنش‌های احتراقی استفاده شده است؛ همچنین گروه قطرات با قطرهای

مختلف پاشیده می‌شوند. نتایج نشان می‌دهد که اثرات احتراق گروهی قطرات بر تمام جنبه‌های احتراق اسپری اثر غالب را دارد. در سال ۱۹۹۹ کاندل و همکاران [۱۴]، 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<sup>۱</sup> شکل می‌گیرد که با اکسیژن مایع و هیدروژن گاز تغذیه می‌شود. شعله ایجاد شده در این پیکربندی به‌طور گسترده با روش‌های تشخیص نوری و فن‌های پردازش تصویر مورد مطالعه قرار گرفته است. داده‌ها نشان می‌دهند که یک شعله بسیار متلاطم در اطراف قطرات متراکم شکسته شده تشکیل شده است که توسط هسته مایع ایجاد می‌شود. در سال ۲۰۰۵ ناکامورا و همکاران [۱۵]، با استفاده از شبیه‌سازی عددی مستقیم (DNS)<sup>۲</sup> در یک پیکربندی شعله جریان متقابل آرام رفتار احتراق گروه قطره را مورد بررسی قرار دادند. از *n-decane* به‌عنوان یک سوخت اسپری مایع استفاده شده و یک واکنش کلی یک مرحله‌ای برای مدل واکنش احتراق به کار گرفته شده است. نتایج آن‌ها نشان داد که احتراق گروه قطره در ناحیه غیر پیش‌آمیخته هوای احتراق به وجود می‌آید؛ همچنین احتراق گروه قطره باعث کاهش دمای گاز می‌شود. این مسئله عمدتاً توسط سرکوب واکنش احتراق ناشی از کمبود اکسیژن و تا حدی توسط تبادل انرژی از طریق انتقال حرارت جابجایی بین قطرات و فاز گازی ایجاد می‌شود. در سال ۲۰۱۴ اوراین و هاردالوپاس [۱۶] به مطالعه احتراق اسپری در پیکربندی جریان متقابل برای قطر قطرات ۱۲۵ و ۲۰۰ میکرومتر پرداختند و با محاسبه عدد احتراق گروهی به این نتیجه رسیدند که قطر قطره ۱۲۵ و ۲۰۰ میکرومتر رفتار متفاوتی در قبال احتراق گروهی قطرات دارند. در سال ۲۰۱۸ میکامی و همکاران [۱۷]، از یک روش نفوذی برای توصیف تحریک احتراق گروهی نا پایا مبتنی بر یافته‌های به‌دست‌آمده از آزمایش‌های میکرو گرانشی روی

<sup>1</sup> Injector Shear

<sup>2</sup> Direct Numerical Simulation

۲- مدل فیزیکی و معادلات حاکم بر روش عددی

۲-۱- معادلات ریاضی حاکم بر احتراق اسپری

معادلات حاکم در نظر گرفته شده بر فاز گازی عبارت‌اند از پیوستگی، مومنتم، انرژی و کسر جرمی گونه‌ها،

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

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

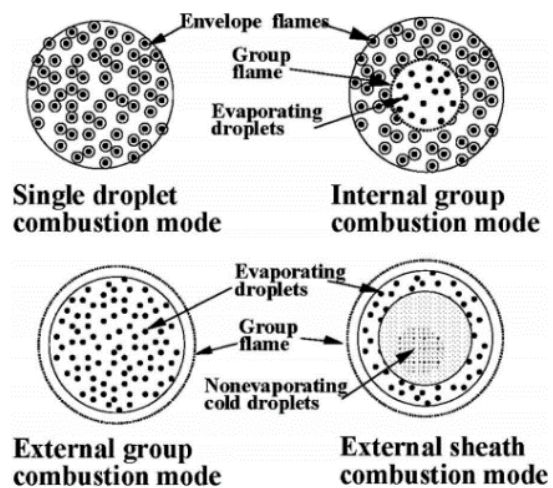
$$\frac{\partial (\rho h)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \rho u_j h - \rho \lambda \frac{\partial h}{\partial x_j} + \sum_{k=1}^n h_k (\rho \lambda - \rho D_k) \frac{\partial Y_k}{\partial x_j} \right] = S_h, \quad (3)$$

$$\frac{\partial (\rho Y_k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \rho u_j Y_k - \rho D_k \frac{\partial Y_k}{\partial x_j} \right) = S_{combu,k} + S_{Y_k}. \quad (4)$$

که در آن به ترتیب،  $u_i$  سرعت فاز گازی،  $\rho$  چگالی،  $\mu$  ویسکوزیته،  $P$  فشار استاتیک،  $g_i$  نیروی جاذبه،  $h$  آنتالپی کل،  $\lambda$  ضریب نفوذ گرمایی گاز  $h_k$ ،  $Y_k$  و  $D_k$  به ترتیب آنتالپی مخصوص، کسر جرمی و ضریب انتشار جرمی گونه  $k$ th است.  $\delta_{ij}$  تابع دلتای کرونکر<sup>۱</sup>،  $S_i$  نشان‌دهنده تعامل بین گاز و گام پراکنده بوده و  $S_{combu,k}$  عبارت منبع ناشی از احتراق است؛ همچنین  $\rho$  چگالی فاز گازی که از طریق معادله حالت برای گاز ایده‌آل محاسبه می‌شود [۲۰]، [۲۱].

دیدگاه اوپلر-لاگرانژ برای مدل‌سازی قطرات حاصل از جت سیال مورد استفاده قرار گرفته است که تنها قطرات سوخت به‌طور جداگانه به روش لاگرانژین دنبال می‌شوند. فرض بر این است که چگالی قطرات بسیار بیشتر از چگالی فاز پیوسته است و فقط کشش و شتاب جاذبه قابل توجه هستند. اثر برش سیال روی نیروی مایع وارد بر قطرات [۲۲] و [۲۳] نادیده گرفته می‌شود. علاوه بر این، تجزیه قطره، برخورد و اثرات ذرات متراکم [۲۴] و [۲۵] نادیده گرفته می‌شوند.

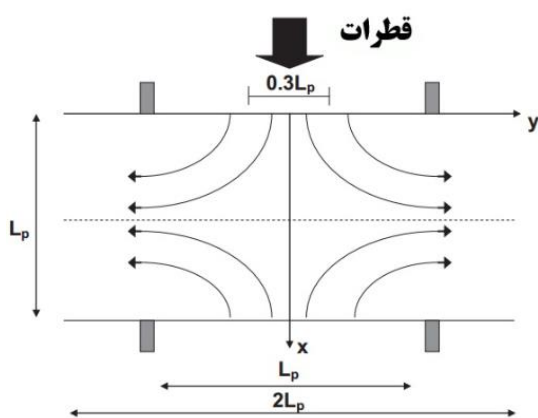
گسترش شعله‌ای از قطرات سوخت *n-decane* استفاده کردند. نتایج نشان داده که احتمال وقوع احتراق گروهی به شدت با افزایش فاصله متوسط بین قطرات کاهش می‌یابد که به‌عنوان متوسط فاصله قطره در نظر گرفته می‌شود. در سال ۲۰۱۹ فیتریانو و همکاران [۱۸]، یک مدل‌سازی عددی یک‌بعدی برای ارتباط تئوری بین آزمایش‌های احتراق قطرات بیودیزل و پدیده احتراق اسپری موتورهای دیزلی انجام شده است. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که احتمال وقوع احتراق گروه و رفتار شعله پخش شده تا حد زیادی با میانگین فاصله قطرات ارتباط دارد. در سال ۲۰۲۰ امین و روبرت [۱۹]، به بررسی تأثیر محیط احتراق در انتشار دوده در موتورهای دیزل و توربین‌های گازی پرداخته شده است. نتایج نشان می‌دهد که میانگین شعاع قطرات با فشار افزایش می‌یابد، درحالی‌که عدد چگالی ذرات اولیه به علت به هم آمیختگی قطرات کاهش می‌یابد؛ با توجه به اینکه شناسایی ناحیه تشکیل احتراق گروه قطره در شعله جریان متقابل آرام بخصوص در نسبت هم‌ارزی‌های بالا به‌طور دقیق روشن نشده است؛ در کار حاضر شبیه‌سازی عددی در یک جریان ساده برای مشخص کردن نواحی تشکیل احتراق گروه قطرات داخلی و خارجی در نسبت هم‌ارزی‌های بالا (نسبت هم‌ارزی ۵) به‌وسیله پارامتر شاخص شعله و بررسی تغییرات نمودارهای اکسیدکننده و کسر مخلوط، انجام شده است.



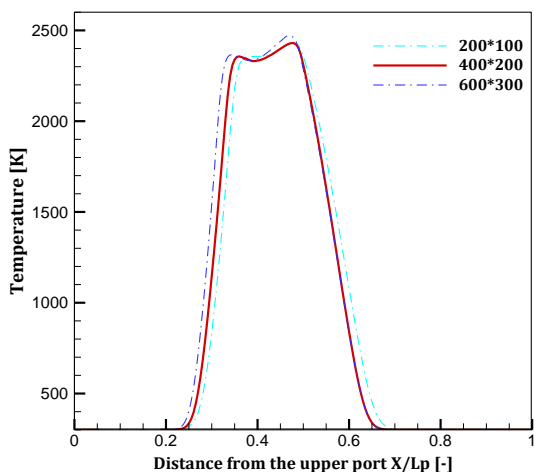
شکل ۱- حالت‌های احتراق گروهی قطرات [۱۲] [۱۱]

<sup>۱</sup> Kronecker

استفاده از الگوریتم *SIMPLE* حل می‌شوند. محدوده محاسبه  $0 \leq x \leq 1$  و  $-1 \leq y \leq 1$  بوده و با توجه به نتایج بررسی استقلال حل از شبکه محاسباتی که در شکل ۳ آورده شده است، به ترتیب در جهت  $x$  و  $y$  به  $200 \times 400$  سلول به‌طور مساوی تقسیم شده است. حل تمامی معادلات از روش مرتبه دوم بادسو<sup>۴</sup> انجام می‌شود. قطرات سوخت اتمیزه شده به‌صورت تصادفی با استفاده از کد UDF در محل  $-0.15 \leq y \leq 0.15$  درگاه بالایی پاشیده شده و صورت لاگرانژی دنبال می‌شوند.



شکل ۲- دامنه محاسباتی برای شبیه‌سازی عددی



شکل ۳- نمودار توزیع دما در نسبت هم ارزی ۱۰۲۶ جهت بررسی استقلال از شبکه محاسباتی

در مورد تبخیر قطرات از مدل تبخیر همرفت/ انتشار کنترل شده<sup>۱</sup> موجود در نرم‌افزار فلونت استفاده شده است که توسط روابط (۵-۷) محاسبه می‌شود:

$$\frac{dm_p}{dt} = A_p K_c \rho \ln(1 + B_m), \quad (5)$$

$$Sh_{AB} = \frac{K_c d_p}{D_{i,m}} = 2.0 + 0.6 Re_d^{1/2} Sc^{1/3}. \quad (6)$$

$$B_m = \frac{Y_{i,s} - Y_{i,\infty}}{1 - Y_{i,s}}. \quad (7)$$

که در اینجا  $m_p$  جرم قطره،  $K_c$  ضریب انتقال جرم،  $A_p$  مساحت سطح قطره،  $\rho$  چگالی گاز،  $B_m$  عدد جرم اسپالدینگ،  $D_{i,m}$  ضریب نفوذ بخار در سطح گسترده،  $Sc = \mu / \rho D_{i,m}$  عدد اشمیت،  $d_p$  قطر قطره،  $Y_{i,s}$  کسر جرمی بخار در سطح و  $Y_{i,\infty}$  کسر جرمی بخار در فضای گسترده گازی است [۲۶].

## ۲-۲- شرح میدان حل

شبیه‌سازی شعله‌های اسپری در یک پیکربندی جریان متقابل آرام با استفاده از نرم‌افزار فلونت انجام شده و روش حل با کار عددی واتانایب و همکاران [۱] صحه‌گذاری 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  $y$  می‌باشند. مبدأ دامنه در مرکز درگاه مشعل بالایی واقع شده است. از درگاه‌های بالا و پایین هوای اتمسفریک ( $T=300$  k،  $P=0.1013$  MPa و کسر جرمی اکسیژن  $Y_{O_2}=0.2357$ ) از محل  $-0.05 \leq y \leq 0.05$  وارد می‌شود و اسپری *n-decane* خالص در محل  $-0.15 \leq y \leq 0.15$  پاشیده می‌شود؛ همچنین سرعت جریان وارد شده از درگاه‌های بالا و پایین یکسان است [۱] [۲۷].

## ۲-۳- داده‌های محاسباتی

معادلات حاکم بر فاز گازی (معادلات (۱)-(۴)) به‌وسیله نرم‌افزار تجاری انسیس-فلونت<sup>۳</sup> با روش حجم محدود و با

<sup>1</sup> Convection/Diffusion Controlled

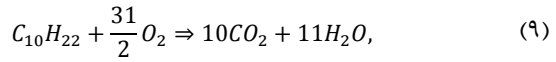
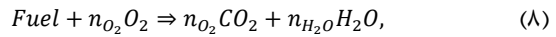
<sup>2</sup> Schmidt

<sup>3</sup> Ansys Fluent

<sup>4</sup> Second Order Upwind

که در آن  $n$  ضریب استوکیومتری مولی هرگونه است،  $A$  ضریب فرکانس،  $T$  دمای گاز،  $E$  انرژی فعال‌سازی است [۲۸]. حالت پایه و دیگر شرایط تأمین قطره و گاز مورد مطالعه در اینجا در جدول ۱ آورده شده است. نرخ کرنش به‌عنوان نسبت مجموع سرعت گاز ورودی  $u_0$  از درگاه بالا و پایین و فاصله بین درگاه بالا و پایین  $L_p$  ( $a = 2u_0/L_p$ ) تعریف می‌شود. نسبت هم ارزی به‌عنوان نسبت جرم کل قطرات و هوای صادرشده از درگاه بالا تعریف می‌شود. برای بررسی اثر

برای مدل واکنش احتراق، یک مدل واکنش کلی یک مرحله‌ای از  $n$ -decane [۲۸] اتخاذ می‌شود. در این مدل، واکنش به‌صورت زیر نشان داده می‌شود:



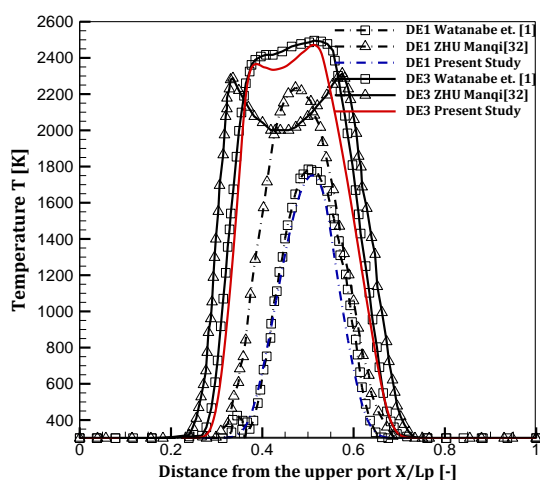
و ثابت واکنش‌های یک مرحله‌ای کلی،  $K_{ov}$  (mol/cm<sup>3</sup>/s) به‌صورت رابطه (۱۰) است:

$$k_{ov} = AT^n \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) [Fuel]^a [O_2]^b. \quad (10)$$

جدول ۱- حالت‌های محاسباتی و شرایط اولیه قطره

حالت	نرخ کرنش $a$ (S <sup>-1</sup> )	نسبت هم‌ارزی $\phi_1$ (-)	قطر متوسط ساوتر SMD ( $\mu$ m)	نرخ مومنتم M (-)
حالت پایه	DB	۵	۱۰۶۰۷	۲،۹۹۶
اثر نسبت هم‌ارزی	DE1	۰،۲۱	۱۰۶۰۷	۷۱،۳۳۷۷
	DE2	۰،۴۲		۳۵،۶۶۷۵
	DE3	۱		۱۴،۰۹۸
	DE4	۱،۲۶		۱۱،۰۸۸۹
	DE5	۳		۴،۹۹۳۳
	DE6(DB)	۵		۲،۹۹۶
اثر نرخ کرنش	DA1	۵	۱۰۶۰۷	
	DA2(DB)	۴۰		
	DA3	۶۰		
	DA4	۸۰		
اثر اندازه اولیه قطرات	DC1	۵	۳۰	
	DC2		۷۴،۲	
	DC3(DB)		۱۰۶۰۷	
	DC4		۱۳۷،۰۶	

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 [۳۲] هم که از مرجع [۱] برای صحنه‌گذاری بر روش حل استفاده کرده، به این نکته اشاره شده است. بعد از اطمینان از درست بودن روش حل، به بررسی نواحی تشکیل احتراق گروهی قطرات به وسیله پارامتر شاخص شعله، پرداخته شده است.



شکل ۴- مقایسه نمودار تغییرات دمای حاصل از شبیه‌سازی با مقاله مرجع برای نسبت هم‌ارزی‌های ۰/۴۲ و ۱/۲۶

#### ۴- نتایج و بحث

برای درک بهتر احتراق اسپری و شناسایی ناحیه احتراق گروه قطره، نیاز به شناخت پارامترهایی همچون کسر مخلوط [۳۰] و پارامتر شاخص شعله [۳۱] وجود دارد که به ترتیب از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$Z = \frac{sY_F - Y_O + Y_O^0}{sY_F^0 + Y_O^0} \quad (12)$$

$$F.I = \nabla Y_{C_{10}H_{22}} \cdot \nabla Y_{O_2} \quad (13)$$

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 غیر پیش‌آمیخته در

نسبت هم‌ارزی، محاسبات برای شش نسبت هم‌ارزی ۰/۲۱، ۰/۴۲، ۱، ۱/۲۶، ۳ و ۵ انجام می‌شود (به ترتیب موارد DE1، DE2، DE3، DE4، DE5 و DE6) و برای محاسبه نسبت مومنتم در نسبت هم‌ارزی‌های مختلف از رابطه (۱۱) استفاده می‌شود [۲۹]؛ همچنین محاسبات برای چهار نرخ کرنش ۲۰، ۴۰، ۶۰ و  $80 \text{ s}^{-1}$  انجام می‌شود (به ترتیب حالت‌های DA1، DA2، DA3 و DA4). علاوه بر این، برای بررسی اثر اندازه قطر اولیه قطره، محاسبات برای چهار قطر ۳۰، ۷۴/۲، ۱۰۶/۷ و ۱۳۷/۶ میکرومتر انجام می‌شود (به ترتیب موارد DC1، DC2، DC3 و DC4)؛ همچنین سرعت اولیه قطرات برابر با همان سرعت جریان هوا است. عدد رینولدز بر اساس 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 پایین فقط هوا وارد می‌شود، بنابراین می‌توان گفت که یک نمونه واقعی از احتراق اسپری مورد بررسی قرار می‌گیرد [۱].

$$M = \frac{\dot{m}_{gas} V_{gas}}{\dot{m}_{liq} V_{liq}} \quad (11)$$

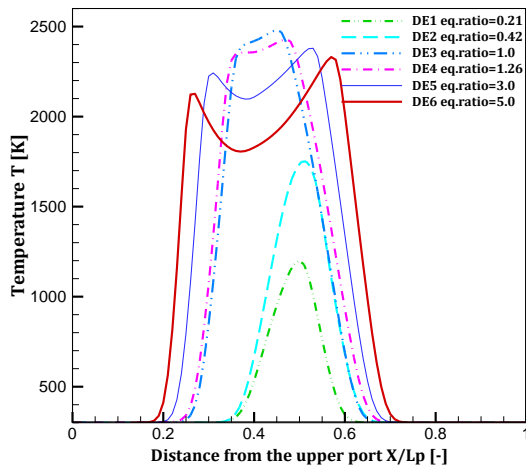
#### ۳- صحنه‌گذاری

جهت انجام شبیه‌سازی‌های حل عددی از نرم‌افزار تجاری فلوئنت استفاده شده و به منظور صحنه‌گذاری<sup>۱</sup>، نتایج مدل‌سازی این نرم‌افزار با داده‌های منتشرشده در یک مقاله معتبر مقایسه شده است. نتایج اعتبارسنجی در ادامه بیان شده است.

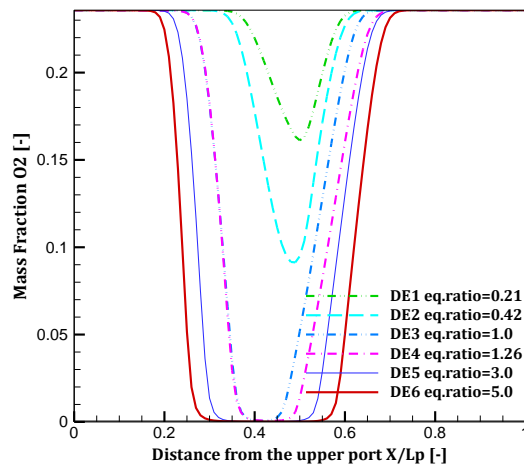
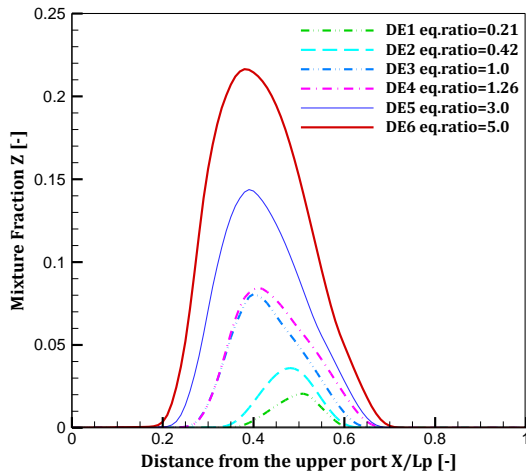
#### ۳-۱- اعتبارسنجی روش حل عددی

در کار حاضر ابتدا روش حل با نتایج عددی واتانایب و همکاران [۱] صحت سنجی می‌شود، برای این کار شبیه‌سازی در دو نسبت هم‌ارزی ۰/۴۲ و ۱/۲۶ به ترتیب برای حالت‌های DE2 و DE4 انجام شد که در جدول ۱ آورده شده است که نتایج شبیه‌سازی و مقاله مورد نظر را می‌توان در شکل ۴ مشاهده کرد، همان‌طور که مشاهده می‌شود، نتایج شبیه‌سازی تطابق خوبی با نتایج کار عددی واتانایب و همکاران دارد؛ خطای جزئی که در قسمت ماکزیمم دما

<sup>۱</sup> Validation



شکل ۵- نمودار توزیع دما برای نسبت هم‌ارزی‌های مختلف



شکل ۶- نمودار تغییرات کسر مخلوط و کسر جرمی O<sub>2</sub> در نسبت هم‌ارزی‌های مختلف؛ الف) کسر مخلوط و ب) کسر جرمی O<sub>2</sub>

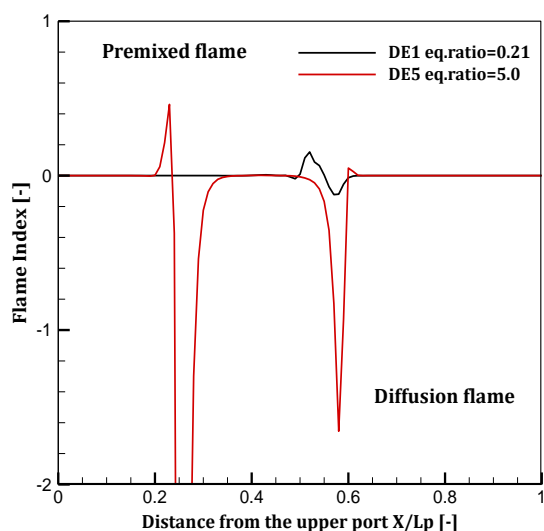
آن قرار دارند، F.I. برای شعله پیش‌آمیخته مثبت است و برای شعله غیر پیش‌آمیخته منفی است [۱۵].

#### ۴-۱- اثر نسبت هم‌ارزی

محاسبات برای شش نسبت هم‌ارزی مختلف ۰/۲۱، ۰/۴۲، ۱، ۱/۲۶، ۳ و ۵ به ترتیب برای حالت‌های DE1، DE2، DE3، DE4، DE5 و DE6 که در جدول ۱ آورده شده است، انجام شد. برای همه حالت‌ها نرخ کرنش  $a$ ،  $40 (s^{-1})$  و قطر قطرات SMD،  $106.7$  میکرومتر است. در شعله‌های اسپری برای نسبت هم‌ارزی‌های بالا دو ناحیه احتراق داریم، ناحیه پیش‌آمیخته و غیر پیش‌آمیخته که شاخص شعله مناطقی را شناسایی می‌کند که شعله‌های پیش‌آمیخته و شعله‌های غیر پیش‌آمیخته در آن قرار دارند، F.I. برای شعله پیش‌آمیخته مثبت است و برای شعله غیر پیش‌آمیخته منفی است (شکل ۷) که احتراق گروه قطره طبق [۱۵] در ناحیه غیر پیش‌آمیخته شکل می‌گیرد. ناحیه غیر پیش‌آمیخته خود متشکل از دو ناحیه است، تعدادی از قطرات در لایه بالا و پایین شعله به‌وسیله شعله خارجی محترق شده و دسته قطرات بین لایه بالایی و پایینی شعله فقط بخار می‌شوند [۱۱]، [۱۲]؛ زیرا در مقادیر زیاد نسبت هم‌ارزی، به دلیل تجمع زیاد قطرات در ناحیه مرکز شعله بعد از تبخیر قطرات اکسیدکننده کافی برای شکل‌گیری احتراق وجود ندارد، بنابراین دمای مرکز شعله کاهش می‌یابد (شکل ۵)؛ تصور می‌شود که این رفتار اساساً با سرکوب واکنش احتراقی ناشی از اثر خنک‌کننده مرتبط با احتراق گروه قطره و تا حدی با تبادل انرژی بین قطرات و فاز گازی، اتفاق می‌افتد؛ زیرا با افزایش کسر مخلوط، مقدار کسر جرمی اکسیدکننده در مرکز شعله به‌واسطه واکنش احتراقی در محدوده  $x/L_p = 0.05 - 0.3$  به صفر می‌رسد (شکل ۶) و به همین دلیل واکنش احتراقی سرکوب می‌شود و دمای مرکز شعله افت پیدا می‌کند. پدیده‌ای که در آن قطرات سوخت دمای گاز را کاهش می‌دهد، اثر خنک‌کننده یا احتراق گروه داخلی قطره نامیده می‌شود [۱۵] و [۳۳].

همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود؛ در نسبت هم‌ارزی‌های زیاد، بخش عمده شعله به‌صورت غیر پیش‌آمیخته بوده و رژیم غیر پیش‌آمیخته در نسبت هم‌ارزی‌های زیاد شامل دو ناحیه است، دسته‌ای از قطرات

حالت‌های DA1، DA2، DA3 و DA4 انجام شد که در جدول ۱ آورده شده است. برای همه حالت‌ها قطر قطرات SMD،  $106/7$  میکرومتر و نسبت هم‌ارزی، ۵ است. شکل ۹ توزیع

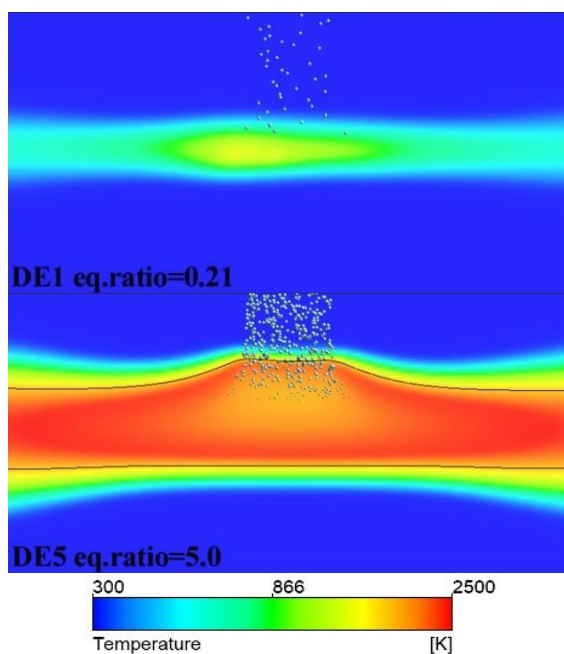


شکل ۷- نمودار شاخص شعله برای نسبت هم‌ارزی‌های مختلف

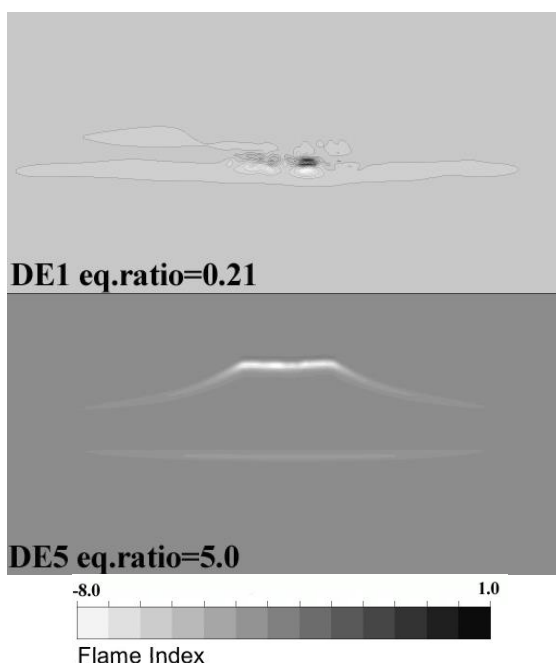
به صورت گروهی در لایه بالایی شعله سوخته شده و تعدادی هم به لایه زیرین شعله نفوذ کرده و آنجا در حضور اکسیدکننده وارد شده از درگاه پایین، محترق می‌شوند، یعنی احتراق گروه خارجی قطره در دو ناحیه بالا و پایین شعله اتفاق می‌افتد [۱۱]، [۱۲]؛ همچنین به دلیل افزایش کسر مخلوط سوخت و هوا در مرکز شعله و صفر شدن مقدار اکسیدکننده در محدوده  $x/L_p = 0.3 - 0.55$  (شکل ۶)، مقدار شاخص شعله F.I که حاصل ضرب عددی گرادیان کسر جرمی سوخت و اکسیدکننده است، در ناحیه مرکز شعله صفر شده است؛ همان‌طور که در شکل ۸ (الف) نشان داده شده است، قسمت‌های سفیدرنگ نشان‌دهنده ناحیه غیر پیش‌آمیخته می‌باشند که احتراق گروه خارجی قطره در این ناحیه شکل می‌گیرد و ناحیه بین قسمت‌های سفیدرنگ نشان‌دهنده محل تشکیل احتراق گروه داخلی قطرات است [۱۱]، [۱۲].

#### ۴-۲- اثر نرخ کرنش

اثر تغییرات نرخ کرنش با انجام محاسبات برای چهار نرخ کرنش مختلف ۲۰، ۴۰، ۶۰ و  $80 S^{-1}$  به ترتیب برای



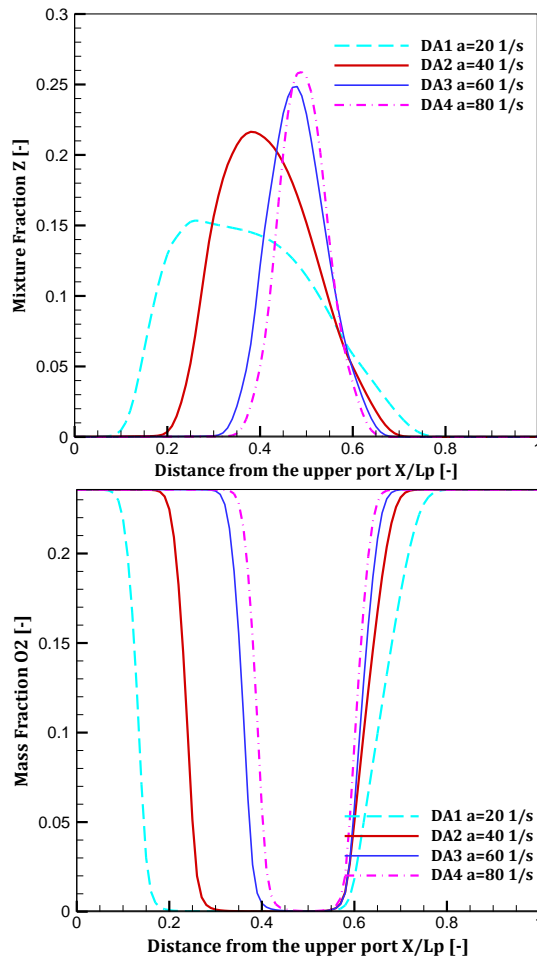
(ب)



(الف)

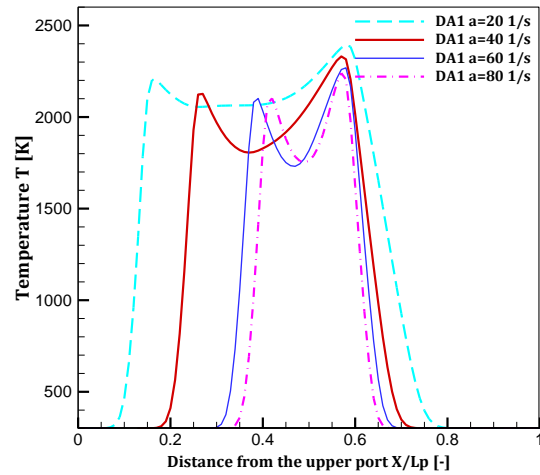
شکل ۸- توزیع لحظه‌ای دما و رژیم شعله در نسبت هم‌ارزی‌های مختلف؛ (الف) شاخص شعله و (ب) دمای شعله





شکل ۱۰- نمودار تغییرات کسر مخلوط و کسر جرمی O<sub>2</sub> در نرخ کرنش‌های مختلف؛ الف) کسر مخلوط و ب) کسر جرمی O<sub>2</sub>

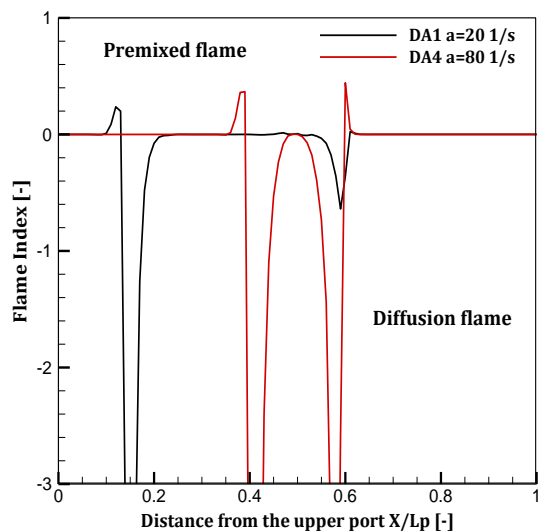
در شکل ۱۱ نمودار شاخص شعله F.I برای دو نرخ کرنش ۲۰ و  $80 \text{ s}^{-1}$  ترسیم شده است؛ همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش نرخ کرنش از پهنای ناحیه رژیم غیر پیش‌آمیخته کاسته می‌شود (محدوده بین قسمت‌های سفیدرنگ در شکل ۱۲ الف))، گروهی از قطرات به دلیل وجود اکسیدکننده کافی در لایه بالایی شعله محترق می‌شوند و تعدادی از قطرات به لایه پایینی شعله نفوذ کرده و آن‌جا در حضور اکسیدکننده وارد شده از درگاه پایین، محترق می‌شوند که به این حالت احتراق گروه خارجی قطره گفته می‌شود (قسمت‌های سفیدرنگ در شکل ۱۲ الف)) [۱۱]، [۱۲]؛ همچنین به دلیل سرعت بالای قطرات و کند شدن تبخیر در نرخ کرنش‌های بالا، کسر جرمی سوخت در



شکل ۹- نمودار توزیع دما برای نرخ کرنش‌های مختلف

محوری دما  $T$  را برای نرخ کرنش‌های مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش نرخ کرنش افت دمای مرکز شعله بیشتر شده و پهنای شعله کمتر می‌شود و به سمت درگاه پایین حرکت می‌کند؛ زیرا با افزایش نرخ کرنش سرعت اولیه هوا و قطرات ورودی افزایش پیدا می‌کند و موجب می‌شود که تجمع قطرات در یک‌لایه از مرکز شعله افزایش یابد؛ در نرخ کرنش‌های بالا، به دلیل تجمع زیاد قطرات در ناحیه مرکز شعله بعد از تبخیر قطرات اکسیدکننده کافی برای شکل‌گیری احتراق وجود ندارد و احتراق شکل نمی‌گیرد، بنابراین دمای مرکز شعله کاهش می‌یابد (شکل ۹)، همچنین عدد شاخص شعله F.I در ناحیه تشکیل شعله دارای مقدار منفی و یا صفر است که نشان‌دهنده احتراق غیر پیش‌آمیخته است. تصور می‌شود که این رفتار اساساً با سرکوب واکنش احتراقی ناشی از اثر خنک‌کننده مرتبط با احتراق گروه قطره و تا حدی با تبادل انرژی بین قطرات و فاز گازی، اتفاق می‌افتد؛ زیرا با افزایش کسر مخلوط، مقدار کسر جرمی اکسیدکننده در مرکز شعله به واسطه واکنش احتراقی در محدوده  $0.042 - 0.058$   $x/L_p$  به صفر می‌رسد (شکل ۱۰) و به همین دلیل واکنش احتراقی سرکوب می‌شود و دمای مرکز شعله افت پیدا می‌کند. پدیده‌ای که در آن قطرات سوخت دمای گاز را کاهش می‌دهد، اثر خنک‌کننده یا احتراق گروه داخلی قطره نامیده می‌شود [۱۵]، [۳۳].

کمتری هستند و سرعت تبخیر آن‌ها زیاد است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش قطر قطرات اینرسی قطرات افزایش‌یافته و سرعت تبخیر آن‌ها کاهش می‌یابد [۳۱]؛ به همین دلیل حداکثر دمای شعله در فاصله دورتری از درگاه

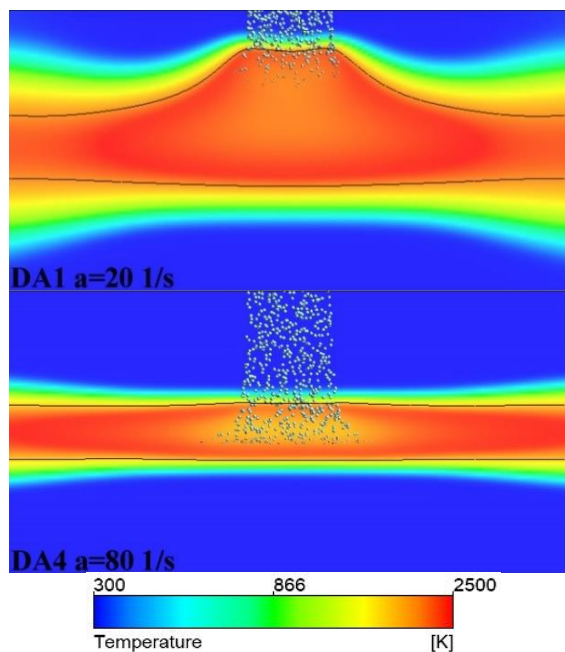


شکل ۱۱- نمودار شاخص شعله برای نرخ کرنش‌های مختلف

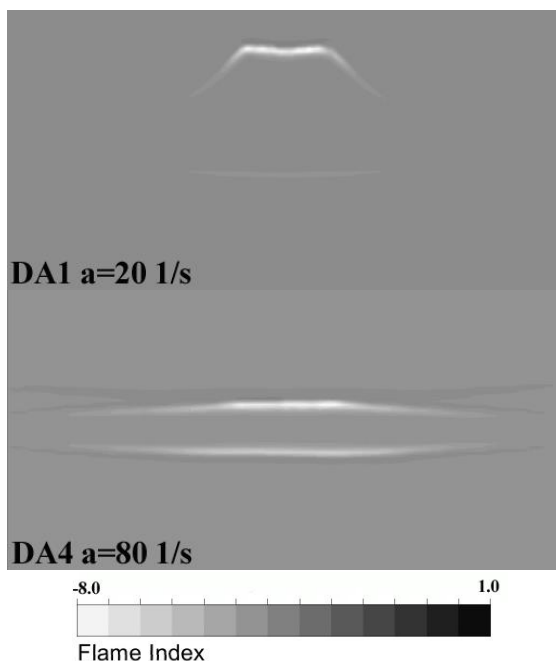
مرکز شعله افزایش پیدا می‌کند و به دلیل مصرف شدن تمام کسر جرمی اکسیدکننده به وسیله واکنش احتراقی در این ناحیه، مقدار شاخص شعله در مرکز شعله صفر می‌شود؛ زیرا شاخص شعله حاصل ضرب عددی گرادیان سوخت و اکسیدکننده است که در این ناحیه احتراق گروه داخلی قطرات یا همان سرمایش در احتراق شکل می‌گیرد [۱۵] و [۳۳].

#### ۳-۴- اثر قطر قطرات

اثر توزیع اندازه اولیه قطرات با انجام محاسبات برای چهار قطر قطره مختلف ۳۰، ۷۴/۲، ۱۰۶/۷ و ۱۳۷/۶ میکرومتر به ترتیب برای حالت‌های DC1، DC2، DC3 و DC4 انجام شد که در جدول ۱ آورده شده است. برای همه حالت‌ها نرخ کرنش  $a$ ،  $20 \text{ s}^{-1}$  و نسبت هم‌ارزی  $\phi_1$ ، ۵ است. شکل ۱۳ توزیع محوری دما  $T$ ، را برای قطرهای مختلف قطره نشان می‌دهد. برای حالت DC4 با SMD بزرگ‌تر احتراق اسپری سوخت در مقایسه با حالت DB (حالت پایه) تأخیر دارد. هنگامی که SMD کاهش می‌یابد، نقطه اشتعال به سمت درگاه بالا تغییر می‌کند؛ زیرا قطرات کوچک‌تر دارای اینرسی

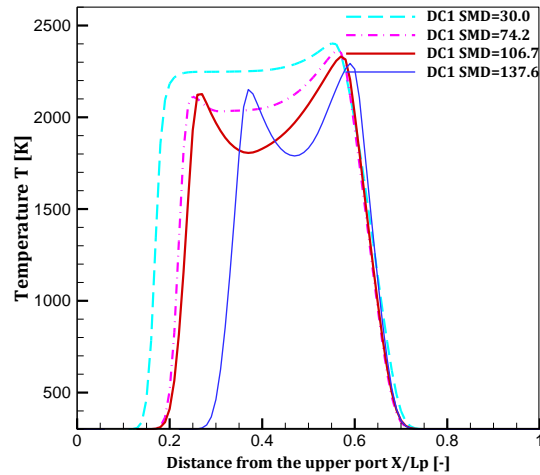
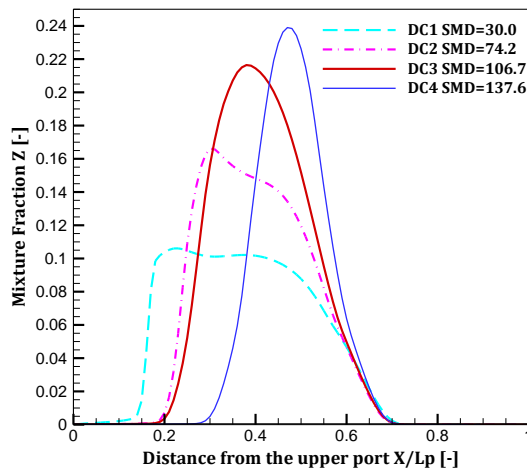


(ب)

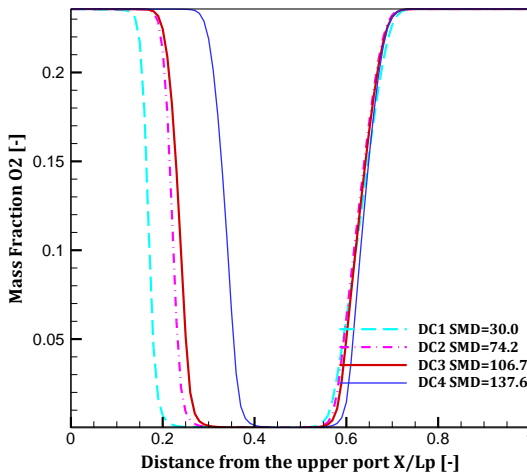


(الف)

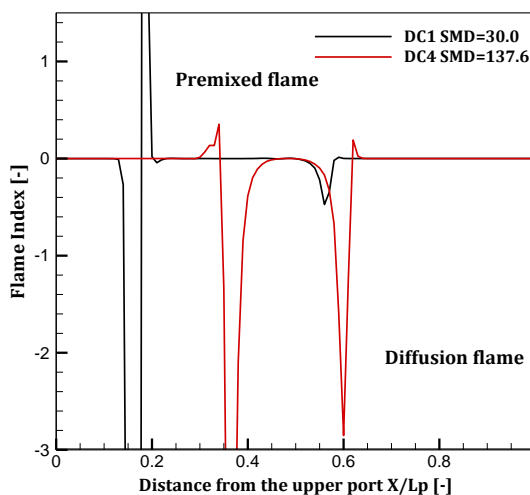
شکل ۱۲- توزیع لحظه‌ای دما و رژیم شعله در نرخ کرنش‌های مختلف؛ (الف) شاخص شعله و (ب) دمای شعله



شکل ۱۳- نمودار توزیع دما برای قطر قطرات مختلف



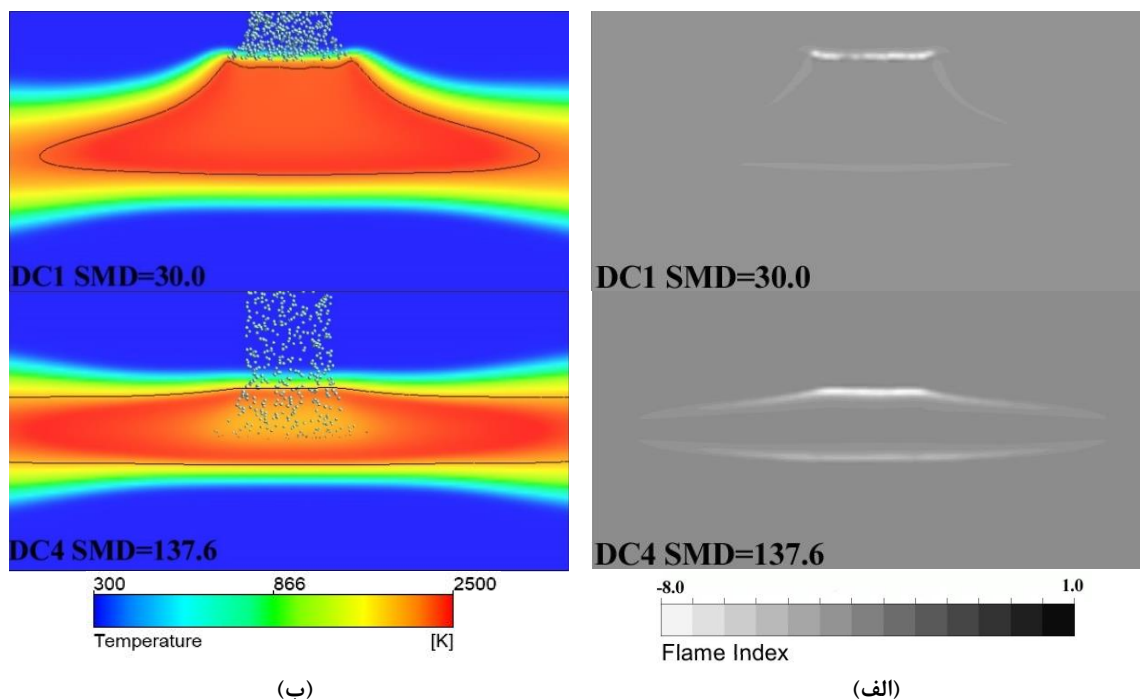
شکل ۱۴- نمودار تغییرات کسر مخلوط و کسر جرمی O<sub>2</sub> در قطر قطرات مختلف؛ الف) کسر مخلوط و ب) کسر جرمی O<sub>2</sub>



شکل ۱۵- نمودار شاخص شعله برای قطر قطرات مختلف

بالایی شکل می‌گیرد و محدوده منطقه دمابالا از  $x/L_p = 0.1 - 0.77$  به  $x/L_p = 0.3 - 0.65$  منتقل می‌شود. در این محدوده عدد شاخص شعله F.I دارای مقدار منفی و یا صفر است که نشان‌دهنده محدوده احتراق گروهی قطرات است؛ زیرا در این ناحیه کسر مخلوط سوخت و هوا به دلیل تجمع قطرات افزایش می‌یابد و به دلیل صفر شدن اکسیدکننده در محدوده  $x/L_p = 0.4 - 0.6$  (شکل ۱۴) قطرات فقط تبخیر می‌شوند و واکنش احتراقی سرکوب می‌شود، بنابراین در این ناحیه احتراق شکل نمی‌گیرد و دمای مرکز شعله کاهش می‌یابد که این حالت را احتراق گروه قطره داخلی یا سرمایش در احتراق می‌نامند [۱۵ و ۳۳].

در شکل ۱۵ نمودار شاخص شعله F.I برای دو قطر قطره ۳۰ و ۱۳۷/۶ میکرومتر ترسیم شده است؛ همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش قطر قطرات پهنای ناحیه رژیم غیر پیش‌آمیخته به دلیل اینرسی بالای قطرات کمتر می‌شود (ناحیه بین قسمت‌های سفیدرنگ در شکل ۱۶ الف)؛ در این محدوده گروهی از قطرات در لایه بالایی شعله به دلیل حضور اکسیدکننده کافی، محترق می‌شوند و تعدادی از قطرات هم به لایه زیرین شعله نفوذ کرده و آنجا در حضور اکسیدکننده وارد شده از درگاه پایین محترق می‌شوند که به این حالت احتراق گروه خارجی قطرات گفته می‌شود [۱۱]، [۱۲]. در قطر قطرات بالا به دلیل اینرسی بالای قطرات و کند شدن سرعت تبخیر [۳۴]، کسر جرمی سوخت در مرکز شعله افزایش پیدا کرده و به دلیل مصرف شدن تمام کسر جرمی



شکل ۱۶- توزیع لحظه‌ای دما و رژیم شعله در قطر قطرات مختلف؛ الف) شاخص شعله و ب) دمای شعله

فقط تبخیر شده و محترق نمی‌شوند؛ همچنین رژیم شعله در محدوده‌ای که مقدار کسر مخلوط افزایش پیدا می‌کند، به صورت غیر پیش‌آمیخته است. به دلیل وجود اکسیدکننده کافی در ناحیه بالا و پایین شعله، گروهی از قطرات در لایه بالایی شعله محترق شده و تعدادی از قطرات هم به لایه پایین شعله نفوذ کرده و در آنجا به دلیل اکسیدکننده کافی که از درگاه پایین وارد می‌شود محترق می‌شوند که در این دو ناحیه به دلیل اینکه قطرات به وسیله شعله خارجی محترق می‌گردند، احتراق گروه خارجی قطرات نامیده می‌شود.

با توجه به اینکه مقدار پارامتر شاخص شعله حاصل ضرب عددی گرادیان سوخت و اکسیدکننده است، به همین دلیل در نسبت هم‌ارزی‌های زیاد، نرخ کرنش‌های بالا و قطر قطرات بزرگ در مرکز شعله به دلیل تجمع زیاد قطرات و صفر بودن مقدار کسر جرمی اکسیدکننده در مرکز شعله، مقدار پارامتر شاخص شعله صفر می‌شود.

با توجه به مطالعه عددی حاضر، قطرات در ناحیه مرکز شعله فقط تبخیر می‌شوند و احتراق شکل نمی‌گیرد؛ بنابراین احتراق گروه داخلی قطره یا همان سرمایه‌ی احتراق در ناحیه

اکسیدکننده به وسیله واکنش‌های احتراقی در این ناحیه، مقدار شاخص شعله در مرکز شعله صفر می‌شود؛ زیرا شاخص شعله حاصل ضرب عددی گرادیان سوخت و اکسیدکننده است که به این حالت احتراق گروه داخلی قطرات یا سرمایه‌ی در احتراق گفته می‌شود [۱۵ و ۳۳].

### ۵- نتیجه‌گیری

شبیه‌سازی عددی دوبعدی در پیکربندی شعله اسپری جریان متقابل آرام، به منظور شناسایی ناحیه تشکیل احتراق گروهی قطرات؛ برای نسبت هم‌ارزی‌ها، نرخ کرنش‌ها و قطر قطره‌های مختلف انجام شد. نتایج اصلی به دست آمده در این مطالعه می‌تواند به شرح زیر خلاصه شود.

برای نسبت هم‌ارزی‌های زیاد، نرخ کرنش‌های بالا و قطر قطرات بزرگ مشاهده شد که با افزایش هرکدام کسر مخلوط در ناحیه مرکز شعله افزایش می‌یابد و تمام اکسیدکننده به وسیله واکنش احتراقی در این ناحیه مصرف می‌شود و دمای شعله در این ناحیه کاهش پیدا می‌کند؛ زیرا واکنش احتراقی در ناحیه مرکز شعله به دلیل صفر شدن مقدار اکسیدکننده، سرکوب می‌شود؛ یعنی در این ناحیه قطرات

ضریب نفوذ گرمایی گاز ( $m^2/s$ )	$\lambda$	مرکز شعله درجایی که مقدار پارامتر شاخص شعله صفر می‌شود، شکل می‌گیرد.
دلتای کرونکر	$\delta$	
ترم تنش	$\sigma$	
هدایت	$c$	
قطره	$p$	
کسر مخلوط	$Z$	
جرم	$m$	
		<b>۶- تشکر و قدردانی</b>
		در اینجا بر خود لازم می‌دانم که از راهنمایی‌های ارزشمند مهندس محمد صفر زاده کمال تشکر و قدردانی را داشته باشم.
		<b>۷- علائم و نشانه‌ها</b>
		<b>علائم انگلیسی</b>
		$T$ دما (k)
		$A$ مساحت ( $m^2$ )
		$p$ فشار (MPa)
		$h$ آنتالپی کل (J)
		$u$ سرعت فاز گازی (m/s)
		$S$ ترم منبع
		$Re$ عدد رینولدز
		$Sc$ عدد اشمیت
		$D$ ضریب کسر مخلوط
		$K$ ضریب انتقال جرم (J/K)
		$B$ عدد جرم اسپالدینگ
		$g$ نیروی جاذبه ( $m/s^2$ )
		<b>علائم یونانی</b>
		$\rho$ چگالی، ( $kg/m^3$ )
		$\mu$ ویسکوزیته ( $kg/m.s$ )
		<b>۸- مراجع</b>
[1] Watanabe H, Kurose R, Hwang SM, Akamatsu F (2007) Characteristics of flamelets in spray flames formed in a laminar counterflow. Combust Flame 148(4): 234-248.		
[2] Saboohi Z, Ommi F, Fakhrtabatabaei A (2016) Development of an augmented conceptual design tool for aircraft gas turbine combustors. Int J Multiphys 10(1): 53-73.		
[3] Saboohi Z, Ommi F (2017) Emission prediction in conceptual design of the aircraft engines using augmented CRN. Aeronaut J 121(1241): 1005-1028.		
[4] Saboohi Z, Ommi F, Akbari MJ (2019) Multi-objective optimization approach toward conceptual design of gas turbine combustor. Appl Therm Eng 148: 1210-1223.		
[5] Watanabe H, Kurose R, Komori S, Pitsch H (2008) Effects of radiation on spray flame characteristics and soot formation. Combust Flame 152: 2-13.		
[6] Hayashi J, Watanabe H, Kurose R, Akamatsu F (2011) Effects of fuel droplet size on soot formation in spray flames formed in a laminar counterflow. Combust Flame 158(12): 2559-2568.		
[7] Hayashi J, Fukui J, Akamatsu F (2013) Effects of fuel droplet size distribution on soot formation in spray flames formed in a laminar counterflow. Proc Combust Inst 34(1): 1561-1568.		
[8] Alviso D, Rolon JC, Scouflaire P, Darabiha N (2015) Experimental and numerical studies of biodiesel combustion mechanisms using a laminar counterflow spray premixed flame. Fuel 153: 154-165.		

- [20] Pitsch H (2000) Unsteady flamelet modeling of differential diffusion in turbulent jet diffusion flames. *Combust Flame* 123(3): 358-374.
- [21] Pitsch H, Peters N (1998) A consistent flamelet formulation for non-premixed combustion considering differential diffusion effects. *Combust Flame* 114(1-2): 26-40.
- [22] Komori S (1999) Drag and lift forces on a rotating sphere in a linear shear flow. *J Fluid Mech* 384: 183-206.
- [23] Kurose R, Misumi R, Komori S (2001) Drag and lift forces acting on a spherical bubble in a linear shear flow. *Int J Multiphas Flow* 27: 1247-1258.
- [24] Apte BSV, Mahesh K, Lundgren T (2003) A Eulerian-Lagrangian model to simulate two-phase / particulate flows. Minnesota Univ Minneapolis.
- [25] Spray FIN (1986) High temperature gasdynamics laboratory department of mechanical engineering stanford university.
- [26] ANSYS Fluent Theory Guide. no. January, 2017.
- [27] Watanabe H, Kurose R, Hwang SM, Akamatsu F (2007) Characteristics of flamelets in spray flames formed in a laminar counterflow. *Combust Flame* 148(4): 234-248.
- [28] Westbrook CK, Dryer FL (1984) Chemical kinetic modeling of hydrocarbon combustion. *Prog Energy Combust Sci* 10(1): 1-57.
- [29] Son M, Yu K, Koo J, Kwon OC, Kim JS (2015) Effects of momentum ratio and weber number on spray half angles of liquid controlled pintle injector. *J Therm Sci* 24(1): 37-43.
- [30] Turns SR (1996) An introduction to combustion. Vol. 499. McGraw-hill, New York.
- [31] Yamashita H, Shimada M, Takeno T (1996) A numerical study on flame stability at the transition point of jet diffusion flames. In Symposium (International) on Combustion 27-34.
- [32] Manqi Z (2010) Diphasic counterflow flame: Parametric study. Internship at CERFACS Toulouse, France.
- [33] Kurose R (2004) CTR annual research briefs-2004. *Cent Turbul Res*.
- [۳۴] جواد خادم (۱۳۸۴) بررسی اثرات متقابل قطره سوخت با هوای داغ در محفظه احتراق. اولین کنفرانس احتراق ایران، تهران، دانشگاه تربیت مدرس.
- [9] Mikami M, Oyagi H, Kojima N, Wakashima Y, Kikuchi M, Yoda S (2006) Microgravity experiments on flame spread along fuel-droplet arrays at high temperatures. *Combust Flame* 146(3): 391-406.
- [10] Mikami M, Mizuta Y, Tsuchida Y, Kojima N (2009) Flame structure and stabilization of lean-premixed sprays in a counterflow with low-volatility fuel. *Proc Combust Inst* 32(2): 2223-2230.
- [11] Chiu HH, Liu TM (1977) Group combustion of liquid droplets. *Combust Sci Technol* 17(3-4): 127-142.
- [12] Chiu HH, Kim HY, Croke EJ (1982) Internal group combustion of liquid droplets. *Symp Combust* 19(1): 971-980.
- [13] Ag D (1998) A group combustion model for treating reactive sprays IN I. C. engines. 1857-1864.
- [14] Candel S, Lacas F, Darabiha N, Rolon JC (1999) Group combustion in spray flames. *Multiph Sci Technol* 11(1).
- [15] Nakamura M, Akamatsu F, Kurose R, Katsuki M (2005) Combustion mechanism of liquid fuel spray in a gaseous flame. *Phys Fluids* 17(12): 1-14.
- [16] Orain M, Hardalupas Y (2014) Droplet characteristics and local equivalence ratio of reacting mixture in spray counterflow flames. *Exp Therm Fluid Sci* 57: 261-274.
- [17] Mikami M, Saputro H, Seo T, Oyagi H (2018) Flame spread and group-combustion excitation in randomly distributed droplet clouds with low-volatility fuel near the excitation limit: A percolation approach based on flame-spread characteristics in microgravity. *Microgravity Sci Tec*.
- [18] Fitriana L, Saputro H, Dewi AC, Setiawan AB, Bugis H (2019) Two-dimensional mathematical modeling of flame spread behavior of biodiesel droplet through the percolation approach. *Aip Conf Proc* 2194(1): 20029.
- [19] Amin HMF, Roberts WL (2020) Investigating soot parameters in an ethane/air counterflow diffusion flame at elevated pressures. *Combust Sci Technol* 1-16.