ماهنامه علمى پژوهشى



مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بررسی عددی تاثیر اندازه قطر قطرهی سوخت مایع در احتراق در یک هندسهی دو بعدی متقارن محوری

توحيد خاکزند¹، رامين کوهيکمالي^{2*}، جواد محمودي مهر³

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت

2– دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت

3– استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت

* رشت، صندوق پستى 3756، kouhikamali@guilan.ac.ir

چکیدہ	اطلاعات مقاله
پاشش سوخت و تبخیر آن نقش بسیار مهمی در بسیاری از فرآیندهای احتراقی در صنعت مانند صنایع حمل و نقل، صنایع نظامی، نیروگاهها و کورهها دارد. کار حاضر بر روی تاثیر قطر قطرهی سوخت مایع بر ویژگیهای محفظه احتراق و تشکیل آلایندهها مانند مونواکسید کربن و ناکس در یک محفظه احتراق دوبعدی متقارن محوری تمرکز کرده است. برای شبیهسازی سیستم احتراقی از روش مدل فاز گسسته استفاده شده است	مقاله پژوهشی کامل دریافت: 11 آذر 1395 پذیرش: 22 دی 1395 ارائه در سایت: 13 بهمن 1395
— که مبنای این روش بر پایه یروش اویلری-لاگرانژی است. در این مدل فاز پیوسته به صورت اویلری و فاز گسسته به صورت لاگرانژی شبیه- این مدن به منه می منابط توری مدیر مدیر ایسا ادا فریط میا میا ما ما میاند. مد آز زمین تا طویل سال می میاند.	کلید واژگان: امارین
سازی می شوند. برهم دنش بین فازها و نشعشع در شبیه سازی لخاط شده است. احتراق با مدل عیر پیش امیخته و نابع احتمال چکالی شبیه سازی شده است. برای معادلات آشفتگی از مدل کی⊣لیسیلون استفاده شده است. با تغییر در قطر قطرات سوخت تاثیر این عامل در دمای محفظه	اندازه فطرات اسپری سوخت
احتراق و همچنین تولید آلایندهها از جمله ناکس و مونواکسید کربن مورد بررسی قرار می گیرد. با توجه به نتایج به دست آمده قطرات کوچک	شبیهسازی عددی
ناکس بیشتری در مقایسه با قطرات بزرگتر تولید میکنند. همچنین قطرات بزرگتر مونواکسید کربن بیشتری نسبت به قطرات کوچکتر تولید کردهاند.	احتراق

Numerical investigation of the effect of a liquid fuel droplet diameter in combustion in a 2-D axisymmetric geometry

Tohid Khakzand, Ramin Kouhikamali^{*}, Javad Mahmoudimehr

Department of Mechanical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran * P.O.B. 3756, Rasht, Iran, kouhikamali@guilan.ac.ir

ARTICLE INFORMATION	ABSTRACT
Original Research Paper Received 21 November 2016 Accepted 11 January 2017 Available Online 01 February 2017	Spray combustion is utilized in a number of engineering applications such as energy conversion, military industrial, furnace and propulsion devices. Current work focused on the effect of liquid fuel droplet diameter on the efficiency of the combustion chamber and formed emission such as NO_x and CO in a two-dimensional axisymmetric combustion chamber. The discrete phase model approach was
Keywords: Droplet Size Fuel Spray Numerical Simulation Combustion	− employed for simulating combustion. The gas phase is simulated using an Eulerian approach, while the droplets are treated with a Lagrangian method. The coupling between the two phases and effect of radiation is considered. The mixture-fraction/probability density function (PDF) equilibrium chemistry model is used to predict the combustion of the vaporized fuel. Also, the conservative equations of mass, momentum and energy in the turbulent flow field were solved in conjunction with the k−ε two equation turbulence model. A numerical simulation was carried out to study the influence of droplet size on the formation and emission of NO _x and other contaminants. This effect was investigated under different droplet diameter and type of injection. The following conclusions can be drawn: Smaller droplets produce higher NO _x emission than the larger ones. Larger droplets produce higher CO than smaller ones.

1- مقدمه

شتاب فزاینده در جهت به پایان بردن منابع سوختهای فسیلی و دیگری آلودگی محیطزیست در اثر سوزاندن این منابع. از جمله مشکلات آلودگی زیستمحیطی ناشی از احتراق سوختهای فسیلی میتوان به صدور آلاینده-های ناشی از احتراق سوختهای فسیلی مانند ناکس¹ و مونواکسید کربن^۲ اشاره کرد که باعث افزایش صدور گازهای گلخانهای و به تبع آن افزایش

احتراق راه متداول تولید انرژی در بسیاری از سیستمهای صنعتی، صنایع حمل و نقل و صنایع نظامی از جمله توربینهای گاز، موتورهای احتراق داخلی، کورهها و بویلرها است [1]. تأمین انرژی یکی از اساسیترین پیشنیازهای توسعه اقتصادی و بهبود کیفی زندگی بشر است. روند افزایش مصرف انرژی در جهان بشر را با دو بحران بزرگ روبرو کرده است، نخست

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-30]

دمای زمین، افزایش گازهای سمی و آلودگی شهرها، ایجاد تغییراتی در آبو-هوا از جمله بارانهای اسیدی شده است [2]. توجه به این مسائل و مشکلات بهینهسازی و افزایش راندمان و کاهش سطح آلایندههای ناشی از احتراق سوختهای مایع اهمیت بسیاری یافته است بهطوریکه احتراق قطرات سوخت مایع مبحث موردعلاقهی بسیاری از تحقیقات انجام گرفته در 5 دههی اخیر بوده است. برای غلبه بر مشکلات و مسائل ذکرشده بهطور کلی از دو روش اصلی استفاده می شود:

- استفاده از سوختها و منابع انرژی جایگزین و تجدید پذیر
- بهینه سازی و بهبود ویژگی های احتراق سوخت های فسیلی و افزایش
 کیفیت اختلاط سوخت و هوا

کار حاضر بر روش دوم یعنی بهینهسازی و بهبود احتراق سوخت مایع و افزایش راندمان احتراق تکیه دارد. شناخت و بررسی دقیق برهم کنش پیچیده یین فاز گاز و فاز مایع در احتراق سوخت پاشش شده یمایع کلید اصلی در بهبود عملکرد محفظه ی احتراق و افزایش راندمان احتراق و کاهش سطح آلاینده ها است. برای سوختهای معمول فسیلی مانند بنزین و دیزل سطح آلاینده های خروجی میتواند به وسیله ی تغییرات و بهینه سازی ویژگی-های پاشش سوخت و کیفیت اختلاط سوخت و هوا کاهش یابد. برای دستیابی به این مهم لازم است که تمام سوخت پاشش شده با هوای در دستیابی به این مهم لازم است که تمام سوخت احتراق کامل تر صورت یذیرد [2].

اکسیدهای نیتروژن (ناکس) در شعلهی احتراق سوخت مایع ناشی از دو فرآیند اصلی است: ناکس حرارتی و ناکس فوری. ناکس دمایی از اکسیداسیون نیتروژن اتمسفر به وجود میآید و ناکس فوری از واکنش نيتروژن اتمسفر با راديكالهاى هيدروكربن در ناحيه سوخت-غنى شعله حاصل می گردد. تحقیقات نشان داده است که مقدار ناکس دمایی برای ناحیه ای از شعله که دما در آن از 1700 کلوین پایین تر باشد به نسبت کم است [3] در حالی که در چنین نواحی ممکن است ناکس تولید شده از مکانیسم فوری (پرامپت) بیشتر باشد. هر یک از این مکانیسمها در بخش بعد تشریح خواهد شد. برای مدلسازی فرآیند احتراق از مدل غیر-پیش آمیخته استفادهشده است که معادلات انتقال را برای کسرهای مخلوط ٔ حل می کند. معادلات برای هر جزء خاص حل نمی شوند بلکه غلظت هر جزء از میدان کسر مخلوط که از روابط ترموشیمیایی محاسبه شده است به دست می آید. از سال 1970 تاکنون محققان بسیاری بر اسپری و ویژگیهای احتراق سوخت مایع تمرکز کردهاند. مطالعات مربوط به ویژگیهای سوخت را میتوان به دو نوع کلی تقسیم کرد: ویژگیهای ماکروسکوپیک مانند زاویه پاشش سوخت و طول نفوذ شعله و ویژگیهای میکروسکوپیک مانند سرعت و قطر ذرات پاشش شده. هایاشی و همکاران [4] با استفاده از مدلسازی آزمایشگاهی تأثیرات توزیع اندازه ذرات را بر تشکیل دوده در شعلهی آرام بررسی نمودند. آواسی و همکاران [2] تاثیر اندازه قطرهی ایزولهی متان را در احتراق سوخت به صورت تحلیلی مورد بررسی قرار دادند. تای لی و همکاران [5] تحقیقات آزمایشگاهی برای بررسی تاثیر توزیع اندازه قطرات و خصوصیات تبخیر سوخت در مدل احتراق پیش آمیخته جریان چرخشی انجام دادند و مشاهده کردند کاهش در فشار محیط باعث بهتر شدن تبخیر قطرات می گردد. فوجيتا و همكاران [6] تاثير اندازه قطرات و تشعشع و نسبت تناسب سوخت و

هوا را با حل عددی در محفظه احتراق دو بعدی و مدل احتراق پیش آمیخته مورد بررسی قرار دادند و نتیجه گرفتند هرچه اندازه قطرات افزایش می یابد دمای منطقه مرکزی پایین دست جریان کاهش می یابد. واتانابه و همکاران [7] بر روی تاثیر تشعشع بر خصوصیات شعله ی اسپری و تشکیل دوده، به وسیله ی حل مستقیم عددی دو بعدی در حالت آرام اقدام نمودند و مشاهده کردند که تشعشع به طور زیادی بر تشکیل دوده و ساختار شعله تاثیر می گذارد. شارما و سوم [8] تأثیرات مواد قابل تبخیر سوخت و ویژگیهای پاشش سوخت را در خصوصیات احتراق و تشکیل ناکس بررسی عددی نمودند و مشاهده کردند با افزایش زاویه پاشش تولید ناکس افزایش می یابد. تمرکز کار حاضر بر تغییر تشکیل شده از جمله ناکس و مونواکسید کربن در یک محفظه احتراق دو بعدی متقارن محوری است. تاثیر قطرات در سه بخش شامل پاشش قطراتی بعدی متقارن محوری است. تاثیر قطرات در سه بخش شامل پاشش قطراتی روسین رملر هرکدام تحت سه زاویه پاشش 0 درجه، 30 درجه و 60 درجه بررسی می شود.

2- معادلات حاكم

1-2- فرضيات شبيهسازى

فرضیات زیر برای مدلسازی فرآیندهای مختلفی که در داخل محفظه احتراق اتفاق میافتد در نظر گرفته شده است:

- یک آنالیز دینامیک سیالات محاسباتی دو بعدی متقارن محوری یک شعلهی آشفته قادر است تا سرعت گاز، دما و غلظت هر جزء را با دقت مناسب پیشربینی کند.
- اسپری سوخت از قطراتی با اندازه مشخص و محدود تشکیل شده است.
 - برهم کنش دو طرفه بین فاز پیوسته و فاز گسسته[†] حاکم است.
 - نیروی شناوری ناچیز است.
 - کروزن⁶ بهعنوان سوخت مایع در نظر گرفته شده است.

2-2- معادلات

بسیاری از جریانهای مهندسی مورد استفاده در صنعت شامل برهم کنش فاز پیوسته (مانند گاز) و فاز گسسته (مانند قطرات مایع یا جامد) است. از جملهی این جریانها و کاربردها میتوان به جداکنندههای گردبادی²، بویلرهای پودر زغالی^۷، موتورهای احتراق داخلی و… اشاره کرد. این برهم کنشها میتواند بهوسیلهی مدل فاز گسسته شبیه سازی شود. پایه مدل فاز گسسته بر مبنای روش اویلری-لاگرانژی است. روش اویلری-لاگرانژی برای مشخص کردن دستهای از تکنیکهای مدل سازی و شبیه سازی استفاده میشود که در آن قطرات یا ذرات (فاز گسسته) به روش لاگرانژی بیان می-شوند در حالی که جریان حامل این ذرات (فاز پیوسته) به روش اویلری توصیف می گردد.

مسیر حرکت ذره از (قطره یا حباب) فاز گسسته بهوسیلهی انتگرالگیری از تعادل نیرویی^{^۸}روی ذره که در مختصات لاگرانژی نوشته شده است به دست میآید. این تعادل نیرویی لختی ذره را برابر با نیروهایی که روی ذره عمل میکنند قرار میدهد و برای مثال در مختصات افقی بهصورت معادلهی

¹NO

² Thermal NO ³ Mixture fraction

⁴ Discrete Phase ⁵ Kerosene (C₁₂H₂₃)

⁶ Cyclone Separator

⁷ Pulverized coal/oil fired boilers

⁸ Force Balance

(1) نوشته می شود.

$$\frac{du_p}{dt} = F_D \left(\overline{U} - \overline{U_p} \right) + \frac{\overline{g}(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + \overline{F}$$
(1)

که در آن \overline{F} ترم شتاب اضافی است (نیرو بر واحد جرم ذره) و $(\overline{P} - \overline{U_p})$ نیروی پسا بر واحد جرم ذره میباشد که F_D از رابطهی (2) به دست میآید. نیروی جرم مجازی، نیروی پسا، نیروی سافمن، نیروی برونین، نیروی باست و فاکسن و اثرات مگنس و گرادیان فشار و اثرات گرانش در حالت کلی بر ذره اثر دارند که در کار حاضر نیروی درگ بر ذره اعمال شده است و از نیروی گرانش به دلیل قطر کم محفظه، از گرادیان فشار به دلیل طول کم محفظه و برابر بودن فشار ورودی و خروجی (فشار محفظه برابر اتمسفر در نظر گرفته شده است) و از نیروی حرم مجازی به دلیل نبود گرادیان فشار صرف نظر شده است. همچنین نیروی سافمن و برونین نیز فقط برای قطرات زیر میکرون لحاظ میگردد که تمام قطرات پاشش شده قطر بزرگتری دارند پس نیروی باست که تاثیر گذشتهی قطرات بر دیگر قطرات است در نظر گرفته نشده است. نیروی فاکسن هم برای جریانهای خزشی حضور دارد که پس نیروی باست که تاثیر گذشته و قطرات بر دیگر قطرات است در نظر پرفته نشده است. نیروی فاکسن هم برای جریانهای خزشی حضور دارد که جریان مورد مطالعه این گونه نیست. از اثرات مگنس نیز به دلیل اینکه دورانی

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_D \text{Re}}{24} \tag{2}$$

ا عدد رینولدز است و طبق رابطهی (3) به دست می آید [10,9]. $ho d_n |\overline{U_n} - \overline{u}|$

$$Re = \frac{\mu p_p |v_p - u|}{\mu}$$
(3)

معادلهی (4) برای تعیین دمای ذرات بهوسیلهی انتگرال گیری بر روی آن استفاده میشود.

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = hA_p (T_{\infty} - T_p) - \frac{dm_p}{dt} h_{fg} + \varepsilon_p A_p \sigma(\theta_R^4 - T_p^4)$$
(4)

$$\sum_{k=1}^{\infty} b_k c_k (5) \text{ where } a_k (5) \text{ wh$$

$$\theta = \left(\frac{\theta}{4\sigma}\right)^{\frac{1}{4}} \tag{5}$$

در رابطهی (5)، G پدیدهی تشعشع است و طبق رابطهی (6) به دست می اید. $G = \int_{-\pi}^{4\pi} I d\Omega$ (6)

مومنتوم انتقالی از فاز پیوسته به فاز گسسته با استفاده از تغییرات مومنتوم ذرات (معادله (1)) و ضرب این معادله در دبی جرمی ذرات و گام زمانی بهصورت معادلهی (7) به دست میآید.

$$F = \sum \left(\frac{\mu C_D \text{Re}}{24 \rho_p d_p^2} (u_p - u) + F_{\text{other}}\right) \dot{m}_p \Delta t \tag{7}$$

$$= \frac{p.o}{m_{p,0}} \left[\left(m_{p_{\text{in}}} - m_{p_{\text{out}}} \right) \left[-H_{\text{lat}_{\text{ref}}} + H_{\text{pyrol}} \right] \right] \\ -m_{p_{\text{out}}} \int_{T_{\text{ref}}}^{T_{p_{\text{out}}}} C_{p_p} dT + m_{p_{\text{in}}} \int_{T_{\text{ref}}}^{T_{p_{\text{in}}}} C_{p_p} dT \tag{8}$$

$$M = \frac{\Delta m_p}{m_{p,0}} \dot{m}_{p,0} \tag{9}$$

در این مطالعه روش جهات مجزا^۱ برای حل معادلهی انتقال تشعشع مورد استفاده قرار گرفته است. مدل جهات مجزا یک مدل مناسب برای شبیهسازی احتراق در بسیاری از مدلهای کاربردی است [7].

0

$$\begin{split} \Omega. \nabla I(r, \Omega) &= -(\alpha + \kappa)I(r, \Omega) + \alpha I_b(r) \\ &+ \frac{\kappa}{4\pi} \int_{\Omega' = 4\pi} I(r, \Omega) \times \Phi(\Omega' \to \Omega) d\Omega \end{split}$$

$$\kappa = \int_{0}^{\infty} i_{b,1} \alpha_{\lambda} \frac{d\lambda}{d}$$
 , $\kappa = \eta_{s} \pi \frac{d^{2}p}{dk} N_{d}$ (11)

(10)

 $\alpha = \int_{0}^{\infty} i_{b,\lambda} \alpha_{\lambda} \frac{a_{h}}{I_{b}} , \quad \kappa = \eta_{s} \pi \frac{a_{p}}{4} N_{d}$ (11) تحت فرض ضریب پخش برابر در مدل احتراقی غیر پیش آمیخته، معادلات اجزاء واکنش احتراقی می تواند به یک معادله برای کسر مخلوط f کاهش یابد. معادلهی کسر مخلوط دار میانگین چگالی به صورت زیر است.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \overline{f}) + \nabla \cdot (\rho \overline{\vartheta} \overline{f}) = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_t}{\sigma_t} \nabla \overline{f}\right) + S_{\rm m} + S_{\rm add} \tag{12}$$

بهعلاوه برای حل معادلهی (12) باید معادله بقای زیر برای واریانس کسر مخلوط ⁷7 حل شود.

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\rho \overline{f'}^2 \right) + \nabla \cdot \left(\rho \overline{\vartheta} \overline{f'}^2 \right) = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_t}{\sigma_t} \nabla \overline{f'}^2 \right) + C_g \mu_t (\nabla \overline{f})^2 - C_d \rho \frac{\varepsilon}{\kappa} \overline{f'}^2 + S_{add}$$
(13)

در این معادله $f' = f - \overline{f}$ و ضرایب $\sigma_{
m t}, C_{
m g}, C_{
m d}$ به ترتیب برابر 2.8، 2.86 و 0.85. 0.85 و 0.85. 0.85

برای شبیهسازی فرآیندهای مربوط به ناکس دمایی از مکانیسم زلدوویچ استفاده شده است [3].

$$\frac{d[\text{NO}]}{dt} = 2k_{f,1}[\text{O}][\text{N}_2] \frac{\left(1 - \frac{k_{r,1}k_{r,2}[\text{NO}]^2}{k_{f,1}[\text{N}_2]k_{f,2}[\text{O}_2]}\right)}{\left(1 + \frac{k_{r,1}[\text{NO}]}{k_{f,2}[\text{O}_2] + k_{f,3}[\text{OH}]}\right)}$$
(14)

$$[0] = 3.97 \times 10^5 T^{-\frac{1}{2}} [0_2]^{\frac{1}{2}} e^{-\frac{31090}{T}}$$
(15)

برای شبیه سازی فرآیندهای مربوط به ناکس فوری از مدل دی سوئته استفاده شده است [12].

$$\frac{d[\mathrm{NO}]}{dt} = fk'_{\mathrm{pr}}[\mathrm{O}_2]^a[\mathrm{N}_2][\mathrm{fuel}]\mathrm{e}^{-\mathrm{E'}_a/RT}$$
(16)

$$f = 4.75 + 0.0819n - 23.2\phi + 32\phi^2 - 12.2\phi^3$$
(17)

$$k'_{\rm pr} = 6.4 \times 10^6 \left(\frac{\rm RT}{p}\right)^{a+1}$$
(18)

که در آن $\mathbf{E'_{a}}$ و $\mathbf{K'_{pr}}$ و $\mathbf{E'_{a}}$ مول است. $\mathbf{E'_{a}}$ و $\mathbf{K'_{pr}}$ و $\mathbf{E'_{a}}$ میتند که بهوسیلهی دپارتمان سوخت و انرژی دانشگاه لیدز محاسبه شدهاند. \emptyset نسبت تعادل و n تعداد کربن در هر مولکول سوخت هیدروکربنی است. نیز مرتبه واکنش اکسیژن است.

3-2- مدل عددی

در این مطالعه تبخیر و احتراق سوخت مایع با استفاده از قابلیت مدل سازی فاز گسسته در بستهی تجاری انسیس و نرمافزار فلوئنت برای محاسبه و پیش بینی فیزیک جریان گاز و اسپری مایع مورد بررسی قرار گرفته است. برای مدل سازی احتراق سوخت تبخیر شده در محفظهی احتراق از مدل احتراق غیر پیش آمیخته^۲ و مدل تعادل شیمیایی تابع احتمال چگالی^۲ استفاده شده است. همچنین برای مدل سازی خصوصیات آشفتگی جریان فاز پیوسته از مدل کی اپسیلون آر ان جی^۲ استفاده شده است. در این بررسی مدل پاشش غیر اتومایزری از یک نقطه با زاویه پاشش 45 درجه و با توزیع روسین -رملر^۵ در 10 گروه از 10 میکرومتر تا 100 میکرومتر برای محت سنجی با آزمایش شیر نژاد و همکاران [13] استفاده شده است و برای ادامه

5 Rosin-Rammler

¹ Discrete Ordinates

 ² NON-premixed Combustion
 ³ probability density function(PDF)

 $^{{}^{4}}K - \varepsilon$

بررسی تاثیر اندازه قطرات سوخت در ویژگیهای محفظه از زوایای پاشش 0 درجه، 30 درجه و 60 درجه که تشکیل مخلوط توپر می دهند در ورودی محفظه احتراق استفاده شده است. همچنین تاثیر اندازه قطرات در 3 دستهی قطرات با قطرهای یکسان، قطرات با توزیع روسین - رملر و قطرات با توزیع خطی بررسی خواهد شد. سیستم احتراق سوخت مایع در شکل 1 نشان داده شده است. یک پاشش سوخت کروزن وارد محفظه احتراق متقارن محوری میشود که در آن هوا با دمای 298 کلوین و سرعت 3 متر بر ثانیه جریان اند و شرط مرزی دیواره بازگشتی در نظر گرفته شده است. طول محفظه احتراق 1 متر در نظر گرفته شده است. طول محفظه شده است. جریان هوا آشفته است و برای مدل سازی احتراق از مدل احتراقی شده است. جریان هوا آشفته است و برای مدل سازی احتراق از مدل احتراقی غیر پیش آمیخته استفاده شده است. سوخت در دمای 323 کلوین و با سرعت سوخت 500 کیلوگرم بر ثانیه است.

4-2- استقلال از شبکه و صحتسنجی

شکل 2 دما روی محور محفظه احتراق اندازه گیری شده بهوسیلهی آزمایش بشیرنژاد و همکاران [13] و دمای پیش بینی شده بهوسیلهی شبیه سازی در کار حاضر را برای تعداد شبکه های استفاده شده نمایش می دهد. برای بررسی استقلال از شبکه چندین شبکهی محاسباتی مورد بررسی قرار گرفت که سه شبکه 120 × 240 و 180 × 360 و 240 × 480 کمترین اختلاف را با داده-های تجربی داشتند و برای شبکه های ریزتر از آن ها تغییری در نتایج مشاهده نگردید. پس برای شبیه سازی شبکه 180 × 360 که دارای جواب بهتر و سرعت حل بیشتری بود انتخاب گردید. بررسی نمودارها نشان می دهد که برای این تعداد شبکه میانگین خطای نسبی برابر 17.3% است. این خطا ناشی از سرعت پاشش قطرات به داخل محفظه احتراق در مدل آزمایشگاهی و مدل شبیه سازی شده می باشد.

3- بحث و بررسی

برای بررسی تاثیر اندازه قطر قطرات سوخت مایع در محفظه احتراق سه زاویه پاشش مختلف 60 درجه، 30 درجه و 0 درجه با سرعت 500 متر بر ثانیه با ویژگیهایی که در جدول (1) تشریح شده است استفاده شده است. همچنین برای بررسی تاثیر قطر ذرات، سه روش پاشش روسین-رملر، خطی و یکسان استفاده شده است.

1-3- توزيع قطرات با قطر يكسان

برای بررسی تاثیر اندازه قطرات، از قطرهای یکسان برای هر ذره استفاده شده است. در نتیجه قطر میانگین ساتر^۱ برای گروه برابر با قطر هریک از



Fig. 1 A schematic diagram of the numerical set-up شكل 1 نمايش مدل مورد استفاده در شبيه سازى محفظه احتراق



Fig. 2 Temperature on Combustor centerline شكل 2 دما روى محور محفظه احتراق

جدول 1 متغيرهاى اوليه مدلسازى محفظه احتراق Table 1 Parameters of injection characteristic

اندازه	خصوصيات
1 m	طول محفظه احتراق
0.36 m	قطر محفظه احتراق
3 m/s	سرعت هوای ورودی
298 k	دمای هوای ورودی
1200 k	دماي ديواره محفظه احتراق
500 m/s	سرعت پاشش سوخت
0.05 kg/s	دبی سوخت

قطرات آن خواهد بود به عبارت دیگر قطر بیان شده همان قطر ساتر نیز است. قطرها در 5 دسته که در جدول (2) آورده شدهاند مورد بررسی قرار گرفتهاند.

شکل 3 مقدار ناکس را برای 3 زاویه پاشش مختلف در قطر پایهی 0.1 میلی متر نشان می دهد. همان طور که از شکل مشخص است با افزایش زاویه پاشش ناکس افزایش یافته است. با توجه به اینکه در زاویه های بزرگ تر قطرات به دلیل اصطکاک بیشتری که با فاز پیوسته دارند در فواصل کوتاه تری تبخیر می شوند و احتراق زودتر رخ می دهد پس فرصت تشکیل ناکس در این مدل های پاشش بیشتر است و آلاینده بیشتری تولید می کنند. با افزایش زاویه پاشش از 0 درجه به 30 درجه ناکس خروجی %26 افزایش یافته است و به ازای افزایش زاویه پاشش از 30 درجه به 60 درجه ناکس خروجی %16 افزایش داشته است.

جدول 2 ویژگیهای توزیع هماندازه قطر قطرات

Cable 2 droplet diameter equal diameter distribution characteristics			
قطر میانگین ساتر (SMD)	اندازه قطرات	خصوصيات	
1µm	1μm	دسته 1	
5µm	5µm	دسته 2	
10µm	10µm	دسته 3	
50µm	50µm	دسته 4	
100µm	100µm	دسته 5	

¹ Sauter mean diameter



Fig.3 NOx on Length of combustor $$\mathbf{3}$$ and the set of the set

شکل 4 کانتورهای دمای محفظه احتراق را برای سه زاویه پاشش 30.0 و 60 درجه در قطر پایهی 0.1 میلیمتر نمایش میدهد. همانطور که در شکل مشخص است با افزایش زاویه پاشش احتراق در حجم بیشتری از محفظه صورت گرفته است بنابراین تولید ناکس در زاویه پاشش 60 درجه نسبت به زوایای پاشش 30 و 0 درجه بیشتر و 30 درجه نیز نسبت به زاویه پاشش 0 درجه بیشتر بوده است.

شکل 5 نمودار دمای میانگین وزنی در طول محفظه احتراق را برای سه زاویه پاشش مختلف نمایش می دهد. همان طور که در مورد شکل 3 گفته شد هرچه زاویه بالاتر رود احتراق در فاصله کوتاهتری صورت گرفته و در نتیجه دمای میانگین وزنی در محفظه احتراق در طول زیادتری افزایش می یابد که همین عامل موجب تولید ناکس بیشتری می گردد. پرشهایی که در دو نمودار مشاهده می شود به دلیل برخورد قطرات با دیواره محفظه می باشد. در این مواقع قطرات در فاصله ی طولی کمتری تبخیر شده و چون سریعتر ناکس تولید شده است در نتیجه برآمدگی در شکل نمودار ایجاد شده است. دلیل



Fig.4 Temperature Contour [K] for 0° , 30° and 60° injection at $d_p=0.1$ mm

شکل 4 کانتورهای دما برحسب کلوین برای سه زاویه پاشش در قطر پایهی 0.1 میلیمتر



Fig.5 Mass-weighted temperature on length of combustor شکل5 نمودار دمای میانگین وزنی در طول محفظه احتراق

اینکه در زاویه 60 درجه پرشی مشاهده نمی شود به این خاطر است که تعداد جریان قطراتی که به دیواره می خورند و در اثر شرط در نظر گرفته شده برای دیواره به قسمتهای مرکزی محفظه برمی گردند بیشتر از زاویه پاشش 30 درجه است بنابراین دما به صورت ناگهانی افزایش نمی یابد در نتیجه ناکس تولید شده نیز به تدریج تولید می گردد. در شکل 5 این افزایش دما مشخص است.

شکل 6 کانتورهای دما را برای زاویه پاشش 0 درجه برای 5 قطر مختلف پاشش نمایش می دهد. همان طور که در شکل مشخص است با افزایش قطر قطرات حجم احتراق تولید شده کاهش یافته است. این تغییر برای قطرات کوچکتر که احتراق آنها سریع رخ می دهد چندان محسوس نیست ولی برای قطرات بزرگتر از 0.05 میلی متر تغییرات شدیدتر می گردد. طبیعتاً هرچه احتراق در فاصله ی دورتری اتفاق بیفتد زمان کافی برای کامل شدن آن پیش نمی آید و در نتیجه ناکس خروجی کاهش و مونواکسید خروجی افزایش می یابد.



Fig.6 Temperature Contour [K] for 0° injection for various diameter of drops شکل 6 کانتورهای دما برحسب کلوین برای زاویه پاشش 0 درجه در قطرهای مختلف

مهندسی مکانیک مدرس، اردیبهشت 1396، دوره 17، شماره 2

شکل 7 و 8 کانتورهای دما را به ترتیب برای زاویه پاشش 30 درجه و 60 درجه برای قطرهای مختلف پاشش نمایش میدهد. برای قطرات کوچک تر از 0.05 میلیمتر کانتورهای دما بسیار مشابه حالت زاویه پاشش 0 درجه میباشد. برای قطرات بزرگتر از 0.05 میلیمتر احتراق در نزدیکی دیواره شکل گرفته و حجم بیشتری از محفظه درگیر فرآیند احتراق گشته است.

شکل 9 نمودار مقدار ناکس را برای زاویه پاشش 0 درجه نشان میدهد. در این نوع پاشش با افزایش قطر، مقدار ناکس بهطور پیوسته کاهش یافته است. دلیل آن به این علت است که هرچه قطر قطرات افزایش مییابد مطابق شکل 6 حجم کمتری درگیر افزایش دمای محفظه احتراق میشود (احتراق



Fig.7 Temperature Contour [K] for 30° injection for various diameter of drops

شکل 7 کانتورهای دما برحسب کلوین برای زاویه پاشش 30 درجه در قطرهای مختلف



Fig.8 Temperature Contour [K] for 60° injection for various diameter of drops

شکل 8 کانتورهای دما برحسب کلوین برای زاویه پاشش 60 درجه در قطرهای مختلف



شکل 9 نمودار مقدار ناکس در طول محفظه احتراق برای زاویه 0 درجه

در حجم کمتری اتفاق میافتد) چون احتراق دیرتر اتفاق افتاده و فرصت کافی برای تبادل گرما میسر نیست. پس با کاهش دمای تولید شده ناکس نیز کاهش مییابد.

شکل 10 و 11 نمودار مقدار ناکس را در طول محفظه برای زاویه پاشش 30 درجه و 60 درجه به تصویر کشیده است. همان طور که از شکل مشخص است برای قطرات کوچکتر مقادیر ناکس همانند حالت پاشش با زاویه 0 درجه میباشد. هرچه قطر قطرات افزایش یافته به دلیل آن که شعله در فضای محفظه پخش شده ناکس تولیدی کاهش مییابد. همچنین در قطرهای بزرگتر قطرات به دیواره برخورد میکنند و موجب میشود که ناکس تولید شده افزایش یابد.

شکل 12، شکل 13 و شکل 14 نسبت جرمی مونواکسید کربن را برای زوایای پاشش 0 ، 30 و 60 درجه نمایش میدهد. برای قطراتی که قطر بزرگتری دارند تبخیر و احتراق سوخت در فاصلهی دورتری از ورودی محفظه احتراق اتفاق میافتد بنابراین مونواکسید تولید شده که باید در فرآیند احتراق تولید و سپس از بین برود فرصت کافی برای از بین رفتن پیدا



Fig.10 NOx for 30° injection شکل 10 نمودار مقدار ناکس در طول محفظه احتراق برای زاویه 30 درجه



Fig.13 Mass fraction of CO for 30° injection

شکل 13 نمودار نسبت جرمی مونواکسیدکربن در طول محفظه احتراق برای زاویه 30 درجه



Fig.14 Mass Fraction of CO for 60° injection شكل 14 نمودار نسبت جرمی مونواكسيدكربن در طول محفظه احتراق برای زاويه

60 درجه

جدول 3 ویژگیهای توزیع خطی اندازه قطرات Table 3 droplet diameter linear distribution characteristics

قطر میانگین ساتر (SMD)	اندازه قطرات	خصوصيات
3.41 µm	از 1μm تا 10μm	دسته 1
14.95 μm	از 11μm تا 20μm	دسته 2
25.17 μm	از 21µm تا 30µm	دسته 3

کوچکتر باشد تغییرات آن تاثیر کوچکتری بر مقدار ناکس تولیدی میگذارد بهطوری که افزایش قطر از 3.41μm به 14.95μm باعث کاهش 1.6% ناکس خروجی شده است. در حالی که افزایش قطر از 14.95μm به 25.17μm باعث کاهش 6.4% ناکس خروجی گشته است.

شکل 16 مقدار ناکس را برای زاویه پاشش 30 درجه نشان میدهد. در این شکل نیز با افزایش قطر قطرات ناکس خروجی کاهش مییابد ولی این کاهش نسبت به زاویه 0 درجه شدیدتر است. دلیل آن این است که با افزایش زاویه سرعت نسبی بین دو فاز کاهش یافته و عدد رینولدز نسبی (معادله 3)



Fig.11 NO_x for 60° injection شکل 11 نمودار مقدار ناکس در طول محفظه احتراق برای زاویه 60 درجه

نمی کند و مقداری از آن محفظه احتراق را ترک می کند در نتیجه فرآیند احتراق کامل نمی شود. برای زاویه پاشش 0 درجه چون قطرات اصطکاک کمتری با فاز پیوسته دارند و همچنین به دیواره محفظه برخورد نمی کنند با افزایش قطر ذرات نسبت جرمی مونواکسید کربن افزایش می یابد ولی برای زاویه پاشش 30 و 60 درجه با توجه به شکل شعلهی تشکیل شده و زاویه پاشش نتایج دستخوش تغییراتی می شود. هرچه قطر ذرات بزرگ تر و زاویه بیشتر باشد این تغییرات شدیدتر و غیرقابل پیش بینی تر می گردد.

2-3- توزيع خطى اندازه قطرات

در این توزیع اندازه سه دسته از قطرات برای زوایای پاشش 0، 30 و 60 درجه به داخل محفظه احتراق پاشش شدهاند. ویژگیهای اندازه و قطر قطرات در جدول (3) آورده شده است.

شکل 15 مقدار ناکس را در محفظه احتراق برای زاویه پاشش 0 درجه نمایش میدهد. همان طور که در نمودار مشخص است با افزایش قطر متوسط ساتر ناکس خروجی از محفظه احتراق کاهش یافته است. هرچه قطر قطرات



Fig.12 Mass Fraction of CO for 0°

0 شکل 12 نمودار نسبت جرمی مونواکسیدکربن در طول محفظه احتراق برای زاویه 0 درجه



Fig.17 $\rm NO_x$ on combustor for 60° injection شکل 17 مقدار ناکس در محفظه احتراق برای زاویه پاشش 60 درجه



Fig.18 Mass Fraction of CO for 0° injection

شکل 18 نمودار نسبت جرمی مونواکسیدکربن در محفظه احتراق برای زاویه 0 درجه

شکل 19 نسبت جرمی مونو اکسید کربن را برای زاویه پاشش 30 درجه بیان مینماید. با بررسی شکل مشخص میشود که در صورت افزایش قطر از 3.41µm به 14.95µm مونواکسیدکربن خروجی 25.16 افزایش پیدا کرده است. در حالی که در افزایش قطر از 14.95µm به 25.17µm مونواکسید خروجی از محفظه احتراق 18.8% افزوده شده است.

شکل 20 نسبت جرمی مونو اکسید کربن را برای زاویه پاشش 60 درجه بیان مینماید. با بررسی شکل مشخص است که در صورت افزایش قطر از 3.41μm به 14.95μn مونواکسیدکربن خروجی 40% افزایش پیدا کرده است. در حالی که در افزایش قطر از 14.95μm به 25.17μm مونواکسید خروجی از محفظه احتراق 15.2% افزوده شده است.

3-3- توزيع روسين-رملر اندازه قطرات

سه نوع توزیع قطر روسین رملر برای پاشش قطرات در زوایای پاشش 0، 30 و 60 درجه استفاده شده است. قطرات در محدودهی قطر ۱۹۳ تا ۱۹۳۸ با پارامتر توزیع 3 و سه قطر میانگین ۱2.5µm ایدازه و قطر قطرات در جدول (4) محفظه احتراق تزریق میشوند. ویژگیهای اندازه و قطر قطرات در جدول (4) آورده شده است.





شکل 15 مقدار ناکس در محفظه احتراق برای زاویه پاشش 0 درجه



Fig.16 NO_x on combustor for 30° injection شکل 16 مقدار ناکس در محفظه احتراق برای زاویه پاشش 30 درجه

افزایش مییابد در نتیجه نیروی پسا (معادله 2) افزایش مییابد. از شکل مشخص است که به ازای افزایش قطر از 3.41μm به 14.95μm ناکس خروجی 14% کاهش داشته است. در حالی که افزایش قطر از 14.95μm به 25.17μm باعث کاهش 21.5% ناکس خروجی گشته است.

شکل 17 نیز نمودار تغییرات ناکس در محفظه احتراق را برای زاویه پاشش 60 درجه نمایش میدهد. با بررسی نمودار مشخص میشود که به ازای افزایش قطر از 3.41µm با 14.95µm ناکس خروجی 25.1% کاهش داشته است. در حالی که افزایش قطر از 14.95µm به 25.17µm باعث افزایش مجدد ناکس به اندازه 26% در خروجی گشته است.

شکل 18 نسبت جرمی مونو اکسید کربن را برای زاویه پاشش 0 درجه نمایش میدهد. با افزایش اندازه قطرات همان طور که در موارد قبلی بیان شد مونواکسیدکرین افزایش مییابد. از شکل مشخص است که به ازای افزایش قطر از 3.41µm به 14.95µm مونواکسیدکربن خروجی 4.5% افزایش داشته است. در حالی که در افزایش قطر از 14.95µm به 25.17µm مونواکسید خروجی از محفظه احتراق 13% افزوده شده است. شکل 22 نیز توزیع تجمعی عددی سه نوع توزیع در نظر گرفته شده را نشان داده است.



Fig.21 droplet diameter number frequency distribution شكل 21 توزيع عددى فركانسى قطر قطرات



Fig.22 droplet diameter cumulative number distribution

شكل 22 توزيع عددى تجمعى قطر قطرات



شکل 23 مقدار ناکس در محفظه احتراق برای زاویه پاشش 0 درجه



Fig.19 Mass Fraction of CO for 30° injection

شكل 19 نمودار نسبت جرمى مونواكسيدكربن در محفظه احتراق براى زاويه 30درجه



Fig.20 Mass Fraction of CO for 60° injection

شکل 20 نمودار نسبت جرمی مونواکسیدکربن در محفظه احتراق برای زاویه 60درجه

جدول 4 ویژگیهای توزیع روسین-رملر اندازه قطرات

Table 4 droplet diameter Rosin-Rammler distribution characteristics					
قطر ميانگين ساتر	قطر	پارامتر	اندازه قطرات	خصوصيات	
(SMD)	ميانگين	توزيع			
9.05µm	12.5µm	3	از 1μm تا 50μm	دسته 1	
18.28µm	25µm	3	از 1µm تا 50µm	دسته 2	
28.87 μm	37.5µm	3	از 1μm تا 50μm	دسته 3	

شکل 21 توزیع فرکانسی عددی سه نوع توزیع در نظر گرفته شده را نمایش میدهد.

شکل 23 مقدار ناکس را برای زاویه پاشش 0 درجه نشان میدهد. همان طور که از نمودار مشخص است برای زاویه پاشش 0 درجه ناکس خروجی از محفظه احتراق دچار تغییرات بسیار اندکی شده است و میتوان بیان کرد که در زاویه پاشش 0 درجه ناکس تولید شده به نوع توزیع قطرات وابسته نیست. همچنین با مقایسه دو نمودار 23 و 15 مشاهده می شود که این دو نوع توزیع خطی و روسین-رملر برای زاویه پاشش 0 درجه دارای نتایج یکسانی هستند.

شکل 24 مقدار ناکس را برای زاویه پاشش 30 درجه نمایش میدهد. هرچه قطرات بزرگتر در توزیع بیشتر باشند ناکس خروجی از محفظه احتراق کاهش مییابد. به ازای افزایش قطر میانگین ساتر از π9.05μμ به 18.28μμ ناکس خروجی 26% کاهش یافته است و به ازای افزایش قطر میانگین ساتر از 18.28μμ به 28.87μm ناکس خروجی از محفظه احتراق 22% کاهیده شده است.

شکل 25 مقدار ناکس را برای زاویه پاشش60 درجه نمایش می دهد. در زاویه پاشش 60 درجه هرچه قطرات با اندازه متوسط تر پاشش شدهاند ناکس خروجی از محفظه احتراق در وضعیت مناسب تری قرار گرفته است. در زاویه پاشش 60 درجه همان طور که در مباحث قبل تر گفته شد به دلیل احتراق و افزایش دما در حجم بیشتری از محفظه ناکس تولیدی فقط وابسته به عامل اندازه قطرات نیست و به عواملی از جمله سرعت، آشفتگی جریان و... نیز وابسته است.

شکل 26 بیان کننده ینسبت جرمی مونواکسید کربن در محفظه احتراق برای زاویه پاشش 0 درجه میباشد. همان طور که در مورد ناکس تولیدی در



شکل 24 مقدار ناکس در محفظه احتراق برای زاویه پاشش 30 درجه



شکل 25 مقدار ناکس در محفظه احتراق برّای زاویه پاشش 60 درجه



Fig.26 Mass Fraction of CO for 0° injection شکل 26 نمودار نسبت جرمی مونواکسیدکربن در محفظه احتراق برای زاویه 0 درجه

زاویه پاشش 0 درجه گفته شد با بررسی نمودار این نتیجه گرفته می شود که در زاویه پاشش 0 درجه نوع پاشش و تغییر قطر قطرات تغییرات اندکی در مقدار مونواکسید کربن خارجشده از محفظه احتراق ایجاد میکند.

شکل 27 نشانگر نسبت جرمی مونواکسیدکربن در محفظه احتراق برای زاویه پاشش 30 درجه میباشد. به ازای افزایش قطر میانگین ساتر از 9.05μm به 18.28μm مونواکسید کربن خروجی از محفظه احتراق به مقدار %3.95 افزایش یافته است و به ازای افزایش قطر میانگین ساتر از 18.28μm 28.87μm مونو اکسید خارجشده از محفظه احتراق %24.5 افزوده شده است.

شکل 28 نسبت جرمی مونواکسید کربن را برای زاویه پاشش 60 درجه نمایش میدهد.

4- نتیجه گیری

حل عددی مدلسازی احتراق غیر پیش آمیخته سوخت مایع در یک محفظه احتراق دو بعدی متقارن محوری برای بررسی تاثیر اندازه قطر قطرات سوخت در تشکیل آلایندهها مانند ناکس و مونواکسیدکربن و دیگر ویژگیهای محفظه احتراق انجام شد. این بررسی برای 5 قطر مختلف، 3 نوع توزیع



شکل 27 نمودار نسبت جرمی مونواکسیدکربن در محفظه احتراق برای زاویه 30 درجه



Fig.28 Mass Fraction of CO for 60° injection شکل 28 نمودار نسبت جرمی مونواکسیدکربن در محفظه احتراق برای زاویه 60 درجه

قطرات و 3 زاویه پاشش مختلف انجام شد و نتایج زیر به دست آمد:

- اندازه قطرات تاثیر مهمی بر تولید ناکس و مونواکسیدکربن در قطرات بزرگ سوخت در شعلههای آشفته دارد.
- قطرات ریزتر ناکس بیشتری نسبت به قطرات بزرگتر تولید میکنند.
- برای قطرات خیلی ریز تولید ناکس و مونواکسیدکربن نزدیک به هم است.
- قطرات بزرگتر مونواکسیدکربن و دیاکسیدکربن بزرگتری نسبت به قطرات کوچکتر ایجاد میکنند.
- شکل شعله تاثیر مستقیمی بر پارامترهای شعله مانند تولید ناکس و مونواکسیدکربن و دمای میانگین وزنی محفظه دارد.
- برخورد قطرات بزرگتر با دیواره محفظه مخصوصاً در زاویه پاششهای
 بالا باعث آشفتگی در نتایج میشود.

5- فهرست علائم

- (m²) سطح قطره A_p
 - مريب يسا ^{CD}
- $(Jkg^{-1}K^{-1})$ ظرفیت گرمایی C_p
- (Jkg⁻¹K⁻¹) ظرفیت گرمایی قطره C_{p_n}
 - (m) قطر قطره d_p
 - F نيرو (N)
- (Nkg^{-1}) نيروى پسا در واحد جرم ذره F_D
 - نسبت مخلوط f
 - g شتاب گرانش (ms⁻²)
 - (Wm⁻²) تابع تشعشع
- $(Wm^{-2}K)$ ضريب انتقال حرارت جابجايي h
 - (Jkg⁻¹) گرمای نهان h_{fg}
- (J $m kg^{-1}$) گرمای نهان در شرایط مرجع $H_{
 m lat_{ref}}$
- (Jkg⁻¹) انتقال حرارت ناشی از تجزیه مواد قابل تبخیر (H_{pyrol}
 - ^I شدت تشعشع
 - شدت تشعشع جسم سیاه I_b
 - نابع جسم سیاہ پلانک ⁱb,
 - $(m^3m^{-1}s^{-1})$ ثوابت سرعت برای واکنش رو به جلو $k_{f,1}$, $k_{f,2}$, $k_{f,3}$

- (m³m⁻¹s⁻¹) تصحیح کننده ثوابت سرعت واکنش معکوس (kg) m_p جرم ذره (kg) $m_{p,0}$ جرم اولیه ذره (kg) $\dot{m}_{p,0}$ دبی جرمی اولیه ذرات فاز گسسته (kgs⁻¹)
 - (kgs⁻¹) دبی جرمی ذرات فاز گسسته \dot{m}_p
 - (kg) جرم ذره در ورود به سلول حل فاز پيوسته $m_{p_{\rm in}}$
 - (kg) جرم ذرہ در خروج از سلول حل فاز پیوسته $m_{p_{out}}$
 - $(\mathrm{kgs^{-1}})$ انتقال جرم از فاز گسسته به پیوسته M
 - تعداد قطرات در واحد حجم N_d
- ⁿ تعداد اتمهای کربن در مولکول برای سوختهای هیدروکربنی
 - *P* فشار (pa)
 - (J) انتقال حرارت Q
 - R ثابت جهانی گازها(J.mol⁻¹K⁻¹)
 - Re عدد رینولدز نسبی
 - ^S چشمه
 - ^t زمان (s)
 - (K) دمای ذره T_p
 - (K) دمای مرجع برای محاسبات آنتالپی (K)
 - (K) دمای ذره در ورود به سلول حل فاز پیوسته $T_{p_{
 m in}}$
 - (K) دمای ذره در خروج از سلول حل فاز پیوسته $T_{p_{\text{out}}}$
 - (K) دمای فاز پیوسته T_∞
 - $({
 m ms}^{ ext{-1}})$ سرعت فاز U
 - (ms⁻¹) سرعت ذره U_p
 - علائم يونانى
 - m^{-1} میانگین ضریب جذب پلانک (m $^{-1}$)
 - ^۲ میانگین ضریب پراکندگی(پخش) پلانک
 - $({
 m kgm}^{-2})$ چگالی ذرات فاز گسسته ho_p
 - (kgm⁻²) چگالی فاز پیوسته ho
 - (pas) ويسكوزيته مولكولى فاز پيوسته μ
 - فاکتور بازده پراکندگی(پخش) برای یک ذره η_s
 - قابلیت نشر ذره \mathcal{E}_p
 - $(Wm^{-2}K^{-4})$ ثابت استفان-بولتزمن σ
 - (K) دمای تشعشع θ_R
 - (rad) جهت Ω
 - Ø نسبت هم ارزی

6- مراجع

- H. Wang, K. Luo, J. Fan, Effects of turbulent intensity and droplet diameter on spray combustion using direct numerical simulation, *Fuel*, Vol. 121, No. 1, pp. 311-318, 2014.
- [2] I. Awasthi, G. Gogos, T. Sundararajan, Effects of size on combustion of isolated methanol droplets, *Flame And Combustion*, Vol. 160, No. 1, pp. 1789-1802, 2013.
- [3] J. Warnatz, U. Mass, R. Dibble, Combustion: physical and chemical fundamentals modeling and simulation, experiments, pollutant formation, pp. 259-265, 4th Edition, Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.
- [4] J. Hayashi, J. Fukui, F. Akamatsu, Effects of fuel droplet size distribution on soot formation in spray flames formed in a laminar counterflow, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 34, No. 1, pp. 1561-1568, 2013.

145

- [10] S. Morsi, A. Alexander, An Investigation of Particle Trajectories in Two-Phase Flow Systems, *Fluid Mechanic*, Vol. 55, No. 2, pp. 193-208, 1972.
- [11] S. Hashemi, A. Fattahi, G. Sheikhzade, Presumed PDF Modeling of Reactive oxy-fuel flow in a model combustor, *The Journal of Energy: Engineering & Management*, Vol. 2, No. 4, pp. 48-57, 2012.
- [12] G. DeSoete, Overall Reaction Rates of NO and Formation from Fuel Nitrogen, *The Combustion Institute*, Vol. 15, No. 1, pp. 1093– 1102, 1975.
- [13] K. Bashirnezhad, M. Moghiman, I. Zahmatkesh, Studies on soot formation and combustion in turbulent spray flames: Modeling and experimental measurement, *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, Vol. 26, No. 3, pp. 45-54, 2007.
- [14] D.P. Schmidt, C.J. Rutland, M.L. Corradini, A fully compressible, two-dimensional model of small, high-speed, cavitating nozzles, *Atomization and Sprays*, Vol. 9, No. 3, pp. 255-276, 1999.

- [5] T. Li, K. Nishida, H. Hiroyasu, Droplet size distribution and evaporation characteristics of fuel spray by a swirl type atomizer, *Fuel*, Vol. 90, No. 7, pp. 2367–2376, 2011.
- [6] A. Fujita, H. Watanabe, R. Kurose, S. Komori, Two-dimensional direct numerical simulation of spray flames - Part 1: Effects of equivalence ratio, fuel droplet size and radiation, and validity of flamelet model, *Fuel*, Vol. 104, No. 1, pp. 515–525, 2013.
- [7] H. Watanabe, R. Kurose, S. Komori, H. Pitsch, Effects of radiation on spray flame characteristics and soot formation, *Combustion And Flame*, Vol. 152, No. 1-2, pp. 2-13, 2008.
- [8] S. Som, N. Sharma, Influence of fuel volatility and spray parameters on combustion characteristics and NOx emission in a gas turbine combustor, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 24, No. 5-6, pp. 885-903, 2002.
- [9] F. Filho, N. Fukumasu and G. Krieger, Numerical simulation of an ethanol turbolant spary flame with RANS and diffusion combustion model, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol.35, No. 3, pp. 189-198, 2013