



بررسی عددی پاشش اسپری اتانول و استون در محیط گازی

حسن خالقی^{*}، اعلی صدوقی

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۱/۱۷
بازنگری: ۱۳۹۹/۰۶/۱۵
پذیرش: ۱۳۹۹/۰۸/۰۴
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۸/۲۰

کلمات کلیدی:

شبیه‌سازی اسپری
تبخیر
چندفازی
اولر-لاگرانژ
الکل‌ها

خلاصه: در این مقاله به بررسی پاشش اسپری تبخیری دو هیدروکربن اکسیژن‌دار، اتانول و استون، در محیط گازی پرداخته شده است. به منظور حصول این هدف، فاز گازی با رویکرد اولری و قطرات فاز مایع به صورت لاگرانژی شبیه‌سازی شده‌اند و اندرکنش بین دوفاز به صورت دوطرفه در نظر گرفته شده است. طبق نتایج، در مدت زمان مناسب پس از پاشش اسپری، درصد کلی تبخیر استون به مراتب بیشتر از اتانول است، اما در مدت زمان‌های اولیه پاشش اسپری، هر دو ماده نرخ کلی تبخیر مشابهی داشته‌اند. همچنین هر دو ماده، از منظر طول نفوذ اسپری در محیط گازی، تقریباً پیشروی یکسانی داشته‌اند. همچنین به واسطه سرعت پاشش تقریباً یکسان، اثرات نزدیک به هم بر روی میدان‌های سرعت فاز گازی از خود برجای گذاشته‌اند. مقایسه میدان دمای فاز گازی برای پاشش اتانول و استون پس از گذشت زمان ۱/۵ میلی‌ثانیه نشان می‌دهد که دمای محیط گازی پس از پاشش اتانول به مراتب کمتر از دمای محیط پس از پاشش استون است. این امر به این دلیل است که اکثر جرم تبخیرشده از قطرات در دمای ثابت و برابر دمای تبخیر آن‌ها رخ می‌دهد و همچنین این که گرمای مورد نیاز تبخیر از محیط گازی تأمین می‌شود.

مقدمه

در فرآیندهای متعددی در صنعت از اسپری‌ها استفاده می‌شود که در این میان می‌توان به اسپری آب در برج‌های خنک‌کن، اسپری و تبخیر سوخت در کاربردهای تولید انرژی و یا اسپری به منظور نشست ذرات و رنگ‌پاشی اشاره نمود. از همین رو شناخت بهتر و مدلسازی دقیق‌تر پدیده اسپری و فرآیندهای موجود در آن از اهمیت بالایی برخوردار است. همچنین، نرخ هر واکنشی، از جمله واکنش‌های شیمیایی، تحت کنترل‌کننده‌ترین مرحله آن است، فرآیند پاشش اسپری نیز توسط نرخ تبخیر کنترل می‌شود [۱]. اسپری مایعات شامل فرآیندهای متعدد و مختلفی هستند. در فرآیندهای اسپری، شکست‌های اولیه^۱ و ثانویه^۲ بعد از خروج مایع از نازل انجام می‌شود. همچنین در این بین پدیده‌های تحت عنوان برخورد و به هم پیوستن^۳

رخ می‌دهد. فرآیند گرمایش قطرات و تبخیر آن‌ها در همه‌ی مراحل اسپری سوخت رخ می‌دهد و از همین رو اهمیت آن قابل توجه است [۲].

فرآیند مهم در شبیه‌سازی این نوع از مسائل، فرآیند تبخیر است که به علت تداوم این فرآیند از ابتدا تا انتهای پاشش، در مقابل برخی فرآیندهای دیگر موجود در اسپری از جمله شکست و برخورد که تحت شرایط خاصی رخ می‌دهد، از اهمیت به‌سزایی برخوردار است. به منظور اشاره به اهمیت مسأله تبخیر، از سال ۱۹۵۰ مدلسازی تبخیر قطرات از مربع قطر^۴ با مدلسازی تبخیر یک تک قطره تک جز آغاز گردید [۳] و پس از آن در سال ۱۹۶۲ بورمن و جانسون [۴] به بهبود مدل برای قطرات متحرک پرداختند. آبرامزون و سیریگانو [۵] در سال ۱۹۸۱ نیز با اصلاح مدل‌های قبلی به اصلاح مدل در بخش تبخیر و انتقال حرارت پرداختند و مباحث مربوط به گرادیان دما درون قطره و اثر آن را مطرح نمودند. آبرامزون مدلی بر مبنای انتقال

- 1 Primary Break-Up
- 2 Secondary Break-Up
- 3 Collision



کسر جرمی‌های بالای گازمیع در سوخت دیزل، آزادسازی انرژی کمتر و زمان تبخیر افزایش به سزایی می‌یابد.

اتانول، با توجه به دسترسی و تولید آسان، همیشه یک سوخت جایگزین مورد توجه در میان محققان بوده، از همین رو ترکیب سوخت دیزل و اتانول به منظور دستیابی به سوختی ترکیبی مورد استقبال بوده است. در سال ۲۰۰۷، ژائو و همکاران [۱۱]، در تحقیقی به مطالعه آزمایشگاهی بر روی اسپری سوخت ترکیبی دیزل-اتانول پرداختند و نتایجی را در شرایط مختلف کاری ارائه نمودند. با توجه به نوع انژکتور مورد استفاده در آزمایش، اضافه نمودن اتانول، تفاوت زیادی در ظاهر کلی اسپری ایجاد نمود. با این حال، در فشارهای پایین، با افزایش نسبت جرمی اتانول، طول نفوذ اسپری کاهش و همچنین زاویه باز شدن اسپری افزایش یافت، در حالی که در فشارهای بالا، تفاوت در طول نفوذهای اسپری قابل تشخیص نبوده و تفاوت چندانی ندارند. کیم و همکاران [۹] به بررسی اثر بیودیزل، به صورت عددی و تجربی پرداختند. در حالت تجربی، اندازه‌گیری طول نفوذ، مربع قطرهای قطرات و اثراتی از این دست را با استفاده از کد کیوا^۴ مورد مطالعه قرار دادند.

مطالعه عددی بر روی اسپری الکل‌ها و کتون‌هایی مانند اتانول و استون به صورت جدا و مستقل مورد مطالعه و بررسی قرار نگرفته است، از همین رو در این مقاله به بررسی عددی و شبیه‌سازی اسپری تبخیری این دو ماده مختلف با در نظر گرفتن مدل‌های شکست و برخورد با دیدگاه اولر-لاگرانژ پرداخته شده و مقایسه بین دو سوخت ارائه گشته است. همچنین در این مقاله تمامی خواص فاز گاز و همچنین خواص قطرات به صورت متغیر با دما و فشار در نظر گرفته شده است که در مقالات گذشته در این زمینه، مجموع این موارد همزمان در شبیه‌سازی اسپری الکل و کتون مورد مطالعه قرار نگرفته است.

در ادامه به معرفی معادلات حاکم در بخش دوم، به تفکیک فاز پیوسته و گسسته قطرات پرداخته می‌شود. پس از آن نیز استقلال از شبکه و صحت‌سنجی کد کامپیوتری که به زبان فرترن برای حل میدان گازی و اسپری قطرات نوشته شده است، انجام می‌گیرد. در بخش چهارم به معرفی نتایج و تحلیل آن‌ها پرداخته می‌شود.

گونه در قطرات بر مدل قبلی خود اضافه نمود و مدل را برای قطرات چند جزئی معرفی کرد. ساژین [۶] حلی تحلیلی برای معادلات انتقال حرارت و گونه در داخل قطره با مبنا قراردادن مدل آبرامزون برای تبخیر قطرات چندجزئی، ارائه نمود. نکته مشترک تمام مطالعات اشاره‌شده در فوق این است که تمامی مطالعات برای یک تک قطره در حال تبخیر می‌باشد.

در زمینه تبخیر الکل‌ها و کتون‌ها، بسیاری از مطالعات با مخلوط کردن این مواد به عنوان افزودنی و یا بهبوددهنده انجام شده‌اند. در برخی دیگر از مطالعات نیز به بررسی تبخیر تک قطره الکل‌ها و کتون‌ها به صورت تک جزء و یا چندجزئی پرداخته شده است. در تبخیر قطرات الکل، موگوبا و همکاران [۷] بر روی تبخیر و فرآیندهای موجود در تبخیر قطرات دوجزئی تمرکز داشتند و مطالعاتی انجام دادند. عمده مطالعات آن‌ها بر روی تبخیر الکل‌ها از جمله اتانول و استون بود که این مطالعات به صورت آزمایشگاهی و محاسباتی انجام شده است. در روش‌های آزمایشگاهی از تصویربرداری لیزری به دو روش تقاطع لیزری^۱ و تصویربرداری قطرات^۲ استفاده نمودند. ساژین و همکاران [۸] در سال ۲۰۱۰ به مطالعه عددی و آزمایشگاهی تبخیر قطرات دوجزئی متشکل از اتانول و استون نمودند. در این مطالعه گرادیان دما و غلظت درون قطره حل شده است. همچنین این بررسی نشان داد که نزدیک‌ترین دما به دمای اندازه‌گیری شده در داده‌های تجربی، دمای سطح قطره می‌باشد. در بخش دیگر این تحقیق به معرفی روابطی به منظور متوسط‌گیری خواص مواد و همچنین به معرفی روابطی به منظور متغیر بودن خواص با دما اشاره شده است.

هاونگ و همکاران [۹] در سال ۲۰۰۴، با ترکیب الکل متانول با دیزل، ترکیبی از نوع بیودیزل را مورد مطالعه آزمایشگاهی قرار دادند. آن‌ها بیان کردند، با افزایش کسر جرمی متانول در سوخت ترکیبی متانول-دیزل، افزایش آزادسازی انرژی را نتیجه می‌دهد. قی و همکاران [۱۰] نیز به بررسی ترکیب سوختی گاز مایع^۳ و دیزل پرداختند. این مطالعه در درصد ترکیب‌های متفاوت گازمیع با دیزل صورت گرفت و در ادامه آن به بررسی خروجی‌هایی نظیر آلایندگی این ترکیب‌ها پرداخته‌اند. این مطالعه که به صورت آزمایشگاهی انجام شده است، بیان می‌کند که با افزایش دور موتور و همچنین

1 Light Interference Filter

2 Laser Doppler Anemometry

3 LPG

معادلات حاکم

به صورت زیر می‌باشد که با جایگزینی مقادیر موجود در جدول ۱ معادلات متفاوت حاصل می‌گردد.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_g \theta \varphi) + \nabla(\rho_g \theta \bar{u} \varphi) = \nabla(\Gamma_\varphi \nabla \varphi) + S_\varphi + S_{\varphi,d} \quad (1)$$

پارامتر φ پارامتری عمومی است که انتقال آن مورد نظر می‌باشد و در جدول ۱ مشخص شده است، Γ_φ ضریب پخش، S_φ عبارت منبع و $S_{\varphi,d}$ عبارت منبع به واسطه حضور قطرات در محیط میدان حل می‌باشد که ناشی از کوپلینگ دوطرفه میدان فاز گازی و قطرات می‌باشد. پارامتر θ کسر حجمی فاز گاز می‌باشد به این معنی که کسری از حجم سلول می‌باشد که توسط فاز گاز (فاز پیوسته و اولری) اشغال شده است.

فاز مایع

معادلات مربوط به قطره در بخش‌های متفاوتی قرار داده شده‌اند که در هر قسمت به‌طور کامل بررسی می‌شوند.

اندازه و مسیر حرکت

روش بهینه برای تفسیر ریاضی حرکت قطرات در یک جریان، استفاده از دیدگاه لاگرانژی است. مسیر حرکت قطره در این محیط با استفاده از تغییرات سرعت محاسبه شده در قانون دوم نیوتن به دست می‌آید که برآیند نیروهای وارد بر ذره را به جرم و شتاب آن مربوط می‌سازد. نیروهای وارد بر قطرات را می‌توان به سه گروه زیر تقسیم‌بندی کرد [۱۲].

مدل دوفازی انتخاب‌شده برای میدان حل، مدل دوفازی اولری-لاگرانژی است، به این ترتیب معادلات برای هر دوفاز گسسته (قطرات) و پیوسته (فاز گازی) به تفکیک ارائه می‌گردد. همچنین با توجه به کوپلینگ میدان‌های فشار و سرعت در میدان پیوسته گازی، الگوریتم حل میدان جریان و مدل‌های انتقال حرارت و جرم قطرات فاز گسسته به‌طور کامل معرفی شده و کوپلینگ دوطرفه و اثرات متقابل قطرات بر جریان گازی و بالعکس نیز در قالب، عبارت‌های منبعی که در معادلات اعمال می‌گردند نیز معرفی خواهند گشت.

فاز گازی

برای حل میدان جریان فاز پیوسته فرض‌هایی به‌قرار زیر در نظر گرفته شده است که عبارتند از:

- ۱- جریان به‌صورت ناپایا، تراکم‌پذیر، در نظر گرفته شده است.
- ۲- جریان به‌صورت نیوتونی و با خواص متغیر می‌باشد.
- ۳- با توجه به در نظر گرفتن کوپلینگ دوطرفه، اثرات فاز گسسته بر فاز پیوسته به‌صورت اعمال عبارات منبع می‌باشد که مقادیر و نحوه اعمال آن‌ها در ادامه بررسی می‌گردد.

مدل توربولانسی اصلی مورد استفاده در انجام پژوهش، مدل $k-\epsilon$ می‌باشد. همچنین با توجه به تراکم‌پذیری جریان و متغیر بودن چگالی، از متوسط‌گیری وزنی استفاده می‌شود که مزیت عمده این روش حذف نوسانات چگالی در معادلات می‌باشد. معادله کلی انتقال

جدول ۱. معرفی متغیرهای جایگزین‌شده در معادله انتقال

Table 1-All Possible variable in transport equation

متغیر	نماد (واحد)	φ	Γ_φ	S_φ
جرم	m (kg)	۱	.	.
سرعت	u ($\frac{m}{s}$)	u	μ_{eff}	$\theta \frac{\partial P}{\partial x_i}$
انرژی	E ($\frac{kJ}{kg}$)	h	$\frac{\mu_{eff}}{\sigma_h}$.
انرژی توربولانسی	k ($\frac{kJ}{kg}$)	k	$\frac{\mu_{eff}}{\sigma_k}$	$P_k - \epsilon$
نرخ اضمحلال	ϵ ($\frac{1}{s}$)	ϵ	$\frac{\mu_{eff}}{\sigma_\epsilon}$	$C_{1\epsilon}(\frac{\epsilon}{k})P_k - C_{2\epsilon}(\frac{\epsilon^2}{k})$
کسر جرمی بخار سوخت	F	f	D	.

جدول ۲. خلاصه‌ای از نیروهای وارد بر قطره در جریان

Table 2-Summary of the forces, which act on the droplet in flow

دسته‌بندی	نیرو	مکانیزم عملکرد
	پسا	سرعت لغزشی میان دو فاز
	گرادیان فشار	فشار هیدرواستاتیک و نیروی شناوری
نیروی سطحی	بایست	شتاب نسبی دو فاز (یا اثر تاریخچه نا پایا)
	سافمن	گرادیان سرعت فاز پیوسته
	جرم مجازی	شتاب سیال اطراف قطره
	گرادیان دما	گرادیان دمای سیال اطراف
نیروی اندرکنش میان قطرات	واندروالس	اندرکنش اتمی یا مولکولی
	نیروی حجمی	از سوی کره زمین

۱- نیروهایی که بین سطح مشترک دو فاز منتقل می‌شوند

حجمی.

در این کاربرد، نسبت چگالی فاز گاز به قطره در حدود 10^{-3} یا کمتر می‌باشد. تحت این شرایط، نیروهای بایست، جاذبه و جرم مجازی قابل صرف نظر کردن می‌باشند [۱۷]. پس می‌توان معادله (۳) را به صورت زیر ساده‌سازی کرد:

$$\frac{du_{i,d}}{dt} = K_d ((u_{i,g} + u'_{i,g}) - u_{i,d}) - \frac{1}{\rho_d} \left(\frac{dp_i}{dx_i} \right) \quad (4)$$

$$K_d = \frac{3}{4} C_d \left(\frac{\rho_g}{\rho_d} \right) \frac{1}{D_d} |u_{i,g} - u_{i,d}|$$

ضریب پسا نیز به صورت زیر قابل محاسبه می‌باشد:

$$C_d = \begin{cases} 0.44 & \text{Re}_d > 1000 \\ (24 + 3.6 \text{Re}_d^{0.687}) / \text{Re}_d & \text{Re}_d \leq 1000 \end{cases} \quad (5)$$

$$\text{Re}_d = \frac{\rho_g |u_g - u_d| D_d}{\mu_g}$$

که در آن Re_d عدد رینولدز قطره می‌باشد.

بر اساس تعریف سرعت یک ذره نیز می‌توان معادله مسیر حرکت ذره را به شکل زیر مشخص کرد:

$$\frac{dx_{i,d}}{dt} = u_{i,d} \quad (6)$$

که در آن $X_{i,d}$ معرف مکان قطره می‌باشد. همان‌طور که می‌دانیم سرعت‌های اغتشاشی مستقیماً در دسترس نمی‌باشند. و این اطلاعات به صورتی داخل انرژی توربولانس نهفته می‌باشد. برای حالت ایزوتروپیک می‌توان نوشت:

(نیروهای سطحی)

۲- نیروهای اندرکنش میان خود قطرات

۳- نیروهای وارد بر حجم قطره (نیروهای خارجی یا حجمی)

معادله عمومی اندازه حرکت ذره ابتدا توسط بایست [۱۳] بوزینسک [۱۴] و آسین [۱۵] برای یک ذره کروی که در یک سیال ساکن حرکت می‌کند استخراج شد. چن [۱۶] معادله را به منظور در نظر گرفتن تغییرات سرعت در سیال حامل، گسترش داد. معادله اندازه حرکت قطره به صورت عمومی زیر می‌باشد:

$$m_d \frac{du_{i,d}}{dt} = \bar{F}_{\text{Drag}} + \bar{F}_{\text{pressure}} + \bar{F}_{\text{Virtual-mass}} + \bar{F}_{\text{Basset}} + \bar{F}_{\text{Gravity}} + \bar{F}_{\text{Saffman}} + \bar{F}_{\text{Brownian}} + \bar{F}_{\text{Thermophoretic}} + \bar{F}_{\text{Van-der-Waals}} \quad (2)$$

جدول ۲ به صورت دسته‌بندی شده به معرفی این نیروها می‌پردازد. که با نوشتن فرمول هر کدام از آن‌ها، معادله به صورت زیر درمی‌آید:

$$\frac{\pi}{6} D_d^3 \rho_d \frac{du_{i,d}}{dt} = C_d \frac{1}{2} \rho_g (u_{i,g} - u_{i,d}) |u_{i,g} - u_{i,d}| + \frac{\pi D_d^2}{4} + \frac{\pi}{6} D_d^3 \rho_g \frac{du_{i,g}}{dt} + \frac{1}{2} D_d^3 \rho_g \frac{d}{dt} (u_{i,g} - u_{i,d}) + \frac{3}{2} D_d^2 \sqrt{\pi \rho_g \mu} \int_0^t \frac{d}{dt} (u_{i,g} - u_{i,d}) \frac{d\tau}{\sqrt{t-\tau}} - \frac{1}{\rho_d} \left(\frac{dp_i}{dx_i} \right) + \sum F_i \quad (3)$$

که در آن C_d ضریب پسا و F_i مشخص کننده تمام نیروهای خارجی مؤثر بر روی قطره می‌باشد. به ترتیب نیروهای وارده به قطره در سمت راست معادله (۳) عبارت‌اند از، نیروی پسا، نیروی گرادیان فشار، نیروی جرم مجازی، نیروی تاریخچه‌ای بایست و سایر نیروهای

که نسبتی از میزان انتقال حرارت به انتقال جرم می‌باشد. در معادله (۱۰) C_{pv} ظرفیت هدایت حرارتی بخار سوخت می‌باشد. در این معادلات عدد ناسلت Nu و عدد شرود Sh با استفاده از معادلات زیر به دست می‌آید:

$$Sh = 2 + 0.6 Re_d^{0.5} Sc^{1/3} \quad (11)$$

$$Nu = 2 + 0.6 Re_d^{0.5} Pr^{1/3} \quad (12)$$

که در آن تعریف اعداد اشمیت^۵ و پرانتل^۶ به صورت $Sc = \frac{\mu_g}{\rho_g D}$ و $Pr = \frac{C_{pg} \mu_g}{K}$ می‌باشد.

ترم چشمه در معادلات فاز گاز

به دلیل در نظر گرفتن کوپلینگ دوطرفه، عبارت‌های ترم چشمه‌ای در معادلات پیوستگی مومنوم و انرژی به شرح زیر است:
ترم چشمه معادله پیوستگی:

این ترم به نوعی بیان گر میزان ورود بخار سوخت به فاز گازی می‌باشد که مجموع جرم تبخیر شده از تمام قطرات می‌باشد:

$$\dot{S}_{md} = -\frac{\pi \rho_d}{6 \delta t} \sum N_{dk} \{ (D_{dk}^{n+1})^3 - (D_{dk}^n)^3 \} \quad (13)$$

در این رابطه، عبارت مجموع به معنی جمع بر روی تمام قطرات موجود در دامنه حل می‌باشد. بالانویس‌های n و $n+1$ نشان‌دهنده زمان حل می‌باشند و δt بیان‌کننده گام زمانی می‌باشد.
ترم چشمه معادله اندازه حرکت:

این ترم نیز تأثیر مجموع میزان اندازه حرکت منتقل شده بین دو فاز می‌باشد:

$$\dot{S}_{u_{idk}} = -\frac{\pi \rho_d}{6 \delta t} \sum N_{dk} \{ (D_{dk}^{n+1})^3 u_{idk}^{n+1} - (D_{dk}^n)^3 u_{idk}^n \} \quad (14)$$

ترم چشمه معادله انرژی

این ترم میزان گرما یا انرژی منتقل شده به قطره را مشخص

می‌نماید:

$$\dot{S}_{hd} = -\frac{\pi \rho_d}{6 \delta t} \sum N_{dk} \{ (D_{dk}^{n+1})^3 (C_p T_{dk})^{n+1} - (D_{dk}^n)^3 (C_p T_{dk})^n \} \quad (15)$$

$$u'_g = v'_g = w'_g = \sqrt{\frac{2}{3} k} \quad (7)$$

انتقال حرارت و جرم

مدل‌های مورد استفاده در تبخیر در ادبیات دوفازی بر این فرض استوار است که بخار سوخت موجود در نزدیکی سطح قطره همیشه اشباع می‌باشد، بنابراین، نرخ تبخیر برابر نرخ پخش سوخت از سطح قطره به محیط اطراف می‌باشد. این‌گونه مدل‌ها به مدل‌های هیدرودینامیکی مشهور می‌باشند. در حالت اولیه و ساده، مدل معرفی به قرار زیر می‌باشد. روابط ارائه شده توسط بورمن^۱ و جانسون^۲ برای محاسبه تغییرات جرم و دمای قطره استفاده شده است. در این روابط نرخ تبخیر به نسبت فشار بخار اشباع به فشار محیط و دمای قطرات با فرض هم‌دمابودن مرکز و سطح قطره در نظر گرفته شده است:

$$\frac{dm_d}{dt} = -\pi D_d DP_t \ln \{ (P_t - P_{vs}) / (P_t - P_{vs}) \} h / RT_m \quad (8)$$

$$\frac{d(m C_p T)_d}{dt} = -\pi D_d K (T_g - T_d) \{ Z / (e^Z - 1) \} Nu + Q \frac{dm_d}{dt} \quad (9)$$

که در آن‌ها D ضریب پخش، P_t فشار کل، P_{vs} فشار بخار در نواحی دور از سطح قطره، P_{vs} فشار بخار بر روی سطح قطره، R ثابت جهانی گازها، T دما می‌باشد و زیرنویس m نشان‌دهنده میانگین مقادیر گاز و قطره می‌باشد، C_p ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت می‌باشد، K ضریب هدایت حرارتی بوده و Q گرمای نهان تبخیر می‌باشد.

همانطور که از معادله (۹) مشخص می‌باشد، مجموع حرارت رسیده به قطره که توسط ترم اول سمت راست معادله محاسبه می‌شود، به صورت کامل صرف گرمایش قطره نمی‌شود و بخشی از آن صرف انتقال حرارت بار نهان یا تغییر فاز قطره می‌گردد. نکته قابل توجه در این معادله در نظر گرفتن هم‌زمان دو فرآیند انتقال حرارت و جرم می‌باشد که توسط پارامتر Z در معادلات ظاهر می‌شود که به صورت زیر بیان می‌شود:

$$Z = -\frac{C_{pv} \frac{dm_d}{dt}}{\pi D_d Nu} \quad (10)$$

- 3 Nusselt
- 4 Sherwood
- 5 Schmidt
- 6 Prandtl

- 1 Borman
- 2 Johnson

الگوریتم حل

روش‌های عددی به منظور حل معادلات حاکم مورد استفاده قرار گرفتند. به منظور رسیدن به جواب برای این معادلات، روش‌های مختلفی در دینامیک سیالات محاسباتی برای گسسته‌سازی و همین‌طور الگوریتم حل آن‌ها موجود می‌باشد که گسسته‌سازی ترم‌های معادلات مورد استفاده در جدول (۳) اشاره شده است. در این تحقیق روش حجم محدود به منظور گسسته‌سازی مورد استفاده قرار گرفته است. الگوریتم مورد استفاده برای حل معادلات گسسته‌سازی شده روش ضمنی و غیرتکراری پیرو می‌باشد [۱۷]. با توجه به هندسه معرفی شده برای مسأله، انواع مختلف شرایط مرزی را دارا می‌باشد که در زیر معرفی می‌گردد.

دیواره‌ها

محور استوانه

در ادامه هر کدام از مرزهای فوق و شرایط مرزی خاص هر کدام از معادلات بر آنها معرفی می‌گردد.

دیواره‌ها

شرط اصلی روی دیواره‌های شرط عدم لغزش می‌باشد، در نتیجه میدان سیال به شدت تحت تأثیر می‌باشد. همچنین با توجه به مغشوش‌بودن میدان جریان، در نزدیکی دیواره یکی از پدیده‌هایی که مورد اهمیت می‌باشد، غالب‌شدن نیروهای لزجی بر اینرسی خواهد بود، در نتیجه رینولدز اغتشاشی به مقدار کوچکی میل می‌نماید. یکی از رهیافت‌های حل این پدیده استفاده‌نمودن از توابع دیواره می‌باشد. در این ناحیه نزدیک دیواره، تنش برشی و همچنین نرخ انتقال حرارت ثابت در نظر گرفته می‌شود. یک لایه مرزی مغشوش

جدول ۳. گسسته‌سازی ترم‌های مختلف معادلات و روش حل دستگاه معادلات

Table 3. Discretization of different terms and the method of equation sets

روش حل	نام مسأله
حجم محدود	دیدگاه حل مسأله
اولر - مرتبه اول	تقریب ترم زمانی
ترکیب بالادست و مرکزی	تقریب ترم همرفت
تقریب مرکزی	تقریب ترم هدایت یا پخش
روش ADI با تکرار	حل دستگاه معادله

را به صورت کلی به سه زیرناحیه آرام، بافر و مغشوش تقسیم‌بندی می‌شود که محدوده آن توسط پارامتر بدون بعدشده طول توربولانسی نزدیک دیوار^۱ مشخص می‌شود که کمتر از مقدار $11/63$ در محدوده لزج و بیشتر از آن در محدوده مغشوش قرار می‌گیرد [۱۸]. از نظر دمایی نیز، دیواره‌ها در شرایط دما ثابت قرار دارند.

محور استوانه

از آنجا که سیستم مختصات استفاده‌شده دارای یک قطب می‌باشد، شرایط مرزی برای تمام متغیرها در این نقطه می‌بایست معین باشد. هنگامی که جریان داخل استوانه متقارن محوری می‌باشد، هیچ‌گونه جریانی از قطب عبور نمی‌کند بدین معنی که سرعت سیال در این نقاط صفر بوده و مشتق نرمال تمام متغیرهای دیگر نیز صفر می‌باشند. در حالتی که حل جریان سه‌بعدی می‌باشد نیز این نقاط از دامنه حل جدا شده و در آن نقطه میانگین مقادیر سلول‌های اطراف می‌شود. از علل این انتخاب نیز، به ریزبودن شبکه در نزدیکی مرکز استوانه، و کاهش حجم محاسباتی و همچنین با توجه به نوع مدل‌سازی و عدم حضور قطرات زیاد و اثرپذیری کمتر فاز گاز در آن منطقه، این نوع شرط مرزی در این بخش لحاظ گردیده است.

استقلال از شبکه و صحت‌سنجی

در این بخش به بررسی اسپری و نتایج استقلال از شبکه و گام زمانی و همچنین اعتبارسنجی آن پرداخته می‌شود. همانطور که انتظار می‌رود، مسأله از نوع ناپایا است، همچنین با توجه به بحث‌های معرفی‌شده مبنی بر حرکت قطرات و تصادفی‌بودن حرکت آن‌ها به واسطه پخش آن‌ها، گام زمانی از اهمیت به‌سزایی برخوردار می‌باشد، به همین منظور به استقلال از گام زمانی نیز پرداخته شده است. هندسه مورد مطالعه که در شکل ۱ و ۲ نمایش داده شده است، یک استوانه می‌باشد که دارای قطر $6/4$ سانتی‌متر و ارتفاع 12 سانتی‌متر می‌باشد.

شبکه مورد استفاده در این مطالعه، به صورت قطبی^۲ ایجاد می‌گردد، به این صورت که در نزدیکی مرکز استوانه که محل قرارگیری نقطه پاشش نیز می‌باشد، ریزتر بوده و با دورشدن از آن به مرور درشت‌تر شده، همچنین در سمت دیواره با توجه به اهمیت و اثرگرفتن

1 Y^+

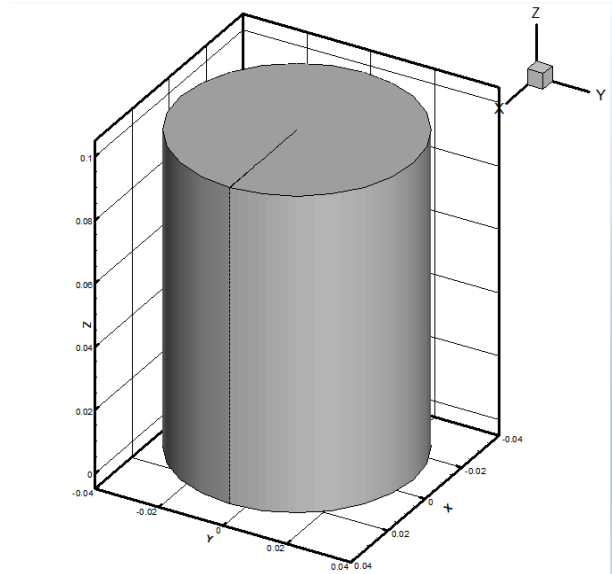
2 Polar

حرکت قطرات و همچنین میدان اصلی جریان از دیواره، شبکه‌بندی ریز شده تا دقت بیشتر شود. حال به بررسی پارامترهای مرتبط با استقلال از شبکه پرداخته می‌شود. به این منظور در شرایطی که پاشش اسپری طبق شکل ۱ از مرکز استوانه و در ارتفاع ۱۲ سانتی‌متر صورت می‌گیرد، بررسی پارامترهای میدان به منظور استقلال از شبکه در فاصله ۱۰ سانتی‌متر از کف استوانه انجام می‌گیرد که منطقه‌ای با گرادیان‌های شدید و نزدیک محل نازل می‌باشد. پاشش به صورت ۴۵ درجه نسبت به محور افقی صورت گرفته است. به منظور تحقق درک بهتر نسبت به شرایط واقعی، استقلال از شبکه در شرایطی مشابه به شرایط مورد استفاده برای اعتبارسنجی که در جدول ۶ و ۷ معرفی گشته‌اند، صورت گرفته است.

در بحث بررسی استقلال از شبکه، با توجه به حرکت‌های تصادفی فاز گسسته تفاوت‌های اندکی بین مقادیر وجود خواهد داشت. همچنین برای استقلال از شبکه، مقایسه سرعت‌ها در سه راستا بررسی می‌گردد تا بتوان به نتیجه حاصل‌شده اتکا نمود که نتایج آن در شکل ۳ تا ۵ نمایش داده شده است. پس از بررسی استقلال از شبکه، شبکه مطلوب مسأله، شبکه دوم انتخاب شده است.

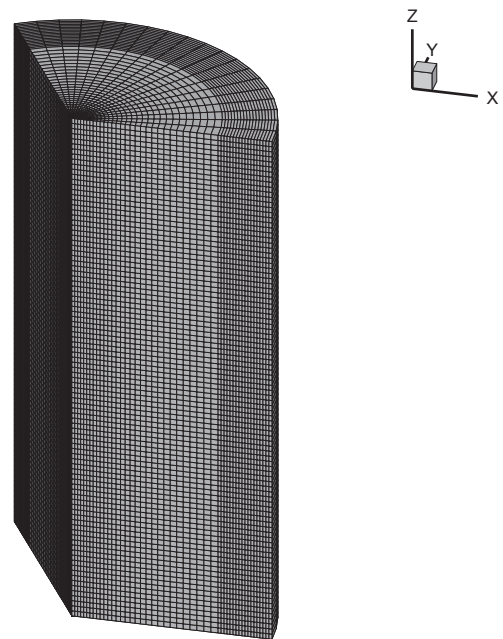
با توجه به ناپایابودن معادلات، بررسی استقلال از گام زمانی از جمله مواردی می‌باشد که باید مورد بررسی قرار گیرد که در جدول ۵ گام‌های زمانی مختلف معرفی شده و در شکل‌های ۶ و ۷ دو میدان سرعت که به علت زاویه پاشش عمودی تا ۴۵ درجه نسبت به خط مرکزی از اهمیت بیشتری برخوردار هستند، مورد مقایسه قرار گرفته‌اند و گام زمانی دوم به عنوان گام زمانی مناسب انتخاب شده است.

به منظور اطمینان از عملکرد کد اسپری و بررسی دقت و صحت مدل‌های موجود در آن، با نتایج تجربی اعتبارسنجی صورت می‌گیرد. این دسته از نتایج آزمایشگاهی که در بخش شبکه تحقیقاتی موتور آزمایشگاه سنندیا قرار دارد به اسپری نوع A مشهور است [۱۹]. این



شکل ۱. هندسه مورد استفاده در پژوهش به منظور پاشش اسپری در آن

Fig. 1. the geometry of the study



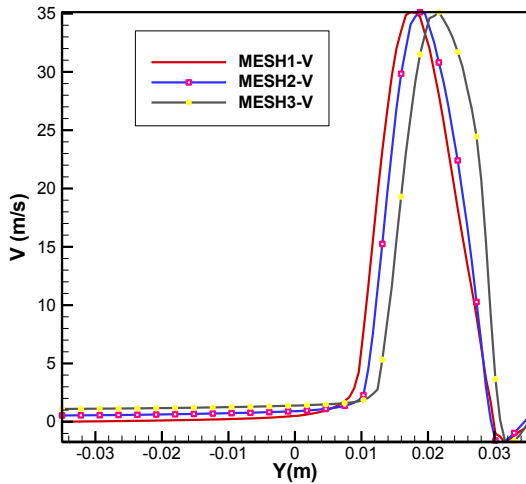
شکل ۲. نمای برش‌زده از شبکه مورد استفاده

Fig. 2. the face of the grid of the study

جدول ۴. مشخصات شبکه‌بندی‌های مورد مطالعه

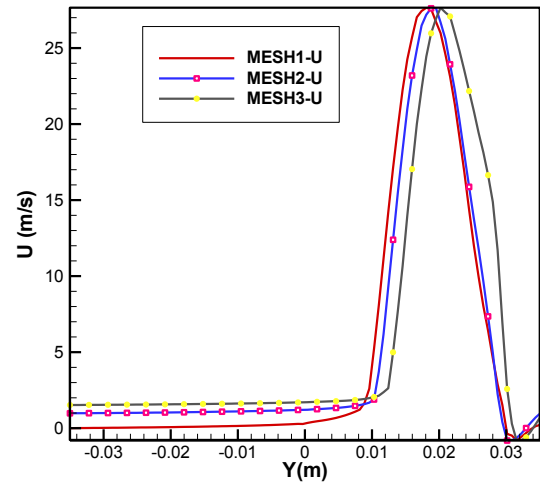
Table 4. The information of grid of the study

شماره شبکه	تعداد شبکه در جهت شعاعی	تعداد شبکه در جهت زاویه‌ای	تعداد شبکه در جهت محوری	تعداد کل شبکه
مش ۱	۴۰	۴۰	۱۰۰	۱۶۰۰۰۰
مش ۲	۶۰	۶۰	۱۲۰	۴۳۲۰۰۰
مش ۳	۸۰	۸۰	۱۵۰	۹۶۰۰۰۰



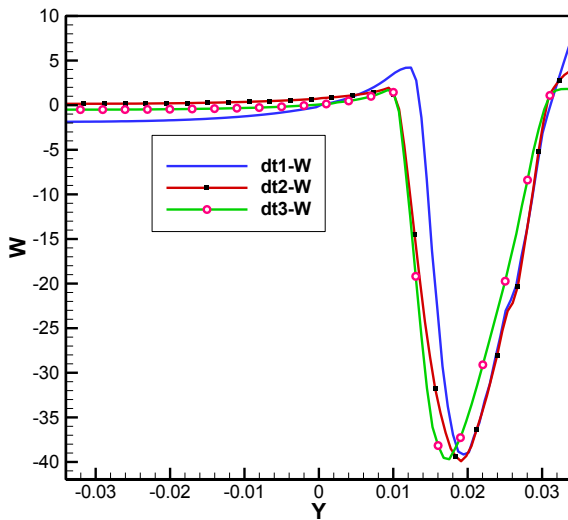
شکل ۴. مقایسه سرعت راستای Y برای سه شبکه

Fig. 4. Comparison of Y velocity for three different meshes



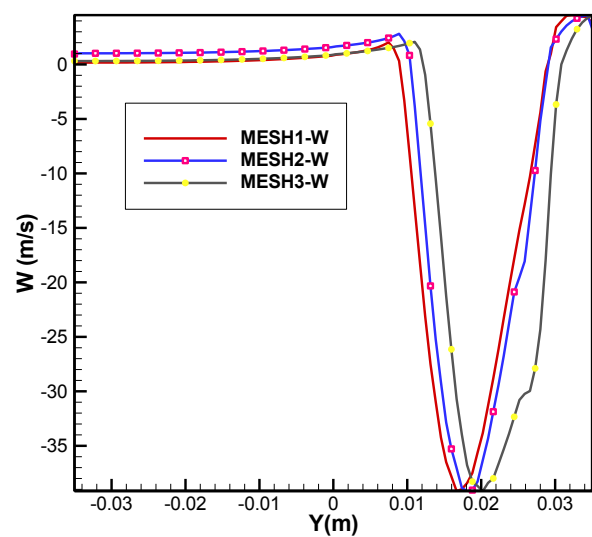
شکل ۳. مقایسه سرعت راستای X برای سه شبکه

Fig. 3. Comparison of X velocity for three different meshes



شکل ۶. مقایسه سرعت محوری در برای سه گام زمانی

Fig. 6. Comparison of Cylindrical axis velocity for three different Timestep



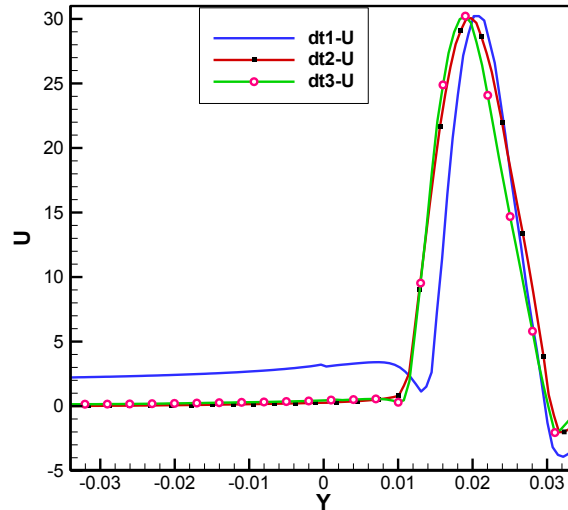
شکل ۵. مقایسه سرعت محوری در برای سه شبکه

Fig. 5. Comparison of Cylindrical axis velocity for three different meshes

جدول ۵. گام های زمانی مورد بررسی به منظور استقلال از گام زمانی

Table 5. Different timestep for consideration of timestep independy

مقدار گام زمانی	نام گام زمانی
۶ (μs)	گام زمانی اول
۳ (μs)	گام زمانی دوم
۱/۴۸ (μs)	گام زمانی سوم



شکل ۷. مقایسه سرعت راستای X برای سه شبکه

Fig. 7. Comparison of X velocity for three different timestep

جدول ۶. مشخصات اسپری مورد استفاده برای داده‌های تجربی [۱۹]

Table 6. the information of the experimental spray [19]

پارامتر	مقدار (واحد)	پارامتر	مقدار (واحد)
مدت زمان پاشش	۱/۵ (ms)	دمای سوخت	۳۶۳ (K)
میزان سوخت پاشش شده	۳/۴۶ (mg)	نوع سوخت	نرمال هپتان
دمای محفظه	۴۴۰ (K)	فشار محفظه	۲/۹۳ (MPa)
کسر مولی نیتروژن در محفظه	۱۰۰ (%)	قطر نازل	۰/۰۸۴ (mm)
چگالی گاز محفظه	۲۲/۸ (kg/m ³)	فشار نازل	۱۵۰ (MPa)

شبیه‌سازی شوند.

اختلاف لحظات اول مقایسه نتیجه طول نفوذ اسپری بین نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی که در شکل ۹ نمایش داده شده است به این علت است که در شبیه‌سازی عددی تمامی قطرات از ابتدا به صورت کامل اتمیزه شده وارد محیط می‌شوند ولی در حالت آزمایشگاهی، اسپری به صورت ستونی از مایع و فرم لیگامنت با مومنتوم بیشتری وارد می‌شوند و در نتیجه در مراحل ابتدایی طول نفوذ نسبت به نتایج تجربی کمتر شده است. همچنین صحت‌سنجی‌های تکمیلی کد مورد استفاده در این پژوهش، در مقالات دیگر این گروه گزارش شده است [۲۰]

نتایج

در این بخش به ارائه نتایج دو هیدروکربن اکسیژن‌دار مطرح

آزمایش با تزریق سوخت و انجام اندازه‌گیری‌ها در یک محفظه ساکن و بسته انجام می‌شود.

نرخ ورود سوخت به محفظه احتراق نیز در شکل ۸ به نمایش درآمده است.

به منظور مقایسه نتایج با نتایج تجربی به مقایسه عمق نفوذ اسپری که می‌تواند نماینده‌ای از همه پدیده‌های درگیر در اسپری باشد می‌پردازیم. مشخصات داده‌شده به کد محاسباتی در جدول ۷ آمده است.

با توجه به تفاوت رویکرد اولر-لاگرانژ محاسباتی با فیزیک تجربی و شرایطی که در کد به صورت کاملاً اتمیزه شده وارد می‌شود، از همین رو با نزدیک قراردادن پارامتر متوسط جذر مربع قطر^۱ که نمایه‌ای از قطر متوسط قطرات در تابع توزیع ذرات می‌باشد، برخی از قطرات در شبیه‌سازی بزرگتر از قطر نازل و نزدیک‌تر به واقعیت

1 Sauter mean diameter

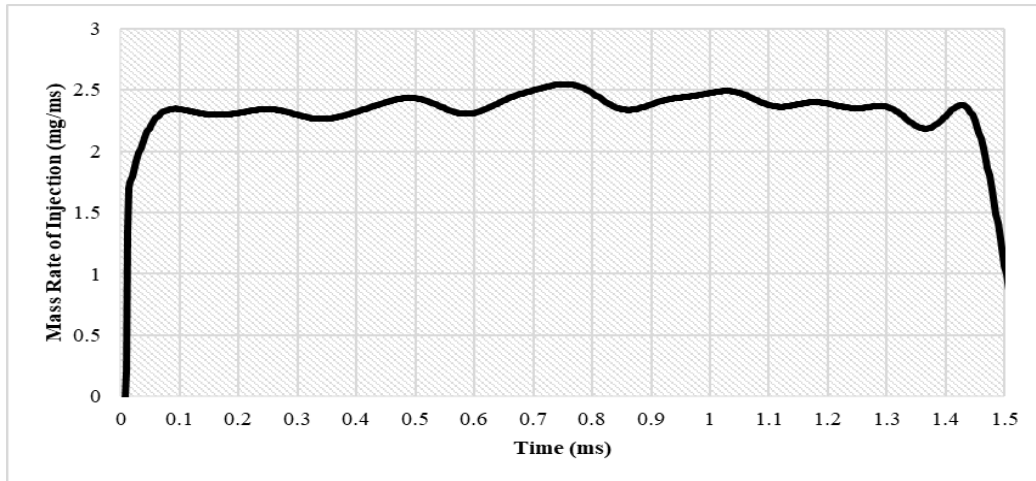


Fig. 8. The mass flow rate in the chamber

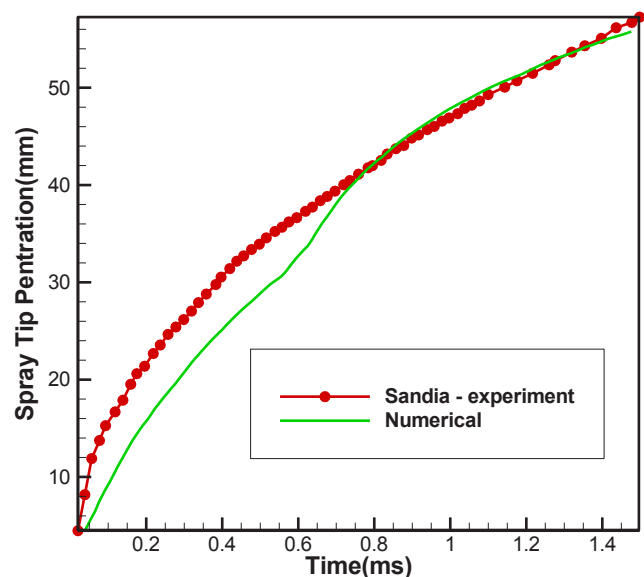
شکل ۸. نرخ ورود سوخت به محفظه احتراق

جدول ۷. اطلاعات برای شبیه‌سازی عددی اسپری با نتایج تجربی

Table 7. The information of the numerical spray

پارامتر	مقدار(واحد)	پارامتر	مقدار(واحد)
مدت زمان پاشش	۱/۵(ms)	دمای سوخت	۳۶۳ (K)
میزان سوخت پاشش شده	۳/۴۶(mg)	نوع سوخت	نرمال هپتان
دمای محفظه	۴۴۰ (K)	فشار محفظه	۲/۹۳(MPa)
چگالی گاز محفظه	۲۲/۸(Kg/m ³)	قطر نازل	۰/۰۸۴ (mm)
		D32	۸۰(μm)

در زمینه‌های سوختی، اتانول^۱ و استون^۲ پرداخته می‌شود. خواص ترموفیزیکی این دو هیدروکربن در مقاله ساژین [۸] آمده است. شرایط شبیه‌سازی نیز در جدول ۸ نمایش داده شده است. اولین نتایج مورد بحث، مقایسه نتایج درصد کلی تبخیر و همچنین طول نفوذ اسپری می‌باشد که از جمله پارامترهای اسکالر می‌باشد. اتانول در ساختار خود دارای پیوند با مولکول اکسیژن می‌باشد و استون گرچه یک کتون است، ولی با دارا بودن اکسیژن در ساختار خود دارای ارزش بالایی می‌باشد، اما پیوند مستقیم هیدروژن و اکسیژن در ساختار مولکولی خود ندارد، در حالی که اتانول همانند اکثر الکل‌ها، پیوند مستقیم هیدروژن و اکسیژن را در ساختار خود دارد. در نتیجه همین تفاوت، انتظار می‌رود پیوندهای قطبی و قوی‌تری در حین تغییر فاز و تبخیر اتانول باید شکسته شود، از همین رو، تبخیر استون



شکل ۹. صحت سنجی کد اسپری با داده های تجربی

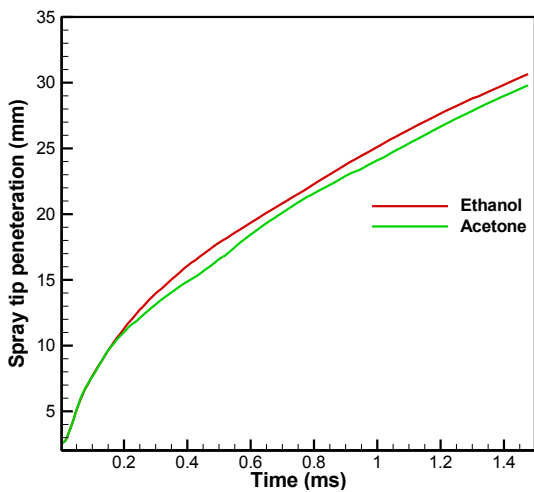
Fig. 9. The validation of numerical code with experimental data

1 Ethanol
2 Acetone

جدول ۸. شرایط پاشش اسپری هیدروکربن‌های اکسیژن‌دار مورد مطالعه

Table 8. Injection condition of Oxygenated hydrocarbons in the study

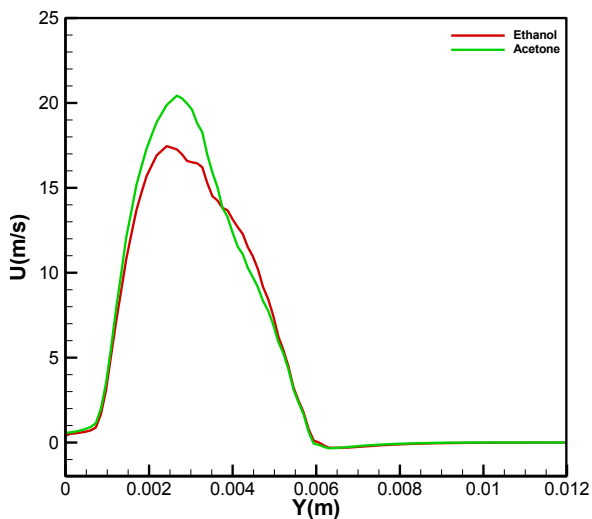
پارامتر	مقدار (واحد)	پارامتر	مقدار (واحد)
دمای محفظه	۵۰۰ (K)	زاویه پاشش	۴۵
دمای دیواره	۵۰۰ (K)	مدت زمان پاشش	۱/۵ (ms)
فشار محیط	۲۵ (bar)	قطر متوسط	۳۰ (μm)
دمای پاشش قطره	۳۰۰ (K)	قطر کمینه	۰/۵ (μm)



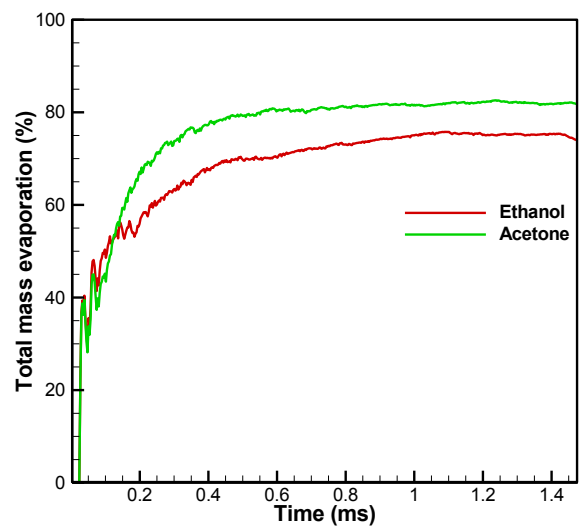
شکل ۱۱. مقایسه طول نفوذ اسپری اتانول و استون
Fig. 11. comparison of spray tip penetration

تبخیر بیشتر و سریع‌تری نسبت به تبخیر اتانول خواهد بود. با توجه به مطالب گفته‌شده در خصوص پیوندهای شیمیایی مطرح‌شده، همانطور که در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است، تبخیر کلی استون به مراتب بیشتر از تبخیر کلی الکل اتانول می‌باشد. همچنین به واسطه همین تبخیر بیشتر، قطرات کمتر و کوچکتر موجود در محیط گازی برای قطرات استون، طول نفوذ اسپری کمتری از این ماده در مقابل طول نفوذ اتانول مشاهده می‌شود.

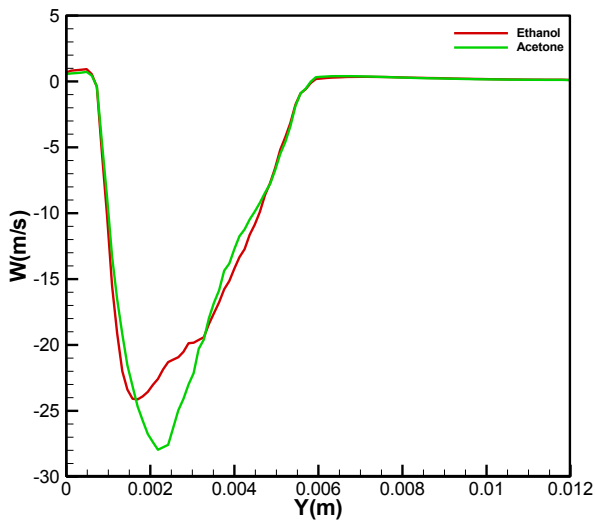
در خصوص اثراتی که تبخیر این دو ماده بر روی فاز گازی می‌گذارند نیز تفاوت‌هایی مشاهده می‌شود که در شکل ۱۲ الی ۱۴ نمایش داده شده است. این مقایسه در شرایط پاشش یکسان پس از ۱/۵ میلی‌ثانیه در صفحه پاشش و فاصله ۲ سانتی‌متری از بالای



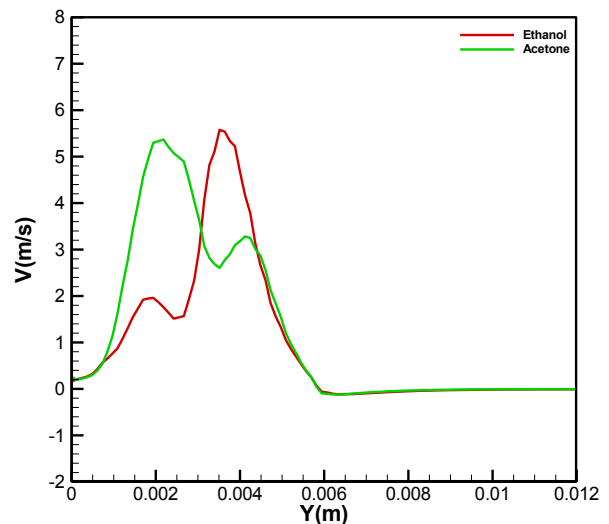
شکل ۱۲. مقایسه سرعت راستای x فاز گاز اسپری اتانول و استون
Fig. 12. Comparison of X velocity of gas flow for ethanol and acetone injected spray



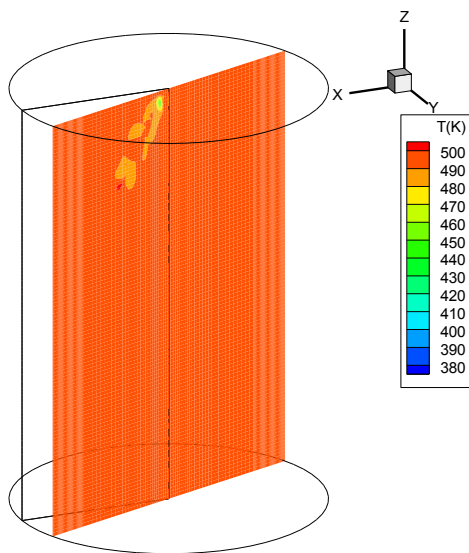
شکل ۱۰. مقایسه تبخیر اسپری اتانول و استون
Fig. 10. comparison of total mass evaporation



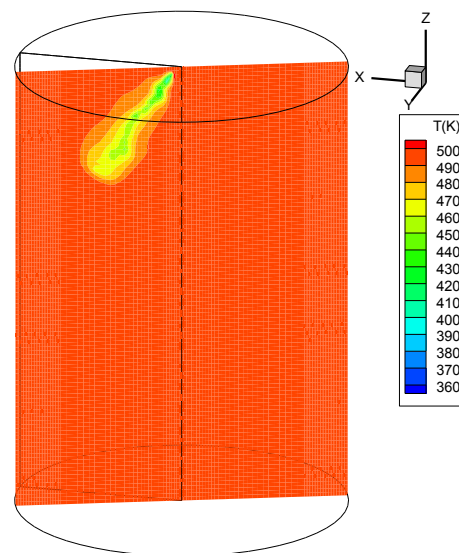
شکل ۱۴. مقایسه سرعت راستای محوری فاز گاز اسپری اتانول و استون
Fig. 14. Comparison of Cylindrical axis velocity of gas flow for ethanol and acetone injected spray



شکل ۱۳. مقایسه سرعت راستای Y فاز گاز اسپری اتانول و استون
Fig. 13. Comparison of Y velocity of gas flow for ethanol and acetone injected spray



شکل ۱۶. میدان دمای اسپری استون در صفحه پاشش اسپری
Fig. 16. The temperature field of gas in the injection plate of acetone spray



شکل ۱۵. میدان دمای اسپری اتانول در صفحه پاشش اسپری
Fig. 15. The temperature field of gas in the injection plate of ethanol spray

همانطور که در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ مشاهده می‌شود، با توجه به حضور بیشتر قطرات اتانول در محیط نسبت به قطرات استون، اثرات بیشتری بر فاز گازی گذاشته‌اند و باعث کاهش دمای بیشتری در فاز گازی شده‌اند. همچنین در پدیده تبخیر در اسپری‌های تبخیری، قطرات به واسطه گرمایش و همچنین شکست‌های پی‌درپی، به سرعت به دمای تبخیر خود رسیده و در دمای ثابت ادامه تبخیر را

محافظه انجام شده است.

طبق نتایج به‌دست‌آمده از شکل ۱۲ الی ۱۴، به علت چگالی بیشتر و وزن مولکولی بیشتر قطرات استون نسبت به قطرات اتانول، در اثر ازدست‌دادن مومنتوم به فازگازی، اثرات بیشتری بر روی فاز گازی خود می‌گذارند. کانتورهای دمایی دو اسپری در صفحه پاشش اسپری بعد از ۱/۵ میلی‌ثانیه نیز به صورت زیر است.

ادامه می‌دهند. با توجه به دمای بالاتر تبخیر اتانول، همین امر باعث می‌شود که قطره نیازمند گرمای بیشتری باشد تا به نقطه‌ای برسد که بیشترین تبخیر خود را انجام دهد. به علاوه، گرمای نهان تبخیر بالاتر که دلایل شیمیایی آن در بخش معرفی مواد ارائه گردید که به علت پیوندهای قوی‌تر آن می‌باشد، گرمای بیشتری از محیط اطراف خود برای تبخیر دریافت نموده است و علی‌رغم نرخ کمتر تبخیر، دمای محیط به مراتب پایین‌تری می‌باشد.

جمع‌بندی

در این مقاله به بررسی اسپری تبخیری دو ماده مختلف استون و اتانول پرداخته شد. از جمله نتایج مهم استخراج‌شده می‌توان به، تبخیر به مراتب بیشتر استون اشاره نمود که البته از منظر پیوندهای شیمیایی به وضوح قابل توجیه است، اما نکته مهم اینجاست که انرژی آزادشده از استون به مراتب از اتانول کمتر خواهد بود. همچنین با توجه به زمان موجود برای تبخیر در کاربردهای مختلف تولید انرژی، زمانی کمتر ۱ میلی‌ثانیه که در این بازه زمانی، محدوده تبخیر هر دو ماده در یک حدود است و استفاده از اتانول به واسطه آزادسازی بیشتر انرژی به شدت قابل توجیه است. همچنین از منظر طول نفوذ و اثراتی که بر روی میدان سرعت فاز پیوسته پس از پاشش اسپری گذاشته می‌شود، دو ماده مختلف تفاوت‌های کمی از خود نشان داده‌اند. از نظر اثرات ناشی از پاشش دو ماده بر روی میدان گازی، اتانول با دارا بودن دمای تبخیر بیشتر نیازمند گرمای بیشتری بوده تا به مرز تبخیر خود برسد و به علاوه، گرمای نهان تبخیر بالاتر که دلایل شیمیایی آن در معادلات مربوط به خواص ماده به صورت پیش‌فرض اعمال گشته است، در نتیجه، گرمای بیشتری از محیط اطراف خود برای تبخیر دریافت نموده است و علی‌رغم نرخ کمتر تبخیر، دارای دمای محیط به مراتب پایین‌تری می‌باشد.

فهرست علائم

علائم انگلیسی

Δ عبارت منبع معادله کلی انتقال

$\Delta_{\phi,d}$ عبارت منبع ناشی از اندرکنش قطرات

ΔV حجم سلول محاسباتی

m جرم (kg)

u سرعت m/s

E انرژی kj/kg

k انرژی توربولانسی kj/kg

Y^+ تابع دیواره

F_{force} نیروهای وارده بر قطره

C_d ضریب درگ

Re_d عدد رینولدز

D_d قطر قطرات

D ضریب پخش جرمی

P فشار

T دما

Z ضریب تصحیح انتقال حرارت و جرم قطرات

C_p ضریب انتقال حرارت ویژه

Sh عدد شروود

Nu عدد ناسلت

علائم یونانی

ρ_g چگالی مخلوط سوخت (kg/m^3)

ϕ پارامتر عمومی به عنوان متغیر

Γ_ϕ ضریب پخش در معادله کلی انتقال

θ کسر حجمی در معادله کلی انتقال

ε نرخ اضمحلال 1/s

μ_{eff} ویسکوزیته موثر

σ ضرایب ناشی از توربولانس

ρ_d چگالی قطرات

مراجع

- [1] J.K. Flores, A review of: William Bartok and Adel F. Sarofim, eds., "Fossil Fuel Combustion". (New York: Wiley, 1991). $99.95, Energy Sources, 14(3) (1992) 331-332.
- [2] M. Al Qubeissi, R. Kolodnytska, S.S. Sazhin, Biodiesel fuel droplets: modelling of heating and evaporation processes, in: 25th European Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, 2013.

- of alternative fuels: A comparative analysis of ethanol–gasoline blends and gasoline, *Fuel*, 86(10) (2007) 1645-1650.
- [12] L.-S. Fan, C. Zhu, *Principles of gas-solid flows*, (2005).
- [13] A.B. Basset, *A treatise on hydrodynamics: With numerous examples*, Cambridge, Deighton, Bell and Co., England, 1888. .
- [14] J. Boussinesq, *Théorie analytique de la Chaleur mise en harmonie avec la thermodynamique et avec la théorie mécanique de la lumière*, *Monatshefte für Mathematik und Physik*, 15(1) (1904) A67-A68.
- [15] J. Kaur, A.K. Tiwari, J.K. Ratan, *Hydrodynamic Study of Power-Law Fluids across Unconfined Semi-Circular Cylinder at Low Reynolds Numbers: Effect of Orientation angle*.
- [16] T. Chan-Mou, *Mean Value and Correlation Problems connected with the Motion of Small Particles suspended in a turbulent fluid*, Springer Netherlands, 2013.
- [17] B. Ahmadi-Befrui, A.D. Gosman, R.I. Issa, A.P. Watkins, EPISO — An implicit non-iterative solution procedure for the calculation of flows in reciprocating engine chambers, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 79(3) (1990) 249-279.
- [18] S.B. Pope, *Turbulent Flows*, *Measurement Science and Technology*, 12(11) (2001) 2020-2021.
- [19] S. A, in: S.N.L.E.C.N. (ECN) (Ed.) *Spray A*, Accessed 8, <https://ecn.sandia.gov/ecn-data-search/>. Nov 2017.
- [20] A. P. Watkins and H. Khaleghi, “Three dimensional diesel engine spray modeling,” in *International symposium on computers in engine technology*, Cambridge, 1987.
- [3] C.K. Law, H. Law, A d2-law for multicomponent droplet vaporization and combustion, *AIAA journal*, 20(4) (1982) 522-527.
- [4] G.L. Borman, J.H. Johnson, *Unsteady Vaporization Histories and Trajectories of Fuel Drops Injected into Swirling Air*, in, SAE International, 1962.
- [5] B. Abramzon, W.A. Sirignano, *Droplet vaporization model for spray combustion calculations*, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 32(9) (1989) 1605-1618.
- [6] S. Sazhin, A. Elwardany, P. Krutitskii, V. Depredurand, G. Castanet, F. Lemoine, E. Sazhina, M.R. Heikal, *Multicomponent droplet heating and evaporation: Numerical simulation versus experimental data*, *International Journal of Thermal Sciences - INT J THERM SCI*, 50 (2011) 1164-1180.
- [7] C. Maqua, *Contribution à la compréhension de l'évaporation de gouttes de combustible bi-composant à l'aide de méthodes optiques*, 2007.
- [8] S.S. Sazhin, A. Elwardany, P.A. Krutitskii, G. Castanet, F. Lemoine, E.M. Sazhina, M.R. Heikal, *A simplified model for bi-component droplet heating and evaporation*, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53(21) (2010) 4495-4505.
- [9] H.J. Kim, H.K. Suh, S.H. Park, C.S. Lee, *An Experimental and Numerical Investigation of Atomization Characteristics of Biodiesel, Dimethyl Ether, and Biodiesel–Ethanol Blended Fuel*, *Energy & Fuels*, 22(3) (2008) 2091-2098.
- [10] D.H. Qi, Y.Z. Bian, Z.Y. Ma, C.H. Zhang, S.Q. Liu, *Combustion and exhaust emission characteristics of a compression ignition engine using liquefied petroleum gas–Diesel blended fuel*, *Energy Conversion and Management*, 48(2) (2007) 500-509.
- [11] J. Gao, D. Jiang, Z. Huang, *Spray properties*

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

H. Khaleghi, A. Sadooghi, *Numerical investigation of ethanol and acetone spray injection into gaseous environment*, *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 53(Special Issue 5) (2021) 3213-3226.

DOI: [10.22060/mej.2020.18215.6765](https://doi.org/10.22060/mej.2020.18215.6765)

