

تحلیل تاثیر افزودن نانوذرات آلومینا بر تبخیر قطرات سوخت دیزل در محفظه احتراق مدل توربین گاز

محمد صادق عابدی نژاد^۲

گروه مهندسی مکانیک
دانشکده مهندسی
دانشگاه الزهرا

ابراهیم شریفی سده^۲

دانشکده مهندسی مکانیک
دانشگاه علم و صنعت ایران

فرزاد بازدیدي طهراني^۱

دانشکده مهندسی مکانیک
دانشگاه علم و صنعت ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۴/۲۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۲/۰۸)

چکیده

در مقاله حاضر، تاثیر افزودن نانوذرات آلومینا بر تبخیر قطرات سوخت دیزل مورد تحلیل عددی قرار گرفته است. نانوسوخت حاصل از افزودن ۰/۵ و ۱ درصد حجمی ذرات آلومینا به سوخت پایه دیزل به صورت تک فاز در نظر گرفته شده است. جریان دو فاز متشکل از قطرات سوخت و هوای ورودی با نگرش اوپلر-لاگرانژ مدل سازی شده است. هم چنین، برای تحلیل مشخصه های جریان واکنشی آشفته رهیافت متوسط گیری رینولدز ناویر استوکس به همراه مدل انتقال حرارت تشعشی جهات مجزا و مدل احتراقی فلیملت پایا به کار گرفته شده است. به منظور اطمینان از صحت نتایج مقایسه هایی با نتایج تجربی انجام شده است. نتایج حاکی از آن است که با افزودن نانوذرات آلومینا، ظرفیت گرمایی و طول عمر قطرات سوخت افزایش می یابد. هم چنین، عمق نفوذ قطرات در حضور نانوذرات بیشتر شده و قطرات در فواصل دورتری از ورودی تبخیر می شوند. این نکته بیان گر کاهش نرخ تبخیر قطرات سوخت دیزل در حضور نانوذرات آلومینا است.

واژه های کلیدی: محفظه احتراق مدل، جریان دو فاز، نانوذرات آلومینا، تبخیر قطرات

Analysis of the Influence of Alumina Nanoparticles Addition on Diesel Fuel Droplets Evaporation in the Gas Turbine Model's Combustion Chamber

Farzad Bazdidi-
Tehrani

School of Mechanical
Engineering,
Iran University of Science
and Technology

Ebrahim Sharifi
Sedeh

School of Mechanical
Engineering,
Iran University of
Science and Technology

Mohammad Sadegh
Abedinejad

Department of
Mechanical Engineering,
Faculty of Engineering,
Alzahra University

(Received: 04/July/2020 ; Accepted: 28/April/2021)

ABSTRACT

In the present article, the influence of alumina nanoparticles addition on the evaporation of diesel fuel droplets in the combustion chamber of the gas turbine model has been numerically investigated. The nano-fuel, resulting from adding the alumina nanoparticles in volume fractions of 0.5 and 1 percent, has been considered as a single-phase fluid. To model the two-phase flow, which is consisted of fuel droplets and inlet air, the Eulerian-Lagrangian approach is applied. In order to investigate the characteristics of the reactive spray flow, Reynolds Averaged Navier-Stokes turbulence approach, discrete ordinates radiation heat transfer model, and steady diffusion flamelet combustion model have been employed. Comparisons between the present results and the existing experimental data have been made to evaluate the obtained accuracy. The results show that, with the addition of alumina nanoparticles, the heat capacity and lifetime of fuel droplets are increased. Also, in the presence of nanoparticles, the penetration depth of the droplets increases, and droplets evaporate in further distances from the inlet boundary. This implies a reduction in the evaporation rate of fuel droplets in the presence of alumina nanoparticles.

Keywords: Combustion Chamber Model, Two-Phase Flow, Alumina Nanoparticles, Evaporation of Droplets

۱- استاد (نویسنده پاسخگو): bazdid@iust.ac.ir

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد تبدیل انرژی: Ebrahim_sharifi@mecheng.iust.ac.ir

۳- استادیار: m.abedinejad@alzahra.ac.ir

فهرست علائم و اختصارات

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، به دلیل خواص ترموفیزیکی منحصر به فرد نانوسیالات، توجه بسیاری از محققان به این گروه کاملاً جدید از سیالات جلب شده است [۱]. نسبت بالای سطح به حجم در نانوذرات، آن‌ها را بسیار کاربردی‌تر از هم‌تایانشان در مقیاس میکرون می‌کند [۲]. در نتیجه، پژوهش‌های بسیاری در زمینه تاثیرات این ذرات بر مشخصه‌های ترموفیزیکی، تبخیر و احتراق سیالات مختلف انجام شده است.

اسفه و همکاران [۳ و ۴] تاثیر دما و کسر حجمی ذرات نانو را بر ضریب رسانش گرمایی نانوسیالات بررسی کردند. آن‌ها هم‌چنین در پژوهش دیگری [۵] به بهینه‌سازی رسانش گرمایی و لزجت نانوسیال اتیلن گلیکل در دما و کسر حجمی مختلف پرداختند. سوناوین و همکاران [۶] گزارش کردند که افزودن نانوذرات آلومینا به سوخت توربین گاز هوایی باعث افزایش چشم‌گیر لزجت، ضریب رسانش و ظرفیت ویژه گرمایی سوخت توربین گاز هوایی می‌شود. شریعت‌مدار و پاکدهی [۷] اعلام کردند که افزودن نانوذرات باعث تغییر خواص ترموفیزیکی سوخت مانند رسانش گرمایی، ظرفیت گرمایی و ارزش حرارتی می‌گردند. تنویر و گیائو [۸] گزارش کردند که افزودن نانوذرات فلزی و یا اکسید فلزی (بورون و آلومینا) در غلظت‌های پایین (در غلظت وزنی کم‌تر از ۵ درصد) تاثیری بسیار کمی بر کشش سطحی سیال دارد؛ اما با افزایش غلظت نانوذرات، و افزایش نیروی واندروالسی کشش سطحی نانوسیال افزایش می‌یابد. گامری و رنتر [۹] و هم‌چنین جاود و همکاران [۱۰] گزارش کردند که نرخ تبخیر قطرات سوختی حاوی نانوذرات از مکانیزم کلاسیک مجذور قطر قطره تبعیت می‌کند؛ این در حالیست که برخی دیگر [۱۱] خلاف این مسئله را مدعی شدند. به‌علاوه، گان و گیائو [۱۲]، مهتا و همکاران [۱۳] و گامری و رنتر [۹] گزارش کردند که نرخ تبخیر قطرات با افزودن نانوذرات افزایش می‌یابد؛ در مقابل جاود [۱۴] کاهش نرخ تبخیر این قطرات را گزارش کرد؛ آن‌ها گزارش کردند که تفاوت در نرخ تبخیر قطرات سوختی حاوی نانوذرات با وقوع به هم‌چسبیدن ذرات، که می‌تواند به غلظت نانوذرات و هم‌چنین شرایط محیطی وابسته باشد، مرتبط است. یانگ و همکاران [۱۵] در پژوهش تازه‌ای فرآیند تبخیر قطرات دیزل حاوی نانوذرات سریم‌اکسید را مورد بررسی قرار دادند؛ آن‌ها عنوان کردند که تبخیر قطرات

A	مساحت، m^2
B_m	عدد انتقال جرم اسپالدینگ
C_p	ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت، $J/(kg K)$
$D_{i,m}$	ضریب نفوذ بخار در آب
d_d	قطر قطره
F_D	نیروی پسا
f	کسر مخلوط
H	آنتالپی، J
h	ضریب انتقال حرارت جابجایی، $W/m^2 K$
h_{fg}	گرمای نهان تبخیر
Ir	شدت تشعشع، $J/s sr$
IMF	نسبت دمای جوشش سوخت پایه به نانوذره
m	جرم، kg
M	جرم مولی، g/mol
n	ضریب انکسار در معادله انتقال تشعشعی
Re_d	عدد رینولدز نسبی قطره
s'	بردار جهت پراکنش
S	ترم چشمه
Sh_{AB}	عدد شروود
t	زمان، s
T	دما، K
U, V, W	سرعت، m/s
X, Y, Z	سیستم مختصات
Y_k	کسر جرمی گونه k
علائم یونانی	
α	ضریب جذب
Γ	ضریب دیفیوژن
ρ	چگالی، kg/m^3
σ	ضریب پراکنش
Ψ	متغیر وابسته
ϕ	غلظت حجمی
Φ	تابع فاز
λ	ضریب رسانش گرمایی، $W/m K$
χ	نرخ استهلاک اسکالر، $1/s$
زیرنویس	
bf	سیال پایه
nf	نانوسیال
np	نانوذرات
p	قطره
∞	فاز گاز

محفظه را نمایش می‌دهد. این محفظه به صورت استوانه‌ای با طول ۴۰۰ mm و قطر ۸۰ mm است. سوخت مایع توسط یک سوخت‌پاش هوا-انفجاری واقع در مرکز صفحه ورودی به داخل محفظه اسپری می‌شود. در فاصله ۶۰ mm از صفحه ورودی ۴ جت هوا، هر یک به قطر ۸ mm وجود دارد.

برای گسسته‌سازی هندسه مسئله از یک شبکه ساختار یافته استفاده شده است. برای بررسی استقلال نتایج حاصل از سایز شبکه، از چهار شبکه به ترتیب با تعداد سلول‌های محاسباتی ۲۴۵۳۶۶، ۶۷۷۰۶۰، ۹۲۹۹۸۴ و ۱۳۵۰۹۷۲ استفاده شده است. شکل ۲ نتایج مطالعه‌ی شبکه را در قالب توزیع سرعت محوری روی خط مرکزی محفظه را نمایش می‌دهد؛ با توجه به دقت و هزینه محاسباتی مناسب از شبکه سوم (شبکه ج) برای انجام محاسبات استفاده شده است. بیشینه اختلاف نتایج حاصل از شبکه ج) و شبکه د) کم‌تر از ۱ درصد می‌باشد.

شکل ۳ شبکه نهایی استفاده شده در شبیه‌سازی حاضر را نشان می‌دهد. در ورودی محفظه، به علت وجود گردآیدان شدید فشار و نیز رخ‌دادن واکنش احتراق و تبخیر قطرات، سلول‌های کنار دیواره کوچک‌تر در نظر گرفته شده است. آن‌جایی که برای شبیه‌سازی جریان از مدل آشفتگی Realizable k-ε همراه با مدل منتر- لچنر استفاده شده است، فاصله سلول‌های کنار دیواره به گونه‌ای تنظیم شده است که میانگین Y^+ روی سطح دیواره برابر با ۱ باشد.

۲-۱- شرایط مرزی

هوای ورودی در فشار و دمای محیط به داخل محفظه دمیده می‌شود. دبی جرمی هوای ورودی به محفظه احتراق برابر با $34/7 \text{ kg/h}$ است که از این بین سهم هوای سوخت‌پاش $1/2 \text{ kg/h}$ و سهم هوای جت‌ها $33/5 \text{ kg/h}$ می‌باشد. دمای دیواره‌های محفظه برابر با 900 K و دیواره‌ی ورودی بی‌دررو در نظر گرفته شده‌اند. ضریب گسیل و پراکنش تشعشع گرمایی دیواره‌ها به ترتیب $0/7$ و $0/4$ (مطابق با خواص تشعشعی استیل) لحاظ شده‌اند. در خروجی محفظه (با توجه به تخلیه خروجی در محیط) شرط مرزی فشار در خروجی لحاظ شده است. شرایط مرزی آشفتگی در ورودی و خروجی جریان، قطر هیدرولیکی و

سوختی حاوی نانوذرات متشکل از ۸ مرحله است: پیدایش حباب‌های اولیه داخل قطره، شکل‌گیری لایه متخلخل کروی روی قطره، پیدایش قطرات ثانویه داخل قطره (ناشی از حضور نانوذرات)، به هم پیوستن حباب‌ها، میکرو-انفجار، تبخیر پایا، تجمع ذرات نانو روی سطح قطره و ایجاد یک لایه‌ی متخلخل متراکم روی سطح قطره. این درحالیست که تنها فرآیندهای ۱، ۴، ۵ و ۶ در تبخیر قطرات سوخت خالص رخ می‌دهد.

مهرگان و مقیمان [۱۶] تاثیر افزودن نانوذرات آلومینیوم به سوخت دیزل و اتانول را به صورت عددی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نانو سوخت حاصل از ترکیب نانوذرات آلومینیوم و سوخت دیزل و اتانول را به عنوان یک سیال تک‌فاز در نظر گرفتند و مدل احتراقی اضمحلال گردابه به همراه رهیافت آشفتگی متوسط گیری رینولدز ناویر استوکس را به کار بردند. نتایج آن‌ها حاکی از کاهش نرخ تبخیر قطرات سوخت در حضور نانوذرات آلومینیوم بود. آن‌ها هم‌چنین در پژوهش دیگری رابطه‌ای برای تخمین گرمای نهان تبخیر قطرات سوختی حاوی ذرات نانو ارائه کردند [۱۷].

با وجود تحقیقات گسترده در زمینه افزودن نانوذرات به سوخت‌های مایع، تاکنون مطالعه کاملی در مورد استفاده از این ذرات در محفظه احتراق توربین گاز در کنار مفاهیم پیچیده‌ای هم‌چون جریان دو فاز، جریان آشسته و واکنش احتراق انجام نشده است؛ بنابراین در مقاله حاضر به مطالعه تاثیر افزودن ذرات نانو بر تبخیر قطرات سوخت درون محفظه احتراق مدل توربین گاز پرداخته شده است. بدین منظور از رهیافت آشفتگی متوسط‌گیری رینولدز ناویر- استوکس، مدل احتراقی فلیلمت پایا و مدل انتقال حرارت تشعشعی جهات مجزا همراه با نگرش اوپلر- لاگرانژ، برای بررسی طول عمر، دما و قطر قطرات سوخت، استفاده شده است. جهت سنجش صحت نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی، سرعت، دما و غلظت گونه دی‌اکسید کربن با داده‌های آزمایشگاهی گزارش شده توسط بائر [۱۸] مقایسه شده است.

۲- هندسه و روش حل

برای شبیه‌سازی حاضر از محفظه احتراق مدل ارائه شده توسط بائر [۱۸] استفاده شده است. شکل ۱ شماتیک این

۲-۲- معادلات حاکم

برای مدل‌سازی جریان دوفاز متشکل از هوای ورودی و قطرات سوختی از نگرش اویلر-لاگرانژ [۲۰] استفاده شده است؛ به گونه‌ای که قطرات سوختی به صورت یک فاز گسسته به روش لاگرانژ و هوای ورودی به صورت یک فاز پیوسته به روش اویلری مدل می‌شوند. صورت کلی معادلات حاکم بر فاز پیوسته شامل معادلات بقای مومنتوم، انرژی و کسر جرمی گونه‌ها به صورت رابطه (۱) می‌باشد. هم‌چنین برای مدل‌سازی آشفستگی جریان نگرش متوسط‌گیری رینولدز ناویر استوکس به کار گرفته شده است.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial X}(\rho U \psi) + \frac{\partial}{\partial Y}(\rho V \psi) + \frac{\partial}{\partial Z}(\rho W \psi) \\ &= \frac{\partial}{\partial X}(\Gamma \Psi \frac{\partial \psi}{\partial X}) + \frac{\partial}{\partial Y}(\Gamma \Psi \frac{\partial \psi}{\partial Y}) + \frac{\partial}{\partial Z}(\Gamma \Psi \frac{\partial \psi}{\partial Z}) \\ &+ S_{\psi 1} + S_{\psi 2} \end{aligned} \quad (1)$$

در معادله (۱) نشان‌دهنده متغیر وابسته شامل جرم، مومنتوم، انرژی جنبشی آشفستگی، نرخ اضمحلال انرژی جنبشی آشفستگی، آنتالپی و کسر جرمی گونه‌هاست.

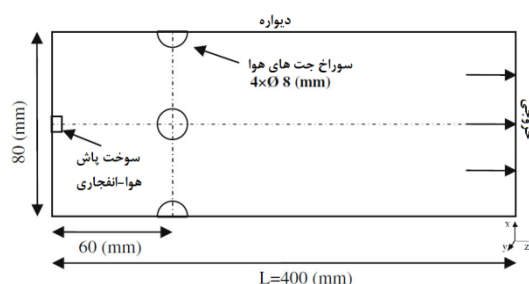
در نواحی نزدیک به سوخت‌پاش قطرات حاصل از اسپری سوخت مایع فاز گسسته‌ای را با کسر حجمی کوچک‌تر از ۱۰ درصد تشکیل می‌دهند که برای مدل‌سازی آن از نگرش لاگرانژ استفاده می‌شود. مسیر حرکت ذره در نگرش لاگرانژی با انتگرال‌گیری از رابطه (۲) به دست می‌آید.

$$\frac{d\bar{u}_p}{dt} = F_D (\bar{u} - \bar{u}_p) \quad (2)$$

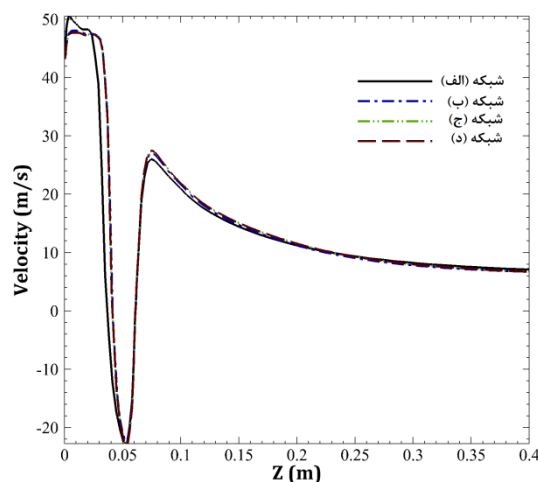
سمت چپ معادله (۲) برابر با اینرسی قطره و سمت راست آن برابر با نیروی پسای وارد بر قطره است. برای مدل‌سازی دمای قطرات از مدل دمای تعادلی استفاده شده است؛ بدین ترتیب دمای کل قطره یکسان در نظر گرفته شده و نیازی به محاسبه انتقال حرارت رسانی در داخل قطره نیست. نرخ تبخیر قطرات سوخت از رابطه (۳) محاسبه می‌گردد.

$$\frac{dm_p}{dt} = \pi d_p \rho_{\infty} D_{i,m} Sh_{AB} \ln(1 + B_m) \quad (3)$$

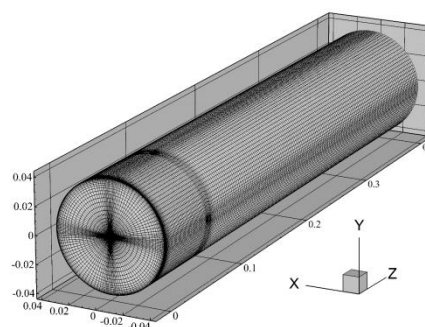
شدت آشفستگی در نظر گرفته شده است. هم‌چنین سوخت مایع دیزل ($C_{10}H_{22}$) با آهنگ جرمی 0.00028 kg/s توسط سوخت‌پاش هوا-انفجاری به داخل محفظه احتراق تزریق می‌گردد. سوخت‌پاش هوا- انفجاری به صورت یک حلقه به قطر 0.7 mm برای خروجی سوخت و حلقه‌ای به ترتیب با قطرهای داخلی و خارجی 1 mm و 3 mm برای خروجی هوا در نظر گرفته شده است.



شکل (۱): شماتیک محفظه احتراق مدل استفاده شده در مطالعه حاضر [۱۸ و ۱۹]



شکل (۲): توزیع سرعت محوری در چهار سایز مختلف شبکه



شکل (۳): شبکه نهایی استفاده شده در شبیه‌سازی حاضر

$$\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{2} \rho \chi \frac{\partial^2 T}{\partial f^2} - \frac{1}{C_p} \sum H_i S_i + \frac{1}{2C_p \rho \chi} \times \left[\frac{\partial C_p}{\partial f} + \sum_i C_{p,i} \frac{\partial Y_i}{\partial f} \right] \frac{\partial T}{\partial f} \quad (7)$$

عبارات Y_i ، $C_{p,i}$ ، C_p ، S_i ، H_i و χ در معادلات (۶ و ۷) به ترتیب برابر با کسر جرمی گونه نام، ظرفیت گرمایی ویژه گونه نام، ظرفیت گرمایی میانگین مخلوط، ترم چشمه نرخ واکنش، آنتالپی ویژه گونه نام و نرخ استهلاک اسکالر هستند.

در یک جریان واکنشی، با توجه به حضور مناطق با دمای بالا، انتقال حرارت تشعشعی نقش عمده‌ای در تبادل حرارت بین سطوح ایفا می‌کند. معادله انتقال حرارت تشعشعی برای یک محیط جذب کننده، منتشر کننده و پراکنده کننده در موقعیت r و در جهت s به صورت معادله (۸) است.

$$\frac{dI(r,s)}{ds} + (\alpha + \sigma_s) I(r,s) = \alpha n \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^4 I(r,s') \Phi(s,s') d\Omega' \quad (8)$$

معادله ۸، یک معادله انتگرالی دیفرانسیلی پیچیده است؛ لذا برای حل آن از مدل جهات مجزا [۲۲] استفاده شده است. همچنین برای دخیل کردن تغییرات ویژگی‌های گازهای احتراق بر خواص تشعشعی از مدل توزیع وزنی مجموع گازهای خاکستری (WSGGM) استفاده شده است. اطلاعات کامل‌تر در مورد مدل‌های فلیمیت، جهات مجزا و نگرش اویلر-لاگرانژ در مراجع [۲۳-۲۴] موجود است.

نانوسوخت حاصل از افزودن ۱/۵ و ۱ درصد حجمی نانوذرات آلومینا به سوخت دیزل به صورت تک فاز مدل‌سازی شده است؛ علت انتخاب این درصدهای حجمی جلوگیری از بروز خطا در به‌کارگیری نگرش تک فاز بوده است. بدین صورت خواص ترموفیزیکی سوخت مایع در حضور نانوذرات طبق روابط (۹، ۱۰ و ۱۱) اصلاح می‌شوند [۱۶].

$$\rho_{nf} = (1 - \phi) \rho_{bf} + \phi \rho_{np} \quad (9)$$

در رابطه (۳) d_p ، ρ_∞ ، $D_{i,m}$ ، Sh_{AB} و B_m به ترتیب بیان‌گر قطر قطره، جرم مخصوص فاز گاز، ضریب نفوذ بخار در فاز گاز، عدد شروود و عدد جرم اسپالدینگ می‌باشند. دمای قطره با استفاده از معادله (۴) به روز رسانی می‌شود. هنگامی که دمای قطره به دمای جوشش می‌رسد، معادله (۵) تحت عنوان معادله جوشش در محاسبات وارد می‌شود.

$$m_p C_{p,p} \frac{dT_p}{dt} = h A_p (T_\infty - T_p) - \frac{dm_p}{dt} h_{fg} \quad (4)$$

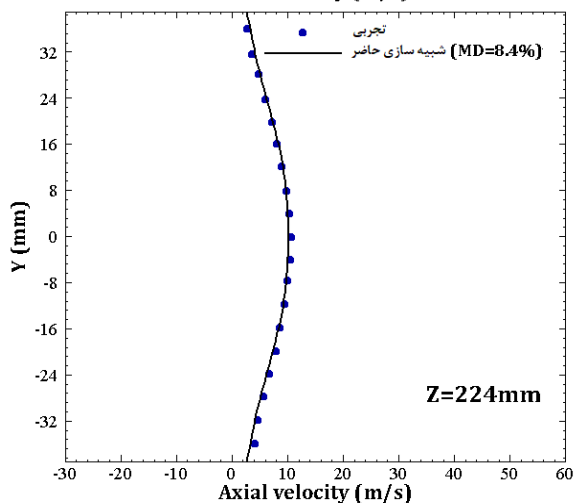
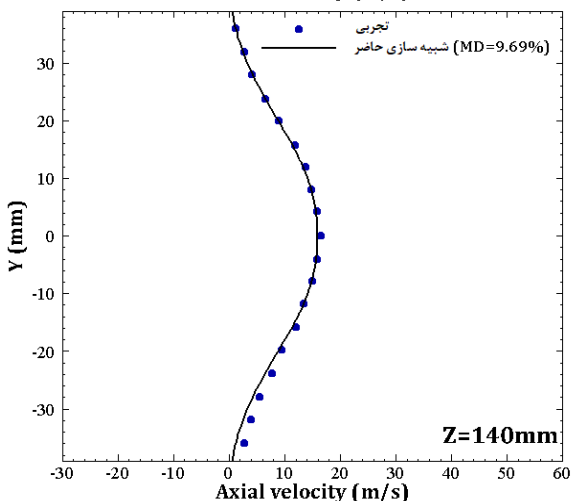
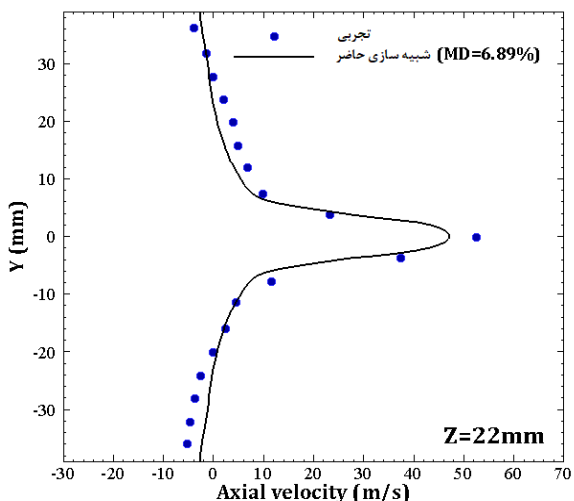
$$\frac{d(d_p)}{dt} = \frac{4\lambda_\infty}{\rho_p C_{p,\infty} d_p} (1 + 0.23 \sqrt{Re_d}) \times \ln \left[1 + \frac{C_{p,\infty} (T_\infty - T_p)}{h_{fg}} \right] \quad (5)$$

در معادلات (۴ و ۵)، T_∞ ، λ_∞ ، h ، T_p ، $C_{p,p}$ و h_{fg} به ترتیب برابر با دمای فاز پیوسته، ضریب رسانش گرمایی فاز پیوسته، ضریب انتقال حرارت جابجایی، دمای قطره، ظرفیت گرمایی ویژه قطره در فشار ثابت و گرمای نهان تبخیر قطره می‌باشند. در شبیه‌سازی حاضر، تعداد ۱۰۰۰۰ پارسل برای مدل‌سازی حرکت قطرات در نظر گرفته شده است. همچنین، با توجه به محدوده کسر حجمی قطرات سوخت و عدد وبر اتصال بین فاز گسسته و فاز پیوسته به صورت دو طرفه لحاظ شده و شکست ثانویه قطرات در محاسبات فاز گسسته منظور نشده است. زمانی که گرادیان دما در داخل قطره کم باشد، مکانیزم غالب انتقال حرارت جابجایی در نظر گرفته شده است.

برای مدل‌سازی احتراق غیر پیش‌آمیخته سوخت دیزل از مدل احتراقی فلیمیت پایا [۲۱] استفاده شده است. برای ارتباط بین آشفته‌گی جریان و احتراق غیر پیش‌آمیخته تابع جرم مخصوص احتمال بتا به کار گرفته شده است. معادلات فلیمیت شامل معادلات کسر جرمی و دما، با تغییر فضای فیزیکی به فضای کسر مخلوط، به صورت معادلات (۶ و ۷) خواهند بود.

$$\frac{\partial Y_i}{\partial t} = \frac{1}{2} \rho \chi \frac{\partial^2 T}{\partial f^2} - S_i \quad (6)$$

مقطع ۲۲ mm نشان گر وجود جریان بازگشتی ناشی از جریان جت‌های هواست.



شکل (۴): مقایسه سرعت محوری حاصل از شبیه‌سازی با نتایج تجربی بائر [۱۸] در فواصل مختلف از صفحه ورودی

$$C_{p,nf} = \frac{(1-\varphi)\rho_{bf}C_{p,bf} + \varphi\rho_{np}C_{p,np}}{\rho_{nf}} \quad (10)$$

$$M_{nf} = (1-\varphi)M_{bf} + \varphi M_{np} \quad (11)$$

در معادلات (۸، ۹ و ۱۰) ρ ، C_p و M به ترتیب بیان‌گر غلظت حجمی نانوذرات، جرم مخصوص، ظرفیت گرمایی ویژه و جرم مولی می‌باشند؛ همچنین اندیس‌های nf ، bf و np به ترتیب نشان‌دهنده خواص نانوسیال، سیال پایه و نانوذرات هستند.

تغییرات گرمای نهان تبخیر سوخت پایه در اثر افزودن نانوذرات به وسیله رابطه (۱۲) محاسبه می‌شود. در این رابطه IMF برابر با نسبت دمایی جوش سیال پایه به نانوذرات است [۱۷].

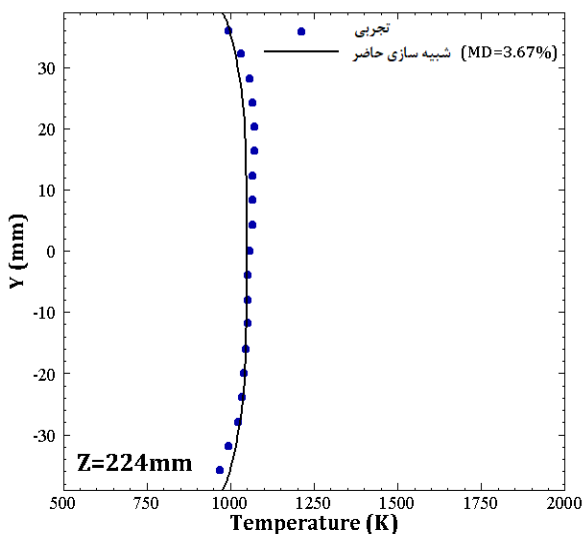
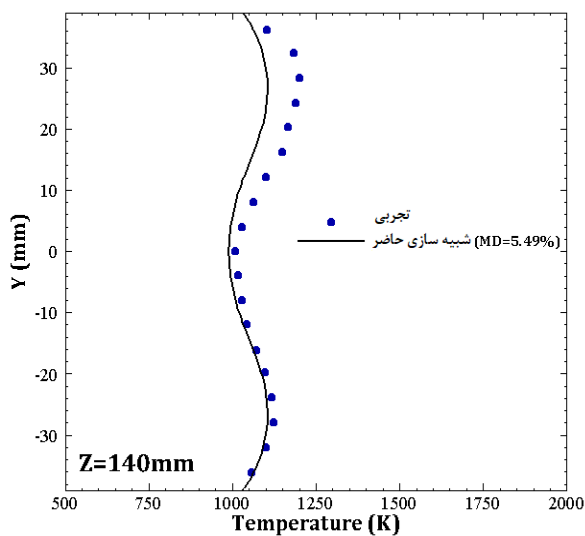
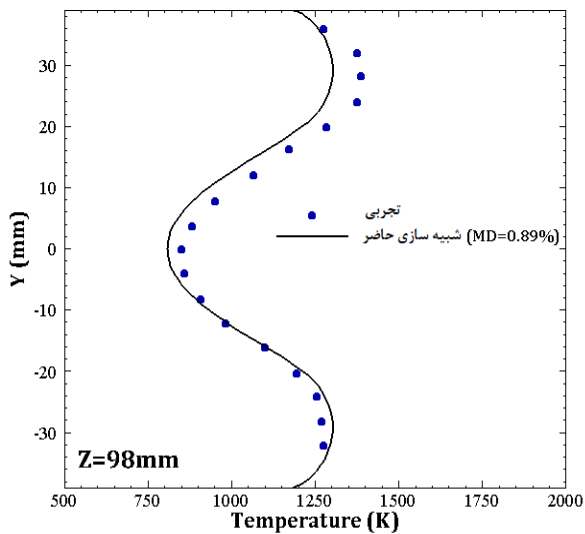
$$(\rho h_{fg})_{nf} = (1-\varphi)(\rho h_{fg})_{bf} + IMF \times \varphi(\rho h_{fg})_{np} \quad (12)$$

۳- نتایج و بحث

جهت سنجش صحت نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی، مقایسه‌هایی با داده‌های آزمایشگاهی گزارش شده توسط بائر [۱۸] صورت گرفته است. مقدار میانگین خطا بین نتایج حاضر و نتایج تجربی (MD) از طریق معادله (۱۲) محاسبه می‌شود.

$$MD = \frac{|data(Exp.) - results(Num.)|}{data(Exp.)} \quad (13)$$

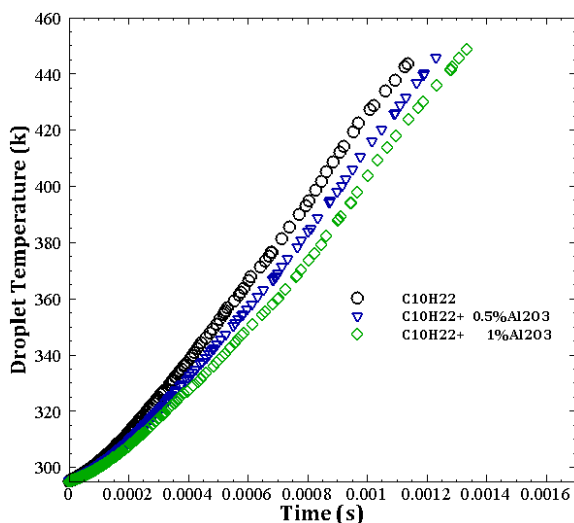
شکل ۴ مقایسه نتایج سرعت محوری حاصل از شبیه‌سازی حاضر با نتایج بائر [۱۸] را در فواصل مختلف از صفحه ورودی نمایش می‌دهد. روند کلی نتایج همانند داده‌های تجربی است و در عین حال نتایج حاضر از دقت مناسبی برخوردارند. از آنجایی که در مقاله بائر [۱۸] اطلاعات مربوط به اسپری به طور کامل گزارش نشده است، اختلاف بین نتایج می‌تواند ناشی از شرایط متفاوت در پاشش سوخت باشد. همچنین سرعت‌های منفی نزدیک دیواره در



شکل (۵): مقایسه نتایج توزیع دما حاصل از شبیه‌سازی حاضر با نتایج تجربی بائر [۱۸] در فواصل مختلف از صفحه ورودی

شکل ۵ مقایسه توزیع دما حاصل از شبیه‌سازی و نتایج تجربی بائر [۱۸] در مقاطع عرضی مختلف از صفحه ورودی را ارائه می‌دهد. مقادیر بالای دما در مقطع ۹۸ mm از صفحه ورودی بیان‌گر وقوع احتراق و حضور شعله در این ناحیه می‌باشد. قطرات ورودی از سوخت پاش پس از برخورد به جریان ورودی از جت‌های هوا به نزدیکی دیواره‌ها رانده شده و در این ناحیه محترق می‌شوند. بنابراین دما در نزدیکی دیواره بالاتر است. با پیش‌روی در محفظه از میانگین دمای محفظه کاسته می‌شود. شکل ۶ کسر مولی دی‌اکسید کربن در شبیه‌سازی حاضر و نتایج تجربی بائر [۱۸] را نمایش می‌دهد. روند کلی نتایج دما و کسر مولی دی‌اکسید کربن نیز با داده‌های تجربی سازگار است. از آن‌جایی که توزیع دما و کسر مولی گونه‌های احتراقی نیز به شدت متأثر از شرایط پاشش سوخت است، خطای اندک این مقادیر نیز می‌تواند ناشی از شرایط متفاوت پاشش سوخت در مقاله حاضر باشد.

فرآیند تبخیر قطرات نانو سوخت‌ها، یک مسئله چند فاز، چند مولفه‌ای و همراه با مقیاس‌های طولی و زمانی مختلف است. فرضیات به‌کار گرفته شده در این پژوهش شامل نانوسیال تک فاز و فرض دمای تعادلی برای قطره سوختی تا حدودی از پیچیدگی این موضوع می‌کاهد. طبق معادله ۴ عبارت‌های mC_p و h_{fg} عامل تعیین‌کننده تغییرات دمای قطره سوختی هستند. با صرف‌نظر از تغییرات جزئی قطر قطره متأثر از تغییر کشش سطحی در حضور نانوذرات، می‌توان عبارت mC_p را معادل با ρC_p دانست (mC_p برابر با ظرفیت گرمایی قطره سوختی در فشار ثابت است). با افزودن نانوذرات آلومینا ظرفیت گرمایی ویژه سوخت (C_p) کاهش اندک و جرم مخصوص سوخت (ρ) افزایش چشم‌گیری را تجربه می‌کنند. از این رو ظرفیت گرمایی قطره سوختی افزایش می‌یابد. با افزایش این مقدار گرما و زمان بیشتری برای رسیدن قطره به دمای جوشش آن لازم خواهد بود. شکل ۷ تغییرات دمای بزرگ‌ترین سائز قطرات برای سوخت خالص و نانو سوخت دیزل آلومینا در غلظت‌های حجمی ۰/۵ و ۱ درصد را نمایش می‌دهد. با افزودن نانوذرات آلومینا و افزایش ظرفیت گرمایی قطرات شیب نمودار تغییرات دما کاهش می‌یابد و قطرات مقاومت بیشتری در برابر تغییر دما از خود نشان می‌دهند.

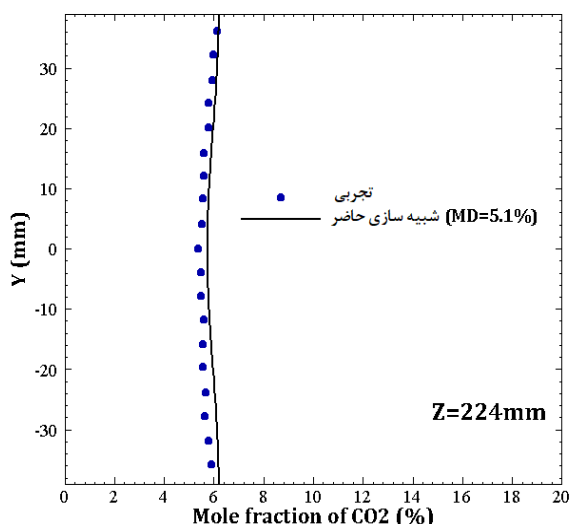
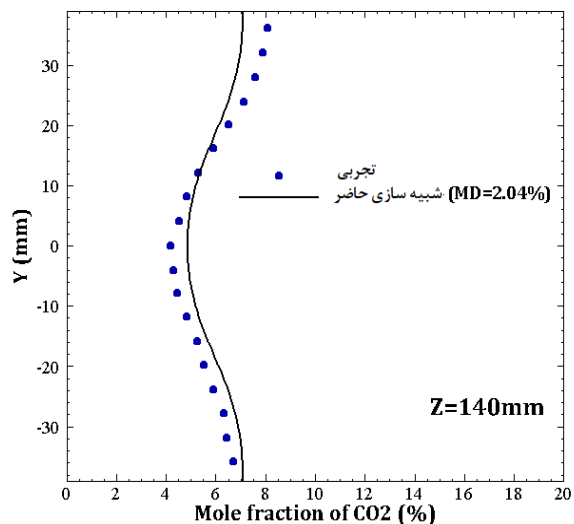
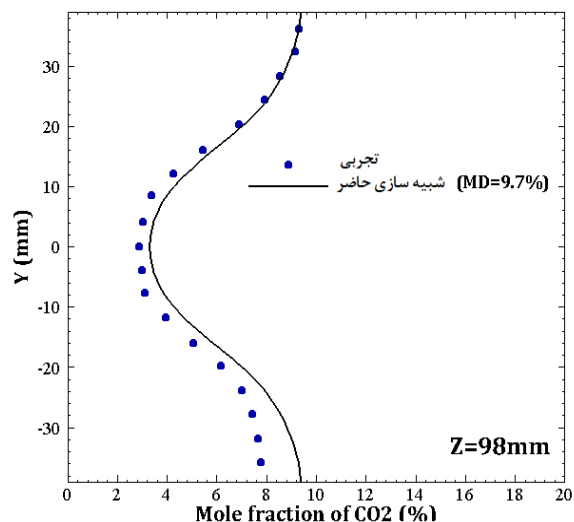


شکل (۷): تغییرات دمای بزرگ‌ترین سایز قطرات برای سوخت خالص و نانوسوخت دیزل آلومینا

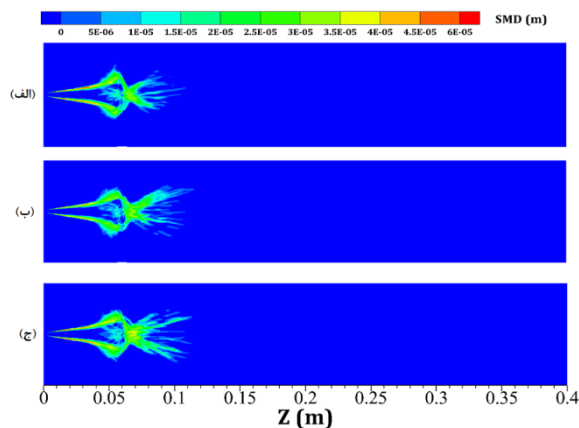
افزودن نانوذرات آلومینا به سوخت دیزل باعث افزایش گرمای نهان تبخیر قطرات سوختی می‌شود [۱۷]. این تاثیر به واسطه معادله (۱۲) اعمال می‌شود. در واقع افزایش گرمای نهان تبخیر قطرات باعث طولانی شدن دوره تغییر فاز قطره می‌گردد. شکل ۸ تغییرات دمای قطرات سوخت خالص و نانوسوخت را در مراحل مختلف تبخیر، برای قطرات سایز میانی، نمایش می‌دهد. ملاحظه می‌شود که با افزودن ذرات نانو علاوه بر کاهش شیب رسیدن به نقطه جوشش، دوره تغییر فاز قطرات سوختی نیز افزایش می‌یابد.

شکل ۹ طول عمر قطرات سوخت خالص و نانوسوخت دیزل-آلومینا را برای بزرگ‌ترین سایز قطرات نشان می‌دهد. مشاهده می‌گردد که افزودن ذرات نانو علاوه بر به تاخیر انداختن شروع دوره‌ی تاخیر فاز، باعث افزایش طول عمر قطرات سوختی نیز می‌گردد؛ به گونه‌ای که با افزودن ۰/۵ و ۱ درصد نانوذرات آلومینا طول عمر بزرگ‌ترین سایز قطرات به ترتیب ۹/۱ و ۱۸/۱ درصد افزایش می‌یابد.

شکل ۱۰ توزیع میانگین قطر سائر قطرات سوختی را در صفحه مرکزی محفظه ($x=0$) نمایش می‌دهد. با افزودن ذرات نانو و افزایش طول عمر قطرات، عمق نفوذ آنها نیز افزایش یافته و قطرات در فواصل دورتری از صفحه ورودی تبخیر می‌شوند.



شکل (۶): مقایسه نتایج کسر مولی دی‌اکسید کربن حاصل از شبیه‌سازی حاضر با نتایج تجربی بائر [۱۸] در فواصل مختلف از صفحه ورودی

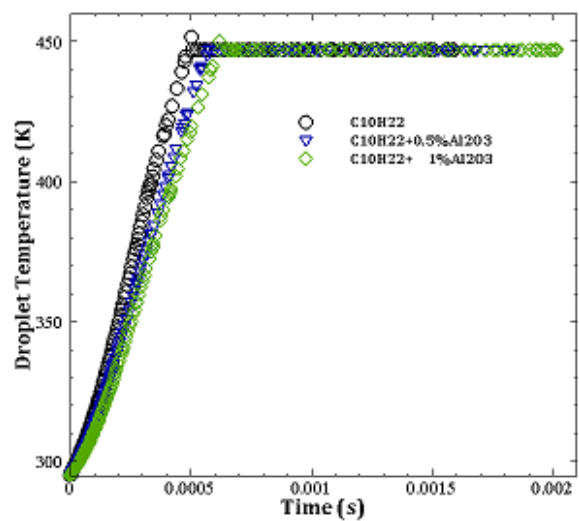


شکل (۱۰): توزیع میانگین قطر سائر قطرات سوختی در صفحه مرکزی محفظه، (الف) سوخت دیزل خالص، (ب) و (ج) به ترتیب سوخت دیزل به همراه ۱/۵ و ۱ درصد آلومینا

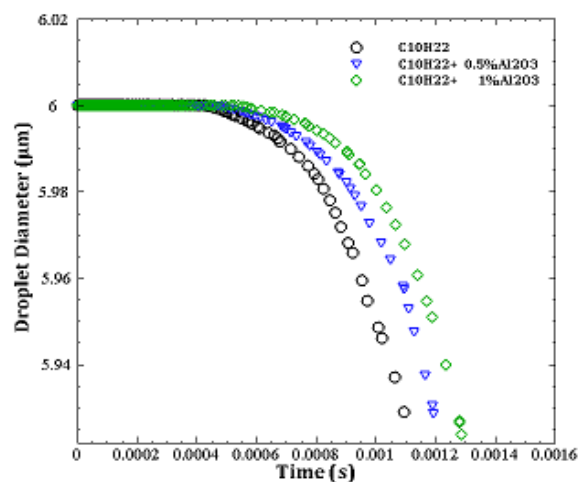
۴- نتیجه گیری

در مقاله حاضر، تاثیر افزودن نانوذرات آلومینا، در غلظت‌های حجمی ۱/۵ و ۱ درصد، به صورت عددی بررسی شد. برای صحت‌سنجی نتایج حاصل از شبیه‌سازی مقایسه‌هایی با داده‌های تجربی موجود صورت گرفت. برای تحلیل مشخصه‌های جریان پاششی واکنشی دیدگاه اویلر-لاگرانژ به همراه رهیافت آشفتگی متوسط‌گیری رینولدز ناویر-استوکس، مدل احتراقی فلیمت پایا و مدل انتقال حرارت تشعشعی جهات مجزا به کار گرفته شد. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که با افزودن نانوذرات آلومینا به سوخت پایه دیزل ظرفیت گرمایی و طول عمر قطرات افزایش می‌یابد؛ به طوری که با افزودن ۱/۵ و ۱ درصد حجمی نانوذرات آلومینا به ترتیب افزایش ۹/۱ و ۱۸/۱ درصدی در طول عمر بزرگ‌ترین سایز قطرات مشاهده می‌گردد. به علاوه، توزیع قطر میانگین سائر قطرات سوخت نشان می‌دهد عمق نفوذ قطرات در حضور نانوذرات بیش‌تر شده و قطرات در فواصل دورتری از صفحه ورودی تبخیر می‌شوند. بنابراین نرخ تبخیر قطرات سوختی در حضور نانوذرات آلومینا نسبت به سوخت خالص کاهش می‌یابد. این روند با افزایش غلظت نانوذرات ادامه می‌یابد.

بدین ترتیب از شکل‌های ۷ تا ۱۰ مشخص می‌شود که افزودن نانوذرات آلومینا تاثیر محسوسی بر تبخیر قطرات سوخت دیزل دارند. نانوذرات آلومینا با افزایش ظرفیت گرمایی و نیز گرمای نهان تبخیر قطرات، باعث کاهش نرخ تغییرات دما و افزایش طول عمر قطرات سوخت می‌گردند؛ به عبارت دیگر حضور نانوذرات آلومینا باعث کاهش نرخ تبخیر قطرات می‌شود. این روند با افزایش غلظت نانوذرات ادامه می‌یابد.



شکل (۸): تغییرات دمای قطرات سایز میانی سوخت خالص و نانوسوخت را در مراحل مختلف تبخیر



شکل (۹): طول عمر بزرگ‌ترین سایز قطرات سوخت خالص و نانوسوخت

۵- مراجع

- Elevated Temperatures”, *Combust. Flame*, Vol. 160, no. 12, pp. 2955-2963, 2013.
11. Javed, I., Baek, S.W. and Waheed, K., “Effects of Dense Concentrations of Aluminum Nanoparticles on the Evaporation Behavior of Kerosene Droplet at Elevated Temperatures: The Phenomenon of Microexplosion”, *Exp. Therm. Fluid Sci.*, Vol. 56, pp. 33-44, 2014.
 12. Gan, Y. and Qiao, L. “Evaporation Characteristics of Fuel Droplets with Addition of Nanoparticles under Natural and Forced Convection”, *Int. J. Heat Mass Transf.*, Vol. 54, no. 23-24, pp. 4913-4922, 2011.
 13. Mehta, R.N., Chakraborty, M. and Parikh, P.A. “Nanofuels: Combustion, Engine Performance and Emissions”, *Fuel*, Vol. 120, pp. 91-97, 2014.
 14. Javed, I., Baek, S.W. and Waheed, K. “Evaporation Characteristics of Heptane Droplets with the Addition of Aluminum Nanoparticles at Elevated Temperatures”, *Combust. Flame*, Vol. 160, Nno. 1, pp. 170-182, 2013.
 15. Wang, J., Qiao, X., Ju, D., Wang, L. and Sun, C. “Experimental Study on the Evaporation and Micro-explosion Characteristics of Nanofuel Droplet at Dilute Concentrations”, *Energy*, Vol. 183, pp. 149-159, 2019.
 16. Mehregan, M. and Moghiman, M. “Effect of Aluminum Nanoparticles on Combustion Characteristics and Pollutants Emission of Liquid Fuels—A Numerical Study”, *Fuel*, Vol. 119, pp. 57-61, 2014.
 17. Mehregan, M. and Moghiman, M. “Propose a Correlation to Approximate Nanofluids’ Enthalpy of Vaporization—a Numerical Study”, *International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing*, Vol. 2, no. 1, 2014.
 18. Bauer, H., Eigenmann, L., Scherrer, B. and Wittig, S. “Local Measurements in a Three Dimensional Jet-stabilized Model Combustor”, *ASME*, 1995.
 19. Bazdidi-Tehrani, F. and Zeinivand, H. “Presumed PDF Modeling of Reactive two-phase Flow in a Three Dimensional Jet-stabilized Model Combustor”, *Energ. Convers. Manage.*, Vol. 51, no. 1, pp. 225-234, 2010.
 20. Berlemont, A., Grancher, M. and Gouesbet, G. “Heat and Mass Transfer Coupling between Vaporizing Droplets and Turbulence using a Lagrangian Approach”, *Int. J. Heat Mass transf.*, Vol. 38, pp.3023-3034, 1995.
 1. Prasher, R., Bhattacharya, P. and Phelan, P. E. “Thermal Conductivity of Nanoscale Colloidal Solutions (Nanofluids)”, *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 94, no. 2, 2005.
 2. Yetter, R. A., Risha, G. A. and Son, S. F. “Metal Particle Combustion and Nanotechnology”, *P. Combust. Inst.*, Vol. 32, no. 2, pp. 1819-1838, 2009.
 3. Esfe, M. H., Saedodin, S., Biglari, M. and Rostamian, H., “Experimental Investigation of Thermal Conductivity of CNTs-Al₂O₃/water: a Statistical Approach.” *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, Vol. 69, pp. 29-33, 2015.
 4. Esfe, M. H., Arani, A. A. A. and Badi, R. S., Rejvani, “ANN Modeling, Cost Performance and Sensitivity Analyzing of Thermal Conductivity of DWCNT-SiO₂/EG Hybrid Nanofluid for Higher Heat Transfer”, *J. Therm. Anal. Calorim.*, Vol. 131, no. 3, pp. 2381-2393, 2018.
 5. Esfe, M. H. and Hajmohammad, M. H., “Thermal Conductivity and Viscosity Optimization of Nanodiamond-Co₃O₄/EG (40: 60) Aqueous Nanofluid Using NSGA-II Coupled with RSM”, *J. Mol. Liq.*, Vol. 238, pp. 545-552, 2017.
 6. Sonawane, S., Patankar, K., Fogla, A., Puranik, B., Bhandarkar, U. and Kumar, S.S. “An Experimental Investigation of Thermo-physical Properties and Heat Transfer Performance of Al₂O₃-Aviation Turbine Fuel Nanofluids”, *Appl. Therm. Eng.*, Vol. 31, no. 14-15, pp. 2841-2849, 2011.
 7. Shariatmadar, F.S. and Pakdehi, S.G. “Synthesis and Characterization of Aviation Turbine Kerosene Nanofuel Containing Boron Nanoparticles”, *Appl. Therm. Eng.*, Vol. 112, pp. 1195-1204, 2017.
 8. Tanvir, S. and Qiao, L. “Surface Tension of Nanofluid-type Fuels Containing Suspended Nanomaterials”, *Nanoscale Res. Lett.*, Vol. 7, no. 1, pp. 1-10, 2012.
 9. Ghamari, M. and Ratner, A. “Combustion Characteristics of Colloidal Droplets of Jet Fuel and Carbon Based Nanoparticles”, *Fuel*, Vol. 288, pp. 182-189, Fuel, 2017.
 10. Javed, I., Baek, S.W., Waheed, K., Ali, G. and Cho, S.O. “Evaporation Characteristics of Kerosene Droplets with Dilute Concentrations of Ligand-Protected Aluminum Nanoparticles at

23. Bazdidi-tehrani, F. and Abedinejad, M.S. "Influence of Incoming Air Conditions on Fuel Spray Evaporation in an Evaporating Chamber", Chem. Eng. Sci., Vol. 189, pp. 233-244., 2019.
24. Bazdidi-tehrani, F., Abedinejad, M.S. and Mohammadi, M., "Analysis of Relationship between Entropy Generation and Soot Formation in Turbulent Kerosene/Air Jet Diffusion Flames", Energy fuel, Vol. 33, no. 9, pp.9184-9195, 2019.
21. Pitch, H. and Peters, N. "A Consistent Flamelet Formulation for Non-premixed Combustion Considering Differential Diffusion Effects", Combust. Flame, Vol. 114, no. 1, pp. 26-40, 1998.
22. Moss, J., Perera, S., Stewart, C. and Makida, M. "Radiation Heat Transfer in Gas Turbine Combustors", In Proc. 16th (Int'l) Symp on Air Breathing Engines, Cleveland, OH, 2003.

