ماهنامه علمى پژوهشى





mme.modares.ac.ir

# مقایسه اثر افزودن غلظتهای مختلف نانولوله کربنی و افزایش نسبت جرمی C/H سوخت

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

مایع بر رفتار احتراقی و تابش حرارتی شعله

مهدی بقراطی<sup>1</sup>، محمد مقدمان<sup>2\*</sup>، سند هادی یورحسینی<sup>3</sup>

2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

3- استادیار، مهندسی مکانیک، مجتمع آموزش عالی گناباد، گناباد

\* مشهد، moghiman@um.ac.ir ،91775-1111

چکیدہ	اطلاعات مقاله
حضور ذرات و اتمهای کربن در احتراق سوختهای فسیلی نقش مهمی در انتقال حرارت تابشی و رفتار احتراقی شعلهها دارد. افزایش کربن در شعله میتواند به وسیله استفاده از سوختهای سنگین تر (با نسبت جرمی C/H بزرگتر) یا به وسیله تزریق ذرات کربن به سوختهای سبکتر انجام شود. در این پژوهش اثر افزودن غلظتهای مختلف نانو لوله کربنی چند دیواره با گروه عاملی هیدروکسیل (OH) در سوخت هیدرو کربنی مایع بر توزیع دما و تابش حرارتی شعله اندازه گیری و نتایج با رفتار احتراقی سوختهای مایع با C/H مختلف مقایسه شده است. برای اندازه گیری تابش درخشانی (طیف مرئی) و تابش حرارتی (طول موجهای تابشی مرئی و مادون قرمز) به ترتیب از یک لوکسمتر و ترموپیل استفاده شده است. توزیع دما با استفاده از تصویربرداری حرارتی (طول موجهای تابشی مرئی و مادون قرمز) به ترتیب از یک لوکسمتر و ترموپیل استفاده شده است. توزیع دما با استفاده از تصویربرداری حرارتی و غلظت ذرات دوده با توجه به طول موج تابش حاصل از احتراق آنها اندازه گیری شده است. تابش درخشانی (طیف مرئی) و تابش حرارتی (طول موجهای تابشی مرئی و مادون قرمز) به ترتیب از یک لوکسمتر و ترموپیل استفاده شده است. توزیع دما با استفاده از تصویربرداری حرارتی و غلظت ذرات دوده با توجه به طول موج تابش حاصل از احتراق آن ها اندازه گیری شده است. تابع نشان می دهد افزایش کربن به صورت نانوذرات موجب افزایش سرعت واکنشها، کاهش طول شعله، افزایش دما و افزایش تابش حرارتی می شود افزایش کربن به صورت سوخت سنگین تر (H/) بیشتر) موجب کندی احتراق، افزایش طول شعله، افزایش دما و افزایش تابش حرارتی می شود استفاده از سوخت نانوسیال با کسر جرمی 0.01 در سوخت پایه با 5.47–5.47، موجب افزایش تابش حرارتی به میزان 3.4 موجب افزایش سینتیک شیمیایی، افزایش دام و تابشهای حرارتی و درخشانی می شود و نقطه بیشنه دما در شعله به ابتدای شعله نانوذرات موجب افزایش سینتیک شیمیایی، افزایش دما و تابشهای حرارتی و درخشانی می شود و نقطه بیشنه دما در شعله به ابتدای شعله نزدیکتر	مقاله پژوهشی کامل دریافت: 13 خرداد 1396 ارائه در سایت: 17 شهریور 1396 شعله دیفیوژن نسبت جرمی C/H تابش حرارتی تابش درخشانی
می کردد.	

# Comparison of effects of adding various carbon nanotube concentrations and increasing C/H mass ratio of liquid fuels on combustion behavior and flame thermal radiation

# Mehdi Boghrati<sup>1</sup>, Mohammad Moghiman<sup>1\*</sup>, Seyed Hadi Pourhoseini<sup>2</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

2- Department of Mechanical Engineering, University of Gonabad, Gonabad, Iran

\* P.O.B. 91775-1111, Mashhad, Iran, moghiman@um.ac.ir

#### **ARTICLE INFORMATION** Original Research Paper Received 03 June 2017 Accepted 06 August 2017

Keywords:

Luminosity

ABSTRACT

The particles and atoms of carbon significantly affect radiation heat transfer and combustion behavior of flames. Number of carbon particles within the flame is increased by utilizing fuel with higher C/H mass ratio or adding carbon particles into lighter liquid fuel. In this study, the effect of adding various Available Online 08 September 2017 concentrations of multi-walled carbon nanotubes with hydroxyl functional group into hydrocarbon liquid fuel has been measured on temperature distribution and thermal radiation of the flame. Furthermore, the measured results are compared with the results of combustion behavior of liquid fuels Diffusion flame Nanofluid fuel with higher C/H value. A thermopile sensor and a lux meter were utilized to measure the flame thermal C/H mass ratio radiation (visible and infrared spectrum) and luminosity (visible wavelengths). Thermography technic Thermal radiation and IR image were applied to determine the distribution of temperature and soot within the flame. The results showed that adding nanoparticles into liquid fuel increased the rate of chemical reaction kinetics, temperature and thermal radiation and decreased flame length. In addition, a rise in the value of C/H of the liquid fuel increased temperature, flame length and thermal radiation and reduced the rate of chemical reaction kinetics. By adding 0.01% mass fraction of nanoparticles into the base fuel with C/H=5.47, thermal radiation increased by 3.4% the same as liquid fuel with C/H=5.52. The increase of nanoparticle concentrations increased the rate of chemical reaction kinetics, maximum temperature, thermal radiation and luminosity. In addition, the position of maximum temperature moved closer to the burner.

M. Boghrati, M. Moghiman, S. H. Pourhoseini, Comparison of effects of adding various carbon nanotube concentrations and increasing C/H mass ratio of liquid fuels on combustion behavior and flame thermal radiation, Modares Mechanical Engineering, Vol. 17, No. 9, pp. 205-213, 2017 (in Persian)

#### 1- مقدمه

رشد روز افزون مصرف انرژی، محدود بودن منابع و میزان تولید آلایندههای زیست محیطی حاصل از احتراق دلیل پژوهش های فراوان بر خصوصیات احتراقی و انتقال حرارتی شعله به منظور افزایش راندمان و کاهش انتشار آلاینده هاست. مشخصات تابشی شعله که بخش مهمی از انتقال حرارت شعله به دیواره های کوره را تشکیل می دهد از مهم ترین پارامتر های تأثیر گذار در بازده حرارتی سیستم های احتراقی است [1]. این در حالی است که تابش شعله با تأثیر بر توزیع دما، غلظت آلاینده هایی نظیر اکسیدهای نیتروژن را نیز در خروجی محفظه احتراق تغییر می دهد [2].

پژوهشهای فراوانی پیرامون ویژگیهای انتقال حرارتی شعله سوختهای مختلف و راههای بهبود خواص تابشی شعله به منظور افزایش بازده محفظه احتراق انجام شده است. برای نمونه لاو و همکاران [3] به بررسی خواص تابشی شعله سوختهای مایع و بیودیزل پرداخته و تأثیر کیفی تابش درخشانی بر تابش کلی شعله را مورد بررسی قرار دادند. در پژوهشی دیگر بقراطی و همکاران [4] تأثیر نسبت جرمی کربن به هیدروژن (C/H) سوخت مایع را بر خواص احتراقی، تابش گرمایی، درخشانی و میزان آلایندههای تولیدی در شعله اندازه گیری کرده و یک رابطه کمی بین تابش گرمایی و بابش درخشانی شعله ارائه کردند. افزایش غلظت ذرات دوده در درون شعله از طریق پیش گرمایش سوخت [5] و نیز تزریق مواد حاوی کربن به درون ناحیه صدور تابش و درخشندگی شعله پیشنهاد شده است. این ذرات با حرکت در امتداد شعله اکسید شده و تابش میکند، به طوری که طول موج تابش سوختن ذرات دوده' در ناحیه مرئی نزدیک به مادون قرمز است [9].

با پیشرفتهای حاصل در زمینه نانو فناوری، مطالعه بر افزودن نانوذرات به سوخت پایه به منظور بهبود خواص احتراقی یا کاهش آلایندگی آن مورد توجه پژوهشگران زیادی قرار گرفته است [10]. افزودن نانوذرات با توجه به خواص فیزیکی و شیمیایی آن میتواند تغییرات فراوانی در خواص سوخت مايع پايه ايجاد كند. براي نمونه اين ذرات با ايفاي نقش نانوكاتاليست<sup>۲</sup> خواص احتراقی سوختهای دیزل و بیودیزل را بهبود میبخشد [11]. برخی گزارشها نشان میدهد نانوذرات میتواند به عنوان ذرات دارای انرژی بیشتر هنگام اکسید شدن در سوختها مورد استفاده قرار گیرد [12]. از طرفی دیگر با انتخاب مناسب نانوذرات دارای خاصیت مغناطیسی مانند اکسید آهن" مي توان عملكرد موتور را بهبود بخشيد [13]. برخي پژوهشگران بر اين عقیدهاند که استفاده از برخی نانوذرات غلظت آلاینده NO<sub>x</sub> را نیز کاهش مىدهد [14]، همچنين نانوذرات مىتواند با افزايش نقطه جوش نانوسوخت احتمال افروزش در یک صفحه داغ را افزایش دهد [15]. گان و همکاران [16] در پژوهشی اثر غلظت نانوذرات آهن و برم را بر خواص احتراقی شعله در سوختهای پایه nدکان<sup>†</sup> و اتانول<sup>۵</sup> مورد بررسی قرار دادند. این محققین دریافتند که این ذرات با افزایش غلظت نانوذرات در طول شعله به هم چسبیده و تشکیل کلوخه<sup>ع</sup> میدهند، به طوری که این کلوخهها گاهی پس از سوختن سوخت مایع نسوخته باقی میمانند. چگالی نانوذرات نقش کلیدی در کلوخه شدن ایفا کرد. در پژوهشی دیگر گان و همکاران [17] تأثیر نانوذرات آلومینیوم در سوخت پایه nدکان و اتانول را برررسی کردند. پراکندگی

نانوذرات در سوخت پایه اتانول بهتر از nدکان است. در پژوهشی دیگر اوی و همکاران [18] اثر غلظتهای مختلف اکسید گرافیت<sup>۷</sup>، اکسید آلومینیوم<sup>۸</sup> و اکسید سریم<sup>۴</sup> را بر خواص احتراق قطرهای دیزل مورد آزمایش قرار دادند. نتایج نشاندهنده آن بود که اکسید گرافیت در مقایسه با نانوذرات دیگر دارای احتراقی کامل تر است، از طرفی دیگر سبب کاهش آلایندههای اکسید نیتروژن، دیاکسیدکربن و دیگر ذرات نسوخته جامد می گردد.

نانو لولههای کربنی<sup>۱۰</sup> (CNT) از جمله نانو ذراتی است که کربن عنصر اصلی تشکیلدهنده آن است. از طرفی کربن و هیدروژن عناصر اصلی ساختار شیمیایی سوخت هیدروکربنی است. از آنجا که وجود کربن در نانو لولههای کربنی و سوختهای هیدروکربنی موجب متجانس بودن این ذرات با سوخت هیدروکربنی است، این نانوذرات دارای جایگاه ویژهای در بین نانوذرات افزودنی به سوخت هستند. باشا و همکارش [19] تأثیر افزودن CNT در سوخت پایه بیودیزل<sup>۱۱</sup> تهیه شده از روغن جاتروفا خام<sup>۱۲</sup> را بر خواص احتراقی شعله و تولید اکسیدهای نیتروژن مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان دهنده کاهش زمان افروزش<sup>۱۳</sup> و افزایش زمان تبخیر<sup>۱۴</sup> بود، همچنین این محققین دریافتند که استفاده از این نانوذره در سوخت نرخ تولید اکسیدهای نیتروژن را کاهش میدهد. در پژوهشی مشابه باناپورمات و همکاران [20] اثر افزودن نانو لولههای کربنی چند دیواره<sup>۱۵</sup> را به یک نوع سوخت بیودیزل در یک سیستم موتور دیزل سیلندر پیستونی مورد آزمایش قرار داده و دریافتند که افزودن این نانوذرات سبب بهبود خواص احتراقی سوخت پایه و کاهش تولید آلايندهها مى شود. وحيد و همكاران [21] تأثير افزودن نانوذرات اكسيد آلومینیوم (آلومینا<sup>۱</sup>۶) و نانو لولههای کربنی چند دیواره را بر تابش شعله در مشعل آزمایشگاهی سوخت گاز مایع<sup>۱۷</sup> مورد آزمایش قرار دادند. با توجه به ماهیت متفاوت ذرات یعنی قابل اشتعال و غیرقابل اشتعال بودن آن نتایج متفاوتی حاصل شد. به طور کلی با افزودن آلومینا مقدار دما و شار گرمایی نسبت به سوخت پایه کاهش یافت. این در حالی بود که در مورد نانو لوله کربنی چند دیواره مقدار شار گرمایی تابشی و در نتیجه کل شار تابشی حرارتي افزايش يافت.

مطالعه پژوهشهای پیشین نشان میدهد که نقش نانوذرات در تغییر خواص سوخت پایه دارای اهمیت بسیار است. از طرفی دیگر مطالعه تابش شعله به عنوان یکی از مهمترین مکانیزمهای انتقال حرارت در کورهها با وجود پیچیدگی در مفهوم و مکانیزم میتواند دستیابی به محفظه احتراقی با بازدهی بالاتر را ممکن سازد. با توجه به بررسی مراجع مختلف هنوز مطالعه مدونی در مورد خواص تابشی مشعلهای نفوذی با سوخت نانوسیال انجام نگرفته است. هدف این پژوهش آزمایشگاهی مقایسه تغییرات تابشی گرمایی و خصوصیات احتراقی شعله در سوخت هیدروکربنی مایع و نانوسیال است. غلظتهای مختلف نانولوله کربنی چند دیواره به سوخت مایع پایه با C/H=5.47 اضافه و نتایج با نتایج حاصل از احتراق سوخت مایع با یا 2.5=CH مقایسه گردید، همچنین به منظور تحلیل بهتر تابش گرمایی و نقش ذارت دوده، تابش درخشانی شعله نیز اندازه گیری شد.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Soot <sup>2</sup> Nanocatalyst

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> N-decane

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> Ethanol <sup>6</sup> Agglomerate

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup> Graphite Oxide
<sup>8</sup> Aluminum Oxide

<sup>9</sup> Cerium Oxide

<sup>&</sup>lt;sup>10</sup> Carbon Nano Tubes

<sup>&</sup>lt;sup>11</sup> Biodiesel
<sup>12</sup> Raw Jatropha Oil

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Ignition delay Time

<sup>14</sup> Evaporation Time

 <sup>&</sup>lt;sup>15</sup> Multiwalled Carbon Nanotubes
 <sup>16</sup> Alumina

<sup>&</sup>lt;sup>17</sup> Liquefied Petroleum Gas (LPG)

### 2- تجهیزات آزمایشگاهی

شکل 1 نشاندهنده شماتیک محفظه احتراق است. کلیه واکنشهای احتراقی سوخت مایع داخل کوره از جنس فولاد ضد زنگ<sup>۱</sup> با قابلیت کارکرد در دمای بالا انجام می گیرد.

كوره به شكل استوانه با طول 1.2 متر و قطر 0.45 متر است. چهار روزنه بر کوره به منظور رویت و اندازه گیری پارامترهای مختلف شعله طراحی شده است. این روزنهها به ترتیب دارای فاصلههای 0.15، 0.27، 0.39 و 0.51 متر از محل نصب مشعل در ورودی محفظه احتراق است. مشعل نفوذی (دیفیوژن) مورد استفاده دارای یک چرخنده هوای ورودی است که پاشش سوخت مايع به صورت هممركز و از مركز آن انجام مى گيرد. فشار پمپ سوخت این مشعل 10 بار است. در این نوع شعله سوخت و هوا از دو مسیر جداگانه وارد محفظه احتراق شده و در آنجا با یکدیگر ترکیب و تشکیل شعله میدهند. امکان تغییر میزان هوا و سوخت (نسبت همارزی) از طریق استفاده از نازلهای مختلف با قطرهای مختلف، زاویه و الگوهای پاشش مختلف و تغییر دمپر ورود هوا به درون مشعل به سادگی فراهم بوده و این شرایط سبب کنترل شعله و ایمنی بیشتر آن در مقایسه با شعلههای پیشآمیخته میشود. از اینرو استفاده از شعلههای دیفیوژن در کاربردهای صنعتی در مقایسه با شعلههای پیش آمیخته گسترش بیشتری یافته است. به منظور ساخت نانوسیال از سوخت مایع پایهای استفاده شده است که جدول 1 درصد جرمی عناصر تشکیل دهنده آن را نشان میدهد.

درصد جرمی هر یک از عناصر تشکیل دهنده سوخت پایه توسط دستگاه واریو ال کیوب<sup>۲</sup> که آنالیز عنصری کربن، هیدروژن، نیتروژن و گوگرد<sup>۳</sup> را تعیین می کند، مشخص شده است. نانوذرات مورد استفاده در این پژوهش نانو لوله کربنی چند دیواره است که مشخصات فیزیکی آن در جدول 2 نشان داده شده است.

به منظور ساخت نانوسیال همگن ابتدا نانوذرات جامد به داخل سیال افزوده شده و سپس این مخلوط داخل دستگاه حمام ماوراصوت به مدت یک ساعت قرار داده شده است [22]. برای حصول اطمینان از ساخته شدن مخلوط همگن و پایدار، نمونه تولید شده توسط دستگاه زتا پتانسیل مالورن<sup>†</sup> مورد سنجش قرار گرفت. نمونهها داخل اتانول رقیقسازی شدند. مقدار پتانسیل زتا اندازه گیری شده برای نمونههای مورد سنجش 10.2- میلی ولت بود؛ بنابراین برای شرایط آزمایشگاهی این پژوهش که مصرف بلافاصله سوخت است، نمونهها دارای پایداری مناسبی بودند. لزجت و چگالی سوختهای مورد استفاده در این پژوهش در جدول 3 ارائه شده است. چگالی توسط روش استاندارد آزمون 287-DD و لزجت توسط لزجت سنج برو کفیلد مدل DVIII Ultra در دمای 25 درجه سلسیوس اندازه گیری شده است. شکل 2 سوختهای نانوسیال با غلظتهای مختلف را نشان میدهدکه رنگ نمونه با افزایش غلظت نانوذرات تیرهتر می گردد.

اندازه گیری دما توسط دوربین حرارتی نک آویو<sup>6</sup> مدل G100EX با قابلیت کارکرد در گستره دمایی 40 تا 1500 درجه سلسیوس و دقت 0.08 درجه سلسیوس انجام شده است [23]. به منظور به دست آوردن ماتریس دما کلیه فرایندها مطابق شکل 3 انجام شده است [24]. پس از تصویربرداری طول موجهای مرئی و مادون قرمز از شعله در طول یک زمان مشخص از دو نرمافزار متلب و تحلیلگر اینفرک<sup>2</sup> مدل NS9500 برای تحلیل تصاویر استفاده

$$I_{(i,j)} = \frac{T_{(i,j)} - T_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}}$$
(1)

در این رابطه  $T_{(i,j)}$  مقدار جدید نقطه (i,j) است.  $T_{(i,j)}$  مقدار دما در هر نقطه است. T<sub>min</sub> و  $T_{max}$  به ترتیب مقدار کمینه و بیشینه دما در ماتریس دمایی است.

اندازه گیری شدت تابش تمام طول موجهای تابشی شعله توسط ترموپیل<sup>۷</sup> ساخته شده شرکت کیپ و زونن<sup>۸</sup> انجام گرفته است [25]. ترموپیل متشکل از تعداد مشخصی ترموکوپل است که به صورت سری به یکدیگر متصل هستند. مکانیزم کارکرد این وسیله بر مبنای اثر گرما- الکتریک است. برای حصول اطمینان از نتایج بهدستآمده این وسیله در آزمایشگاه کاملاً عایق تابشی در مقابل تابش جسم سیاه<sup>4</sup> با دمای معین قرار گرفته است. تغییر دمای جسم سیاه سبب تغییر سیگنال خروجی ترموپیل و تغییر ولتان الکتریکی می گردد. تغییر ولتاژ الکتریکی توسط یک مولتیمتر دیجیتال نشان داده میشود. این ترموپیل دارای دقت 0.016 میلیولت بر میلیوات است.

لوکس متر<sup>۱۰</sup> ساخته شده شرکت دکترمتر<sup>۱۱</sup> مدل SM 206 برای اندازه گیری درخشانی شعله مورد استفاده قرار گرفته است [26]. این وسیله توانایی اندازه گیری شدت تابش در گستره طول موج لوکس متر<sup>۱۲</sup> برای اندازه گیری درخشانی شعله مورد استفاده قرار گرفته الکترومغناطیسی نور مریی را داراست. لوکس متر دارای بازه اندازه گیری بین 0.1–399.9 وات بر متر مربع و دقت 5% مقدار اندازه گیری شده است.

آنالیز و تحلیل خطا یکی از مهمترین ملزومات هر کار آزمایشگاهی است. خطای ناشی از دقت تجهیزات اندازه گیری و خطای ناشی از تکرارپذیر بودن آزمایشات در شرایط محیطی و انسانی مختلف مهمترین عوامل خطا در اندازه گیری های آزمایشگاهی است. برای اطمینان از صحت نتایج به دست آمده آزمایش ها در دو نوبت تکرار شده و عدم قطعیت توسعه یافته ناشی از دقت تجهیزات اندازه گیری و تکرار آزمایش با سطح اطمینان %95 (فاکتور پوششی 2=K) محاسبه و با علامت "I" در نمودارهای مربوطه نشان داده شده است. این به این معنی است که به احتمال %95 با تکرار و انجام آزمایشات بعدی نتایج در بازهای که با علامت "I" مشخص شده، قرار خواهند گرفت.

## 3- نتايج و بحث

تمام آزمایشهای انجام شده در این پژوهش در شرایط کاملاً یکسان انجام گرفته است. دبی سوخت و هوا به ترتیب 1.95 و 4.2 کیلوگرم بر ساعت بوده است. دو نوع نانولوله کربنی چند دیواره با گروههای عاملی کربوکسیل<sup>۱۲</sup> (COOH) و هیدروکسیل<sup>۱</sup>((OH) برای ساخت سوخت نانوسیال به کار گرفته

**جدول 1** درصد جرمی عناصر تشکیلدهنده سوخت پایه

Table 1 Elemental composition of base liquid fuel				
S (%)	N (%)	H (%)	C (%)	C/H
0.000	0.090	15.435	84.475	5.47

Inermopile
8 Kipp & Zonen
9 Black Body
10 Lux Meter
11 - 16

- <sup>11</sup> Dr.Meter <sup>12</sup> Lux Meter
- 13 Carboxyl

14 Hydroxyl

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Stainless Steel

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> CHNS Vario el-Cube <sup>3</sup> CHNS Elemental Analyzer

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Malvern

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> NEC Avio

<sup>6</sup> InfRec Analyzer

# مقایسه اثر افزودن غلظتهای مختلف نانولوله کربنی و افزایش نسبت جرمی C/H سوخت مایع بر *ر*فتار احتراقی و تابش حرارتی شعله

مہدی بقراطی و همکاران

T-L-2 Densites and size a site of here first and new effect of first

جدول 2 مشخصات فيزيكي نانو لوله كربني چند ديواره

Table 2 The specifications of multi-walled carbon nanotube					
قطر خارجى	قطر داخلی	طول	مقدار OH-	خلوص	نانوذره
10-20nm	5-10nm	~30µm	3.06 Wt.%	>95 Wt.%	نانو لوله کربنی چند دیواره با گروه عاملی هیدروکسیل (OH-)

# **جدول 3** چگالی و لزجت سوختهای پایه و نانوسیال

Table 5 Density and viscosity of base fuel and nanofilid fuels						
سوخت نانوسیال با درصد جرمی 0.01	سوخت نانوسیال با درصد جرمی 0.006	سوخت نانوسیال با درصد جرمی 0.003	سوخت پايه			
1.55	1.54	1.52	1.50	لزجت (mPa.s)		
	0.786			چگالی (gr/cm <sup>3</sup> )		



شکل 1 شماتیک محفظه احتراق و ابزار اندازه گیری

شد. نانو لوله کربنی چند دیواره با گروه عاملی کربوکسیل پایداری مناسبی را طی همگنسازی در حمام ماورای صوت از خود نشان نداد و نانوذرات کلوخه شدند به طوری که با چشم غیرمسلح نیز قابل رویت بود. در طرف مقابل گروه عاملی هیدروکسیل توانایی همگن شدن مناسبی را داخل سوخت مایع هیدروکربنی نشان داد. نکته دیگر در انتخاب درصد جرمی نانوذرات انسداد نازل در کسر جرمیهای بالاتر است. در آزمایشات انجام شده در این پژوهش در کسرهای جرمی بالاتر از %0.01 روزنه نازل در اثر تهنشینی نانو لولههای

کربنی مسدود شد، طول شعله کاهش یافت و در نهایت مشعل از کار ایستاد؛

بنابراین کسر جرمیهای انتخاب شده برای مقادیر کوچکتر از 0.01% انتخاب شده است. استفاده از نتایج حاصل از تصویر برداری شعله یک روش غیرمخرب و

ارزان قیمت تحلیل مشخصات شعله است. به طور کلی سه نوع تصویر از هر شعله ارائه می شود که عبارت از تصویر مرئی، تصویر مرئی نزدیک به منطقه مادون قرمز و تصویر توزیع دما با استفاده از دوربین حرارتی است. تصویر



Fig. 2 Nanofluid fuels samples

شكل 2 مشخصات ظاهرى سوخت نانوسيال



**Fig. 3** Extraction of desired characteristics from thermal images [24] شکل 3 مراحل بدست آوردن ماتریس دما [24]

مرئی که نشاندهنده طول و حجم شعله و توسط دوربین دیجیتال گرفته شده است، همچنین با توجه به این که ذرات دوده موجود در شعله در طول موجهای مریی نزدیک به محدوده مادون قرمز تابش میکنند [27]، با تصویربرداری مادون قرمز و استفاده از فیلتر مناسب در جلوی لنز دوربین میتوان توزیع کیفی دوده در درون شعله را تعیین کرد. تصویر توزیع کیفی دوده به وسیله به کارگیری فیلتر مناسب در جلوی لنز دوربین به دست میآید شکل 4 طیف عبوری از این فیلتر که با طیف سنج آواتار نیکولت حرارتی<sup>۱</sup> مدل FTIR متحص شده را نشان می دهد [28].

شکل 5 از چپ به راست تصویر مرئی شعله، توزیع کیفی ذرات دوده و توزیع کمی دما را نشان میدهد. تصویر سوم با استفاده از دوربین حرارتی گرفته شده است که توزیع کمی دما را در محدوده شعله نشان میدهد. دوده مهم ترین عامل درخشانی شعله است. همان طور که در شکل مشخص است غلظت ذرات دوده در محدوده میانی شعله با افزایش کسر جرمی به %0.01 افزایش مییابد. غلظت ذرات دوده رابطهای مستقیم با میزان درخشانی شعله داد. نانوذرات کربنی خود نوعی سوخت هیدروکربنی است؛ بنابراین انتظار میرود که در اثر قرارگیری این ذرات جامد بسیار ریز در درون شعله و سوختن آنها، انرژی آزاد شده در اثر واکنش احتراقی این ذرات باعث گسترش منطقه دما بالا در درون شعله گردد. ستون سوم شکل 5 نیز مؤید این موضوع است، به طوری که با افزایش کسر جرمی نانو ذرات به %0.01

شکل 6 اثر غلظت نانوذرات بر توزیع دما در امتداد محور مرکزی شعله را

برای دو حالت سوخت پایه و کسر جرمی (۵) %0.01 نشان میدهد. همان طور که در شکل مشخص است در هر دو حالت نمودار توزیع محوری دما رفتار شعلههای دیفیوژن را دارد، به طوری که دما با شیب زیاد افزایش یافته تا به بیشینه خود میرسد، سپس کاهش مییابد. مقایسه بین این دو حالت نشان میدهد که سوخت نانوسیال با کسر جرمی 0.01% دارای بیشترین دما است که با نتایج حاصل از تصویربرداری با دوربین حرارتی از شعله (شکل 5) نيز همخواني دارد. همان طور كه پيشتر گفته شد دليل اين امر احتراق نانوذرات در درون شعله و آزاد شدن انرژی حاصل از سوختن آنهاست که سبب می شود تا مقدار دمای بیشینه در طول شعله در کسر جرمی %0.01 نسبت به سوخت پایه افزایش یابد، همچنین با توجه به شکل 6 نقطه بیشینه دما در کسر جرمی %0.01 نسبت به سوخت پایه به ابتدای شعله نزدیکتر می گردد. نانوذرات دارای قطر کوچک تری در مقایسه با قطرات سوخت مایع پایه هستند. با توجه به راهنمای سازنده نازل قطر ذرات سوخت مایع پاشیده شده حد 45 میکرومتر است [29]؛ بنابراین فرآیند احتراق بعضی از این ذرات کوتاهتر از احتراق قطرات سوخت مایع پایه بوده و زودتر محترق می شوند، انرژی آزاد شده باعث تسریع نرخ سینتیک احتراق قطرات سوخت مایع می شود. لازمه سوختن مولکول های سوخت مایع شکسته شدن آن هاست. اتمهای کربن برای سوختن باید از زنجیره مولکولی خارج شوند که این عمل نیاز به صرف انرژی دارد.

سوختن نانوذرات به عنوان ذرات کربن خالص انرژی فعالسازی و آزادسازی اتمهای کربن داخل زنجیره مولکولی سوخت مایع را سریعتر فراهم می کند. در نتیجه قطرات سوخت مایع زودتر به انرژی فعالسازی لازم برای انجام واکنش احتراق رسیده و در ناحیه بالادست شعله محترق میشوند. همین امر سبب افزایش دما در ابتدای شعله سوخت نانوسیال نسبت به سوخت پایه می گردد. برای بررسی خصوصیات تابشی شعله دو تابش در محدوده کل طول موجهای تابشی شعله (تابش حرارتی یا گرمایی) و تابشی توسط اندازه گیری کل طول موجهای تابشی شعله انجام گرفته است. درخشانی شعله نشانگر سوختن ذرات دوده در طول شعله است. تغیرات دما در پایین دست شعله به عنوان مثال در فاصله طولی cm 30 m تغییرات دما در بالادست شعله است، به طوری که در پایین دست شعله دمای شعله با نانو ذره کمتر از حالت سوخت پایه (بدون نانو ذره) است. دلیل این



Fig. 4 IR transmittance filter [28]

**شکل 4** طیف عبوری از فیلتر [28]

<sup>1</sup> Thermo Nicolet Avatar



Fig. 5 The images of visible flame, soot distribution and temperature distribution(K) of nanofluid fuel with mass faction of 0.003%, nanofluid fuel with mass fraction of 0.006% and nanofluid fuel with mass fraction of 0.01% and nanofluid fuel with mass fractin and nanofluid fuel with mass fractin and nano

توزیع دما برای سه حالت از بالا به پایین: سوخت نانو سیال با کسر جرمی %0.003، کسر جرمی %0.00 و کسر جرمی %0.01

امر این است که در حالت با نانو ذره بیشینه دمای شعله و ناحیه دما بالای واکنش احتراق به سمت بالادست متمایل بوده و درنتیجه نرخ سینتیک واکنشهای شیمیایی افزایش مییابد. در ناحیه بالادست شعله در سوخت نانوسیال سوخت بیشتری میسوزد. این امر سبب افزایش نرخ انتقال حرارت آنها با دیواره کوره و کاهش توزیع دمای محوری در پایین دست کوره میشود، همچنین افزایش نرخ انتقال حرارت تابشی شعله به دلیل حضور ذرات نانو از جنس دوده در شعله نیز بر کاهش دمای شعله در پایین دست شعله مؤثر است.

در شکل 7 اثر غلظت نانوذرات بر بیشینه دمای شعله نشان داده شده است. همان طور که مشاهده میشود بیشینه دما با افزایش غلظت نانوذرات نیز افزایش مییابد، به طوری که مقدار بیشینه دما در کسر جرمی %0.01، 50 درجه کلوین بیشتر از سوخت پایه است.

شکل 8 تغییرات تابش گرمایی و دمای میانگین شعله را در غلظتهای مختلف نانوذرات نشان میدهد. دمای میانگین شعله توسط میانگینگیری دمای اندازهگیری شده کلیه نقاط در محدوده شعله توسط دوربین حرارتی حاصل میشود. دوربین حرارتی محدوده شعله را با تعداد 240 202 نقطه مشخص میکند. با توجه به شکل 8 تابش گرمایی و دمای میانگین شعله با افزایش کسر جرمی نانوذرات افزایش مییابد. براساس نتایج شکلهای 5-7 با افزایش کسر جرمی نانوذرات به دلیل اضافه شدن انرژی حاصل از احتراق این ذرات به شعله، ناحیه دما بالای شعله و بیشینه دمای شعله و دمای میانگین

شعله افزایش می یابد. براساس قانون استفان بولتزمن، تابش گرمایی شعله تابعی از دو پارامتر دما و ضریب صدور تابش است؛ بنابراین با افزایش کسر جرمی نانوذرات به دلیل افزایش دمای شعله، تابش گرمایی آن افزایش می یابد. از آنجا که ساختار اصلی نانوذرات را کربن تشکیل می دهد، بنابراین با افزایش کسر جرمی نانوذرات در سوخت پایه، غلظت ذرات دوده و کربن جامد نیز در درون شعله افزایش می یابد (شکل 5). افزایش غلظت ذرات کربن



Fig. 6 The effect of nanoparticles mass fraction (0.01%) on the flame distribution along flam axis

**شکل 6** اثر افزودن نانوذرات با کسر جرمی 0.01% بر توزیع دما در جهت محور مرکزی شعله نسبت به سوخت پایه

در شعله نیز سبب افزایش ضریب صدور تابش و در نتیجه افزایش تابش گرمایی شعله خواهد شد. افزودن نانوذرات میزان تولید دوده داخل شعله و در نتیجه درخشانی شعله را تغییر میدهد.

شکل 9 مقایسه بین تغییرات درخشانی شعله و دمای میانگین شعله را در غلظتهای مختلف نانوذرات نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود با افزایش کسر جرمی نانوذرات درخشندگی شعله افزایش می یابد. درخشندگی شعله ارتباط مستقیم با زردسوزی شعله داشته و زردسوزی و رنگ زرد شعله نیز تابع غلظت ذرات جامد کربن و دوده در درون شعله است. از آن جا که ساختار اصلی نانوذرات، ذرات کربن است؛ بنابراین با افزایش کسر جرمی نانوذرات در سوخت پایه غلظت ذرات دوده و کربن جامد نیز در درون شعله افزایش و درخشندگی شعله بیشتر خواهد شد.

شکل 10 مقایسه بین روند تغییرات تابش گرمایی و درخشانی شعله را نشان میدهد. همان طور که مشاهده میشود با افزایش کسر جرمی نانو لولهکربنی هر دو پارامتر تابش گرمایی و تابش درخشانی شعله افزایش



Fig. 7 The effect of nanoparticles mass fractions on maximum temperature of flame

شکل 7 اثر غلظت نانوذرات بر افزایش دمای بیشینه شعله



Fig. 8 The effect of nanoparticles mass fractions on flame means temperature and thermal radiation

شکل 8 اثر غلظت نانوذرات بر دمای میانگین شعله و تابش گرمایی



Fig. 9 The effect of nanoparticles mass fraction on flame luminosity شکل 9 تأثیر غلظت نانوذارت بر درخشانی شعله

مییابد، اما میزان افزایش برای تابش گرمایی و درخشانی یکسان نیست. با افزایش کسرجرمی نانوذرات، شیب تغییرات تابش گرمایی بیشتر از تابش درخشانی است. دلیل این امر این است که در کسر جرمیهای بزرگ هر دو پارامتر افزایش دما ناشی از احتراق نانوذرات و افزایش ضریب صدور تابش ناشی از زرد سوزی سبب تقویت تابش گرمایی شعله میشود. این در حالی است که در کسر جرمیهای کوچک تغییرات دمای شعله ناچیز بوده و صرفاً زردسوزی و افزایش ضریب صدور تابش گرمایی شعله تأثیر میگذارد. شکل 11 مقایسه بین تابش گرمایی سوخت پایه با 2.54–2.6 سوخت

نانوسیال با کسر جرمی %0.0 و سوخت هیدروکربنی مایع با ۲۰۰.2–۱۲) سوخت نانوسیال با کسر جرمی %0.0 و سوخت هیدروکربنی مایع با 5.52–C/H نشان میدهد. با توجه به شکل مشخص می گردد که تابش گرمایی برای دو حالت سوخت نانوسیال با کسر جرمی %0.01 و سوخت هیدروکربنی با C/H=5.52 تقریباً برابر است. افزودن %0.01 نانوذرات به دلیل کوچک بودن کسر جرمی نانوذرات، تغییر محسوسی در مقدار C/H سوخت پایه ایجاد نمی کند؛ بنابراین C/H سوخت نانوسیال و سوخت پایه تقریباً برابر است و در



Fig. 10 Thermal radiation variation vs. flame luminosity شکل 10 تغییرات تابش گرمایی با توجه به تغییرات تابش درخشانی

5- فهرست علایم T دما (K) زیرنویس ها min کمینه max بیشینه علایم یونانی کسر جرمی نانوذرات در سوخت پایه

#### 6- مراجع

- [1] B. Viskanta, *Radiative Transfer of Combustion Systems: Fundamentals and Applications*, pp. 3-5, New York: Begell House, 2005.
- [2] A. J. Bhowal, B. K. Mandal, Radiation effect on temperature distribution and NO formation in a diffusion flame under reduced gravity conditions, *Heat and Mass Transfer*, Vol. 52, No. 2, pp. 227-243, 2016.
- [3] N. D. Love, R. N. Parthasarathy, S. R. Gollahalli, Rapid characterization of radiation and pollutant emissions of biodiesel and hydrocarbon liquid fuels, *Energy Resources Technology*, Vol. 131, No. 1, pp. 012202-012202, 2009.
- [4] M. Boghrati, M. Moghiman, S. H. Pourhoseini, The impact of C/H on the radiative and thermal behavior of liquid fuel flames and pollutant emissions, *the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 39, No. 7, pp. 2395-2403, 2017.
- [5] S. M. Javadi, M. Moghiman, Experimental study of natural gas temperature effects on the flame luminosity and NO emission, *Spray and Combustion Dynamics*, Vol. 4, No. 2, pp. 175-184, 2012.
- [6] S. H. Poorhoseini, M. Moghiman, Experimental study on the effect of coal injection on structure, radiation, temperature and thermal efficiency of natural gas diffusion flames, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 7, pp. 163-168, 2014. (in Persian فارسی)
- [7] S. H. Pourhoseini, A novel configuration of natural gas diffusion burners to enhance optical, thermal and radiative characteristics of flame and reduce NOx emission, *Energy*, Vol. 132, pp. 41-48, 2017.
- [8] S. H. Pourhoseini, M. Moghiman, An experimental study on the effect of synchronous combustion of gas-gasoil on? Luminosity and radiative heat transfer of natural gas flame, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 15, pp. 11-16, 2015. (in Persian فارسى)
- [9] M. Chloe, J. McDaid, Developing and Implementing Advanced Optical Diagnostics for the Investigation of Fuel and Flow Effects on Impinging Jet Flames, PhD Thesis, Department of Mechanical Engineering, The University of Sheffield, September, 2013.
- [10] V. Chandrasekaran, M. Arthanarisamy, P. Nachiappan, S. Dhanakotti, B. Moorthy, The role of nano additives for biodiesel and diesel blended transportation fuels, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Vol. 46, pp. 145-156, 2016.
- [11] H. Tyagi, P. E. Phelan, R. Prasher, R. Peck, T. Lee, J. R. Pacheco, P. Arentzen, Increased hot-plate ignition probability for nanoparticle-laden diesel fuel, *Nano Letters*, Vol. 8, No. 5, pp. 1410-1416, 2008/05/01, 2008.
- [12] D. Wen, Nanofuel as a potential secondary energy carrier, *Energy & Environmental Science*, Vol. 3, No. 5, pp. 591-600, 2010.
- [13] N. S. Sarvestany, A. Farzad, E. Ebrahimnia-Bajestan, M. Mir, N. Sabet Sarvestany, A. Farzad, E. Ebrahimnia-Bajestan, M. Mir, Effects of magnetic nanofluid fuel combustion on the performance and emission characteristics, *Dispersion Science and Technology*, Vol. 35, No. 12, pp. 1745-1750, 2014.
- [14] V. W. Khond, V. M. Kriplani, Effect of nanofluid additives on performances and emissions of emulsified diesel and biodiesel fueled stationary CI engine: A comprehensive review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 59, pp. 1338-1348, 2016.
- [15] Z. Huang, W. Kan, Y. Lu, T. Cheng, L. Yu, X. Hu, Effect of nanoparticle suspensions on liquid fuel hot-plate ignition, *Nanotechnology in Engineering* and Medicine, Vol. 5, No. 3, pp. 031004-031004, 2014.
- [16] Y. Gan, Y. S. Lim, L. Qiao, Combustion of nanofluid fuels with the addition of boron and iron particles at dilute and dense concentrations, *Combustion* and Flame, Vol. 159, No. 4, pp. 1732-1740, 2012.
- [17] Y. Gan, L. Qiao, Radiation-enhanced evaporation of ethanol fuel containing suspended metal nanoparticles, *Heat and Mass Transfer*, Vol. 55, No. 21-22, pp. 5777-5782, 2012.
- [18] J. B. Ooi, H. M. Ismail, V. Swamy, X. Wang, A. K. Swain, J. R. Rajanren, Graphite oxide nanoparticle as a diesel fuel additive for cleaner emissions and lower fuel consumption, *Energy and Fuels*, Vol. 30, No. 2, pp. 1341-1353, 2016.
- [19] J. S. Basha, R. B. Anand, The influence of nano additive blended biodiesel fuels on the working characteristics of a diesel engine, *the Brazilian Society* of Mechanical Sciences and Engineering, Vol. 35, No. 3, pp. 257-264, 2013.
- [20] N. R. Banapurmath, R. Sankaran, A. A. V. Tumbal, N. T. N, A. M. Hunashyal, N. H. Ayachit, Experimental investigation on direct injection diesel engine fuelled with graphene, silver and multiwalled carbon nanotubes-biodiesel blended fuels, *Automotive Engineering and Technologies*, Vol. 3, No. 4, pp. 129-138, 2014.

نتیجه میتوان بدون افزایش مقدار C/H، میزان تابش گرمایی شعله را با افزودن مقدار بسیار ناچیزی نانو لوله کربنی چند دیواره افزایش داد. این در حالی است که افزایش C/H سوخت درعین افزایش تابش گرمایی سبب افزایش تولید گاز گلخانه ای CO2 نیز می گردد [4].

#### 4- نتیجه گیری

در این پژوهش مقایسهای بین تأثیر افزودن کسرهای جرمی نانو لولههای کربنی چند دیواره با گروه عاملی هیدروکسیل و تغییر C/H سوخت مایع بر میزان تابش گرمایی و رفتار احتراقی شعله انجام شد. کسر جرمیهای اعمال شده %0.003، %0.006 و %0.01 بودند. به منظور تحلیل بهتر نتایج از یک دوربین حرارتی استفاده گردید. نتایج به دست آمده به شرح زیر است:

- مقایسه بین سوخت با کسرهای جرمی مختلف نشان داد که با افزایش
   کسر جرمی، دمای میانگین و بیشینه شعله نیز افزایش مییابد.
- نشان داده شد که تابش گرمایی شعله که تابعی از دما و ضریب صدور است، به دمای میانگین شعله وابسته است و با افزایش کسر جرمی افزایش مییابد.
- درخشانی شعله نیز وابسته به دمای میانگین شعله است و با افزایش
   کسر جرمی زیاد می شود.
- رابطه سهموی میان تغییرات تابش گرمایش برحسب تابش درخشانی شعله در کسرهای جرمی مختلف وجود دارد.
- نانوذرات با افزایش سینتیک احتراق و میزان واکنشهای احتراقی
   دمای شعله را زیاد کرده و بیشینه دما را به نازل نزدیکتر میکنند.
- مقدار افزایش تابش گرمایی با افزودن %0.01 از نانوذرات به سوخت پایه با C/H=5.47، به اندازه %3.4 نسبت به سوخت پایه است. این در حالی است که با افزودن این مقدار نانوذرات، مقدار نسبت جرمی C/H در سوخت پایه تغییر نمی کند. این میزان افزایش تقریباً با مقدار افزایش تابش گرمایی سوخت هیدروکربنی با C/H=5.52 برابری می کند.





Fig. 11 Comparison of thermal radiation for three cases: base fuel with C/H=5.47, nanofluid fuel with mass fraction of 0.01% and liquid fuel with C/H=5.52

**شکل 11** مقایسه تابش گرمایی شعله برای سه حالت سوخت پایه با C/H=5.47. افزودن کسر جرمی 0.01 درصد به سوخت پایه و سوخت هیدروکربنی مایع با C/H=5.52

#### مقایسه اثر افزودن غلظتهای مختلف نانولوله کربنی و افزایش نسبت جرمی C/H سوخت مایع بر رفتار احتراقی و تابش حرارتی شعله

[25] CA 2 Laboratory Thermopile, Accessed 2011; http://www.kippzonen.com/Download/28/CA-2-Laboratory-Thermopile-Brochure.pdf.

- [26] SM 206, Accessed 2013; www.drmeter.com.
- [27] N. W. Bressloff, J. B. Moss, P. A. Rubini, Differential total absorptivity solution to the radiative transfer equation for mixtures of combustion gases and soot, *Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals*, Vol. 31, No. 1, pp. 43-60, 1997.
  [28] S. H. Pourhoseini, M. Moghiman, Effect of pulverized anthracite coal
- [28] S. H. Pourhoseini, M. Moghiman, Effect of pulverized anthracite coal particles injection on thermal and radiative characteristics of natural gas flame: An experimental study, *Fuel*, Vol. 140, No. 15, pp. 44-49, 2015.
- flame: An experimental study, *Fuel*, Vol. 140, No. 15, pp. 44-49, 2015.
   [29] Oil Nozzles Types EH and ES, Accessed on May 2010; http://heating.danfoss.com/PCMPDF/DKBDPD060J302.pdf.
- [21] K. Waheed, S. W. Baek, I. Javed, Y. Kristiyanto, Investigations on thermal radiative characteristics of LPG combustion: effect of alumina nanoparticles addition, *Combustion Science and Technology*, Vol. 187, No. 6, pp. 827-842, 2015.
- [22] B. Lamas, B. Abreu, A. Fonseca, N. Martins, M. Oliveira, Assessing colloidal stability of long term MWCNT based nanofluids, *Colloid and Interface Science*, Vol. 381, No. 1, pp. 17-23, 2012.
  [23] ThermoGEAR G120EX/G100EX Series, Accessed 2009;
- [23] ThermoGEAR G120EX/G100EX Series, Accessed 2009; http://www.infrared.avio.co.jp/en/products/ir-thermo/pdf/catalog-g120ex-g100ex-e.pdf.
- [24] O. Doosti-Irani, M. R. Golzarian, M. H. Aghkhani, H. Sadrnia, M. Doosti-Irani, Development of multiple regression model to estimate the apple's bruise depth using thermal maps, *Postharvest Biology and Technology*, Vol. 116, pp. 75-79, 2016.