



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

مهدی بقراتی<sup>1</sup>، محمد مقیمان<sup>2\*</sup>، سید هادی پورحسینی<sup>3</sup>

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

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

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

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

### چکیده

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 سنگین‌تر (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 اندازه‌گیری و نتایج با رفتار احتراقی سوخت‌های مایع با C/H مختلف مقایسه شده است. برای اندازه‌گیری 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 آن‌ها اندازه‌گیری شده است. نتایج نشان می‌دهد افزایش کربن به صورت نانوذرات موجب افزایش سرعت واکنش‌ها، کاهش طول شعله، افزایش دما و افزایش تابش حرارتی و افزایش کربن به صورت سوخت سنگین‌تر (C/H بیشتر) موجب کندی احتراق، افزایش طول شعله، افزایش دما و افزایش تابش حرارتی می‌شود. استفاده از سوخت نانوسیال با کسر جرمی 0.01 درصد نانوذرات در سوخت پایه با C/H=5.47، موجب افزایش تابش حرارتی به میزان 3.4 درصد می‌شود. این میزان افزایش با افزایش تابش حرارتی در سوخت هیدروکربنی با C/H=5.52 برابری می‌کند. افزایش غلظت نانوذرات موجب افزایش سینتیک شیمیایی، افزایش دما و تابش‌های حرارتی و درخشانی می‌شود و نقطه بیشینه دما در شعله به ابتدای شعله نزدیک‌تر می‌گردد.

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: 13 خرداد 1396  
پذیرش: 15 مرداد 1396  
ارائه در سایت: 17 شهریور 1396  
کلید واژگان:  
شعله دیفیوژن  
سوخت نانوسیال  
نسبت جرمی C/H  
تابش حرارتی  
تابش درخشانی

## 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  
Available Online 08 September 2017

#### Keywords:

Diffusion flame  
Nanofluid fuel  
C/H mass ratio  
Thermal radiation  
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 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 with higher C/H value. A thermopile sensor and a lux meter were utilized to measure the flame thermal radiation (visible and infrared spectrum) and luminosity (visible wavelengths). Thermography technic 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.

#### Please cite this article using:

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)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

## 1- مقدمه

رشد روز افزون مصرف انرژی، محدود بودن منابع و میزان تولید آلاینده‌های زیست‌محیطی حاصل از احتراق دلیل پژوهش‌های فراوان بر خصوصیات احتراقی و انتقال حرارتی شعله به منظور افزایش راندمان و کاهش انتشار آلاینده‌هاست. مشخصات تابشی شعله که بخش مهمی از انتقال حرارت شعله به دیواره‌های کوره را تشکیل می‌دهد از مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار در بازده حرارتی سیستم‌های احتراقی است [1]. این در حالی است که تابش شعله با تأثیر بر توزیع دما، غلظت آلاینده‌هایی نظیر اکسیدهای نیتروژن را نیز در خروجی محفظه احتراق تغییر می‌دهد [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 لائو 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 اندازه‌گیری کرده و یک رابطه کمی بین تابش گرمایی و تابش درخشانی شعله ارائه کردند. افزایش غلظت ذرات دوده در درون شعله از طریق پیش‌گرمایش سوخت [5] و نیز تزریق مواد حاوی کربن به درون ناحیه دمای بالای شعله [6-8]، راه‌کارهای دیگری است که برای افزایش ضریب صدور تابش و درخشندگی شعله پیشنهاد شده است. این ذرات با حرکت در امتداد شعله اکسید شده و تابش می‌کنند، به طوری که طول موج تابش سوختن ذرات دوده<sup>1</sup> 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 آلاینده‌گی 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 مایع پایه ایجاد کند. برای نمونه این ذرات با ایفای نقش نانوکاتالیست<sup>2</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<sup>3</sup> می‌توان عملکرد موتور را بهبود بخشید [13]. برخی پژوهشگران بر این عقیده‌اند که استفاده از برخی نانوذرات غلظت آلاینده NO<sub>x</sub> را نیز کاهش می‌دهد [14]، همچنین نانوذرات می‌تواند با افزایش 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 n-دکان<sup>4</sup> و اتانول<sup>5</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>6</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 n-دکان و اتانول را بررسی کردند. پراکندگی

نانوذرات در سوخت پایه اتانول بهتر از n-دکان است. در پژوهشی دیگر اوی و همکاران [18] اثر غلظت‌های مختلف اکسید گرافیت<sup>7</sup>، اکسید آلومینیوم<sup>8</sup> و اکسید سریم<sup>9</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 کامل‌تر است، از طرفی دیگر سبب کاهش آلاینده‌های اکسید نیتروژن، دی‌اکسید کربن و دیگر ذرات نسوخته جامد می‌گردد.

نانو لوله‌های کربنی<sup>10</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 آن جا 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>11</sup> تهیه شده از روغن جاتروفا خام<sup>12</sup> را بر خواص احتراقی شعله و تولید اکسیدهای نیتروژن مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان‌دهنده کاهش زمان افروزش<sup>13</sup> و افزایش زمان تبخیر<sup>14</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>15</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 آلاینده‌ها می‌شود. وحید و همکاران [21] تأثیر افزودن نانوذرات اکسید آلومینیوم (آلومینا)<sup>16</sup> و نانو لوله‌های کربنی چند دیواره را بر تابش شعله در مشعل آزمایشگاهی سوخت گاز مایع<sup>17</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 حرارتی افزایش یافت.

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 نانو سیال 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 C/H=5.52 مقایسه گردید، همچنین به منظور تحلیل بهتر تابش گرمایی و نقش ذرات دوده، تابش درخشانی شعله نیز اندازه‌گیری شد.

7 Graphite Oxide

8 Aluminum Oxide

9 Cerium Oxide

10 Carbon Nano Tubes

11 Biodiesel

12 Raw Jatropha Oil

13 Ignition delay Time

14 Evaporation Time

15 Multiwalled Carbon Nanotubes

16 Alumina

17 Liquefied Petroleum Gas (LPG)

1 Soot

2 Nanocatalyst

3 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

4 N-decane

5 Ethanol

6 Agglomerate

## 2- تجهیزات آزمایشگاهی

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

کوره به شکل استوانه با طول 1.2 متر و قطر 0.45 متر است. چهار روزنه بر کوره به منظور رویت و اندازه‌گیری 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 مایع به صورت هم‌مرکز و از مرکز آن انجام می‌گیرد. 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 پیش‌آمیخته 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 تشکیل‌دهنده سوخت پایه توسط دستگاه واریو ال کیوب<sup>2</sup> که آنالیز عنصری کربن، هیدروژن، نیتروژن و گوگرد<sup>3</sup> را تعیین می‌کند، 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 ماورصوت 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>4</sup> مورد سنجش قرار گرفت. نمونه‌ها داخل اتانول رقیق‌سازی شدند. مقدار پتانسیل زتا اندازه‌گیری 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 ASTM D-287 و لزجت توسط لزجت سنج بروکفیلد مدل DVIII Ultra در دمای 25 درجه سلسیوس اندازه‌گیری شده است. شکل 2 سوخت‌های نانوسیال با غلظت‌های مختلف را نشان می‌دهد که رنگ نمونه با افزایش غلظت نانوذرات تیره‌تر می‌گردد.

اندازه‌گیری دما توسط دوربین حرارتی نک آویو<sup>5</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>6</sup> مدل NS9500 برای تحلیل تصاویر استفاده

می‌شود. ماتریس‌های حرارتی به نرم‌افزار تحلیلگر اینفرک منتقل شده و دمای تمامی نقاط به دست می‌آید. ماتریس حرارتی در نرم‌افزار متلب فراخوانی شده و تبدیل به یک تصویر سیاه و سفید می‌گردد که برای تحلیل بیشتر از رابطه (1) استفاده می‌شود:

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

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

اندازه‌گیری شدت تابش تمام طول موج‌های تابشی شعله توسط ترموپیل<sup>7</sup> ساخته شده شرکت کیپ و زون<sup>8</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-الکترونیک است. برای حصول اطمینان از نتایج به دست آمده این وسیله در آزمایشگاه کاملاً عایق تابشی در مقابل تابش جسم سیاه<sup>9</sup> با دمای معین قرار گرفته است. تغییر دمای جسم سیاه سبب تغییر سیگنال خروجی ترموپیل و تغییر ولتاژ الکتریکی می‌گردد. تغییر ولتاژ الکتریکی توسط یک مولتی‌متر دیجیتال نشان داده می‌شود. این ترموپیل دارای دقت 0.016 میلی‌ولت بر میلی‌وات است.

لوکس متر<sup>10</sup> ساخته شده شرکت دکترمتر<sup>11</sup> مدل SM 206 برای اندازه‌گیری درخشانی شعله مورد استفاده قرار گرفته است [26]. این وسیله توانایی اندازه‌گیری شدت تابش در گستره طول موج لوکس متر<sup>12</sup> برای اندازه‌گیری درخشانی شعله مورد استفاده قرار گرفته الکترومغناطیسی نور مرئی را داراست. لوکس متر دارای بازه اندازه‌گیری بین 0.1-399.9 وات بر متر مربع و دقت  $\pm 5\%$  مقدار اندازه‌گیری شده است.

آنالیز و تحلیل خطا یکی از مهم‌ترین ملزومات هر کار آزمایشگاهی است. خطای ناشی از دقت تجهیزات اندازه‌گیری و خطای ناشی از تکرارپذیر بودن آزمایشات در شرایط محیطی و انسانی مختلف مهم‌ترین عوامل خطا در اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی است. برای اطمینان از صحت نتایج به دست آمده آزمایش‌ها در دو نوبت تکرار شده و عدم قطعیت توسعه یافته ناشی از دقت تجهیزات اندازه‌گیری و تکرار آزمایش با سطح اطمینان 95% (فاکتور پوششی  $K=2$ ) 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- نتایج 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>13</sup> (COOH) و هیدروکسیل<sup>14</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

<sup>7</sup> Thermopile  
<sup>8</sup> Kipp & Zonen  
<sup>9</sup> Black Body  
<sup>10</sup> Lux Meter  
<sup>11</sup> Dr.Meter  
<sup>12</sup> Lux Meter  
<sup>13</sup> Carboxyl  
<sup>14</sup> Hydroxyl

<sup>1</sup> Stainless Steel  
<sup>2</sup> CHNS Vario el-Cube  
<sup>3</sup> CHNS Elemental Analyzer  
<sup>4</sup> Malvern  
<sup>5</sup> NEC Avio  
<sup>6</sup> InfRec Analyzer

جدول 2 مشخصات فیزیکی نانو لوله کربنی چند دیواره

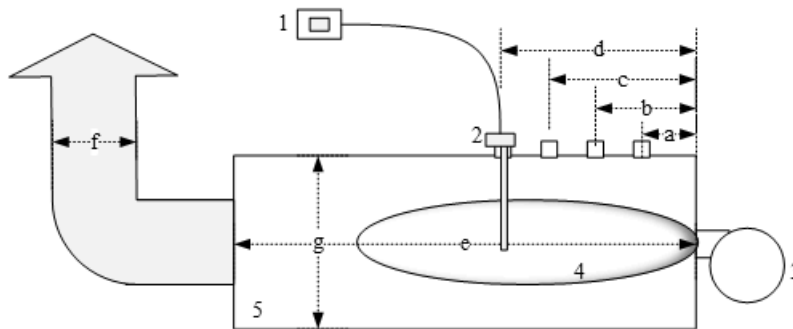
Table 2 The specifications of multi-walled carbon nanotube

نانو ذره	خلوص	مقدار -OH	طول	قطر داخلی	قطر خارجی
نانو لوله کربنی چند دیواره با گروه عاملی هیدروکسیل (-OH)	>95 Wt.%	3.06 Wt.%	~30 $\mu$ m	5-10nm	10-20nm

جدول 3 چگالی و لزجت سوخت‌های پایه و نانوسیال

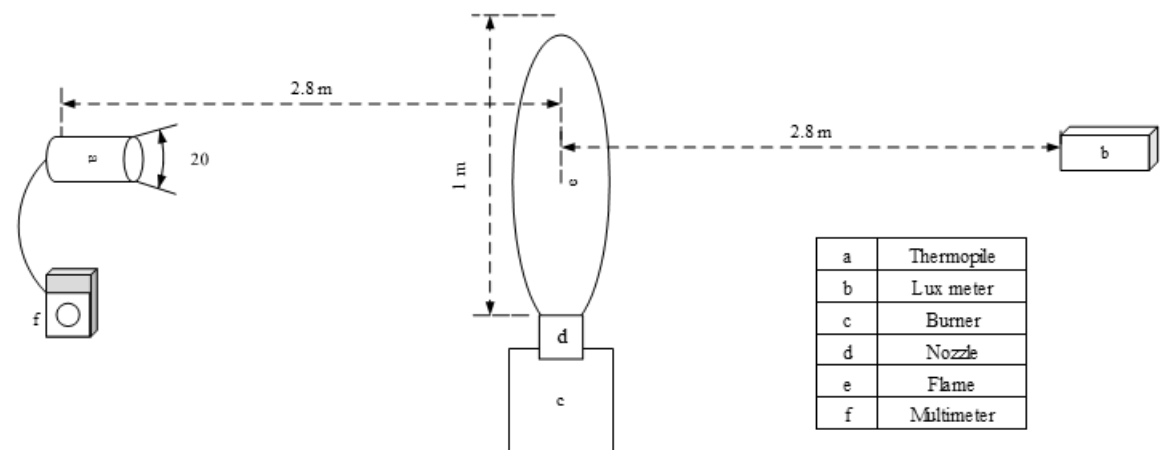
Table 3 Density and viscosity of base fuel and nanofluid fuels

سوخت پایه	سوخت نانوسیال با درصد جرمی 0.003	سوخت نانوسیال با درصد جرمی 0.006	سوخت نانوسیال با درصد جرمی 0.01
1.50	1.52	1.54	1.55
لزجت (mPa.s)			
0.786			
چگالی (gr/cm <sup>3</sup> )			



1	Data logger
2	Thermocouple
3	Liquid fuel burner
4	Flame
5	Combustion chamber

Length (m)		
a	Aperture	0.15
b	Aperture	0.27
c	Aperture	0.39
d	Aperture	0.51



a	Thermopile
b	Lux meter
c	Burner
d	Nozzle
e	Flame
f	Multimeter

Fig. 1 Schematic of combustion chamber and measurement instruments

شکل 1 شماتیک محفظه احتراق و ابزار اندازه‌گیری

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 می‌شود که عبارت از تصویر مرئی، تصویر مرئی نزدیک به منطقه مادون قرمز و تصویر توزیع دما با استفاده از دوربین حرارتی است. تصویر

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% روزه نازل در اثر ته‌نشینی نانو لوله‌های

برای دو حالت سوخت پایه و کسر جرمی (ϕ) 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) نیز هم‌خوانی دارد. همان طور که پیشتر گفته شد دلیل این امر احتراق نانوذرات در درون شعله و آزاد شدن انرژی حاصل از سوختن آن‌هاست که سبب می‌شود 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 می‌گردد. نانوذرات دارای قطر کوچک‌تری 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 می‌شوند، انرژی آزاد شده باعث تسریع نرخ سینتیک احتراق قطرات سوخت مایع می‌شود. لازمه سوختن مولکول‌های سوخت مایع شکسته شدن آن‌هاست. 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 می‌کند. 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 می‌گردد. برای بررسی خصوصیات تابشی شعله دو تابش در محدوده کل طول موج‌های تابشی شعله (تابش حرارتی یا گرمایی) و درخشانی شعله (طول موج‌های مرئی) اندازه‌گیری شده است. انتقال حرارت تابشی توسط اندازه‌گیری کل طول موج‌های تابشی شعله انجام گرفته است. درخشانی شعله نشانگر سوختن ذرات دوده در طول شعله است. تغییرات دما در پایین دست شعله به عنوان مثال در فاصله طولی  $X=50\text{ cm}$  برخلاف 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

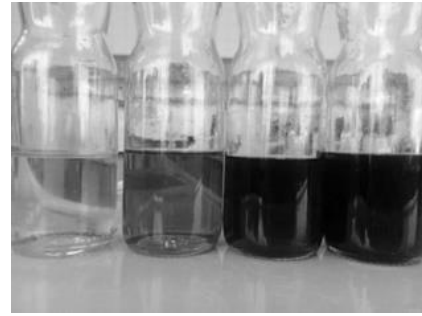


Fig. 2 Nanofluid fuels samples

شکل 2 مشخصات ظاهری سوخت نانوسیال

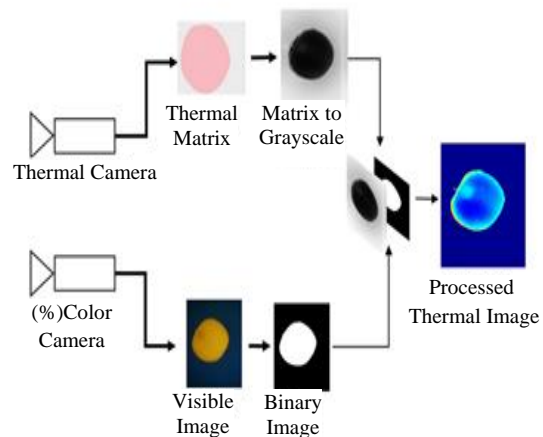


Fig. 3 Extraction of desired characteristics from thermal images [24]

شکل 3 مراحل بدست آوردن ماتریسی دما [24]

مرئی که نشان‌دهنده طول و حجم شعله و توسط دوربین دیجیتال گرفته شده است، همچنین با توجه به این‌که ذرات دوده موجود در شعله در طول موج‌های مرئی 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>1</sup> مدل 370 FTIR مشخص شده را نشان می‌دهد [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 مهم‌ترین عامل درخشانی شعله است. همان‌طور 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 دارد. 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% محدوده دما بالای شعله نیز گسترش یافته است.

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

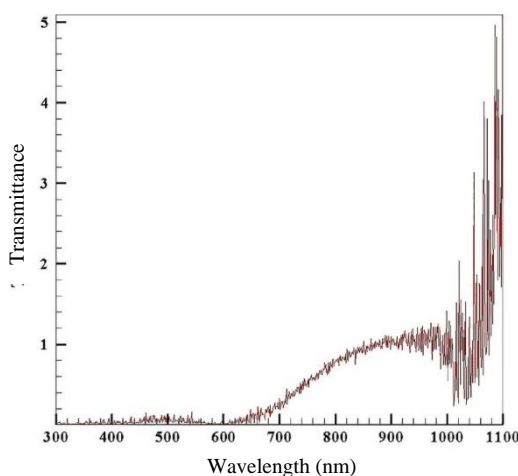
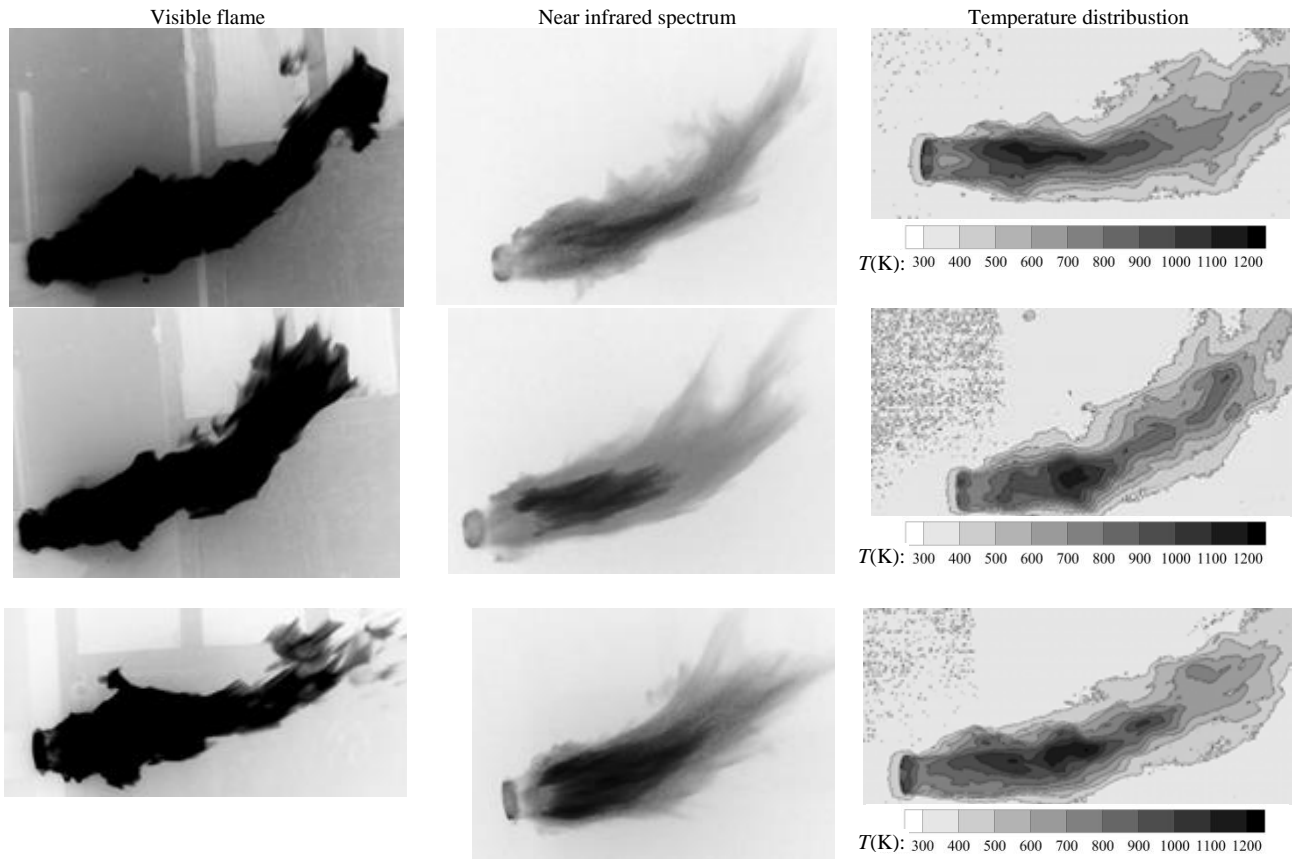


Fig. 4 IR transmittance filter [28]

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 fraction of 0.003%, nanofluid fuel with mass fraction of 0.006% and nanofluid fuel with mass fraction of 0.01%

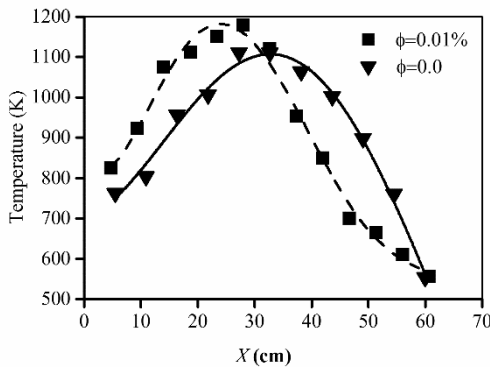
شکل 5 تصاویر گرفته شده از شعله از چپ به راست: تصویر مرئی، تصویر با استفاده از فیلتر مناسب برای نشان دادن غلظت ذرات دوده در شعله و تصویر حرارتی برای نشان دادن توزیع دما برای سه حالت از بالا به پایین: سوخت نانو سیال با کسر جرمی 0.003%، کسر جرمی 0.006% و کسر جرمی 0.01%.

شعله افزایش می‌یابد. 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 می‌یابد. از آن‌جا که ساختار اصلی نانوذرات را کربن تشکیل می‌دهد، بنابراین با افزایش کسر جرمی نانوذرات در سوخت پایه، غلظت ذرات دوده و کربن جامد نیز در درون شعله افزایش می‌یابد (شکل 5). افزایش غلظت ذرات کربن

امر این است که در حالت با نانو ذره بیشینه دمای شعله و ناحیه دما بالای واکنش احتراق به سمت بالادست متمایل بوده و در نتیجه 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.

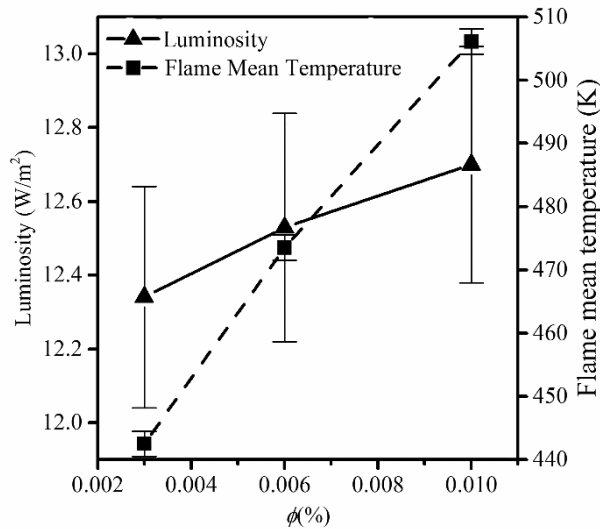
در شکل 7 اثر غلظت نانوذرات بر بیشینه دمای شعله نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود بیشینه دما با افزایش غلظت نانوذرات نیز افزایش می‌یابد، به طوری که مقدار بیشینه دما در کسر جرمی 0.01%، 50 درجه کلون بیشتر از سوخت پایه است.

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 240×320 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



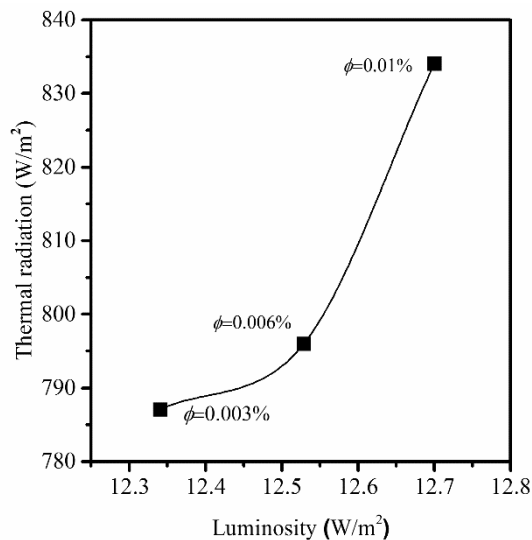
**Fig. 6** The effect of nanoparticles mass fraction (0.01%) on the flame distribution along flam axis

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



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

می‌یابد، اما میزان افزایش برای تابش گرمایی و درخشانی یکسان نیست. با افزایش کسر جرمی 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 زردسوژی و افزایش ضریب صدور تابش بر تابش گرمایی شعله تأثیر می‌گذارد. شکل 11 مقایسه بین تابش گرمایی سوخت پایه با  $C/H=5.47$ ، سوخت نانوسیال با کسر جرمی 0.01% و سوخت هیدروکربنی مایع با  $C/H=5.52$  را نشان می‌دهد. با توجه به شکل مشخص می‌گردد 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 نمی‌کند؛ بنابراین  $C/H$  سوخت نانوسیال و سوخت پایه تقریباً برابر است و در

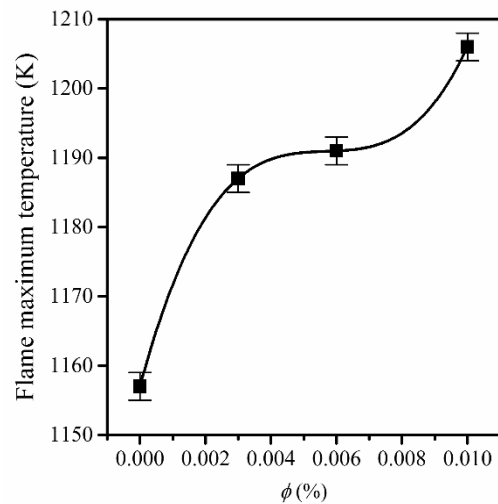


**Fig. 10** Thermal radiation variation vs. flame luminosity  
 شکل 10 تغییرات تابش گرمایی با توجه به تغییرات تابش درخشانی

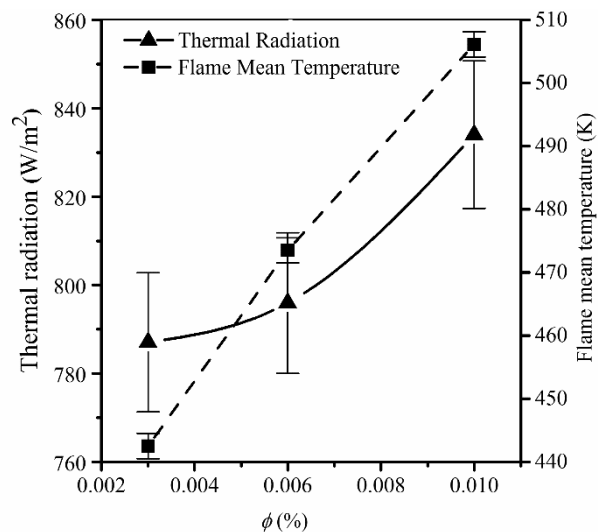
در شعله نیز سبب افزایش ضریب صدور تابش و در نتیجه افزایش تابش گرمایی شعله خواهد شد. افزودن نانوذرات میزان تولید دوده داخل شعله و در نتیجه درخشانی شعله را تغییر می‌دهد.

شکل 9 مقایسه بین تغییرات درخشانی شعله و دمای میانگین شعله را در غلظت‌های مختلف نانوذرات نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش کسر جرمی نانوذرات درخشندگی شعله افزایش می‌یابد. درخشندگی شعله ارتباط مستقیم با زردسوژی شعله داشته و زردسوژی و رنگ زرد شعله نیز تابع غلظت ذرات جامد کربن و دوده در درون شعله است. از آن‌جا 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. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش کسر جرمی نانو لوله کربنی 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

## 5- فهرست علائم

T دما (K)

زیر نویس‌ها

min کمینه

max بیشینه

علائم یونانی

 $\phi$  کسر جرمی نانوذرات در سوخت پایه

## 6- مراجع

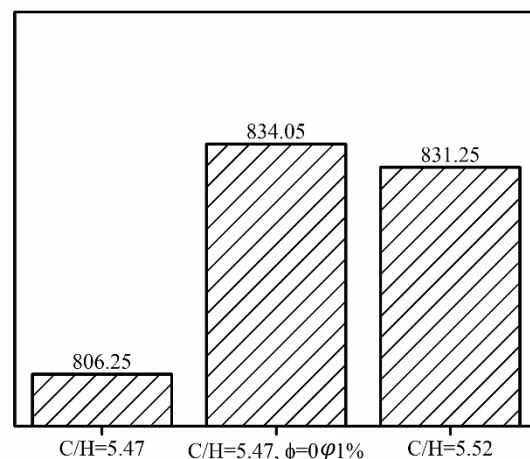
- [1] B. Viskanta, *Radiative Transfer of Combustion Systems: Fundamentals and Applications*, pp. 3-5, New York: Begell House, 2005.
- [2] A. J. Bhowal, B. K. Mandal, Radiation effect on temperature distribution and NO formation in a diffusion flame under reduced gravity conditions, *Heat and Mass Transfer*, 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. Pourhoseini, M. Moghiman, Experimental study on the effect of coal injection on structure, radiation, temperature and thermal efficiency of natural gas diffusion flames, *Mofares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 7, pp. 163-168, 2014. (in Persian)
- [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-gas oil? Luminosity and radiative heat transfer of natural gas flame, *Mofares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 15, pp. 11-16, 2015. (in Persian)
- [9] M. Chloe, J. McDavid, *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 CO<sub>2</sub> نیز می‌گردد [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 می‌شود.
- رابطه سهمی میان تغییرات تابش گرمایی 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 نمی‌کند. این میزان افزایش تقریباً با مقدار افزایش تابش گرمایی سوخت هیدروکربنی با C/H=5.52 برابری می‌کند.

Thermal radiation (W/m<sup>2</sup>)

**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



- [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](http://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 particles injection on thermal and radiative characteristics of natural gas 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; <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. Sadrmia, 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.