مجله مهندسی مکانیک مدرس، شهریور 1396، دوره 17، شماره 6، ص‌ص 233-240

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بررسی میدان دما و ساختار شعله آرام جت‌های برخوردی مایل گاز لندفیل با استفاده از روش تجربی اینترفرومتری ماخ-زندر

مهرداد کیانی[1]، پریا امیری[1]، کاظم اسماعیل‌پور[2*]

1- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران
2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد دماوند، دماوند
* تهران، صندوق پستی 39715-194، esmailpour@damavandiau.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 19 فروردین 1396
پذیرش: 29 اردیبهشت 1396
ارائه در سایت: 25 خرداد 1396

کلید واژگان:
میدان دمایی شعله آرام
مشعل‌های برخوردی
گاز لندفیل
روش اینترفرومتری ماخ-زندر

چکیده

امروزه به علت بحران انرژی و افزایش میزان تقاضا، استفاده از سوخت‌های جایگزین ضروری می‌باشد. گاز لندفیل محصول طبیعی تجزیه مواد آلی در محل دفن زباله‌ها می‌باشد که از متان و دی‌اکسیدکربن تشکیل شده است. شعله‌های برخوردی پیکربندی واحدی می‌باشند که منجر به افزایش میزان اختلاط و بهبود راندمان فرآیند احتراق می‌شوند. در این مطالعه، به بررسی میدان دمایی و ساختار شعله آرام پیش مخلوط لندفیل-هوا در مشعل‌های متقاطع برخوردی پرداخته شده است. برای به‌دست آوردن میدان دمایی محصولات احتراق شعله حاصل شده از روش اینترفرومتری ماخ-زندر استفاده شده است. به‌منظور اعتبارسنجی نتایج، دماهای به‌دست آمده از روش تداخل‌سنجی با نتایج استخراج شده از ترموکوپل مقایسه شدند و انطباق خوبی بین این دو مشاهده شد. برای بررسی موقعیت قرارگیری مشعل‌ها در کنار یکدیگر، اثرات زاویه و فاصله بین دو مشعل مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. اثر این دو پارامتر در رژیم جریان آرام در حالی مورد مطالعه قرار گرفته است که زاویه بین دو مشعل از 60 تا 100 درجه و فاصله بی‌بعد آن (s/D_h) از 3.44 تا 9.63 تغییر می‌کند. در بررسی زاویه بین مشعل‌ها مشاهده می‌شود که در مشعل‌های متقاطع، زاویه تاثیر چندانی در بیشینه دما ندارند (3 درصد اختلاف برای بیشینه دما در هر حالت) اما بر ساختار شعله بسیار موثر می‌باشد. از طرفی دیگر فاصله بین مشعل‌ها اثر چشمگیری بر بیشینه دما، ساختار شعله و ناحیه داغ به‌وجود آمده دارد.

Investigation of Temperature Field and Laminar Flame Structure of Inclined Impinging Jets by Interferometry Mach-Zehnder Experimental Method

Mehrdad Kiani[1], Paria Amiri[1], Kazem Esmailpour[2*]

1- Mechanical Engineering Department, Tehran University, Tehran, Iran
2- Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University of Damavand, Damavand, Iran
* P.O.B. 39715-194, Tehran, Iran, esmailpour@damavandiau.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 08 April 2017
Accepted 19 May 2017
Available Online 15 June 2017

Keywords:
Temperature Field of Laminar Flame
Impinging Flames
Landfill Gas
Mach-Zehnder Interferometry

ABSTRACT

Nowadays, due to energy crisis and the increase in the energy demand, the use of alternative fuels is essential. Landfill gas (LFG) is a natural product of the decomposition of organic material in landfills which is composed of methane and carbon dioxide. Impinging flames are a unique configuration which leads to an increase in the amount of mixing and improving combustion efficiency. In this study, temperature field and flame structure of laminar premixed flame of landfill-air in cross burners have been examined. The flame temperature field of combustion products was obtained by the Mach-Zehnder interferometry method. To validate the results, the obtained temperatures of Mach-Zehnder method were compared to measured data by thermocouples and good agreement was observed. The effects of angle and distance between two burners have been studied to investigate the effect of burner's configuration on the flame structure. These two parameters in laminar flow regime have been studied, while the angle between two burners varied from 60 to 100 degrees and dimensionless distance (s/D_h) varied from 3.44 to 9.63. The obtained results showed the burner's angle does not have much impact on the maximum flame temperature but the flame structure is affected significantly by this parameter. On the other hand, the distance between burners has strong effect on the maximum flame temperature, flame structure, and the region of maximum flame temperature.

1- مقدمه

امروزه، نگرانی‌های پیرامون مشکلات زیست محیطی و گران شدن سوخت‌های فسیلی باعث شده تا استفاده از سوخت‌های تجدیدپذیری که از مواد بیومس به‌دست می‌آیند از اهمیت ویژه‌ای برخوردار باشد [1]. گازی که طی سالیان دراز (10 تا 40 سال) از طریق تجزیه بی‌هوازی زباله‌های جامد شهری توسط باکتری به‌دست می‌آید را گاز لندفیل می‌نامند. این گاز ترکیبی از گاز متان، کربن‌دی‌اکسید، مقادیر کمی اکسیژن، نیتروژن و غیره می‌باشد. ارزش حرارتی در موقع سوختن گاز لندفیل به شدت وابسته به نسبت

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

M. Kiani, P. Amiri, K. Esmailpour, Investigation of Temperature Field and Laminar Flame Structure of Inclined Impinging Jets by Interferometry Mach-Zehnder Experimental Method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 6, pp. 233-240, 2017 (in Persian)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.6.54.4]

مقدار متان و کربن‌دی‌اکسید موجود در این ترکیب می‌باشد و مقدار آن از 3000 تا 6000 کیلوکالری بر متر مکعب متغیر است [3,2]. وجود کربن دی‌اکسید در گاز لندفیل به‌طور چشمگیری باعث کاهش دما و سرعت شعله می‌شود. مشعل‌های گازی پیش‌ترکیب در مصارف خانگی و بخش‌های صنعتی به منظور احتراق بهتر و انتقال حرارت سریع‌تر در رینولدز و فشار پایین استفاده بالایی دارند و این علت باعث شده که مطالعات زیادی روی این پروژه انجام شود. مطالعه میدان دمایی شعله پیش ترکیب باعث طراحی بهتر مشعل‌ها می‌شود [4].

روش‌های تجربی متداول جهت اندازه‌گیری میدان دمای احتراق استفاده از ترموکوپل‌ها و ترمومترهای مقاومتی است. پیشرفت‌های زیادی در روش‌های اندازه‌گیری دما و محصولات احتراق در سیستم‌های تبدیل انرژی از قبیل بویلر و توربین گازی و ... صورت گرفته است [5]. روش‌های اپتیکی قابلیت اندازه‌گیری میدان دمایی به‌صورت یک‌جا و اندازه‌گیری دماهای بالا بدون تماس با شعله تشکیل شده را دارند. اما این روش نیازمند تجهیزات مخصوص و لیزر قدرتمند می‌باشد [6]. شایان ذکر است که وجود ترموکوپل باعث اغتشاش در جریان می‌شود که منجر به خطای اندازه گیری می‌شود.

روش‌های اپتیکی مرسوم را می‌توان به دو دسته اینترفرومتری[1] و دفلکتومتری[2] تقسیم‌بندی کرد [7] که به‌ترتیب براساس محاسبه ضریب شکست (اختلاف فاز) و مشتق ضریب شکست بنا نهاده شده‌اند. روش‌های مرسوم اینترفرومتری شامل هولوگرافی [8]، ماخ-زندر [9] و اسپکل [10] و غیره و روش‌های مرسوم دفلکتومتری شامل شیلیرن [11]، موایر [12] و تالبوت[13] می‌باشند.

ارتباط بین ضریب شکست و دما به کمک رابطه حالت گلدستون-دیل[3] برقرار می‌شود. از منابع ایجاد خطا در محاسبه میدان دمایی شعله در نظر نگرفتن اثر گونه‌ها در محاسبه چگالی در رابطه گلدستون-دیل می‌باشد [14, 15]. توان کم لیزر و انحرافات هندسی منجر به ایجاد خطا در نتایج می‌شود [16]. رئوس [17] و مرزکیچ [18] یک ضریب ثابت گلدستون-دیل برای محصولات احتراق پیشنهاد کردند که برای شعله همگن پیش ترکیب با دقت $\pm 2\%$ کاربرد دارد و می‌توان به خوبی از تغییرات تحت تاثیر واکنش‌ها در طی فرایند احتراق چشم پوشی کرد. استلا [19] و ون در وج [20] برای قسمت روشن و درخشان شعله یک ضریب ثابت ارائه نمودند تا بتوان با دقتی در حدود $\pm 2\%$ به کار برد. بنابراین می‌توان از ضریب شکست هوا به عنوان جایگزین مناسبی برای ضریب شکست محصولات احتراق شعله به‌کار برد.

شاخر و نیرالا [21] در یک مطالعه مروری به بررسی اندازه‌گیری‌های پروفیل‌های دمایی با استفاده از روش‌های اپتیکی پرداختند. احمدی و همکاران [22] به منظور تعیین نمودن اثر اکسیدکننده در شعله، اکسیژن را با متان در مشعل حلقوی ساده ترکیب نمودند و با استفاده از روش تجربی ماخ-زندر مورد مطالعه قرار دادند و به این نتیجه دست یافتند که اکسیدکننده تاثیر چشمگیری در افزایش دمای شعله حاصل شده دارد.

از عوامل موثر بر ساختار شعله می‌توان به هندسه مشعل اشاره نمود. تاثیر مشعل حلقوی بر ساختار شعله و شاخصه‌های انتقال حرارت آن در برخورد به سطح صاف در رژیم جریان آرام پیش ترکیب توسط ایراندوست [23] و دانگ [24] بررسی شد. در این مطالعه اثر فاصله نازل تا صفحه، رینولدز و نسبت هم ارزی با استفاده از روش اینترفرومتری ماخ-زندر مورد مطالعه قرار گرفت. نجفیان [25] و کیو [26] در یک مطالعه مشابه با استفاده از روش اینترفرومتری به بررسی اثر هندسه مشعل شیاری بر ساختار شعله و شاخصه‌های حرارتی شعله پیش مخلوط پرداختند. نتایج نشان می‌دهد که پروفیل انتقال حرارت در مشعل شیاری یکنواختی بیشتری نسبت به مشعل حلقوی دارد. در مواقعی که صفحه هدف نسبت به مشعل استفاده شده بزرگتر باشد، نیاز به شعله‌ای عریض‌تر است و به همین دلیل از چند مشعل در کنار یکدیگر استفاده می‌شود. نجفیان و همکاران [27] در یک مطالعه تجربی به بررسی ساختار شعله و میدان دمایی در مشعل‌های ترکیبی (شامل سه مشعل شیاری بدون زاویه در کنار یکدیگر) پرداختند. در این مطالعه با استفاده از روش تجربی ماخ-زندر، اثر رینولدز و نسبت هم‌ارزی و فاصله مشعل‌ها از یکدیگر را مورد بررسی قرار دادند. اثر قرارگیری جت شعله‌های حلقوی بر روی یکدیگر در فواصل متفاوت توسط وو و همکاران [28] مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که مشخصات انتقال حرارت به شدت به فاصله مشعل‌ها وابسته است. چنانچه مشعل‌ها نسبت به یکدیگر زاویه داشته باشند، جت‌ها بر روی یکدیگر تاثیر گذاشته و منجر به تغییر ساختار شعله می‌شوند. لی و همکاران [29] اثر پایداری را با استفاده از روش تجربی پی آی وی[4] برای مشعل‌های متقاطع شیاری و سوخت پروپان مورد مطالعه قرار دادند و نتایج را با مشعل شیاری تخت مقایسه نمودند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که این شکل از مشعل‌ها باعث پایداری شعله می‌شوند. چن و همکاران [30] اثر اضافه کردن هیدروژن و کربن‌مونواکسید به سوخت پروپان را در مشعل-های متقاطع برای شعله پروپان را مطالعه نمودند و نشان دادند که با اضافه کردن مونواکسید کربن دمای شعله افزایش می‌یابد.

در این مطالعه احتراق سوخت لندفیل در شعله‌های برخوردی به صورت تجربی و با استفاده از روش ماخ-زندر بررسی شده است. هدف از انجام این مطالعه بررسی تاثیر پارامترهای هندسی بر روی ساختار شعله‌های برخوردی و دمای شعله می‌باشد. به منظور نیل به این هدف دو پارامتر هندسی مهم شامل فاصله مشعل‌ها از هم و زاویه قرارگیری آن‌ها مورد توجه قرار گرفته‌اند. نتایج تجربی به صورت خطوط همدمایی که از تصاویر تکنیک اینترفرومتری استخراج شده‌اند و توزیع دما در صفحات مختلف مورد تحلیل قرار گرفته‌اند.

2- تجهیزات آزمایشگاهی

2-1- اینترفرومتری

استفاده از روش تجربی ماخ-زندر، ابزار مناسبی برای مجسم کردن میدان ضریب شکست محصولات احتراق می‌باشد. تجهیزات اصلی این روش که بر روی میز اپتیک قرار گرفته‌اند (شکل 1) عبارت‌اند از : لیزر[5]، میکرولنز[6]، پین هول[7]، دو پرتو اسپلیتر[8]، سه آیینه، دو عدسی و یک دوربین. میز اپتیک در هنگام انجام آزمایش بر روی چهار بالشتک هوا قرار می‌گیرد تا تجهیزات قرار گرفته بر روی میز از محیط اطراف خود ایزوله گردند.

باریکه نور از یک منبع لیزر هلیوم نئون[9] 5 میلی وات با طول موج 632.8 نانومتر ساطع می‌شود و سپس از یک پین هول و میکرولنز عبور می‌کند. نور واگرا شده از یک موازی‌ساز با قطر 10 سانتی‌متر عبور می‌کند و پس از رسیدن به یک آینه 50 درصد، نیمی از باریکه نور از مسیر اصلی خود (که شعله را پوشش می‌دهد) عبور می‌کند و نیمی دیگر از یک مسیر بدون

[1] Interferometry
[2] Deflectometry
[3] Gladstone Dale

[4] Particle Image Velocimetry
[5] laser
[6] Microlens
[7] Pinhole
[8] Beam Splitter
[9] Helium-Neon Laser

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.6.54.4]

تغییرات ضریب شکست می‌گذرد. دو باریکه نور در بیم اسپلیتر شماره 2 به یکدیگر می‌رسند و درنهایت طبق مسیر مشخص شده تحویل دوربین دیجیتال داده می‌شوند. وجود اختلاف فاز که دو باریکه نسبت به یکدیگر دارند باعث به وجود آمدن خطوط تاریک و روشن بر روی آینه شفاف می‌شود. تصویر به‌دست آمده توسط یک دوربین دیجیتال 30 فریم بر ثانیه ضبط و به کامپیوتر فرستاده می‌شود. اطلاعات بیشتر در مورد ماخ-زندر در مراجع [31-33] ارائه شده است.

2-2- مشعل‌ها

در "شکل 2" دو مشعل شیاری با قابلیت تنظیم ارتفاع فاصله و زاویه نشان داده شده‌اند.

هر مشعل از دو صفحه استیل ضدزنگ[1] با عرض مقطع 0.3، طول مقطع 20 و عمق 60 میلی‌متر تراش خورده تشکیل شده است. سطح داخلی هر صفحه با دستگاه فرزکاری CNC با دقت 0.01 میلی‌متر پولیش کاری شده است. برای آب‌بندی مشعل‌ها از یک نوار مسی با ضخامت 0.1 میلی‌متر استفاده شده است و در نتیجه یک جت شیاری با مقطع عرضی 0.7 و طول 20 میلی‌متر تولید می‌کند (شکل 3). ابعاد طوری انتخاب شده تا جریان خروجی یکنواخت خوبی داشته باشیم. از فرض دو بعدی بودن جریان استفاده کنیم. به‌منظور یکنواخت‌تر کردن شعله ایجاد شده در داخل مشعل از ساچمه و هانی‌کامب استفاده شده است. میز اپتیک و لیزر توسط یک پرده ضخیم به‌طور کامل محصور شده است تا تاثیر جابجایی ذرات هوا بر روی مساله مورد مطالعه کاهش یابد. تمامی تجهیزات قرار گرفته بر روی میز اپتیک توسط پلکسی گلس‌های شفاف محافظت می‌شوند. میز بر روی بالشتک‌های هوا قرار می‌گیرد تا از اثرات لرزش ایمن باشد. گاز لندفیل توسط دو کپسول متان و کربن دی‌اکسید تامین می‌شود.

همان‌طور که در "شکل 4" مشاهده می‌شود گاز متان از یک سیلندر با فشار 50 بار و درجه خلوص 4.5 و هوای مورد نیاز برای پیش ترکیب توسط یک کمپرسور 2.5 بار (ساخته شده توسط شرکت محک) تهیه می‌شود. ابتدا هر سه سیال وارد روتامتر مخصوص (روتامتر دایر[2] و دیفاکو[3]به ترتیب برای اندازه‌گیری دبی هوا و متان) و کالیبره شده‌ی خود می‌شوند. پس از تعیین کردن دبی هر سیال مجددا هر سه سیال متان و کربن دی اکسید و هوا وارد محفظه مخصوص اختلاط می‌شوند. طبق "شکل 3" این محفظه از ساچمه‌های ریز پر شده است. پس از اختلاط مجددا جریان پیش ترکیب وارد دو روتامتر شده و با دقت خوبی مقدار جریان برای هر مشعل نصف می‌شود. مقدار خطای اعلام شده توسط سازنده برای روتامترها حدودا 3 درصد می‌باشد. برای بالا بردن ضریب ایمنی آزمایش از سه فلش بک استفاده شده است.

لازم به ذکر است که به منظور اختلاط بهتر سوخت و هوا و در نتیجه ایجاد یک احتراق مناسب‌تر، از طول رابط بلندتری پس از محفظه اختلاط بهره گرفته شده است. جهت راستی آزمایی روش اینترفرومتری از یک ترموکوپل نوع k، که در حمام آب یخ و آب جوش کالیبره شده، استفاده شده است. اطلاعات به‌دست آمده توسط دیتالاگر[4] در کامپیوتر شخصی نمایش

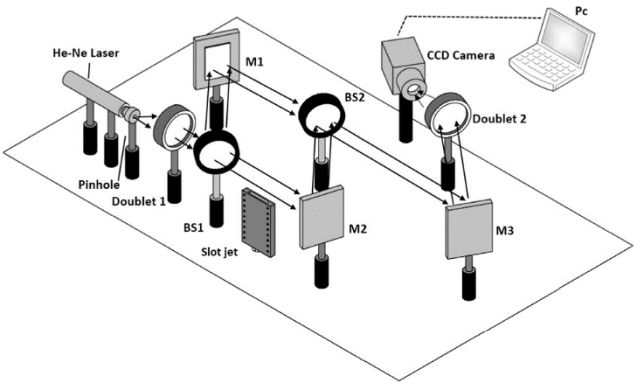


Fig. 1 The schematic configuration of experimental setup in Mach-Zehnder method

شکل 1 شماتیک چیدمان تجهیزات در روش ماخ-زندر

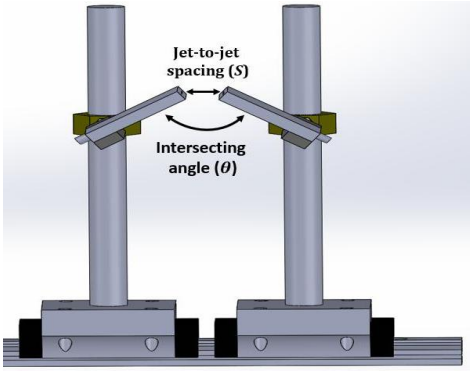


Fig. 2 Configuration of impinging burners and key parameters

شکل 2 پیکربندی مشعله‌های برخوردی و پارامترهای کلیدی

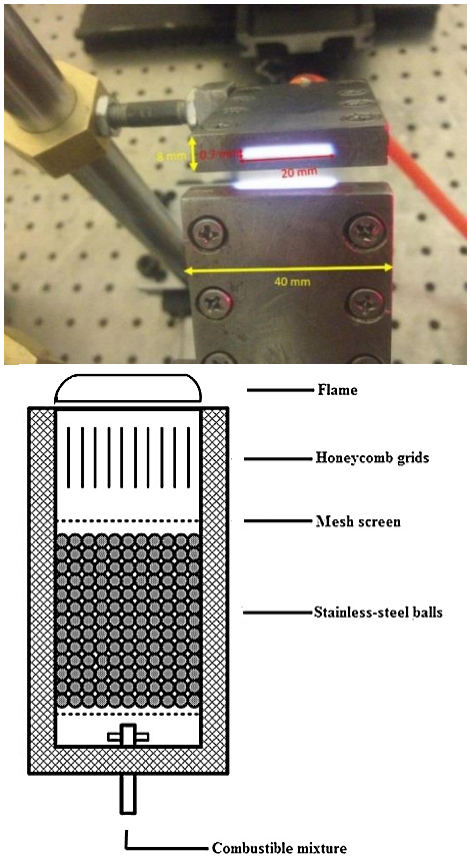


Fig 3 Schematic of burner's internal structure

شکل 3 شماتیکی از ساختار داخلی مشعل

[1] Stainless Steel

[2] Dwyer
[3] Difaco
[4] Data logger

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.6.54.4]

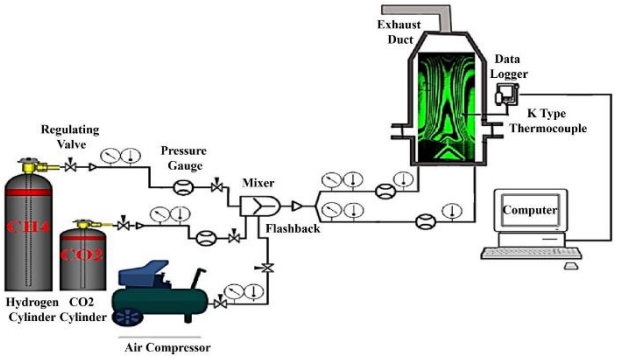


Fig. 4 Schematic of the experimental setup

شکل 4 شماتیک تجهیزات آزمایشگاهی

داده شده است. دما، فشار و رطوبت نسبی آزمایشگاه در زمان تست‌گیری به منظور پردازش تصاویر، اندازه گیری شده‌اند.

3- تحلیل اطلاعات

نور ساطع شده از منبع لیزر هلیوم نئون پس از برخورد با بیم اسپلیتر[1] شماره 1 به دو باریکه نور مجزا از یکدیگر تقسیم می‌شود که نیمی از آن از محیط بدون عامل اغتشاش و نیمی دیگر از آن از محصولات احتراق می‌گذرد. همان‌طور که در "شکل 1" مشاهده می‌شود اختلاف ضریب شکست محصولات احتراق و هوا منجر به اختلاف فاز بین دو باریکه نور می‌شود که این عامل باعث به وجود آمدن خطوط خاموش و روشن در عکس می‌شود. معادله (1) رابطه بین اختلاف فاز و ضریب شکست را بیان می‌کند.

$$\frac{\Delta\varphi(x,y)}{2\pi}=\frac{1}{\lambda}\int_0^L[n_\infty-n(x,y,z)]dz \qquad (1)$$

در مطالعه پیش‌رو به‌دلیل بالا بودن نسبت طول به عرض مشعل شیاری بالا می‌توان از انحنای شعله ناشی از گرادیان دمایی در ابتدا و انتهای آن چشم‌پوشی کرد. با توجه به عدم تغییر ضریب شکست در طول مسیر نور، الگوی به‌دست آمده با فرض خوب و صادقی برای کل طول موردنظر است. بنابراین با صرف‌نظر از تغییرات ضریب شکست در راستای z معادله بالا به صورت دوبعدی ساده‌سازی می‌شود.

$$\frac{\Delta\varphi(x,y)}{2\pi}=[n_\infty-n(x,y)]\frac{L}{\lambda} \qquad (2)$$

خطوط خاموش و روشن به وجود آمده در "شکل 5" فرینج[2] نام دارند. فرینج‌ها در شکل دارای ضریب شکست یکسان هستند که با توجه به رابطه (3) شماره‌گذاری می‌شوند.

$$N=\frac{\Delta\varphi(x,y)}{2\pi} \qquad (3)$$

رابطه بین بزرگی مرتبه فرینج (خطوط پیوسته تاریک و روشن) و ضریب شکست محلی دو بعدی به‌صورت زیر بیان می‌شود.

$$n(x,y)=n_\infty-\frac{N\lambda}{L} \qquad (4)$$

ضریب شکست تابعی وابسته به دما است که با استفاده از رابطه گلدستون-دیل می‌توان میدان دمایی را محاسبه کرد.

$$T(x,y)=[\frac{n_\infty-1}{n(x,y)-1}]T_\infty \qquad (5)$$

برای اندازه‌گیری مختصات مکان فرینج‌ها، ابتدا عکس‌های شعله که توسط دوربین گرفته شده در برنامه متلب[3] به‌صورت دیجیتالی خوانده می‌شوند.

پس از یافتن مکان هر فرینج می‌بایست دمای مربوط به آن محاسبه گردد. برای یافتن دما در ابتدا باید مرتبه بزرگی فرینج‌ها را محاسبه کرد. در این مطالعه ترموکوپل بر روی اولین فرینج یا خط ایزوترم قرار گرفته شده است و دمای آن را ثبت می‌شود. سپس با وارد کردن دمای فرینج اول به برنامه متلب، بقیه ی دمای فرینج‌ها نسبت به خط ایزوترم اول به‌دست می‌آیند. روش عملکرد آن بدین صورت است که اختلاف فازها نسبت به فرینج اول سنجیده می‌شود و با توجه به اختلاف فاز و دمای فرینج اول، درنهایت دمای هر نقطه به‌دست می‌آید.

مرتبه بزرگی فرینج در محلی که ترموکوپل مرجع قرار دارد برابر صفر منظور می‌شود و اختلاف راه بقیه نقاط (اختلاف فاز) را نسبت به این نقطه مرجع می‌سنجیم. این نقطه می‌تواند بر روی یکی از ایزوترم‌ها و یا بیرون از محل فرینج‌ها باشد.

3-1- تحلیل عدم قطعیت

از آن‌جائی‌که بررسی تجربی همیشه با خطا همراه است، باید تلاش نمود تا مقادیر خطاهای وارد شده در آزمایش را به حداقل رساند. اما این تلاش معمولاً به‌وسیله دقت اندازه‌گیری وسایل و تجهیزات آزمایشگاهی محدود می‌شود. برای این‌که میزان خطا در نتایج تجربی را به‌دست آوریم لازم است تا میزان دقت و حساسیت دستگاه‌های اندازه‌گیری را بدانیم. سه عامل باعث ایجاد خطا می‌شوند:

1) عدم قطعیت در نسبت هم‌ارزی
2) عدم قطعیت در عدد رینولدز
3) خطای روش تداخل‌سنجی

در روتامتر خطای کالیبراسیون باعث ایجاد خطا در مقدار واقعی دبی می‌شود که سبب خطا در محاسبه عدد رینولدز و نسبت هم‌ارزی سوخت-هوا می‌شود. بیشینه خطا در این حالت به ترتیب برای نسبت هم‌ارزی و عدد رینولدز 5.5 و 3.46 درصد می‌باشد [34-36].

خطای دیگر مربوط به اندازه‌گیری دما با استفاده از روش تداخل‌سنجی ماخ-زندر می‌باشد. استفاده از ضریب شکست هوا به جای گازهای حاصل از احتراق باعث انحراف از دقت نتایج آزمایش می‌شود. خطایی که برای این منظور گزارش شده است حدود 2.3 درصد در نسبت هم‌ارزی 2 می‌باشد [37]. در نسبت‌های هم ارزی کمتر میزان خطا به کمتر از 2 درصد کاهش می‌یابد [38]. دلیل دوم برای ایجاد خطا تغییر ضریب شکست هوا در دماهای بالا است. هنگامی که پرتوهای لیزر از شعله‌ی مشعل شیاری عبور می‌کند از مسیر اصلی خود منحرف می‌شود.

دلیل سوم ایجاد خطا، تاثیر انتهای مشعل شیاری بر میدان دمایی است. با توجه به این‌که انتهای مشعل با هوای اطراف در تماس است شاهد گرادیان دمایی در این ناحیه هستیم اما از آن‌جا که نسبت طول به عرض مشعل بزرگ است می‌توان میدان دمایی را به‌صورت دوبعدی در سرتاسر مشعل با فرض خوبی در نظر گرفت و از تاثیر این عامل چشم‌پوشی کرد.

3-2- راستی آزمایی

به منظور تعیین دقت عملکرد در روش اندازه‌گیری اینترفرومتری نتایج این روش با نتایج به‌دست آمده از ترموکوپل مقایسه شده است. به علت محدودیت کاربری ترموکوپل نوع k دمای فرینج‌های کمتر از 1400 کلوین اندازه‌گیری شده اند.

[1] Beam Splitter
[2] Fringe
[3] MATLAB

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.6.54.4]

قرارگیری ترموکوپل در مکان‌های مختلف بر روی فرینج‌ها برای نمونه‌ی سوخت لندفیل با نسبت هم‌ارزی استوکیومتریک و عدد رینولدز 70 در "شکل 5" نشان داده شده است.

دمای فرینج‌ها در مقطع معین ($H/D_h=8$) اندازه‌گیری و با نتایج روش اینترفرومتری مطابق "شکل 6" مقایسه شده است. اختلاف دمای منتج شده به خاطر عوامل ذکر شده می‌باشد.

در "شکل 6" با نزدیک‌تر شدن به خط تقارن بین دو مشعل به‌دلیل حضور گونه‌های احتراقی که به‌طور کامل واکنش انجام نداده‌اند، در مرکز اختلاف دمای بیشتری نسبت به فواصل دورتر ملاحظه می‌شود.

4- تحلیل اطلاعات

4-1- مقدمه

در این بخش به بررسی موقعیت قرارگیری دو مشعل نسبت به یکدیگر در رژیم جریان آرام در فشار 0.87 بار و دمای محیط 300 کلوین پرداخته می‌شود. جهت بررسی میدان دمایی و ساختار شعله در هر یک از حالات، دو مقطع در فواصل $H/D_h=29.8$ عمود بر راستای محور تقارن مشعل‌ها زده شده است که سمت چپ خط تقارن بین دو مشعل برای بررسی نتایج می‌باشد. دامنه تغییرات مشخصه عملکردی فرایند احتراق در جدول 1 نشان داده شده است.

4-2- مشخصات ساختار شعله‌های برخوردی

شعله‌ی مشعل‌های متقاطع از لحاظ ساختاری با شعله‌ی مشعل‌های هم‌محور مخالف و موازی تفاوت‌های زیادی دارند. "شکل 7"، شماتیک و جهت‌گیری محور مختصات را برای رژیم جریان در مشعل‌های متقاطع نشان می‌دهد. در این شکل مبدأ مختصات بر روی خط تقارن و هم ارتفاع با دهانه‌ی خروجی مشعل‌ها قرار می‌گیرد. جت‌های جریان در مشعل‌های موازی، بدون زاویه نسبت به هم‌دیگر و در مشعل‌های هم محور مخالف به‌صورت هم‌محور و مخالف یکدیگر حرکت می‌کنند.این در حالی‌است که در مشعل‌های متقاطع دوجت جریان با زاویه‌های مشخص با یکدیگر برخورد می‌کنند. در این حالت تغییر زاویه‌ی بین دو مشعل منجر به بوجود آمدن شعله‌هایی با مشخصات جدید می‌شود. همچنین همان‌طور که در "شکل 7" ملاحظه می‌شود، حضور ناحیه‌ی چرخشی باعث می‌شود اختلاطی بهتر و احتراق با راندمان بالاتری داشته باشیم.

4-3- اثر زاویه بر میدان دمایی و ساختار شعله

برخورد جت های شعله‌ی شیاری زاویه دار باعث ایجاد چالش جدیدی نسبت به مشعل‌های دوتایی موازی و جریان مخالف می‌شود. احتراق گازهای پیش ترکیب شده در این هندسه ها باعث ایجاد ناحیه‌ای با دمای بالاتر در محدوده‌ی برخورد می‌شود، بنابراین فرایند احتراق با کیفیت را نتیجه می‌دهد. بنابراین در این بخش اثر زوایای متفاوت را بر روی انباشتگی حرارتی مورد مطالعه قرار گرفته است. به‌منظور بررسی اثر زاویه‌ی بین دو مشعل بر روی میدان دمایی و ساختار شعله‌ی گاز لندفیل برای پارامترهای متفاوت در حالی که فاصله بین دو مشعل 9.3 میلی‌متر می‌باشد، مطابق جدول 1 بررسی شده است. ($\theta = 60$ و 80 و 100) "شکل 8" ساختار خطوط هم دما را در زوایای متفاوت نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل بالا ملاحظه می‌گردد افزایش زاویه بین دو مشعل باعث بزرگتر شدن ناحیه داغ شعله، قوی‌تر شده جریان برگشتی شعله در

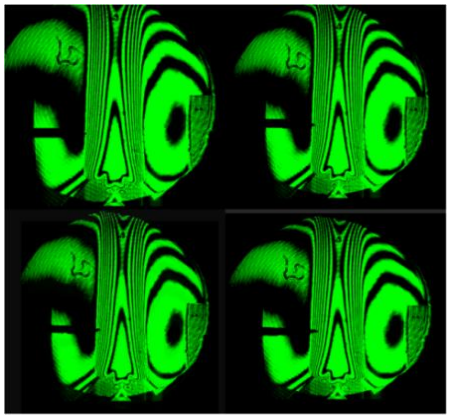


Fig. 5 Thermocouple placement on different fringes in sample situation

شکل 5 قرارگیری ترموکوپل بر روی فرینج‌های مختلف در حالت نمونه

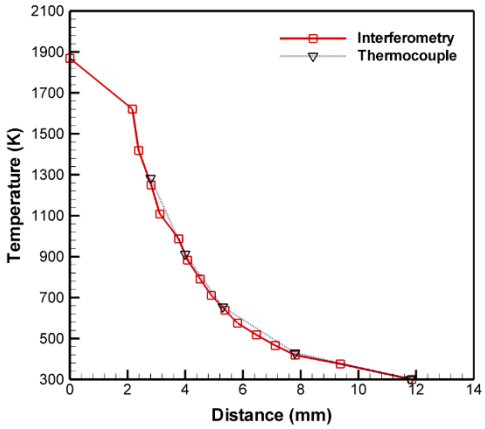


Fig. 6 Variation of temperature along x axis for the sample

شکل 6 تغییرات دما در امتداد x برای نمونه

جدول 1 دامنه تغییرات مشخصه عملکردی فرایند احتراق

Table 1 Domain variation of characterization of combustion process

پارامتر	حداقل مقدار	حداکثر مقدار	مقدار پایه
φ	-	-	1
D	9.3 mm	25 mm	9.3 mm
θ	60°	100°	80°

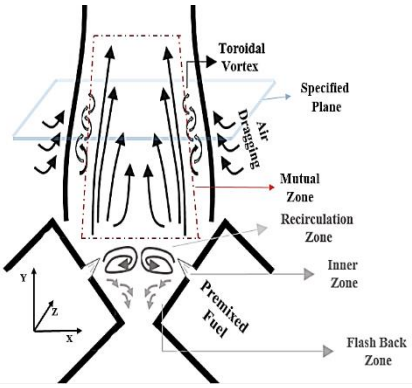
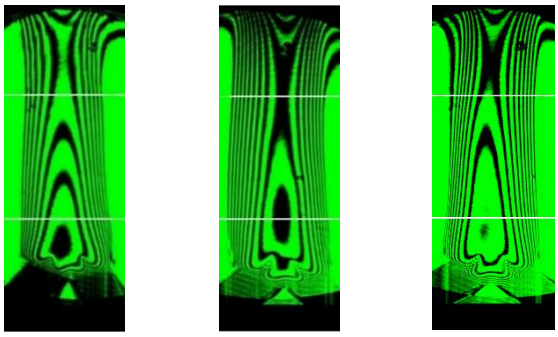


Fig. 7 Schematic configuration of impinging burners and its flow characteristics

شکل 7 شماتیک مشعل‌های برخوردی و مشخصات جریان آن

راستای مخالف محور Y، همچنین باعث لاغرتر شدن ناحیه حرارت دیده شده در راستای محور X ها و همچنین باعث کاهش اثر تداخل شعله‌ها بر روی یکدگر می‌شوند. این موضوع با مطالعات قبلی پیرامون مشعل‌های متقابل با

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.6.54.4]



a) θ=60° b) θ=80° c) θ=100°

Fig. 8 Fringe maps for different angle of slot nozzles

شکل 8 الگوی خطوط همدمای برای زوایای متفاوت

جریان مخالف کاملا سازگاری دارد [39-41].

"شکل 9" منحنی تغییرات دمایی را برای دو مقطع را برای Re=100 در زوایای متفاوت نشان می‌دهد.

برخورد دو جت شعله با یکدیگر منجربه تولید ناحیه‌ای با جریان چرخشی می‌شود که باعث می‌شوند این گردابه‌ها حرارت را از ذرات سوخته شده به نسوخته برسانند و باعث بهبودی کیفیت عملکردی فرایند احتراق بشود. در ممنتوم جریان در راستای افقی در اثر برخورد دو جریان با یکدیگر خنثی می‌شوند که همین امر باعث پایداری بیشتر شعله نیز می‌شود. با افزایش زاویه بین دو مشعل از 60 درجه به 100 درجه باعث بهبود کیفیت اختلاط دو جریان با یکدیگر می‌شود که در نتیجه با ناحیه‌ای با دمای بالاتری همراه می‌باشد و نیز باعث افزایش شار حرارتی می‌شود. با مقایسه دو منحنی "شکل 9" ملاحظه می‌شود که به علت کوتاه بودن طول ناحیه تعامل دو شعله در زوایای کمتر، با فاصله گرفتن از خروجی مشعل‌ها دما افت بیشتری می‌کند. همچنین مشاهده می‌شود که بیشینه دما برای هر دو مقطع بر روی خط تقارن بین مشعل‌ها اتفاق می‌افتد.

4-4- اثر فاصله بر میدان دمایی و ساختار شعله

به‌منظور مطالعه اثر زاویه بر میدان دمایی و ساختار شعله، مشعل‌ها در فواصل مختلف ($s/D_h = 3.8, 5.7, 7.6, 9.6$) از یکدیگر با زاویه 80 درجه قرار داده شدند. "شکل 10"، الگوی دمایی را برای فواصل متفاوت شعله برخوردی آرام لندفیل- هوا نشان می‌دهد.

تغییرات فاصله بین دو مشعل تاثیر بسزایی بر میزان اثر تداخل دو جریان بر یکدیگر دارد و باعث پیدایش ساختار شعله‌های متفاوتی می‌شود. همانطور که در شکل بالا ملاحظه می‌گردد، وجود فشار منفی بین دو جت شعله باعث کشیده شدن دو جریان بسمت یکدیگر می‌شود. همان‌طور که در "شکل 10" ملاحظه می‌گردد با افزایش فاصله بین دو مشعل، ناحیه داغ به‌وجود آمده از خط تقارن بین دو مشعل به سمت خروجی نازل‌ها جابجا می‌شود و همچنین موجب می‌شود که برخورد دو جت شعله در فواصل دورتری از مشعل‌ها صورت بگیرد. این موضوع باعث می‌شود تا شعله‌ها رفتاری مشابه مشعل‌های تکی آزاد از خود نشان بدهند. "شکل 11" منحنی تغییرات دمایی را برای شعله آرام لندفیل در دو مقطع مشخص شده نشان می‌دهد. بیشینه دمای شعله حاصل شده 1912 کلوین (که 86 درصد دمای آدیاباتیک شعله متان می‌باشد) که مربوط به کمترین فاصله بین دو مشعل می‌باشد. تغییرات S/D_h از 3.84 تا 9.63، دما و شار حرارتی را بر روی خط تقارن بین دو مشعل کاهش می‌دهد. از مقایسه منحنی تغییرات دمایی برای دو مقطع

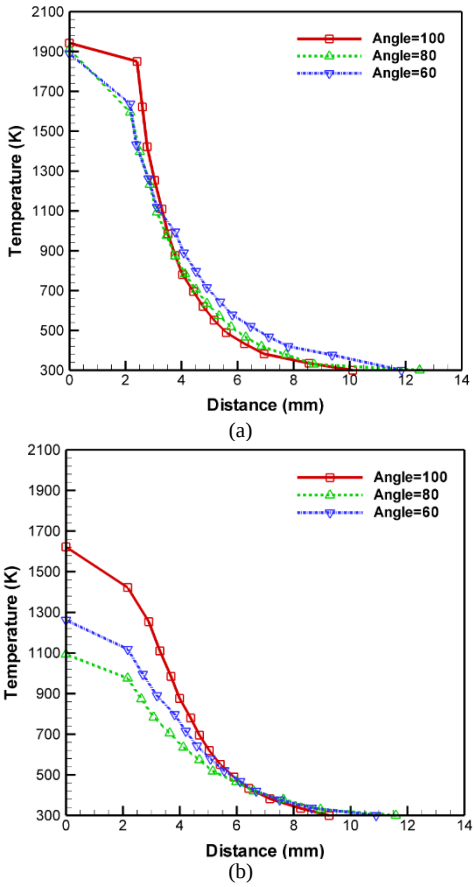
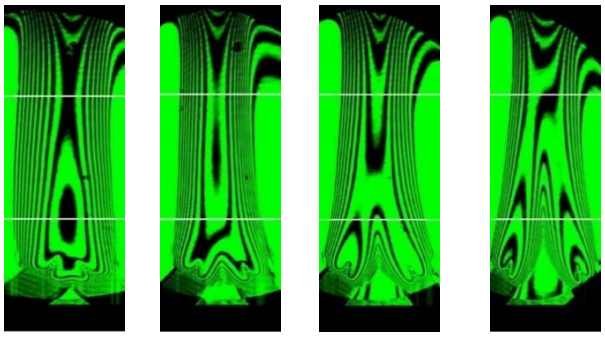


Fig. 9. Temperature profile in two sections for different burners angles a) $H/D_h = 8$ and b) $H/D_h = 28$

شکل 9 تغییرات دمایی برایی دو مقطع در زوایای متفاوت a) $H/D_h = 8$ b) $H/D_h = 28$



a) D=10mm b) D=15mm c) D=20mm d) D=25mm

Fig. 10. Fringe maps for different distances between slot nozzles

شکل 10 الگوی دمایی برای فواصل متفاوت مشعل‌ها

مشخص شده می‌توان دریافت که با افزایش فاصله بین دو مشعل، بیشترین گرادیان دمایی در نزدیکی سر مشعل‌ها رخ می‌دهد. همچنین با دور شدن مشعل‌ها از یکدیگر باعث می‌شود تا ناحیه تماسی شعله با محیط اطراف خود افزایش یابد که در نتیجه باعث اتلاف حرارتی بیشتر انرژی به محیط می‌شود و همچنین شاهد افت دمایی بیشتری در مقطع بالای هستیم. در مسائلی که بحث انتقال حرارت به صفحه هدف موردنظر می‌باشد توصیه می‌شود که صفحه هدف درجایی که بیشترین تعامل دو جت شعله با یکدیگر رخ می‌دهد و اتلاف حرارتی آن کمترین است قرار داده شود. در مقطع پایین‌تر، افزایش فاصله بین دو مشعل باعث می‌شود تا پیک دمایی شعله حاصل شده از خط

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.6.54.4]

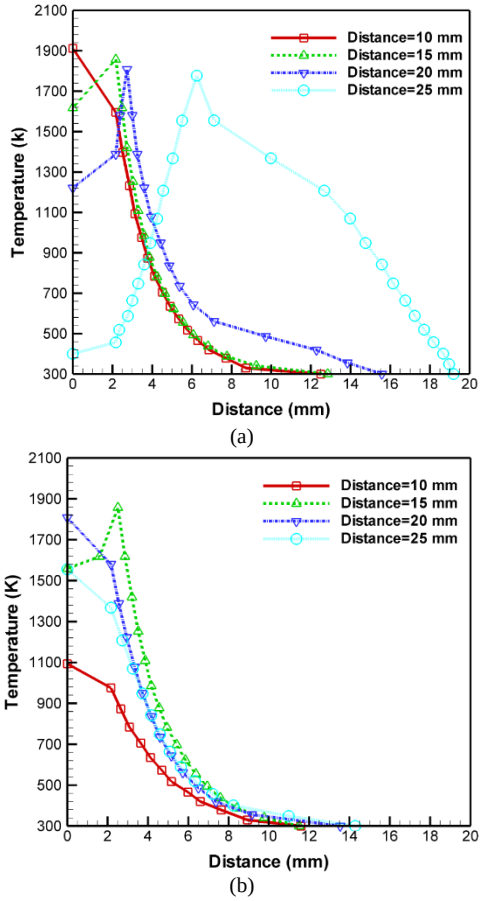


Fig. 11. Temperature profile for different distance between slot nozzles in two sections a) $H/D_h = 8$ and b) $H/D_h = 28$

شکل 11 منحنی تغییرات دمایی برای فواصل متفاوت در مقاطع مشخص شده a) $H/D_h = 8$ and b) $H/D_h = 28$

مرکزی به سمت لبه‌های بیرونی شعله حرکت کند.

5- نتیجه‌گیری

در این مطالعه با استفاده از روش اینترفرومتری ماخ-زندر به بررسی میدان دمایی و ساختار شعله حاصل شده از دو جت برخوردی پیش‌ترکیب لندفیل - هوا پرداخته شده است. برخورد دو جت شعله با یکدیگر تاثیر بسزایی در اختلاط و اغتشاش جریان شعله حاصل شده دارد که می‌تواند کیفیت احتراق را افزایش دهد. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهند که زاویه بین مشعل‌ها تاثیر بسزایی بر روی ساختار شعله و گستردگی ناحیه حرارت دیده شده دارند. افزایش زاویه بین دو مشعل باعث باعث کاهش اثر تداخل شعله‌ها بر روی یکدیگر، بزرگتر شدن ناحیه داغ شعله، قوی‌تر شدن جریان برگشتی شعله در راستای مخالف محور Y و همچنین باعث لاغرتر شدن ناحیه حرارت دیده شده در راستای محور X ها می‌شوند. همچنین از نتایج اثر زاویه می‌توان دریافت نمود که افزایش فاصله باعث کاهش اثر تداخل شعله‌ها بر یکدیگر می‌شود و نیز اتلاف حرارت بیشتری اتفاق می‌افتد. در مقایسه نتایج به‌دست آمده از اثر زاویه و فاصله بین مشعل‌ها ملاحظه می‌شود که در زاویه 100 درجه و فاصله $s/D_h = 3.8$، بهترین ساختار شعله همراه با دمای شعله بالاتر اتفاق می‌افتد.

6- فهرست علائم

d	قطر مشعل (m)
H	فاصله از لبه مشعل در راستای y (m)
l	طول شیار مشعل (m)
L	طول جت در راستای نور لیزر (m)
N	بزرگی مرتبه فرینج
Re	عدد رینولدز
s	فاصله دو مشعل از یکدیگر (m)
T	دما (K)
w	عرض شیار مشعل (m)
X	مختصات در راستای محور عمود بر صفحه (m)
Y	مختصات در راستای محور موازی با صفحه (m)
Z	مختصات در راستای محور موازی با صفحه (m)

علایم یونانی

Δ	اختلاف
θ	زاویه دو سر مشعل با یکدیگر
λ	طول موج نور لیزر ساطع شده (nm)
φ	اختلاف فاز دو باریکه نور

زیرنویس‌ها

H	هیدرولیکی
O	حالت مرجع
∞	حالت بی‌نهایت

7- مراجع

[1] S. A. Sherif, F. Barbir, T. T. Tsotsis, Fundamental and environment aspects of landfill gas utilization for power generation, *Chemical Engineering Journal*, Vol. 82, No. 3, pp. 46-63, 2003.

[2] W. Qin, F. N. Egolfopoulos, T. N. Veziroglu, Principals of hydrogen energy production, *Journal of Scientific and Industrial Research*, Vol. 62, No. 9, pp. 157-172, 2001.

[3] C. E. Lee, C. H. Hwang, H. Y. Lee, A study on the interchangeability of LFG-LPG mixed fules with LFG quality in domestic combustion appliances, *Fuel*, Vol. 87, No. 7, pp. 297-303, 2008.

[4] L. Lombardi, E. Carnevale, A. Corti, Greenhouse effect reduction and energy recovery from waste landfill, *Energy*, Vol. 31, No. 12, pp. 3208-3219, 2006.

[5] N. Fujisawa, T. Yamagata, H. Tomidokoro, Flickering characteristics and temperature field of premixed methane/air flame under the influence of co-flow, *Energy*, Vol. 78, No. 8, pp. 374-385, 2014.

[6] P. Hariharan, Flickering characteristics and temperature field of premixed methane/air flame under the influence of co-flow, *Optical Interferometry*, Vol. 78, No. 1, pp. 374-385, 2003.

[7] C. Shakher, A. K. Nirala, A review on refractive index and temperature profile measurements using laser-based interferometric techniques, *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 31, No. 1, pp. 455-491, 1999.

[8] D. L. Reuss, Temperature measurement in a radialy symmetric flame using holographic interferometry, *Combustion and Flame*, Vol. 49, No. 5, pp. 207-219, 1983.

[9] J. A. Qi, W. O. Wong, C. W. Leung, D. W. Yuen, Temprature field measurement of a premixed butane/ air slot laminar flame jet with Mach-Zender interferometry, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 28, No. 3, pp. 1806-1812, 2008.

[10] A. Asseban, M. Lallemand, J. B. Saulnier, N. Fomin, E. Lavinskaja, W. Merkrich, D. Vitkin, Digital speckle photography and speckle tomography in heat transfer studies, *Optics & Laser Technology*, Vol. 32, No. 2, pp. 583-592, 2000.

[11] M. R. Davis, P. Rerkshanada, Schlieren measurement of turbulent structure in a diffusion flame, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 6, No. 9, pp. 402-416, 1993.

[12] E. Barziv, S. Sgulim, O. Kafri, E. Keren, Measurement of temperature distributions in a methane/air flame by moire deflectometry, *Nineteenth Symposium (international) on Combustion/The Combustion Institute*, Vol. 6, No. 7, pp. 303-310, 1982.

[13] A. W. Lohmann, D. E. Silva, A Talbot Interferometer with circular gratings, *Combustion and Flame*, Vol. 4, No. 5, pp. 463-490, 1972.

[14] J. H. Gladstone, T. Dale, *Researches on the Fraction, Dispersion and Sensitiveness of Liquids*, Philosophical Transactions of the Royal Society of London, pp. 317-343, 1863.

[15] R. Francesconi, S. Ottani, Correlation of density and refraction index for liquid binary mixture scontaining polyglycols, Use of the group contributions

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.6.54.4]

Optics and Lasers in Engineering, Vol. 68, No. 5, pp. 194-202, 2015.
[28] J. WU, J. Seyed Yagoobi, R. H. Page, Heat transfer and combustion characteristics of an array of radial jet reattachment flames, *Combustion and Flame*, Vol. 125, No. 3, pp. 955-964, 2001.
[29] C. C. Li, J. W. Chen, J. T. Yang, Stabilization of double flames interacting with the intersecting flow on a V-shaped burner, *Combustion Science Technology*, Vol. 184, No. 6, pp. 2117-2135, 2012.
[30] J. W. Chen, C. P. Chiu, Combustion characteristics of premixed propane flame with added H_2 and CO on a V-shaped impinging burner, *Combustion Science Technology*, Vol. 40, No. 9, pp. 1244-1255, 2015.
[31] E. R. Eckert, R. J. Goldstein, *Measurements in Heat Transfer*, Taylor and Francis, pp. 140-199, Belmont, California, 1976.
[32] W. Hauf, U. Grigull, Optical methods in heat transfer, *Heat Transfe*r, Vol. 6, No. 2, pp. 133-366, 2015.
[33] R. D. Flack, Mach–Zehnder interferometer errors resulting from test section misalignment, *Applied Optics*, Vol. 17, No. 7, pp. 985-987, 1978.
[34]J. P. Holman, W. J. Gajda, *Experimental Methods for Engineers*, pp. 130-350, New York: McGraw-Hill, 1994.
[35] K. J. Bosschaart, L. DeGoey, Detailed analysis of the heat flux method for measuring burning velocities, *Combust Flame*, Vol. 132, No. 2, pp. 170-180, 2003.
[36] H. W. Coleman, W. G. Steele, *Experimentation,Validation,and Uncertainty Analysis for Engineers*, pp. 220-294, Hoboken, NewJersey: John Wiley & Sons, 2009.
[37] X. Qin, X. Xiao, I. K. Puri, S. K. Aggarwal, Effect of varying composition on temperature reconstructions obtained from refractive index measurements in flames, *Combustion and Flame*, Vol. 128, No. 1, pp. 121-132, 2002.
[38] C. C. Chen, K. C. Chang, S. M. Tieng, Effect of composition change on temperature measurements in a premixed flame by holographic interferometry, *Optical Engineering*, Vol. 31, No. 1, pp. 353-362, 1992.
[39] C. Y. Wu, Y. C. Chao, C. P. Chen, C. T. Ho, Effects of CO addition on the characteristics of laminar premixed CH4/air opposed-jet flames, *Combustion and Flame*, Vol. 73, pp. 156-362, 2009.
[40] Y. Huang, C. J. Sung, J. A. Eng., Laminar flame speeds of primary reference fuels and reformer gas mixtures, *Combustion and Flame*, Vol. 139, pp. 239-251, 2004.
[41] F. N. Egolfopoulos, H. P. Cho, C. K. Law, Laminar flame speeds of methane-air mixtures under reduced and elevated pressures, *Combustion and Flame*, Vol. 77, pp. 375-391, 1989.
in the Lorentz–Lorenz, Gladstone–Dale and Voge lequations to evaluate the density of mixtures, *Journal of Molecular Liquids*, Vol. 133, No. 9, pp. 125-133, 2007.
[16] P. Picart, Error analysis for a Mach-Zender type speckle interferometer, *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 35, No. 10, pp. 335-353, 2001.
[17] D. L. Reuss, Temperature measurement in a radially-symmetric flame using holographic interferometry, *Combustion and Flame*, Vol. 49, No. 5, pp. 207-219, 1983.
[18] W. Merzkirch, *Flow Visualization*, Academic Press, pp. 335-353, 1974.
[19] A. Stella, G. Guj, S. Giammartini, Measurement of axisymmetric temperature fields using reference beam and shearing interferometry for application to flame, *Experiments in Fluids*, Vol. 29, No. 3, pp. 1-12, 2000.
[20] B. A. Van der Wege, C. J. O'Brien, S. Hochgreb, Quantitative shearography in axisymmetric gas temperature measurement, *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 31, No. 1, pp. 21-39, 1999.
[21] C. Shakher, A. K. Nirala, A review on refractive index and temperature profile measurement susing laser-based interferometric, *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 31, No. 9, pp. 455-491, 1999.
[22] M. Ahmadi, M. Saffar Avval, T. Yousefi, M. Goharkhah, B. Nasr, M. Ashjaee, Temperature measurement of a premixed radially symmetric methane flame jet using the Mach–Zehnder Interferometry, *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 49, No. 2, pp. 859-865, 2011.
[23] M. S. Irandoost, M. Ashjaee, M. H. Askari, S. Ahmadi, Temperature measurement of axisymmetric partially premixed methane/air flame in a co-annular burner using Mach–Zehnder interferometry, *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 74, No. 3, pp. 94-102, 2015.
[24] L. L. Dong, C. S. Cheung, C. W. Leung, Heat transfer from an impinging premixed butane/air slot flame jet, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 45, No. 1, pp. 979-992, 2002.
[25] Z. Najafian Ashrafi, M. Ashjaee, M. H. Askari, Two-dimensional temperature field measurement of a premixed methane/air flame using Mach–Zehnder interferometry, *Optics Communications*, Vol. 341, No. 4, pp. 55-63, 2015.
[26] J. A. Qi, W. O. Wong, C. W. Leung, D. W. Yuen, Temperature field measurement of a premixed butane/air slot laminar flame jet with Mach-Zehnder interferometry, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 28, No. 8, pp. 1806-1812, 2008.
[27] Z. Najafian Ashrafi, M. Ashjaee, Temperature field measurement of an array of laminar premixed slot flame jets using Mach-Zehnder interferometry,

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.6.54.4]