

بررسی تجربی پایداری مشعل پیش آمیخته‌ی شعله سطحی استوانه‌ای مورد استفاده در دیگ‌های چگالشی

هادی پاسدار شهری
استادیار- دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه
تربیت مدرس
pasdar@modares.ac.ir

حسین سلطانیان
دانشجو- دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه
تربیت مدرس
soltanian.h@gmail.com

مهدی نجارنیکو
دانشجو- دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه
تربیت مدرس
mahdinajarnikoo@yahoo.com

محمد ضابطیان

استادیار- دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه تربیت مدرس
m.zabetian@modares.ac.ir

چکیده

امروزه به منظور افزایش بازده دیگ‌ها و کاهش مصرف سوخت آن‌ها، نوع چگالشی آن مورد توجه می‌باشد. در این تحقیق یک نوع از مشعل‌های مورد استفاده در این دیگ‌ها مورد بررسی دقیق قرار گرفته است. بستر آزمون مشعل پیش آمیخته به منظور بررسی تجربی مشعل شعله سطحی استوانه‌ای، طراحی و ساخته شد. ظرفیت نامی مشعل مورد آزمایش ۲۸kW است. مشعل در محدوده‌ی ظرفیت حرارتی ۱۱،۷۴ تا ۱۷،۱۴ کیلووات و نسبت هم‌ارزی ۰،۴ تا ۱،۲ با سوخت گاز طبیعی مورد آزمایش قرار گرفته است. ویژگی‌های ظاهری شعله در پنج حالت شعله‌ی سبز، زرد تشعشی، آبی پایدار، بلندشدگی شعله و حد خاموشی پایین مورد بحث قرار گرفت. در ظرفیت‌های پایین، شعله‌ی متمایل به رنگ سبز در نسبت هم‌ارزی یک و بیشتر از یک، شعله‌ی زرد تشعشی در محدوده‌ی نسبت هم‌ارزی ۰،۸ تا ۰،۹ و شعله‌ی آبی پایدار در محدوده‌ی نسبت هم‌ارزی ۰،۷ تا ۰،۷۵ مشاهده شد. با افزایش ظرفیت حرارتی، محدوده‌ی بروز شعله‌ی زرد تشعشی کاهش و محدوده‌ی بروز شعله‌ی آبی پایدار افزایش می‌یابد. همچنین حد پایین خاموشی شعله در نسبت هم‌ارزی ۰،۴۴ اتفاق افتاد. در نهایت محدوده‌ی پایداری شعله‌ی مشعل بین دو حالت شعله‌ی زرد تشعشی و بلندشدگی شعله تعریف گردید. این محدوده‌ی متناظر با محدوده‌ی شعله‌ی آبی پایدار است که با افزایش ظرفیت وسیع‌تر می‌شود. اما محدوده‌ی نسبت هم‌ارزی ۰،۷ تا ۰،۷۶ در تمام ظرفیت‌های مورد آزمایش، دارای شعله‌ی آبی پایدار می‌باشد.

کلمات کلیدی: دیگ چگالشی، شعله‌ی پیش آمیخته، مشعل شعله سطحی، محدوده‌ی پایداری

مقدمه

یکی از جدیدترین فناوری‌های رایج در تامین حرارت، دیگ‌های چگالشی است که در مقایسه با سایر دیگ‌ها راندمان بالاتری دارند و سوخت کمتری مصرف می‌کنند [۱]. گرمای محسوس و نهان محصولات احتراق در این دیگ‌ها توسط مبدل حرارتی گرفته می‌شود. این امر باعث چگالش بخار آب موجود در محصولات احتراق می‌شود که نهایتاً منجر به افزایش چشم‌گیر بازدهی حرارتی می‌گردد. برای چگالش بخار آب باید دمای محصولات احتراق به دمای کمتر از 55°C یعنی کمتر از دمای نقطه‌ی شبنم برسد. با توجه به مقدمه ذکر شده، مشعل دیگ چگالشی باید دارای ویژگی‌های خاصی باشد. به دلیل گرفتن گرمای نهان محصولات احتراق و کاهش دمای محفظه احتراق، مشعل این دیگ‌ها باید توانایی برقراری شعله پایدار در دمای پایین را داشته باشد. این موضوع در مشعل‌های اتمسفریک که بیش‌تر در دیگ‌های معمولی استفاده می‌شود امکان پذیر نیست. همچنین به دلیل طراحی فشرده دیگ‌های چگالشی، اندازه‌ی محفظه‌ی

احتراق کوچک است. بنابراین باید از مشعل‌هایی استفاده کرد که طول شعله آن کوتاه باشد. زیرا طول شعله‌ی بلند باعث برخورد شعله با سطح مبدل حرارتی و آسیب رساندن به آن می‌شود [۲]. در صنعت عموماً از مشعل‌های شعله سطحی برای دیگ‌های چگالشی استفاده می‌کنند. این مشعل‌ها باعث توزیع یکنواخت حرارت در تمام سطح مبدل و افزایش راندمان دیگ می‌شود. از این رو شناسایی مشخصه‌های احتراقی این مشعل‌ها و پیدا کردن محدوده‌ی پایداری آن حائز اهمیت است.

از دهه‌ی ۱۹۷۰ دیگ‌های چگالشی در خیلی از کشورهای دنیا گسترش یافتند و فراگیر شدند [۳]. این روند ادامه داشته است تا این که در سال ۲۰۱۷ دیگ‌های چگالشی سهم ۹۲٪ از بازار فروش دیگ‌ها در اروپا را به خود اختصاص داده است [۴]. در این بازه‌ی ۴۷ ساله مطالعات زیادی در مورد دیگ‌های چگالشی و مشعل‌های شعله سطحی انجام شده است که در ادامه برخی از مهم‌ترین آنها اشاره خواهد شد؛ اما مشعل‌های شعله سطحی استوانه‌ای کم‌تر مورد بحث قرار گرفته است. به دلیل تجربی بودن تحقیق حاضر تمرکز بر روی مطالعات آزمایشگاهی بوده است.

لی و هم‌کاران [۵] مشعل شعله سطحی استوانه‌ای را بر روی بستر آزمون مشعل پیش آمیخته مورد سنجش قرار داد. وی هم‌چنین ساختار این نوع مشعل را به صورت تجربی بهینه‌سازی و میزان آلاینده‌ی و پایداری شعله را برای ساختار بهینه مشخص کرد. لی و هم‌کاران [۶] یک دیگ چگالشی با مقیاس آزمایشگاهی طراحی و در آن از مشعل شعله سطحی استوانه‌ای استفاده کرد. با بهینه‌سازی مشخصات مبدل حرارتی از جمله بافل‌ها و پره‌ها، آزمون‌های احتراقی را انجام داد. بازده حرارتی بدست آمده توسط این دیگ آزمایشگاهی ۹۰٪ بوده است. راقوان و هم‌کاران [۷] مشعل شعله سطحی پیش آمیخته را به منظور سنجش نسبت هم‌ارزی‌های خیلی کم مورد آزمایش قرار دادند. وی در این کار علاوه بر طراحی محفظه اختلاط، با استفاده از دوربین حرارتی توزیع دمای مشعل را بدست آورد. یو و هم‌کاران [۲] مشعل شعله سطحی با پوسته‌ی متخلخل را با سه جنس و درصد تخلخل متفاوت مورد آزمایش قرار داد. وی با بررسی پایداری و شکل شعله مشعل صفحه‌ای متخلخل توانست از میان سه نوع مشعل مورد آزمون بهترین نوع مشعل از لحاظ پایداری و آلاینده‌ی را انتخاب کند. لی و هم‌کاران [۸] مشعل شعله سطحی پیش آمیخته‌ی استوانه‌ای را به همراه ناحیه‌ی داخلی متخلخل و نگهدارنده‌ی شعله طراحی کردند. نتایج نشان داد که استفاده از درصد تخلخل بیشتر در بافل داخلی و همچنین استفاده از نگهدارنده‌ی شعله در ابتدا و انتهای مشعل به یکنواختی شعله و پایداری آن کمک می‌کند. لیو و هم‌کاران [۹]، ابتدا توسط یک مدل عددی مشخصات هندسی یک مشعل پیش آمیخته‌ی تخت همراه با محفظه‌ی اختلاط و اجکتور را مورد بررسی قرار دادند. سپس با طراحی یک بستر آزمایشگاهی، عملکرد این مجموعه‌ی مشعل و محفظه‌ی اختلاط را با نتایج



شکل ۱ مشعل شعله سطحی استوانه‌ای

جدول ۱ ترکیبات و مشخصات گاز طبیعی شهر تهران [۱۲]

حداکثر	حداقل	واحد اندازه گیری	ترکیبات و مشخصات فیزیکی
92.3	89.11	Mol%	متان (CH ₄)
3.82	1.74	Mol%	اتان (C ₂ H ₆)
1.21	0.19	Mol%	پروپان (C ₃ H ₈)
0.52	0.06	Mol%	ایزوبوتان (I-C ₄)
0.1	0	Mol%	نرمال بوتان (n-C ₄)
0.27	0.01	Mol%	ایزوپنتان (I-C ₅)
0.03	0	Mol%	نرمال پنتان (n-C ₅)
0.29	0	Mol%	هگزان و سنگینتر (C ₆₊)
4.95	3.56	Mol%	نیتروژن (N ₂)
1.29	0.39	Mol%	دی اکسید کربن (CO ₂)
0.629	0.594		چگالی نسبی (sp.G)
9132	8679	kcal/scm	ارزش حرارتی ناخالص (GHV)

گام اول: محاسبه دبی سوخت

دبی سوخت از تقسیم ظرفیت حرارتی مشعل بر ارزش حرارتی پایین سوخت بدست می‌آید. این در حالی است که بازدهی احتراق ۱۰۰٪ در نظر گرفته شود. رابطه‌ی (۱) نحوه‌ی محاسبه‌ی دبی سوخت را نشان می‌دهد.

$$Q_{fuel} = \frac{W}{LHV} \quad (1)$$

گام دوم: محاسبه دبی هوا

دبی هوا با در نظر گرفتن نسبت هم‌ارزی و ظرفیت حرارتی در رابطه‌ی (۲) نشان داده شده است.

$$Q_{air} = \frac{17.12 * \rho_{fuel} * W}{LHV * \rho_{air} * \varphi} \quad (2)$$

عدد ۱۷٫۱۲ نسبت جرمی هوا به سوخت در حالت استوکیومتری می‌باشد.

گام سوم: شماتیک بستر آزمون

اجزای بستر آزمون و ترتیب قرارگیری آن‌ها در شکل ۲ مشاهده می‌شود. بستر آزمون از دو مسیر گاز و هوا تشکیل شده است که ابزارها و تجهیزات لازم در این دو مسیر قرار گرفته است. گاز و هوا توسط مخلوطکن ترکیب و به سمت مشعل هدایت می‌گردد.

گام چهارم: انتخاب تجهیزات مسیر

گاز شهری منبع تغذیه‌ی مسیر گاز می‌باشد. مسیر گاز شامل شیر توپی، دو عدد شیر تنظیمی در ابتدا و انتهای مسیر، فیلتر گاز و تنظیم‌کننده فشار

عددی مقایسه کردند. ژائو و هم‌کاران [۱۰] کار لیو و هم‌کاران [۹] را بر روی یک مشعل استوانه‌ای تکرار کردند. راشوان و هم‌کاران [۱۱] یک مشعل نیمه پیش‌آمیخته‌ی شعله سطحی تخت را مورد آزمایش قرار دادند. وی توانست محدوده‌ی شعله‌وری، طول شعله و آلاینده‌ها را در نسبت اختلاط‌های مختلف سوخت و هوا بدست آورد.

یکی از اهداف مهم بررسی مطالعات مرور شده در بالا، الگوبرداری از بسترهای آزمون استفاده شده توسط دیگران برای انجام آزمایش‌های احتراقی بر روی مشعل‌های پیش‌آمیخته می‌باشد. یکی از مهم‌ترین نتایج بررسی شده در مورد مشعل‌های شعله سطحی، بحث محدوده‌ی پایداری شعله می‌باشد. همچنین بررسی ویژگی‌های ظاهری شعله از جمله رنگ و موقعیت شعله نسبت به سرمشعل، جزء موارد بررسی شده می‌باشد.

برای انجام تحقیق حاضر، ابتدا نیاز بود که یک بستر آزمون مشعل پیش-آمیخته طراحی و ساخته شود. سپس یک نمونه مشعل شعله سطحی استوانه‌ای توسط بستر ساخته شده مورد آزمایش قرار می‌گیرد. روش آزمایش و برنامه آزمون‌های انجام شده به طور کامل تشریح می‌شود. تصاویر شعله در ظرفیت‌های حرارتی و نسبت هم‌ارزی‌های مختلف استخراج می‌گردد. به طور مفصل در مورد ویژگی‌های ظاهری شعله‌ی مشعل و محدوده‌ی پایداری و بازه‌ی عملکردی بهینه‌ی آن بحث می‌گردد. نهایتاً با روش لبه‌یابی، لبه‌ی ناحیه‌ی واکنش‌های سریع در تصاویر مشعل استخراج می‌گردد.

بستر آزمون

ظرفیت نامی مشعل مورد نظر ۲۸ kW است؛ به همین دلیل بستر آزمون، برای مشعل‌هایی با حداکثر ظرفیت حرارتی ۳۰ kW طراحی شده است. تصویر مشعل مورد استفاده در شکل ۱ مشاهده می‌شود. قطر و ارتفاع این مشعل به ترتیب ۷ و ۱۱ سانتی‌متر است. در این تحقیق از گاز طبیعی شهر تهران و هوا به ترتیب به عنوان سوخت و اکسیدکننده استفاده شده است. ترکیبات و مشخصات گاز طبیعی شهر تهران در جدول ۱ مشاهده می‌شود. در جدول ۱ برای ارزش حرارتی و چگالی نسبی مخلوط دو مقدار حداکثر و حداقل حداکثر بیان شده است. برای محاسبات انجام شده در این پژوهش از میانگین این دو مقدار برای چگالی نسبی و ارزش حرارتی سوخت استفاده می‌گردد.

مشعل‌های مورد استفاده در این کار از ۱۰۰٪ تا ۲۰٪ ظرفیت نامی، شعله پایدار ایجاد می‌کنند [۱۳]. روتامترهای به کار رفته در دستگاه آزمون دارای دقت ۲٪ بیشینه مقیاس است. یعنی دبی‌های نزدیک به مقدار بیشینه، بالاترین دقت و دبی‌های نزدیک به مقدار کمینه، کم‌ترین دقت را دارند. در این تحقیق بیشینه خطای ناشی از این موضوع ۱۰٪ در نظر گرفته شده است. یعنی دبی‌هایی مورد آزمایش باید دارای حدکثر ۱۰٪ خطا باشند. ظرفیت‌های بیشینه نیز باعث ایجاد گرمای زیاد اطراف بستر آزمایشگاهی می‌شود. کنترل این گرما و کار با دستگاه برای آزمون‌گر مشکل می‌گردد. بنابراین دبی‌های خیلی پایین و دبی‌های خیلی بالا به دلایل ذکر شده، مورد سنجش قرار نمی‌گیرد.

ناحیه‌ی اشتعال پذیری بین دو حد بالا و حد پایین خاموشی می‌باشد. حد پایین در مخلوط رقیق و نسبت هم‌ارزی کم‌تر از یک اتفاق می‌افتد و حد بالا در مخلوط غنی و نسبت هم‌ارزی بیش‌تر از یک تعریف می‌گردد. در این پژوهش، مشعل در هوای محیط مورد سنجش قرار می‌گیرد. هوای محیط نیز تاثیر به‌سزایی در بروز اشتعال دارد. بنابراین از میان حدود اشتعال‌پذیری، فقط حد پایین قابل دستیابی می‌باشد. برای گاز متان، حد پایین اشتعال پذیری ۰،۴۶ گزارش شده است [۱۴]. به عبارت دیگر مقدار هوای لازم برای رسیدن به حد پایین، بیش از دو برابر مقدار استوکیومتریکی است. بنابراین علاوه بر محدودیت دبی‌های خیلی کم و خیلی زیاد، محدودیت دو برابر بودن دبی هوا نسبت دبی گاز برای رسیدن به حد پایین نیز اضافه می‌شود.

با توجه به موارد گفته شده، محدوده‌ی دبی گاز ۱،۱ تا ۱،۶ متر مکعب بر ساعت و محدوده‌ی نسبت هم‌ارزی ۰،۴ تا ۱،۲ انتخاب می‌شود. این محدوده نسبت هم‌ارزی به این دلیل تعریف شده است که حتما حد اشتعال‌پذیری پایین و شعله‌ی کمی غنی‌تر از حالت استوکیومتریکی را پوشش دهد.

جمع‌آوری داده‌ها

داده‌های آزمایش شامل فشار و دمای مسیر، دبی گاز و هوا و تصاویر مشعل می‌باشد. تصاویر مشعل توسط دوربین (scb-5000) CCD گرفته شده است. فشار و دمای مسیر برای تصحیح مقدار روتامتر کاربرد دارد. تصحیح مقدار روتامتر با فرض گاز ایدال برای گاز و هوا، توسط رابطه‌ی (۳) انجام می‌شود.

$$\frac{P_r Q_r}{T_r} = \frac{P_c Q_c}{T_c} \quad (3)$$

آنالیز عدم قطعیت

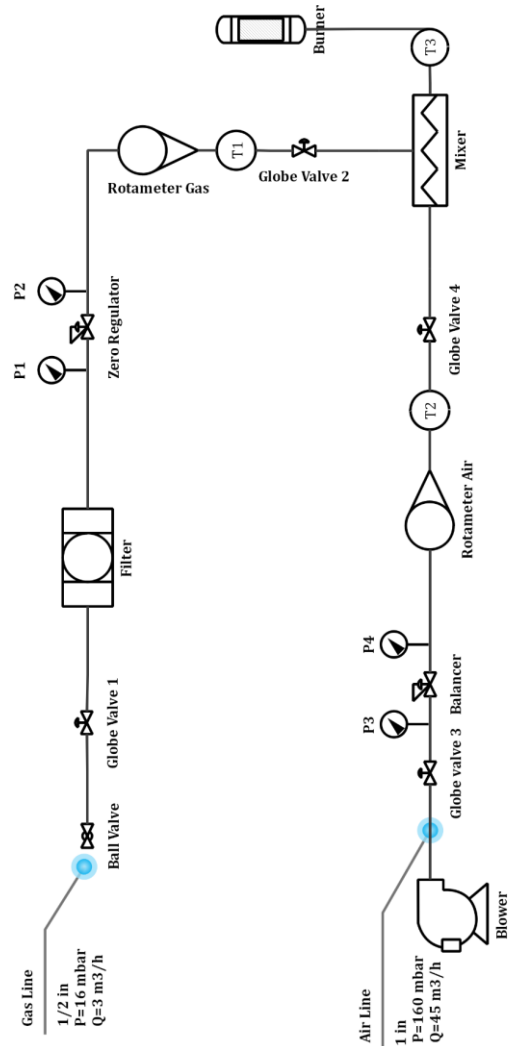
پس از تصحیح مقدار روتامترها و دستیابی به دبی واقعی گاز و هوا، اقدام به محاسبه‌ی ظرفیت حرارتی مشعل و نسبت هم‌ارزی می‌شود. این مقدار محاسبه شده، متاثر از داده‌های خوانده شده از ابزارهای اندازه‌گیری می‌باشد. عدم قطعیت مقادیر دما و فشار تقریباً صفر است. با توجه به رابطه‌ی (۱) عدم قطعیت ظرفیت حرارتی نیز صفر است؛ زیرا عدم قطعیت دبی خوانده شده از روتامتر گاز صفر می‌باشد.

در جدول ۲ نتایج آنالیز عدم قطعیت نسبت هم‌ارزی به روش کلاین و مکلینتوک [۱۵] نمایش داده شده است. دبی هوا با توجه به نوسان زیاد، ۱۰ بار خوانده و میانگین گرفته می‌شود. اختلاف نسبی این ده بار تکرار به عنوان عدم قطعیت کمیت دبی هوا شناخته می‌شود. با توجه به رابطه‌ی (۴) و وابستگی نسبت هم‌ارزی به دبی هوا، نتایج این آنالیز نشان می‌دهد،

است. از یک دمنده‌ی مدل سایدچنل با قدرت موتور ۰،۷۵ kW برای تامین دبی و فشار لازم مسیر هوا استفاده شده است. مسیر هوا شامل دو عدد شیر تنظیمی در ابتدا و انتهای مسیر و تنظیم‌کننده فشار می‌باشد.

گام پنجم: انتخاب ابزارهای اندازه‌گیری

با توجه به روابط (۱) و (۲) حدوداً بیش‌ترین مقدار دبی برای گاز و هوا در ظرفیت حرارتی ۳۰ kW، به ترتیب ۳ و ۴۵ متر مکعب بر ساعت می‌باشد. محدوده دبی روتامتر هوا بین ۰،۳۵ تا ۳ متر مکعب بر ساعت و گاز بین ۶،۵ تا ۴۵ متر مکعب بر ساعت می‌باشد. در مسیر گاز از یک فشارسنج عقربه‌ای با محدوده اندازه‌گیری صفر تا ۱۰۰ میلی‌بار قبل از تنظیم‌کننده فشار (P₁) و صفر تا ۴۰ میلی‌بار بعد از تنظیم‌کننده فشار (P₂) استفاده شده است. در مسیر هوا نیز از یک فشارسنج عقربه‌ای با محدوده اندازه‌گیری صفر تا ۲۵۰ میلی‌بار قبل از تنظیم‌کننده فشار (P₃) و صفر تا ۱۰۰ میلی‌بار بعد از تنظیم‌کننده فشار (P₄) استفاده شده است. همچنین دمای هوا، گاز و مخلوط توسط سه دماسنج عقربه‌ای با محدوده‌ی صفر تا ۶۰ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری می‌شود.



شکل ۲ شماتیک بستر آزمون مشعل پیش‌آمیخته

روش آزمایش

سرمشعل می‌گردد. بنابراین این شرایط مشعل نمی‌تواند حالت مطلوب آن باشد [۲].

با افزایش دبی هوا و کاهش نسبت هم‌ارزی، شعله کمی از سطح مشعل فاصله گرفته و باعث می‌شود که برافروختگی سطح سرمشعل برطرف شود. در نسبت هم‌ارزی ۰٫۷۳، شعله به رنگ آبی مشاهده می‌شود؛ ولی کماکان ریشه‌های شعله نزدیک سطح سرمشعل می‌باشد و پدیده‌ی بلندشدگی شعله مشاهده نمی‌گردد. لی و هم‌کاران این حالت شعله را برای مشعل مورد آزمایش خود، حالت پایدار معرفی کردند. وی شعله‌ی آبی که بلندشدگی در آن مشاهده نمی‌شود را شعله‌ی پایدار و مطلوب این نوع مشعل‌ها معرفی کرده است [۸]. در این تحقیق نیز از همین تعریف برای تبیین پایداری شعله استفاده می‌گردد.

ادامه روند افزایش دبی هوا و کاهش نسبت هم‌ارزی باعث می‌شود که رفته رفته سرعت مخلوط از سرعت سوزش پیشی بگیرد. این عدم توازن بین سرعت مخلوط نسوخته و سرعت سوزش شعله باعث می‌شود، شعله از سطح سرمشعل فاصله بگیرد. شعله‌ی بلند شده بنا به دلایلی نامطلوب است. اول اینکه، باعث رها شدن گازهای نسوخته می‌شود. بنابراین احتراق ناقص بوجود می‌آید. دوم اینکه، ایجاد جرقه برای شعله‌ای که در فاصله از سوراخ سرمشعل ایجاد می‌شود، مشکل است. دلیل سوم اینکه، کنترل دقیق مکان شعله‌ی بلند شده مشکل است. بنابراین باعث انتقال حرارت ضعیف می‌شود. علاوه بر موارد گفته شده، شعله‌ی بلند شده باعث بروز سر و صدا نیز می‌گردد [۱۴]. پدیده‌ی بلندشدگی در نسبت هم‌ارزی ۰٫۶۴ از کناره‌های سرمشعل شروع شده و با افزایش دبی هوا، این پدیده بروز بیش‌تری پیدا می‌کند و به سمت قسمت‌های مرکزی کشیده می‌شود. در نسبت هم‌ارزی ۰٫۵۴، کاملاً شعله از سطح فاصله گرفته است. با افزایش بیش‌تر دبی هوا و رسیدن نسبت هم‌ارزی به ۰٫۴۴، شعله به مرز خاموشی می‌رسد. از شکل ۳ می‌توان نتیجه گرفت که در مخلوط‌های رقیق هرچه نسبت هم‌ارزی کاهش پیدا کند، فاصله‌ی شعله از سطح سرمشعل بیش‌تر می‌شود. زیرا سرعت مخلوط ورودی افزایش می‌یابد. همچنین شعله با کاهش نسبت هم‌ارزی به ترتیب رنگ سبز، زرد و آبی به خود می‌گیرد.

عدم قطعیت نسبت هم‌ارزی در دبی هوای ۲۵ متر مکعب بر ساعت، ۴٪ می‌باشد.

$$\varphi = \frac{17.12 * \rho_{fuel} * W}{LHV * \rho_{air} * Q_{air}} \quad (۴)$$

جدول ۲ آنالیز عدم قطعیت نسبت هم‌ارزی

متغیر	واحد	مقدار	$W_{\varphi} = \frac{\partial \varphi}{\partial Q_{air}} W_{Q_{air}}$
Q_{air}	m^3/hr	25	1
مقدار عدم قطعیت کل: $\frac{W_{\varphi}}{\varphi} = 4\%$			

تکرارپذیری آزمایش:

هر آزمایش حداقل سه بار تکرار شده است و میانگین آن به عنوان داده نهایی ثبت شده است. اختلاف معناداری بین تکرارهای آزمایش مشاهده نشده است.

نتایج آزمایش

حد خاموشی پایین:

جدول ۳ دبی گاز تصحیح شده، ظرفیت حرارتی مشعل و حد خاموشی پایین را نشان می‌دهد. ظرفیت حرارتی که مورد آزمایش قرار گرفته است، بین ۱۱٫۷۴ تا ۱۷٫۱۴ کیلووات می‌باشد. حد خاموشی پایین نیز برای مشعل مورد آزمایش و شرایط آزمایشگاهی مذکور تقریباً ۰٫۴۴ بدست آمده است.

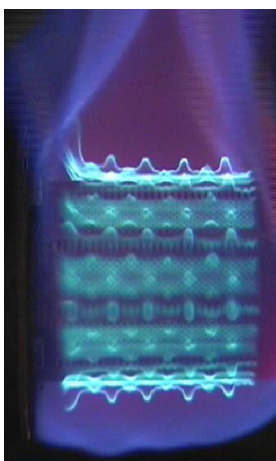
جدول ۳ ظرفیت حرارتی و حد خاموشی پایین بعد از تصحیح دبی

دبی گاز (m^3/hr)	دبی گاز تصحیح شده (m^3/hr)	ظرفیت حرارتی (kW)	حد خاموشی پایین
1.1	1.13	11.74	0.44
1.2	1.23	12.77	0.44
1.3	1.34	13.92	0.44
1.4	1.45	14.99	0.45
1.5	1.55	16.07	0.45
1.6	1.65	17.14	0.44

تغییرات شعله در ظرفیت ثابت:

شکل ۳ تصاویر شعله را در ظرفیت حرارتی ۱۱٫۷۴ kW و نسبت هم‌ارزی-های مختلف نشان می‌دهد. در نسبت هم‌ارزی ۱٫۱۲، رنگ شعله به سبز متمایل شده است. این حالت به دلیل فعال شدن رادیکال C_2 در مخلوط-های غنی نزدیک به حالت استوکیومتری می‌باشد. این رادیکال طیف مرئی ۵۱۶nm از خود ساطع می‌کند که در محدوده‌ی رنگی سبز مایل به آبی یا همان فیروزه‌ای قرار می‌گیرد [۸، ۱۶].

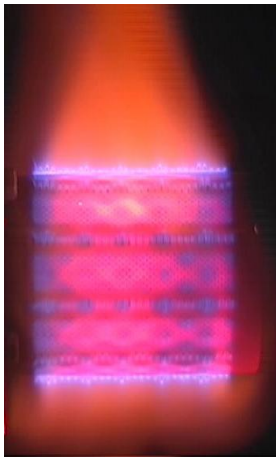
وقتی مخلوط گاز و هوا از حالت استوکیومتری کمی رقیق‌تر می‌شود، شعله‌ی زرد رنگ تشکیل می‌شود. عموماً در احتراق سوخت‌های هیدروکربنی، ایجاد رنگ زرد به دلیل وجود دوده می‌باشد. ولی در مشعل شعله سطحی علاوه بر این موضوع، نزدیک شدن شعله به سطح سرمشعل و در نتیجه برافروختگی آن باعث ایجاد تشعشعات فروسرخ می‌شود [۱۷]. این پدیده علاوه بر تولید دوده، باعث وارد شدن تنش حرارتی به سطح سرمشعل می‌شود. این تنش حرارتی شدید نهایتاً باعث کاهش طول عمر



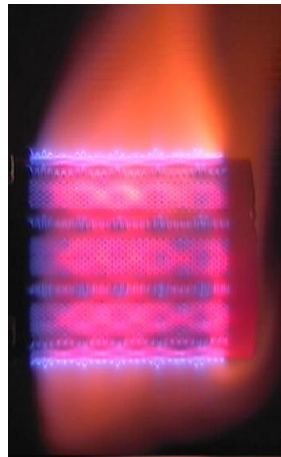
$\varphi = 1.12$



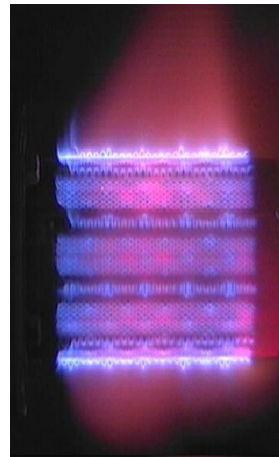
$\varphi = 0.91$



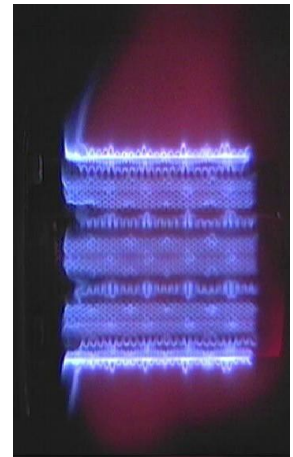
11.74 kW



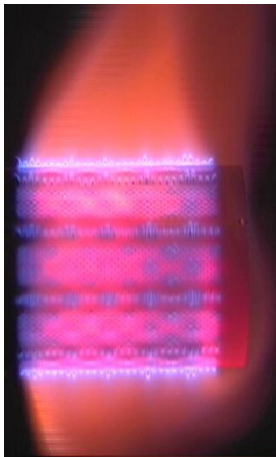
12.77 kW



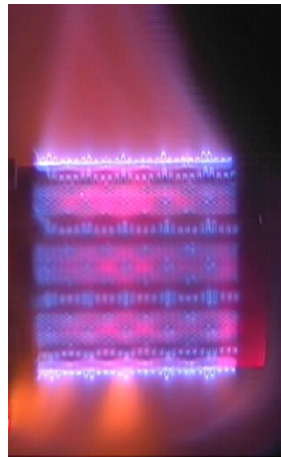
$\phi = 0.73$



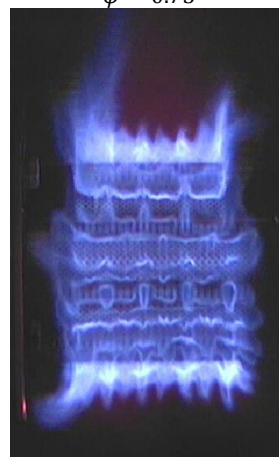
$\phi = 0.64$



13.92 kW



14.99 kW

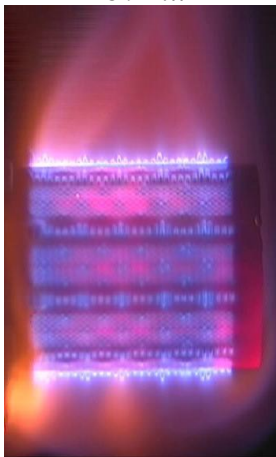


$\phi = 0.54$

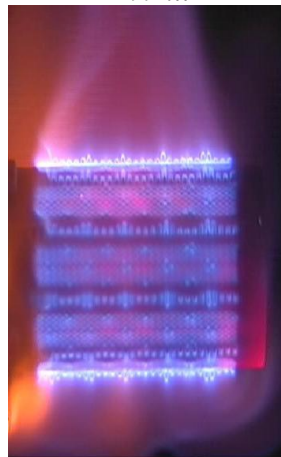


$\phi = 0.44$

شکل ۳ تصاویر مشعل در ظرفیت حرارتی ۱۱,۷۴ kW در نسبت هم‌ارزی های متفاوت



16.07 kW



17.14 kW

شکل ۴ تصاویر مشعل در نسبت هم‌ارزی ۰,۸۵ و ظرفیت‌های متفاوت

تغییرات شعله در نسبت هم‌ارزی ثابت:

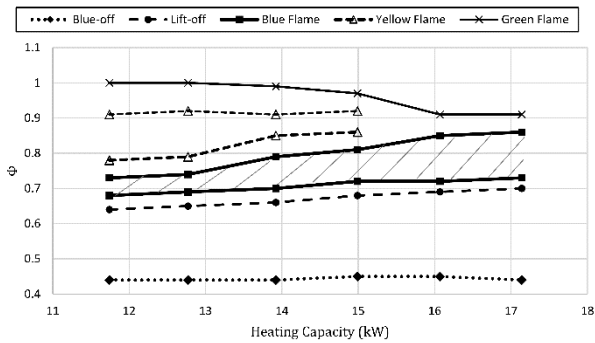
در شکل ۴ تاثیر تغییر ظرفیت در نسبت هم‌ارزی ثابت ۰,۸۵ بررسی شده است. هرچه ظرفیت حرارتی افزایش می‌یابد، دبی مخلوط نسوخته نیز افزایش می‌یابد؛ بنابراین سرعت مخلوط از سرعت سوزش بیشتر می‌شود. در نتیجه شعله از سطح سرمشعل فاصله می‌گیرد و برافروختگی سطح بر طرف می‌شود [۲]. به همین دلیل است با افزایش ظرفیت حرارتی، محدوده‌ی شعله‌ی زرد تشعشعی کوچک‌تر شده و به تدریج از بین می‌رود.

دیاگرام پایداری:

دیاگرام پایداری شکل ۵ از پنج ناحیه‌ی تشکیل شده است. ناحیه اول، ناحیه‌ی بروز شعله‌ی سبز است. در عمل رنگ شعله در این ناحیه فیروزه‌ای می‌باشد. دلیل ایجاد این رنگ فعال شدن رادیکال C_2 در محدوده‌ی نسبت هم‌ارزی یک می‌باشد. البته این حالت بیش‌تر در مخلوط‌های غنی نزدیک به شرایط استوکیومتری رخ می‌دهد. هرچه ظرفیت حرارتی افزایش می‌یابد، این ناحیه وسیع‌تر می‌شود و امکان بروز شعله سبز رنگ در مخلوط‌های کمتر از نسبت هم‌ارزی یک نیز وجود دارد [۸, ۱۶, ۱۸, ۱۹].

هفتمین کنفرانس سوخت و احتراق ایران، ۲۴ و ۲۵ بهمن ماه ۱۳۹۶

تهران، دانشگاه صنعتی شریف



شکل ۵. دیگرام پایداری مشعل شعله سطحی استوانه‌ای

لبه یابی شعله

شعله‌ی پیش‌آمیخته‌ی آرام به دو بخش تقسیم می‌شود: ناحیه‌ی پیش‌گرم که انرژی کمی آزاد می‌کند و ناحیه‌ی واکنشی که حجم زیادی انرژی ناشی از واکنش‌های شیمیایی آزاد می‌شود. ناحیه‌ی واکنشی خود شامل دو بخش است. یک ناحیه نازک که واکنش‌های شیمیایی در آن سریع اتفاق می‌افتد و در ادامه‌ی آن، یک ناحیه بزرگ‌تر که واکنش‌های شیمیایی کندتر انجام می‌شود. ناحیه‌ی واکنش‌های سریع در فشار اتمسفر، ضخامتی کمتر از یک میلی‌متر دارد. ضخامت ناحیه‌ی واکنشی دوم در فشار اتمسفر می‌تواند تا چندین میلی‌متر گسترش یابد [۱۴].

لبه‌یابی شعله به چند دلیل مفید است. اولاً، لبه‌یابی تخمینی مناسب از مشخصات ظاهری شعله مانند شکل، اندازه و موقعیت ارائه می‌کند. ثانیاً، با حذف نویز و پس‌زمینه تعداد داده‌های لازم برای پردازش‌های بعدی ناحیه‌ی شعله را کاهش می‌دهد و باعث کاهش زمان و افزایش دقت پردازش‌های بعدی می‌گردد. ثالثاً، از این روش می‌توان برای جداسازی نواحی مختلف شعله استفاده کرد [۲۰].

در این قسمت سعی شده است که مرز بین دو ناحیه‌ی واکنشی سریع و کند به روش لبه‌یابی تصاویر استخراج شود. از تصویر مشعل در ظرفیت ۱۱،۷۴ کیلووات و نسبت هم‌ارزی ۰،۷۳ به عنوان تصویر نمونه برای انجام لبه‌یابی استفاده شده است. روش‌های مختلفی برای لبه‌یابی تصاویر وجود دارد که در این تحقیق از روش کنی^۱ استفاده می‌گردد. در شکل ۶ نتیجه‌ی کار بردن الگوریتم کنی برای مشعل مورد نظر نشان داده شده است. تصاویر از نمای نزدیک مشعل انتخاب شده تا لبه‌ی مورد نظر به خوبی قابل مشاهده باشد.

الگوریتم‌های لبه‌یابی تصویر را به حالت دودویی تبدیل می‌کند. همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، لبه شناسایی شده توسط الگوریتم کنی کاملاً روی لبه مشاهده شده در تصویر خاکستری است. مقایسه‌ی نقاط ۱، ۲ و ۳ به خوبی این موضوع را نشان می‌دهد. مقدار پیکسل روی لبه‌ی شناسایی شده برابر ۱ است؛ زیرا تصویر به حالت دودویی تبدیل شده است. در سمت چپ مشعل کمی بلندشدگی مشاهده می‌شود که این موضوع هم به خوبی در تصویر لبه‌یابی شده نشان داده شده است. قسمت بلندشدگی در شکل با شماره ۱ مشخص شده است. با مقایسه لبه‌های شناسایی شده توسط این الگوریتم با لبه‌ی مشاهده شده در تصویر خاکستری، کارآمد بودن این روش برای این مشعل به اثبات می‌رسد. بنابراین برای تمییز دادن

ناحیه دوم، ناحیه‌ی شعله‌ی زرد تشعشی است. عموماً در احتراق سوخت-های هیدروکربنی، ایجاد رنگ زرد به دلیل وجود دوده می‌باشد. ولی در مشعل شعله سطحی علاوه بر این موضوع، نزدیک شدن شعله به سطح سر مشعل و در نتیجه برافروختگی آن باعث ایجاد تشعشعات فرورسرخ می‌شود [۱۷]. چشم انسان این پدیده را به صورت رنگ قرمز می‌بیند. در ظرفیت-های پایین سرعت سوزش بیشتر از سرعت مخلوط نسوخته می‌باشد؛ زیرا در دبی مخلوط نیز کم است. به همین دلیل شعله به سطح می‌چسبد و باعث برافروختگی سطح سرمشعل می‌گردد. هرچه ظرفیت حرارتی افزایش می‌یابد، دبی مخلوط نسوخته نیز افزایش می‌یابد؛ بنابراین سرعت مخلوط از سرعت سوزش بیشتر می‌شود. در نتیجه شعله از سطح سرمشعل فاصله می‌گیرد و برافروختگی سطح بر طرف می‌شود [۲]. به همین دلیل است با افزایش ظرفیت حرارتی، محدوده‌ی شعله‌ی زرد تشعشی کوچک‌تر شده و به تدریج از بین می‌رود. به طوری که در ظرفیت حرارتی ۱۷،۱۴ کیلووات شعله‌ی زرد تشعشی ایجاد نمی‌گردد.

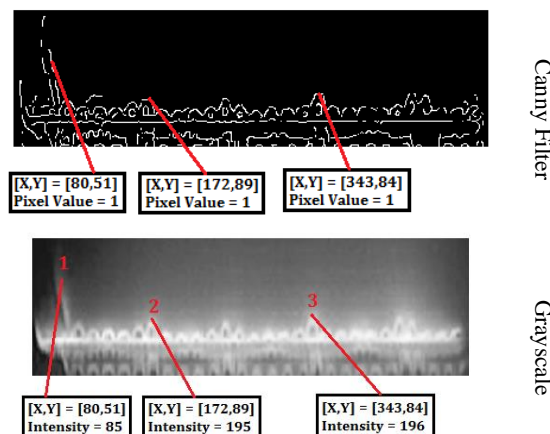
ناحیه سوم، ناحیه‌ی شعله‌ی آبی پایدار می‌باشد. این ناحیه در حد فاصل بین دو حالت شعله‌ی زرد تشعشی و بلندشدگی شعله اتفاق می‌افتد. در شکل ۵ این ناحیه به وسیله‌ی هاشور مشخص شده است. پایدارترین حالت یک شعله‌ی پیش‌آمیخته در این محدوده قرار می‌گیرد. در این حالت بین سرعت مخلوط نسوخته و سرعت سوزش تعادل برقرار شده است. یعنی نه شعله به سطح سرمشعل چسبیده است و نه خیلی از سطح فاصله گرفته است.

ناحیه چهارم، ناحیه‌ی بلندشدگی شعله است. شروع بلندشدگی شعله از لبه‌های کناری سرمشعل استوانه‌ای می‌باشد. حتی در حالت شعله‌ی آبی پایدار نیز در برخی از قسمت‌های سرمشعل استوانه‌ای به صورت موضعی بلندشدگی رخ می‌دهد. در تحقیق حاضر این بلندشدگی‌های موضعی ناچیز مشاهده شده است. بنابراین زمانی که شعله در دو لبه‌ی کناری مشعل به طور کامل شروع به بلند شدن می‌کند، پدیده‌ی بلندشدگی گزارش می‌گردد. با افزایش ظرفیت، بلندشدگی شعله از نسبت هم‌ارزی ۰،۶۴ به ۰،۷ منتقل شده است. این موضوع نیز به دلیل افزایش سرعت مخلوط نسوخته و در نتیجه بیشتر شدن آن نسبت به سرعت سوزش اتفاق افتاده است. ناحیه پنجم، حد خاموشی پایین شعله‌ی پیش‌آمیخته می‌باشد. در واقع کم‌ترین نسبت هم‌ارزی که شعله‌ی پیش‌آمیخته مشتعل باقی می‌ماند. در تمام ظرفیت‌ها حد خاموشی پایین در حدود ۰،۴۴ است. این مقدار به مقدار گزارش شده برای حد خاموشی پایین گاز متان (۰،۴۶) بسیار نزدیک است [۱۴]. این اختلاف می‌تواند به دلیل هندسه‌ی مشعل، شرایط آزمایشگاهی و تفاوت گاز شهری با گاز متان به وجود آمده باشد. از نمودار پایداری می‌توان نتیجه گرفت که حالت شعله‌ی پایدار مشعل شعله سطحی استوانه‌ای در ظرفیت‌های حرارتی مورد آزمایش، بین نسبت هم‌ارزی ۰،۷ تا ۰،۷۶ واقع شده است.

^۱ Canny Method

P_r	mbar	فشار استاندارد درج شده روی روتامتر،
P_c	mbar	فشار واقعی مسیر،
Q_r	m^3/hr	دبی خوانده شده از روتامتر،
Q_c	m^3/hr	دبی تصحیح شده،
T_r	K	دمای استاندارد درج شده روی روتامتر،
T_c	K	دمای واقعی مسیر،
$W\phi$		عدم قطعیت نسبت هم‌ارزی
$W_{Q_{air}}$		عدم قطعیت دبی هوا
فهرست علائم یونانی		
ρ_{air}	kg/m^3	چگالی هوا،
ρ_{fuel}	kg/m^3	چگالی گاز،
ϕ		نسبت هم‌ارزی سوخت

دو ناحیه‌ی واکنشی سریع و کند از هم می‌توان از روش لبه‌یابی استفاده کرد.



شکل ۶ نتیجه لبه‌یابی توسط الگوریتم کنی و مقایسه آن با تصویر خاکستری

نتیجه‌گیری

در این تحقیق مشعل پیش‌آمیخته‌ی شعله سطحی استوانه‌ای با ظرفیت نامی ۲۸ kW مورد بررسی تجربی قرار گرفت. این مشعل در حد فاصل بین ظرفیت حرارتی ۱۱،۷۴ تا ۱۷،۱۴ کیلووات و نسبت هم‌ارزی ۰،۴ تا ۱،۲ آزمایش شد. به منظور انجام این آزمایش‌ها یک بستر آزمون مشعل پیش‌آمیخته طراحی و ساخته شد. مراحل طراحی این بستر به طور کامل تشریح و سپس روش آزمایش و مراحل آن تبیین شد. از نتایج بدست آمده می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- ۱- رنگ شعله با کاهش نسبت هم‌ارزی از ۱،۲ به سمت ۰،۴ به ترتیب سبز، زرد و آبی می‌شود. رنگ سبز به دلیل فعال شدن رادیکال C_2 در مخلوط‌های غنی نزدیک به حالت استوکیومتری رخ می‌دهد.
- ۲- در مخلوط‌های رقیق با کاهش نسبت هم‌ارزی، فاصله‌ی شعله از سطح سر مشعل بیشتر می‌شود. نهایتاً باعث بروز بلندشدگی شعله و خاموشی می‌گردد.
- ۳- با افزایش ظرفیت و در نتیجه افزایش سرعت مخلوط نسوخته، امکان بروز شعله‌ی زرد تشعشعی کاهش می‌یابد.
- ۴- ناحیه شعله‌ی پایدار در حد فاصل دو حالت شعله‌ی زرد تشعشعی و بلندشدگی شعله تعریف می‌گردد. این ناحیه با افزایش ظرفیت وسیع‌تر می‌شود.
- ۵- محدوده‌ی نسبت هم‌ارزی ۰،۷ تا ۰،۷۶ برای تمام ظرفیت‌های آزمایش شده، دارای شعله‌ی پایدار می‌باشد.
- ۶- از روش لبه‌یابی تصویر می‌توان برای جداسازی نواحی شعله‌ی پیش‌آمیخته استفاده کرد. ناحیه‌ی واکنشی سریع و کند با این روش به خوبی از هم تمییز داده شد.

فهرست علائم

Q_{air}	m^3/hr	دبی هوا،
Q_{fuel}	m^3/hr	دبی گاز،
W	kW	ظرفیت حرارتی،
LHV	kcal/ m^3	ارزش حرارتی پایین سوخت،

مراجع

[۱] R. M. Lazzarin and L. Schibuola, "Performance analysis of heating plants equipped with condensing boilers," *Journal of heat recovery systems*, vol. 6, no. 4, pp. 269-276, 1986.

[۲] B. Yu, S.-M. Kum, C.-E. Lee, and S. Lee, "Combustion characteristics and thermal efficiency for premixed porous-media types of burners," *Energy*, vol. 53, pp. 343-350, 2013.

[۳] Q. Chen, J. Swithenbank, and V. Sharifi, "Review of Industrial Condensing Boilers (Technology & Cost). Case Study: Thermal Design of a condensing boiler in a Large Scale Biomass District Heating Plant (40 MW)," *Sheffield University Waste Incineration Centre, Sheffield University*, 2010.

[۴] "کارگاه آموزشی پکیج‌های چگالشی، انجمن احتراق ایران، دانشگاه تربیت مدرس" تاریخ برگزاری، ۱۳۹۵/۳/۹.

[۵] S. Lee, S.-M. Kum, and C.-E. Lee, "An experimental study of a cylindrical multi-hole premixed burner for the development of a condensing gas boiler," *Energy*, vol. 36, no. 7, pp. 4150-4157, 2011.

[۶] S. Lee, S.-M. Kum, and C.-E. Lee, "Performances of a heat exchanger and pilot boiler for the development of a condensing gas boiler," *Energy*, vol. 36, no. 7, pp. 3945-3951, 2011.

[۷] V. Raghavan, "Experimental Study of Premixed Flames on a Multi-Hole Matrix Burner," *International Journal of Integrated Engineering*, vol. 4, no. 1, 2012.

[۸] P. H. Lee and S. S. Hwang, "Formation of lean premixed surface flame using porous baffle plate and flame holder," *Journal of Thermal Science and Technology*, vol. 8, no. 1, pp. 178-189, 2013.

[۹] F.-G. Liu, X.-Y. You, Q. Wang, and R. Zhang, "On optimal design and experimental validation of household appliance burner of

- low pollutant emission," *Energy conversion and management*, vol. 76, pp. 837-845, 2013.
- [۱۰] D.-F. Zhao, F.-G. Liu, X.-Y. You, R. Zhang, B.-L. Zhang, and G.-L. He, "Optimization of a premixed cylindrical burner for low pollutant emission," *Energy Conversion and Management*, vol. 99, pp. 151-160, 2015.
- [۱۱] S. S. Rashwan, A. H. Ibrahim, T. W. Abou-Arab, M. A. Nemitallah, and M. A. Habib, "Experimental investigation of partially premixed methane-air and methane-oxygen flames stabilized over a perforated-plate burner," *Applied Energy*, vol. 169, pp. 126-137, 2016/05/01/ 2016.
- [۱۲] <http://www.nigc.ir>. ۱۳۹۵/۵/۳۰، آخرین بازدید،
- [۱۳] ["http://www.bekaert.com/en/products/construction/heating/duonit-innovative-compact-cylindrical-gas-burner-with-a-round-head"](http://www.bekaert.com/en/products/construction/heating/duonit-innovative-compact-cylindrical-gas-burner-with-a-round-head). ۱۳۹۶/۵/۳، تاریخ آخرین دسترسی،
- [۱۴] S. R. Turns, *An introduction to combustion*. McGraw-hill New York, 1996.
- [۱۵] S. a. Kline and F. McClintock, "A., 1953, "Describing Uncertainties in Single-Sample Experiments," *ASME Mech, Eng*, vol. 75, pp. 3-8.
- [۱۶] R. R. John and M. Summerfield, "Effect of turbulence on radiation intensity from propane-air flames," Princeton University, 1957.
- [۱۷] H.-W. Huang and Y. Zhang, "Flame colour characterization in the visible and infrared spectrum using a digital camera and image processing," *Measurement Science and Technology*, vol. 19, no. 8, p. 085406, 2008.
- [۱۸] R. R. John and M. Summerfield, "Studies of the mechanism of flame stabilization by a spectral intensity method," *Jet Propulsion*, vol. 25, p. 535, 1955.
- [۱۹] I. Hurlle, R. Price, T. Sugden, and A. Thomas, "Sound emission from open turbulent premixed flames," in *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1968, vol. 303, no. 1475, pp. 409-427: The Royal Society.
- [۲۰] T. Qiu, Y. Yan, and G. Lu, "An autoadaptive edge-detection algorithm for flame and fire image processing," *IEEE Transactions on instrumentation and measurement*, vol. 61, no. 5, pp. 2012, 1486-1493.