

اندازه‌گیری نورتابی شیمیایی رادیکال متیلیدین برانگیخته در شعله‌های حاوی دوده

کامیاب کرباسی شرق^۱، محمد مهدی صالحی^{۲*}، امیر مردانی^۳

۱- کارشناسی ارشد، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، kamyab.karbasishargh@ae.sharif.edu

۲- استادیار، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، mmsalehi@sharif.edu

۳- دانشیار، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، amardani@sharif.edu

* نویسنده مخاطب

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۰۴، دریافت آخرین اصلاحات: ۱۴۰۱/۰۶/۰۴، پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۲۱)

چکیده: در این پژوهش با استفاده از یک روش تجربی غیرتداخلی، نورتابی شیمیایی گونه متیلیدین برانگیخته *CH در شعله نفوذی در رژیم جریان آرام اندازه‌گیری شده است. در این روش از یک دوربین معمولی و فیلترهای نوری میان‌گذر استفاده شده است. نورتابی شیمیایی این گونه در محدوده ۴۳۰ نانومتر ساطع می‌شود، اما در صورت وجود دوده در شعله، تشعشع حرارتی دوده در محدوده نور مرئی در بازه نورتابی شیمیایی گونه متیلیدین برانگیخته نیز تابش قابل ملاحظه‌ای دارد. در این پژوهش با استفاده از دو فیلتر نوری دیگر با طول موج‌های مرکزی ۴۲۰ و ۴۴۰ نانومتر، تخمینی از تشعشع حرارتی دوده در محدوده ۴۳۰ نانومتر به دست می‌آید. با استفاده از این تخمین اثر تشعشع دوده بر نورتابی شیمیایی گونه متیلیدین برانگیخته حذف می‌شود. مقایسه نتایج این پژوهش با شبیه‌سازی عددی نشان می‌دهد که در شرایطی که مقدار کمی دوده تشکیل شده است، این روش با دقت خوبی می‌تواند اثرات تشعشع دوده را حذف کند. اما با افزایش غلظت دوده و در نتیجه افزایش شدت تشعشع آن، خطای روش افزایش می‌یابد.

کلیدواژگان: نورتابی شیمیایی متیلیدین برانگیخته، شعله نفوذی، دوده

مقدمه

روش‌های تجربی پژوهش در حوزه احتراق به دو دسته‌ی تداخلی و غیرتداخلی^۱ تقسیم می‌شوند. روش‌های تجربی تداخلی مانند سرعت سنج سیم‌داغ، ترموکوپل و نمونه‌بردار^۲ بر ساختار میدان جریان تاثیر گذاشته و در نتیجه می‌تواند از خطای قابل ملاحظه‌ای برخوردار باشد. از سویی دیگر برخی از روش‌های تجربی که عمدتاً دارای ماهیت اپتیکی هستند، عمدتاً تداخلی در میدان جریان ایجاد نمی‌کنند. از روش‌های غیرتداخلی برای بررسی میدان جریان واکنشی تشعشع‌های خروجی از شعله نظیر تشعشع گرمایی^۳ و نورتابی شیمیایی^۴ استفاده می‌شود. تشعشع گرمایی ناشی از تبدیل انرژی گرمایی به امواج الکترومغناطیس است که این امواج در دمای شعله می‌تواند مرئی باشد. از مهم‌ترین کاربردهای استفاده از تابش گرمایی برای اندازه‌گیری دما می‌توان به روش آتش‌سنجی^۵ اشاره کرد. نورتابی شیمیایی ناشی از تابش امواج الکترومغناطیس از یک گونه شیمیایی برانگیخته^۶ است. این گونه شیمیایی برانگیخته در واکنش‌های اولیه شیمیایی تولید شده و پس از تابش نور به حالت پایدار می‌رسد.

1. Intrusive & Non-Intrusive
2. Probe
3. Thermal Radiation
4. Chemiluminescence
5. Pyrometry
6. Chemically Excited

در شعله‌های هیدروکربنی قوی‌ترین سیگنال‌های نورتابی شیمیایی به ترتیب ناشی از گونه‌های هیدروکسیل برانگیخته OH^* و متیلیدین برانگیخته CH^* است. تابش گونه هیدروکسیل برانگیخته در طیف ماوراءبنفش است اما تابش گونه متیلیدین در محدوده آبی رنگ طیف مرئی است که بسته به شرایط در شعله‌های هیدروکربنی قابل مشاهده است. از کاربردهای اندازه‌گیری نورتابی شیمیایی گونه متیلیدین برانگیخته می‌توان به بررسی غیرمستقیم پارامترهای شعله مانند محاسبه نرخ آزادسازی انرژی [۲۰،۲۱]، محاسبه نسبت هم‌ارزی [۴،۳]، پدیدارشناسی ساختار شعله [۶،۵] و اعتبارسنجی شبیه‌سازی‌های عددی اشاره کرد [۸،۷].

در پژوهش حسین و ناکامورا [۱] نرخ آزادسازی انرژی در یک شعله نفوذی جریان متقابل^۱ با استفاده از روش عددی محاسبه شده و با سیگنال نورتابی شیمیایی متیلیدین برانگیخته مقایسه شده است. این پژوهش برای دو سوخت متان و پروپان و با رقیق‌کننده‌های مختلف در نرخ کرنش‌های^۲ مختلفی انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که میزان تابش نورتابی شیمیایی این گونه رابطه مستقیمی با نرخ آزادسازی انرژی کلی شعله دارد، که این رابطه در نرخ کرنش‌های کم به صورت خطی و در نرخ کرنش‌های بالا و نزدیک خاموشی به صورت غیرخطی تغییر می‌کند. در پژوهشی مشابه نوری و ساتزمن [۲] با استفاده از شعله‌های پیش‌مخلوط بانزن^۳ نشان دادند که نرخ آزادسازی انرژی رابطه مستقیمی با فشار، نسبت هم‌ارزی و شدت سیگنال نورتابی شیمیایی CH^* دارد. در فشارهای پایین میزان وابستگی نرخ آزادسازی انرژی به نسبت هم‌ارزی بیشتر است. در نتیجه اندازه‌گیری نرخ آزادسازی انرژی نیازمند اندازه‌گیری توزیع مکانی نسبت هم‌ارزی در شعله است و با استفاده از سیگنال نورتابی شیمیایی CH^* به تنهایی نمی‌توان این مهم را اندازه‌گیری کرد. اما در فشارهای بالا، نظیر شرایط عملکردی موتورهای احتراق داخلی و توربین‌های گازی، میزان وابستگی نرخ آزادسازی انرژی به نسبت هم‌ارزی کاهش می‌یابد و می‌توان با اندازه‌گیری میزان نورتابی شیمیایی CH^* ، به تنهایی تقریب خوبی از نرخ آزادسازی انرژی به دست آورد.

نتایج پژوهش نوری و ساتزمن [۲] و پژوهش‌های مشابه [۴،۳] نشان می‌دهد که با استفاده از اندازه‌گیری همزمان نورتابی شیمیایی OH^* و CH^* می‌توان نسبت هم‌ارزی را به صورت محلی محاسبه کرد. ژانگ و همکاران [۳] نسبت سیگنال نورتابی شیمیایی OH^* و CH^* را در یک شعله نفوذی با جریان هوای هم‌محور^۴ اندازه‌گیری کرده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که در نواحی آبی رنگ شعله، این نسبت می‌تواند تقریب خوبی از نسبت کربن به اکسیژن و در نتیجه نسبت هم‌ارزی محلی ارائه دهد. ژبونگ و همکاران [۴] نیز به نتیجه‌گیری مشابهی با بررسی شعله‌های نیمه‌پیش‌مخلوط رسیده‌اند.

از دیگر کاربردهای اندازه‌گیری نورتابی شیمیایی می‌توان به پدیدارشناسی ساختار شعله اشاره کرد. به عنوان مثال ینگ و همکاران [۵] با استفاده از نورتابی شیمیایی گونه‌های CH^* و OH^* به بررسی اثر رقیق‌سازی سوخت با گاز دی‌اکسیدکربن بر روی ساختار یک شعله نفوذی پرداخته است. همچنین تامالو و همکاران [۶] با استفاده از این روش اثر اضافه کردن هیدروژن به سوخت متان بر روی ناپایداری آکوستیکی یک شعله پیش‌مخلوط را بررسی کرده‌اند. از دیگر پژوهش‌های مشابه می‌توان به پژوهش سایدی و ماستراکوس [۹] اشاره کرد که با استفاده از نورتابی شیمیایی به بررسی ساختار شعله نفوذی جت سوخت در جریان هوای عرضی^۵ پرداخته است اشاره کرد. همچنین جیاسی و همکاران [۷] با استفاده از نورتابی شیمیایی گونه متیلیدین ساختار یک شعله نفوذی در شرایط ریزگرانش^۶ را با شرایط گرانش معمول مقایسه کرده‌اند. در این پژوهش نتایج تجربی با نتایج شبیه‌سازی‌های عددی نیز مقایسه شده است. از دیگر پژوهش‌هایی که نتایج تجربی نورتابی شیمیایی برای اعتبارسنجی مدل‌سازی‌های عددی مورد استفاده قرار گرفته است می‌توان به پژوهش پی و همکاران [۸] اشاره کرد. در این

1. Counter-flow Diffusion Flame
 2. Strain Rate
 3. Bunsen Burner
 4. Co-flow Diffusion Flame
 5. Jet in Cross-Flow
 6. Micro-Gravity Conditions

پژوهش شعله اسپری در شرایط عملکردی موتور دیزل با روش تابع توزیع احتمال انتقال یافته^۱ شبیه‌سازی شده است و نتایج با نورتایی شیمیایی گونه OH^* مقایسه شده است.

از پژوهش‌های داخلی انجام شده در زمینه نورتایی شیمیایی می‌توان به پژوهش سلطانیان و ضابطیان [۱۰] اشاره کرد. در این پژوهش تابش گونه‌های مختلفی نظیر CH^* ، OH^* ، C_2^* و CO_2^* با استفاده از یک فیبر نوری متصل به یک طیف سنج و بر روی یک مشعل متخلخل اندازه‌گیری شده است. استفاده از فیبر نوری این امکان را می‌دهد که سیگنال تابش شعله با دقت زمانی بالا داده‌برداری شود و در نتیجه می‌توان با استفاده از یک طیف‌سنج و پردازش سیگنال مربوطه تابش گونه‌های مختلف در طول موج‌های مختلف - اعم از مرئی، ماوراء بنفش و مادون قرمز - را اندازه‌گیری کرد. با این وجود، در صورت استفاده از فیبر نوری یک سیگنال از تجمیع نورتایی‌های شیمیایی اندازه‌گیری می‌شود و نتایج توزیع مکانی نورتایی شیمیایی را نشان نمی‌دهد. جهت اندازه‌گیری توزیع مکانی، تنها راه استفاده از دوربین و فیلترهای نوری میان‌گذر^۲ است. جهت اندازه‌گیری نورتایی شیمیایی گونه CH^* از فیلتر میان‌گذر با طول موج مرکزی ۴۳۰ نانومتر استفاده می‌شود.

در پژوهش‌های فوق تمرکز بررسی نورتایی شیمیایی گونه متیلیدین برانگیخته در شرایط بدون دوده بوده است. در شعله‌های پیش‌مخلوط در صورت وجود مقدار کافی اکسیدکننده دوده تشکیل نمی‌شود. اما تشکیل شعله نفوذی بدون دوده نیازمند رقیق کردن سوخت - با نیتروژن و یا گاز دی‌اکسیدکربن - است. در شرایطی که دوده در شعله تشکیل می‌شود، تابش جسم سیاه دوده در طیف وسیعی از امواج الکترومغناطیس از جمله نواحی نزدیک نورتایی شیمیایی گونه‌های OH^* و CH^* رخ می‌دهد. در نتیجه اندازه‌گیری نورتایی شیمیایی در این شرایط نیازمند حذف اثر نور پس‌زمینه تشعشع دوده است. در این راستا اولین پژوهش توسط هاردالوپاس و همکاران [۱۱] انجام شده است که بر روی حذف اثر دوده از شعله‌های نفوذی در رژیم جریان آشفته متمرکز بوده است. در این پژوهش علاوه بر استفاده از فیلتر نوری ۴۳۰ نانومتری، از دو فیلتر میان‌گذر دیگر با فرکانس‌های مرکزی ۴۲۰ و ۴۴۰ نانومتر جهت حذف تشعشع ناشی از دوده استفاده شده است. این پژوهش بر روی شعله آشفته پیچشی کروسین-هوا انجام شده و جزئیات حذف اثرات تشعشع دوده به‌صورت روشمند ارائه نشده است.

کارنانی و دان-رنکین [۱۲] نیز با استفاده از دو فیلتر ۴۲۰ و ۴۴۰ نانومتر به حذف اثرات تشعشع دوده بر روی تصاویر نورتایی شیمیایی گونه متیلیدین پرداخته‌اند. بر خلاف پژوهش هاردالوپاس و همکاران [۱۱]، این پژوهش بر روی یک شعله ساده نفوذی آرام اتیلن-هوا انجام شده و همچنین نحوه استفاده از تصاویر دو فیلتر ۴۲۰ و ۴۴۰ نانومتر برای حذف اثرات تشعشع دوده با استفاده از قانون پلانک به‌صورت روشمند ارائه شده است. این روش سپس توسط ژانگ و همکاران [۱۳] و لیو و همکاران [۱۴] به ترتیب در شعله‌های جریان متقابل و شعله‌های نفوذی جت مورد استفاده قرار گرفته است. در پژوهش لیو و همکاران [۱۴] علاوه بر CH^* ، از این روش برای حذف اثرات تشعشع دوده بر روی نورتایی شیمیایی گونه OH^* نیز استفاده شده است.

در پژوهش جاری روش تجربی ارائه شده توسط کارنانی و دان رنکین [۱۲] برای اولین بار در کشور پیاده‌سازی شده است. هدف از این پژوهش شناسایی محدودیت‌ها و قابلیت‌های این روش برای اندازه‌گیری نورتایی شیمیایی در شرایط وجود دوده در شعله است. این روش بر روی یک شعله نفوذی آرام با سوخت گاز طبیعی پیاده‌سازی شده است. در این مقاله ابتدا روش تجربی مورد استفاده و تئوری حاکم بر آن تشریح می‌شود. سپس روش شبیه‌سازی عددی و مدل‌های مورد استفاده با جزئیات ارائه می‌شود. در ادامه نتایج تجربی و عددی ارائه و مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. در نهایت نیز نتیجه‌گیری و پیشنهادات برای ادامه کار ارائه می‌شود.

1. Transported Probability Density Function Method
2. Band-pass optical filter

تئوری

مشابه پژوهش‌های پیشین [۱۲، ۱۴] برای بدست آوردن کانتورهای گونه متیلیدین برانگیخته از یک دوربین و یک فیلتر ۴۳۰ نانومتر استفاده می‌شود و برای حذف اثرات دوده از تصاویر به‌دست آمده از فیلتر ۴۳۰ نانومتر I^{430nm} ، با استفاده از تصاویر دو فیلتر دیگر با طول موج‌های مرکزی ۴۲۰ و ۴۴۰ نانومتر، I^{420nm} و I^{440nm} ، تشعشع دوده تخمین زده می‌شود:

$$I_{CH^*} = I^{430nm} - I_{soot}^{430nm} \approx I^{430nm} - (\psi_1 C_1 I^{420nm} + \psi_2 C_2 I^{440nm}) \quad (۱)$$

که ضرایب ψ_1 و ψ_2 به ترتیب حساسیت طیفی دوربین در فرکانس‌های ۴۲۰ و ۴۴۰ نسبت به فرکانس ۴۳۰ نانومتر است. همچنین ضرایب C_1 و C_2 با توجه به میزان تابش حرارتی دوده و همچنین حساسیت طیفی فیلترها محاسبه می‌شود. تابش حرارتی دوده در طیف پیوسته‌ای از امواج الکترومغناطیس با طول موج‌های مختلف رخ می‌دهد. این طیف طبق قانون پلانک به دمای دوده وابسته است:

$$B_{soot}(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k_b T}} - 1} \quad (۲)$$

در این رابطه T دمای جسم در مقیاس کلوین، λ طول موج، h ثابت پلانک، c سرعت نور و k_b ثابت بولتزمن است. با توجه اینکه محاسبه میزان دمای دوده در حالت حقیقی دشوار است، نمی‌توان میزان تابش دوده را به‌صورت مستقیم محاسبه کرد. در نتیجه مشابه پژوهش کارنانی و ودان رنکین [۱۲] میزان تابش دوده در طول موج ۴۳۰ نانومتر با کمک تابش در طول موج‌های ۴۲۰ و ۴۴۰ نانومتر تخمین زده می‌شود:

$$C_1 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} B_{soot} \cdot \tau_{420nm} d\lambda + C_2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} B_{soot} \cdot \tau_{440nm} d\lambda = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} B_{soot} \cdot \tau_{430nm} d\lambda \quad (۳)$$

که τ در رابطه فوق، حساسیت طیفی فیلتر مربوطه است. در این پژوهش از فیلترهای ساخت شرکت Thorlabs Inc. استفاده شده است که مشخصات فنی آن در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱- مشخصات فنی فیلترهای نوری

Table 1- Technical specifications of the optical filters

Filter	CWL ² (nm)	FWHM ¹ (nm)	Blocking Band (nm)	Transmission
420 nm	420±2	10±2	200-3000	Figure 1
430 nm	430±2	10±2	200-3000	Figure 1
440 nm	440±2	10±2	200-3000	Figure 1

حساسیت طیفی هریک از این فیلترها که در شکل ۱ نمایش داده شده است، توسط شرکت سازنده اندازه‌گیری شده و در پیوست فنی قابل دسترسی است. در این شکل شدت تابش ذرات دوده (معادله ۲) در دو دمای ۱۸۰۰ و ۲۰۰۰ کلوین نیز نمایش داده شده است. مشابه پژوهش‌های ژانگ و همکاران [۱۳] و لیو و همکاران [۱۴] طیف تابشی دوده $I_{\lambda,soot}$ در این دو دما محاسبه شده و به همراه حساسیت‌های طیفی فیلترها τ در رابطه ۳ جای‌گذاری می‌شود. با انتگرال‌گیری از $\lambda_1 = 400 \text{ nm}$ تا $\lambda_2 = 480 \text{ nm}$ به ازای هر دما یک معادله به‌دست آمده و با استفاده از این دو معادله دو مجهول $C_1 = 0/737$ و $C_2 = 0/391$ محاسبه می‌شود.

1. Full Width Half Max
2. Center Wavelength

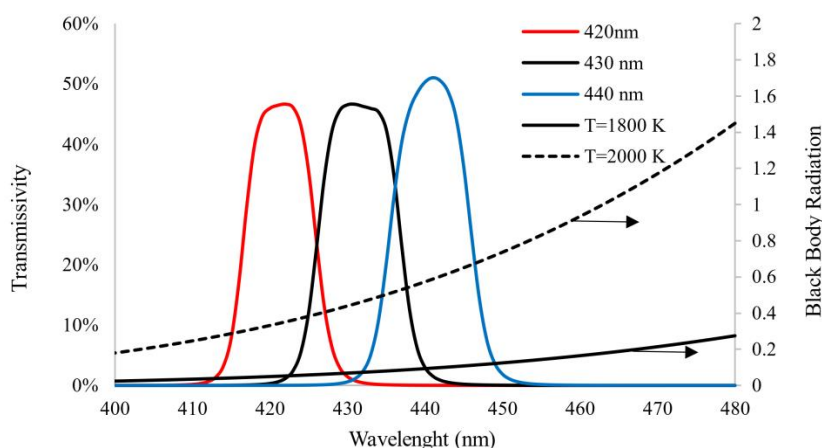


Figure 1- Optical Transmissivity of the three filters and black body radiation spectrum at two different temperatures.
 شکل ۱- منحنی‌های حساسیت طیفی هریک از فیلترها و میزان تابش جسم سیاه در دو دمای ۱۸۰۰ و ۲۰۰۰ درجه کلوین

پارامترهای ψ_1 و ψ_2 به حساسیت طیفی سیستم تصویربرداری وابسته است. در این پژوهش از دوربین دیجیتالی Nikon مدل D7100 استفاده شده است. حساسیت طیفی سنسورهای سه کانال اندازه‌گیری شده [۱۵] و در شکل ۲ آمده است. با استفاده از این داده‌ها نسبت حساسیت کانال آبی دوربین در طول موج ۴۲۰ نانومتر به طول موج ۴۳۰ برابر با $\psi_1 = 0/182$ و حساسیت در طول موج ۴۴۰ به طول موج ۴۳۰ برابر با $\psi_2 = 1/316$ است. با جایگذاری این دو ثابت در معادله ۱ می‌توان با استفاده از تصاویر به‌دست آمده از فیلترهای ۴۲۰ و ۴۴۰ نانومتر، اثرات تشعشع دوده بر روی کانتورهای گونه متیلیدین برانگیخته که با استفاده از فیلتر ۴۳۰ نانومتر بدست می‌آید را حذف کرد.

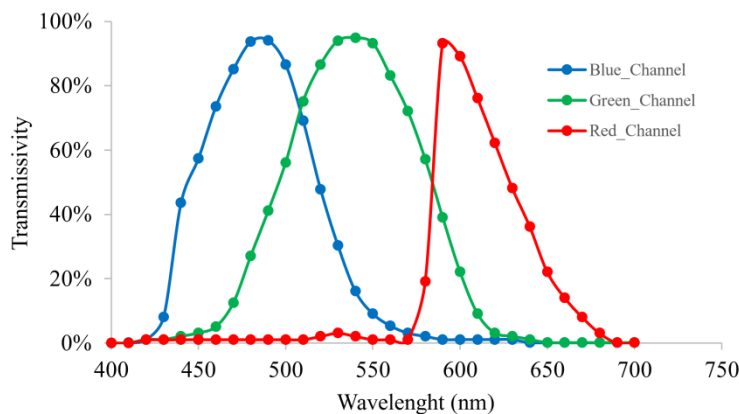


Figure 2- Spectral sensitivity of the blue, red and green channels of the Nikon D7100 camera [15]
 شکل ۲- حساسیت طیفی کانال‌های آبی، قرمز و سبز دوربین دیجیتال [۱۵] Nikon D7100

روش تجربی

دامنه این پژوهش محدود به بررسی نورتایی شیمیایی در شعله‌های نفوذی دارای دوده در رژیم جریان آرام است. برای ایجاد چنین شعله‌ای از دو لوله هم‌محور مطابق شکل ۳ استفاده شده است. قطر داخلی لوله سوخت ۸ میلی‌متر و ضخامت آن یک میلی‌متر است. قطر داخلی لوله هوا ۱۸ میلی‌متر است. سوخت مورد استفاده در این پژوهش گاز طبیعی است. دو شعله در دو شرایط کاری مختلف تشکیل شده که جزئیات آن در جدول ۲ آمده است.

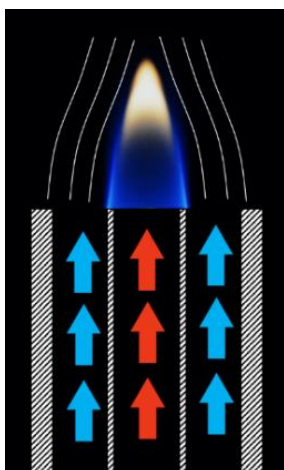


Figure 3- Schematic of the co-flow diffusion flame [16]
 شکل ۳- شماتیک شعله نفوذی با هوای هم‌محور [۱۶]

تصویربرداری با کمک یک دوربین دیجیتال معمولی Nikon مدل D7100 با سه فیلتر نوری ۴۲۰، ۴۳۰ و ۴۴۰ انجام شده است. به منظور تصویربرداری از شعله با بهترین دقت و کیفیت مناسب با استفاده از دوربین موردنظر، پس از انجام آزمایش‌های متعدد و سعی و خطا، زمان نوردهی برابر با ۱/۵ ثانیه و میزان حساسیت حسگر (ISO) برابر با ۳۲۰۰ در نظر گرفته شده است. با استفاده از هر فیلتر تعداد ۱۰ عکس گرفته می‌شود. برای پردازش تصاویر یک برنامه ساده در محیط نرم‌افزار متلب^۱ توسعه داده شده است. بدین منظور ابتدا کانال آبی^۲ تمامی تصاویر گرفته شده از هر یک از فیلترها، استخراج و جدا می‌شود و برای میانگین‌گیری انتخاب می‌شود. دلیل استفاده و استخراج کانال آبی تصاویر و عدم استفاده از دو کانال دیگر، قرار گرفتن تابش گونه CH^* در محدوده ۴۳۰ نانومتری است که در ناحیه آبی رنگ طیف مرئی قرار دارد. میانگین‌گیری باعث می‌شود که اثرات لرزش کم و احتمالی شعله در هر سه فیلتر تا حدودی حذف شود. در نهایت برای به‌دست آوردن کانتوری خالص از نورتابی شیمیایی گونه CH^* بدون تاثیرات تشعشع شیمیایی دوده، رابطه ۱ مورد استفاده قرار می‌گیرد.

جدول ۲- مشخصات و شرایط شعله‌های مورد بررسی در آزمایش

Table 2- Specifications and conditions of the flames in the experiment

Flame	Fuel	Flow Regime	Air Flow rate (Nm ³ /hr)	Fuel Flow rate (Nlit/hr)
1	Natural Gas	Laminar	0.7	4.5
2	Natural gas	Laminar	0.5	3.2

مدل عددی جهت ارزیابی نتایج روش تجربی

در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار آنسیس-فلوئنت دو شعله جدول ۲ شبیه‌سازی می‌شود. بدین منظور ابتدا مدل‌سازی و تولید هندسه مشعل و سپس شبکه‌بندی آن انجام می‌شود. با توجه به نوع مشعل، هندسه مسئله در نرم‌افزار بصورت متقارن محوری^۳ مدل می‌شود. شبکه محاسباتی در شکل ۴ نمایش داده شده است. شبکه محاسباتی نزدیک دیواره و در نواحی تشکیل شعله ریزشده است. حداکثر مقدار نسبت منظری^۴ در شبکه ۲۰۰ است که در نواحی نزدیک خروجی اتفاق می‌افتد.

1. MATLAB
 2. Blue Channel
 3. Axisymmetric
 4. Aspect Ratio

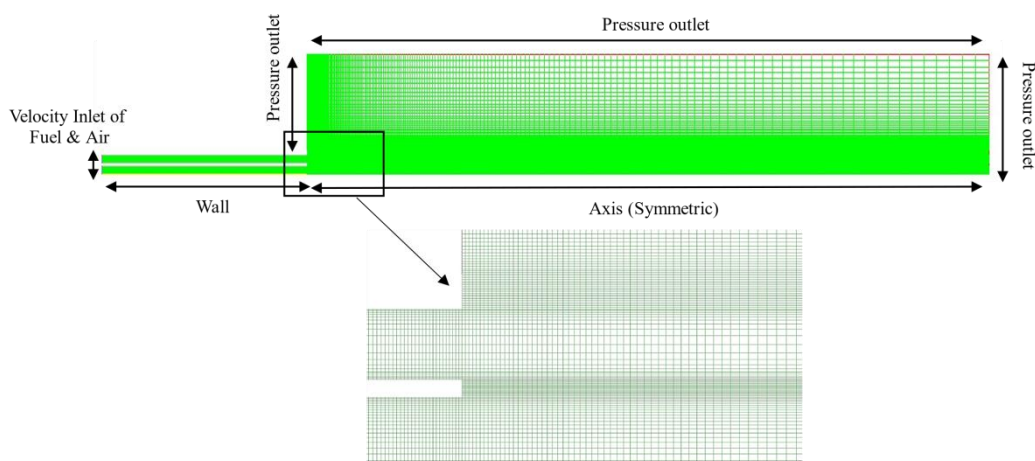


Figure 4- Computational grid and boundary conditions

شکل ۴- شبکه محاسباتی و شرایط مرزی

شرایط مرزی ورودی سوخت و هوا به صورت شرط مرزی سرعت ورودی^۱ است. هوای ورودی تنها دارای دو گونه اکسیژن و نیتروژن در نظر گرفته شده است و ترکیبات سوخت گاز طبیعی شهری مشتمل بر حدود ۸۸ درصد متان و سایر گونه‌ها اتان (۴/۷ درصد)، پروپان (۱/۷۴ درصد)، نیتروژن (۴/۷ درصد)، ایزوبوتان (۰/۳۷ درصد)، ایزوپنتان (۰/۱۳ درصد)، هگزان (۰/۰۸ درصد) و دی اکسیدکربن (۰/۰۵ درصد) است. ناحیه میان ورودی نازل هوا و سوخت و جداره‌های لوله‌هایی که جریان سوخت و هوا در آن جریان دارد به صورت شرط مرزی دیواره با شرط عدم لغزش در نظر گرفته شده است. شرط مرزی حرارتی و تابشی دیواره‌ها به صورت شار حرارتی صفر وات بر مترمربع در نظر گرفته شده است. اطراف مشعل کاملاً باز است و همه مرزهای باز در اطراف دو لوله هوا و سوخت به صورت خروجی-فشار^۲ مدل‌سازی می‌شود.

مکانیزم شیمیایی

در این شبیه‌سازی از مکانیزم شیمیایی GRI-Mech 3.0 استفاده شده است. در این مکانیزم واکنش‌های مرتبط با گونه CH^* موجود نیست. این واکنش‌ها که در جدول ۳ آمده است از نسخه ۱,۳ مکانیزم آرامکو^۳ نیز به مکانیزم شیمیایی اضافه شده است [۱۷]. جهت اعتبارسنجی مکانیزم GRI-Mech 3.0 بهبود یافته، یک شعله نفوذی جریان متقابل با استفاده از حلگر یک-بعدی نرم‌افزار کنتر^۴ در دو نرخ کرنش مختلف شبیه‌سازی شد. در هر نرخ کرنش، شبیه‌سازی با مکانیزم اولیه آرامکو و مکانیزم بهبود یافته انجام شده است. نتایج بدست‌آمده برای کسر مولی گونه CH^* در شکل ۵ نشان داده شده است. محاسبه نرخ کرنش از برازش یک خط بر نمودار سرعت محوری برحسب فاصله محوری در بالادست شعله از سمت سوخت مطابق تعریف لا و همکاران [۱۸] انجام شده است. نتایج نشان شکل ۵ می‌دهد که مکانیزم GRI-Mech 3.0 بهینه شده محل تشکیل گونه CH^* را با تقریب خوبی پیش‌بینی می‌کند، اما به نسبت مکانیزم آرامکو از مقداری خطا در تخمین مقدار بیشینه این گونه برخوردار است. از آنجا که هدف این پژوهش کالیبراسیون کامل به معنای ایجاد یک تناظر یک به یک بین مقدار این گونه و شدت نور ثبت شده در پیکسل‌های عکس‌های دوربین نیست و صرفاً روش تجربی پیشنهادی برای حذف اثرات تشعشع دوده مورد ارزیابی قرار گرفته است، استفاده از مکانیزم بهبود یافته GRI-Mech 3.0 قابل توجیه است.

1. Velocity Inlet
2. Pressure Outlet
3. AramcoMech 1.3
4. Cantera

جدول ۳- واکنش‌های موثر بر تولید گونه CH^* و ضرایب مرتبط با هر یک از واکنش‌ها

Table 3- Reactions affecting CH^* species production and the coefficients associated with each of the reactions

Reaction	A ($\frac{cm^3}{mols}$)	B	Activation Energy (cal/mol)	Reference
$C_2H + O_2 \rightleftharpoons CO_2 + CH^*$	6.02×10^{-4}	4.4	-2285	[۱۹]
$C_2H + O \rightleftharpoons CO + CH^*$	6.02×10^{12}	0.0	457	[۱۹]
$CH^* + N_2 \rightleftharpoons CH + N_2$	3.03×10^{-4}	3.4	-381	[۲۰]
$CH^* + O_2 \rightleftharpoons CH + O_2$	2.48×10^6	2.1	-1720	[۲۰]
$CH^* + H_2O \rightleftharpoons CH + H_2O$	5.30×10^{13}	0.0	0	[۲۰]
$CH^* + H_2 \rightleftharpoons CH + H_2$	1.47×10^{14}	0.0	1361	[۲۰]
$CH^* + CO_2 \rightleftharpoons CH + CO_2$	2.40×10^{-1}	4.3	-1694	[۲۰]
$CH^* + CO \rightleftharpoons CH + CO$	2.44×10^{12}	0.5	0	[۲۰]
$CH^* + CH_4 \rightleftharpoons CH + CH_4$	1.73×10^{13}	0.0	167	[۲۰]

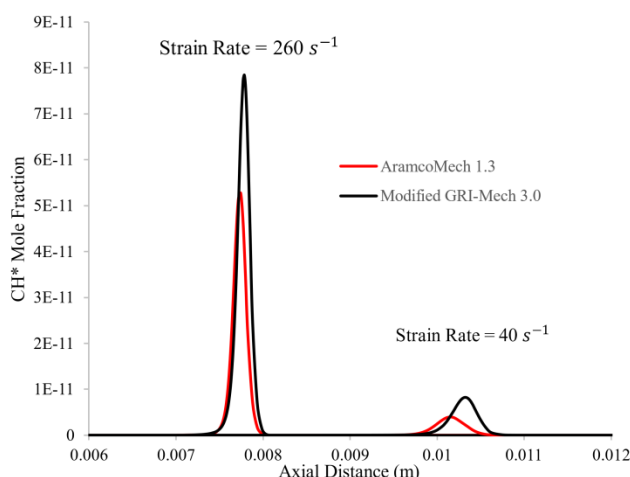


Figure 5- Effect of the chemical kinetics mechanism on CH^* mole fraction in a counter-flow diffusion flame

شکل ۵- اثر مکانیزم شیمیایی بر کسر مولی گونه متیلیدین برانگیخته در یک شعله نفوذی جریان متقابل

مدل‌سازی دوده

در شبیه‌سازی‌های شعله‌های حاوی دوده مدل‌سازی فرآیندهای منجر به تشکیل و مصرف دوده و همچنین انتقال حرارت تشعشع از اهمیت به سزایی برخوردار است. زیرا تشعشع حرارت از دوده باعث کاهش دما در میدان جریان می‌شود و دما نیز به نوبه خود بر روی نرخ واکنش‌ها تأثیر قابل توجهی دارد. برای شبیه‌سازی تشعشع از روش DO^1 و برای شبیه‌سازی دوده از مدل ماس-بروکس^۲ استفاده شده است [۲۱]. در این مدل دو معادله انتقال برای کسر جرمی دوده و غلظت هسته‌های دوده^۳ حل می‌شود. روابط نیمه تجربی برای مکانیزم‌های مختلف تشکیل دوده اعم از هسته‌زایی^۴، رشد سطحی، اکسید شدن و چسبیدن ذرات دوده به یکدیگر^۵ در جملات منبع این دو معادله لحاظ شده است. به عنوان نمونه نرخ تولید ذرات اولیه تشکیل دوده از استیلین از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\frac{dN}{dt} = 54N_a \left(\frac{\rho Y_{C_2H_2}}{W_{C_2H_2}} \right) \exp\left(-\frac{21100}{T}\right) \quad (4)$$

1. Discrete ordinates
2. Moss-Brookes
3. Soot nuclei concentration
4. Inception
5. Coagulation

که در این رابطه N_a عدد آووگادرو و $Y_{C_2H_2}$ و $W_{C_2H_2}$ به ترتیب کسرجرمی و جرم مولی گونه استیلن است. روابط مشابهی برای نرخ اکسید شدن دوده برحسب کسرجرمی گونه‌های O و OH موجود است [۲۲،۲۱]. در شکل‌های ۶ و ۷ کارایی مکانیزم شیمیایی GRI-Mech 3.0 بهبود یافته در مقایسه با مکانیزم آرامکو در تخمین کسرمولی گونه‌های استیلن و اکسیدکننده‌های دوده در یک شعله یک بعدی نفوذی جریان متقابل مقایسه شده است. مکانیزم آرامکو ۱،۳ به صورت جامع برای هیدروکربن‌های C1-C4 از جمله استیلن با داده‌های تجربی اعتبارسنجی شده است [۱۷]. نتایج این دو شکل نشان می‌دهد که تفاوت قابل ملاحظه‌ای بین دقت دو مکانیزم در پیش‌بینی گونه‌های اکسیدکننده دوده نیست. اما در مورد گونه استیلن گرچه مکانیزم GRI-Mech 3.0 محل تشکیل این گونه را به خوبی پیش‌بینی می‌کند، اما مقدار آن را بیشتر از مکانیزم آرامکو تخمین می‌زند. لازم به ذکر است که هدف از شبیه‌سازی عددی صرفاً مقایسه کیفی با نتایج تجربی است. پیش‌بینی دقیق دوده با مدل‌های نیمه‌تجربی نظیر مدل ماس-بروکس به سادگی میسر نیست [۲۲].

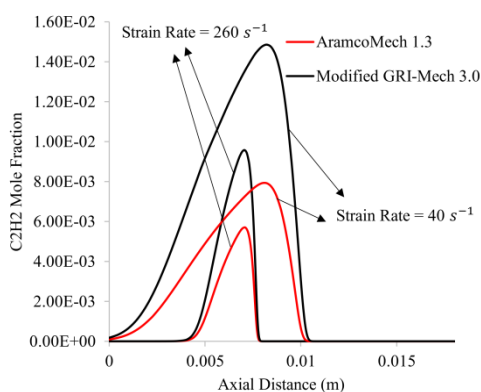


Figure 6- Effect of the chemical kinetics mechanism on acetylene mole fraction in a counter-flow diffusion flame

شکل ۶- اثر مکانیزم شیمیایی بر کسر مولی استیلن در یک شعله نفوذی جریان متقابل

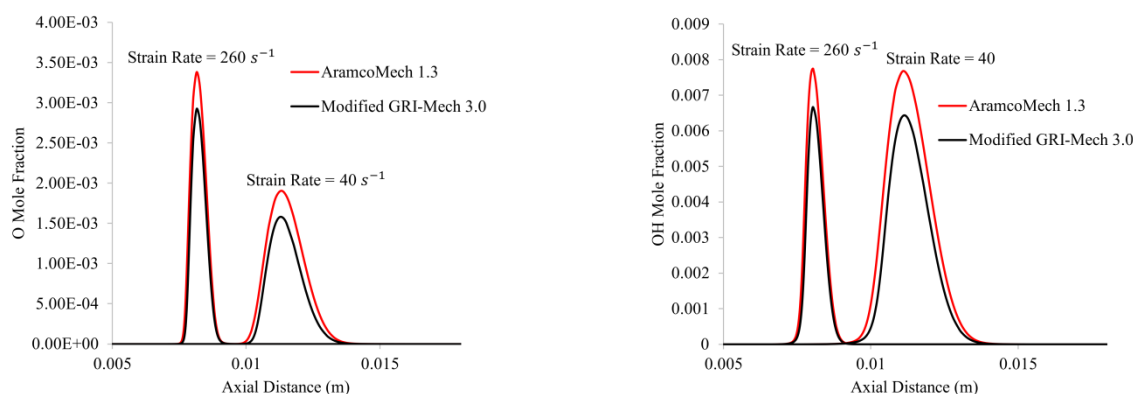


Figure 7- Effect of the chemical kinetics mechanism on soot oxidizing species in a counter-flow diffusion flame

شکل ۷- اثر مکانیزم شیمیایی بر گونه‌های اکسیدکننده دوده در یک شعله نفوذی جریان متقابل

تنظیمات حلگر عددی

در روش حل عددی جهت جفت کردن معادلات سرعت و فشار از روش SIMPLE استفاده شده است. همچنین جهت گسسته‌سازی جملات همرفت^۱ معادلات انتقال از روش بالادست مرتبه دو^۱، گرادیان‌ها از روش کمترین مربعات سلول-پایه^۲ و

1. Convective terms

جملات نفوذی^۳ از روش تفاضل-مرکزی استفاده می‌شود. حل ابتدا با معیار همگرایی 10^{-3} انجام شده و پس از ریز و تطبیق شبکه^۴ در نواحی اطراف شعله، با معیار همگرایی 10^{-6} ادامه می‌یابد.

نتایج

تصاویر معمولی از دو شعله بدون استفاده از فیلترهای نوری در شکل ۸ آمده است. نواحی آبی رنگ در شعله توزیع مکانی گونه CH^* را نشان می‌دهند. این گونه بیشتر در نزدیکی دهانه نازل و مرز شعله که سوخت و هوا با نفوذ در یکدیگر مخلوط استوکیومتریک قابل اشتعال را ایجاد می‌کنند، تشکیل می‌شود. نواحی زردرنگ و زرد متمایل به سفید رنگ ناشی از تشعشع حرارتی دوده در طیف مرئی است. تشکیل دوده مستلزم تجزیه سوخت و تشکیل گونه پیش‌ساز، انجام فرآیندهای تشکیل حلقه‌های آروماتیک، هسته‌زایی و در نهایت رشد سطحی دوده است. در نتیجه دوده پس از گونه CH^* تشکیل شده و در بخش‌های بالاتر شعله دیده می‌شود.

نتایج شبیه‌سازی عددی کسرحجمی دوده نیز در شکل ۸ نشان داده شده است. در هر دو شکل فاصله نقطه حداکثر مقدار از سرمشعل مشخص شده است. این مقدار در نتایج تجربی شعله ۱ برابر با ۱۰ میلی‌متر و در نتایج عددی ۱۸ میلی‌متر است. در شعله ۲ این مقادیر به ترتیب برابر با ۹ و ۱۲ میلی‌متر است. علت اختلاف بین نتایج تجربی و عددی می‌تواند ناشی از مکانیزم شیمیایی و همچنین مدل ساده ماس-بروکس برای تخمین دوده باشد. مطابق نتایج شکل ۷ استفاده از مکانیزم GRI-Mech 3.0 باعث می‌شود که مقدار استیلین بیش از مقدار واقعی پیش‌بینی شود. همچنین پژوهش‌های پیشین [۲۲] نشان دادند که مدل ماس-بروکس مقدار دوده را بیشتر از مقدار واقعی تخمین می‌زند. در نتیجه حجم زیادی از دوده تشکیل شده و اکسید شدن آن به نسبت شرایط واقعی با تأخیر صورت می‌گیرد. در نتیجه محل دوده به نسبت نتایج تجربی در ارتفاع بالاتری از سرمشعل اتفاق می‌افتد.

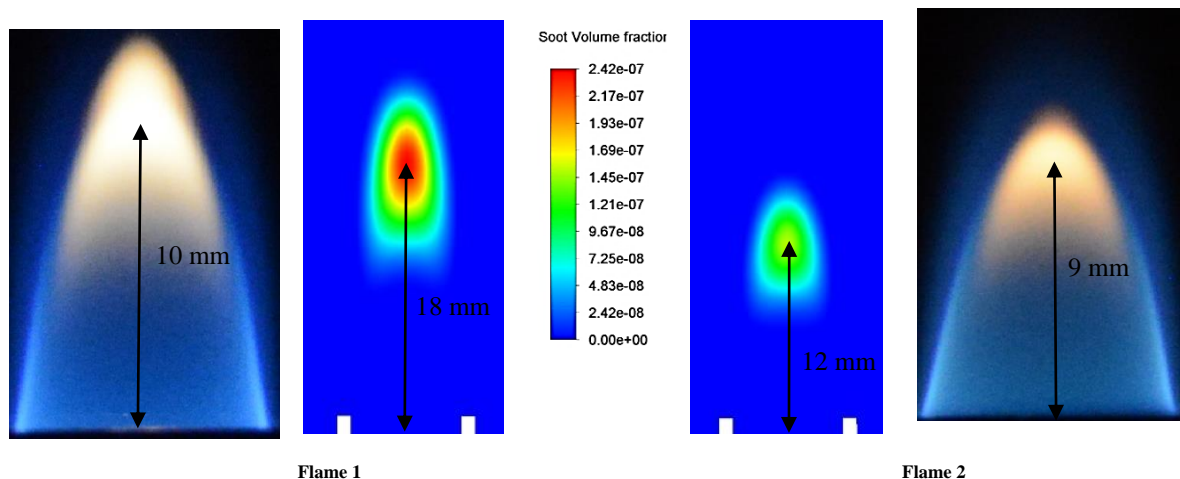


Figure 8- Normal Images of the two flames without the optical filters and the simulated soot volume fraction contours

شکل ۸- تصاویر معمولی از شعله‌ها بدون فیلتر نوری و کانتورهای کسرحجمی دوده شبیه‌سازی شده

1. Second-order upwind
2. Least-Squares Cell-based
3. Diffusion terms
4. Grid adaption

نتایج شبیه‌سازی عددی میدان دما و تشعشع کل شعله نیز در شکل ۹ نمایش داده شده است. مقایسه نتایج شکل ۸ و ۹ نشان می‌دهد که نواحی حداکثر تشعشع و حداکثر مقدار کسر حجمی دوده تقریباً منطبق است. در نتیجه تشعشع ناشی از برانگیخته شدن ذرات دوده در این نواحی به مراتب بیشتر از تشعشع گازها است. پس از اکسید شدن سوخت و تشکیل گازهای دی‌اکسید کربن و بخار آب، تشعشع ناشی از این گازها در میدان سیال غالب می‌شود. با اختلاط این گازها با هوای اطراف، رفته رفته دمای محصولات احتراق کاهش یافته و در نتیجه میزان تشعشع نیز کاهش می‌یابد.

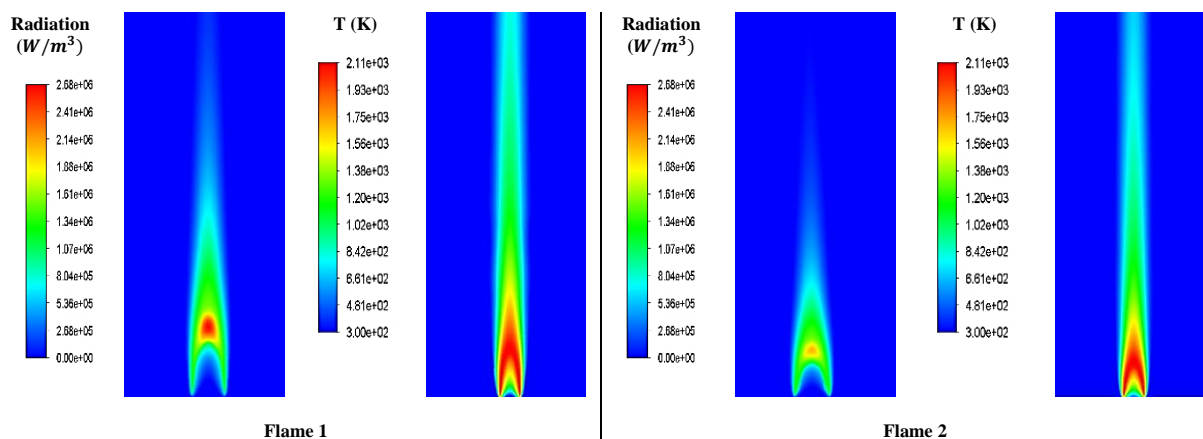


Figure 9- Simulated temperature and total radiation rate from the flames

شکل ۹- دما و نرخ تشعشع کل شبیه‌سازی شده از شعله‌ها

تصاویر گرفته شده از شعله ۱ با استفاده از سه فیلتر نوری در شکل ۱۰ نمایش داده شده است. شدت نورتایی شیمیایی گونه CH^* در نزدیکی خروجی نازل در تصویر با فیلتر ۴۳۰ نانومتر بیشتر از دو تصویر دیگر است. این مهم ناشی از این است که نورتایی شیمیایی این گونه بیشتر در حوالی طول موج ۴۳۰ نانومتر اتفاق می‌افتد. همچنین در هر سه تصویر اثرات تشعشع دوده در نوک شعله قابل مشاهده است. این اثرات در طول موج‌های بالاتر بیشتر است که منطبق با قانون پلانک (شکل ۱) است. برای حذف اثرات دوده بر روی نورتایی شیمیایی گونه CH^* تصاویر فیلترهای ۴۲۰ و ۴۴۰ طبق معادله ۱ از تصویر فیلتر ۴۳۰ نانومتر کم می‌شود. نتایج در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

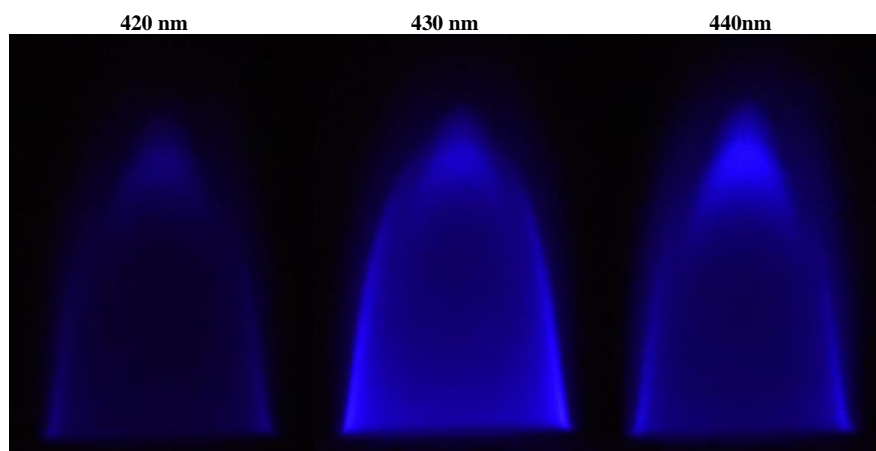


Figure 10- Image of flame 1 with the three optical filters

شکل ۱۰- تصاویر گرفته شده از شعله ۱ با سه فیلتر نوری

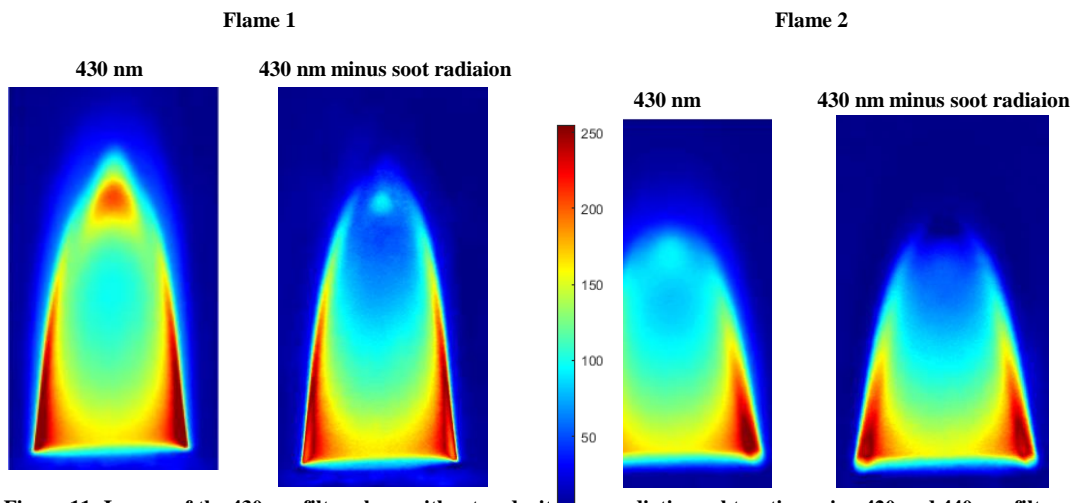


Figure 11- Images of the 430 nm filter along with and without soot radiation subtraction using 420 and 440 nm filters

شکل ۱۱- کانتورهای حاصل از تصاویر با فیلتر ۴۳۰ نانومتر و همچنین استفاده از دو فیلتر دیگر برای حذف تشعشع دوده

تفاوت اصلی شعله ۱ و ۲ در دبی سوخت و در نتیجه میزان دوده تشکیل شده و شدت تشعشع ناشی از آن است. شکل ۱۱ نشان می‌دهد در شعله ۱ که شدت تشعشع دوده زیاد است، در نواحی حداکثر تشکیل دوده، هنوز اثرات تشعشع باقی مانده است. برای درک بهتر محدودیت‌های روش، نتایج تجربی با نتایج شبیه‌سازی عددی در شکل ۱۲ مقایسه شده است. برای مقایسه معنادار، از تبدیل معکوس آبل^۱ بر روی نتایج تجربی استفاده شده است. این شکل نشان می‌دهد که تطابق قابل قبولی بین نتایج تجربی و نتایج عددی در تخمین گونه CH^* برقرار است. در عین حال، در نواحی حداکثر شدت تابش دوده در شعله ۱ در نزدیکی محور، مقدار قابل ملاحظه‌ای تشعشع وجود دارد که در نتایج عددی مشاهده نمی‌شود. در نتیجه به احتمال بسیار زیاد این تشعشع ناشی از نورتابی شیمیایی گونه CH^* نیست، بلکه از عدم حذف کامل تشعشع دود در روش مورد استفاده ناشی می‌شود.

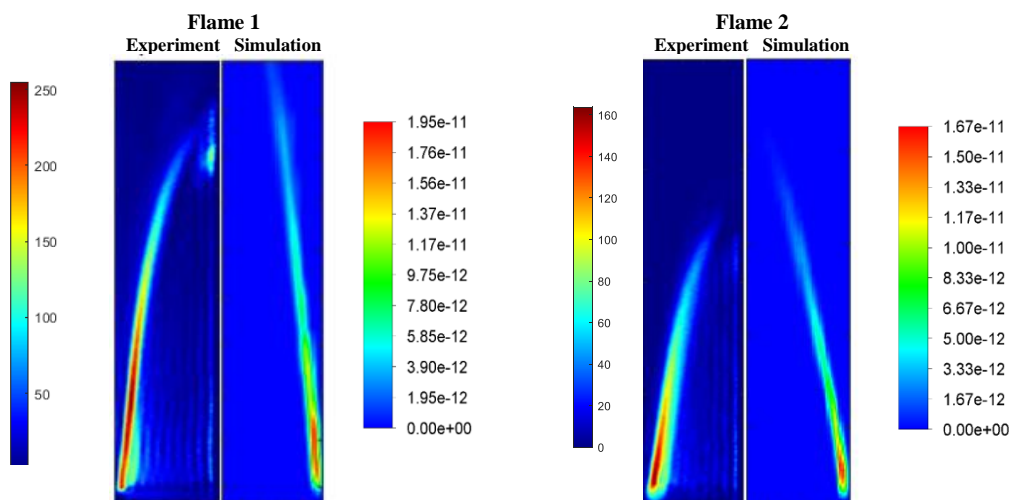


Figure 12- Comparison between normalized contours of CH^* in numerical simulation and experiments.

شکل ۱۲- مقایسه نتایج تجربی و عددی کانتور کسر جرمی گونه CH^* نرمال شده

بررسی‌های اولیه نشان می‌دهد که به دلیل شدت بالای نور، کانال آبی در محدوده‌ای از پیکسل‌ها در تصاویر فیلترهای ۴۳۰ و ۴۴۰ نانومتر اشباع^۱ شده است. در نتیجه سیگنال ثبت شده، کل تشعشع دوده را شامل نمی‌شود و استفاده از رابطه ۱ منجر به خطا می‌شود. ژنگ و برینهارد با استفاده از استنباط بیزی^۲، روشی را جهت تخمین مقدار واقعی تشعشع در پیکسل‌های اشباع شده ارائه داده‌اند [۲۳]. این روش از پتانسیل خوبی برای افزایش کارایی روش توسعه داده شده در این پژوهش در شعله‌های با غلظت دوده زیاد، برخوردار است. به‌علاوه با افزایش ذرات دوده در شعله تشعشع حرارتی افزایش یافته و دمای ذرات دوده کاهش می‌یابد. در این پژوهش برای توسعه رابطه ۱، از تخمین تشعشع دوده در دو دمای ۱۸۰۰ و ۲۰۰۰ کلوین استفاده شده است. در شرایطی که غلظت ذرات دوده افزایش یابد، این دما تا محدوده ۱۷۰۰ کلوین کاهش می‌یابد [۲۴]. در نتیجه دقت این روش بهتر است که ابتدا دمای دوده با استفاده از روش‌هایی نظیر آتش‌سنجی دوده [۲۴] اندازه‌گیری شود، سپس با معلوم بودن دمای دوده در هر نقطه می‌توان تشعشع دوده را به‌صورت دقیق در هر نقطه با استفاده از رابطه پلانک محاسبه و رابطه ۱ را به‌صورت محلی اعمال کرد.

نتیجه‌گیری

اندازه‌گیری نورتابی شیمیایی گونه متیلیدین برانگیخته یک روش غیرتداخلی و کم هزینه برای پدیده‌شناسی و صحت‌سنجی شبیه‌سازی‌های عددی در جریان‌های احتراقی با سوخت‌های هیدروکربنی است. این گونه در طیف مرئی امواج الکترومغناطیس تابش قابل توجهی دارد و در نتیجه به سادگی با استفاده از یک دوربین معمولی و فیلترهای نوری قابل اندازه‌گیری است. در این پژوهش یک روش تجربی برای اندازه‌گیری نورتابی شیمیایی این گونه در شرایط تشعشع حرارتی دوده در پس‌زمینه ارائه شده است. این روش بر روی شعله نفوذی آرام با سوخت گاز طبیعی پیاده‌سازی شده و نتایج با شبیه‌سازی‌های عددی مقایسه شده است. در این روش با استفاده از فیلترهای نوری میان‌گذر، تشعشع دوده در محدوده طول موج ۴۳۰ نانومتر - محدوده نورتابی شیمیایی متیلیدین برانگیخته - تخمین زده شده و از نورتابی شیمیایی گونه مذکور کم می‌شود. مقایسه نتایج تجربی به‌دست آمده برای دو شعله با دبی سوخت و در نتیجه غلظت ذرات دوده متفاوت با شبیه‌سازی‌های عددی نشان می‌دهد که خطای این روش با افزایش تشعشع دوده افزایش می‌یابد. این امر ناشی از اشباع شدن تصاویر و یا کاهش قابل ملاحظه دمای دوده در این شرایط است. در ادامه کار می‌توان با استفاده از روش آتش‌سنجی دوده دمای محلی دوده را محاسبه و تخمین بهتری از تشعشع دوده به‌دست آورد. همچنین با بهبود روش و سخت‌افزار عکس‌برداری و یا پردازش تصاویر با روش‌های پیشرفته، اشباع پیکسل‌ها را کاهش و دقت روش به‌کار رفته در این پژوهش را افزایش داد.

مراجع

1. A. Hossain and Y. Nakamura., "A numerical study on the ability to predict the heat release rate using CH* chemiluminescence in non-sooting counterflow diffusion flames," *Combustion and Flame*, Vol. 161, pp. 162-172, 2014.
2. V. N. Nori and J. M. Scitzman, "CH* chemiluminescence modeling for combustion diagnostics," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 32, pp. 895-903, 2009.
3. T. Zhang, Q. Guo, Q. Liang, Z. Dai and G. Yu, "Distribution Characteristics of OH*, CH*, and C2* Luminescence in CH4/O2 Co-flow Diffusion Flames," *Energy and Fuels*, Vol. 26, pp. 5503-5508, 2012.
4. Y. K. Jeong, C. H. Jeon and Y. J. Chang, "Evaluation of the equivalence ratio of the reacting mixture using intensity ratio of chemiluminescence in laminar partially premixed CH4-air flames," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 30, pp. 663-673, 2006.
5. J. Yang, Y. Gong, Q. Guo, H. Zhu, F. Wang and G. Yu, "Experimental studies of the effects of global equivalence ratio and CO2 dilution level on the OH* and CH* chemiluminescence in CH4/O2 diffusion flames," *Fuel*, Vol. 278, 2020.
6. S. Taamallah, Z. A. LaBry, S. J. Shanbhogue, and A. F. Ghoniem. "Thermo-acoustic instabilities in lean premixed swirl-stabilized combustion and their link to acoustically coupled and decoupled flame macrostructures," *Proceedings of the combustion institute*, Vol. 35, pp. 3273-3282, 2015.

1. Saturated Pixel
2. Bayesian Inference

7. D. Giassi, S. Cao, B. Anne, V. Bennett, D. P. Stocker, F. Takahashi and M.B. Long, "Analysis of CH* concentration and flame heat release rate in laminar coflow diffusion flames under microgravity and normal gravity," *Combustion and Flame*, Vol. 167, pp. 198-206, 2016.
8. Y. Pei, E. R. Hawkes, S. Kook, G. M. Goldin and T. Lu, "Modelling n-dodecane spray and combustion with the transported probability density function method," *Combustion and Flame*, Vol. 162, pp. 2006-2019, 2015.
9. J. Sidey and E. Mastorakos, "Visualization of MILD combustion from jets in cross-flow," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 35, pp. 3537-3545, 2015.
10. H. Soltanian, and M. Zabetian Toroghi and H. Pasdarsahri, "Experimental study of combustion species radiation to evaluate equivalence ratio in a surface flame burner," *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 53, pp. 41-52, 2021. (In Persian)
11. Y. Hardalupas, A. Selbach and J. H. Whitelaw, "Aspects of oscillating flames," *Journal of Visualization*, Vol. 1, pp. 79-85, 1998.
12. S. Karnani and D. Dunn-rankin, "Visualizing CH* chemiluminescence in sooting flames," *Combustion and Flame*, Vol. 160, pp. 2275-2278, 2013.
13. Q. Zhang, Y. Gong, Q. Guo, X. Song and G. Yu, "Experimental Study on CH* Chemiluminescence Characteristics of Impinging Flames in an Opposed Multi-Burner Gasifier," *AIChE Journal*, Vol. 63, pp. 2007-2018, 2017.
14. Y. Liu, J. Tan, M. Wan, L. Zhang and X. Yao, "Quantitative Measurement of OH* and CH* Chemiluminescence in Jet Diffusion Flames," *ACS Omega*, Vol. 5, pp. 15922-15930, 2020.
15. <https://www.dpreview.com/forums/thread/4202900>
16. Y. Hassanpour, *Design and development of a turbulent jet burner with variable premixing percentage*, MSc Thesis, Department of Aerospace Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran, 2022. (In Persian)
17. W. K. Metcalfe, S. M. Burke, S. S. Ahmed and H. J. Curran. "A Hierarchical and Comparative Kinetic Modeling Study of C1-C2 Hydrocarbon and Oxygenated Fuels." *International Journal of Chemical Kinetics*, Vol. 45, pp. 638-675, 2013.
18. C. K. Law, D. L. Zhu and G. Yu, "Propagation and extinction of stretched premixed flames." *21st Symposium (International) on Combustion*, Technical University of Munich, West Germany, 1988.
19. K. Devriend, H. Van Look, B. Ceursters and J. Peeters, "Kinetics of formation of chemiluminescent CH(A²Δ) by the elementary reactions of C₂H(X²Σ⁺) with O(3P) and O₂(X³Σ_g⁻): A pulse laser photolysis study," *Chemical Physics Letters*, Vol. 261, pp. 450-456, 1996.
20. S. M. Hwang, W. C. Gardiner, M. Frenklach and Y. Hidaka, "Induction zone exothermicity of acetylene ignition," *Combustion and Flame*, Vol. 67, pp. 65-75, 1987.
21. S. J. Brookes and J. B. Moss, "Predictions of Soot and Thermal Radiation Properties in Confined Turbulent Jet Diffusion Flames." *Combustion and Flame*, Vol. 116, pp. 486-503, 1999.
22. G. Ma, J. Z. Wen, M. F. Lightstone and M. J. Thompson, "Optimization of Soot Modeling in Turbulent Nonpremixed Ethylene/Air Jet Flames," *Combustion Science and Technology*, Vol. 177, pp.1567-1602, 2005.
23. X. Zhang and D. H. Brainard, "Estimation of saturated pixel values in digital color imaging," *Journal of the Optical Society of America*, Vol. 21, pp.2301-10, 2004.
24. P. B. Kuhn, B. Ma, B.C. Connelly, M.D. Smooke and M.B. Long, "Soot and thin-filament pyrometry using a color digital camera," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 33, pp. 743-750, 2011.

English Abstract

CH* Chemiluminescence Measurement in sooting Flames

Kamyab Karbasishargh¹, Mohammad Mahdi Salehi^{2*}, Amir Mardani³

1- School of Aerospace Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran, kamyab.karbasishargh@ae.sharif.edu

2- School of Aerospace Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran, mmsalehi@sharif.edu

3- School of Aerospace Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran, amardani@sharif.edu

*Corresponding author

(Received: 2022/07/26, Received in revised form: 2022/08/26, Accepted: 2022/09/12)

In this work, a non-intrusive method is developed to measure the CH* chemiluminescence in a laminar non-premixed flame. In this method, a digital camera and optical band-pass filters are used. CH* chemiluminescence happens in a sharp band around 430 nm, but in the case of a soot formation in the flame, the resulting thermal radiation partly happens in the CH* chemiluminescence band. In this work, two other band-pass filters with central frequencies of 420 and 440 nm are used to estimate the thermal radiation of soot particles near 430 nm. Using this approximation, the effect of the thermal radiation of soot particles on CH* chemiluminescence is removed. Comparing the experimental results in this work with the numerical simulations show that the proposed method can effectively remove the soot thermal radiation when the soot concentration is low. However, as the soot concentration increases, resulting in enhanced thermal radiation, the accuracy of the method decreases.

Keywords: CH* chemiluminescence, diffusion flame, soot