

اندازه‌گیری آزمایشگاهی تاثیر متغیرهای مختلف بر بهره تولید دوده‌ی صنعتی

کاظم بشیرنژاد^{۱*}، حمید ممهدی هروی^{۱**}، دانیال فلاح هروی^{۱***} و محمد مقیمان^{۲****}

۱- دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد، دانشکده مهندسی، گروه مکانیک

۲- دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه مکانیک

(دریافت: ۱۳۸۸/۶/۹، پذیرش: ۱۳۸۸/۱۰/۸)

در این پژوهش اثر متغیرهای مختلف از جمله محل تزریق خوراک سوخت، دبی سوخت، نوع سوخت و طول ناحیه ورودی کوره در تولید دوده‌ی صنعتی مطالعه شده است. اندازه‌گیری‌ها در یک کوره‌ی آزمایشگاهی که بدین منظور طراحی و ساخته شده انجام پذیرفته است. غلظت دوده‌ی صنعتی خروجی از کوره به روش وزنی اندازه‌گیری شده است. نتایج آزمایشگاهی برای چهار نوع سوخت شامل متان، پروپان، استیلن و گازوییل به دست آمده است. نتایج نشان می‌دهند که بهره تولید دوده‌ی صنعتی برای سوخت‌های متان، پروپان و گازوییل نسبت به هم تغییرات کمی دارند اما بهره تولید دوده‌ی صنعتی از استیلن بیش‌تر از دو برابر متان، پروپان و حتی گازوییل است. نتایج هم‌چنین نشان می‌دهند که اثر محل تزریق خوراک سوخت بر بهره تولید دوده‌ی صنعتی وابسته به هندسه محفظه‌ی احتراق سوخت اصلی است. هم‌چنین مشاهده شد که به‌ترین بازده تولید دوده‌ی صنعتی برای تمام سوخت‌ها به جز استیلن در نسبت هم‌ارزی ۴ به وقوع پیوسته است.

واژگان کلیدی: دوده‌ی صنعتی، بهره تولید، متان، پروپان، استیلن، گازوییل

مقدمه

دوده‌ی صنعتی کاربرد بسیار وسیعی در صنایع مختلف از جمله صنعت لاستیک سازی و رنگ دارد. دوده‌ی صنعتی به عنوان یک ماده مهم از کربن تقریباً خالص و دارای ویژگی‌های منحصر به فردی است. این ماده صنعتی مهم اثر قابل توجهی بر مقاومت در مقابل سایش و استقامت لاستیک‌ها و پلاستیک‌ها دارد، به طوری که بیش از ۵۰ درصد وزن بعضی از لاستیک‌ها از دوده‌ی صنعتی تشکیل شده است. روش اصلی تولید دوده‌ی صنعتی تجزیه گرمایی هیدروکربن‌ها و احتراق ناقص سوخت‌های کربن‌دار است [۱ و ۲]. با توجه به اهمیت دوده‌ی صنعتی تا کنون تحقیقات مختلفی بر روی آن انجام شده است تا بهره تولید و ویژگی‌های این محصول بهبود یابد. هم‌چنین با توجه به افزایش بهای نفت خام و کاهش ذخایر نفتی جهان ضرورت افزایش بهره تولید این محصول مورد توجه بسیاری از محققان است.

دوده‌های صنعتی مورد استفاده در صنعت حدود ۹۸ درصد کربن دارند و ۲ درصد بقیه را اکسیژن، هیدروژن، نیتروژن و سولفور تشکیل می‌دهند. میزان مواد غیر آلی موجود در دوده‌ی صنعتی که خاکستر نامیده می‌شود خیلی ناچیز است. اتم‌های کربن موجود در ذرات دوده‌ی صنعتی در لایه‌هایی واقع شده‌اند که به دلیل آرایش منظم و موازی و نیز هم‌پوشانی یک‌دیگر، باعث ایجاد ساختار نیمه‌گرافیتی دوده‌ی صنعتی شده‌اند. محدوده‌ی اندازه‌ی قطر ذرات دوده‌ی صنعتی ۱۰ تا ۴۰۰ نانومتر است. توده‌های اولیه دوده‌ی صنعتی از ترکیب و به هم چسبیدن ذرات بسیار کوچک‌تر پدید می‌آیند و شکل‌های هندسی متفاوتی از قبیل خوشه‌ای و خوشه‌انگوری با شاخه‌های حجیم دارند. دو ویژگی اصلی دوده‌های صنعتی در شناسایی آن‌ها ساختار و مساحت آن‌هاست.

* استادیار - نویسنده مخاطب (ایمیل: bashirnezhad@yahoo.com)

** استادیار (ایمیل: heravim@mshdiau.ac.ir)

*** کارشناس ارشد مکانیک (ایمیل: danielfal@yahoo.com)

**** استاد (ایمیل: mmoghiman@yahoo.com)

هر چه هوا در حین فرایند تولید دوده‌ی صنعتی افزایش یابد، ذرات دوده‌ی صنعتی کوچک‌تر می‌شوند ولی بهره تولید کاهش می‌یابد. امروزه در حدود ۵۰ نوع دوده‌ی صنعتی تولید می‌شوند. میزان مواد فرار در دوده‌ی صنعتی با گرما دادن آن در حدود ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد، در شرایط خلا اندازه‌گیری می‌شود. در جریان گرمادهی به دوده‌ی صنعتی، گروه‌های عاملی سطح آن جدا می‌شوند که از این راه می‌توان مقدار اکسیژن و در نتیجه PH دوده‌ی صنعتی را مشخص کرد. در حین گرمادهی ترکیب‌های آلی سطح، تبخیر شده و تنها به صورت فیزیکی بر روی سطح ذرات دوده‌ی صنعتی جذب می‌شوند. گر چه میزان این مواد در دوده‌های صنعتی ناچیز است اما مقدار آن‌ها قابل اندازه‌گیری است. این ترکیب‌ها اصولاً رنگی بوده و باعث تخریب در سطح تماس لاستیک می‌شوند. میزان گوگرد موجود در سطح ذرات دوده‌ی صنعتی به نوع هیدروکربن مصرف شده و نیز روش تولید دوده‌ی صنعتی بر می‌گردد [۲۰].

دوده‌ی صنعتی توسط روش‌های مختلف تولید می‌شود که عبارت‌اند از روش کوره‌ای، گرمایی، کانالی، چراغی، و استیلنی، که در این میان روش کوره‌ای اهمیت بیش‌تری دارد [۳]. در روش کوره‌ای که متداول‌ترین روش تولید دوده است سوخت اصلی با مقدار مناسبی از هوا در یک کوره مجهز به عایق مقاوم در برابر آتش برای تولید گازهای داغ سوزانیده می‌شوند. با تزریق خوراک سوخت به داخل گازهای داغ، در اثر گرمای زیاد، سوخت تجزیه می‌شود. تجزیه گازها در ۱۲۰۰ تا ۱۵۰۰ درجه سانتی‌گراد انجام می‌گیرد. ذرات کربن که از تجزیه گرمایی سوخت تولید شده‌اند هسته‌ی دوده را تشکیل می‌دهند. هسته‌ها پس از تشکیل به دو طریق رشد سطحی و انعقاد، بزرگ می‌شوند. در رشد سطحی، فعل و انفعالاتی که در سطح خارجی هسته انجام می‌شود، به طور مرتب به قطر هسته می‌افزاید، این در حالی است که در فرایند انعقاد، دو یا چند ذره به یک‌دیگر چسبیده و توسط یک پوسته خارجی احاطه می‌شوند. افزایش اندازه‌ی ذرات در ابتدا رشد سطحی و سپس انعقاد را متوقف می‌کند. خوشه‌شدن در فاز آخر رشد دوده انجام می‌شود که در طی آن ذرات به صورت تصادفی به یک‌دیگر می‌چسبند و ظاهر خوشه‌ای پیدا می‌کنند. گازهای داغ حاوی ذرات دوده‌ی صنعتی از تونلی (با پاشش آب) برای تنظیم ویژگی‌های دوده و پایان دادن به واکنش‌ها عبور می‌کنند. در اثر پاشش آب گازهای داغ تا حدود ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد سرد می‌شوند. سپس این مخلوط سرد شده به جدا کننده‌های سیکلونی وارد می‌شود و حدود ۷۵ درصد از دوده‌ی صنعتی با این روش جمع‌آوری می‌شود. گازهای باقی‌مانده هنوز دارای مقداری دوده‌ی صنعتی هستند که برای جمع‌آوری آن‌ها از فیلترهای کیسه‌ای ویژه‌ای استفاده می‌شود [۱]. در این پژوهش تولید دوده‌ی صنعتی با روش کوره‌ای مورد بررسی قرار گرفته است.

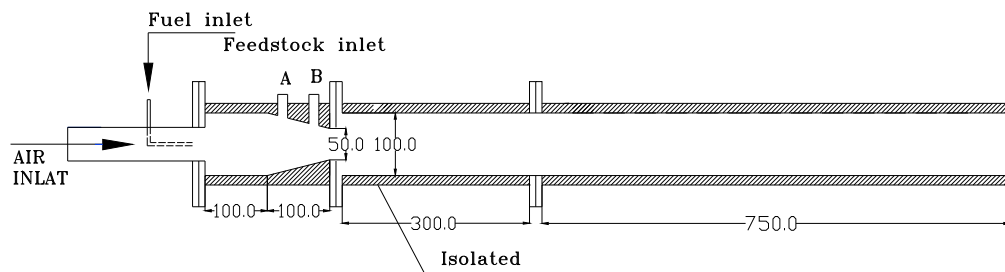
مهم‌ترین مواد خام برای تولید دوده‌ی صنعتی، هیدروکربن‌های سنگین و محصولات جانبی مایع حاصل از فراورش زغال‌سنگ، گاز طبیعی و استیلن‌اند. معمولاً دوده‌های تولید شده از روغن‌های سنگین و سبک در صنایع لاستیک سازی، دوده‌ی تولید شده از استیلن در تولید باتری‌های خشک و دوده‌ی تولید شده از گاز متان در صنایع رنگ‌سازی استفاده می‌شوند.

تحقیقات زیادی بر روی نحوه تولید دوده‌ی صنعتی انجام شده است. تحقیقات نشان می‌دهند که کیفیت و کمیت تولید دوده‌ی صنعتی نه تنها به هندسه کوره بلکه به شرایط ورود خوراک سوخت نیز بستگی دارد [۴]. مطالعه‌ی متغیرهای موثر بر سطح دوده‌ی صنعتی توسط لاکوود و همکارانش [۴] در سال ۱۹۹۵ انجام شده است. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که نرخ خوراک سوخت و نسبت هم‌ارزی بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی دوده‌ی صنعتی موثر است. شبیه سازی دوده در یک کوره دوده‌ی صنعتی توسط هایشی و همکارانش در سال ۱۹۹۷ انجام شده است. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که در کسری از میلی‌ثانیه و در صورت نبود اکسیژن تشکیل دوده‌ی صنعتی همراه با تولید هیدروژن، منوکسید کربن و استیلن انجام می‌شود [۵]. نحوه اختلاط خوراک سوخت در یک کوره آزمایشگاهی دوده‌ی صنعتی توسط گرنبرگر و همکارانش در سال ۲۰۰۰ بررسی شده است. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که بهره تولید دوده‌ی صنعتی متأثر از هندسه و شرایط اختلاط خوراک سوخت است [۵]. تولید دوده‌ی صنعتی در دماهای بالا و تبدیل آن به کربن و هیدروژن توسط فلچر و همکارانش در سال ۲۰۰۱ بررسی شده است. آن‌ها روش جدیدی برای تولید دوده‌ی صنعتی ارائه کرده‌اند که دارای ضریب بهره نزدیک به ۱ است ولی در حال حاضر به دلیل هزینه‌های زیاد آن در عمل امکان‌پذیر نیست [۷].

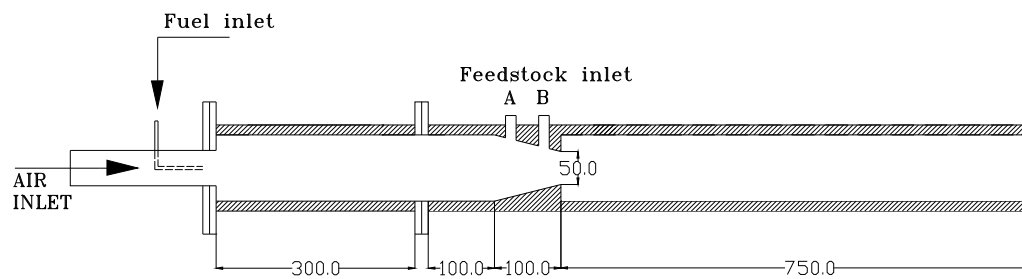
در سال ۲۰۰۶ مقیمان و همکارانش اثر چرخش هوای ورودی بر روی دوده‌ی صنعتی را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که زاویه‌ی چرخش هوای ورودی بر روی دوده‌ی صنعتی موثر است و محل تشکیل بیشینه دوده و دما به هم خیلی نزدیک هستند [۸]. با وجود تحقیقات متعدد بر روی دوده‌ی صنعتی نتایج تجربی و آزمایشگاهی کافی برای بررسی تاثیر عوامل مختلف بر بهره تولید دوده‌ی صنعتی وجود ندارد و تحقیقات بیشتری مورد نیاز است. از عوامل مهم بر تولید دوده‌ی صنعتی نحوه اختلاط خوراک سوخت با گازهای داغ و دمای گازهای داغ هنگام تزریق خوراک سوخت است. هندسه ناحیه پیش احتراق و محل تزریق خوراک سوخت از عوامل موثر بر اختلاط و دمای گازهای حاصل از احتراق اولیه است. در این تحقیق عوامل مختلف از جمله اثر محل تزریق خوراک سوخت، هندسه محفظه‌ی احتراق، نوع سوخت و نسبت هم‌ارزی بر ضریب بهره تولید دوده بررسی شده است.

شرح دستگاه آزمایشگاهی

کوره استفاده شده در این تحقیق برای تولید دوده‌ی صنعتی و بررسی عوامل مختلف تاثیرگذار در آن مطابق شکل (۱-الف) مشابه کوره تولید دوده شرکت دوده‌ی صنعتی پارس ساخته شده است. این کوره شامل قسمت‌های محفظه‌ی پیش احتراق، محفظه‌ی اختلاط، محفظه‌ی واکنش، ورودی هوای محوری، ورودی سوخت اصلی به صورت محوری، چند عدد ورودی برای خوراک سوخت به صورت شعاعی و ورودی هواست. کوره آزمایشگاهی طوری طراحی شده است که قسمت‌های مختلف آن قابلیت باز و بسته شدن را دارند و برای آزمایش‌های مختلف به راحتی قابل تعویض‌اند. به طوری که در شکل (۱-ب) نشان داده شده است قطعات پیش احتراق و محفظه‌ی اختلاط می‌توانند با یکدیگر جابه‌جا شوند تا اثر این جابه‌جایی نیز بر روی میزان بهره تولید دوده‌ی صنعتی مطالعه شود. مشخصات سوخت و اکسید کننده در جدول (۱) ارائه شده است. در شکل (۲) نیز تصویر واقعی کوره نشان داده شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۱- طرحواره کوره (اندازه‌ها بر حسب میلی‌متر هستند)



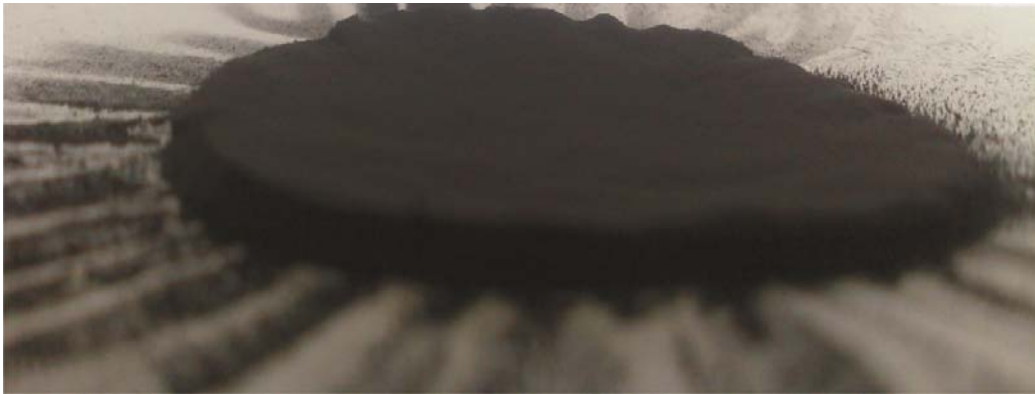
شکل ۲- کوره آزمایشگاهی در هنگام استفاده از سوخت متان

جدول ۱- مشخصات سوخت و اکسید کننده

شماره‌ی آزمایش	۱	۲	۳	۴
نوع سوخت اصلی	پروپان	پروپان	پروپان	پروپان
نوع خوراک سوخت	متان	پروپان	گازوییل	استیلن
اکسید کننده	هوا	هوا	هوا	هوا
دبی جرمی سوخت اصلی kg/min	۰/۰۰۸۱۸	۰/۰۰۸۱۸	۰/۰۰۸۱۸	۰/۰۰۸۱۸
دبی جرمی خوراک سوخت kg/min	۰/۰۰۸۱۸	۰/۰۱۶۳۶	۰/۰۲۴۵۴	۰/۰۳۲۷۲
دبی جرمی اکسید کننده kg/min	۰/۱۵۴	۰/۱۵۴	۰/۱۵۴	۰/۱۵۴
نسبت هم‌ارزی بر مبنای سوخت اصلی	۰/۸۳	۰/۸۳	۰/۸۳	۰/۸۳

در تحقیق حاضر متغیرهای مختلفی از جمله دبی هوا و سوخت ورودی، دمای هوا و سوخت ورودی، دمای محصولات احتراق و میزان غلظت دوده‌ی صنعتی خروجی اندازه‌گیری شده‌اند. برای اندازه‌گیری تمام این متغیرها از وسایل اندازه‌گیری با گستره‌ی اندازه‌گیری و حساسیت مناسب استفاده شده است. اندازه‌گیری دبی هوای ورودی توسط یک دبی‌سنج پروانه‌ای با دقت ۱ لیتر بر ثانیه انجام شده است. برای دقت بیشتر در اندازه‌گیری‌ها و جلوگیری از خطای محل اتصال دبی‌سنج به لوله ورودی هوا محل اتصال توسط یک قطعه واسطه مناسب کاملاً هوابند شده است تا تمام هوای ورودی از داخل دبی‌سنج بگذرد. اندازه‌گیری دبی سوخت گازی توسط روتامتر با دقت ۱۶/۰ لیتر بر ثانیه و اندازه‌گیری دبی سوخت مایع به روش وزنی با استفاده از یک ترازوی دیجیتال با دقت ۱ گرم و زمان‌سنج (Timer) با دقت ۱ میلی‌ثانیه انجام شده است. برای افزایش دقت اندازه‌گیری دبی سوخت گاز از دو عدد روتامتر که به صورت سری قرار گرفته‌اند استفاده شده است که هم‌زمان مقدار دبی سوخت توسط هر دوی آن‌ها اندازه‌گیری شده و در صورت عدم یکسان بودن دبی اندازه‌گیری شده توسط روتامترها از میانگین آن‌ها استفاده شده است. دمای هوا و سوخت ورودی توسط ترموکوپل نوع J با دقت ۱ درجه سانتی‌گراد و دمای گازهای احتراق توسط ترموکوپل نوع K با دقت ۱ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شده است. اندازه‌گیری غلظت دوده‌ی صنعتی به روش وزنی با دقت ۱ میلی‌گرم انجام شده است. در این روش مقدار مشخصی از گازهای خروجی از روی فیلتر مخصوص عبور داده می‌شوند و فیلتر قبل و بعد از آزمایش وزن می‌شود که با توجه به وزن گازهای عبوری از روی فیلتر و وزن دوده‌ی صنعتی قرار گرفته بر روی فیلتر کسر جرمی دوده‌ی صنعتی محاسبه می‌شود. هنگامی که مقدار دوده‌ی صنعتی موجود در گازهای احتراق کم باشد با بیش‌تر کردن مقدار جرم گازهای عبوری از روی فیلتر دقت اندازه‌گیری بیش‌تر می‌شود. در شکل (۳) نمونه‌ای از دوده‌ی صنعتی تولید شده بر روی فیلتر کاغذی نشان داده شده است. شایان ذکر است که ضخامت نمونه برداشت شده حدود ۳ میلی‌متر است.

نوع سوخت، محل تزریق خوراک سوخت و هندسه محفظه‌ی احتراق علاوه بر این که بر غلظت دوده‌ی صنعتی موثر هستند بر ویژگی‌های دوده از جمله اندازه‌ی هسته دوده، درصد مواد فرار، سطح بر واحد جرم دوده و درصد خاکستر نیز موثرند. در این پژوهش مقدار دوده‌ی تولید شده مورد توجه بوده و ویژگی‌های آن اندازه‌گیری نشده است.



شکل ۳- نمونه‌ای از دوده‌ی صنعتی جمع‌آوری شده برای اندازه‌گیری

در جدول (۲) فهرست وسایل اندازه‌گیری استفاده شده به همراه گستره و دقت اندازه‌گیری آن‌ها ارائه شده است. تمام اندازه‌گیری‌ها در حالت دایم صورت گرفته است، لذا در حین آزمایش‌ها بعد از هر تغییر در شرایط کوره مدت زمان کافی برای رسیدن به شرایط دایم در نظر گرفته شده است. برای اطمینان از به حالت دایم رسیدن کوره تغییرات دمای شعله با گذر زمان در نقاط مختلف شعله کنترل شده و در صورت گذشت حداقل ده دقیقه از زمان اندازه‌گیری و کمتر بودن نوسانات دما از ۵ درجه سانتی‌گراد، حالت دایم در نظر گرفته شده است.

جدول ۲- مشخصات وسایل اندازه‌گیری

دقت	گستره‌ی اندازه‌گیری	وسیله اندازه‌گیری	کمیت اندازه‌گیری شده
۱ (°C)	۰ -۵۰۰ °C	دماسنج نوع J	دمای هوای ورودی
۱ lit/s	۰ -۱۰۰ lit/s	دبی‌سنج پروانه‌ای	دبی هوای ورودی
۱ (°C)	۰ -۵۰۰ °C	دماسنج نوع J	دمای سوخت ورودی
۱ g	۰ -۲۰ kg	ترازوی دیجیتال	دبی سوخت (مایع)
۰/۰۱۶ lit/s	۰ -۱۰۰ lit/min	روتامتر	دبی سوخت (گاز)
۱ (°C)	۰ -۹۰۰ °C	ترموکوپل نوع k	دمای گازهای احتراق
۱ mgr	۰ -۱۰۰ gr	ترازوی دیجیتال	وزن دوده‌ی صنعتی

تعیین خطای اندازه‌گیری‌ها

برای اطمینان از داده‌های آزمایشگاهی تمام وسایل آزمایشگاهی در آزمایشگاه‌های معتبر از جمله آزمایشگاه کالیبراسیون شرکت گاز خراسان رضوی و آزمایشگاه کالیبراسیون اداره استاندارد کالیبره شده‌اند. با این وجود احتمال وجود خطاهای تصادفی در حین اندازه‌گیری وجود دارد، به همین دلیل همه داده‌های آزمایشگاهی تحلیل آماری شده‌اند. لذا ابتدا برای هر آزمایش، سه داده‌ی آزمایشگاهی جمع‌آوری شده و سپس میانگین حسابی داده‌ها محاسبه و به عنوان داده‌ی نهایی استفاده شده است. مقدار خطای احتمالی داده‌ها از فرمول زیر محاسبه شده است [۸].

$$\sigma_m = \sigma / n^{0.5} \quad (1)$$

که σ انحراف معیار مجموعه اندازه‌گیری‌ها، σ_m انحراف معیار مقدار میانگین و n تعداد اندازه‌گیری‌هاست. با توجه به این که برای تمام نتایج تجربی n عدد ۳ است. این فرمول به شکل زیر در تحلیل نتایج تجربی استفاده شده است.

$$\sigma_m = 0.577\sigma \quad (2)$$

درصد خطای اندازه‌گیری داده‌های آزمایشگاهی از رابطه زیر محاسبه شده است.

$$x = 100 \sigma_m / \bar{x} \quad (3)$$

که \bar{x} میانگین حسابی داده‌های آزمایشگاهی و x درصد خطای اندازه‌گیری است. نتایج تحلیل آماری داده‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد که میزان خطای اندازه‌گیری دوده‌ی صنعتی حدود دو برابر بیش‌تر از خطای اندازه‌گیری دماست که به دلیل پیچیده‌تر بودن روش اندازه‌گیری دوده‌ی صنعتی نسبت به روش اندازه‌گیری دماست. متوسط خطای اندازه‌گیری دما و دوده‌ی صنعتی برای سوخت‌های مختلف در جدول (۳) نشان داده شده‌اند.

جدول ۳- مقادیر متوسط درصد خطای اندازه‌گیری داده‌های اندازه‌گیری شده

نوع سوخت	خطای اندازه‌گیری دما	خطای اندازه‌گیری دوده‌ی صنعتی
متان	۵٪	۹٪
پروپان	۸٪	۱۲٪
گازوییل	۷٪	۱۴٪
استیلن	۷/۲٪	۱۴٪

نتایج

نتایج آزمایشگاهی برای چهار حالت مختلف شامل دو هندسه کوره متفاوت و دو محل تزریق خوراک سوخت مختلف ارایه شده‌اند که در شکل‌های (۱) و (۲) نشان داده شده‌اند. همچنین در این مقاله چهار نوع خوراک سوخت شامل متان، پروپان، استیلن و گازوییل مورد بررسی قرار گرفته‌اند که مشخصات آن‌ها در جدول (۴) ارایه شده‌اند.

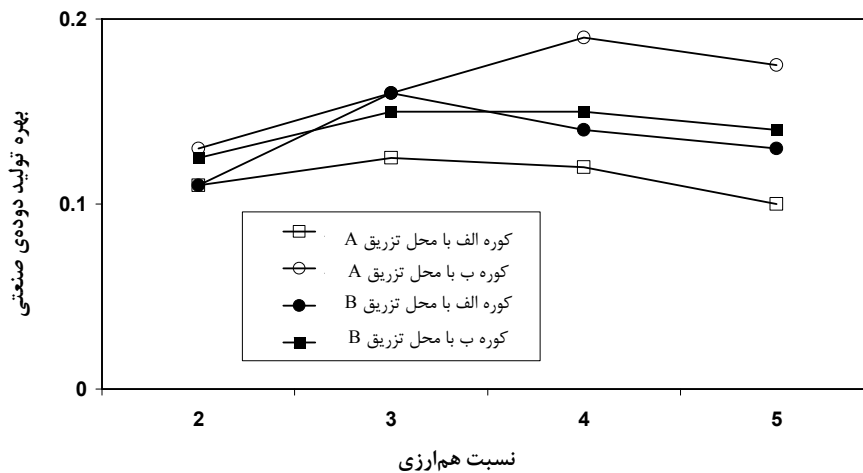
جدول ۴- مشخصات خوراک سوخت

نوع سوخت	فرمول شیمیایی	جرم مولکولی سوخت	نسبت جرم کربن موجود در سوخت به جرم مولکولی سوخت
متان	CH ₄	۱۶	۰/۷۵
پروپان	C ₃ H ₈	۴۴	۰/۸۲
استیلن	C ₂ H ₂	۲۶	۰/۹۲
گازوییل	C ₁₆ H ₃₄	۲۲۶	۰/۸۵

برای تمامی حالت‌های بالا بهره تولید با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی و فرمول زیر محاسبه شده است. در این رابطه Y ضریب بهره، m_{fs} جرم خوراک سوخت (kg)، m_{mf} جرم سوخت اصلی (kg) و m_{cb} جرم دوده‌ی صنعتی (kg) است.

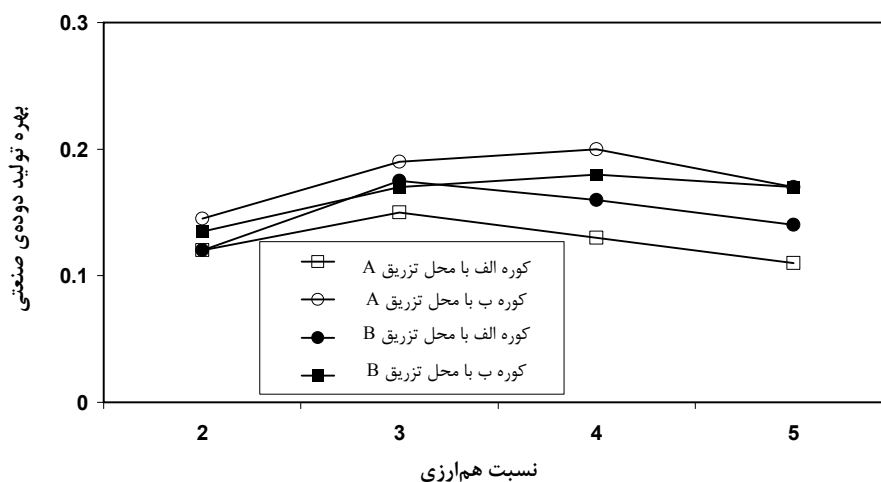
$$Y = \frac{m_{cb}}{m_{fs} + m_{mf}} \quad (4)$$

در شکل (۴) تغییرات ضریب بهره بر حسب نسبت هم‌ارزی برای گاز متان ارایه شده است. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش دبی جرمی خوراک سوخت یا نسبت هم‌ارزی، ابتدا ضریب بهره تولید دوده‌ی صنعتی افزایش و سپس کاهش می‌یابد. در مقادیر کم خوراک سوخت به دلیل وجود اکسیژن اضافی در گازهای احتراق سوخت اصلی (نسبت هم‌ارزی در سوخت اصلی ۸۳/۰ است) مقداری از خوراک سوخت در هنگام تزریق به گازهای داغ، محترق می‌شود و باعث کاهش جرم خوراک سوخت تزریق شده می‌شود که این موضوع باعث پایین آمدن ضریب بهره به ویژه در نسبت‌های هم‌ارزی پایین می‌شود. با افزایش میزان خوراک سوخت مقدار تولید دوده‌ی صنعتی نیز افزایش می‌یابد. اما در نسبت هم‌ارزی ۵ ضریب بهره کاهش یافته است. چون مقدار زیادی از انرژی گازهای داغ داخل محفظه‌ی احتراق برای گرم کردن خوراک سوخت مصرف می‌شود بنابراین انرژی کافی برای تجزیه گرمایی خوراک سوخت وجود ندارد و در نهایت منجر به کاهش بهره تولید دوده‌ی صنعتی می‌شود [۱۰].

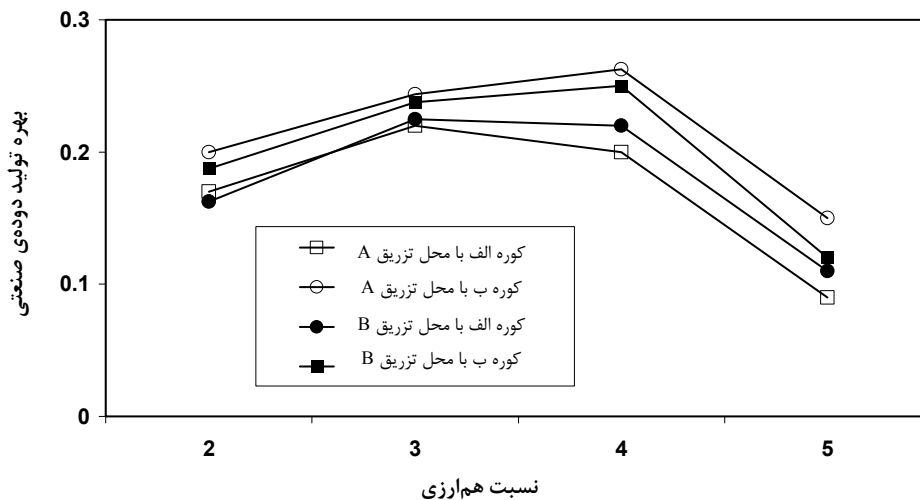


شکل ۴- بهره تولید سوخت متان در شرایط مختلف کوره

در شکل‌های (۵) و (۶) تغییرات ضریب بهره تولید دوده‌ی صنعتی برای سوخت‌های پروپان و گازوییل بر حسب نسبت هم‌ارزی ارایه شده‌اند. نتایج نشان می‌دهند که گاز متان و پروپان و گازوییل خیلی شبیه به هم رفتار می‌کنند. برای هر سه سوخت کوره با هندسه (ب) و محل تزریق خوراک سوخت A بیش‌ترین ضریب بهره تولید را دارد. همان‌طور که در شکل‌های (۱) و (۲) نشان داده شده است در کوره (ب) طول محفظه‌ی احتراق سوخت اولیه بیش‌تر از کوره (الف) است. لذا در کوره (ب) به دلیل طولانی‌تر بودن محفظه‌ی احتراق اولیه، احتراق سوخت اصلی به طور کامل انجام شده و دمای گاز به بیش‌ترین مقدار خود رسیده است، اما در طرح (الف) به دلیل کوتاه بودن محفظه‌ی احتراق اولیه، احتراق سوخت اصلی به طور کامل انجام نشده که منجر به کاهش ضریب بهره تولید شده است. همچنین نتایج نشان می‌دهند محل تزریق بر روی بهره تولید دوده‌ی صنعتی موثر است اما به هندسه کوره نیز وابسته است، به طوری که برای کوره طرح (الف) محل تزریق B و برای کوره با طرح (ب) محل تزریق A بهره بیش‌تری دارد. در طرح (الف) سوخت اصلی به طور کامل محترق نشده است، بنابراین هر چه دیرتر خوراک سوخت تزریق شود بهره تولید افزایش می‌یابد. لذا با توجه به این که محل تزریق B نسبت به محل تزریق A فاصله بیش‌تری از ورودی سوخت اصلی دارد بهره تولید بالاتری نیز دارد. اما در طرح کوره (ب) بازده بهره تولید برای محل تزریق A بیش‌تر از B است، زیرا در این طرح به دلیل طولانی‌تر بودن فضای احتراق، سوخت اصلی به طور کامل محترق شده و در ناحیه اختلاط هر چه سوخت زودتر تزریق شود اختلاط بیش‌تر انجام می‌شود که منجر به افزایش بهره تولید می‌شود.

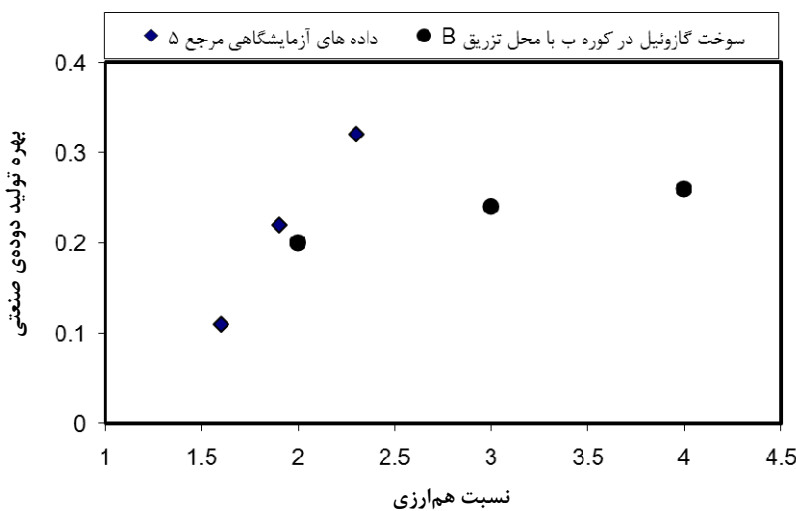


شکل ۵- بهره تولید سوخت پروپان در شرایط مختلف کوره



شکل ۶- بهره تولید سوخت گازوییل در شرایط مختلف کوره

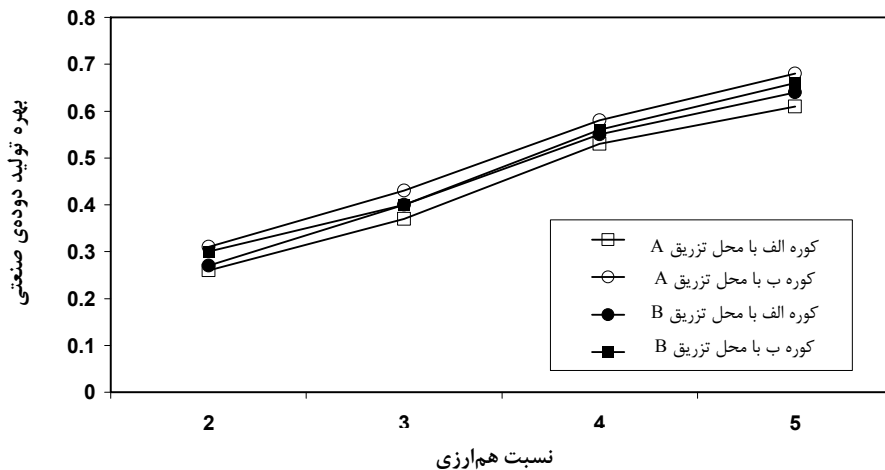
در شکل (۷) نتایج سوخت گازوییل با نتایج تجربی مرجع [۵] که سوخت اصلی گازوییل و خوراک سوخت آن سوخت سنگین است، نشان داده شده است. هندسه کوره در مرجع [۵] تقریباً شبیه کوره نوع (ب) با محل پاشش B است، به همین دلیل با نتایج گازوییل در این حالت مقایسه شده است. روند تغییرات هر دو نتیجه تقریباً یکسان است. مقدار ضریب بهره در مرجع [۵] بیش‌تر از ضریب بهره تولید دوده‌ی گازوییل است که به دلیل استفاده از هیدروکربن‌های سنگین‌تر است.



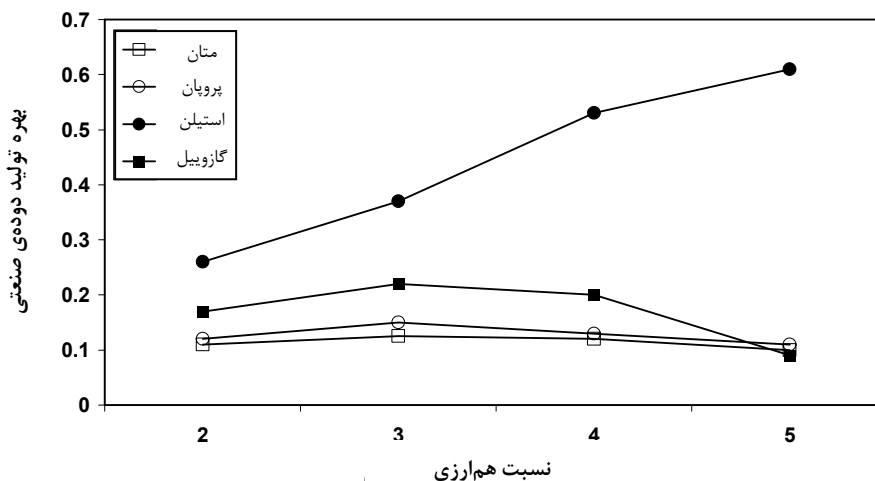
شکل ۷- مقایسه‌ی نتایج سوخت گازوییل با نتایج مرجع [۵]

در شکل (۸) تغییرات نسبت هم‌آزری برای سوخت استیلن و برای شرایط مختلف کوره و محل تزریق سوخت ارایه شده است. نتایج نشان می‌دهند که رفتار استیلن با تمام سوخت‌های مطالعه شده تفاوت دارد. به طوری که با افزایش نسبت هم‌آزری مقدار ضریب بهره نیز افزایش یافته است. با توجه به این که تجزیه گرمایی استیلن یک واکنش گرمازاست ولی تجزیه گرمایی سایر هیدروکربن‌های مطالعه شده گرماگیر است، بنابراین با افزایش دبی جرمی خوراک سوخت ضریب بهره تولید دوده‌ی صنعتی برای سوخت استیلن افزایش می‌یابد زیرا انرژی مورد نیاز برای گرم کردن استیلن توسط تجزیه استیلن تامین می‌شود [۱۱].

در شکل (۹) تغییرات ضریب بهره تولید برای کوره با هندسه (الف) و محل تزریق A برای چهار سوخت مختلف ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهند که گاز متان دارای ضریب بهره تولید کمتری است که این به دلیل پایین تر بودن نسبت جرم کربن به جرم سوخت در هر مولکول سوخت است. در جدول (۴) برای سوخت‌های مطالعه شده این نسبت ارائه شده است. همان‌طور که در جدول نشان داده شده نسبت جرم کربن به جرم سوخت برای متان ۰/۷۵، برای پروپان ۰/۸۲ و برای گازوییل ۰/۸۵ است. نتایج همچنین نشان می‌دهند که بازده بهره تولید استیلن تقریباً بیش از دو برابر سایر سوخت‌هاست که این به دلیل گرمازا بودن تجزیه گرمایی استیلن است.

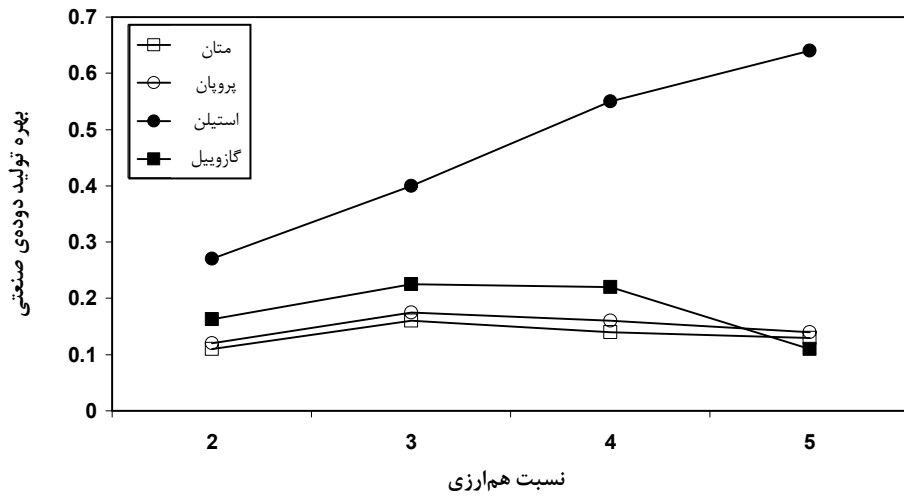


شکل ۸- بهره تولید سوخت استیلن در شرایط مختلف کوره

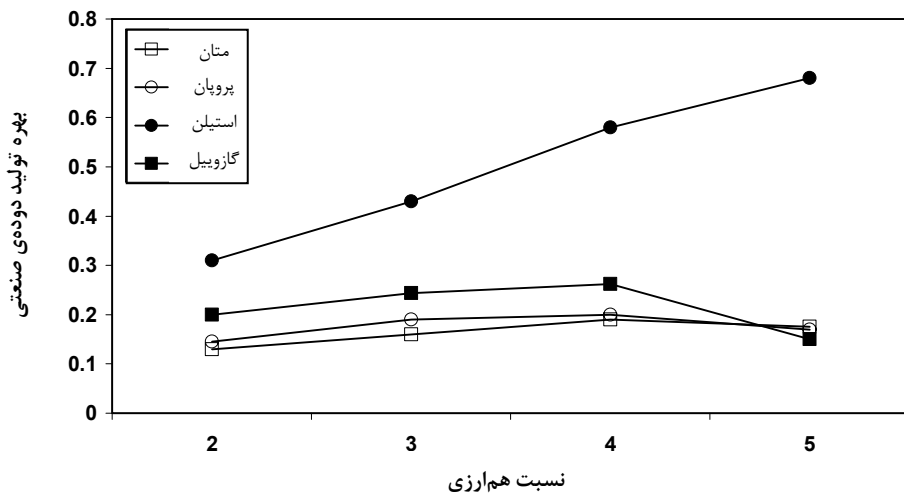


شکل ۹- بهره تولید برای سوخت‌های مختلف در کوره (الف) و محل تزریق A

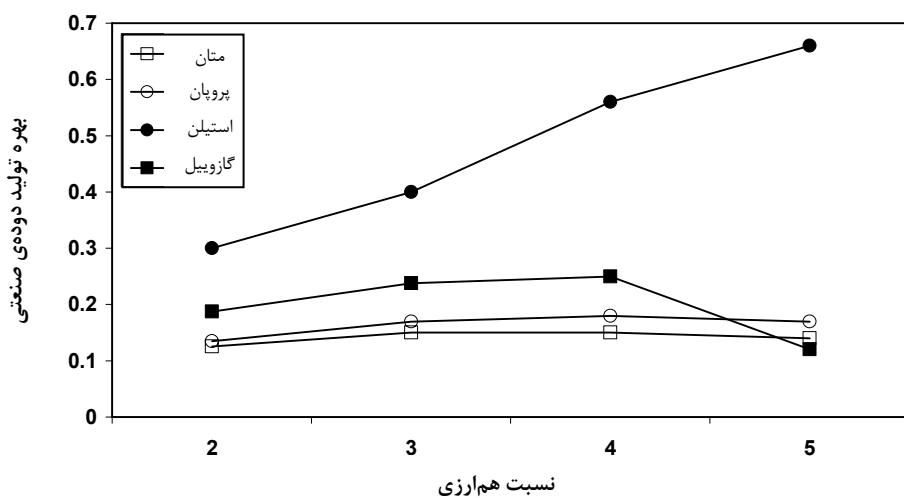
در شکل‌های (۱۰) تا (۱۲) تغییرات ضریب بهره تولید برای سوخت‌های مختلف با یکدیگر مقایسه شده‌اند. نتایج نشان می‌دهند که برای سوخت گازوییل بهره تولید نسبت به سوخت متان و پروپان در مقادیر کم‌تر خوراک سوخت بالاتر است اما در مقادیر بیش‌تر خوراک سوخت کم‌تر است. سوخت گازوییل به صورت مایع تزریق می‌شود، بنابراین در مقادیر پایین نسبت هم‌ارزی انرژی کافی برای تبدیل مایع به بخار و سپس شکستن پیوند هیدروکربن‌ها وجود دارد و چون گازوییل دارای نسبت کربن بیش‌تری نسبت به متان و پروپان است، بهره تولید بیش‌تری هم دارد. در مقادیر بالاتر خوراک سوخت به دلیل مصرف انرژی برای تبخیر گازوییل مایع بهره تولید آن نسبت به متان و پروپان کم‌تر شده است.



شکل ۱۰- بهره تولید برای سوخت‌های مختلف در کوره (الف) و محل تزریق B



شکل ۱۱- بهره تولید برای سوخت‌های مختلف در کوره (ب) و محل تزریق A



شکل ۱۲- بهره تولید برای سوخت‌های مختلف در کوره (ب) و محل تزریق B

نتیجه گیری

در این پژوهش، تاثیر عوامل مختلفی بر روی بهره تولید دوده‌ی صنعتی به صورت آزمایشگاهی بررسی شده است، از جمله اثر نوع سوخت، هندسه محفظه‌ی احتراق و محل تزریق سوخت مورد بررسی قرار گرفته‌اند. نتایج نشان می‌دهند که:

- ضریب بهره استیلن بسیار بالاتر از سایر سوخت‌های مطالعه شده است.
- بالاترین بهره تولید مربوط به کوره طرح (ب) و محل تزریق A است.
- تغییرات ضریب بهره تولید برای سوخت‌های متان، پروپان و گازوییل دارای یک الگوی رفتاری است و فقط بهره تولید سوخت مایع گازوییل در مقادیر پایین نسبت هم‌ارزی بیش‌تر از بهره تولید متان و پروپان است. در نسبت‌های هم‌ارزی بالاتر این رفتار برعکس است.

قدردانی

بدین وسیله از دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد که هزینه لازم را برای ساخت کوره و خرید لوازم آزمایشگاهی مورد نیاز تامین کرده است، تشکر و قدردانی می‌شود.

مراجع

1. Adamski, R., In International Carbon Black Directory and Source Book, Portland, ME, USA, Intertech Publications, 1999.
2. Baptiste, J., Donnet, R., and Jaio Wang, M., Carbon Black Science and Technology, 2nd Edition, 1993.
3. Franta, I., Elastomers and Rubber Compounding Materials: Manufacture, Properties and Applications, New York, Wiley, 1989.
4. Lockwood, F. C., and Niekerk, S. E., "Parametric Study of a Carbon Black Oil Furnace," Combustion and Flame, 103, pp. 76-90, 1995.
5. Hayashi, S., Furuhashi, T., Aoki, H., Miura, T., Kanai, T., and Kurihara, M., "Simulation of Soot Formation Behavior in Carbon Black Furnace," Proceedings of ICLASS-97, August, 1997.
6. Gruenberger, T. M., Moghiman, M., Bowen, P. J., and Syred, N., "Dynamic of Soot Formation by Turbulent Combustion and Thermal Decomposition of Natural gas," Combustion Science and Technology, 174, pp. 67-86, 2002.
7. Fabry, F., Flamant, G., and Fulcheri, L., "Carbon Black Processing by Thermal Plasma: Analysis of the Particle Formation Mechanism," Chemical Engineering Science, 56, pp. 2123-2132, 2001.
8. Moghiman, M., and Bashirnezhad, K., "Experimental and Numerical Studies of Carbon Black Natural Gas Furnace," Kuwait Journal of Science and Engineering, 34, pp. 167-182, 2007.
9. Saario, A., Rebola, A., Coelho, P. J., Costa, M., and Oksanen, A., "Heavy Fuel Oil Combustion in a Cylindrical Laboratory Furnace: Measurements and Modeling," Journal of Fuel, 84, pp. 359-372, 2005.
10. Moghiman, M., "Numerical Prediction and Measurement of Carbon Black through Turbulent Combustion and Decomposition of Natural Gas," Scientia Iranian, 10, No. 2, pp. 1-9, 2003.
11. Babushok, V. I., and Miziolek, A. W., "Condensation Flame of Acetylene Decomposition," Combustion and Flame, 136, pp. 141-145, 2004.

English Abstract

Lab Measurement of the Effect of Different Parameters on Carbon Black Yield

K. Bashirnezhad¹, H. Momahedi Heravi¹, D. Falah Heravi¹ and M. Moghiman²

1- Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Islamic Azad University of Mashhad

2- Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad

In this study, the effect of several parameters such as feedstock location, fuel mass flow rate, fuel type and length of furnace inlet are studied. All of the measurements have been done in a laboratory furnace that has been designed and made specifically for this purpose. Carbon black concentration is measured using the weighted method. Measurements are obtained for four fuels: methane, propane, acetylene, and oil gas. The results show that carbon black yields for methane, propane and oil gas are similar, but such carbon black yield for acetylene is more than twice that of the other fuels. The results reveal that the effect of feedstock injection place strongly depends on furnace geometry. They also indicate that the maximum yield for all of the above mentioned fuels, except for acetylene, occur when feedstock fuel mass flow rate is 4 times that of pre-combustor fuel rates.

Keywords: Carbon black, Yield, Methane, Propane, Acetylene, Oil gas.