

مطالعه آزمایشگاهی تاثیر استفاده از روش FGR بر دمای ماکزیمم شعله و انتشار NO_x در احتراق گازوئیل و بیودیزل

علی آجیلیان ممتاز^{۱*}، شهاب نوری فرد^۲، حمید ممهدی هروی^۳
دانشگاه آزاد اسلامی مشهد، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مکانیک
(*نویسنده مخاطب: pouria_204@yahoo.com)

چکیده

هدف از انجام این پژوهش، مطالعه آزمایشگاهی تاثیر برگشت گازهای خروجی بر دمای شعله و انتشار NO_x حاصل از احتراق گازوئیل و بیودیزل می باشد. آزمایشات در کوره استوانه‌ای شکل، در حالت غیر پیش‌آمیخته، درصدهای مختلف برگشت گازهای خروجی از صفر تا ۳۰ درصد و دبی‌های هوای ورودی $0.3/5$ ، $0.4/5$ و $0.5/5$ انجام شده است. به منظور بازگردانی گازهای خروجی به محفظه احتراق، از لوله‌های فولادی با اتصالات جوشی استفاده گردیده و در مسیر آن به کمک یک فن سانتریفوژ، گازهای برگشتی به همراه هوای ورودی وارد محفظه احتراق شوند. جهت اندازه‌گیری دما از ترموکوپل نوع S با توانایی اندازه‌گیری دما تا $1700^\circ C$ و به منظور اندازه‌گیری آلاینده‌های احتراقی از دستگاه آنالیزور گاز Testo 350-XL استفاده شده است. در این تحقیق سوخت‌های گازوئیل و همچنین بیودیزل B20 و B40 تولید شده از روغن آفتابگردان استفاده گردیده است. مقایسه نتایج با آزمایشات سایر محققین مطابقت بسیار خوبی، خصوصاً از لحاظ کیفی، نشان می‌دهد. نتایج آزمایشگاهی بیانگر این است که در احتراق گازوئیل، با افزایش درصد گازهای برگشتی تا ۳۰ درصد، انتشار آلاینده NO_x حدود ۱۶ درصد و در احتراق بیودیزل B20 و B40 به ترتیب حدود ۱۷ و ۱۸ درصد کاهش می‌یابد. از طرف دیگر نتایج نشان داد در احتراق بیودیزل، با افزایش درصد حجمی بیودیزل از صفر تا ۴۰ درصد در مخلوط سوخت، دمای گازهای خروجی و انتشار آلاینده NO_x به ترتیب به میزان ۶ و ۱۳ درصد افزایش می‌یابد. نتایج همچنین نشان می‌دهد با افزایش دبی هوای ورودی، دما و انتشار آلاینده‌ی NO_x روند نزولی خواهد داشت. نتایج حاصل از این پژوهش بیانگر آن است که روش بازگردانی گازهای خروجی، روشی موثر در جهت کاهش آلاینده NO_x می‌باشد. از طرف دیگر استفاده از سوخت تجدیدپذیر بیودیزل به تنهایی، سبب افزایش انتشار آلاینده NO_x می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: FGR، بیودیزل، NO_x

۱- مقدمه

انرژی نقش مهمی در زندگی روزانه انسان‌ها ایفا می‌کند و یکی از مهمترین عوامل پیشرفت جوامع بشری است. منابع انرژی می‌توانند به سه گروه تقسیم شوند: انرژی سوخت‌های فسیلی، انرژی هسته‌ای و انرژی‌های تجدیدپذیر [۱]. بعضی از منابع فوق طی سالیان دراز و بعضی نیز به تازگی در جهت رفع نیاز بشر به انرژی مورد استفاده قرار می‌گیرند. سوخت‌های فسیلی در زمان‌های قدیم طی واکنش‌های شیمیایی پیچیده و در طی سالیان بسیار طولانی تولید شده‌اند و تجدیدپذیر نیستند [۲]. ذغال سنگ، گاز طبیعی و نفت از جمله سوخت‌های فسیلی‌اند. استفاده از این‌گونه سوخت‌ها اگرچه نیاز بشر به انرژی را تا حد زیادی برآورده کرده است اما مشکلاتی از قبیل آلودگی‌های زیست‌محیطی و تولید گازهای

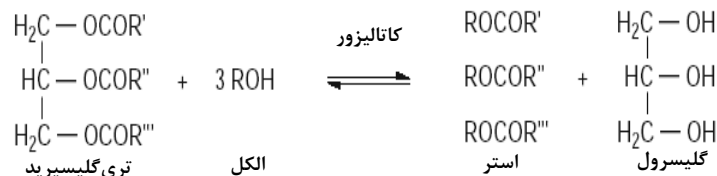
۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد

۳- استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد

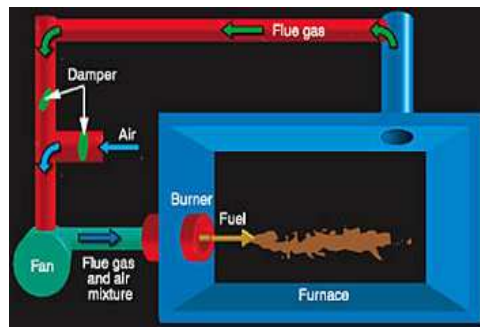
گلخانه‌ای را نیز به همراه داشته است. امروزه کشورهای دنیا با دو بحران رو به پایان بودن منابع سوخت‌های فسیلی و اثرات زیان‌بار مربوط به تولید آلاینده‌ها روبرو هستند.

دسته دیگر انرژی، انرژی هسته‌ای است که در تولید آن از مواد قابل شکافت (مانند اورانیوم) استفاده می‌شود. این دانش با کاربردهای فراوان و متنوعی که دارد در دهه‌های آینده که منابع فسیلی برای تأمین انرژی رو به افول است و تاکنون بهره‌گیری از آن‌ها برآلودگی‌های زیست محیطی افزوده است، تضمین‌کننده استمرار حیات و بقای زندگی بشر است [۳]. انرژی هسته‌ای، علیرغم مزایای بسیارش، معایب اساسی دارد که می‌توان به مشکلات دورریزی فضولات، امکان تکثیر جنگ‌افزارهای هسته‌ای از زباله‌های رآکتور مرغوب، آلودگی گرمایی ناشی از نیروگاه‌ها و تأثیرات سوء بر سلامتی انسان نام برد. برای غلبه بر مشکلات ذکر شده، منابع انرژی جدید به دلیل اینکه عمدتاً دوست‌دار محیط زیست می‌باشند و از منابع تجدیدپذیر مانند گیاهان، روغن‌های خوراکی و غیرخوراکی بدست می‌آیند بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند [۴]. بیودیزل یک نوع سوخت تجدیدپذیر و تجزیه‌پذیر است که از روغن گیاهی و یا چربی حیوانی بدست می‌آید. توصیف علمی آن عبارت از استرهای منو الکیل اسیدهای چرب با زنجیر طولانی است. مواد اولیه این سوخت تری‌گلیسیرید شامل روغن‌های خوراکی و غیر خوراکی، پسماندهای آن‌ها و چربی‌های گیاهی است. دانه‌های روغنی که اکثراً برای تولید بیودیزل بکار می‌روند عبارتند از: روغن آفتابگردان، خرما، سویا، بادام‌زمینی، کانولا (گونه‌ای از دانه شلغم روغنی)، جاترفا (نوعی دانه روغن گیاهی غیرخوراکی که در کویرزدایی مورد استفاده است). بیودیزل از ترکیب منو الکیل اسید چرب (که منابع آن اشاره شد) با الکل و در حضور کاتالیزور بدست می‌آید که طی واکنش‌هایی "متیل استر" با عنوان تجاری بیودیزل تولید می‌شود و بعد از خالص‌سازی قابل استفاده است [۵]. رایج‌ترین الکل‌های مورد استفاده برای تولید بیودیزل متانول و اتانول است. از هیدروکسیدپتاسیم و هیدروکسیدسدیم نیز معمولاً به عنوان کاتالیزور استفاده می‌شود. چهار روش اصلی برای تولید و استفاده بیودیزل از روغن‌های نباتی شامل استفاده مستقیم از روغن‌های گیاهی به عنوان سوخت، میکرو امولسیون، پیرولیز و ترانس استریفیکاسیون روغن‌های گیاهی می‌باشند که روش آخر معمول‌تر و اقتصادی‌تر است [۶]. واکنش کلی ترانس استریفیکاسیون به صورت زیر است [۷]:



شکل ۱- واکنش کلی ترانس استریفیکاسیون

گلیسیرین که از محصولات فرعی این فرایند است پس از تصفیه در منابع آرایشی و بهداشتی و نظامی کاربرد دارد [۸]. انتشار آلاینده‌ها و توجه به مسائل زیست محیطی از عوامل مهم در انتخاب نوع سوخت و طراحی سیستم‌های احتراقی می‌باشد [۹]. انواع گوناگون آلاینده‌ها در محصولات احتراق سوخت‌های گوناگون وجود دارد که مهم‌ترین آن‌ها اکسیدهای نیتروژن (NO_x) می‌باشد. از اثرات عمده ناشی از آلاینده‌ها می‌توان به خصوصیات تغییر یافته اتمسفر و میزان بارندگی، آسیب به پوشش گیاهی و آلودگی و تباهی مواد، افزایش بالقوه شیوع بیماری (ناخوشی) و مرگ و میر در انسان‌ها اشاره کرد [۱۰]. روش‌های مختلفی جهت کاهش انتشار NO_x وجود دارد که یکی از موثرترین آن‌ها، کاهش دمای نقطه ماکزیمم می‌باشد [۱۱]. در این روش، همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، بخشی از محصولات احتراق در خروجی کوره بازگردانی شده و به هوای ورودی اضافه می‌گردد. بدین ترتیب حداقل دو عامل که باعث کاهش تشکیل اکسیدهای نیتروژن می‌شود روی می‌دهد. اول این که این عمل باعث کاهش درصد اکسیژن در محصولات احتراق می‌گردد. لذا گازهای خروجی اکسیژن کمتری داشته و احتراق در اتمسفر با اکسیژن کم باعث کاهش تولید NO_x می‌شود. همچنین به دلیل افزایش نرخ جریان در فرایند احتراق، دمای شعله کاهش می‌یابد که با این عمل NO_x حرارتی کمتر تشکیل می‌شود و در نتیجه میزان تولید اکسیدهای نیتروژن کاهش می‌یابد.



شکل ۲- شماتیک روش بازگردانی گازهای خروجی (EGR یا FGR)

اثر^۱ FGR این است که ظرفیت گرمای گازهای سوزانده شده را برای مقدار معینی از گرمای آزاد شده افزایش می دهد، بنابراین دمای احتراق را پایین می آورد [۱۲]. به طور کلی دو نوع FGR وجود دارد. در نوع اول ابتدا گازهای برگشتی توسط یک مبدل حرارتی خنک کاری شده و سپس با هوا مخلوط می گردد. در این صورت دمای احتراق به طور محسوسی کاهش می یابد. در نوع دیگر آن گازهای برگشتی بدون اینکه خنک شود با هوا مخلوط می شود. نوع اول به دلیل اینکه سبب افزایش آلدئیدها در محصولات احتراق می گردد و همچنین هزینه اضافی ناشی از خنک کاری گازهای برگشتی را به همراه دارد کمتر مورد استفاده قرار می گیرد. باید توجه داشت که میزان زیاد FGR باعث ناپایداری و احتراق ناقص و در نتیجه تولید CO و دود می گردد. میزان کم FGR نیز باعث افزایش تولید NO_x می شود. بنابراین یافتن میزان بهینه FGR بایستی مورد توجه قرار گیرد.

نقطه شروع تحقیقات پیرامون سوخت بیودیزل به سال ۱۸۹۳ برمی گردد که دکتر رادولف دیزل و همکارانش در آلمان به دنبال ساخت موتوری بودند که بالاترین نسبت تراکم ممکن را داشته باشد [۱]. وی در سال ۱۹۰۰ از روغن بادم زمینی برای به کار انداختن موتور دیزل استفاده کرد. تحقیقات آن ها ادامه یافت تا اینکه در سال ۱۹۱۲ اعلام کردند که می توان از روغن های گیاهی تولید سوخت کرد. تولید تجاری این سوخت از دهه ۱۹۹۰ آغاز گردید. تحقیقات در این زمینه ادامه یافت تا در سال ۱۹۹۴ کمیته ملی بیودیزل آمریکا گزارشی درباره سوخت بیودیزل B20 (مخلوط ۲۰ درصد بیودیزل و ۸۰ درصد گازوئیل) و خصوصیات عملکردی و آلاینده های تولیدی آن ارائه نمود. این گزارش نشان می داد بیودیزل عملکرد موتور را بهبود بخشیده و انتشار آلاینده ها نیز کاهش یافته است. سپس در سال ۲۰۰۱ ساکا و کودیانا [۱۳] به کمک فرایند ترانس استریفیکاسیون و بدون استفاده از کاتالیزور موفق به تولید بیودیزل شدند. در سال ۲۰۰۵ گارین [۱۴] به مطالعه تاثیر زمان و دمای واکنش بر روی کیفیت استر پرداخت. نتایج تحقیقات وی نشان داد این دو پارامتر مهم ترین عوامل تاثیرگذار بر کیفیت سوخت بیودیزل می باشند. تولید اسیدهای چرب متیل استر با استفاده از امواج مایکروویو و کاتالیزورهای هموژن در سال ۲۰۰۷ توسط هرناندو و همکارانش مورد مطالعه قرار گرفت [۱۵]. آن ها گزارش کردند که با استفاده از تابش امواج مایکروویو، می توان تری گلیسیریدها را به کمک متانول سریع تر الکل دار کرد که این عمل باعث افزایش تولید اسیدهای چرب متیل استر می شود. پژوهشگران زیادی از روغن بازیافتی برای تولید بیودیزل استفاده کرده اند [۱۶]. استفاده از این گونه روغن ها اگرچه هزینه اولیه تهیه روغن به منظور تولید بیودیزل را کاهش می دهد، اما عموماً هزینه خالص سازی و رفع ناخالصی ها از سوخت جبران این کاهش هزینه را می کند. امروزه تحقیقات گسترده ای بر روی جلبک ها و گیاهان تک یاخته ای جهت تولید روغن و بالطبع بیودیزل در حال اجرا است. تنها دو روش برای تولید بیودیزل با استفاده از جلبک وجود دارد: استفاده از کانال های حلقه ای و فوتوبیوراکتورها. بزرگترین دستگاهی که از روش اول بیودیزل تولید می کند در سال ۲۰۰۶ توسط اسپولا و همکارانش ساخته شده است [۱۷].

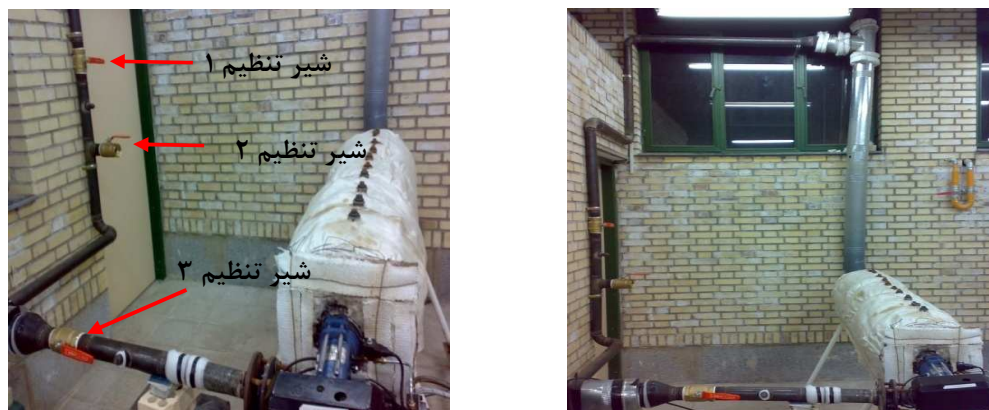
¹ Flue Gas Recirculation

محققان زیادی نیز از روش بازگردانی گازهای خروجی به محفظه احتراق (FGR) به منظور کاهش تولید آلاینده اکسیدهای نیتروژن (NO_x) استفاده کرده اند. بالتازار و کاروالهو [۱۸] در سال ۱۹۹۷ به بررسی آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی تاثیر بازگردانی گازهای خروجی بر روی شعله و انتشار آلاینده‌ها در احتراق پروپان و هوا در کوره آزمایشگاهی پرداخت. نتایج بیانگر این بود که استفاده از این روش باعث کاهش انتشار NO_x می‌شود و در عین حال بر روی بازده احتراق تاثیر منفی ندارد. همچنین وی متوجه شد که بازگردانی گازهای خروجی تا ۳۲ درصد، بدون توجه به میزان هوای اضافی، بر روی پایداری شعله هیچ تاثیر سوئی ندارد. در سال ۲۰۰۱، تیموتی وبستر [۱۹] با استفاده از این روش در احتراق پیش‌آمیخته گاز طبیعی و هوا در نسبت هم‌ارزی ۱ و بازگردانی ۵۰ درصد گازهای خروجی از دودکش به محفظه احتراق، موفق شد انتشار NO_x را به میزان ۹۵ درصد کاهش دهد. در این آزمایشات میزان گازهای برگشتی از صفر تا ۲۰ درصد متغیر بود. در سال ۲۰۰۶، ماتسوموتو و همکارانش [۲۰] تحقیقی آزمایشگاهی به منظور مطالعه اثربخشی بازگردانی گازهای خروجی به محفظه احتراق بر کاهش آلاینده NO_x انجام دادند. این تحقیق بر روی شعله غیرپیش‌آمیخته دی‌متیل‌تر صورت پذیرفت. نتایج بیانگر این بود که به دلیل سرعت بالای احتراق و دمای پایین اشتعال می‌توان از روش FGR به منظور کاهش آلاینده‌های احتراقی این سوخت بهره برد. علاوه بر این، با ۸۵ درصد گازهای برگشتی، میزان انتشار NO_x تا ۹۰ درصد کاهش می‌یابد. در سال ۲۰۰۸، ینگ و لانگ بیو [۲۱] با استفاده از سوخت دی‌متیل‌تر (که سوختی ارزان و نسبتاً پاک برای موتورهای دیزل است)، به بررسی تاثیر استفاده از روش FGR بر کاهش آلاینده NO_x پرداختند. در این تحقیق گازهای برگشتی (تا میزان ۲۰ درصد) به درون هوای ورودی تزریق گردید. نتایج این تحقیق نشان داد که بازگردانی ۲۰ درصد از گازهای خروجی انتشار NO_x را تا ۴۰ درصد کاهش می‌دهد. علت این کاهش، افزایش کسر مولی گونه‌های CO_2 و H_2O در ورودی است که ظرفیت حرارتی بالای این گونه‌ها سبب کاهش دمای احتراق و انتشار NO_x می‌گردد. روی و همکارانش [۲۲] در سال ۲۰۱۱ به بررسی استفاده از EGR و جداکننده‌های سیکلونی بر کاهش NO_x و ذرات ریز در موتور دیزل پاشش مستقیم پرداختند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که میزان انتشار NO_x با استفاده از تکنیک EGR به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد هرچند که انتشار ذرات ریز افزایش می‌یابد. از طرف دیگر استفاده از جداکننده‌های سیکلونی انتشار ذرات ریز را کاهش می‌دهد. اما در سرعت‌ها و بارهای بالای موتور استفاده همزمان از EGR و جداکننده‌های سیکلونی سبب کاهش همزمان NO_x و ذرات ریز می‌گردد. همانطور که اشاره گردید سوخت بیودیزل علیرغم مزایای بسیار زیاد و کاهش انتشار تعداد زیادی از آلاینده‌های احتراقی، سبب افزایش انتشار آلاینده NO_x می‌گردد. در مقاله حاضر به مطالعه آزمایشگاهی اثر استفاده از روش FGR بر انتشار آلاینده‌های احتراقی (خصوصاً NO_x) در احتراق سوخت بیودیزل داخل کوره آزمایشگاهی پرداخته شده است.

۲- آزمایش

کوره آزمایشگاهی استفاده شده در این پروژه با توجه به ظرفیت مشعل، از یک استوانه افقی با طول ۱۸۰۰ mm و قطر ۳۶۰ mm تشکیل شده که در قسمت ورودی آن محلی برای نصب مشعل و در قسمت خروجی نیز محلی برای اتصال دودکش در نظر گرفته شده است. سطح داخلی کوره کاملاً صیقلی است تا هیچ‌گونه مقاومتی در مقابل گازهای داغ بوجود نیاید. بدنه کوره از فولاد AISI316 جهت مقاومت در دماهای بالا ساخته شده است. اطراف کوره توسط عایق حرارتی پشم هندی پوشانده شده است بطوریکه انتقال حرارت از بدنه کوره قابل اغماض است. جنس عایق حرارتی پشم هندی و ضخامت آن ۴۰ mm می‌باشد. دمای داخل کوره بوسیله یک ترموکوپل نوع S با قابلیت اندازه‌گیری دما تا $1700^\circ C$ اندازه‌گیری شده است. به منظور اندازه‌گیری NO_x از دستگاه گاز آنالیزر Testo 350 XL که قادر است NO_x را تا ۳۰۰۰ ppm اندازه‌گیری کند، استفاده شده است. به منظور بازگردانی بخشی از گازهای خروجی از دودکش و ترکیب آن با هوای ورودی به مشعل، از ارتفاع ۳ متری با نصب سه راهی بر روی دودکش، مسیر برگشت گازهای خروجی ایجاد شده است. مسیر در نظر گرفته شده جهت بازگردانی گازهای دودکش از لوله گازی فولادی و به قطر ۲ اینچ می‌باشد. به منظور به حداقل رساندن اتلافات و درزبندی کامل از اتصالات جوشی بهره برده شده است. بر روی این مسیر سه شیر تنظیم و یک فن مکنده جهت تنظیم دبی گازهای بازگشتی از

دودکش خروجی و هوای ورودی به مشعل نصب گردیده‌اند. از شیر تنظیم اول به منظور کنترل دبی گازهای برگشتی از دودکش، از شیر دوم جهت تنظیم دبی هوای ورودی و از شیر سوم جهت تنظیم دبی مخلوط گازهای برگشتی و هوای ورودی به مشعل استفاده شده است. فن مکند نیز که از نوع سانتریفوژ می‌باشد با مکش هوا و گازهای خروجی از دودکش، دبی مورد نظر جهت ورود به مشعل و ترکیب با سوخت را فراهم می‌کند. برای خنک کردن فن نیز از یک فن خنک کننده پروانه‌ای استفاده شده است. در شکل ۳ کوره آزمایشگاهی و مسیر بازگشت گازهای خروجی نشان داده شده است.



شکل ۳- کوره آزمایشگاهی و مسیر بازگشت گازهای خروجی

در منابع مختلف به منظور تعیین درصد FGR از فرمول‌های مختلفی استفاده شده است که در این پروژه از فرمول زیر استفاده شده است [۱۸]:

$$FGR = \frac{\text{Mass of air without FGR} - \text{Mass of air with FGR}}{\text{Mass of air without FGR}} \quad (1)$$

علاوه بر گازوئیل، سوخت بیودیزل نیز تولید و در آزمایشات مورد استفاده قرار گرفته است. در این پژوهش از روغن آفتابگردان، از متانول به عنوان الکل و از هیدروکسیدپتاسیم به عنوان کاتالیزور برای تولید بیودیزل استفاده گردیده است. جهت اطمینان از تولید سوخت بیودیزل و انجام کامل فرایند ترانس‌استریفیکاسیون، نمونه‌ای از بیودیزل تولیدی تحت تست IR^۱ قرار گرفت. نتیجه انجام این تست بیانگر این بود که فرایند ترانس‌استریفیکاسیون به طور کامل صورت پذیرفته است و استر که جزء اصلی سازنده بیودیزل می‌باشد، تشکیل گردیده است. همچنین نمونه‌ای از این سوخت پس از تولید به آزمایشگاه فرستاده شد و بعضی از خواص آن اندازه‌گیری گردید. نتایج بدست آمده، که در جدول ۱ ارائه شده است، موید آن است که خواص سوخت بیودیزل تولید شده با جداول استاندارد این سوخت مطابقت و نزدیکی بسیار خوبی دارد.

جدول ۱- خواص بیودیزل استاندارد و تولید شده در این آزمایش

بیودیزل تولیدی	بیودیزل خالص	گازوئیل خالص	مشخصات سوخت		
			استاندارد ASTM	واحد	خصوصیت
۰/۹۱۳	۰/۸۹۵	۰/۸۱۵	D4052	g/cm ³	چگالی
۴/۱	۴/۷۹	۲/۴۵	D445	Cst	ویسکوزیته در دمای ۴۰ °C
۱	۷	-۴	D2500	°C	نقطه ابری شدن
-۶	-۴	-۲۴	D97	°C	نقطه ریزش

^۱ از طیف IR یک جسم مجهول میتوان گروه‌های مختلف موجود در آن را به دست آورد. همچنین برای اثبات یکسان بودن دو جسم از طیف IR استفاده می‌شود.

۳- میزان خطا در داده‌های آزمایشگاهی

در این پژوهش ابتدا برای هر نقطه، سه داده آزمایشگاهی جمع‌آوری شده است و سپس میانگین حسابی داده‌ها محاسبه و به عنوان داده نهائی آزمایشگاهی استفاده می‌شود. مقدار خطای احتمالی یا عدم قطعیت داده‌ها از فرمول زیر محاسبه شده است [۲۳].

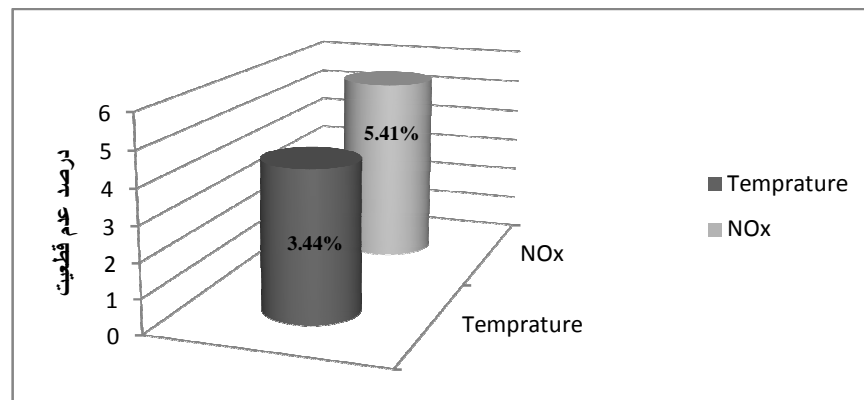
$$\sigma_m = \sigma / n^{0.5} \quad (2)$$

در این فرمول σ_m انحراف معیار مقدار میانگین و σ انحراف معیار مجموعه اندازه‌گیری‌ها و n تعداد اندازه‌گیری‌ها در هر نقطه می‌باشد. مقدار درصد عدم قطعیت (x) داده‌های آزمایشگاهی از رابطه زیر محاسبه شده است.

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

که در آن \bar{x} مقدار میانگین حسابی داده‌های آزمایشگاهی می‌باشد.

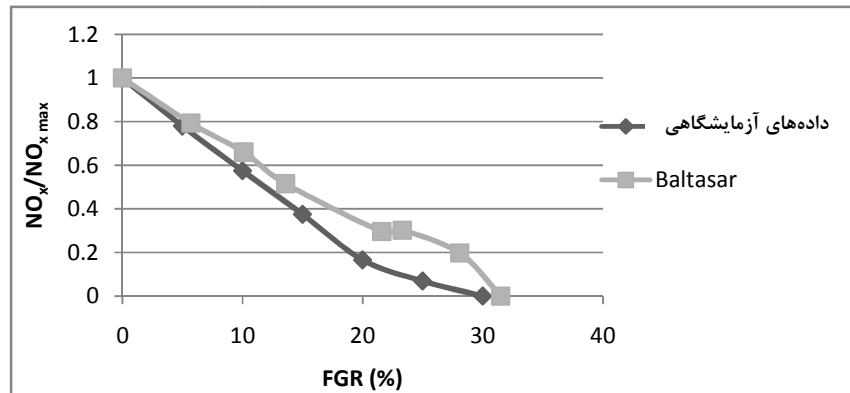
عدم قطعیت داده‌های بدست آمده (در حالت ۱۵ درصد FGR و دبی ورودی $5/5 \text{ m}^3/\text{min}$) در نمودار ۱ نشان داده شده است.



نمودار ۱- درصد عدم قطعیت داده‌های آزمایشگاهی

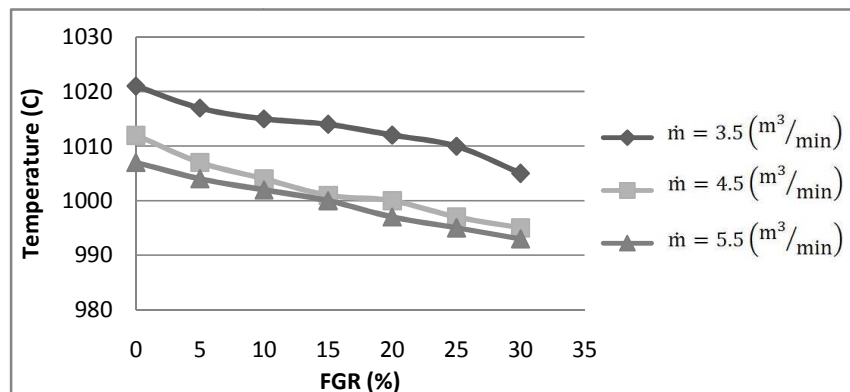
۴- نتایج

دمای سوخت و هوای ورودی بسته به میزان گازهای برگشتی از ۳۰۰ درجه کلوین تا ۳۵۰ درجه کلوین متغیر است. آزمایش‌ها در درصدهای مختلف FGR، از صفر تا ۳۰ درصد و فشار هوای ۱ اتمسفر صورت گرفته است. آزمایشات برای دبی‌های هوای ورودی $3/5 \text{ m}^3/\text{min}$ ، $4/5$ و $5/5$ تکرار شده و تاثیر آن بر احتراق بررسی می‌گردد. داده‌های آزمایشگاهی اندازه‌گیری شده با نتایج آزمایشگاهی مرجع [۱۸] مقایسه شده است. هرچند که شرایط کاری آزمایش و پارامترهای مختلف مانند دبی سوخت و هوا، در این پژوهش و مرجع فوق کاملاً مشابه نیستند، اما روند کیفی تغییر داده‌های آزمایشگاهی مشابه یکدیگر هستند. در نمودار ۲ تغییرات میزان $\text{NO}_x/\text{NO}_{x,\text{max}}$ حاصل از نتایج بالتازار و نتایج آزمایشگاهی بدست آمده در این پژوهش در نسبت هم‌ارزی ۱/۱۴ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود روند کیفی تغییرات خصوصاً در نقاط ابتدایی کاملاً یکسان است و اختلاف مقادیر اندازه‌گیری شده به واسطه شرایط کاری مختلف، نوع سوخت، پارامترهای متفاوت دبی سوخت و هوا و مشخصات هندسی کوره می‌باشد.



نمودار ۲- مقایسه بین داده‌های آزمایشگاهی اندازه‌گیری شده و نتایج آزمایشگاهی بالتازار و همکارانش [۱۸]

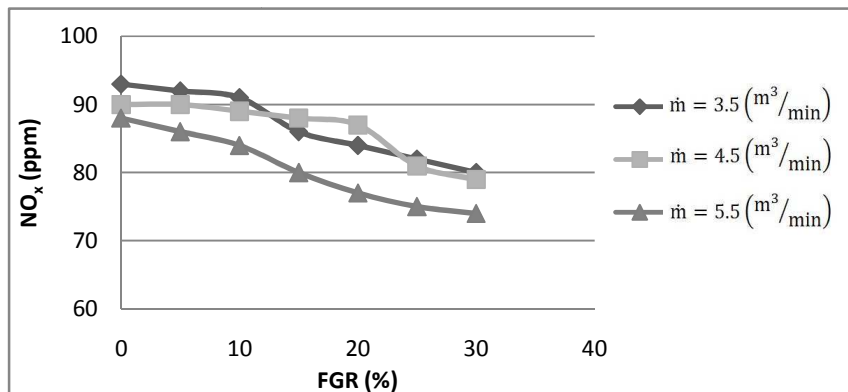
نمودار ۳ نتایج آزمایشگاهی تأثیر درصدهای مختلف FGR بر دمای گازهای داخل کوره در فاصله ۳۰cm از انتهای آن حاصل از احتراق گازوئیل برای دبی‌های مختلف مخلوط هوا و گازهای برگشتی را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که دمای محصولات احتراق با افزایش درصد FGR کاهش می‌یابد. دو عامل باعث این کاهش دما می‌شود. اول اینکه با اضافه شده میزان گازهای برگشتی و افزایش درصد FGR میزان اکسیژن کمتری جهت احتراق سوخت وارد مشعل می‌شود. علاوه بر آن به دلیل گرمای ویژه بالای مخلوط گازهای برگشتی و هوا نسبت به هوای خالص، دمای گازهای احتراقی داخل کوره کاهش می‌یابد. از دیگر عوامل کاهش دما با افزایش درصد FGR می‌توان به افزایش توربولانسی و کاهش طول شعله اشاره کرد. مشاهده می‌شود که دمای ماکزیمم برای دبی $3/5 \text{ m}^3/\text{min}$ برابر با 1021 درجه سانتیگراد است که با 30% درصد FGR به 1005 درجه سانتیگراد کاهش یافته است. به طور مشابه برای دبی‌های ورودی $4/5 \text{ m}^3/\text{min}$ و $5/5$ این میزان از 1012 و 1007 درجه سانتیگراد در حالت بدون FGR به 993 و 995 درجه سانتیگراد در حالت 30% درصد FGR کاهش یافته است.



نمودار ۳- تأثیر درصدهای مختلف FGR بر روی دمای گازهای خروجی در احتراق گازوئیل برای دبی‌های ورودی مختلف

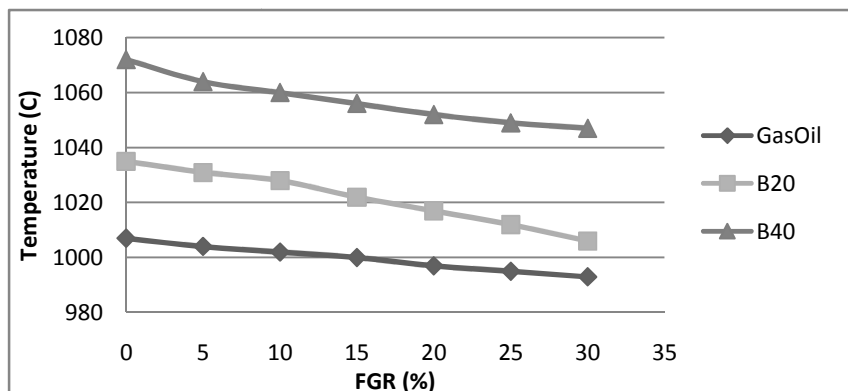
در نمودار ۴ نتایج آزمایشگاهی تأثیر درصدهای مختلف FGR بر انتشار NO_x در گازهای خروجی از کوره، حاصل از احتراق گازوئیل برای دبی‌های هوای ورودی مختلف نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش میزان دبی هوای ورودی میزان انتشار NO_x کاهش می‌یابد. از طرفی با افزایش درصد FGR نیز انتشار NO_x کاهش می‌یابد. این کاهش غلظت به دو دلیل روی می‌دهد. اول اینکه با افزایش درصد FGR غلظت اکسیژن ورودی کاهش می‌یابد که این عامل باعث می‌شود میزان این گونه کاهش یافته و ضمن تأثیر بر سینتیک بنیادی واکنش تولید NO_x ، نرخ تولید آن را نیز کاهش دهد. علاوه بر این از آنجا واکنش تشکیل NO_x به شدت به دمای احتراق وابسته می‌باشد و با افزایش میزان گازهای خروجی برگشتی

ماکزیم دمای شعله کاهش می‌یابد و در نتیجه انتشار این آلاینده را کاهش می‌دهد. با توجه به نمودار مشاهده می‌شود که در دبی ورودی $3/5 \text{ m}^3/\text{min}$ غلظت انتشار NO_x در حالت بدون FGR از 93 ppm به 80 ppm در حالت 30% درصد FGR کاهش یافته است که کاهش حدود 14% را نشان می‌دهد. همچنین در دبی‌های ورودی $4/5 \text{ m}^3/\text{min}$ و $5/5 \text{ m}^3/\text{min}$ نیز با افزایش درصد FGR از صفر تا 30% درصد به ترتیب $12/22\%$ درصد و $15/9\%$ درصد کاهش انتشار NO_x ملاحظه می‌گردد.



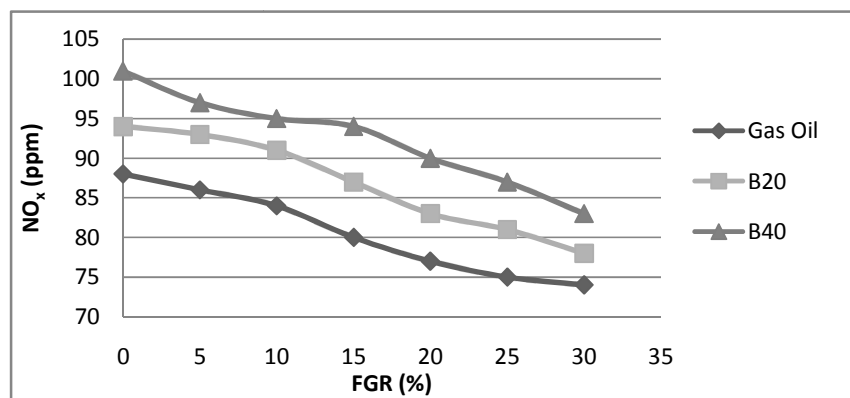
نمودار ۴- تأثیر درصدهای مختلف FGR بر انتشار NO_x در احتراق گازوئیل برای دبی‌های ورودی مختلف

یکی از اصلی‌ترین تفاوت‌های بیودیزل با سایر سوخت‌های فسیلی در میزان اکسیژن موجود در آن می‌باشد. برخلاف گازوئیل که در محتوای آن اکسیژن موجود نمی‌باشد بیودیزل حاوی 10% تا 12% درصد وزنی اکسیژن است. نمودار ۵ نتایج آزمایشگاهی تأثیر استفاده از سوخت بیودیزل بر روی دمای گازهای خروجی حاصل از احتراق برای درصدهای مختلف FGR و در دبی ثابت $5/5 \text{ m}^3/\text{min}$ را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود با افزایش درصد حجمی سوخت بیودیزل از 0% تا 40% درصد، دمای گازهای حاصل از احتراق افزایش می‌یابد. زنجیره طولیل هیدروکربنی بیودیزل و وجود اکسیژن در مخلوط سوختی منجر به بهبود احتراق، افزایش راندمان حرارتی و در نتیجه افزایش دما می‌شود. همچنین باید توجه داشت که نقطه اشتعال بیودیزل نسبت به گازوئیل بالاتر بوده و در نتیجه سبب افزایش دمای گازهای خروجی می‌گردد. از طرف دیگر ملاحظه می‌گردد که با افزایش میزان گازهای برگشتی و درصد FGR دمای گازهای خروجی روند نزولی دارد. ماکزیم دمای گازهای خروجی برای احتراق گازوئیل 1007°C می‌باشد و برای احتراق بیودیزل B20 و B40 به 1035°C و 1072°C رسیده است که به ترتیب حدود 3% و 6% درصد افزایش یافته است.



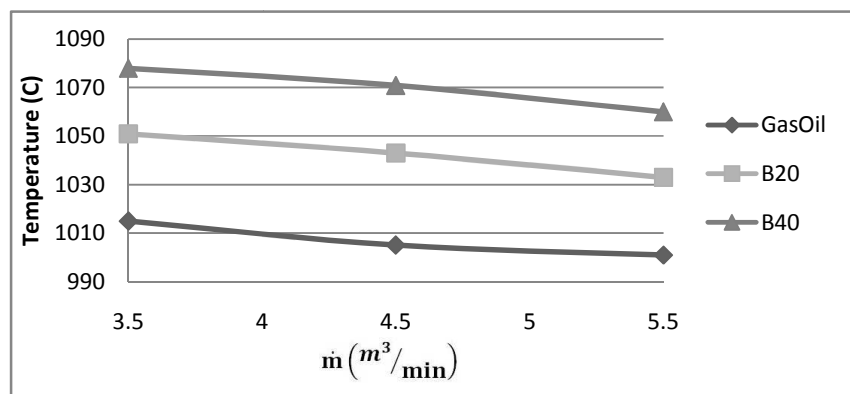
نمودار ۵- نتایج آزمایشگاهی تأثیر استفاده از بیودیزل بر دمای گازهای خروجی در دبی ثابت $5/5 \text{ m}^3/\text{min}$

نیترژن یک گاز بی‌اثر می‌باشد و تا دمای 1100°C بدون واکنش باقی می‌ماند ولی در دماهای بالاتر بی‌اثر نمانده، وارد واکنش شیمیایی با اکسیژن موجود در محفظه شده و تشکیل اکسیدهای ازت می‌دهد. از طرفی مکانیزم غالب در تولید آلاینده NO_x بویژه در دماهای بالا مکانیزم حرارتی زلدوویچ می‌باشد. اثر استفاده از سوخت بیودیزل بر تولید آلاینده NO_x در درصدهای مختلف FGR و در دبی ثابت $5/5 \text{ m}^3/\text{min}$ در نمودار ۶ نشان داده شده است. دمای بالاتر احتراق بیودیزل نسبت به گازوئیل و حضور اکسیژن در سوخت بیودیزل از مهم‌ترین دلایل افزایش NO_x در هنگام استفاده از سوخت بیودیزل می‌باشند. عدد ستان بیودیزل بیشتر از گازوئیل می‌باشد، لذا انتظار می‌رود که احتراق بهبود یافته و انتشار آلاینده NO_x کاهش یابد. ولی انتشار آلاینده NO_x افزایش می‌یابد زیرا خواص ترموفیزیکی بیودیزل مانند چگالی که بر روی خواص سوخت تأثیرگذار است، موجب افزایش انتشار این آلاینده می‌شود. مقدار ماکزیمم آلاینده NO_x در حالت بدون FGR در احتراق گازوئیل 88 ppm می‌باشد که در احتراق بیودیزل B20 این مقدار به 94 ppm و در احتراق بیودیزل B40 به 101 ppm رسیده است. نمودار زیر نشان می‌دهد که با افزایش درصد FGR از صفر تا 30% درصد میزان انتشار NO_x حاصل از احتراق گازوئیل، B20 و B40 به ترتیب حدود 16% ، 17% و 18% درصد کاهش یافته است.



نمودار ۶- نتایج آزمایشگاهی تأثیر استفاده از بیودیزل بر انتشار NO_x در دبی ثابت $5/5 \text{ m}^3/\text{min}$

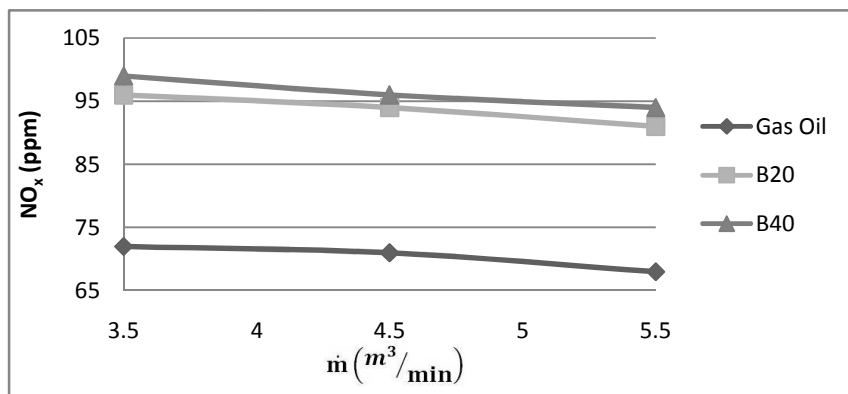
در این قسمت به بررسی تأثیر تغییر دبی مخلوط هوا و گازهای برگشتی بر محصولات احتراق بیودیزل و گازوئیل پرداخته می‌شود. نتایج برای درصد FGR ثابت 10% درصد نشان داده شده است. نمودار ۷ نتایج آزمایشگاهی تأثیر افزایش دبی مخلوط هوا و گازهای برگشتی بر دمای محفظه احتراق در فاصله 30 cm از انتهای کوره حاصل از احتراق گازوئیل، B20 و B40 در 10% درصد FGR را نشان می‌دهد.



نمودار ۷- نتایج آزمایشگاهی تأثیر تغییر دبی مخلوط هوا و گازهای خروجی بر دمای محفظه احتراق در 10% درصد FGR

با افزایش دبی ورودی و در نتیجه افزایش هوای اضافی دما کاهش می‌یابد. در این شرایط هوای اضافی مانند یک چاه حرارتی عمل کرده و دمای گازهای حاصل از احتراق را کاهش می‌دهد. علاوه بر این، افزایش نسبت هوای اضافی از دید سرعت گازهای احتراق را به همراه دارد که این امر زمان ماند گازها در محفظه احتراق برای انجام احتراق کامل را کاهش می‌دهد. با توجه به نمودار مشاهده می‌شود که با افزایش دبی ورودی از $3/5 \text{ m}^3/\text{min}$ تا $5/5 \text{ m}^3/\text{min}$ برای سوخت‌های گازوئیل، B20 و B40 دمای گازها در نزدیکی خروجی کوره حدود ۲ درصد کاهش می‌یابد. از طرف دیگر ملاحظه می‌گردد در همه دبی‌های ورودی، افزایش میزان بیودیزل در سوخت از صفر تا ۴۰ درصد سبب افزایش دمای داخل کوره می‌شود.

با توجه به نمودار ۸ ملاحظه می‌گردد که با افزایش دبی ورودی میزان انتشار NO_x کاهش یافته است. از آنجا که واکنش تشکیل NO_x به شدت به دما وابسته است، با افزایش دبی ورودی میزان اکسیژن ورودی جهت احتراق نیز افزایش یافته و در نتیجه احتراق کامل تر صورت می‌پذیرد. در این حالت دمای محفظه احتراق کاهش می‌یابد و در نتیجه میزان تولید NO_x روند نزولی پیدا می‌کند. با توجه به نمودار ۸ مشاهده می‌شود که افزایش دبی ورودی از $3/5 \text{ m}^3/\text{min}$ به $5/5 \text{ m}^3/\text{min}$ سبب کاهش انتشار NO_x برای سوخت‌های گازوئیل به میزان ۵/۵ درصد و برای سوخت‌های B20 و B40 حدود ۵ درصد می‌گردد. از طرف دیگر مشاهده می‌شود که با اضافه شدن میزان بیودیزل به گازوئیل از صفر تا ۴۰ درصد میزان انتشار NO_x افزایش یافته است. به عنوان مثال در دبی ورودی $3/5 \text{ m}^3/\text{min}$ با استفاده از سوخت B20 و B40 به ترتیب حدود ۳۳ و ۳۷ درصد افزایش انتشار آلاینده NO_x ملاحظه می‌گردد.



نمودار ۸- نتایج آزمایشگاهی تأثیر تغییر دبی مخلوط هوا و گازهای خروجی بر تشکیل آلاینده NO_x در ۱۰ درصد FGR

۵- نتیجه گیری

نتایج آزمایشگاهی دما و آلاینده NO_x حاصل از احتراق مخلوط سوخت مایع بیودیزل و گازوئیل در یک کوره با مشخصات هندسی طول $1/8 \text{ m}$ و قطر $0/32 \text{ m}$ مورد بررسی قرار گرفت. همچنین اثر تغییر درصد FGR و تغییر دبی مخلوط هوا و گازهای برگشتی بر دما و تولید آلاینده NO_x حاصل از احتراق مورد تجزیه و تحلیل واقع شده‌اند. ملاحظه گردید که در احتراق بیودیزل و گازوئیل، در همه دبی‌های ورودی، با افزایش درصد FGR از صفر تا ۳۰ درصد، دمای محفظه احتراق به طور متوسط ۲۰ درجه و میزان انتشار آلاینده NO_x حدود ۱۷ درصد کاهش می‌یابد. از طرف دیگر، در حالت بدون FGR و دبی $5/5 \text{ m}^3/\text{min}$ ، با افزایش درصد حجمی بیودیزل خالص از ۰ تا ۴۰ درصد در مخلوط سوخت، دمای گازهای حاصل از احتراق برای B20 و B40 به ترتیب ۲۸ و ۶۵ درجه افزایش می‌یابد. در این حالت انتشار آلاینده NO_x نیز با افزودن بیودیزل به گازوئیل، برای B20 و B40 به ترتیب ۷ و ۱۵ درصد افزایش می‌یابد. علاوه بر این با افزایش دبی مخلوط گازهای برگشتی و هوا، دمای گازهای خروجی و انتشار آلاینده NO_x کاهش می‌یابد.

۶- مراجع

- [1] Demirbas, A. "Biofuels Securing the Plant's Future Energy Needs", *Green Energy and Technology*, pp.156-223, 2009.
- [2] Demirbas, A. "Biodiesel: A realistic fuel alternative for diesel engines", *Springer*, London, 2008.
- [۳] س. م. مرتضوی، و ز. هاشمی، فن آوری هسته ای و نقش آن در ایجاد بستری مناسب برای توسعه پایدار، شرکت انتشارات علمی و فرهنگی. صفحه ۸۸، ۱۳۸۵.
- [4] Karaosmanoglu, F., Aksoy, H.A., "The phase separation problem of gasoline-ethanol mixture as motor fuel alternatives", *Thermal Sci Technol* 11, pp.49-52, 1988.
- [5] Kemp, D., "National Standards for Biodiesel-Discussion Paper", Department of the Environment and Heritage, pp.12-103, 2003.
- [۶] زنوزی، علی، قبادیان، برات، "مقایسه بیودیزل تولیدی به عنوان انرژی تجدیدپذیر از چهار روغن خوراکی"، ششمین همایش ملی انرژی، تهران، ۱۳۸۶.
- [7] Keskin, A., "Biodiesel production from Free Fatty Acids obtained with Neutralization of the Crude Glycerin", *International Journal of ENERGY SOURCES*, Vol. 27, pp.17-24, 2005.
- [8] <http://www.jamejamonline.ir>.
- [9] Haagen-Smith, A. J., "Chemistry and Physiology of Los Angeles Smog", *Industrial Engineering Chemistry*, Vol.44, pp.1342-1346, 1952.
- [10] Seinfeld, J. H., "Atmospheric Chemistry and Physics of Air Pollution", John Wiley & Sons, New York, 1986.
- [11] Bowman, C. T., "Control of Combustion-Generated Nitrogen Oxide Emissions: Technology Driven by Regulations," Twenty-Fourth Symposium (International) on Combustion, The combustion Institute, Pittsburg, PA, pp.859-879, 1992.
- [12] Turns, S. R., "An introduction to combustion: concepts and applications", 2nd ed., McGraw-Hill, 2000.
- [13] Saka S., Kusdiana D., "Biodiesel fuel from rapeseed oil as prepared in supercritical methanol", *Fuel*, Vol.80, pp. 225-231, 2001.
- [14] Jon Van Gerpen, "Biodiesel processing and production", *Fuel Processing Technology*, Vol.86, pp.1097-1107, 2005
- [15] Hernando J et al, 2007, "Biodiesel and FAME synthesis assisted by microwaves: Homogeneous batch and flow processes", *Fuel*, Vol.86, pp.1641-1644.
- [16] Houfang Lu, Yingying Liu, Hui Zhou, Ying Yang, Mingyan Chen, Bin Liang, "Production of biodiesel from jatorpha curcas L.oil", *Computers and Chemical Engineering*, Vol.33, pp.1091-1096, 2009.
- [17] Chisti, Y. "Biodiesel from Microalgae", In *Biothecology Advances*, Vol. 25, pp.294-307, 2007.
- [18] Baltasar, J., Carvalho, M.G., Coelho, P., "Flue gas recirculation in a gas-fired laboratory furnace: measurements and modeling", *Fuel*, Vol.76, pp.919-929, 1997.
- [19] Webster, T., "Burner technology for single digit NO_x emissions in boiler applications", CIBO NO_x control XIV conference, 2001.
- [20] Matsumoto, R., Ozawa, M., Terada, S., Lio, T., "Low No_x combustion of DME by means of Flue Gas Recirculation", *Fuel*, Vol.85, pp.112-120, 2006.
- [21] Ying, W., Longbao, Z., "Experimental study on exhaust emissions from a multi-cylinder DME engine operating with EGR and oxidation catalyst", *Applied Thermal Engineering*, Vol.28, pp.1589-1595, 2008.
- [22] Roy, M.M., Najmul Hoque, S.M., "Use of exhaust gas recirculation (EGR) and cyclonic separator for simultaneous NO_x and PM reduction in DI diesel engines", *Journal of Petroleum and Gas Engineering*, Vol.23, pp.54-63, 2011.
- [۲۳] ک. بشیرنژاد، اندازه گیری و شبیه سازی اثر زاویه پاشش سوخت و شدت چرخش هوای ورودی بر تشکیل دوده و دوده صنعتی، دانشکده مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، پایان نامه دکتری، ۱۳۸۶.