

بررسی و تحلیل تجربی خواص احتراق و ویژگی های فیزیکوشیمیایی نانوسوخت ها با استفاده از مکمل های نانوساختار هیبریدی

سید امیرحسین زهمیان* (دانشیار)

سهیل رضازاده منفردنیا (کارشناس)

محمدرضا بازوکی (کارشناس)

محمد بازوکی (استاد)

پژوهشگاه مواد و انرژی، گروه پژوهشی انرژی خورشیدی

مهندسی مکانیک شریف (بهار ۱۴۰۲)
دوره ۳-۳۹، شماره ۱، ص. ۶۷-۵۵ (پژوهشی)

افزودنی های نانوساختار کاربرد گسترده ای در صنایع مختلف به ویژه نیروگاه ها دارند و باعث کاهش مصرف ویژه سوخت^۱ و همچنین کاهش انتشار آلاینده ها می شوند. در این مطالعه، نانوذرات هیبریدی در سوخت های مازوت و دیزل پراکنده شده اند و ویژگی های فیزیکوشیمیایی نانوسوخت های ساخته شده بررسی شده اند. نتایج نشان داد که شدت ارزش حرارتی نانوسوخت پایه مازوت و پایه دیزل به ترتیب نسبت به سوخت های خالص مازوت و دیزل به میزان ۱۳/۴۱٪ و ۱۴/۰۲٪ بهبود پیدا کرده اند. بنابراین، نانوذرات اکسید فلزی و نانولوله های کربنی چنددیواره تأثیر قابل ملاحظه ای بر ویژگی های احتراقی سوخت دارند. به طور کلی، نمونه های بهینه ای نانوسوخت بر پایه مازوت و دیزل همه ویژگی های یک سوخت ایده آل برای استفاده در فرایند احتراقی را دارند و می توانند جایگزین مناسبی برای سوخت های مازوت و دیزل خالص باشند.

واژگان کلیدی: نانوسوخت، نانوذریل، نانوساختار هیبریدی، نانومازوت، احتراق.

azamzamian@merc.ac.ir
srezazadeh69@gmail.com
pazoukim.reza@gmail.com
m.pazouki@merc.ac.ir

۱. مقدمه

سده بیست و یکم میلادی پررنگ شده است که به انجام پژوهش های متعددی در این زمینه منجر شده که البته اکثر قریب به اتفاق آنها در مقیاس آزمایشگاهی و یا پیلوت کوچک مقیاس بوده اند. از میان کاربردهای یاد شده برای نانوسوخت ها، موتورهای درون سوز تراکمی که اساس دیزل - ژنراتورها را تشکیل می دهند، موتورهای درون سوز توربینی (اساس کار توربین های گازی نیروگاهی) و سامانه های چرخه بخار در صنعت برق کاربرد دارند و دیگر کاربردها موضوعیتی برای این مطالعه ندارند. تاکنون مطالعات مربوط به بررسی جامع جنبه های احتراق و پایداری نانوذرات مختلف پایه فلزی و اثر افزودن و معلق سازی آنها در مخلوط سوخت های دیزل و بیودیزل توسط موتور احتراق تراکمی در طول ۵ ساله اخیر انجام شده است.^[۱] در دو دهه گذشته، کاربرد و استفاده از منابع سوخت پایه بیودیزل در موتورهای دیزلی، به دلیل مزایای مختلف زیست محیطی و اقتصادی آن ارجحیت یافته است. زمینه های زیادی برای بهبود در عملکرد و کاهش انتشار آلاینده ها با بیودیزل به عنوان سوخت پایه وجود دارد. در سال های اخیر، استفاده از نانوذرات نیز به عنوان

افزودنی های نانوساختار از دو دهه ی پیش کاربرد گسترده ای در صنایع گوناگون پیدا کرده اند؛ از جمله برای افزایش سرعت واکنش در راکتورهای شیمیایی، بهبود گیرایش و چسبندگی در کمپوزیت ها، بهبود ویژگی های مکانیکی و استحکام در فرآورده های جامد، افزایش اثرگذاری در کاتالیست ها و بهبود ویژگی های ترمودینامیکی در سیالات مورد استفاده قرار می گیرند. در صنایع نیروگاهی به دلیل افزایش روزافزون مصرف سوخت های فسیلی با هدف پاسخگویی به تقاضای روزافزون انرژی الکتریکی، که با افزایش انتشار آلاینده ها و تسریع روند پدیده ی اثر گلخانه ای همراه بوده است، توجه به تأثیر افزودنی های نانوساختار بر کاهش مصرف ویژه سوخت (سوخت مصرفی به ازای واحد تولید انرژی الکتریکی) و نیز بر کاهش پیدایش آلاینده ها در سامانه های تبدیل انرژی نیروگاهی (موتورژنراتورها، بویلرها و توربین های گاز) از آغاز

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴/۱۴/۱۴، اصلاحیه ۱۴/۰۵/۱۴، پذیرش ۱۴/۰۵/۲۳/۱۴.

DOI:10.24200/J40.2022.60630.1645

استاد به این مقاله:

زهمیان، سید امیرحسین، رضازاده منفردنیا، سهیل، بازوکی، محمدرضا و بازوکی، محمد (۲۰۱۴). «بررسی و تحلیل تجربی خواص احتراق و ویژگی های فیزیکوشیمیایی نانوسوختها با استفاده از مکمل های نانوساختار هیبریدی»، مهندسی مکانیک شریف، (۱) ۳۹-۳، ص. ۶۷-۵۵

نانوافزودنی در گازوتیل، خواص حرارتی فیزیکی مانند نسبت سطح به حجم بالا، قابلیت هدایت حرارتی و انتشار جرم را هنگامی که در هر محیط سیال پایه پراکنده می‌شوند، بهبود می‌بخشد. بر اساس نتایج موجود در مرور ادبیات منابع، مشخص شده است که نانوافزودنی‌ها با گازوتیل، بیودیزل و مخلوط‌ها، بسته به غلظت افزودنی‌های نانوسیال، نقطه‌ی اشتعال^۲، نقطه‌ی آتش^۳، گرانروی سینماتیکی و سایر خواص را بهبود می‌بخشند. در پژوهش‌های انجام شده تأثیر پراکندگی نانوافزودنی‌های مختلف بر عملکرد و ویژگی‌های انتشار موتور احتراق دیزل به عنوان یک موتور احتراق فشرده یا تراکمی با نسبت تراکم بالا است که با سوخت پایه‌ی مخلوط دیزل و بیودیزل است و مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است.^[۱] پیشینه‌ی کاربرد افزودنی‌های نانوساختار به سوخت‌های مایع به پایان سده بیستم و آغاز دهه‌ی ۲۰۰۰ میلادی بازمی‌گردد که نانو ذرات متنوعی به وسیله‌ی پژوهش‌گران و دانشمندان با هدف بهبود ویژگی‌های احتراقی سوخت، بهبود شاخص‌های عملکردی موتور‌ها یا سامانه‌های حرارتی تبدیل انرژی و کاهش انتشار آلاینده‌ها به کار گرفته شدند؛ به عنوان مثال تأثیر مواد افزودنی سوخت بر تشکیل کربن در طی احتراق نشان داده که افزودنی سوخت فرسوس^۴ منجر به تشکیل هسته‌های تراکم در ناحیه‌ی احتراق قبل از تشکیل ذرات کربنی می‌شود. هسته‌های تراکم به احتمال زیاد اکسیدهای آهن هستند. ماده‌ی کربنی ترجیحاً در سطح هسته‌های اکسید آهن متراکم می‌شود، جایی که در آخرین مرحله احتراق می‌سوزد.^[۳] بنیادی‌ترین شاخص‌هایی که در پژوهش‌های انجام شده بر روی سوخت‌های مایع با افزودنی‌های نانوساختار مد نظر قرار گرفتند، قدرت مؤثر خروجی موتور، مصرف ویژه سوخت، بازدهی احتراق و میزان تغییرات در نرخ انتشار آلاینده‌ها بوده‌اند. بخش عمده‌ی پژوهش‌های انجام شده روی افزودنی‌های نانوساختار به سوخت‌ها، افزایش فعالیت کاتالیتیکی در حین فرایند احتراق و دستیابی به کارایی بهتر در احتراق نانوسوخت‌ها را تأیید کردند؛ اما یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های پیش روی نانوسوخت‌ها، تمایل نانوذرات به چسبیدن به هم و تجمع در اثر سطح ویژه بالا و فعالیت زیاد سطحی بوده است که این خود منجر به پدیدار شدن لخته‌ها در نانوسوخت و گاهی انسداد مجراها و روزه‌های انتقال یا پاشش سوخت خواهد شد. بررسی میزان کاهش اکسیدهای ازت از NO به گاز نیتروژن N₂ با واکنش با آهن در فضای غنی از سوخت و محیط اکسیداسیون صورت گرفته که به دلیل محدودیت انتشار اکسیدهای نیتروژن (NO_x) از محفظه‌های احتراق ثابت هنوز یک موضوع مهم در زمینه‌ی حفاظت از محیط زیست طبیعی است. چند جنبه‌ی جدید از تحقیقات توصیف استفاده از آهن به عنوان یک افزودنی که بر کاهش NO_x در درجه حرارت‌های بالا تأثیر می‌گذارد، تاکنون ارائه شده است.^[۴] بررسی‌های تجربی همچنین برای ویژگی‌های رئولوژیکی نانوذرات اکسید تیتانیوم (TiO₂) معلق در مخلوط سوخت دیزل و بیودیزل حاصل از استحصال روغن از گیاه درختچه‌ی افاقیا یا صمغ عربی با نام علمی آکاسیا^۵ برای استفاده در موتور احتراق تراکمی انجام شده است.^[۵] بهبود خواص سوخت پایه‌ی دیزل با استفاده از مواد افزودنی نیز انجام شده که در این تحقیق، ترکیبات آلی فلزات منگنز، منیزیم، مس و کلسیم سنتز شدند و محلول‌های آنها به عنوان افزودنی سوخت دیزل مورد استفاده قرار گرفته است. مواد افزودنی که بیشترین کاهش در نقطه‌ی انجماد سوخت دیزل، میزان بهینه‌ی دوز آن و سایر اثرات عملکردی را به دست آوردند مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج نشان داد که منگنز پایه آلی بیشترین کاهش را در نقطه‌ی انجماد داشته است. از طرفی مشخص شد که عدد ستان سوخت دیزل بدون افزودنی ۴۶/۲۲ و عدد ستان برای سوخت دیزل با مقدار بهینه‌ی غلظت ۴۸/۲۴ است. لذا مشاهده شد که منگنز پایه آلی سبب کاهش گرانروی و نقطه‌ی اشتعال می‌شود و محتویات گازهای خروجی را بهبود می‌بخشد.^[۶] بررسی چندین پژوهش و نتایج مطالعات در دسترس نشان داده که

نانوذرات فلزی و غیرفلزی هر دو در ساختن نانوسوخت‌ها به کار گرفته شده‌اند که از میان نانوذرات پایه فلزی، این فلزات یا ترکیبات آنها (همچون اکسیدهای فلزی) بیشتر به چشم می‌خورد: آهن (Fe)، آلومینیوم (Al)، مس (Cu)، منگنز (Mn)، بر (B)، پلاتین (Pt)، بریلیم (Be)، تیتانیوم (Ti)، روی (Zn)، نیکل (Ni) و سریم (Ce) همچنین از میان نانوذرات غیرفلزی می‌توان به این موارد برجسته اشاره کرد: کربن (C) در شکل‌های گوناگون به ویژه نانولوله‌ها، انواع کانی‌های رسی، مواد آلی همچون گلیسرین و پلی‌اتوکسی استر و ذرات ترکیبی یا نانومواد هیبریدی^۶ ملاحظه شده است.^[۷-۱۳]

این مطالعه با هدف صرفه‌جویی در سوخت مصرفی نیروگاه‌ها انجام شده است. مطالعات کتابخانه‌ی بیش از ۵۰ مورد پژوهش بر روی یافته‌ها و دستاوردهای مربوط به افزودن مواد نانوساختار به سوخت‌های پایه مایع که در اکثر موارد افزودنی‌های نانوساختار به بهبود بازده حرارتی دستگاه‌های تبدیل انرژی و کاهش مصرف ویژه سوخت انجامیده و همچنین اثر مثبتی بر کاهش انتشار آلاینده‌ها داشته‌اند. در این پژوهش، هدف اصلی در واقع ساخت چرخه‌های احتراقی - حرارتی و بررسی پارامترهای حرارتی است که بتواند از نظر ساختار سوختی مواد تولیدی را مورد تأیید قرار دهد. تأیید پارامترها برای انتخاب نمونه‌های نهایی به منظور استفاده در محفظه‌ی احتراقی و بویلرهای نیروگاهی از موارد حائز اهمیت بوده است.

۲. افزودنی‌های نانوساختار

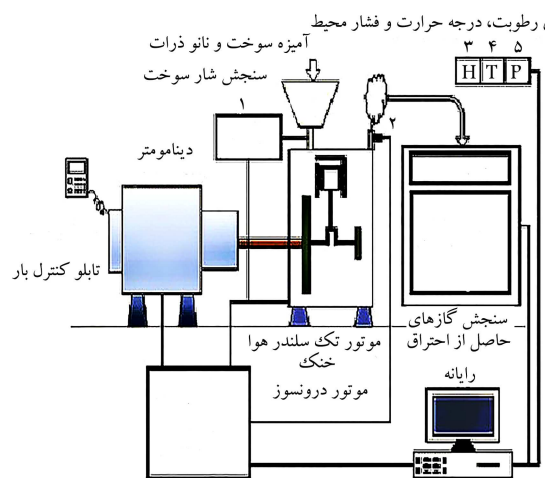
در بررسی نانوسوخت‌های مایع، دسته‌بندی‌های متعددی از جهت نوع سوخت به کار رفته در تجهیز - به عنوان مثال سوخت فسیلی یا سوخت زیستی - و همچنین نوع تجهیز استفاده شده - مانند موتورهای درون‌سوز یا بویلرها - وجود دارند. در این قسمت تمرکز بر امکان‌سنجی استفاده از نانوذرات در سوخت فسیلی دیزل در موتورهای درون‌سوز به منظور بهبود کیفیت سوخت است. موتور و چرخه ترمودینامیکی دیزل به دلیل بازدهی بالاتر نسبت به سایر چرخه‌های ترمودینامیکی و همچنین انعطاف‌پذیری بالا نسبت به نوع سوخت، همواره عضو جدانابذیر تجهیزات تولید برق بوده است. به دلیل انعطاف‌پذیری موتور در قبال نوع سوخت، می‌توان سعی بر تهیه سوختی با راندمان بالاتر و کیفیت مطلوب‌تر بدون ایجاد تغییر در نوع موتور دیزل داشت. از جمله مهم‌ترین و مورد توجه‌ترین سوخت‌هایی که به عنوان جایگزین سوخت دیزل معرفی می‌شوند، سوخت‌های زیستی مختلف موسوم به بیودیزل هستند. این سوخت‌ها از زیست توده^۷ تهیه می‌شوند که نه تنها مواد اولیه‌ی آنها تجدیدپذیر است، بلکه به دلیل کم‌تر سمی بودن نسبت به مواد نفتی، ارجحیت دارند. مطالعات گسترده‌ی در دنیا برای تهیه این سوخت‌ها و استفاده از آنها در موتور دیزل انجام شده است. این نوع سوخت‌ها معمولاً دارای عدد ستان^۸ بالاتر نسبت به سوخت دیزل هستند و به خوبی با موتور دیزل انطباق‌پذیرند. به دلیل بالا بودن عدد ستان با بازدهی بالا در موتور احتراق می‌سوزند و چون واکنش احتراق بهتر انجام می‌شود، انتشار آلاینده‌های مضر که محصول احتراق ناقص در موتور هستند کاهش قابل ملاحظه‌ی خواهد یافت. از جمله‌ی این آلاینده‌های مضر می‌توان به کربن منوکسید و هیدروکربن‌های نسوخته^۹ و دوده اشاره کرد. همچنین به دلیل داشتن گرانروی بالا و طبیعت روغنی این نوع سوخت، عملیات روان‌کاری^{۱۰} در موتور بهتر انجام می‌گیرد که در نهایت استفاده از آنها منجر به افزایش کارایی موتور دیزل خواهد شد. بخش اعظم تجارب به دست آمده مربوط به کاربرد افزودنی‌های نانوساختار به سوخت‌های زیستی (عمدتاً بیودیزل) بوده است اما پژوهش‌های متعددی نیز روی سوخت‌های مایع فسیلی -

نانو ذرات آلومینا از نوع گاما^{۱۸} از بازه اندازه ذرات ۴۳-۲۷ نانومتر و نانوذرات اکسید تیتانیوم (TiO₂) از بازه اندازه ذرات ۵۰-۳۰ نانومتر برخوردار بودند. نانوسوخت مورد استفاده از آمیزش مستقیم نانوذرات در غلظت مشخص شده با نفت گاز ساخته شد و به مدت یک ساعت در فرکانس ۴۰ کیلوهرتز در برابر امواج فراصوت (فراصوتی) عمل آوری شد. به این ترتیب درجه حرارت گازهای حاصل از فرایند احتراق در دودکش با افزایش غلظت نانوذرات افزوده، نسبت به احتراق نفت گاز خالص کاهش نشان داد و این کاهش در حالت استفاده از نانوذرات آلومینا چشمگیرتر بوده است.

چنان که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، اثر کاربرد نانوذرات بر کاهش انتشار منوکسیدکربن چشمگیر بوده اما بر غلظت اکسیدهای نیتروژن تأثیر محسوسی نداشته؛ و نیز به دلیل ناپدید شدن غلظت اکسید گوگرد در گاز دودکش (با توجه به پایین بودن غلظت گوگرد در نفت گاز مصرفی، در ایران غلظت گوگرد در نفت گاز اغلب بالاست) امکان داوری درباره‌ی اثر نانوذرات افزوده بر تغییر غلظت SO₂ فراهم نبوده است. میزان تغییر بازده حرارتی احتراق نیز اندک بوده و در این پژوهش خاص نمی‌توان با صراحت گفت که کاربرد نانوذرات مورد اشاره سبب صرفه‌جویی در مصرف سوخت شده است. اما در یک اظهار نظر کلی می‌توان گفت که کاربرد نانوذرات اکسید آلومینیوم اثر بخشی بهتری نسبت به اکسید تیتانیوم داشته و با افزایش غلظت افزودنی نانوساختار در سوخت مصرفی، اثر بخشی‌ها پررنگ‌تر بوده است. اثرات افزودنی‌های نانوذرات به دیزل بر عملکرد احتراق و انتشار گازهای گلخانه‌ی دیگ بخار، در یک مطالعه‌ی تجربی ارائه شده که سوخت نانوذیزل با افزودن نانوذرات اکسید آلومینیوم (Al₂O₃) و اکسید تیتانیوم (TiO₂) تهیه شده است. اندازه‌گیری‌های عملکرد و انتشار گازهای گلخانه‌ی در لوله‌های شعله‌ی دیگ بخار معکوس مسکونی، آب خنک، انجام شده است.^[۱۵] کاهش منابع سوخت فسیلی و الزامات سخت‌گیرانه‌ی انتشار گازهای گلخانه‌ی، جست‌وجو برای بهبود عملکرد موتورهای دیزل و احتراق تمیزتر را جدی کرده است. اثرات افزودنی‌های مخلوط بیودیزل/دیزل بر عملکرد و انتشار موتورهای دیزلی به طور جامع در مطالعات مختلف بررسی شده است. افزودنی‌های بررسی شده به پنج دسته طبقه‌بندی شدند: افزودنی‌های اکسیژن‌دار، افزودنی‌های میتنی بر فلز و غیرفلز، آب، آنتی‌اکسیدان‌ها و افزودنی‌های میتنی بر پلیمر. اثرات هر دسته بر عملکرد موتور به عنوان مثال، مصرف سوخت ویژه ترمز و راندمان حرارتی ترمز و انتشار گازهای آلاینده‌ی حاصل از احتراق شامل CO، NO_x، هیدروکربورهای نسوخته (HC) و ذرات معلق به طور انحصاری مورد بحث قرار گرفته است. علاوه بر این، استراتژی‌های مختلف مورد استفاده برای افزودن آب، مانند امولسیون آب - دیزل، تزریق مستقیم آب و افزودن آب به میغولد^{۲۰} ورودی نشان داده شده و مزایا و معایب آنها به طور کامل مورد بررسی قرار گرفته است. در نهایت، فرصت‌ها و محدودیت‌های هر افزودنی با در نظر گرفتن عملکرد موتور و خوش‌خیم بودن احتراق برای هدایت تحقیق و توسعه‌ی آینده در این حوزه بیان خواهد شد.^[۱۶-۲۹] تجزیه و تحلیل انرژی، آگزوری و پایداری فرایند احتراق در یک موتور دیزل همراه با ۵ درصد آب به شکل امولسیون در سوخت پایه‌دیزل به صورت نانوسوخت هیبریدی بر پایه‌ی نانولوله‌ی کربنی استوانه‌ی با غلظت ۲۵ ppm و نیز نانوذرات آلومینا کروی با غلظت ۲۵ ppm به عنوان نانوافزودنی و به صورت تجربی بررسی شده است. نتایج تجربی نشان داده که استفاده از افزودنی نانو در آب در سوخت امولسیون دیزل باعث بهبود انرژی، پارامترهای عملکرد آگزوری و پایداری موتور می‌شود. بنابراین، نانوسوخت هیبریدی نانولوله‌ی کربنی و آلومینا دارای پتانسیل بالایی برای تبدیل شدن به یک سوخت معمولی جایگزین برای موتورهای دیزلی بدون هیچ‌گونه تغییرات در طراحی است.^[۳۰] لذا نانومواد خواص بسیار خوبی

معدنی از جمله نفت‌گاز (گازوئیل) و نفت کوره^{۱۱} (مازوت) به انجام رسیده‌اند. در بیشتر پژوهش‌های انجام گرفته، تلاش شده است که احتراق،^{۱۲} فشار شدن^{۱۳} و شعله‌ور شدن^{۱۴} سوخت‌های مایع آمیخته با نانوذرات بررسی و سنجیده شود. اما برخی دیگر بر عملکرد و کارایی سامانه‌ی حرارتی (موتور یا بویلر یا توربین) و انتشار آلاینده‌ها متمرکز بوده‌اند. علی‌رغم مزیت‌هایی که بیودیزل به عنوان سوخت جایگزین در چرخه‌ی دیزل دارد (در بالا به چند مورد از آنها اشاره شد)، استفاده از آنها به تنهایی در موتور دیزل با چالش‌هایی روبه‌روست. از جمله این چالش‌ها می‌توان به بالا بودن گرانیوی این نوع سوخت‌ها، چگالی بالاتر نسبت به سایر سوخت‌ها و نیز بالا رفتن مصرف سوخت موتور در صورت استفاده از آنها نام برد. چندین پژوهش روی اثر افزودنی‌های نانوساختار به سوخت نفت‌گاز (گازوئیل) و یا آمیزه‌ی نفت‌گاز - بیودیزل و سوخت‌های ترکیبی دیگر (همچون آمیزه نفت‌گاز - بیودیزل - اتانول موسوم به سوخت ترنری) بر عملکرد موتورهای درون‌سوز تراکمی^{۱۵} و میزان انتشار آلاینده‌ها انجام شده‌اند. سامانه تجربی بکارگرفته شده در این پژوهش شامل یک موتور درون‌سوز تراکمی (دیزل)، یک دینامومتر و یا مولد الکتریکی (ژنراتور) متصل به بار مصرف، آنالایزر گازهای احتراق، ابزارهای سنجش شدت جریان سوخت و شاخص‌های عملکردی و محیطی (از قبیل دما و رطوبت محیط، فشار سیلندر، توان موتور، گشتاور، دمای گاز احتراق) و ابزارهای ثبت داده‌ها بوده‌اند که نمونه‌ی از چیدمان چنین سامانه‌ی در شکل ۱ دیده می‌شود.

یک مطالعه تجربی در مورد اثرات نانوذرات اضافه شده به سوخت‌های دیزل بر عملکرد احتراق و انتشار گازهای آلاینده در یک لوله‌ی مشعل دیگ بخار توسط باهاتین توپال اوغلو و همکاران ایشان بلال سونگور و هاکان اوزجان در گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه اوندوکوز مایس شهر سامسون در کشور ترکیه انجام شده است.^[۱۵] این مطالعات نشان داده که کاربرد نانوسوخت بر کاهش غلظت منوکسید کربن در گازهای خروجی از دودکش اثر مثبتی گذاشته و بیشترین کاهش در غلظت منوکسید کربن با به کارگیری نانوسوخت آلومینیوم اکساید در غلظت ۳۰۰ ppm به دست آمده است. به این ترتیب در مطالعات انجام شده توسط بهاتین توپال اوغلو و همکاران^[۱۵] آنها همچنین ادعا کردند که بازدهی احتراق اندکی بهبود یافته و از ۹۰/۴٪ به ۹۰/۹٪ رسیده است؛ اما با نگرش به دقت اندازه‌گیری‌ها و درصد خطا که در مطالعه مقدار آن در محاسبه‌ی راندمان عملکرد احتراق ±۱٪ گزارش شده است، البته صحت این ادعا از دید معنادار بودن فرایند طراحی آماری آزمایشات^{۱۶} مورد تردید است. بویلر مورد استفاده از نوع دیگ با شعله‌ی واگشتی^{۱۷} بوده است.



شکل ۱. چیدمان سامانه سنجش اثر کاربرد نانوسوخت‌ها در موتور درون‌سوز تراکمی.

جدول ۱. چکیده یافته‌های کاربرد نفت‌گاز آمیخته با نانوذرات در بویلرهای خانگی. [۱۴]

نفت‌گاز با نانو ذرات		نفت‌گاز خالص	شاخص/متغیر ارزیابی شده
TiO ₂	Al ₂ O ₃		
۳۰۰	۳۰۰	۰	غلظت نانوذرات در سوخت (ppm)
۴۲,۵۱۵	۴۲,۵۳۰	۴۲,۵۱۳	ارزش گرمایی MJ/kg
۸۲۵,۸	۸۲۵,۹	۸۲۵	چگالی نسبی (kg/m ³)
۳,۴	۳,۴	۳,۵	گرانروی سینماتیک Viscosity mm ² /s
۵۱	۴۹	۵۲	نقطه اشتعال Flash point(°C)
تقریباً بدون تغییر	تقریباً بدون تغییر	۰,۸۶۶	نسبت جرمی کربن
تقریباً بدون تغییر	تقریباً بدون تغییر	۰,۱۳۳	نسبت جرمی هیدروژن
همانند	همانند	۵,۵	غلظت گوگرد (mg/kg)
۲۱۰	۷۵	۲۷۵	غلظت CO در گازهای احتراق ppm
۲۳۰,۳	۲۲۸,۴	۲۴۰,۵	دمای گاز احتراق در دودکش °C
۴۷	۵۱	۴۷	غلظت NO _x در گازهای احتراق ppm
< ۱	< ۱	< ۱	غلظت SO ₂ در گازهای احتراق ppm

یک سوخت از مهم‌ترین پارامترهای مربوط به سوخت‌هاست. برای اندازه‌گیری جریان گرما جهت فرایندهایی که در آب صورت می‌گیرد می‌توان از گرماسنج استفاده کرد. اگر واکنش گرماده باشد موجب گرم شدن آب و بالا رفتن دما و در واقع درجه حرارت آن خواهد شد؛ در واکنش‌های گرماگیر دمای آب کاهش می‌یابد. تعداد کالری‌ها یا میزان و مقدار انرژی حرارتی که از واکنش آزاد می‌شود، برابر با حاصل ضرب افزایش دما در ظرفیت کل گرماسنج و محتویات آن است که در ادامه معادلات محاسباتی کامل‌تری ارائه خواهد شد. این دستگاه یکی از مجموعه‌های آزمایشی برای بررسی و مطالعه‌ی تغییر رفتار احتراقی در شرایط مختلف است و امکان انجام آزمایشات مختلف روی سوخت‌های مختلف و طراحی شده را به ما می‌دهد. به طور کاملاً واضح می‌توان گفت که بمب کالری سنج وسیله‌ی بی‌بی‌بی است که به منظور تعیین گرما یا مقدار کالری در نمونه‌های سوخت جامد یا مایع و همچنین سوسپانسیون‌های سوختی کاملاً پایدار مانند نانوسوخت در حجم ثابت، به کار می‌رود. این دستگاه نمونه‌ی سوخت را به طور کامل سوزانده و گرمای حاصله را به جرم مشخص از آب منتقل می‌کند. با توجه به وزن نمونه سوخت و افزایش دمای آب، عدد کالری یا مقدار انرژی حاصل محاسبه می‌شود. عدد کالری در یک آزمایش بمب کالری سنج، بیان‌کننده‌ی گرمای حاصل از احتراق به ازای جرم واحد نمونه سوخت است. این گرما حاصل حرارت تولید شده هنگام سوختن نمونه، به علاوه‌ی گرمای گرفته شده از بخار آب تولید شده طی فرایندهای چگالش و خنک شدن تا دمای بمب است. لازم به ذکر است که تا نمونه‌های دستگاه تعیین ارزش حرارتی یا بمب کالری سنجی توسط شرکت‌های مختلف عرضه می‌شود، اما نمونه‌ی دستگاهی که کاملاً مطابق استانداردهای معتبر با حسگرهای با حساسیت بالاست به صورت سفارش طراحی ویژه در پروژه به کار گرفته شده است. برای طراحی و ساخت این دستگاه لازم است که بر اساس استانداردهای احتراقی و طراحی تجهیزات برای جلوگیری از حوادث اقدام شود و از این جهت بهتر است که این دستگاه توسط تکنسین‌های طراحی آماده‌سازی شود. اما نمونه‌های دستی طراحی شده نیز در

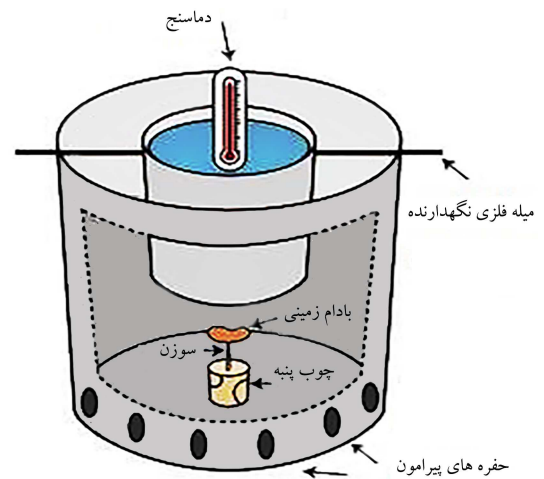
از خود نشان می‌دهد و به آنها اجازه می‌دهد تا به عنوان افزودنی‌های سوخت برای بهبود ویژگی‌های موتور دیزل عمل کنند. مطالعات سال‌های اخیر پتانسیل‌های منحصر به فرد نانومواد و فعالیت‌های آن‌ها در محفظه‌های احتراق و موتورهای دیزلی برای دستیابی به شرایط کاهش انتشار گازهای گلخانه‌یی مضر و عملکرد بهتر فرایند احتراق نشان داده شده است. اثرات سوخت‌های غنی شده با نانومواد هیبریدی بر ویژگی‌های احتراق و زیرسیستم‌های مربوط به احتراق و همچنین فرصت‌های مرتبط، شناسایی شده از نتایج آزمایش‌های به دست آمده در سال‌های اخیر، مورد بحث قرار گرفته‌اند. به این ترتیب بر اساس دو معیار، بهترین جفت‌های سوخت نانومواد پایه از مجموعه‌ی نانومواد که اغلب آزمایش شده‌اند، به عنوان افزودنی‌های سوخت در محفظه‌های احتراق یا موتورهای دیزل شناسایی شده‌اند. این امر با بررسی چالش‌های فنی نیز تاکنون در مطالعات دنبال شده است که برای اطمینان از دوام عملی نانومواد به عنوان افزودنی‌های سوخت عمل می‌کنند، مورد توجه و حل قرار خواهد گرفت. در نهایت، خطرات زیست‌محیطی و سلامت انسان، که طی تحقیقات سال‌های اخیر بروزشان آشکار شده، نیز بررسی و ملاحظه شده است. در صورت امکان، همچنین راه‌حل‌های بالقوه برای مشکلات برجسته نیز مورد بحث و بررسی قرار گرفته‌اند. [۲۱-۳۶]

۳. ساخت چرخه‌ی آزمون‌های احتراق

برای بررسی آزمایشگاهی نحوه‌ی احتراق هر سوخت لازم است بتوان چرخه‌ی دقیق و مؤثر و به صورت بسته در اندازه‌ی آزمایشگاهی و نیمه‌صنعتی تعریف کرد تا در عین حال بهترین دستاورد و تحلیل از روند تغییرات شرایط صورت گیرد. برای این آزمایش، بهترین دستگاه که در اندازه‌ی آزمایشگاهی و ابعاد نیمه‌صنعتی می‌توان طراحی و تدوین کرد، دستگاه بمب کالری سنج است. به دست آوردن ارزش حرارتی



شکل ۴. بمب کالری سنج تهیه شده در پژوهشگاه مواد و انرژی.



شکل ۲. شماتیک طراحی بمب کالری سنج ساده.



شکل ۳. نمونه های نیمه صنعتی بمب کالری سنج.

اولیه و پایانی (پس از پایان واکنش) را یادداشت می کنیم. ضرب تغییرات دما با جرم و ظرفیت گرمایی ویژه ی مایع، میزان انرژی خارج شده در طول واکنش (با فرض گرمازا بودن واکنش) را ارائه می دهد. تقسیم تغییرات انرژی به تعداد مول ها X که در واکنش حضور داشتند نیز، تغییرات آنتالپی واکنش را ارائه می دهد. از این شیوه در آموزش های اولیه ی آکادمیک برای توصیف نظریه ی گرماسنجی استفاده می شود. میزان گرمایی که توسط محفظه از بین می رود با ظرفیت گرمایی دماسنج و محفظه ی آن را در نظر نمی گیرند. به علاوه، نمونه یی که در داخل کالری سنج قرار می گیرد، انتقال گرما از نمونه به کالری سنج و به مایع و گرمای معادل جذب شده از کالری سنج و مایع با گرمای داده شده از فلز را نشان می دهد. چنان که اشاره شد تهیه ی دستگاه نمونه ی نیمه صنعتی از امتیاز خاصی برخوردار بوده است که دستگاه تهیه شده در پژوهشگاه مواد و انرژی با سفارش طراحی و ساخت اجزاء از شرکت معتبر رادمان صنعت انجام شده است (شکل ۴).

۲.۳. اجزای دستگاه

بمب گرماسنج یکی از بخش های مهم و اصلی دستگاه برای اندازه گیری خواص احتراقی است که به صورت کامل و مفصل اجزای آن تشریح و روند بارگذاری سوخت در آن بررسی خواهد شد. در کنار بمب گرماسنج، دستگاه از اجزای دیگری نیز ساخته شده است:

۱. محفظه ی آب دوجداره از جنس استیل ضد زنگ، دارای ورودی و خروجی آب؛
۲. همزن الکتریکی دارای یک میله و دو تیغه با سرعت گردش 500 ppm ؛
۳. محفظه ی بمب و محتویات شامل بوته یا فنجانک، میله های احتراق، وایر جرعه و سوپاپ اکسیژن از جنس استیل ضد زنگ؛
۴. جایگاه قرارگیری محفظه ی بمب برای باز و بسته کردن درب پیچی آن؛
۵. سیستم جرعه شامل سیستم تغذیه، اتصال وایر به بمب وایر جرعه و میله های احتراق؛
۶. حسگر الکترونیکی درجه حرارت با دقت 0.1° درجه ی سانتی گراد (دماسنج)؛
۷. کپسول اکسیژن و نازل تزریق هوا با صفحه فشارسنج؛
۸. سیستم الکترونیکی، صفحه تابلو ویژه و نرم افزار مخصوص برای ثبت اطلاعات و ترسیم نمودارها؛
۹. کلید روشن و خاموش کردن دستگاه؛

حد بسیار ساده موجود است که به صورت شماتیک در شکل ۲ نشان داده شده است.

این دستگاه های دست ساز صرفاً در جهت اندازه گیری مقدار کالری های دانه های مغز مورد استفاده قرار می گیرد که نمی تواند نمونه ی دقیقی از یک ساختار مورد اطمینان برای اندازه هدف مندی خواص احتراقی نانو سوخت ها در جهت رصد بهبود احتراق باشد. اما نمونه یی که در آزمایشات مدنظر مورد استفاده قرار گرفته است، نمونه ی نیمه صنعتی آن است که در آزمایشگاه انرژی های نوین خورشیدی پژوهشگاه مواد و انرژی تهیه شده و مورد استفاده قرار گرفته است. در شکل ۳ به انواع نیمه صنعتی و آزمایشگاهی این دستگاه اشاره شده است.

۱.۳. تعیین خواص احتراق توسط بمب کالری سنج

کالری سنج دستگاهی است که برای گرماسنجی، اندازه گیری دمای واکنش های شیمیایی و تغییرات فیزیکی و نیز ظرفیت گرمایی ویژه کاربرد دارد. معمول ترین انواع کالری سنج ها عبارت از: کالری سنج اسکن تفاضلی، کالری سنج هم دما (ایزوترمال)، کالری سنج سنجش حجمی (تیتراسیون) و کالری سنج افزایش دهنده ی آهنگ واکنش. کالری سنج های ساده تنها متشکل از یک دماسنج متصل به ظرف فلزی پر از آب است که در بالای محفظه ی احتراق قرار دارد. برای پیدا کردن آنتالپی تغییرات هر مول ماده A در واکنش با B ، مایعات به داخل کالری سنج ریخته شده و دمای

جدول ۲. مشخصات نفت کوره سنگین یا مازوت تهیه شده.

نتایج	خصوصیات
بیشینه ۱۸°	گرانروی سینماتیکی (در ۵۰°C)
کمینه ۶۳	نقطه اشتعال (°C)
کمینه بیشینه ۵	نقطه ریزش °C
بیشینه ۳/۰	میزان گوگرد (% وزنی)
بیشینه ۵/۰	میزان خاکستر (% وزنی)
بیشینه ۵/۰	میزان آب و ته‌نشینی (% حجمی)
کمینه ۴۲/۲	ارزش حرارتی (MJ/Kg)

جدول ۳. مشخصات گازوئیل تهیه شده.

نتایج	خصوصیات
۲/۱	گرانروی سینماتیکی (در ۵۰°C)
بیشینه ۵°	نقطه اشتعال (°C)
کمینه ۶	نقطه ریزش °C
بیشینه ۵/۰	میزان گوگرد (% وزنی)
بیشینه ۱/۰	میزان خاکستر (% وزنی)
بیشینه ۵/۰	میزان آب و ته‌نشینی (% حجمی)
کمینه ۴۲/۶۷	ارزش حرارتی (MJ/Kg)

۱۰. موتور برای به گردش درآوردن آب محفظه و یکسان‌سازی درجه حرارت؛

۱۱. قطعه‌ی دانگل ۲۱ برای برقراری ارتباط دستگاه با رایانه.

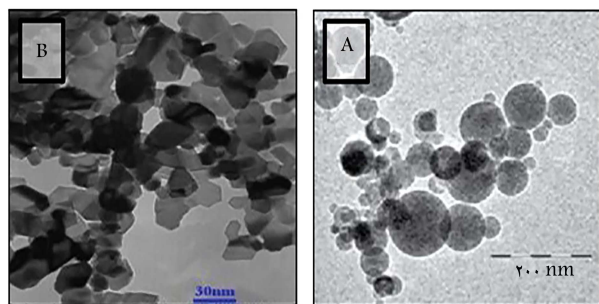
۴. تولید نانوسیالات پایه سوختی

۱.۴. مواد و روش‌های طراحی آزمایش

در این مطالعه چندین نمونه‌ی آزمایشگاهی تهیه شده و از این میان یک نمونه‌ی بهینه‌ی محصول نانوسوخت با پایه سوخت دیزل و همچنین مازوت معرفی شده است. تهیه‌ی نمونه‌های آزمایشگاهی به روش‌های مختلف مورد تحقیق و بررسی قرار گرفت و در انتها روش بهینه به منظور پراکنده‌سازی نانوذرات درون سوخت پایه دیزل و مازوت به کمک سیال کمکی، اختلاط سوخت دیزل با مازوت، مورد استفاده قرار گرفت. سوخت مازوت به کار رفته در این طرح با نام نفت کوره ۱۸° از پالایشگاه تهران تهیه شده است. خصوصیات مازوت تهیه شده در جدول ۲ قابل مشاهده است. همچنین سوخت دیزل به کار رفته در این آزمایش گازوئیل رایج مورد استفاده در خودروهای دیزلی موجود در مراکز سوخت‌رسانی است و از این مراکز تهیه شده است. اطلاعات درمورد خصوصیات فیزیکی و شیمیایی و ترمودینامیکی سوخت گازوئیل در جدول ۳ قابل مشاهده است.

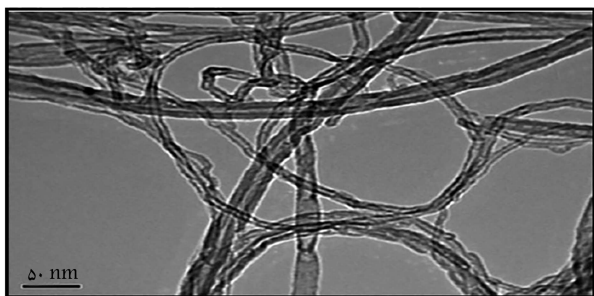
۵. مواد نانو ساختار یا نانوذرات

با توجه به مطالعات انجام شده در خصوص تأثیر نانوذرات مختلف بر متغیرهای عملکردی و آلاینده‌ها در این تحقیق از نانوذرات اکسید سریم و اکسید آلومینیوم به دلیل بالاترین فراوانی استفاده در پژوهش‌های پیشین و فراهم‌آوری سطح کاتالیستی مناسب و از نانولوله‌های کربنی چنددیواره برای افزایش محتوای کربن به منظور افزایش ارزش حرارتی به صورت هیبریدی برای سوخت‌های پایه مازوت استفاده

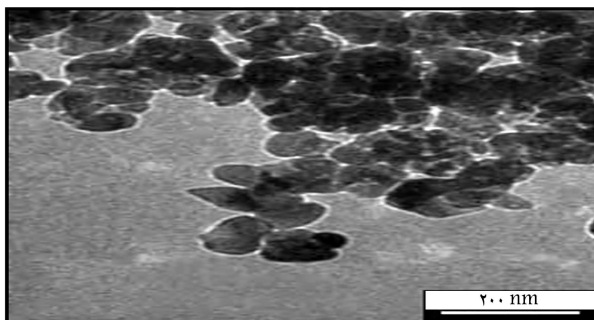


الف) اکسید آلومینیوم؛ ب) اکسید سریم.

شکل ۵. تصاویر TEM نانوذرات.



الف) نانو لوله دوجداره؛



ب) اکسید زیرکونیم.

شکل ۶. تصاویر TEM نانوذرات.

شده است. همچنین از اکسید زیرکونیم نیز در تهیه‌ی نانوسوخت هیبریدی به همراه نانوذرات نام برده شده استفاده شد. نمونه‌ی دیگر نیز از اکسید آلومینیوم به صورت تکی برای تهیه‌ی نانوسوخت مورد استفاده قرار گرفت تا تأثیر حضور نانوذرات به صورت تکی در غلظت‌های بالا مورد بررسی قرار گیرد.

نانوذرات اکسید سریم در ابعاد ۳۰-۱۰ نانومتر ساخت شرکت US-Nano محصول آمریکا است. اکسید آلومینیوم نیز در ابعاد ۴۰ نانومتری از شرکت Plasma Chem ساخت کشور آلمان تهیه شده است. همچنین نانولوله‌های کربنی در حدود ابعاد ۱۰ نانومتر از پژوهشگاه صنعت نفت تهیه شده است. تصاویر مربوط به میکروسکوپ الکترونی عبوری از نانوذرات اکسید سریم و اکسید آلومینیوم مورد استفاده نیز به ترتیب در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده است.

۶. تهیه‌ی نانوسوخت‌های پایه دیزل و مازوت

نتایج تحقیقات حاکی از آن است که افزایش نانوذرات در سوخت در محدوده‌ی مشخص می‌تواند در کاهش آلاینده‌ها و افزایش ارزش حرارتی سوخت مؤثر باشد.

فراصوتی قرار داده می‌شود. فرایند شرح داده شده چهار مرتبه و پس از اضافه کردن هر نانو ذره تکرار می‌شود. پس از ایجاد سوسپانسیون نانو ذرات درون سیال کمکی، حجم مناسب برای تهیهی محلول نهایی ۶٪ حجمی از سیال کمکی درون مازوت گرم شده تهیه می‌شود. به این منظور با استفاده از تجهیزات آزمایشگاهی حجم مورد نظر از سیال کمکی بلافاصله پس از خروج از حمام فراصوتی توسط یک دستگاه همزن مغناطیسی مدل MR Hei – End Heidolph به مازوت گرم شده اضافه می‌شود. دلیل گرم کردن سوخت مازوت صرفاً کاهش گرانیوی آن به میزانی است که قابل اختلاط با سیال کمکی باشد. سیال کمکی تهیه شده به اختصار DACZC_{۲۰} نام‌گذاری شده و نانو سوخت تهیه شده به کمک آن نیز نمونه MACeZC_{۱,۲} نامیده می‌شود.

• نمونهی نانو سوخت هیبریدی (اکسید آلومینیوم/اکسید سریم/اکسید زیرکونیوم/نانولوله کربنی چند دیواره) - مازوت: این نمونه که نمونهی بهینه در این طرح نیز هست، همانند روش قبل تهیه شده و از سیال کمکی دیزل برای پراکنده سازی ذرات درون مازوت استفاده شده است. در ابتدا نانو ذرات اکسید آلومینیوم و اکسید سریم با غلظت نهایی ۱۰۰۰ ppm برای هر نانو ذره و نانولولهی کربنی با غلظت نهایی ۲۰۰ ppm درون سوخت دیزل تهیه می‌شود. در مرحله بعد سیال حاوی نانو ذره به خوبی با دستگاه همزن هم زده می‌شود و به مدت ۱۵ دقیقه درون حمام فراصوتی قرار داده می‌شود. فرایند شرح داده شده سه مرتبه و پس از اضافه کردن هر نانو ذره تکرار می‌شود. پس از ایجاد سوسپانسیون نانو ذرات درون سیال کمکی، حجم مناسب برای تهیهی محلول نهایی ۶٪ حجمی از سیال کمکی درون مازوت گرم شده تهیه می‌شود. سیال کمکی تهیه شده به این روش DACe_{۱۰۰۰}C_{۲۰۰} و نانو سوخت تهیه شده به اختصار MACe_{۶۰}C_{۱,۲} نام‌گذاری شده است. اطلاعات غلظتی نانو سیال‌های کمکی و نانو سوخت مازوت پس از اضافه شدن محلول سوخت کمکی برای پراکنده سازی نانو ذرات به ترتیب در جدول‌های ۴ و ۵ قابل مشاهده است.

۷. آزمایش‌های الکترونی روی نانو سیالات پایه سوختی

مجموعه‌ی آزمایش‌هایی که خواص رئولوژیکی، فیزیکی و الکترونی ساختارها را

جدول ۴. اطلاعات مربوط نانو سیال ثانویه یا سیال کمکی.

سیال کمکی	نانو ذره	غلظت (ppm)
DACe _{۱۰۰۰} C _{۲۰۰}	اکسید آلومینیوم	۱۰۰۰
	اکسید سریم	۱۰۰۰
	نانولوله کربنی چند دیواره	۲۰۰
DACeZC _{۲۰}	اکسید آلومینیوم	۲۰
	اکسید سریم	۲۰
	اکسید زیرکونیوم	۲۰
	نانولوله کربنی چند دیواره	۲۰
DACeZC _{۱,۲}	اکسید آلومینیوم	۱۵
	اکسید سریم	۱۵
	اکسید زیرکونیوم	۱۵
	نانولوله کربنی چند دیواره	۱۵

با توجه به مطالعات انجام شده در مورد نانو سوخت‌ها و افزودنی‌های نانو، از سه نوع نانو ذره (سه مورد اکسید فلزی و یک مورد کربن)، به عنوان افزودنی‌های نانو به صورت هیبریدی و تکی به سوخت پایه مازوت خالص استفاده شده است.

• نمونه نانو سوخت تکی اکسید آلومینیوم - مازوت: نمونهی اولیهی سوخت مازوت از حرارت‌دهی مازوت در دمای ۱۰۰°C برای کاهش گرانیوی مازوت و امکان استفاده از همزن مغناطیسی برای پراکنده سازی نانو ذرات اکسید آلومینیوم استفاده شد. در ابتدا نانو ذره‌ی اکسید آلومینیوم به غلظت ۱۰۰۰ ppm درون مازوت اضافه شد و به مدت ۳۰ دقیقه روی همزن مغناطیسی و دمای بالا هم زده شد. نمونهی تولید شده به این روش از این پس به اختصار MA_{۱۰۰۰} نامیده می‌شود. به علت گرانیوی بسیار بالای مازوت و عدم تأثیر امواج فراصوت در پراکنده‌گی ذرات از استفاده از دستگاه فراصوتی پروب‌دار صرف نظر شده است؛

• نمونهی نانو سوخت هیبریدی (اکسید آلومینیوم/اکسید سریم / اکسید زیرکونیوم/نانولولهی کربنی چند دیواره) - مازوت: به علت خصوصیات ویژهی فیزیکی مازوت (گرانیوی بسیار بالا) فرایند پراکنده سازی نانو ذرات درون مازوت نسبت به روش‌های مطرح شده در تولید نانو دیزل تفاوت داشته و استفاده از این فرایندها که پیش‌تر برای ایجاد نانو سوخت پایه دیزل مطرح شد، مانند همزن و دستگاه فراصوتی، در پراکنده سازی نانو ذرات درون سیال محدودیت‌هایی به همراه دارد. به عبارتی هرچه گرانیوی سیالی بیشتر شود انرژی امواج فراصوت تولید شده توسط دستگاه فراصوت در طول حرکت درون سیال کم شده و از تأثیر این امواج در جداسازی ذرات به هم چسبیده و پراکنده سازی آن در محیط می‌کاهد. بدین منظور برای اطمینان از پراکنده‌گی مناسب ذرات از روشی نوین در پراکنده سازی ذرات درون مازوت استفاده شده است. در این روش ابتدا باید محلولی کمکی حاوی نانو ذرات پراکنده شده را در سیالی ثانویه (که گرانیوی پایینی داشته) همانند روش‌های پیشین تهیه کرده و سپس، از اختلاط مازوت و محلول کمکی حاوی نانو ذرات، سوخت نانو مازوت تهیه شود. به این ترتیب برای ایجاد یک ساختار هیبریدی چند مدل مختلف مورد آزمون و ارزیابی قرار گرفته‌اند تا در نهایت بهترین ساختار منتخب پیشنهاد شود. از سوخت دیزل به عنوان سیال ثانویه مورد استفاده در پراکنده سازی نانو ذرات انتخاب شده است؛ دلیل این انتخاب، ماهیت هیدروکربنی و سوختی آن بوده و لذا ضمن پخش ساده در درون مازوت، ارزش حرارتی آن نیز کاهش نمی‌یابد. برای ایجاد سوسپانسیون‌های کاملاً معلق و پایدار نانو ذرات درون سیال کمکی با سوخت پایه دیزل از دستگاه حمام همگن‌ساز فراصوتی یا همزن فراصوتی مدل UP_{۴۰۰}S شرکت هایشلر Hielscher کشور آلمان در پژوهشگاه مواد و انرژی استفاده شده است. علت استفاده از حمام فراصوتی در پراکنده سازی ذرات درون دیزل، حجم کم نمونهی مورد نیاز برای اضافه شدن به سوخت‌های پایه دیزل و مازوت است. در صورت نیاز به محلول‌هایی با حجم بیشتر می‌توان از دستگاه فراصوتی پروب‌دار نیز استفاده کرد. در ابتدا نانو ذرات اکسید آلومینیوم، اکسید سریم، اکسید زیرکونیوم و نانولولهی کربنی چند دیواره با غلظت نهایی ۲۰ ppm برای هر نانو ذره به همراه ۱ درصد سورفکتانت درون سوخت دیزل تهیه می‌شود. برای پراکنده سازی نانو ذرات درون سیال کمکی دیزل، ابتدا جرم مورد نیاز به منظور ایجاد غلظت مد نظر با استفاده از ترازوی الکترونیکی مدل CPA_{۱۰۰} ۳S, Sartorius به صورت دقیق توزین شده و سپس به درون دیزل اضافه می‌شود. در مرحله‌ی بعد سیال حاوی نانو ذره به خوبی با دستگاه همزن هم زده می‌شود و به مدت ۱۵ دقیقه درون حمام

جدول ۵. اطلاعات مربوط نانو سوخت - مازوت.

نانو سوخت	نانوذره/ ماده	غلظت (ppm)
MA _{۱۰۰۰}	اکسید آلومینیوم	۱۰۰۰
MACeZC _{۱/۲}	اکسید آلومینیوم	۱/۲
	اکسید سریم	۱/۲
	اکسید زیرکونیوم	۱/۲
	نانولوله کربنی چند دیواره	۱/۲
MACe _{۶۰} C _{۱۲}	اکسید آلومینیوم	۶۰
	اکسید سریم	۶۰
	نانولوله کربنی چند دیواره	۱۲
	دیزل	۶ (% حجمی)
MACeZC _{۱۳}	اکسید آلومینیوم	۱۳
	اکسید سریم	۱۳
	اکسید زیرکونیوم	۱۳
	نانولوله کربنی چند دیواره	۱۳
	دیزل	۶ (% حجمی)
	سورفکتانت	۰/۰۶ (< % حجمی)

روش انجام آزمایش بدین طریق بود که ابتدا توسط چیلر، دمای مورد نظر ۲۶ درجه سانتی‌گراد انتخاب شد و زمان اندکی برای رسیدن دمای محفظه‌ی دستگاه به دمای مورد نظر داده شد. سپس مقدار ۳۰ میلی‌لیتر از نمونه به محفظه انتقال داده شد. سپس اسپیندل ۲۲ (دوک) مناسب برای مایعات دوغابی ۲۲ انتخاب شد زیرا ذرات نانو در محیط سوخت به صورت معلق حضور دارند. توسط نرم‌افزار دستگاه، میزان ۵۰ نقطه برای خوانش داده‌ها تنظیم شد و دستوری مبنی بر خواندن داده در هر ۵ ثانیه نیز به دستگاه داده شد. به طور کلی هر نمونه ۲۵۰ ثانیه در محفظه قرار داشت. محدوده‌ی تنش برشی دستگاه نیز بر اساس مقادیر تجربی و برای این‌که وسیع‌ترین بازه ممکن را شامل شود، بین ۰/۱ تا ۱۰۰۰ لیتر بر ثانیه انتخاب شده است. خروجی دستگاه نیز نمودار تنش برشی ۲۴ برحسب تنش ۲۵ و همچنین نمودار گرانروی پویا برحسب تنش برشی انتخاب شد.

۲.۷. اندازه‌گیری چگالی

چگالی سوخت، یکی از خواص فیزیکی است که باید در محدوده‌ی استاندارد باشد تا بتواند کارایی لازم را به عنوان سوخت داشته باشد. معمولاً همه‌ی سوخت‌هایی که در محفظه‌ی احتراق سوزانده می‌شوند چگالی کم‌تر از ۱ گرم بر سانتی متر مکعب یا همان دانسیته‌ی آب مقطر دارند. برای رصد این کمیت فیزیکی و اندازه‌گیری آن از روش وزن‌سنجی با پیکنومتر استفاده شده است. چون این روش برای به دست آوردن دانسیته در واقع دانسیته‌ی نسبی را حاصل می‌کند، باید از یک محلول به عنوان محلول مرجع استفاده شود. در این‌جا از آب دیونیزه برای این منظور استفاده شده و چگالی هر نمونه با توجه به رابطه‌ی ۱ محاسبه می‌شود:

$$\rho_l = \frac{m_l}{m_{H_2O}} \times \rho_{H_2O} \quad (1)$$

برای افزایش دقت و کاهش هرچه بیشتر خطا، برای هر آزمایش سه مرحله تکرار ۲۶ در نظر گرفته شده است.

۸. خواص حرارتی و احتراق نانو سوخت

یکی از معیارهای سنجش و مقایسه‌ی سوخت‌ها، مقدار انرژی حرارتی آزاد شده به ازای واحد جرم آن سوخت است. ارزش حرارتی یک سوخت، مقدار گرمای آزاد شده در اثر احتراق واحد جرم آن سوخت تحت شرایط معین فشار و درجه حرارت است. بیشتر سوخت‌ها ترکیباتی از کربن و هیدروژن دارند که عامل‌های اصلی ایجاد گرما هستند. کربن و هیدروژن در فرایند احتراق هر دو با اکسیژن ترکیب می‌شوند و حرارت تولید می‌کنند. از جمله مهم‌ترین آزمایش‌های مربوط به سوخت می‌توان به آزمایش مربوط به محاسبه‌ی کمیت ارزش گرمایی سوخت توسط بمب کالری سنج اشاره کرد. برای اطمینان از دقت کافی دستگاه، نه تنها تجهیزات دستگاه باید بر اساس استاندارد تولید شده باشد بلکه برای جلوگیری از خطاهای انسانی، باید روند آزمایش نیز بر اساس استاندارد ASTM - D240 باشد. با توجه به این موضوع، نمونه‌ی بمب کالری سنج طراحی شده نیز مطابق همین استاندارد است که با استفاده از آن می‌توان با دقت بالا ارزش حرارتی سوخت مورد نظر را تعیین کرد. به این ترتیب بمب کالری سنجی برای تعیین دقیق ارزش حرارتی سوخت‌های مایع به کار می‌رود، که برای محاسبه‌ی ارزش حرارتی دستگاه از رابطه‌ی ۲ استفاده شده است:

$$E = \frac{Q_1 M_1 + Q_2 M_2 - M_w C_w}{\Delta T} \quad (2)$$

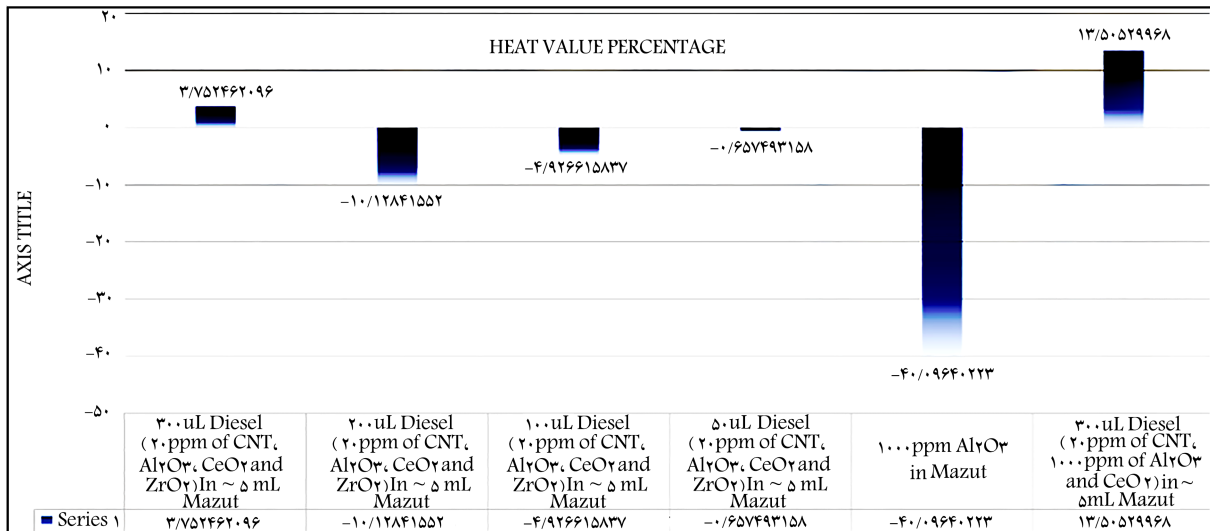


شکل ۷. دستگاه رتومتر استفاده شده برای مطالعه کمی خواص رئولوژیکی نانوسیال.

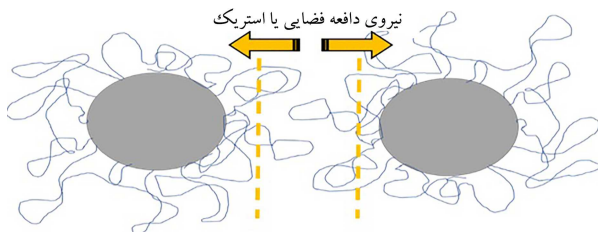
نشان می‌دهد در کنار ساختارهای احتراقی و حرارتی از پر اهمیت‌ترین آنالیزهایی است که ارائه‌ی آنها می‌تواند شرایط احتراقی - حرارتی را به صورت کامل تأیید کرده و نمونه‌ی نهایی بهینه را به ما ارائه کند. این ساختارها باعث رصد کامل نمونه‌ها و ساختارهای نانوذرات و امولسیون‌ها و نانوسیالات طراحی شده از نظر پایه‌ی تراست.

۱.۷. خواص رئولوژیکی: گرانروی و تنش

به منظور بررسی تأثیر نانوذرات بر خواص سیالاتی سوخت، مثل گرانروی و همچنین تنش برشی، آزمایش رتومتری با دستگاه نشان داده در شکل ۷ انجام شده است. از آن‌جا که نانوذرات پخش شده در نمونه‌ی سوخت، سبب ایجاد تغییرات ویژه در خواص سیال می‌شوند و امکان تغییر رفتار مایع از حالت سیال نیوتونی به سیال غیر نیوتونی را دارند، اندازه‌گیری گرانروی توسط ویسکومتر سیالات نیوتونی امکان‌پذیر نبود.



شکل ۸. نمودار تغییر درصد ارزش حرارتی مازوت خالص و نانوسوخت - مازوت.



شکل ۹. تصویر شماتیک پایداری ذرات به علت چسبندگی هیدروکربن‌های دراز زنجیر و ایجاد پایداری انعطاف‌ناپذیر.

نمونه‌گیری از سه قسمت بالایی، میانی و انتهایی ظرف حاوی نانوسوخت بوده و نتایج نشان از یکسان بودن ارزش حرارتی و به تبع آن یکنواختی پراکندگی ذرات در سوخت تهیه شده است. یکنواختی، عدم ته‌نشینی و به هم چسبیدن نانوذرات می‌تواند به دلیل گرانی بسیار بالای مازوت و کاهش حرکت براونی ذرات باشد. هرچه نانوذرات در محیط با گرانی بالاتری پراکنده شوند احتمال برخورد ذرات به یکدیگر و تشکیل ذره بزرگ‌تر نیز کاهش می‌یابد. همچنین وجود انواع هیدروکربن‌های دراز زنجیر در سوخت مازوت پیش‌بینی می‌شود؛ تعدادی از این هیدروکربن‌های دراز زنجیر روی سطوح نانوذرات چسبیده شده و عملکردی شبیه به مواد فعال سطح ایجاد کرده و سبب پایداری انعطاف‌ناپذیر نانوسوخت - مازوت شود. شکل ۹ به طور شماتیک عدم نزدیک شدن نانوذرات به یکدیگر به علت چسبندگی هیدروکربن‌های دراز زنجیر روی سطح نانوذرات را نشان می‌دهد. ارزش حرارتی نمونه $MACeZC_{1,2}$ نیز ۳.۷۵٪ رشد داشته و پیش‌بینی می‌شود دلیل کاهش ارزش حرارتی آن نسبت به نمونه $MACe_{6,C_{12}}$ موارد زیر باشد:

- غلظت پایین نانوذرات: کاهش غلظت نانوذرات سبب کاهش خاصیت کاتالیستی و بهبود سوخت مازوت شده است؛
- وجود نانوذره اکسید زیرکونیوم: در پژوهش‌های پیشین نیز استفاده از اکسید زیرکونیوم سبب کاهش ارزش حرارتی سوخت شده است.

بر اساس مشاهدات آزمایشگاهی محفظه احتراق بمب کالری‌سنجی پس از تکمیل فرایند احتراق، تفاوت قابل ملاحظه‌ای بین دو نمونه مازوت خالص و نانوسوخت - مازوت وجود دارد. این امر نشان‌دهنده بهتر سوختن نانوسوخت تولیدی و همچنین کاهش آلاینده‌های ناشی از احتراق سوخت است. چنان که در

جدول ۶. نتایج حاصل از اندازه‌گیری ارزش حرارتی مازوت خالص و نانوسوخت - مازوت.

سوخت	ارزش حرارتی برحسب MJ/kg	تغییر ارزش حرارتی نسبت به مازوت خالص (%)
مازوت خالص	۳۹/۹۴	-
MA_{100}	۳۷/۹۲	-۵/۵
$MACeZC_{1,2}$	۴۲/۲۸	۳/۷۵
$MACe_{6,C_{12}}$	۴۲/۰۰۴	۱۰/۱۷
$MACeZC_{13}$	۴۲/۱۸	۱۵/۶۲

در این رابطه E ظرفیت کالری‌سنج برحسب Q_1, z, K ارزش حرارتی سوخت برحسب M_1, z, g جرم سوخت مایع برحسب گرم، Q_2 ارزش حرارتی سیم احتراق از جنس کادمیم (این‌جا معادل 1400 kJ/g)، M_2 جرم سیم احتراق مصرف شده (این‌جا معادل ۱۲ سانتی‌متر و نیز 0.0667 گرم) بوده است، ΔT میزان افزایش درجه حرارت پس از رسیدن به تعادل، M_w جرم آب درون پوسته محفظه و C_w ظرفیت گرمایی ویژه آب برحسب ژول بر کیلوگرم درجه کلوین است. بعد از کالیبره کردن سیستم بمب حرارتی و محاسبه‌ی ظرفیت کالری‌سنج گرمای آزاد شده ناشی از احتراق سوخت از فرمول ۳ قابل محاسبه است:

$$Q = \frac{E\Delta T - \sum Gd}{G} \quad (3)$$

که در آن $\sum Gd$ میزان حرارت ایجاد شده توسط سایر افزودنی‌ها (موادی که نسبت به حالت کالیبراسیون اضافه شده‌اند) برحسب ژول و G وزن نمونه سوخت برحسب گرم است. نتایج حاصل از اندازه‌گیری ارزش حرارتی نانوسوخت - مازوت مطابق اطلاعات جدول ۶ حاکی از افزایش ۳.۷۵٪ آن نسبت به ارزش حرارتی مازوت خالص است برای نمونه بهینه $MACe_{6,C_{12}}$ است. چنان که پیش‌تر بیان شد به سبب خواص ویژه‌ی ظاهری و فیزیکی مازوت، بررسی عملی پایداری نانوذرات اضافه شده به درون سوخت امکان‌پذیر نیست. لذا فرایند اندازه‌گیری ارزش حرارتی پس از گذشت ۲۴ ساعت از تهیه‌ی نانوسوخت انجام شده است. در نمودار شکل ۸ در واقع میزان تغییر درصد ارزش حرارتی مازوت خالص و نانوسوخت - مازوت در نمونه‌ها ارائه شده است. همچنین به منظور بررسی ته‌نشینی و پراکندگی ذرات

جدول ۸. پارامترهای بهینه‌ی اجرایی مقایسه‌ی سوخت.

Results	استاندارد	واحد	Test Item
۰٫۸۹		g/cm^3	Density at ۱۵°C
۲٫۳۴۲	D۷۰۴۲	$cSt(mm^2/s)$	Kinematic Viscosity at ۱۰۰ of
۴۵٫۹۳		MJ/kg	H. heat value
۴۳٫۰۷	D۲۴۰	MJ/kg	L. heat value
۰٫۰۳	D۱۸۹	$Wt\%$	Carbon residue
۰٫۵۱	D۱۲۹	$Wt\%$	Sulfur Content
٪۳۸	D۴۸۲	$Wt\%$	Ash Content
۳۸	D۶۳۰۴	mg/kg	Water Content
۵۶	D۹۳	$^{\circ}C$	Flash point
-۱۲	D۹۷	$^{\circ}C$	pour Point
-	D۱۵۰۰	-	Color
Non Corrosive	D۱۳۰	-	Copper Corrosion for ۳hr@۱۰۰°C

جدول ۹. جدول تغییرات کیفیت سوخت مازوت بعد از افزودن نانوامولسیون.

Results	استاندارد	واحد	Test Item
۰٫۹۴۹		g/cm^3	Density at Amb. Temp. (۲۹٫۶°C)
۱۴۴٫۵	D۷۰۴۲	$cSt(mm^2/s)$	Kinematic Viscosity at ۵۰°C
۴۳٫۷۸		MJ/kg	H. heat value
۴۱٫۵۳	D۲۴۰	MJ/kg	L. heat value
۷٫۸۱	D۱۸۹	$Wt\%$	Carbon residue
۳٫۱۱	D۱۲۹	$Wt\%$	Sulfur Content
۰٫۰۶	D۴۸۲	$Wt\%$	Ash Content
Trace	D۹۶	$Vol\%$	Water and sedi.
۶۱	D۹۳	$^{\circ}C$	Flash point
-۳	D۹۷	$^{\circ}C$	pour Point

۹. بحث و تحلیل نتایج

پس از طراحی آزمایشات و انجام آزمایش‌های تکمیلی جدول نهایی با توجه به آزمایش‌های انجام شده و بررسی‌های صورت گرفته بر ساختار سوخت پایه و ساختار نانوسوخت‌های ساخته شده قابل ارائه است و می‌توان ملاحظه کرد که این محصولات نمونه‌های تولیدی تغییرات بسیار زیادی با نمونه‌های پایه ایجاد کرده‌اند که می‌تواند در پیشبرد بهبود عملکرد تجهیزات نیروگاهی و کاهش آلایندگی محیط زیست کمک کند. در جدول ۸ اطلاعات به تفکیک سوخت دیزل قابل مشاهده است که تقریباً بهبودی ۱۸ درصدی در مهم‌ترین پارامتر یعنی «ارزش حرارتی» آن دیده می‌شود. در جدول ۹ نیز مشخصات سوخت احتراقی مازوت بعد از افزودن نانوامولسیون مورد



شکل ۱۰. تفاوت میزان دوده در دو حالت مازوت خالص و نانو سوخت - مازوت در محفظه احتراق.

جدول ۷. نتایج حاصل از اندازه‌گیری خواص حرارتی دیزل خالص و مازوت خالص و نانو سوخت - مازوت.

سوخت	ضریب هدایت حرارتی $\frac{W}{m.K}$	ضریب انتقال حرارت جابجایی $\frac{W}{m^2.K}$
دیزل خالص	۰٫۱۵۲	۲۵۵٫۳۴
مازوت خالص	۰٫۲۰۵	۳۴٫۴۳
MA _{۱۰۰۰}	۰٫۰۳۵	۵۸٫۷۹
MACeZC _{۱٫۲}	۰٫۰۷۷۲	۱۲۹٫۶۸
MACe _۶ .C _{۱۲}	۰٫۰۹۸۴	۱۶۵٫۳۰
MACeZC _{۱٫۲}	۰٫۰۹۹۳	۱۶۶٫۸۱

تصویر شکل ۱۰ ملاحظه می‌شود میزان دوده در حالت احتراق نانو سوخت بسیار کم‌تر از مازوت خالص بوده که در واقع این موضوع به علت احتراق بهتر محصول نانو سوخت ناشی از جذب اکسیژن اضافی و اثر نانوکاتالیستی نانوذرات مورد استفاده در محفظه‌ی احتراق نسبت به حالت سوخت پایه است.

نمونه‌های آزمایش‌های حرارتی نانوسیالات پایه سوختی که معطوف به ضریب هدایت حرارتی و ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی است در کنار آزمایش‌های احتراقی می‌توانند منجر به بهترین انتخاب نهایی باشد. زیرا ممکن است یک نمونه شرایط احتراقی بسیار مناسبی داشته باشد اما خواص حرارتی مناسب از خود ارائه ندهد که در این صورت در سیستم‌های فرایندی و نیروگاهی این عدم تطابق موجب عدم دریافت تطابق بهینه است. چنان که از جدول ۷ برمی‌آید، مازوت و دیزل خالص به لحاظ حرارتی تفاوت بسیاری دارند که با افزودن نمونه‌های امولسیون ساخته شده به مازوت پایه خواص هدایت حرارتی آن نیز همانند مسائل احتراقی بهبود یافته و به بهترین کیفیت خود رسیده است. همچنین در خصوص این پارامتر میان بهبود کیفیت سوختی و حرارتی تطابق وجود دارد که می‌توان امیدوار بود در دیگر پارامتر حرارتی نیز بهبود داشته باشد. در ستون دیگری از جدول یاد شده دیده می‌شود که این تغییرات خواص هدایت جابه‌جایی با توجه به محاسبات انجام شده با توجه به پارامترهای انتخابی افزایش یافته که تطابق کامل تمامی پارامترهای حرارتی احتراقی را نشان می‌دهد که این مورد نمایانگر انتخاب درست نانوذرات است که در حین بهبود احتراق و پایداری باعث افزایش خواص حرارتی شده است.

شرح کامل محدوده‌ی ایده‌آل پارامترهای استاندارد صنعتی که در مراحل مختلف مورد آزمایش قرار گرفته، در جداول ۱۱ ارائه شده است. همچنین ترکیب درصد اجزاء تشکیل‌دهنده‌ی نانوذریل در جدول ۱۱ قابل مشاهده است. نتایج آنالیزهای مربوط به خصوصیات عنصری نانوذریل در جدول ۱۲ قابل مشاهده است.

۱۰. نتیجه‌گیری

استفاده از نانوذرات هیبریدی معلق برای سوخت‌های بر پایه مازوت همانند نتایج سوخت نانوذریل بهبود در خواص حرارتی و احتراق ایجاد کرده است. نتایج این مطالعه نشان‌دهنده‌ی آن است که نمونه‌های بهینه‌ی نانوسوخت مازوت و نانوسوخت دیزل تمام خواص سوخت ایده‌آل برای استفاده در فرایند احتراقی را داشته و می‌تواند جایگزین مناسبی برای سوخت‌های مازوت و دیزل خالص باشد. با توجه به این موضوع که میزان افزایش ارزش حرارتی سوخت دیزل به میزان کیفیت اولیه‌ی سوخت پایه (خالص) و ترکیبات آن در فصول مختلف سال بستگی داشته، به همین جهت میزان بهبود ارزش حرارتی با توجه به نتایج آنالیزهای ارائه شده می‌تواند بین ۱۴/۰۲ تا ۱۸/۵٪ متغیر باشد. در خصوص مازوت نیز به علت مدت زمان دوام نمونه در طی شش ماه و استفاده از لایه‌های بالایی مازوت در مخازن نگهداری و ساخت نمونه‌ی نانومازوت، ارزش حرارتی نمونه‌ی پایه (خالص) ممکن است اندکی کم‌تر از مازوت تازه شده و در نتیجه نانومازوت نیز کاهش داشته است. با این حال نانومازوت تولید شده نسبت به مازوت خالص ارزش حرارتی بالاتری معادل حدود ۱۳/۴۱٪ داشته و این نشان از تأثیر مثبت افزودن نانوذرات اکسید فلزی و نانولوله‌های کربنی چنددیواره در احتراق بهتر سوخت دارد. همچنین با انجام محاسبات مربوط به قیمت تمام شده برای ساخت نمونه‌های نانوسوخت مازوت و دیزل این نتیجه‌گیری حاصل می‌شود که حتی در صورت خریداری مواد اولیه با ارز آزاد، هزینه‌ی نهایی محصول در مقایسه با قیمت سوخت پایه بسیار ناچیز بوده و حداکثر ۲۰ الی ۳۰ درصد افزایش قیمت سوخت پایه قابل پیش‌بینی است که با تولید انبوه مکمل‌های هیبریدی قابل کاهش است و لذا از لحاظ اقتصادی انجام این طرح می‌تواند مزیت اقتصادی بالایی داشته باشد. در تهیه‌ی نانوسوخت دیزل، روش پراکنده‌سازی ذرات به صورت دو مرحله‌ی صورت‌گرفت و نانوذرات پس از توزین، به همراه ماده‌ی پایدارکننده درون سوخت ریخته شده و پس از اختلاط کامل از دستگاه فراصوتی به منظور پراکنده‌سازی نهایی ذرات استفاده شده است. از نانوذریل تهیه شده در این طرح می‌توان مستقیماً به عنوان محصول سوختی استفاده کرد. سوخت دیزل به کار رفته در این آزمایش از گازوئیل مورد استفاده در خودروهای دیزلی موجود در مراکز سوخت‌رسانی تهیه شده است.

به این ترتیب، تمامی نتایج و مشخصه‌های سوختی در محدوده‌ی ایده‌آل یک ماده‌ی سوختی مورد استفاده در صنایع نیروگاهی بوده و در برخی از خصوصیات بهبود یافته است.

تقدیر و تشکر

مطالعات مربوط به این پروژه از حمایت مالی شرکت مادر تخصصی تولید نیروی برق حرارتی و حمایت علمی پژوهشگاه نیرو برخوردار شده است که بدین وسیله قدردانی می‌شود.

جدول ۱۰. مقایسه‌ی ارزش حرارتی سوخت پایه (خالص) دیزل و مازوت با نانوسوخت‌های تولیدی.

سوخت	ارزش حرارتی جدید	تغییر ارزش حرارتی نسبت به سوخت پایه
دیزل خالص	۴۰,۲۸ MJ/kg	-
D - ACS _{۱۰۰} (نانو دیزل)	۴۵,۹۳	٪۱۴,۰۲
مازوت خالص	۳۸,۰۶	-
M - ACeZC _{۱۳} (نانو مازوت)	۴۳,۷۸	٪۱۳,۴۱

جدول ۱۱. مشخصات سوخت نانوذریل.

نمونه	سوخت پایه	نانوذرات	غلظت (ppm)
		اکسید سیلیسیوم	۱۰۰
D - ACS _{۱۰۰}	دیزل	اکسید آلومینیوم	۱۰۰
		نانولوله‌های کربنی چند دیواره ^۱	۱۰۰

۱. Multi Wall Carbon None Tube (MWCNT)

جدول ۱۲. نتایج آنالیز عنصری نانوذریل برحسب ppm.

Test Result	Test Result	Test Result	Test Result
Mo	۰,۰	Fe	۰,۷
Zn	۰,۸	Cr	۰,۸
P	۰,۰	Al	۲۵
Ca	۰,۳	Cu	۰,۰
Ba	۰,۰	Pb	۰,۰
Mg	۰,۸	Sn	۰,۰
Si	۱۳,۵	Ni	۰,۰
Na	۸,۲	Ti	۰,۰
B	۰,۸	Ag	۰,۰
V	۰,۰		

طراحی دیده می‌شود که اعداد بهبودیافته کاملاً قابل مشاهده‌اند. از طرف دیگر، نتایج حاصل از آزمایش تغییر ارزش حرارتی سوخت نانومازوت و نانوذریل نسبت به ارزش حرارتی سوخت پایه در جدول ۱۰ قابل مشاهده است. مشخصات فنی نانوسوخت‌های تولید شده: مشخصات نانوسوخت‌های بهینه با

پانوشته‌ها

۱. مصرف ویژه سوخت (Specific Fuel Consumption) عبارت است از اندازه‌گیری بازده یا راندمان سوخت هر موتور محرکه یا محفظه احتراق که باعث احتراق می‌شود و انرژی یا توان حاصل را تولید می‌کند. در واقع به عنوان تعریف عبارت است از میزان مصرف سوخت تقسیم بر توان تولید شده.
۲. نقطه‌ی اشتعال یا درخشش (Flash Point) پایین‌ترین درجه دمایی است که در آن از ماده، بخاری قابل احتراق ساطع می‌شود.
۳. نقطه‌ی آتش (Fire Point) یا نقطه‌ی احتراق، به پایین‌ترین درجه حرارت مورد نیاز برای آتش گرفتن و بخار شدن یک سوخت اطلاق می‌شود، که آتش آن برای حداقل ۵ ثانیه پس از احتراق با شعله باز ادامه داشته باشد.
۴. فروسن (Ferrocene) با فرمول شیمیایی $Fe_{10}H_{10}C$ ؛ که جرم مولی آن $186.04 g/mol$ و شکل ظاهری این ترکیب، پودر نارنجی روشن است.
5. Acacia Concinna Biodiesel
6. Hybrid NanoMaterials
7. Biomass
8. Cetane Value
9. Unburned Hydro Carbons (UHC)
10. Lubrication
۱۱. نفت کوره یا مازوت که به انگلیسی Mazut است، یکی از هیدروکربن‌های نفتی است که در مراحل پالایش نفت خام پس از نفتا، بنزین و نفت سفید به دست می‌آید و چون سیاه‌رنگ است به نام نفت سیاه نیز خوانده می‌شود. این ماده ارزان‌ترین ماده سوختی برای کوره‌ها، حمام‌ها و تنور نانوبی‌ها، موتورهای دیزلی دریایی و برخی نیروگاه‌ها است که کیفیت بسیار پایین و ویسکوزیته بالایی دارد.
12. Combustion
13. Vaporization
14. Ignition
15. CI Engines
16. Statistical Experimental Design
17. Reversal Flame
۱۸. نانوذرات اکسید آلومینیوم گاما یا $Nano Al_2O_3$ Gamma مهم‌ترین نانو ساختار آلومینا که بیشتر به عنوان نانوکاتالیست در صنایع مختلف نفت، ساختارهای کامپوزیتی برای هوا و فضا، پوشش‌های عایق و پایداری حرارتی مورد استفاده قرار می‌گیرد، گاما آلومینا $Al_2O_3 - \gamma$ مزومتخلخل است که دارای نظم ساختاری و توزیع باریک اندازه حفرات هستند. گاما آلومینا به دلیل دارا بودن مساحت سطح زیاد بیشترین کاربرد را در صنعت کاتالیست دارد.
19. Unburned Hydr Carbon (UHC)
۲۰. قطعه‌یی به نام منی‌فولد (Manifold) در پیش‌رانه سیستم احتراق درون‌سوز قرار گرفته که به دو نوع ورودی، هوا و خروجی یا دود تقسیم شده و وظایف مختلفی دارند.
21. Dogle
22. Spindle
23. Slurry Liquids
24. Shear Rate
25. Tension
26. Replication

منابع (References)

1. Saxena, V., Kumar, N. and Saxena, V.K. "A comprehensive review on combustion and stability aspects of metal nanoparticles and its additive effect on diesel and biodiesel fuelled C.I. engine", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **70**, pp. 563-588 (2017).
2. Shaafi, T., Sairam, K., Gopinath, A. and et al. "Effect of dispersion of various nanoadditives on the performance and emission characteristics of a CI engine fuelled with

- diesel, biodiesel and blends-A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **49**, pp. 563-573 (2015).
3. Kasper, M., Sattler, K., Siegmann, K. and et al. "The influence of fuel additives on the formation of carbon, during combustion", *J Aerosol Science*, **30**, pp. 217-225 (1999).
4. Lissianski, V.V., Maly, P.M. and Zamansky, V.M. "Utilization of iron additives for advanced control of NOx emissions from stationary combustion sources", *Industrial Engineering Chemical Research*, **40**(15), pp. 3287-3293 (2001).
5. Vishal, S., Niraj, K., Kumar, S.V. and et al. "Experimental investigations for rheological characteristics of TiO2 nanoparticles doped diesel, biodiesel fuel blends for use in compression ignition engine", *In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **691**, pp. 1-10 (2019).
6. Guru, M., Karakaya, U., Altiparmak, D. and et al. "Improvement of diesel fuel properties by using additives", *Energy Conversion Management*, **43**, pp. 1021-1025 (2002).
7. Shaafi, T. and Velraj, R. "Influence of alumina nanoparticles, ethanol and isopropanol blend additive with diesel-soyabean biodiesel blend fuel, combustion, engine performance and emissions", *Renew Energy*, **80**, pp. 655-663 (2014).
8. Hosseini, S.H., Taghizadeh-Alisaraei, A., Ghobadian, B. and et al. "Effect of added alumina as nano-catalyst to diesel-biodiesel blends on performance and emission characteristics of CI engine", *Energy*, **124**, pp. 543-552 (2017).
9. Gumus, S., Ozcan, H., Ozbey, M. and et al. "Aluminum oxide and copper oxide nanodiesel fuel properties and usage in a compression ignition engine", *Fuel*, **163**, pp. 80-87 (2016).
10. Sivakumar, M., Sundaram, N.S., Ramesh-Kumar, R. and et al. "Effect of aluminum oxide nanoparticles blended pongamia methyl ester on performance, combustion and emission characteristics of diesel engine", *Renewable Energy*, **116**, pp. 518-526 (2018).
11. Hosseini, S.H., Taghizadeh-Alisaraei, A., Ghobadian, B. and et al. "Performance and emission characteristics of a CI engine fuelled with carbon nanotubes and diesel-biodiesel blends", *Renewable Energy*, **111**, pp. 201-213 (2017).
12. Soukht Saraee, H., Taghavifar, H. and Jafarmadar, S. "Experimental and numerical consideration of the effect of CeO2 nanoparticles on diesel engine performance and exhaust emission with the aid of artificial neural network", *Applied Thermal Engineering*, **113**, pp. 663-672 (2017).
13. Debbarma, S. and Dev Misra, R. "Effects of iron nanoparticle fuel additive on the performance and exhaust emissions of a compression ignition engine fuelled with diesel and biodiesel", *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, **10**, pp. 1002-1009 (2018).
14. El-Seesy, A., Hassan, H. and Ookawara, S. "Effects of graphene nanoplatelet addition to jatropha biodiesel-diesel mixture on the performance and emission characteristics of a diesel engine", *Energy*, **147**, pp. 1129-1152 (2018).

15. Sungur, B., Topaloglu, B. and Ozcan, H. "Effects of nanoparticle additives to diesel on the combustion performance and emissions of a flame tube boiler", *Energy*, **113**, pp. 44-51 (2016).
16. Kouravand, S. and Kermani, A.M. "Clean power production by simultaneous reduction of NOx and SOx contaminants using mazut nano-emulsion and wet flue gas desulfurization", *Journal of Cleaner Production*, **201**, pp. 229-235 (2018).
17. Smirnov, V.V., Kostritsa, S.A., Kobtsev, V.D. and et al. "Experimental study of combustion of composite fuel comprising n-decane and aluminum nanoparticles", *Combustion and Flame*. **162**, pp. 3554-3561 (2015).
18. Kannaiyan, K. and Sadr, R., "The effects of alumina nanoparticles as fuel additives on the spray characteristics of gas-to-liquid jet fuels", *Applied Thermal and Fluid Science*. **87**, pp. 93-103 (2017).
19. Marikkar, N., Vierling, M., Aboujaib, M. and et al. "Soot reduction in gas turbine combustors using oxidation catalyst additives", *ASME Turbo Expo: Turbine Technica Conference and Exposition Proceedings*, **4A**, Combustion Fuels and Emissions, Canada (2015).
20. Hales, D. "Renewables global status report", In REN21 Secretariat. Paris (2018). <https://www.ren21.net>.
21. Ghareghani, A., Asiaei, S., Khalife, E. and et al. "Simultaneous reduction of CO and NOx emissions as well as fuel consumption by using water and nano particles in diesel-biodiesel blend", *Journal of Cleaner Production*, **210**, pp. 1164-1170 (2019).
22. Ghanbari, M., Najafi, G., Ghobadian, B. and et al. "Performance and emission characteristics of a CI engine using nano particles additives in biodiesel-diesel blends and modeling with GP approach", *Fuel*, **202**, pp. 699-716 (2017).
23. Khalife, E., Tabatabaei, M., Demirbas, A. and et al. Impacts of additives on performance and emission characteristics of diesel engines during steady state operation", *Progress in Energy and Combustion Science*, **59**, pp. 32-78 (2017).
24. Soudagar, M.E.M., Nik-Ghazali, N.N., Abul Kalam, M. and et al. "The effect of nano-additives in diesel-biodiesel fuel blends: a comprehensive review on stability, engine performance and emission characteristics", *Energy Conversion and Management*, **178**, pp. 146-177 (2018).
25. Mehregan, M. and Moghiman, M. "Effects of nano-additives on pollutants emission and engine performance in a urea-SCR equipped diesel engine fueled with blended-biodiesel", *Fuel*, **222**, pp. 402-406 (2018).
26. Mehta, R.N., Chakraborty, M. and Parikh, P.A. "Nanofuels: combustion, engine performance and emissions", *Fuel*, **120**, pp. 91-97 (2014).
27. Örs, I., Sarikoç, S., Atabani, A.E. and et al. "The effects on performance, combustion and emission characteristics of DICI engine fuelled with TiO2 nanoparticles addition in diesel/biodiesel/n-butanol blends", *Fuel*, **234**, pp. 177-188 (2018).
28. Praveen, A., Lakshmi Narayana Rao, G. and Balakrishna, B. "Performance and emission characteristics of a diesel engine using calophyllum inophyllum biodiesel blends with TiO2nanoadditives and EGR", *Egyptian Journal of Petroleum*, **27**(4), pp. 731-738 (2018).
29. Rashedul, H.K., Masjuki, H.H., Kalam, M.A. and et al. "The effect of additives on properties, performance and emission of biodiesel fuelled compression ignition engine", *Energy Conversion and Management*, **88**, pp. 348-364 (2014).
30. Rai, R.K. and Sahoo, R.R. "Impact of different shape based hybrid nano additives in emulsion fuel for exergetic, energetic, and sustainability analysis of diesel engine", *Energy*, **214**, (1 January 2021). <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119086>.
31. Kegl, T., Kralj, A.K., Kegl, B. and et al. "Nanomaterials as fuel additives in diesel engines: a review of current state, opportunities, and challenges", *Progress in Energy and Combustion Science*, **83** (March 2021). <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2020.100897>.
32. Rai, R.K. and Sahoo, R.R. "Effect of CNT and Al2O3-CNT hybrid nano-additive in water-emulsified fuels on DICI engine energetic and exergetic performances", *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, **147**, pp. 3577-3589 (2022). <https://doi.org/10.1007/s10973-021-10746-x>.
33. Çakmak, A., Yeşilyurt, M.K., Erol, D. and et al. "The experimental investigation on the impact of n-octanol in the compression-ignition engine operating with biodiesel/diesel fuel blends: exergy, exergoeconomic, environmental analyses", *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, (27 April 2022). <https://doi.org/10.1007/s10973-022-11357-w>.
34. Narges Karimi Abiyazani, N.K., Pirouzfard, V. and Chiahung Su. "Enhancing engine power and torque and reducing exhaust emissions of blended fuels derived from gasoline-propanol-nano particles", *Energy*, **241** (2022). <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122924>.
35. Sabet Sarvestani, N., Abbaspour Fard, M.H., Tabaszadeh, M. and et al. "Synthesis and evaluation of catalytic activity of NiFe2O4 nanoparticles in a diesel engine: an experimental investigation and multi-criteria decision making approach", *Journal of Cleaner Production*, **365** (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132818>.
36. Gad, M.S., Abdel Aziz, M.M. and Kayed, H. "Impact of different nano additives on performance, combustion, emissions and exergetic analysis of a diesel engine using waste cooking oil biodiesel", *Propulsion and Power Research*, **11**(2), pp. 209-223 (June 2022). <https://doi.org/10.1016/j.jprr.2022.04.004>.