

استفاده از نانو قطرات آب در سوخت گازوییل به منظور کاهش آلاینده‌های زیست محیطی

احمد نعلبندی*^۱، علی اصغر خلیلی^۲ و مهرداد شجاعی^۳

^۱ استادیار پژوهشکده علوم و فناوری پلیمر، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران

^۲ مسئول پروژه پژوهشکده علوم و فناوری های شیمیایی، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران

^۳ رئیس گروه شناسایی و ارزیابی پلیمر پژوهشکده علوم و فناوری پلیمر، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران

دریافت: ۹۱/۸/۷ پذیرش: ۹۱/۱۲/۲۱

چکیده

در این مقاله نانو امولسیون‌هایی متشکل از نانو قطرات آب در سوخت گازوییل به کمک تلفیقی از مواد فعال سطحی غیر یونی، ساخته شده است. سه فرمولاسیون از این نوع امولسیون‌ها، حاوی مقادیر مختلف آب شامل ۵، ۱۰ و ۱۴ قسمت حجمی (به ازای ۱۰۰ قسمت گازوییل) با به کارگیری مخلوطی از دو ماده فعال سطحی، سوربیتان مونو اولئات (۲۰٪) و سوربیتان تری اولئات پلی اکسی اتیلنی (۲۰ مول اتوکسیله) (۸۰٪) و نیز تنظیم نسبت بخش آبدوست به آبگریز^۱ سیستم در مقدار ۱۰ به صورت پایدار و شفاف تهیه گردید. اثر محتویات آب بر اندازه قطرات، ارزش حرارتی سوخت حاصل، میزان انتشار آلاینده‌های زیست محیطی و نیز دمای گازهای خروجی از آگروز در موتورهای دیزلی مورد بررسی قرار گرفت و مشخص شد که میزان مونواکسید نیتروژن، دوده، ذرات معلق، هیدروکربن‌های نسوخته و مونواکسید کربن کاهش می‌یابند. این مطالعه نشان داد که متوسط اندازه نانو قطرات آب تشکیل شده (که در این تحقیق ۳۹-۱۹/۳ نانومتر بود) بستگی به درصد آب بکار رفته و غلظت کل مواد فعال سطحی مصرف شده دارد.

کلمات کلیدی: نانو امولسیون، گازهای آلاینده، موتور دیزل، سوخت گازوییل، سوخت‌های امولسیونی و محیط زیست

مقدمه

نانو امولسیون‌هایی که هیچ نوع به هم پیوستگی و رشد قطرات در آنان روی ندهد، منحصر به فرد بوده و گاه به آنها نانو امولسیون‌های "نزدیک به پایدار ترمودینامیکی" گفته می‌شوند. نانو امولسیون‌ها بدون تغییر در توزیع اندازه قطرات قابل رقیق شدن هستند [۷]. نانو امولسیون‌های روغن در آب با اندازه قطرات ۱۴ نانومتر که دارای پایداری سینتیکی بالا می‌باشند توسط سولانس و همکاران وی گزارش شده‌اند [۸-۹].

نانو امولسیون‌ها بسته به اندازه قطر قطرات آب معلق در آنها می‌توانند شفاف، نیمه شفاف (با اندازه قطر قطرات ۲۰۰-۵۰ نانومتر) و یا شیری رنگ (با قطر قطرات تا ۵۰۰ نانومتر) باشند [۳-۱]. بر خلاف میکرو امولسیون‌ها که به طور ترمودینامیک پایدار هستند نانو امولسیون‌ها تنها از نظر سینتیکی پایدار می‌باشند [۴-۶]. پایداری و دوام بلند مدت

* babanalbandia@ripi.ir

1. HLB

برناد و همکاران در سال ۲۰۰۰ انتشار یافته است [۲۰]. آکوآزول هم‌اکنون در بسیاری از وسایل نقلیه دیزلی در فرانسه و تعدادی دیگر از کشورهای اروپای جنوبی مصرف می‌گردد [۲۱-۲۰]. سوخت دیزل حاوی امولسیون آب یکی از گزینه‌های مناسب برای کاهش آلاینده‌های انتشار یافته از موتورهای احتراق داخلی نظیر موتور دیزل و بخارسازهای صنعتی می‌باشد [۲۳-۲۲]. سوخت‌های امولسیونی عمدتاً حاوی ۲۰-۵ درصد آب، مواد فعال سطحی و سوخت پایه شامل نفت سفید یا گازوییل هستند. تحقیقات انجام شده در چند سال اخیر پیوسته ثابت کرده که سوخت‌های امولسیونی در مقایسه با سوخت‌های دیزلی معمولی از میزان انتشار آلاینده‌های هیدروکربورهای نسوخته، مونواکسیدکربن، دی اکسیدکربن و اکسیدهای مخاطره آمیز ازت و نیز ذرات جامد کمتری برخوردار می‌باشند. در خصوص مکانیزم عمل ذرات آب در سوخت و تاثیر آن در راندمان موتور و کاهش آلاینده‌های خروجی می‌توان گفت که حضور قطرات آب در سوخت‌های امولسیونی به هنگام احتراق باعث جذب گرما و تبخیر ناگهانی آن شده و چون آب سریع‌تر از سوخت تبخیر می‌شود منجر به پخش و توزیع سوخت به صورت ذرات ریز می‌گردد این پدیده در دمای 270°C و در بالای دمای نقطه جوش آب رخ می‌دهد که باعث اتمیزه نمودن سوخت شده و بدین ترتیب با ریز کردن سوخت، فرایند مخلوط شدن آن با اکسیژن هوا را تسهیل نموده و منجر به بهسوزی سوخت می‌شود. نتیجه این بهسوزی کاهش در مصرف سوخت و تقلیل در تولید دوده و هیدروکربورهای نسوخته می‌باشد. توضیح بیشتر در رابطه با مکانیزم انفجار سوخت‌های نانو امولسیونی توسط وانگ و همکاران ارائه شده است [۲۴ و ۲۶]. از مزایای دیگر حضور قطرات آب در سوخت گازوییل کوتاه نمودن زمان احتراق است که این پدیده ناشی از تماس بهتر ذرات سوخت با اکسیژن هوا ناشی از فرایند میکرو انفجار سوخت می‌باشد. هدف از تحقیق حاضر تهیه سوخت گازوییلی حاوی مقادیر متفاوت از نانو امولسیون آب بوده که برای این کار از نوعی

در مقایسه نانو امولسیون‌های آب در روغن^۱ پس از اولین معرفی توسط لندفستر و همکاران که با به‌کارگیری آنها در پلیمریزاسیون‌های آلی و معدنی همراه بود، توجهات بیشتری را بخود معطوف نمودند [۱۳-۱۰]. بسته به روش تهیه، توزیع اندازه قطرات متفاوتی به هنگام ساخت امولسیون‌ها حاصل می‌گردد که با توجه به تاثیر اندازه ذرات در پایداری امولسیون‌ها مشخص می‌شود که دستورالعمل تهیه این مواد در پایداری آنان موثر می‌باشند [۱۵-۱۴]. معمولاً تهیه امولسیون‌ها با اندازه قطرات در محدوده ۲۰۰-۵۰ نانومتر [۶] به کمک یکی از روش‌های: ۱- امولسیون سازی با انرژی بالا (مثلاً توسط همزن‌هایی با نیروی برشی بالا، هموژنایزهایی با فشار بالا و یا ژنراتورهای التراسونیک) [۱۶] و ۲- امولسیون سازی با انرژی کم (معکوس کردن فازها با دما^۲) صورت می‌گیرد [۱۷-۹]. اگرچه روش‌های امولسیون‌سازی با انرژی بالا توام با کنترل بهتر اندازه قطرات و امکان دستیابی به تنوعی از ترکیب درصد اجزاء می‌باشد، لیکن روش‌های امولسیون سازی با انرژی کم اغلب جذاب‌تر هستند زیرا دارای این مزیت می‌باشند که از انرژی ذخیره شده سیستم می‌توان برای کمک به ریز کردن قطرات استفاده نمود. در حال حاضر، موتور دیزل از کاراترین موتورهای احتراق داخلی از نظر مصرف سوخت و راندمان تبدیل می‌باشد [۱۸]. گرچه، بسیاری از مردم نگران آلاینده‌های آزاد شده از آن که شامل گازهای مضر، ذرات معلق و بوی بد هستند، می‌باشند. آلاینده‌هایی که از موتورهای دیزل در هوا انتشار می‌یابند عبارتند از هیدروکربورهای نسوخته^۳، مونواکسیدکربن^۴، دی اکسیدکربن^۵، اکسیدهای مخاطره آمیز ازت^۶ و نیز ذرات جامد^۷ و دوده سیاه که اغلب به مواد مضر و زیان آور تبدیل شده که نه تنها محیط زیست را تخریب می‌کنند بلکه سلامتی انسان‌ها را نیز تهدید می‌نمایند [۱۹]. یک شرکت نفتی فرانسوی نوعی سوخت دیزل امولسیونی به نام آکوآزول به بازار عرضه کرده است. این سوخت محتوی $13\pm 3\%$ آب، $85\pm 3\%$ سوخت دیزل و $2-3\%$ مواد فعال سطحی می‌باشد. نتایج مصرف این نوع سوخت توسط

1. W/O
2. PIT
3. HC
4. CO

5. CO₂
6. NO_x
7. PM

تری اولئات پلی اتیلنی (۲۰ مول اتوکسیله) (Tween 85) تهیه شده از Sigma-Aldrich استفاده گردید. دستگاه مورد استفاده جهت تهیه نانو امولسیون‌ها هموژنایزر توربینی از نوع (Ultraturrax pro 200USA) بود که با صرف انرژی بسیار بالا در دو مرحله تشکیل نانو امولسیون‌ها ممکن گردید. در مرحله اول، امولسیون حد واسطی با افزایش مقادیر مختلف آب (۵، ۹ و ۱۴٪) به مخلوط در حال همزدن ۲۰٪ سوربیتان مونو اولئات و ۸۰٪ سوربیتان پلی اولئات پلی اکسی اتیلنی (۲۰ مول اتوکسیله)، تهیه شد. سپس با افزودن سوخت گازوییل با سرعت و دور همزن ثابت (۸۰۰ دور در دقیقه) به مخلوط فوق و متعاقباً افزایش دور همزن به ۲۰۰۰۰ دور در دقیقه طی ۲ دقیقه، نانو امولسیون تشکیل گردید. در انجام این تحقیق سه نوع نانو امولسیون E_1 , E_2 , E_3 که به ترتیب حاوی ۵، ۹ و ۱۴٪

هموژنایزر پر قدرت استفاده گردید. همچنین بررسی اثر غلظت مواد فعال سطحی (امولسیفایر) در پایداری این نوع سوخت از دیگر اهداف این تحقیق می‌باشد. روش به کار گرفته شده در این فرایند مبتنی بر استفاده از: ۱- نیروی برشی قوی فراهم شده توسط نوعی هموژنایزر که باعث ریز شدن قطرات آب در اندازه نانو می‌شود و ۲- بکارگیری مواد فعال سطحی (سورفکتانت) با تنظیم نسبت بخش آبدوست به آبریز مخلوط که منجر به کاهش مناسب کشش سطحی فصل مشترک فاز آب و سوخت می‌گردد.

بخش تجربی

مواد و دستگاه:

در انجام این تحقیق از گازوییل تجارتي با مشخصات جدول ۱ و سوربیتان مونو اولئات (Span 80) و سوربیتان

جدول ۱: خواص فیزیکی شیمیایی سوخت نانو امولسیون گازوییل/آب

روش آزمایش	E_3	E_2	E_1	گازوییل پایه	خواص سوخت
ASTM D 4052	۰/۸۷۷۹	۰/۸۶۶۴	۰/۸۴۷۷	۰/۸۳۳۷	دانسیته در 22°C (g/ml)
					ترکیب درصد وزنی
ASTM D 5291	۷۰/۴	۷۴/۷	۷۹/۸	۸۴/۹	کربن
ASTM D 5291	۱۲/۸	۱۳	۱۳/۱	۱۳/۴	هیدروژن
Elemental an.	۱۱/۱	۸/۱	۳/۲	<۰/۵	اکسیژن
ASTM D 2622	۰/۴۴	۰/۴۶	۰/۵۴	۰/۶۸	گوگرد
ASTM D 5291	۰/۶	۰/۵	۰/۴	۰/۳	ازت
ASTM D 2500	-۴	-۲	-۲	-۲	نقطه ابری شدن $^\circ\text{C}$
ASTM D 97	-۶	-۶	-۶	-۶	نقطه ریزش $^\circ\text{C}$
ASTM D 976	-	-	۴۹	۵۵	شاخص ستان
ASTM D 445	۹/۹۴۰	۷/۱۹۲	۴/۶۷۵	۳/۲۰۶	گرانروی- cSt (40°C)
ASTM D 130	۱b	۱b	۱b	۱b	Corrosion, 3 hrs, @ 100°C
ASTM D 240	۳۶/۵۵	۳۹/۱۴	۴۲/۳۵	۴۵/۳۳	ارزش حرارتی (MJ/kg)
ASTM D 1533	۱۶/۶۵	۱۱/۴۵	۵/۸۷	۰/۱	درصد وزنی آب (%)
ASTM D 6079	۲۴۸/۷۵	۲۲۵	۱۸۱/۲۵	۳۷۳/۷۵	روان کنندگی μm
ASTM D 86	-	-	-	-	تقطیر در ۷۶۰ mmHg
	-	-	۱۶۰	۱۶۲/۷	نقطه جوش اولیه (IBP) $^\circ\text{C}$
	-	-	۳۵۸/۵	۳۷۳/۶	نقطه جوش نهایی (FBP) $^\circ\text{C}$
ASTM D 524	<۰/۰۱	<۰/۰۱	۰/۰۳۳	۰/۰۴۱	باقی مانده کربن (درصد وزنی)

جدول ۲: مشخصات فنی موتور بنز OM314 مورد آزمایش

ردیف	اطلاعات فنی	OM314
۱	نوع موتور	ایستاده ردیفی
۲	حجم سیلندر	۳۷۸۴ (cm) ³
۳	ترتیب احتراق	۱-۳-۴-۲
۴	دور آرام	۶۰۰ (rpm)
۵	قطر و کورس پیستون	۱۲۸×۹۷ (mm)
۶	تعداد سیلندر/سوپاپ	۸ / ۴
۷	نسبت تراکم	۱۷ : ۱
۸	حداکثر قدرت موتور	۶۳ kW در ۲۸۰۰ rpm
۹	حداکثر گشتاور	۲۳۵ Nm در ۱۸۰۰ rpm
۱۰	نوع احتراق	چهار زمانه ، تزریق مستقیم

جدول ۳: مشخصات سیکل ECE R49
ECE R49 and US 13-mode Cycles

شماره روش	سرعت	بار %	فاکتور وزنی	
			R49	US
۱	بدون بار	-	۰/۲۵: ۳	۰/۲۰: ۳
۲	ماکزیمم سرعت گشتاور	۱۰	۰/۰۸	۰/۰۸
۳		۲۵	۰/۰۸	۰/۰۸
۴		۵۰	۰/۰۸	۰/۰۸
۵		۷۵	۰/۰۸	۰/۰۸
۶		۱۰۰	۰/۲۵	۰/۰۸
۷	بدون بار	-	۰/۲۵: ۳	۰/۲۰: ۳
۸	نرخ توان سرعت	۱۰۰	۰/۱	۰/۰۸
۹		۷۵	۰/۰۲	۰/۰۸
۱۰		۵۰	۰/۰۲	۰/۰۸
۱۱		۲۵	۰/۰۲	۰/۰۸
۱۲		۱۰	۰/۰۲	۰/۰۸
۱۳	بدون بار	-	۰/۲۵: ۳	۰/۲۰: ۳

آب بود (تهیه شد و سپس کلیه آزمایش‌ها در دمای ثابت ۳۰°C بر روی آن‌ها انجام گرفت.

بررسی و ارزیابی قطر قطرات نانوامولسیون آب با استفاده از روش DLS^۱ و به کمک دستگاه Zeta Sizer (ساخت شرکت انگلیسی Malvern در طول موج ۶۳۳ نانومتر) صورت گرفت. همچنین اندازه‌گیری گازهای خروجی از آگزوز شامل مونوکسید نیتروژن^۲، اکسیدهای ازت^۳ و دی‌اکسیدکربن و نیز تعیین دمای گازهای خروجی از آگزوز و سایر ویژگی‌های احتراقی در موتور دیزلی OM314 که مجهز به تجهیزات چند منظوره و سنسورهای الکترو شیمیایی جهت اندازه‌گیری غلظت گاز می‌باشد انجام گرفت.

آزمایش مصرف سوخت و اندازه‌گیری آلاینده‌ها طبق سیکل ECE 13 Mode و ارزیابی عملکرد موتور طبق استاندارد SAE با موتور دیزل OM314 بطور ایستا^۴ انجام شد. مشخصات موتور فوق در جدول ۲ آمده است.

به منظور ارزیابی کارایی سوخت‌های فرموله شده و مقایسه آنها با گازوییل معمولی (پایه)، آزمایش مصرف سوخت و آلاینده‌گی انجام گردید. خلاصه مشخصات سیکل در جدول ۳ نشان داده شده است. برای ارزیابی سوخت‌های امولسیون فرموله شده انتخابی از نظر تأثیر بر عملکرد موتور و مقایسه آن با گازوییل معمولی (پایه) آزمایش با موتور بنز OM314 متصل به یک دستگاه دینامومتر ادی کارنت مدل W230 به حالت ایستا بر روی سکوی آزمایش^۵ و طبق استاندارد SAE 1349 انجام شد.

برای تعیین مشخصه‌های عملکرد مؤثر^۶ موتور با سوخت گازوییل معمولی (پایه) و سوخت نانو امولسیون گازوییل/آب پارامترهای توان، گشتاور، مصرف ویژه سوخت، راندمان حرارتی در شرایط تمام بار^۷ مورد بررسی قرار گرفتند.

جهت انجام آزمایش موتوری از یک دستگاه دینامومتر ادی کارنت مدل W230 ساخت شرکت شنک^۸ استفاده شد. این

1. Dynamic Light Scatering
2. NO
3. NO_x
4. stand

5. Test bed
6. Effective/Brake
7. Full load
8. SCHENCK

نشد و تنها اندکی افزایش در اندازه قطر آنها با زمان ملاحظه گردید. دو پدیده بسیار محتمل برای توجیه رشد اندازه قطرات: الف- به هم پیوستن ناشی از برخورد اتفاقی ذرات و ب- جذب یا الحاق قطرات کوچکتر به بزرگتر ناشی از پدیده به هم پیوستن قطرات^۴ [۲۷] می‌باشد. اگر به هم پیوستن ناشی از برخورد قطرات نیروی محرکه‌ای برای ناپایداری امولسیون باشد، تغییرات در اندازه قطرات با زمان توسط معادله زیر قابل توصیف می‌باشد [۲۸]:

$$1/r^2 = 1/r_0^2 - 8\pi/3\omega t \quad (1)$$

که Γ متوسط شعاع قطرات در لحظه t و Γ_0 شعاع قطرات نخستین و ω تعداد دفعات پاره شدن سطح قطرات در واحد زمان می‌باشد. رابطه فوق معمولاً برای سیستم‌های غلیظ مورد استفاده قرار می‌گیرد، اما می‌توان آن را برای نشان دادن اینکه ناپایداری امولسیون ناشی از به هم پیوستن قطرات هست یا نه، نیز به کار رود [۲۹].

مکانیزم دیگر پدیده به هم پیوستن قطرات برخاسته از اختلاف فشار داخلی قطرات با اندازه‌های مختلف می‌باشد. در این مکانیزم قطرات بزرگتر به هزینه از بین رفتن قطرات کوچکتر، با نفوذ مولکولی فاز پراکنده از طریق فاز پیوسته رشد می‌نمایند. تئوری WSL^5 یک رابطه ریاضی برای سرعت به هم پیوستن قطرات، (ω) پیشنهاد کرده که در معادله ۲ ارائه شده است [۳۰-۳۱]:

$$\omega = dr^3/dt = 8/9[(C_{\infty}\gamma V_m D/dRT)] \quad (2)$$

که Γ متوسط قطر قطرات، t زمان نگهداری محلول امولسیون، C_{∞} حلالیت فاز پراکنده در فاز پیوسته، γ کشش سطحی بین فاز پراکنده و محیط، V_m حجم مولی فاز پراکنده، D ضریب انتشار فاز پراکنده در فاز پیوسته، d دانسیته فاز آلی، R ثابت گازها و T دمای مطلق می‌باشند. یک نانو امولسیون پایدار لازم است دارای اندازه متوسط قطرات کوچک و ضریب به هم پیوستن قطرات بزرگ باشد.

دینامومتر قادر به اعمال بار در شرایط مختلف موتور بوده و دستگاه دارای دقت ۰/۱ نیوتن متر برای اندازه گیری گشتاور و ۱ دور در دقیقه و بصورت دیجیتالی می‌باشند. موتور و دینامومتر توسط یک کوپلینگ ارتجاعی و یک صفحه رابط به فلاپیول متصل گردیده است.

برای اندازه‌گیری گازهای آگروز از آنالایزر مدل MAXSYS 900 استفاده شد. این دستگاه اکسیدهای ازت را به روش نورتابی شیمیایی^۱ و مونو اکسید کربن و دی‌اکسید کربن را به روش آنالیز کننده مادون قرمز غیرپراکنده^۲ و هیدروکربن‌های نسوخته را به روش آشکار ساز یونیزه کننده شعله^۳ اندازه‌گیری می‌نماید. برای سنجش دود از دستگاه دودسنج ساخت کارخانه بوش آلمان استفاده شد. این دستگاه شامل یک دستگاه پمپ نمونه برداری از دود خروجی آگروز و یک دستگاه سنجش میزان دوده به روش نورتایی الکترونیکی است. دستگاه سوخت‌سنج مورد استفاده برای اندازه گیری مصرف سوخت نمونه‌ها از یک ترازوی دیجیتالی با دقت ۱ گرم و کورنومتر دیجیتالی با دقت ۱/۱۰۰ ثانیه استفاده شد. علاوه بر دستگاه‌های فوق که برای اندازه گیری و تعیین مشخصه‌های مختلف موتور به کار می‌رود، تجهیزات کنترلی دیگری نیز استفاده شده که عبارتند از: ترموکوپل برای مشاهده دمای گازهای خروجی موتور، روغن و آب، فشارسنج به منظور کنترل فشار روغن. برای کنترل دمای آب و روغن از یک فن جداگانه در جلو رادیاتور استفاده شد. در مواقع ضروری از پاشش آب سرد به بدنه کارتل جهت جلوگیری از افزایش غیر متعارف دمای روغن استفاده گردید.

نتایج و بحث

پایداری نانو امولسیون:

نانو امولسیون‌های آب در گازوئیل که در این تحقیق تهیه گردید از پایداری بسیار خوبی برخوردار بودند، به طوری که در طی مدت زمان دو هفته هیچ گونه جدایی فازی در آنها مشاهده

1. CLS
2. NDIR
3. FID

4. Ostwald ripening
5. Lifshitz-Slezov and Wanger

کاهش این سرعت (ω) با افزایش غلظت مواد فعال سطحی می‌تواند ناشی از اثرات زیر باشد [۳۴]:

۱. ضریب نفوذ مایسل‌ها با افزایش تعداد آنها کاهش می‌یابد زیرا افزایش تعداد باعث افزایش ویسکوزیته می‌شود.
۲. کاهش در اندازه متوسط قطر قطرات آب
۳. احتمال می‌رود که کلوئیدهای به هم چسبیده‌ای به غیر از مایسل‌ها در غلظت‌های نسبتاً بالا از مواد فعال سطحی تشکیل گردند.
۴. احتمال دارد ملکول‌های امولسیفایر تشکیل لایه‌ای ضخیم بدور قطرات امولسیون بدهند و از جابجایی ملکول‌های آب از قطرات به فاز مائی اطراف جلوگیری نمایند.
۵. قطرات نخستین تشکیل شده در غلظت‌های کم امولسیفایر به شکل ضعیفی مجتمع شده‌اند و احتمال می‌رود با ملکول‌های آب کمی تماس داشته باشند.

تاثیر نسبت آب در مخلوط گازوییل/آب بر اندازه نانو قطرات آب:

تغییرات اندازه قطرات آب برحسب نانومتر در مقابل زمان ماندگاری برای سیستم SE/آب/گازوییل، در غلظت‌های متفاوت امولسیفایر (۵ و ۸ درصد وزنی) در دمای ۳۰ درجه سانتیگراد به ترتیب در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است. از این شکل‌ها دیده می‌شود که اندازه قطرات فاز مائی (بر حسب نانومتر) با افزایش محتویات آب (از ۵ به ۱۴ درصد وزنی)، پس از ۳۶۰ ساعت ماندگاری روندی افزایشی (از ۱۹/۳ به ۲۷/۹ و در نهایت ۳۴ نانومتر) دارد. هنگامی که فاز مائی پراکنده در امولسیون افزایش می‌یابد، ضخامت فیلم سطحی کاهش خواهد یافت. بنابراین، افزایش درصد آب در امولسیون می‌تواند کاهش پایداری نانو امولسیون را سبب گردد [۳۵].

آلاینده‌های موتور دیزلی

تحقیقات فراوانی برای کاهش آلاینده‌ها و بهبود رانندگی تبدیل موتورهای دیزلی صورت گرفته است. نتیجه یکی از این

معادله ۲ منجر به یک رابطه خطی بین مکعب شعاع قطره (r^3) و زمان (t) می‌شود، همان‌طور که در شکل ۱ و ۲ نمایش داده شده است. سرعت به هم پیوستن قطرات از طریق شیب هر خط مستقیماً قابل محاسبه می‌باشد. اندازه قطر ذرات نخستین و نهایی و سرعت به هم پیوستن قطرات نانو امولسیون‌های تهیه شده در جدول ۲ و شکل‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ آورده شده است. نانو امولسیون بسیار شفاف با اندازه قطر قطرات ابتدایی ۱۹/۳ نانومتر با غلظت امولسیفایر ۰.۸٪ و محتویات آب ۰.۵٪ تشکیل گردید. اندازه قطرات این امولسیون در طی ۳۶۰ ساعت به تدریج به ۶۷/۲ نانومتر افزایش یافت. این پدیده را می‌توان به ناپایداری نانو ذرات نسبت داد، که طی آن نانو قطرات کوچک آب با مهاجرت به قطرات بزرگتر از طریق فاز پیوسته ناپدید می‌گردند [۳۲]. بنابراین سینتیک از بین رفتن نانو امولسیون‌ها را می‌توان به سرعت به هم پیوستن قطرات نسبت داد. همان‌طور که انتظار می‌رفت، این سرعت با افزایش در غلظت امولسیفایر از ۵ به ۰.۸٪ روندی کاهنده دارد.

تاثیر غلظت امولسیفایر

امولسیفایر نقش بسیار مهمی در فرمولاسیون نانو امولسیون‌ها بازی می‌کند. میزان انرژی لازم برای تشکیل نانو امولسیون را می‌توان از طریق فشار لاپلاس (P) در معادله (۳) دریافت، که R شعاع انحنای قطره‌ای است که با شکسته شدن به قطرات کوچکتر تبدیل می‌گردد.

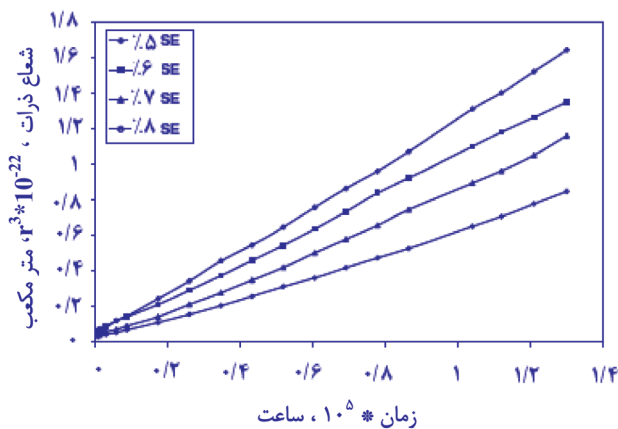
$$P = 2\gamma/R \quad (3)$$

پدیده‌های دیگری که در هنگام امولسیون‌سازی روی می‌دهند عبارتند از جذب مواد فعال سطحی بر سطح قطرات و نیز برخورد قطرات به یکدیگر که ممکن است به ادغام و یکی شدن قطرات منجر گردد [۱].

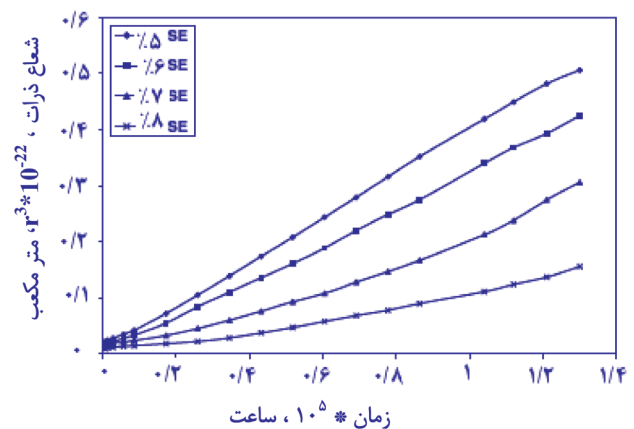
در مورد سرعت پدیده به هم پیوستن قطرات (ω)، همان‌طور که از شکل‌های ۱ و ۲ و نیز جدول ۴ استنباط می‌گردد ω با افزایش غلظت ماده فعال سطحی (از ۳/۹۴ تا $1/0.8 \times 10^{-21} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) در حضور ۰.۵٪ آب در گازوییل کاهش نشان می‌دهد، که این برخلاف بیشتر نتایج گزارش شده در منابع علمی می‌باشد [۳۳].

جدول ۴- تاثیر غلظت مواد فعال سطحی (SE) در شعاع اولیه (r_0) و سرعت (ω) در به هم پیوستن قطرات برای سوخت‌های نانو امولسیون‌ی حاوی مقادیر مختلف آب و غلظت مواد فعال سطحی در دمای 30°C [۳۶]

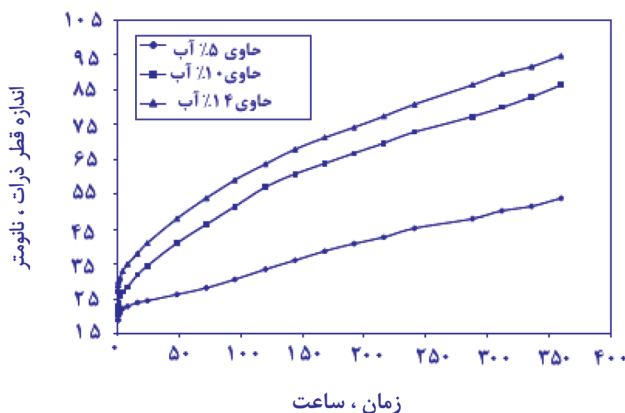
غلظت مواد فعال سطحی (SE)	آب همراه (درصد وزنی)	شعاع اولیه (r_0) نانو متر	سرعت (ω) ($\text{m}^3\text{s}^{-1} \cdot 10^{21}$)
۵	۵	۲۵	۰/۳۹۴
	۱۰	۳۰	۰/۷۲۸
	۱۴	۳۹	۱/۲۰۸
۶	۵	۲۳/۱	۰/۳۲۲
	۱۰	۲۷/۲	۰/۶۵۴
	۱۴	۳۴/۹	۱/۰۰۵
۷	۵	۲۲	۰/۲۰۸
	۱۰	۲۵	۰/۶۲۸
	۱۴	۳۱	۰/۸۵۰
۸	۵	۱۹/۳	۰/۱۰۸
	۱۰	۲۱	۰/۴۶۲
	۱۴	۲۷/۳	۰/۶۱۶



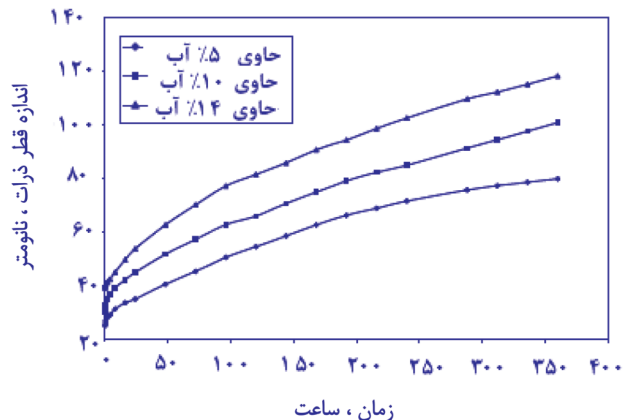
شکل ۲: نانو امولسیون r_3 نسبت به زمان در سیستم آب / مواد فعال سطحی (SE) / سوخت دیزلی حاوی ۱۴٪ آب، $HLB=10$ بامقادیر مختلف غلظت (SE) در دمای 30°C [۳۶]



شکل ۱: نانو امولسیون r_3 نسبت به زمان در سیستم آب / مواد فعال سطحی (SE) / سوخت دیزلی حاوی ۵٪ آب، $HLB=10$ بامقادیر مختلف غلظت (SE) در دمای 30°C [۳۶]



شکل ۴: قطر ذرات آب نسبت به زمان در سیستم آب / مواد فعال سطحی (SE) / سوخت دیزلی حاوی ۸٪ از مواد فعال سطحی (SE) $HLB=10$ در دمای 30°C [۳۶]

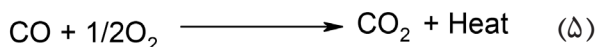


شکل ۳: اندازه قطر ذرات بر حسب زمان در سیستم آب / مواد فعال سطحی (SE) / سوخت دیزلی حاوی ۵٪ ماده فعال سطحی (SE)، $HLB=10$ در دمای 30°C [۳۶]

پدیده توسط زلدوریچ مورد بحث قرار گرفته است [۴۱-۴۲].

انتشار دی اکسید کربن

انتشار آلاینده دی اکسید کربن حاصل از احتراق سوخت گازوییل خالص و امولسیون‌های تهیه شده از آن که حاوی درصد‌های مختلفی از آب (۱۴٪، ۹٪، ۵٪) هستند، در یک موتور دیزلی که با سرعت ثابت ۱۵۰۰ دور بر دقیقه کار می‌کند نشان داده شده است (شکل ۵)، که میزان دی اکسید کربن انتشار یافته از امولسیون‌های آبدار سوخت گازوییل نسبت به گازوییل خالص بیش از ۵٪ افزایش نشان داده است. این افزایش می‌تواند ناشی از تاثیر دمای گاز و نسبت هوای ورودی در سیلندر موتور باشد که با اکسیداسیون مونواکسید کربن به دی اکسید کربن طبق معادله ۵ همراه است.



بدین ترتیب بالاتر بودن دمای گاز در حال سوختن باعث افزایش سرعت اکسیداسیون مونواکسید کربن به دی اکسید کربن و نتیجتاً انتشار دی اکسید کربن بیشتر و مونواکسید کربن کمتر در گازهای خروجی آگروز خواهد شد. احتراق سوخت امولسیونی E_1 که دارای قطرات آب ریزتری نسبت به E_3 می‌باشد، در مقایسه دمای گاز در حال سوختن بالاتری در سیلندر موتور ایجاد نموده و در نتیجه باعث پائین آوردن سرعت اکسیداسیون مونواکسید کربن به دی اکسید کربن می‌شود [۴۳]. همچنین، یک افزایش در انتشار دی اکسید کربن با ازدیاد محتویات آب سوخت نیز مشاهده شده است. افزایش یا کاهش بی رویه در انتشار دی اکسید کربن به طور کیفی قابل توجیه است (شکل ۵). برطبق اصل وانت هف و لی چاتلیر [۴۳]، فشار و دما اثرات متضادی بر میزان انتشار دی اکسید کربن دارند. به طوری که با افزایش دما، درصد انتشار دی اکسید کربن کاهش می‌یابد، در حالی که با افزایش فشار، میزان انتشار دی اکسید کربن افزایش نشان می‌دهد. بنابراین، افزایش درصد آب در سوخت امولسیونی که می‌تواند تاثیرات افزایشی یا کاهشی دما یا فشار بر گاز در حال سوختن داشته باشد، قادر است به بالا رفتن یا پائین آمدن مقدار انتشار دی اکسید کربن منجر گردد.

تلاش‌ها استفاده از قطرات ریز آب در سوخت گازوییل می‌باشد که توانسته هر دو هدف مورد نظر را با حفظ مسائل اقتصادی محقق سازد. در سوخت دیزل محتوی قطرات آب، اندازه قطرات یکی از مهم‌ترین فاکتورهای تعیین کننده خواص احتراق سوخت می‌باشد [۳۷]. عمده‌ترین آلاینده‌های اندازه‌گیری شده سوخت گازوییل امولسیونی مونواکسید کربن، اکسیدهای ازت و دی اکسید کربن می‌باشند که لازم است قبل از مقایسه توسط رابطه ۴ همسان سازی (نرمالیزه) شوند [۳۸].

$$E_B = ((21 - O_B / 21 - O_M)) \cdot E_M \quad (4)$$

E_M میزان انتشار اندازه گیری شده، E_B مقدار انتشار مربوط به غلظت اکسیژن ۳٪، O_M غلظت اکسیژن اندازه گیری شده (٪)، O_B غلظت اکسیژن مرجع (٪) می‌باشد.

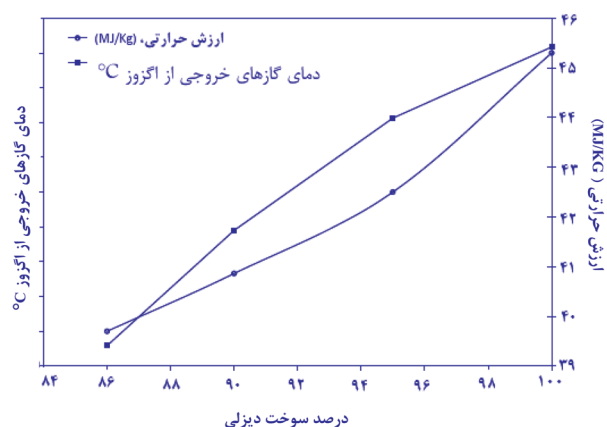
انتشار آلاینده‌های اکسیدهای ازت و مونواکسید نیتروژن

حضور آب در سوخت‌های دیزلی مشخص شده که باعث کاهش در انتشار مونواکسید نیتروژن، اکسیدهای ازت و دی اکسید کربن می‌گردد [۳۹-۴۰]، و این دلیل اصلی توجه به سوخت‌های نانو امولسیونی دیزلی می‌باشد. در گزارشات، حضور ۱۵٪ آب در سوخت دیزلی باعث کاهش اکسیدهای ازت به میزان ۳۵٪ در شرایط عادی اعلام گردیده است [۳۹]. تغییرات مونواکسید نیتروژن، اکسیدهای ازت انتشار یافته از موتوری با سرعت ثابت ۱۵۰۰ دور بر دقیقه که با سوخت‌های امولسیون‌های متفاوتی تغذیه شده در شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزایش مقدار کمی آب، میزان انتشار مونواکسید کربن و اکسیدهای ازت ابتدا افزایش می‌یابد. لیکن فراتر از آن، هرچه درصد آب در سوخت امولسیونی افزایش داده می‌شود میزان مونواکسید نیتروژن و اکسیدهای ازت کاهش می‌یابد. کاهش در انتشار مونواکسید نیتروژن و اکسیدهای ازت به هنگام به کارگیری مقادیر زیاد آب در سوخت ناشی از تبخیر مقدار قابل توجهی آب و در نتیجه جذب حرارت نهان تبخیر این مقدار آب از موتور می‌باشد که باعث افت موضعی دمای فرآیند احتراق آدیاباتیک می‌گردد که در نهایت از سرعت واکنش شیمیایی تشکیل مونواکسید نیتروژن می‌کاهد مکانیزم این

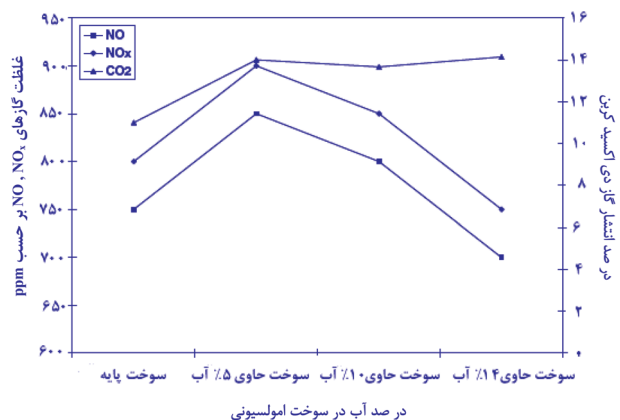
می‌باشد مورد مطالعه قرار گرفت. ارزش گرمایی برای سوخت گازوییل معمولی و سوخت‌های امولسیون‌ی که حاوی مقادیر متفاوتی آب هستند در شکل ۶ نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود یک کاهش منطقی و قابل انتظاری در ارزش حرارتی امولسیون‌ها با کاهش محتویات گازوییل یا افزایش آب در آنها مشاهده می‌شود [۳۷]. بدین ترتیب، کاهش ارزش حرارتی سوخت‌های امولسیون‌ی گازوییل/آب را می‌توان به دو عامل نسبت داد:

- ۱- کاهش در مقدار کل گازوییل موجود در سوخت امولسیون‌ی محترق شده در موتور
- ۲- بخشی از ارزش حرارتی سوخت امولسیون‌ی برای تبخیر آب آن صرف می‌گردد

این باعث شده که یک رابطه خطی بین ارزش حرارتی سوخت امولسیون‌ی با مقدار آب موجود در آن برقرار نباشد. با توجه به پائین تر بودن ارزش حرارتی این سوخت امولسیون‌ی نسبت به گازوییل (پایه) و استفاده ۱۴٪ آب و مواد افزودنی افزایش مصرف سوخت قابل پیش بینی می‌باشد. درصد افزایش آب در مخلوط سوخت نانو امولسیون‌ی همان طوری که در شکل ۶ ملاحظه می‌شود باعث کاهش ارزش حرارتی و دمای گازهای خروجی از اگزوز می‌شود که در نهایت این دو نمودار یکدیگر را در نقطه‌ای با درصد سوخت ۸۷٪ (که



شکل ۶: تاثیر میزان سوخت نانو امولسیون‌ی بر ارزش حرارتی و دمای گازهای خروجی از اگزوز [۳۶]



شکل ۵: میزان انتشار مونوکسید نیتروژن، اکسیدهای ازت و دی اکسید کربن بر حسب (ppm) برای سوخت‌های امولسیون‌ی که در موتور دیزلی با دور ۱۵۰۰ بر دقیقه مورد استفاده قرار گرفته است [۳۶]

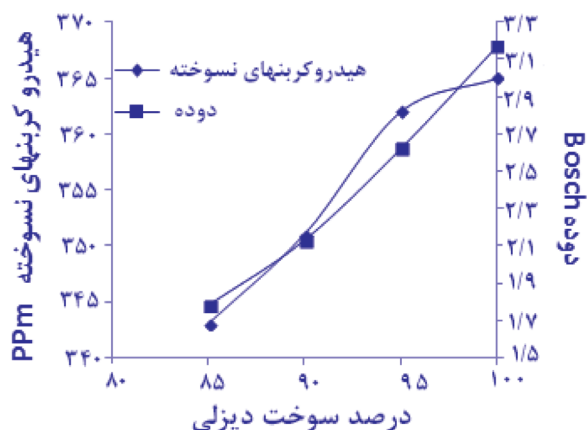
دمای گاز خروجی از اگزوز

دمای گاز خروجی از اگزوز موتور دیزلی که با سرعت ثابت ۱۵۰۰ دور بر دقیقه کار می‌کند برای نمونه‌های مختلف سوخت امولسیون‌ی در شکل ۶ نمایش داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود با افزایش درصد آب در سوخت امولسیون‌ی دمای اگزوز کاهش یافته و این کاهش دما احتمالاً به دلیل تشکیل قطرات بسیار ریز آب پخش شده در گازوییل و تبخیر ناگهانی این قطرات صورت گرفته که باعث پدیده شناخته شده هدر رفت گرما [۴۴].

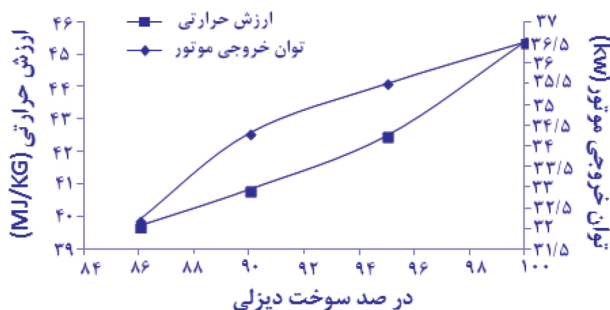
هنگامی که پدیده هدر رفتن گرما روی می‌دهد در واقع فاز آب داخل امولسیون جهت تامین گرمای نهان تبخیر خود بخشی از گرمای سیلندر را جذب نموده و باعث کاهش دمای گازهای حاصل از سوخت می‌گردد [۴۴]. این می‌تواند به دمای فرآیند آدیاباتیک پائین‌تر که بر طبق موازنه حرارت به دست می‌آید نسبت داده شود که به خاطر حرارت بالای تبخیر در امولسیون سوخت دیزل می‌باشد.

ارزش حرارتی

تاثیر محتوای آب بر ارزش گرمایی سوخت، که طبق تعریف مقدار حرارت تولید شده از احتراق کامل مقدار مشخصی سوخت



شکل ۷: تاثیر میزان سوخت نانو امولسیون بر انتشار هیدروکربنهای نسوخته و دوده



شکل ۸: تاثیر میزان سوخت نانو امولسیون بر ارزش حرارتی و توان خروجی موتور دیزلی

آزمایش، راندمان حرارتی موتور مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۹ تغییرات راندمان حرارتی موتور دیزل OM314 با سوخت‌های امولسیونی و گازوییل معمولی (پایه) را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل می‌توان گفت استفاده از سوخت‌های امولسیونی تأثیر قابل توجهی بر راندمان حرارتی موتور در شرایط تمام بار داشته و موجب بهبود آن شده است.

مصرف ویژه سوخت و گشتاور موتور دیزلی

در شکل ۱۰ نمودارهای تغییرات گشتاور موتور و مصرف ویژه سوخت در مقابل درصد گازوییل در مخلوط سوخت امولسیونی نشان داده شده‌اند. این نمودار نشان می‌دهد که مصرف سوخت موتور در آزمایش با سوخت‌های نانو امولسیون

معادل حضور ۱۳٪ آب در سوخت می‌باشد) قطع می‌کنند. ناحیه بین این دو منحنی ناحیه عملیاتی^۱ موتور را نشان می‌دهد که می‌توان در این ناحیه با تغییر درصد آب در سوخت دیزل موتور را به کار گرفت. در حالی که برای نقطه مذکور دو نمودار از یکدیگر دور شده و امکان به وجود آمدن ناحیه عملیاتی برای کارکرد موتور فراهم نمی‌باشد به عبارت دیگر نباید میزان آب در سوخت بیشتر از ۱۳٪ گردد.

دوده و هیدروکربن‌های نسوخته

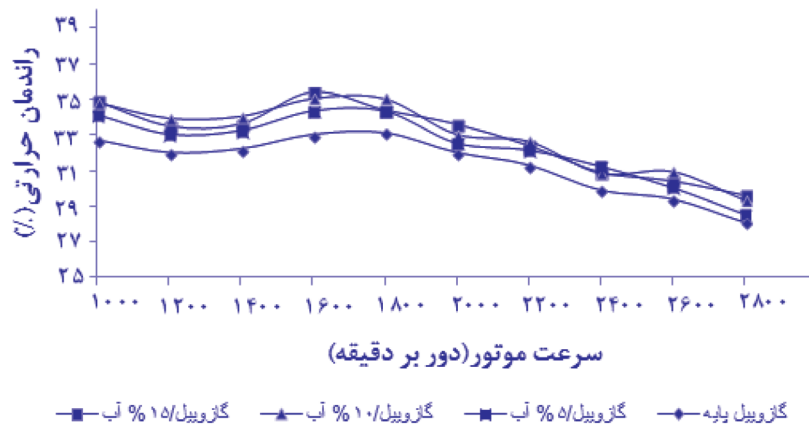
با توجه به شکل ۷ سوخت‌های نانو امولسیون گازوییل با میزان حدود ۵،۱۰، ۱۴ درصد آب به ترتیب ۳۲/۸٪، ۴۳/۹٪ دوده خروجی از آگروز موتور دیزل را نسبت به گازوییل معمولی (پایه) کاهش داده و تأثیر آن نیز بر کاهش هیدروکربن‌های نسوخته نسبت به سوخت پایه در حدود ۶-۱ بوده است.

ارزش حرارتی و توان خروجی موتور

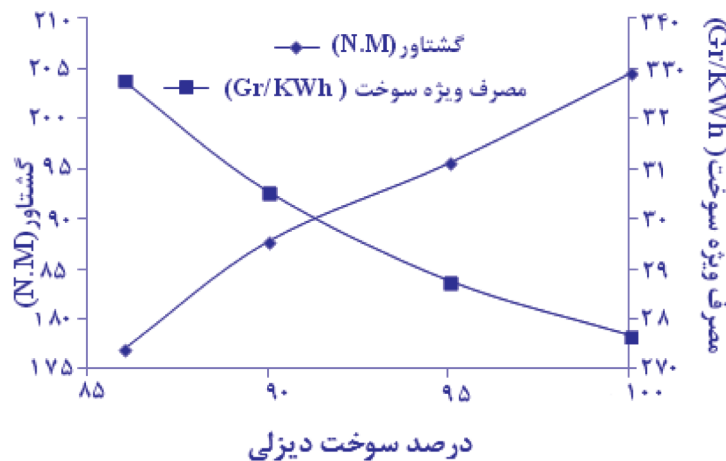
در شکل ۸ کاهش ارزش حرارتی سوخت موجب افت قدرت موتور گردیده است که این ناشی از وجود آب و مواد افزودنی در سوخت می‌باشد. حضور آب در سوخت گرچه بهبود کیفیت احتراق در اثر انفجار میکرو و افزایش راندمان حرارتی، را موجب می‌شود لیکن افت قدرت موتور را نیز به دنبال دارد.

بررسی تاثیر سوخت‌های امولسیونی بر راندمان حرارتی موتور دیزل

راندمان حرارتی ترمزی، میزان بهره‌دهی حرارت آزاد شده در فرایند احتراق و تولید قدرت ترمزی را نشان می‌دهد که بستگی به توان خروجی موتور، آهنگ دبی سوخت مصرفی و ارزش حرارتی آن دارد. چون ترکیب سوخت نقش مهمی در ارزش حرارتی سوخت دارد در نتیجه تأثیر مستقیم بر راندمان حرارتی موتور خواهد داشت و موجب تغییر محسوسی در آن می‌شود. به دلیل تغییر ترکیب سوخت‌های امولسیونی مورد



شکل ۹: مقایسه تغییرات راندمان حرارتی موتور دیزل با سوخت‌های نانوامولسیونی نسبت به سوخت پایه (گازوئیل)



شکل ۱۰- مقایسه مصرف ویژه سوخت و گشتاور موتور با سوخت پایه (گازوئیل)

بررسی تأثیر سوخت‌های نانوامولسیون گازوئیل/آب بر

قطعات موتور

مشاهدات و بررسی‌های بلند مدت سوخت‌های نانو امولسیونی گازوئیل/آب نشان می‌دهد که امکان جدا شدن آب از سوخت وجود داشته که خطر خوردگی قطعات فلزی و تخریب اجزای پلیمری را به دنبال دارد لذا توصیه می‌شود مطالعات و بررسی‌های زیر در این راستا انجام پذیرد.

الف) سوخت‌های امولسیون گازوئیل/آب بر خواص قطعات پلیمری تأثیر دارند و نیازمند بررسی بیشتر خواص فیزیکی و

گازوئیل/آب افزایش یافته و منحنی تغییرات مصرف ویژه سوخت موتور حاکی از پائین‌تر بودن ارزش حرارتی این سوخت‌های نانو امولسیونی نسبت به گازوئیل (پایه) بوده است. لازم به ذکر است که بر اساس نتایج حاصل از آزمایش‌ها در شرایط تمام بار موتور با تغییرات سوخت از گازوئیل معمولی به سوخت نانو امولسیون گازوئیل/آب موجب کاهش توان و گشتاور موتور شده و مصرف ویژه سوخت افزایش یافته است که این مهم با افزایش آب و مواد افزودنی به سوخت، قابل پیش بینی می‌باشد.

مکانیکی آنها می‌باشد.

ب) سوخت‌های امولسیون گازوییل/آب موجب بروز خوردگی موضعی در قطعات فلزی می‌شوند و لذا نیازمند استفاده از مواد بازدارنده خوردگی مناسب به هنگام استفاده از سوخت‌های مذکور می‌باشد.

نتیجه گیری

پایداری سوخت‌های نانو امولسیونی در این تحقیق با اندازه‌گیری متوسط قطر قطرات آب و دنبال کردن نحوه تغییرات آن با زمان مورد بررسی قرار گرفت. مشخص شد با افزایش غلظت مواد فعال سطحی (از ۵ تا ۸٪ وزنی، در مخلوط سوخت گازوییل/آب / مواد فعال سطحی) در محدوده محتویات آب مطالعه شده (۵ تا ۱۴٪)، تغییرات اندازه قطرات با زمان روند متفاوتی دارند. به طوری که رشد اندازه قطرات در غلظت‌های بیشتر مواد فعال سطحی کندتر از حالتی است

منابع

که غلظت‌های کمتر استفاده می‌شوند. همچنین میزان انتشار آلاینده‌های آگروز سوخت‌های نانو امولسیونی اندازه‌گیری گردید و مشخص شد غلظت اکسیدنیتریک کمتر و دی‌اکسیدکربن بیشتری به هنگام احتراق سوخت‌های نانو امولسیونی در مقایسه با سوخت‌های گازوییلی معمولی به‌وجود می‌آید. ضمناً ارزش حرارتی سوخت‌های نانو امولسیونی و دمای گاز خروجی از آگروز موتور به هنگام احتراق آنها کمتر از سوخت گازوییل معمولی می‌باشد. همچنین مشخص شد، میزان اثر بخشی این سوخت‌ها در کاهش انتشار هیدروکربن‌های نسوخته و دوده در مقایسه با سوخت پایه به ترتیب حدود ۶٪ و ۴۴٪ بوده است. نتایج حاصل از داده‌های تجربی در این تحقیق نشان می‌دهد گرچه احتراق سوخت‌های نانو امولسیونی در موتور دیزل باعث کاهش مختصری در توان موتور و بیشینه گشتاور تولید شده توسط آن می‌شود لیکن این نوع سوخت‌ها از پتانسیل بسیار بالایی برای بهبود عملکرد و کاهش آلاینده‌ای موتور برخوردار می‌باشند.

1. Lee GWJ, Tadros TF, Formation and stability of emulsions produced by dilution of emulsifiable concentrates, Part I. An investigation of the dispersion on dilution of emulsifiable concentrates containing cationic and non-ionic surfactants. *Colloids Surf* 5, 1982, pp.105–115.
2. Sagitani H, Friberg S, Lindman B, Emulsion and emulsion stability, Marcel Dekker, New York, 1992, pp.259–271.
3. Forgiarini A, Esquena J, Gonzalez C, Solans C, Formation of nanoemulsions by low energy emulsification methods at constant temperature, *Langmuir* 17, 2001, pp.2076–2083.
4. Wang L, Li X, Zhang G, Dong J, Eastoe J, Oil-in-water nanoemulsions for pesticide formulations. *J Colloid Interface Sci* 314, 2007, pp.259–271.
5. Ruckenstein E, Chi JC, Introduction to micro- and macroemulsions. *J Chem Soc Faraday Trans* 71, 1960, pp.2-7.
6. Sole I, Maestro A, Gonzalez C, Solans C, Jose, M Optimization of nanoemulsion preparation by low-energy methods in an ionic surfactant system, *Langmuir* 22, 2006, pp.8326–8332.
7. Shinoda K, Saito H, The effect of temperature on the phase equilibria and the types of dispersions of the ternary system composed of water, cyclohexane, and nonionic surfactant, *J Colloid Interface Sci* 26, 1968, pp.70–74.
8. Solans C, Izquierdo P, Noll J, Azemer N, Garcia MJ, Nanoemulsions, *Curr Opin Colloid Interface Sci* 10, 2005, pp.102–110.
9. Fernandez P, Andre´ V, Riegger J, Ku`hnle A, Nanoemulsion formation by emulsion phase inversion, *Colloids Surf A* 251, 2004, pp.53-58.

10. Landfester K, Willert M, Antonietti M, Preparation of polymer particles in non-aqueous direct and inverse miniemulsions. *Macromolecules*, 33(7), 2000, pp.2370-2376.
11. Wu H, Ramachandran C, Weiner ND, Roessler BJ, Topical transport of hydrophilic compounds using water-in-oil nanoemulsions, *Int J Pharm* 220, 2001, pp.63-75.
12. Uson N, Garcia MJ, Solans C, Formation of water-in-oil nanoemulsions in a water/mixed non-ionic surfactant/oil system prepared by a low-energy emulsification method, *Colloid Surf A250*, 2004, pp.415-421.
13. Tadros TF, Izquierdo P, Esquena J, Solans C, Formation and stability of nanoemulsions, *Adv Colloid Interface Sci* 108-109, 2004, pp.303-31.
14. Forgiarini A, Esquena J, Gonzalez C, Solans C, Formation and stability of nanoemulsions in mixed non ionic surfactants systems, *Progr Colloid Polym Sci* 118, 2001, pp.184-189.
15. Shinoda K, Kunieda H, Phase properties of emulsion: PIT and HLB. In: Becher P (ed). *Encyclopedia of emulsion technology*, vol 1, Basic theory. Marcel Dekker, NY, 1983, pp.337-367.
16. Kentish S, Wooster TJ, Ashokkumar M, Balachandran S, Mawson, Simons L The use of ultrasonics for nanoemulsion preparation. *Innov Food Sci Emerg Technol* 9, 2008, pp.170-175.
17. Izquierdo P, Esquena J, Tadros TF, Dederen JC, Feng J, Maria JG, Azemar N, Solans C, Phase behavior and nanoemulsion formation by the phase inversion temperature method. *Langmuir* 20, 2004, pp.6594-6598.
18. Lin CY, Wang KH, Effects of a combustion improver on diesel engine performance and emission characteristics when using threephase emulsions as an alternative fuel, *Energy Fuel* 18, 2004, pp.477-484.
19. Bertola A, Li R, Boulouchos K, Influence of water-dieselfuel emulsions and EGR on combustion and exhaust emissions of heavy duty DI diesel engines equipped with common-rail injection system. *SAE paper tech Nr 2003-01-3146*, 2003.
20. Barnaud F, Schmelsle P, and Schulz P, Aquazole: an originalemulsified water diesel fuel for heavy-duty applications, *SAE Paper 2000-01-1861*, 2000.
21. Anna L, Krister H, Water-in-diesel emulsions and related systems. *Adv Colloid Interface Sci* 123-126:231-239, 2006.
22. Chen G, Tao D, An experimental study of stability of oilwater emulsion. *Fuel Process Technol* 86, 2005, pp.499-508.
23. Liu X, Guan Y, Ma Z, Liu H, Surface modification and characterization of magnetic polymer nanospheres prepared by miniemulsion polymerization. *Langmuir* 20, 2004, pp.10278-10282.
24. Wang CH, Law CK. 1983 Fall Meeting of the Western State Section of the Combustion Institute. *Combustion Institute (paper)*. Pittsburgh, PA, USA: Combustion Inst: 1983.
25. Wang CH, Law CK. *Combust Flame* 1985;59:53.
26. Wang C-H, Chen J-T, *Int Commun Heat Mass Trasfer* 1996; 23; 823.
27. Taylor P., Ostwald ripening in emulsions. *Adv Colloid Interface Sci* 75, 1998, pp.107-163.
28. Deminiere B In: Brinks BP (ed), *Modern aspects of emulsion science*, The Royal Society of Chemistry, Cambridge, UK, 1998, pp.261-291.
29. Taha EI, Al-Saidan S, Samy AM, Khan MA, Bioavailability assessment of salbutamol sulfate suppositories in human volunteers, *Int J Pharm* 279, 2004, pp.3-7.
30. Lifshitz IM, Slyozov VV, The kinetics of precipitation from supersaturated solid solutions. *J Phys Chem Solids* 19, 1961, pp.3-7.
31. Wagner CZ, Theory of precipitate change by redissolution, *Elektrochem* 65, 1961, pp.581-591.

32. Sajjadi SH., Bioavailability assessment of salbutamol sulfate suppositories in human volunteers. *Int J Pharm* 279, 2004, pp.581-591.
33. Capek I, Degradation of kinetically-stable O/W emulsions. *Adv Colloid Interface Sci* 107, 2004, pp.130–155.
34. Binks BP, Clint JH, Fletcher PDI, Rippon S, Kinetics of swelling of oil-in-water emulsion stabilized by different surfactants. *Langmuir* 15x, 1999, pp.130–155.
35. Porrasa M, Solans C, Gonzalez C, Martinez A, Guinart A, Gutierrez JM, Studies of formation of w/o nanoemulsions. *Colloids Surf A* 249, 2004, pp.115–118.
36. Al-Sabagh A. M., Emara M. M., Noor El-Din M. R., Aly W. R., Water-in-Diesel Fuel Nanoemulsions Prepared by high Energy: Emulsion Drop Size and Stability, and Emission Characteristics, *J Surfact Deterg*, 15, 2012, pp.139-145.
37. Lee GWJ, Tadros TF, Formation and stability of emulsions produced by dilution of emulsifiable concentrates, Part I. An investigation of the dispersion on dilution of emulsify able concentrates containing cationic and nonionic surfactants. *Colloids Surf A* 5x, 1982.
38. Park W, Huh KY, Park KH, Reduction of NO_x, smoke and brake specific fuel consumption with optimal injection timing and emulsion ratio of water-emulsified diesel. *Proc Inst Mech Eng* 215, 2000, pp.83–93.
39. Alahmer A, Yamin J, Sakhrieh A, Hamdan MA, Engine performance using emulsified diesel fuel. *Energy Convers Manag* 51x, 2010, pp.83–93.
40. Abu-zaid M, Performance of single cylinder-direct injection diesel engine using water fuel emulsions. *Energy Convers Manag* 45, 2003, pp.697–705.
41. Alahmer A, Yamin J, Sakhrieh A, Hamdan MA, Engine Performance using emulsified diesel fuel. *Global conference on renewable and energy efficiency for desert regions (GCREEDER) 2009*, Amman, Jordan.
42. Lin CY, Chen LW, Comparison of fuel properties and emission characteristics of two- and three-phase emulsions prepared by ultrasonically vibrating and mechanically homogenizing, 2008.
43. Le Chatelier HL, On the law of the chemical shift of the equilibrium, *Rep Acad Sci* 196x, 1933, pp.697–705.
44. Lin CY, Wang KH, Diesel engine performance and emission characteristics using three-phase emulsions as fuel, *Fuel* 83, 2004, pp.537–545.