

## پیش بینی خواص فیزیکی و مشخصات قطره‌سازی زیست سوخت به دست آمده از ریز جلبک کلامیدوموناس

امیر امیدوار<sup>۱\*</sup> و الهام امینی<sup>۲\*\*</sup>

۱- دانشگاه صنعتی شیراز، بخش مهندسی مکانیک و هوافضا

۲- دانشگاه علوم پزشکی شیراز، بخش میکروبی‌شناسی

در این نوشتار خواص فیزیکی و مشخصات قطره‌سازی (Atomization) زیست سوخت به دست آمده از ریز جلبک کلامیدوموناس (*Chlamydomonas*) بررسی و مطالعه شده است. به تازگی گونه (*species*) خاصی از ریزجلبک کلامیدوموناس با نام MCCS 026 در برخی نواحی جنوبی ایران (استان فارس) شناسایی شد که پتانسیل تولید زیست سوخت را دارد. بر طبق تحقیقات فیزیولوژیکی- مولکولی انجام شده، این گونه خاص جلبکی علاوه بر نرخ سریع رشد و ظرفیت چربی مطلوب و قابل قبول، محیط کشت بسیار ساده و ارزان قیمتی دارد به طوری که حتی در شرایط اقلیمی ایران به طور طبیعی نیز قابل رشد و تکثیر است. علی‌رغم تمام این ویژگی‌ها، برای اطمینان از عملکرد مطلوب زیست سوخت جدید در موتورهای احتراق تراکمی لازم است خواص فیزیکی و خصوصیات قطره‌سازی این سوخت مورد بررسی قرار گیرد. در تحقیق حاضر برای اولین بار خواص فیزیکی و خصوصیات قطره‌سازی زیست سوخت جدید به طور تحلیلی مطالعه شده است. نتایج نشان داد که سوخت به دست آمده از این گونه جلبکی خواص بسیار مشابهی با سوخت دیزل فسیلی دارد. تحلیل فرآیند قطره‌سازی سوخت نیز حاکی از این است که زیست سوخت جدید نسبت به برخی از زیست سوخت‌های مرسوم و مورد استفاده در اروپا و آمریکا از جمله سویا و کانولا متیل استر عملکرد بسیار مطلوب‌تری دارد. همچنین بررسی‌ها نشان داد که زیست سوخت جدید نسبت به زیست سوخت به دست آمده از برخی ریز جلبک‌های مرسوم دیگر در تولید زیست سوخت مانند کلرلا (*Chlorella*) نیز از کیفیت بالاتری برخوردار است.

**کلید واژه:** زیست سوخت، ریزجلبک، کلامیدوموناس، قطره‌سازی، خواص فیزیکی

### مقدمه

محدودیت منابع انرژی و خطرات زیست محیطی ناشی از استفاده بیش از حد از سوخت‌های فسیلی باعث شده است که در سال‌های اخیر توجه بیشتری به بحث انرژی پاک و منابع تجدید پذیر انرژی شود. امروزه زیست سوخت‌ها به عنوان یکی از جایگزین‌های مناسب برای سوخت‌های فسیلی مطرح هستند. زیست سوخت‌ها مخلوطی از مونو آلکیل استرهای زنجیره‌های اسیدهای چرب هستند که معمولاً از فرآیند استریفیکاسیون (Esterification) روغن‌های گیاهی و یا چربی‌های حیوانی به دست می‌آیند. بررسی‌ها نشان داده است که نمی‌توان از روغن‌های گیاهی به طور مستقیم به عنوان جایگزین مناسبی برای سوخت دیزل استفاده کرد. جرم مولکولی زیاد روغن‌های گیاهی و گرانروی (Viscosity) نسبتاً زیاد آن‌ها استفاده از روغن‌های مذکور را به عنوان سوخت دیزل محدود می‌کند [۱]. روش‌ها و فرآیندهای مختلفی برای کاهش گرانروی روغن‌های گیاهی وجود دارد که از آن جمله می‌توان به رقیق‌سازی (Dilution)، گرماکافت (Pyrolysis) و فرآیند استریفیکاسیون اشاره کرد. در بین روش‌های مذکور فرآیند استریفیکاسیون بیشتر از سایر روش‌ها استفاده می‌شود.

زیست سوخت‌ها ویژگی‌های ارزنده‌ای دارند که آن‌ها را به عنوان جایگزین‌های مناسبی برای سوخت‌های فسیلی مطرح کرده است. سوخت‌های زیستی غیر سمی هستند، در طبیعت به راحتی تجزیه می‌شوند و سازگاری زیادی با محیط زیست

\* استادیار - نویسنده مخاطب (ایمیل: [omidvar@sutech.ac.ir](mailto:omidvar@sutech.ac.ir))

\*\* کارشناس ارشد (ایمیل: [elham.amini@gmail.com](mailto:elham.amini@gmail.com))

دارند. همچنین بررسی‌ها نشان داده است که استفاده از سوخت‌های زیستی باعث کاهش آلاینده‌ها از جمله مونوکسید کربن، دی اکسید گوگرد، هیدروکربن‌های سوخته نشده و ذرات معلق می‌شود [۱-۴]. تقریباً ده درصد وزنی سوخت‌های زیستی را اکسیژن تشکیل می‌دهد. وجود چنین سهمی از اکسیژن در ساختار زیست سوخت‌ها باعث بهبود فرآیند احتراق و کاهش آلاینده‌هاست [۵]. در ترکیب زیست سوخت‌ها گوگرد، ترکیبات آروماتیک و ترکیبات فلزی وجود ندارد. نبود گوگرد در ساختار زیست سوخت‌ها علاوه بر حذف اکسیدهای گوگردی در هوا، از اثرات خوردگی ناشی از ترکیبات گوگردی در داخل موتور نیز می‌کاهد [۶]. همچنین زیست سوخت‌ها عملیات روغنکاری و روانسازی را در موتور بهبود می‌دهند. معمولاً سوخت‌های فسیلی مشکلات روانکاری را به دنبال دارند. این مشکل ریشه در فرآیند گوگردزدایی سوخت دارد. اغلب در طی عملیات گوگردزدایی ترکیبات قطبی هتروسایکلک نیتروژن که نقش عمده‌ای در بهبود روانکاری دارند همراه با گوگرد حذف می‌شوند. در کنار مزیت‌های بسیار زیاد سوخت‌های زیستی، این سوخت‌ها معایبی نیز دارند. یکی از نقاط ضعف این گونه سوخت‌ها در زمان شروع به کار موتور در محیط‌های سرد رخ می‌دهد. در چنین شرایطی زیست سوخت کمی حالت ژلاتینی به خود گرفته و پمپاژ آن با مشکل روبرو می‌شود. البته این نقص به راحتی با اضافه کردن افزودنی‌های خاصی به سوخت برطرف می‌شود. همچنین به دلیل وجود اکسیژن بیشتر در زیست سوخت‌ها، دمای احتراق آن‌ها نیز به مراتب بالاتر از سوخت‌های فسیلی است. این امر احتمال وجود اکسیدهای نیتروژن را در آلاینده‌های خروجی موتور افزایش می‌دهد [۵]. این مشکل را نیز می‌توان با تنظیم زمان‌بندی پاشش سوخت تا حد زیادی مرتفع کرد [۲].

زیست سوخت‌ها را بیشتر از منابع گیاهی مانند دانه‌های روغنی، چربی‌های حیوانی [۷]، پساب و یا فاضلاب‌هایی که منبع آلی دارند و یا حتی از پسماند روغن‌های خوراکی [۲ و ۳] به دست می‌آورند. در آمریکا روغن سویا یکی از مهم‌ترین منابع تولید سوخت سبز (زیست سوخت) است [۸ و ۹]. روغن کانولا، خرما، ذرت و نارگیل از جمله دیگر منابع مرسوم تولید زیست سوخت در کانادا و اروپا هستند [۸]. در بعضی از کشورها از روغن آفتابگردان [۱۰] و حتی روغن به دست آمده از دانه‌های گوجه فرنگی [۱۱] برای تولید زیست سوخت استفاده می‌شود. بیشتر منابع مذکور به دلیل فراورش کم و بازدهی اندک، برای تولید زیست سوخت به صورت دائمی و در مقیاس زیاد مناسب نیستند. اخیراً تحقیقات بسیار گسترده‌ای در زمینه امکان استفاده از ریز جلبک‌ها به عنوان تنها منابع تولید زیست سوخت در مقیاس انبوه انجام شده است. پژوهش‌ها نشان داده است که ریز جلبک‌ها علاوه بر ارزش غذایی بالا، منابع خوبی برای تولید زیست سوخت نیز هستند [۱۲-۱۵]. ریز جلبک‌ها در محیط‌های کنترل شده می‌توانند در همه اقلیم‌ها رشد کنند. به علاوه میزان روغن تولید شده از آن‌ها در واحد سطح محیط زیر کشت تقریباً ۲۰۰ برابر بهترین منابع گیاهی مرسوم است [۱۶]. تاکنون گونه‌های مختلفی از جلبک‌های میکروسکوپی از جمله کلرلا (*Chlorella*) و دونالیلا (*Dunaliella*) با هدف تولید سوخت بررسی شده‌اند [۱۲ و ۱۳].

به تازگی در یک تحقیق جدید گونه‌ای خاص از ریزجلبک کلامیدوموناس (*Chlamydomonas*) با نام MCCS 026 در بخش‌هایی از استان فارس شناسایی و استخراج شد [۱۶]. درصد چربی این ریز جلبک تقریباً ۲۵ درصد است که در مقایسه با سایر گونه‌های ریزجلبکی مرسوم برای تولید زیست سوخت در خارج از کشور مانند کلرلا (۲۸-۳۲ درصد چربی) و دونالیلا (۲۳ درصد چربی) درصد قابل قبولی است [۱۲ و ۱۴]. از جمله امتیازاتی که این گونه جلبکی را از گونه‌های مشابه متمایز می‌سازد؛ نرخ سریع رشد، و سادگی و ارزان بودن محیط کشت این جلبک است [۱۶]. اگرچه از نظر فیزیولوژیکی و مولکولی (نوع و کیفیت اسیدهای چرب موجود)، پتانسیل تولید سوخت سبز از این گونه خاص از جلبک میکروسکوپی به اثبات رسیده است [۱۶] ولی برای اطمینان از اینکه سوخت به دست آمده از این ریزجلبک می‌تواند جایگزین مناسبی برای سوخت‌های مرسوم باشد باید خواص فیزیکی سوخت تولید شده بررسی شده و با سوخت‌های فسیلی و برخی از زیست سوخت‌های مرسوم مقایسه شود. همچنین لازم است خواص قطره‌سازی (*Atomization*) سوخت جدید نیز بررسی شود. در موتورهای دیزل، فرآیند قطره‌سازی و ساختار اسپری سوخت نقش مهمی را در تشکیل مخلوط قابل اشتعال و بازدهی احتراق ایفا می‌کند. بررسی‌ها نشان داده است که این ویژگی‌ها تا حد زیادی به برخی از خواص فیزیکی سوخت از جمله گرانش و کشش سطحی آن

بستگی دارد [۱۷]. از سوی دیگر در سوخت‌های زیستی خواص فیزیکی به شدت به نوع اسیدهای چرب به کار رفته در ترکیب سوخت وابسته است [۱۸].

در این تحقیق برای اولین بار خواص فیزیکی زیست سوخت جدید به روش کاملاً تحلیلی و با محاسبه شاخص‌های توپولوژیکی (Topological) اجزای تشکیل دهنده آن برآورد شده است. در ادامه، برخی از شاخص‌های ماکروسکوپیکی مهم اسپری سوخت از جمله طول نفوذ اسپری و متوسط قطر قطرات برای زیست سوخت جدید محاسبه و با برخی زیست سوخت‌های گیاهی مرسوم مقایسه شده است.

### برآورد خواص فیزیکی زیست سوخت جدید

برای برآورد خواص فیزیکی مهم زیست سوخت جدید لازم است قبل از هر چیز نوع و درصد وزنی مونو استرهای موجود در سوخت مشخص شوند. بدین منظور پس از جداسازی اسیدهای چرب موجود در ریزجلیک کلامیدوموناس، فرآیند استریفیکاسیون اسیدهای چرب انجام می‌شود. سپس تحلیل کیفی انواع استرهای موجود با روش کروماتوگرافی گازی و طیف سنجی جرمی (GC/MS) انجام می‌شود. اطلاعات دقیق‌تر در مورد نحوه تولید زیست سوخت جدید در مرجع [۱۶] به تفصیل منعکس شده است. خلاصه‌ای از لیست متیل استرهای اسید چرب شناسایی شده در زیست سوخت جدید در جدول (۱) آمده است.

جدول ۱- لیست متیل استرهای اسید چرب شناسایی شده در زیست سوخت جدید [۱۶]

درصد	متیل استر اسید چرب
۸/۱	نونانوئیک اسید متیل استر
۹/۸	دوکوزانوئیک اسید متیل استر
۴/۲	دودکانوئیک اسید متیل استر
۶/۶	تترادکانوئیک اسید متیل استر
۵/۶	هگزادکانوئیک اسید متیل استر
۸/۳	تتراکوزانوئیک اسید متیل استر
۱۲/۳	ایکوزانوئیک اسید متیل استر
۱۹/۱	هنیکوزانوئیک اسید متیل استر
۵/۴	پنتادکانوئیک اسید متیل استر

با در دست بودن چنین اطلاعاتی تنها کافی است رابطه‌ای بین خواص فیزیکی و ساختار مولکولی اجزای تشکیل دهنده سوخت برقرار شود. بدین منظور لازم است متغیرهای ساختاری و شاخص‌های توپولوژیکی هر یک از اجزاء سوخت جداگانه محاسبه شوند. شاخص‌های توپولوژیکی اطلاعات اساسی ساختار مولکول مانند اندازه مولکول، باند غیر اشباع و درجه شاخه را بیان می‌کنند. در نهایت نیز شاخص توپولوژیکی سوخت اصلی به صورت ترکیبی از شاخص‌های تک تک اجزا محاسبه می‌شود. از روی متغیر ساختاری و شاخص توپولوژیکی سوخت می‌توان برخی از خواص فیزیکی مهم مانند کشش سطحی و گرانیوی دینامیکی را برای زیست سوخت مورد نظر محاسبه کرد.

### محاسبه کشش سطحی

برای محاسبه کشش سطحی ( $\sigma$ ) بر حسب ( $mN/m$ ) می‌توان از رابطه پیشنهاد شده توسط آلن [۲۰ و ۱۹] استفاده کرد:

$$\sigma = \left( \frac{[P] \cdot (\rho_l - \rho_v)}{M} \right)^4 \quad (1)$$

که  $M$  و  $\rho_v$ ،  $\rho_l$  به ترتیب چگالی مایع، چگالی بخار و جرم مولکولی سوخت هستند. در دماهای کمتر از دمای جوش می‌توان از  $\rho_v$  صرف نظر کرد.  $[P]$  که یک متغیر مستقل از دماست تحت عنوان متغیر پاراکور (Parachor) نامیده می‌شود. در واقع این

متغیر ساختار مولکولی را به کشش سطحی ربط می‌دهد و مقدار آن برای مولکولی با ساختار مشخص و معین ثابت است. مقادیر  $[P]$  بر اساس نوع پیوندهای ترکیب شیمیایی ماده از جدول (۲) به دست می‌آید.

جدول ۲- مقدار متغیر پاراکور بسته به نوع پیوند شیمیایی [۱۹]

گروه/ جزء	$[P]$
C (به جز در $\text{CH}_2$ )	۴/۸
H (متصل به O)	۱۱/۳
H (متصل به C)	۱۷/۱
$-\text{CH}_2-$	۳۹/۰
پیوند دوگانه (اتیلنیک)	۲۳/۲
پیوند سه گانه	۴۶/۶
O در استر یا در $-\text{COO}-$	۶۰/۰

کشش سطحی مخلوط (زیست سوخت) را می‌توان از طریق فرمول زیر محاسبه کرد [۲۱]:

$$\sigma_m = \left[ \sum_{i=1}^n y_i \cdot \sigma_i^{0.25} \right]^4 \quad (۲)$$

که  $y_i$  و  $\sigma_i$  به ترتیب کسر جرمی و کشش سطحی هر یک از اجزای تشکیل دهنده مخلوط هستند.  $n$  نیز تعداد اجزای تشکیل دهنده مخلوط است.

### محاسبه گر انرژی سوخت

برای محاسبه گر انرژی دینامیکی زیست سوخت‌ها می‌توان از رابطه (۳) استفاده کرد [۲۲]:

$$\mu = 5.96249\chi_m - 10.08814 \quad (۳)$$

در این رابطه  $\chi_m$  شاخص توپولوژیکی مخلوط سوخت است که مقدار آن بسته به شاخص توپولوژیکی هر یک از متیل استرهای اسید چرب تشکیل دهنده سوخت ( $\chi_i$ ) به دست می‌آید. رابطه‌های (۴) و (۵) برای محاسبه  $\chi_m$  پیشنهاد شده است [۲۲]:

$$\ln \chi_m = \sum_{i=1}^n y_i \ln \chi_i \quad (۴)$$

$$\chi_m = \sum_{i=1}^n y_i \chi_i \quad (۵)$$

مقدار شاخص توپولوژیکی هر یک از متیل استرهای تشکیل دهنده سوخت بسته به تعداد کربن‌های موجود در ترکیب در برخی از مراجع گزارش شده است [۲۳]. در موارد خاص نیز می‌توان این شاخص را از روابط ساختارشناسی مولکولی محاسبه کرد. جزئیات و نحوه محاسبه شاخص توپولوژیکی ماده به تفصیل در مراجع [۲۳] تا [۲۵] آمده است.

### برآورد مقدار چگالی سوخت

چگالی نسبی مخلوط ( $SG_m$ ) از فرمول زیر قابل محاسبه است:

$$SG_m = \sum_{i=1}^n y_i \cdot SG_i \quad (۶)$$

که  $y_i$  و  $SG_i$  به ترتیب کسر جرمی و چگالی نسبی هر یک از اجزای تشکیل دهنده مخلوط هستند. از آنجا که چگالی نسبی بیانگر نسبت چگالی ماده مورد نظر به چگالی آب است، لذا از این رابطه به سادگی چگالی مخلوط به دست می‌آید. ایچیم و همکاران [۱۷] از این رابطه برای برآورد چگالی سوخت‌های زیستی گیاهی استفاده کردند.

## مدلسازی خواص ماکروسکوپیک اسپری سوخت

### طول نفوذ اسپری

مسافتی که اسپری سوخت در داخل محیط گازی اطرافش می‌پیماید اصطلاحاً طول نفوذ اسپری نامیده می‌شود. از دیدگاه کاربردی میزان طول نفوذ اسپری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. این متغیر می‌تواند در تشکیل مخلوط قابل اشتعال در داخل محفظه احتراق بسیار مؤثر باشد. تاکنون روابط نظری و تجربی گوناگونی برای محاسبه مقدار طول نفوذ اسپری سوخت توسط محققان مختلف ارائه شده است. ساژین و همکاران مدل‌های جدیدی را برای محاسبه این متغیر ارائه کرده‌اند [۲۶]. مدل‌های مذکور از دقت بیشتری نسبت به سایر مدل‌های ارائه شده برخوردارند. به همین دلیل در این پژوهش نیز از مدل ساژین و همکاران [۲۶] برای محاسبه طول نفوذ اسپری سوخت ( $s$ ) بر حسب زمان ( $t$ ) استفاده شده است. بر اساس مدل مذکور داریم:

$$s = \frac{\sqrt{u_{inj} D_0 t}}{(1 - \alpha_d)^{0.25} \rho_g^{0.25} \sqrt{\tan(\theta)}} \times \left( 1.0 - \frac{\sqrt{D_0}}{4 \sqrt{u_{inj}} (1 - \alpha_d)^{0.25} \rho_g^{0.25} \sqrt{\tan(\theta)} \sqrt{t}} \right) \quad (7)$$

در این رابطه  $u_{inj}$  بیانگر سرعت تزریق سوخت ( $m/s$ ) است که بر حسب افت فشار ( $\Delta P$ ) در دهانه نازل پاشش سوخت به دست می‌آید:

$$u_{inj} = c_d \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{\rho_l}} \quad (8)$$

$c_d$  ضریب تخلیه نازل است که می‌توان با تقریب خوبی آن را برابر با  $0.7$  فرض کرد [۲۷].  $\alpha_d$  در رابطه (۷) بیانگر کسر حجمی قطرات اسپری است که مقدار آن معمولاً ناچیز فرض می‌شود [۲۸].  $D_0$  قطر دهانه خروجی نازل،  $\rho_l$  و  $\rho_g$  به ترتیب چگالی سوخت مایع و چگالی محیط گازی و  $\theta$  نیم زاویه مخروط اسپری است. نیم زاویه مخروط اسپری را می‌توان از طریق رابطه زیر محاسبه کرد [۲۹]:

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{\sqrt{3}}{6} \cdot \frac{4\pi}{A} \cdot \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_l}} \right) \quad (9)$$

$A$  مقدار ثابتی است که به نسبت طول به قطر مجرای نازل ( $l/D_0$ ) وابسته است. به طوری که:

$$A = 3 + 0.28(l/D_0) \quad (10)$$

البته کومار و همکاران [۳۰] رابطه دیگری را برای محاسبه  $\theta$  ارائه کرده‌اند:

$$\theta = 0.97 \mu_l^{-0.03} \rho_l^{0.09} \rho_g^{0.14} \Delta P^{0.115} \quad (11)$$

که  $\mu_l$  گرانروی دینامیکی سیال مایع (سوخت) است.

### متوسط قطر قطرات اسپری (SMD- Sauter Mean Diameter)

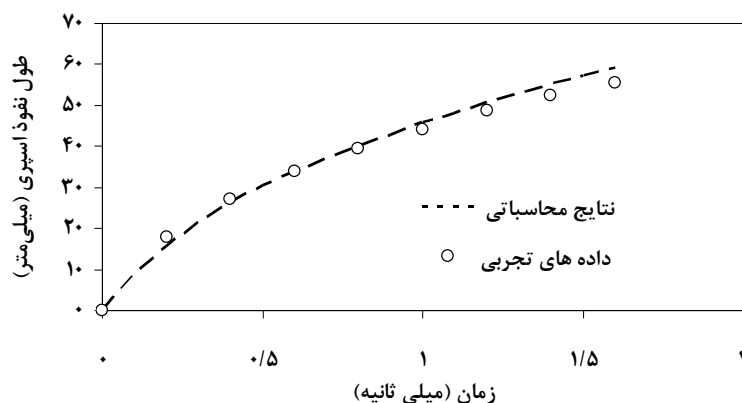
لی و همکاران بر مبنای روش تحلیل ابعادی رابطه زیر را برای محاسبه قطر متوسط قطرات اسپری بعد از گذشت  $0.5$  میلی ثانیه از شروع پاشش ارائه کرده‌اند [۳۱]:

$$SMD = 6156 \times (\nu_l^{0.385} \sigma^{0.737} \rho_l^{0.737} \rho_g^{0.06} \Delta P^{-0.54}) \quad (12)$$

که  $\sigma$  و  $\nu_l$  به ترتیب کشش سطحی و گرانروی سینماتیکی سوخت هستند. این رابطه توسط محققان دیگر برای بررسی خواص برخی از زیست سوخت‌های مرسوم مورد استفاده قرار گرفته و صحت نتایج آن به اثبات رسیده است [۱۷]. لذا در پژوهش حاضر نیز از رابطه بالا برای محاسبه متوسط قطر قطرات اسپری استفاده خواهد شد.

## صحه گذاری بر محاسبات

قبل از اینکه به بحث و بررسی نتایج پردازیم لازم است از صحت مدلسازی‌ها و درستی محاسبات ریاضی اطمینان حاصل کنیم. در شکل (۱) نتایج مقدار طول نفوذ که یکی از مشخصات اساسی اسپری سوخت دیزل است در شرایط فشار محیط برابر با ۵ بار و دمای محیط برابر با ۳۰۰ کلوین با داده‌های تجربی ارائه شده در مرجع [۳۲] در شرایط کاملاً مشابه مقایسه شده‌اند. همان‌طور که دیده می‌شود هماهنگی خوبی بین نتایج محاسباتی با داده‌های تجربی گزارش شده در مرجع [۳۲] برقرار است.



شکل ۱- مقایسه طول نفوذ محاسبه شده با داده‌های تجربی گزارش شده در مرجع [۳۲]

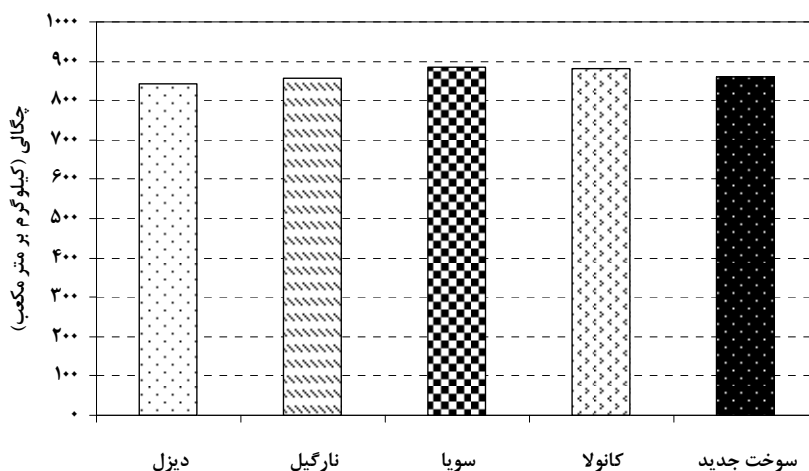
حال که تا حدودی از صحت محاسبات اطمینان حاصل شد، می‌توانیم به بحث و بررسی زیست سوخت جدید پردازیم.

## بحث و بررسی نتایج

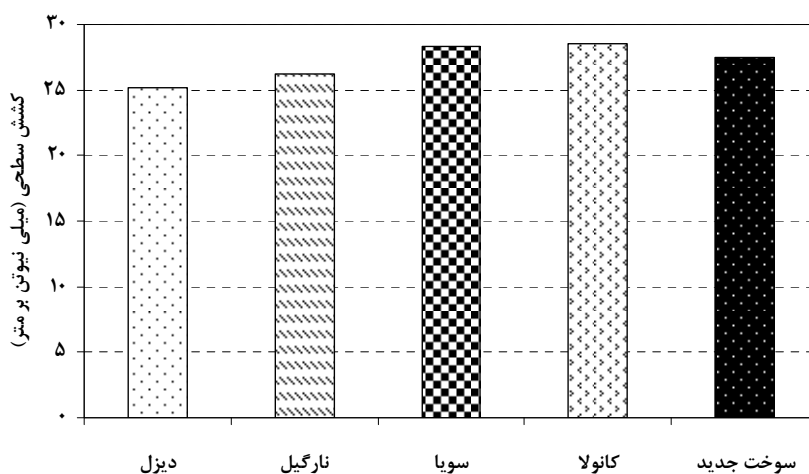
همان‌طور که قبلاً نیز به آن اشاره شد، خواص زیست سوخت‌ها به شدت به خواص استرهای تشکیل دهنده آن‌ها بستگی دارد. از سوی دیگر خواص هر یک از استرهای اسید چرب موجود در سوخت نیز تا حد زیادی به نوع پیوندهای شیمیایی و توپولوژی مولکولی آن وابسته است. بنابراین برای محاسبه خواص فیزیکی زیست سوخت به دست آمده از ریز جلبک کلامیدوموناس لازم است قبل از هر چیز نوع استرهای موجود در آن شناسایی شوند. در جدول (۱) نوع و درصد وزنی استرهای موجود در زیست سوخت جدید گزارش شده است. با استفاده از این اطلاعات می‌توان برخی از خواص فیزیکی مهم زیست سوخت جدید را محاسبه کرد.

در شکل‌های (۲) تا (۴) چگالی، کشش سطحی و گرانیوی دینامیکی زیست سوخت جدید با سوخت دیزل معمولی و برخی از زیست سوخت‌های مرسوم مقایسه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود زیست سوخت به دست آمده از روغن نارگیل از نظر خواص فیزیکی مشابهت زیادی با سوخت دیزل معمولی دارد. این امر به دلیل ساختار مولکولی نسبتاً ساده استر روغن نارگیل در مقایسه با سایر زیست سوخت‌های مورد بررسی است. اما روغن نارگیل تنها در بخش‌های خاصی قابل استحصال است و در همه کشورها و همه اقلیم‌ها استفاده از آن امکان پذیر نیست. نکته حائز اهمیت دیگر کم بودن میزان استحصال سالانه روغن نارگیل در واحد سطح زمین زیر کشت است که استفاده از این منبع را برای تولید زیست سوخت محدود می‌کند. نمودارهای ارائه شده در شکل‌های (۲) تا (۴) حاکی از این است که زیست سوخت جدید نسبت به زیست سوخت‌های مرسوم و مورد استفاده در اروپا و آمریکا از نظر خواص فیزیکی مشابهت بیشتری با سوخت دیزل معمولی دارد. حتی گرانیوی زیست سوخت جدید کمتر از سوخت‌های مذکور است که این امر باعث بهبود خواص قطره‌سازی سوخت و به تبع آن بالا رفتن بازده احتراق می‌شود. همان‌طور که از نمودارهای مذکور پیداست در بین خواص فیزیکی مهم، گرانیوی نسبت به چگالی و کشش سطحی وابستگی بیشتری به ساختار مولکولی و نوع اسیدهای چرب موجود در سوخت دارد. از سوی دیگر گرانیوی تأثیر

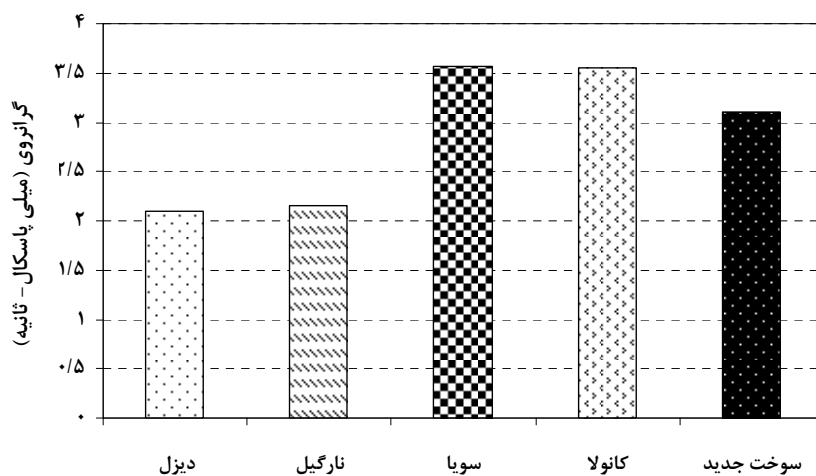
مستقیم بر فرآیند قطره‌سازی و شکست قطرات سوخت دارد (معادله (۱۲)). بنابراین انتظار می‌رود که قطر متوسط و طول نفوذ اسپری سوخت نیز وابستگی زیادی را به توپولوژی و ساختار مولکولی زیست سوخت‌ها از خود نشان دهند.



شکل ۲- مقایسه چگالی زیست سوخت جدید با سوخت دیزل و برخی زیست سوخت‌های مرسوم

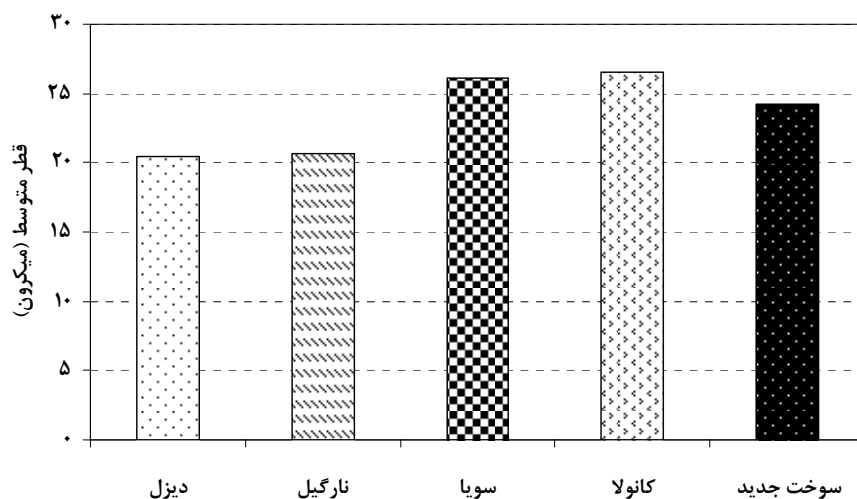


شکل ۳- مقایسه کشش سطحی زیست سوخت جدید با سوخت دیزل و برخی زیست سوخت‌های مرسوم



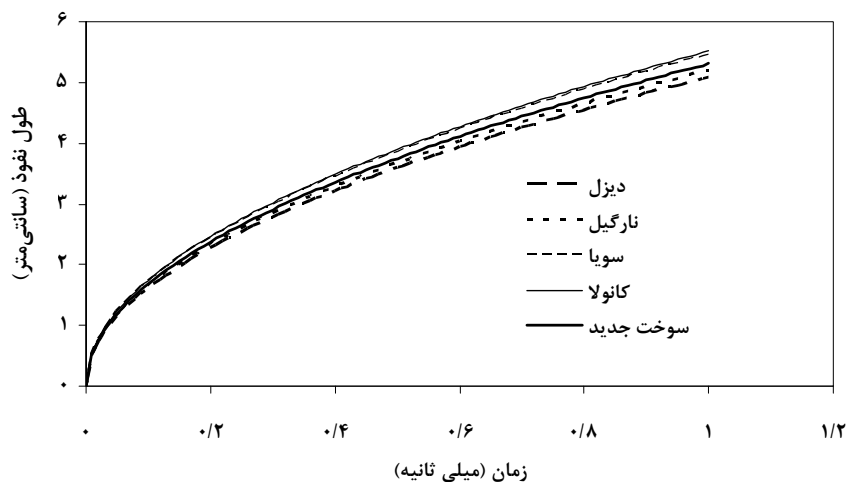
شکل ۴- مقایسه گرانروی زیست سوخت جدید با سوخت دیزل و برخی زیست سوخت‌های مرسوم

در شکل (۵) متوسط قطر قطرات اسپری سوخت‌های مختلف در شرایط مشابه با هم مقایسه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود SMD قطرات اسپری زیست سوخت جدید به سوخت دیزل معمولی شباهت نسبتاً زیادی دارد. به عبارت دیگر زیست سوخت جدید نسبت به کانولا متیل استر و سویا متیل استر راحت‌تر قطره قطره می‌شود که این امر باعث ازدیاد نرخ تبخیر و بهبود کیفیت احتراق می‌شود.



شکل ۵- مقایسه قطر متوسط قطرات اسپری زیست سوخت جدید با سوخت دیزل و برخی زیست سوخت‌های مرسوم

در شکل (۶) نیز طول نفوذ اسپری سوخت برای سوخت دیزل معمولی و برخی زیست سوخت‌های مرسوم و متداول رسم و مقایسه شده است. به وضوح دیده می‌شود که زیست سوخت جدید از این حیث نیز شباهت نسبتاً زیادی با سوخت دیزل معمولی دارد.



شکل ۶- مقایسه طول نفوذ اسپری زیست سوخت جدید با سوخت دیزل و برخی زیست سوخت‌های مرسوم

لازم به ذکر است که زیست سوخت‌ها را اغلب به صورت مخلوط (blend) با سوخت دیزل استفاده می‌کنند. این کار باعث می‌شود که سوخت ترکیبی شباهت بیشتری با سوخت دیزل داشته باشد. از آنجا که زیست سوخت جدید به دست آمده از ریزجلبک کلامیدوموناس نسبت به سایر زیست سوخت‌های متداول شباهت بیشتری با دیزل معمولی دارد، لذا می‌توان



در تشکیل سوخت‌های ترکیبی از درصد بیشتری از این سوخت استفاده کرد. این امر باعث صرفه‌جویی بیشتر در مصرف سوخت‌های فسیلی می‌شود. به علاوه آلودگی‌های زیست محیطی ناشی از مصرف سوخت فسیلی نیز به مراتب کمتر خواهد شد. نکته حائز اهمیت دیگر اینکه زیست سوخت به دست آمده از جلبک کلامیدوموناس نسبت به اغلب زیست سوخت‌های جلبکی از کیفیت نسبتاً بالاتری برخوردار است. در جدول (۳) برخی از خواص فیزیکی زیست سوخت جلبکی جدید با زیست سوخت به دست آمده از جلبک کلرلا و داده‌های استاندارد ASTM مقایسه شده است.

جدول ۳- مقایسه برخی از خواص زیست سوخت جدید با خواص زیست سوخت به دست آمده از کلرلا [۱۴] و استاندارد ASTM

مشخصه سوخت	کلامیدوموناس (MCCS 026)	کلرلا (Protothecoides)	استاندارد ASTM
چگالی (kg/lit)	۰/۸۶۱	۰/۸۶۴	۰/۸۶-۰/۹
گرانروی دینامیکی (cSt)	۳/۶۵	۵/۲	۳/۵-۵

بر اساس تحقیقات اخیر، کلرلا یکی از گونه‌های باکیفیت برای تولید زیست سوخت جلبکی معرفی شده است [۱۴]. داده‌های ارائه شده در جدول (۳) حاکی از این است که گرانروی دینامیکی سوخت به دست آمده از جلبک کلامیدوموناس بسیار کمتر از گرانروی سوخت جلبکی کلرلا است. هم‌طور که قبلاً نیز بدان اشاره شد، گرانروی سوخت از اهمیت بسیار ویژه‌ای برخوردار است و می‌تواند فرآیند قطره‌سازی را به شدت متأثر سازد. بنابراین انتظار می‌رود که زیست سوخت جدید به مراتب از کیفیت بالاتری برخوردار باشد.

### جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این تحقیق خواص فیزیکی و مشخصات قطره‌سازی زیست سوخت به دست آمده از ریزجلبک کلامیدوموناس بررسی و مطالعه شده است. بدین منظور کلیه مونو استرهای اسید چرب موجود در زیست سوخت جدید از نظر ساختار مولکولی بررسی شده‌اند. سپس برخی از خواص فیزیکی مهم زیست سوخت جدید با توجه به شاخص‌های توپولوژیکی هر یک از اجزای تشکیل دهنده آن محاسبه شد. در نهایت نیز برخی از ویژگی‌های ماکروسکوپیکی قطره‌سازی سوخت از جمله قطر متوسط قطرات و طول نفوذ اسپری سوخت محاسبه و با سوخت دیزل معمولی و برخی زیست سوخت‌های متداول مقایسه شد. نتایج به دست آمده از این پژوهش را می‌توان در قالب موارد زیر خلاصه کرد:

- ۱- خواص فیزیکی این سوخت نسبت به سایر زیست سوخت‌های مرسوم و مورد استفاده در اروپا و آمریکا مشابهت بیشتری به سوخت دیزل معمولی دارد. این امر باعث بهبود خواص قطره‌سازی سوخت و به تبع آن بالا رفتن بازده احتراق می‌شود.
- ۲- در بین خواص فیزیکی مهم، گرانروی نسبت به چگالی و کشش سطحی وابستگی بیشتری به ساختار مولکولی و نوع اسیدهای چرب موجود در سوخت دارد. از آنجا که گرانروی تأثیر مستقیم بر قطره‌سازی سوخت پاششی دارد، لذا فرآیند قطره‌سازی سوخت به شدت به توپولوژی مولکولی استرهای اسید چرب موجود در سوخت وابسته است.
- ۳- زیست سوخت جدید نسبت به کانولا متیل استر و سویا متیل استر راحت‌تر قطره قطره می‌شود که این امر باعث زیاد شدن نرخ تبخیر سوخت و بهبود کیفیت احتراق می‌شود.
- ۴- از آنجا که خواص زیست سوخت جدید به دست آمده از ریزجلبک کلامیدوموناس نسبت به سایر زیست سوخت‌های متداول شباهت بیشتری با دیزل معمولی دارد، لذا می‌توان در تشکیل سوخت‌های ترکیبی از درصد بیشتری از این سوخت استفاده کرد. این امر باعث صرفه‌جویی بیشتر در مصرف سوخت‌های فسیلی و کاهش آلودگی‌های زیست محیطی می‌شود.
- ۵- زیست سوخت جدید نسبت به سایر زیست سوخت‌های جلبکی مرسوم به مراتب از کیفیت بالاتری برخوردار است. تاکنون، کلرلا به عنوان یکی از گونه‌های جلبکی باکیفیت برای تولید زیست سوخت معرفی شده است. نتایج تحقیق

حاضر نشان داد که زیست سوخت جدید از نظر خواص فیزیکی و قطره‌سازی از زیست سوخت جلبکی کلرلا نیز به مراتب بهتر است. به نظر می‌رسد این سوخت از نظر کیفی می‌تواند به عنوان رقیب سرسختی برای زیست سوخت جلبکی کلرلا مطرح باشد.

محققان پیشین بر این باورند که گونه MCCS 026 از ریز جلبک کلامیدوموناس علاوه بر غنای مناسب و مطلوب از نظر مقدار چربی و سازگاری زیاد با شرایط اقلیمی ایران، هم به صورت طبیعی و هم در شرایط کنترل شده در محیط‌های کشت بسیار ارزان و در مقیاس زیاد قابل تولید است. تحقیق حاضر بررسی‌ها پیرامون این زیست سوخت جدید را یک گام به جلو برد و نشان داد که زیست سوخت به دست آمده از این ریزجلبک از نظر خواص فیزیکی و مشخصات قطره‌سازی سوخت شباهت زیادی با سوخت‌های فسیلی مرسوم دارد و در صورتی که چنین سوختی تولید شود می‌تواند به راحتی در موتورهای دیزل قطره قطره شده و شرایط مناسبی را برای احتراق فراهم کند. نکته دیگری که در تولید زیست سوخت‌ها باید مورد بررسی قرار گیرد مثبت بودن موازنه انرژی است. موازنه انرژی در فرآیند تولید سوخت‌های زیستی به صورت نسبت انرژی زیستی به دست آمده به انرژی فسیلی مصرف شده برای انجام فرآیند تعریف می‌شود. بدیهی است که زمانی تولید زیست سوخت مقرون به صرفه است که عدد به دست آمده برای موازنه انرژی بزرگ‌تر از یک باشد. این امر در ادبیات مربوط به تولید سوخت‌های بیولوژیک تحت عنوان مثبت بودن موازنه انرژی نامیده می‌شود.

فرآیند تولید زیست سوخت از ریزجلبکها شامل چهار مرحله رشد و پرورش ریز جلبک، برداشت یا جداسازی، روغن‌کشی و سرانجام تبدیل روغن به زیست سوخت می‌شود. مراحل روغن‌کشی و تبدیل روغن به زیست سوخت برای ریزجلبکها و سایر منابع گیاهی که در حال حاضر در اروپا و امریکا استفاده می‌شوند مانند کانولا و سویا مشابه است. بنابراین انرژی لازم برای انجام این مراحل از فرآیند نیز کاملاً مشابه است. عمده‌ترین تفاوت بین فرآیند تولید زیست سوخت‌های جلبکی با زیست سوخت‌های به دست آمده از دانه‌های روغنی در مراحل رشد و برداشت است. بنابراین برای اطمینان از مثبت بودن موازنه انرژی در فرآیند تولید زیست سوخت‌های جلبکی کافی است مقدار انرژی لازم برای انجام این مراحل با دقت بیشتری مورد مطالعه قرار گیرد.

به تازگی پژوهشی در مورد مثبت بودن موازنه انرژی در زیست سوخت‌های ریز جلبکی انجام شد [۳۳]. نتایج این تحقیق نشان داد که اگر انرژی لازم برای فرآیند تولید زیست سوخت‌های جلبکی از منابع بازگشت‌پذیر انرژی مانند انرژی خورشیدی تأمین شود موازنه انرژی فرآیند مثبت خواهد بود [۳۳]. همچنین برای تغذیه ریزجلبک‌ها می‌توان از فاضلاب استفاده کرد که این امر علاوه بر اینکه مشکلات آلودگی فاضلاب‌ها و تصفیه آن‌ها را تا حد زیادی برطرف می‌کند، انرژی و هزینه لازم برای پرورش ریزجلبک‌ها را کاهش داده و به مثبت شدن موازنه انرژی کمک می‌کند. همچنین تفاله‌های باقی‌مانده از فرآیند روغن‌کشی غذای مقوی و مناسبی برای دام‌ها به شمار می‌رود. با این نگاه به نظر می‌رسد که بتوان فرآیندهای تولید زیست سوخت از ریزجلبک کلامیدوموناس را به گونه‌ای طراحی کرد که موازنه انرژی کلی مثبت باشد. ولی با این وجود باز هم بررسی مثبت بودن موازنه انرژی در فرآیند تولید زیست سوخت از این گونه جلبکی خاص امری لازم و اجتناب ناپذیر است و می‌تواند موضوع مناسبی برای تحقیقات آتی باشد.

## منابع

1. Erazo, J., Sequera, A., Parthasarathy, R., and Gollahalli, S. R., "Comparison of Spray Characteristics of Biodiesel and Diesel fuel," AIAA 4816, 2007.
2. Murillo, S., Líguez, J. L., Porterio, J., Geranada, E., and Morán, J. C., "Performance and Exhaust Emissions in the Use of Biodiesel in Outboard Diesel Engines," Fuel, 86, pp 1765-1771, 2007.
3. زنوزی، ع؛ قبادیان، ب؛ توکلی هاشجین، ت؛ فیض الله نژاد، م؛ و باقرپور، ح؛ "تأثیر ترکیب سوخت‌های دیزل و بیودیزل حاصل از پسماند روغن‌های خوراکی در عملکرد موتور اشتعال تراکمی (CI)"، نشریه علمی- پژوهشی سوخت و احتراق، سال اول، شماره اول، ص ۵۳-۶۰، شهریور ۱۳۸۷.

۴. نجفی، ب؛ پیروزیپناه، و؛ و قبادیان، ب؛ "تأثیر استفاده از بیودیزل در کاهش آلاینده‌گی موتور دیزل،" مجموعه مقالات اولین کنفرانس احتراق ایران، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، بهمن ماه ۱۳۸۴.

5. Tyson, S. K., "Biodiesel Handling and Use Guidelines," US Department of Energy, DOE/GO;102004, 1999.
6. Almeida, S. C. A., Belchior, C. R., Nascimento, M. V. G., Viera, L. S. R., and Fleury, G., "Performance of a Diesel Generator Fuelled with Palm Oil," *Fuel*, 81, pp 2097-2102, 2002.
7. Bhatti, H. N., Hanif, M. A., Qasim, M., and Rehman, A., "Biodiesel Production from Waste Tallow," *Fuel*, 87, pp 2961-2966, 2008.
8. Lam, S. C. A., "Biodiesel Droplet Combustion," MS.c Thesis, University of Windsor, Ontario, Canada, 2007.
9. Altiparmak, D., Keskin, A., Koca, A., and Guru, M., "Alternative Fuel Properties of Tall Oil Fatty Acid Methyl Ester-Diesel Fuel Blends," *Bioresource Technology*, 98, pp. 241-246, 2007.
10. Preyra-Irajo, G. A., Izquierdo, N. G., Covi, M., Nolasco, S. M., Quiroz, F., and Aguirrezabal, L. A. N., "Variability in Sunflower Oil Quality for Biodiesel Production: A Simulation Study," *Biomass and Bioenergy*, 33, pp. 459-468, 2009.
11. Giannelos, P. N., Sxizas, S., Lois, E., Zannikos, F., and Anastopoulos, G., "Physical, Chemical and Fuel Related Properties of Tomato Seed Oil for Evaluating Its Direct Use in Diesel Engines," *Industrial Crops and Products*, 22, pp. 193-199, 2005.
12. Chisti, Y., "Biodiesel from Microalgae," *Biotechnology Advances*, 25, pp 294-306, 2007.
13. Chisti, Y., "Biodiesel from Microalgae Beats Bioethanol," *Trends in Biotechnology*, 26, No. 3, pp. 126-131, 2008.
14. Xu, H., Miao, X., and Wu, Q., "High Quality Biodiesel Production from a Microalga *Chlorella Protothecoides* by Heterotrophic Growth in Fermenters," *Journal of Biotechnology*, 126, pp. 499-507, 2006.
15. Mata, T. M., Martins, A. A., and Caetano, N. S., "Microalgae for Biodiesel Production and other Applications: A Review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, pp. 217-232, 2010.
16. Morowvat, M. H., Rasoul-Amini, S., and Ghasemi, Y., "Chlamydomonas as a "New" Organism for Biodiesel Production," *Bioresource Technology*, 101, pp. 2059-2062, 2010.
17. Ejim, C. E., Fleck, B. A., and Amirfazli, A., "Analytical Study for Atomization of Biodiesels and their Blends in a Typical Injector: Surface Tension and Viscosity Effects," *Fuel*, 86, pp. 1543-1544, 2007.
18. Knothe, G., "Dependence of Biodiesel Fuel Properties on the Structure of Fatty Acid Alkyl Esters," *Fuel Processing Technology*, 86, pp. 1059-1070, 2005.
19. Allen, C. A. W., Watts, K. C., and Ackman, R. G., "Predicting the Surface Tension of Biodiesel Fuels from their Fatty Acid Composition," *Journal of American Oil Chemists Society*, 76, pp. 317-323, 1999.
20. Allen, C. A. W., "Properties of Biodiesel Fuel Atomization Characteristics Based on Measured Properties," Ph.D. Thesis, DalTech, Dalhousie University, Nova Scotia, Canada, 1998.
21. Poling, B. E., Parausnitz, J. M., and O'Connell, J. P., *The Properties of Gases and Liquids*, McGraw-Hill, NewYork, 2001.
22. Shu, Q., Yang, B., Yang, J., and Qing, S., "Predicting the Viscosity of Biodiesel Fuels Based on the Mixture Topological Index Method," *Fuel*, 86, pp 1849-1854, 2007.
23. Shu, Q., Wang, J., Peng, B., Wang, D., and Wang, G., "Predicting the Surface Tension of Biodiesel Fuels by Mixture Topological Index Method, at 313K," *Fuel*, 87, pp. 3586-3590, 2007.
24. Uryadov, V. G., Aristova, N. V., and Ofitserov, E. N., "Relationship between the Dynamic Viscosity of Hydrocarbons and the Wiener Topological Index," *Russian Journal of Physical Chemistry A*, 81, No. 4, pp. 644-647, 2007.
25. Uryadov, V. G., Aristova, N. V., and Ofitserov, E. N., "Topological Approach to Description of Dynamic Viscosity of Heteroatom-Containing Organic Compounds," *Chemistry and Computational Simulation Butlerov Communications*, 3, No. 9, pp. 53-58, 2002.
26. Sazhin, S. S., Feng, G., and Heikal, M. R., "A Model for Fuel Spray Penetration," *Fuel*, 80, pp. 2171-2180, 2001.
27. Chehroudi, B., and Bracco, F. V., "Structure of Transient Hollow Cone Spray," SAE Report 880522, 1988.
28. Pozorski, J., Sazhin, S., Waklawczyk, M., Crua, C., Kenneird, D., and Heikal, M., "Spray Penetration in Turbulent flow," *Flow Turbulence and Combustion*, 68, pp. 153-165, 2002.
29. Peterson, B. R., and Ghandhi, J. B., "Transient High-Pressure Hydrogen Jet Measurements," SAE Report 2006-01-0652, 2006.
30. Kumar, S., Watson, H., Milkins, E., and Edsen, J., "Combustion Modeling of Diesel Fuel, Seed Oil and Methyl Ester of Seed Oils," SAE Report 861564, 1986.
31. Lee, C. S., Park, S. W., and Known, S. I., "An Experimental Study on the Atomization and Combustion of Biodiesel-Blended Fuels," *Energy Fuels*, 19, pp. 2201-2208, 2005.
32. Yule, A. J., Mo, S. L., Tham, S. Y., and Aval, S. M., "Diesel Spray Structure," ICLASS-85, London, UK, 1985.
33. Ehimen, E. A., "Energy Balance of Microalgal-Derived Biodiesel," *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 32, No. 12, pp. 1111-1120, 2010.

## English Abstract

# Predicting of Physical Properties and Atomization Characteristics of the Biofuel Derived from *Chlamydomonas* Microalga

A. Omidvar<sup>1</sup> and E. Amini<sup>2</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, Shiraz University of Technology

2- Department of Microbiology, Shiraz University of Medical Science

*The overall objective of present research is to provide insight into physical properties and atomization characteristics of the Chlamydomonas algal biofuel. Biofuels are produced mainly from oil crops, animal fat and waste cooking oil. Because of low productivity and efficiency, these sources are not suitable for continuous and large-scale production of biofuel. Microalgae appear to be the only source of renewable biodiesel that is capable of meeting the global fuel demand. According to a novel physiological-molecular research, the naturally isolated microalga Chlamydomonas sp. MCCS 026 can be used as a valuable feedstock for biofuel production in our country. This species has high growth rate and lipid content requiring just a simple and low-cost culture medium. However, these benefits do not guarantee the practical usage of this new green fuel in DI engines. In order to employ a biodiesel well, it is necessary to know its key properties, i.e. density, viscosity and surface tension. These properties are closely related to the molecular structures of its fatty acid components. This study presents a predictive analytical investigation of the effects of viscosity, density and surface tension on atomization characteristics of the new suggested green fuel. Results from statistical analysis showed that Chlamydomonas algal fuel had near-similar properties to the petroleum diesel fuel. The atomization analysis indicated that for the same operating conditions, the novel biofuel shows better spray characteristics than well-known biofuels, i.e. soybean and canola methyl esters. Also, the results showed that the quality of this new biofuel is higher than other alga-based biofuels.*

**Keywords:** Biofuel, Microalga, *Chlamydomonas*, Atomization, Physical properties