

## ارایه یک رابطه اصلاح شده به منظور تخمین قطر متوسط قطرات افشانه زیست سوختها با استفاده از مدل شاخص ساختار توپولوژیکی مخلوط

امیر امیدوار<sup>۱</sup>

بخش مهندسی مکانیک و هوافضا، دانشگاه صنعتی شیراز

omidvar@sutech.ac.ir

### چکیده

بررسی کیفیت فرآیند قطره سازی و همچنین تخمین قطر متوسط قطرات افشانه زیست سوختها از اهمیت بسزایی برخوردار است. بر طبق مطالعات انجام شده، قطر متوسط قطرات افشانه زیست سوختها به شدت تابع ساختار توپولوژیکی زیست سوخت است. در واقع، شاخص توپولوژیکی اطلاعات اساسی ساختار مولکول مانند اندازه مولکول، باند غیر اشباع و درجه شاخه را در بر دارد. از سوی دیگر قطر متوسط قطرات افشانه از برخی شرایط عملکردی مانند اختلاف فشار در دهانه نازل و همچنین شرایط محیط گازی که پاشش در آن صورت می‌گیرد تأثیر می‌پذیرد. به تازگی رابطه‌ای برای تخمین قطر متوسط قطرات افشانه زیست سوختها ارایه شد که در آن قطر متوسط تنها تابعی از ساختار توپولوژیکی زیست سوخت است. در واقع عدم وابستگی این رابطه به شرایط عملکردی پاشش یکی از مهمترین نقایص آن به شمار می‌رود. در این پژوهش رابطه جدیدی برای تخمین قطر متوسط قطرات افشانه زیست سوختها ارایه شده است. بطوریکه رابطه جدید علاوه بر حفظ وابستگی قطر متوسط قطرات به شاخص توپولوژیکی زیست سوخت، اثرات شرایط عملکردی پاشش نیز لحاظ شده است.

واژه‌های کلیدی: زیست سوخت - قطر متوسط - افشانه - شاخص ساختاری

### ۱- مقدمه

امروزه زیست سوختها به عنوان یکی از جایگزین‌های مناسب برای سوختهای فسیلی مطرح هستند. 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 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]. 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. زیست سوختها را اغلب از منابع گیاهی مانند دانه‌های روغنی، چربیهای حیوانی [۶]، پساب و یا فاضلاب‌هایی که منبع آلی دارند و یا حتی از پسماند روغنهای خوراکی [۲ و ۳] به دست می‌آورند. در امریکا روغن سویا یکی از مهمترین منابع تولید سوخت سبز (زیست سوخت) است [۷ و ۸]. روغن کانولا، خرما، ذرت و نارگیل از جمله دیگر منابع مرسوم تولید زیست سوخت در کانادا و اروپا هستند [۷]. در بعضی از کشورها از روغن آفتابگردان [۹] و حتی روغن به دست آمده از دانه‌های گوجه فرنگی [۱۰] برای تولید زیست سوخت استفاده می‌شود. معمولاً زیست سوختها به دلیل داشتن زنجیره‌های هیدروکربنی بلندتر دارای لزجت بیشتری نسبت به سوختهای فسیلی هستند. این امر می‌تواند فرآیند قطره سازی زیست

۱- استادیار بخش مهندسی مکانیک و هوافضا و عضو پژوهشکده سامانه‌های دریایی دانشگاه صنعتی شیراز

سوخت و به تبع آن تبخیر و احتراق زیست سوختها را تحت تأثیر قرار دهد. به همین دلیل بررسی کیفیت فرآیند قطره سازی و همچنین تخمین قطر متوسط قطرات افشانه زیست سوختها از اهمیت بسزایی برخوردار است. در همین راستا، الکتب (Elkotb) روشی را برای محاسبه قطر متوسط قطرات سوخت ارایه نمود [۱۱]. آلن و همکاران [۱۲] و همچنین ایچیم و همکاران [۱۳] با استفاده از مدل الکتب به بررسی قطر متوسط قطرات افشانه زیست سوختها پرداختند. شو (Shu) و همکاران در سال ۲۰۱۱ میلادی رابطه‌ای برای تخمین قطر متوسط قطرات افشانه زیست سوختها ارایه نمودند [۱۴]. در مدل پیشنهاد شده توسط این محققین، قطر متوسط تنها تابعی از شاخص ساختار توپولوژیکی زیست سوختهاست و اثرات شرایط عملکردی پاشش نظیر اختلاف فشار در دهانه نازل و همچنین فشار یا چگالی محیط گازی که پاشش در آن صورت می‌گیرد در این معادله لحاظ نشده است. بدیهی است که شرایط عملکردی پاشش نقش بسیار مؤثری را در تخمین قطر متوسط قطرات افشانه بازی می‌کنند. در این مقاله سعی شده است تا با استفاده از یک روش تحلیلی، رابطه جدیدی برای تخمین قطر متوسط قطرات افشانه زیست سوختها ارایه گردد. رابطه پیشنهادی در این تحقیق برخی از نواقص رابطه شو و همکاران را مرتفع خواهد ساخت. بطوریکه در رابطه جدید، قطر متوسط قطرات زیست سوختها علاوه بر وابستگی به شاخص توپولوژیکی، به شرایط عملکردی پاشش نیز وابسته است.

### ۲- قطره سازی زیست سوختها

قطر متوسط قطرات افشانه به شدت به نوع نازل مورد استفاده بستگی دارد. یکی از انواع بسیار کاربردی نازلها در پاشش سوخت، نازل چرخشی تحت فشار است. قطر متوسط قطرات برای این نوع نازل از رابطه زیر قابل تخمین و محاسبه است [۱۵]:

$$SMD = 6156(\nu_l^{0.385} \sigma^{0.737} \rho_l^{0.737} \Delta p^{-0.54} \rho_g^{0.06}) \quad (1)$$

که در این رابطه SMD متوسط قطر قطرات اسپری،  $\sigma$  کشش سطحی و  $\mu_l$  لزجت سیال است.  $\Delta p$  و  $\rho_g$  به ترتیب چگالی محیط گازی و اختلاف فشار پشت و جلو نازل می‌باشند. رابطه (۱) را می‌توان به شکل زیر بازنویسی نمود:

$$SMD = 6156(\sigma^{0.737} \mu_l^{0.385} \rho_l^{0.352} \Delta p^{-0.54} \rho_g^{0.06}) \quad (2)$$

این رابطه بیانگر این حقیقت است که قطر متوسط قطرات افشانه سوخت علاوه بر خواص ترموفیزیکی سوخت نظیر چگالی، کشش سطحی و لزجت به برخی از شرایط عملکردی نظیر چگالی محیط گازی و افت فشار نازل نیز وابسته است. بنابراین می‌توان انتظار داشت که در شرایط عملکردی مشابه، نسبت قطر میانگین قطرات افشانه زیست سوختها به قطر میانگین قطرات افشانه دیزل تنها تابعی از خواص ترموفیزیکی دو سوخت باشد:

$$\eta = \frac{SMD_B}{SMD_D} = \left(\frac{\sigma_B}{\sigma_D}\right)^{0.737} \left(\frac{\mu_B}{\mu_D}\right)^{0.385} \left(\frac{\rho_B}{\rho_D}\right)^{0.352} \quad (3)$$

در این رابطه زیرنویس  $B$  بیانگر خواص مربوط به زیست سوخت و زیرنویس  $D$  بیانگر خواص مربوط به دیزل است. به منظور تکمیل و بررسی دقیق‌تر رابطه (۶) لازم است که خواص ترموفیزیکی زیست سوختها محاسبه شوند. در سالهای اخیر مطالعات بسیار زیادی بر روی خواص ترموفیزیکی زیست سوختها انجام شده است. نتایج این تحقیقات نشان داده است که چگالی و کشش سطحی زیست سوختها تا حد زیادی شبیه به سوختهای دیزل معمولی است بطوریکه با تقریب بسیار خوبی (خطای کمتر از ۱/۵) می‌توان نسبت چگالی و نسبت کشش سطحی زیست سوختها به سوخت دیزل معمولی را برابر با واحد فرض نمود. بنابراین می‌توان با تقریب خوبی چنین فرض نمود که کیفیت قطره سازی زیست سوختها تنها تابعی از نسبت لزجت دینامیکی ( $\mu$ ) یا سینماتیکی ( $\nu$ ) زیست سوخت به لزجت دیزل معمولی است. لذا

$$\eta = \frac{SMD_B}{SMD_D} \cong \left(\frac{\mu_B}{\mu_D}\right)^{0.385} = \left(\frac{\nu_B}{\nu_D}\right)^{0.385} \quad (4)$$

در سالهای اخیر پژوهش‌های گسترده‌ای بر روی نحوه محاسبه لزجت زیست سوختها و همچنین عوامل مؤثر بر آن انجام شده است [۱۶-۲۰]. نتایج این بررسی‌ها نشان داده است که لزجت زیست سوختها به شدت تابع ساختار مولکولی اسیدهای چرب تشکیل دهنده زیست سوخت می‌باشد. نتایج این تحقیقات حاکی از این است که خواص ترموفیزیکی مهم نظیر، لزجت زیست سوختها تابعی از شاخص ساختاری یا شاخص توپولوژیکی مولکول آنهاست. شاخص ساختاری یا همان شاخص توپولوژیکی اطلاعات اساسی ساختار مولکول مانند اندازه مولکول، باند غیر اشباع و درجه شاخه را در بر دارد. بنابراین با فرض معلوم بودن خواص ترموفیزیکی دیزل معمولی می‌توان رابطه (۴) را به فرم زیر ساده سازی نمود:

$$\eta = \frac{SMD_B}{SMD_D} = \eta(\chi_m) \quad (5)$$

که  $\eta(\chi_m)$  تابعی از شاخص ساختار توپولوژیکی مخلوط ( $\chi_m$ ) زیست سوخت مورد بررسی است. شاخص ساختاری مخلوط خود تابعی از شاخصهای ساختاری اجزاء تشکیل دهنده آن است. شاخص ساختاری مخلوط عبارت است از:

$$\ln(\chi_m) = \sum_{i=1}^n x_i \ln(\chi_i) \quad (6)$$

رابطه (۶) به رابطه گرونبرگ- نیسان معروف است.  $\chi_i$  شاخص ساختاری هر یک از اجزاء تشکیل دهنده مخلوط است. روش کلی محاسبه  $\chi_i$  بطور دقیق در مرجع [۲۱] آمده است. همچنین مقادیر  $\chi_i$  برای اجزاء تشکیل دهنده اغلب زیست سوختها در جدول (۱) ذکر شده است.

جدول ۱- شاخص ساختاری هر یک از متیل استرهاى اسید چرب [۱۷]

متیل استر اسید چرب	شاخص ساختاری ( $\chi_i$ )
کاپریلک (C8:0)	۵/۱۸۵
کاپریک (C10:0)	۷/۲۲۰
لاپوریک (C12:0)	۷/۶۵۳
میرستیک (C14:0)	۸/۱۷۳
پالمیتیک (C16:0)	۹/۰۹۱
استئاریک (C18:0)	۹/۹۷۹
لینولئیک (C18:3)	۹/۹۲۱
اروسیک (C22:1)	۱۱/۶۵۲

بر اساس نتایج گزارش شده در مرجع [۲۱]، لزجت سینماتیکی زیست سوختها به صورت تابعی از شاخص ساختاری مخلوط گرونبرگ- نیسان از رابطه (۷) قابل محاسبه است:

$$v_B = -3.0781 + 20.1877 \chi_m \quad (7)$$

با اعمال این رابطه فوق در معادله (۴) و با فرض  $v_D = 2/0 \text{ cSt}$  برای سوخت دیزل معمولی، خواهیم داشت:

$$\eta = (-1.539 + 10.09385 \chi_m)^{0.385} \quad (8)$$

لازم به ذکر است که این روابط در محدوده دمایی معمولی از دقت خوبی برخوردار است.

با اعمال رابطه (۸) در رابطه (۵) می‌توان قطر متوسط قطرات افشانه زیست سوختها را محاسبه نمود:

$$SMD_B = (-1.539 + 10.09385 \chi_m)^{0.385} SMD_D \quad (9)$$

با جاگذاری رابطه (۴) در (۹) خواهیم داشت:

$$SMD_B = 6156(-1.539 + 10.09385 \chi_m)^{0.385} (\sigma_D^{0.737} v_D^{0.737} \rho_D^{0.737} \Delta p^{-0.54} \rho_g^{0.06}) \quad (10)$$

با اعمال مقادیر کشش سطحی، چگالی و لزجت سوخت دیزل معمولی در رابطه (۱۰)، قطر متوسط قطرات افشانه دیزل به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$SMD_B = 314.41(-1.539 + 10.09385\chi_m)^{0.385} \Delta p^{-0.54} \rho_g^{0.06} \quad (11)$$

در رابطه فوق، جمله اول سمت راست بیانگر تأثیر خواص ترموفیزیکی زیست سوخت است.

### ۳- بحث و بررسی نتایج

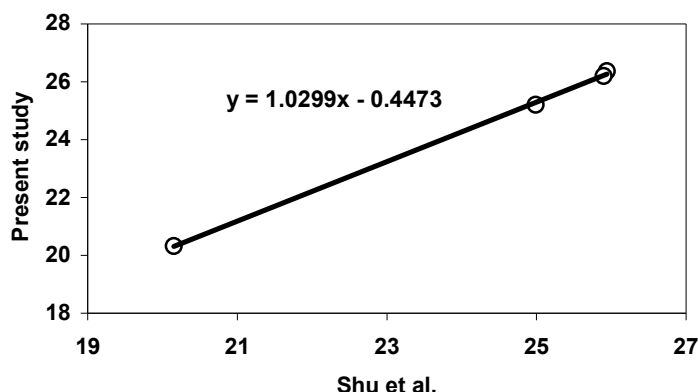
شو و همکاران در سال ۲۰۱۱ میلادی رابطه‌ای برای تخمین قطر متوسط قطرات افشانه زیست سوختها ارائه نمودند [۱۴]. در رابطه ارائه شده توسط این افراد، قطر متوسط قطرات تنها تابعی از شاخص ساختار توپولوژیکی زیست سوخت است. قطر متوسط قطرات افشانه سوخت به شدت تابع شرایط عملکردی پاشش مانند اختلاف فشار پشت و جلو نازل و همچنین چگالی محیط گازی است که سوخت در آن پاشیده می‌شود. لذا چنین به نظر می‌رسد که رابطه ارائه شده در مرجع [۱۴] از این جهت که هیچگونه تابعیتی از شرایط عملکردی پاشش ندارد دچار مشکل است. در این مقاله رابطه جدیدی برای تخمین قطر متوسط قطرات افشانه زیست سوختها ارائه شده بطوریکه علاوه بر وابستگی به شاخص توپولوژیکی زیست سوخت شرایط عملکردی پاشش نیز در آن لحاظ شده است.

در این بخش، نتایج به دست آمده از رابطه پیشنهاد شده در این مقاله برای محاسبه قطر متوسط قطرات افشانه زیست سوختها (رابطه ۱۱) با داده‌های گزارش شده در مرجع [۱۳] مقایسه شده است. نتایج مقایسه در جدول (۲) آمده است. همانطور که از جدول (۲) پیداست، هماهنگی خوبی بین نتایج رابطه پیشنهاد شده با نتایج مرجع [۱۳] وجود دارد.

جدول ۲- مقایسه نتایج رابطه پیشنهادی با داده‌های گزارش شده در مرجع [۱۳]

خطا (%)	$SMD_B$ ( $\mu\text{m}$ )		زیست سوخت
	مرجع [۱۳]	رابطه (۱۱)	
۱/۸	۲۸/۸	۲۸/۲۶	دانه انگور
۱/۰۹	۲۰/۱	۲۰/۳۲	نارگیل
۱/۹	۲۵/۷	۲۶/۲	سویا
۱/۸	۲۵/۹	۲۶/۳۷	بادام زمینی

همچنین نتایج رابطه پیشنهادی با نتایج رابطه ارائه شده در مرجع [۱۴] در شکل (۱) مقایسه شده است. در این شکل داده‌ها برای  $\Delta p = 20 \text{ bar}$  و  $\rho_g = 1/2 \text{ kg/m}^3$  رسم شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود در این شرایط داده‌های هر دو رابطه تطابق خوبی دارند. البته لازم به ذکر است که با تغییر شرایط (اختلاف فشار یا چگالی گاز) رابطه ارائه شده توسط شو و همکاران دیگر قادر به تخمین دقیق قطر متوسط قطرات نخواهد بود. در حالیکه رابطه پیشنهاد شده در این مقاله می‌تواند این تغییرات را در محاسبات لحاظ نماید.



شکل ۱- مقایسه نتایج رابطه پیشنهادی با داده‌های گزارش شده در مرجع [۱۴]

#### ۴- نتیجه گیری

در این پژوهش سعی شد تا با استفاده از یک روش تحلیلی، رابطه جدیدی برای تخمین قطر متوسط قطرات افشانه زیست سوختها ارایه گردد. رابطه پیشنهادی در این تحقیق برخی از نواقص رابطه شو و همکاران را مرتفع کرده است. بطوریکه علاوه بر وابستگی به شاخص توپولوژیکی، تأثیر شرایط عملکردی پاشش نظیر اختلاف فشار دهانه نازل و همچنین چگالی محیطی که پاشش در آن انجام می‌شود نیز لحاظ شده است. نتایج رابطه جدید پیشنهادی با داده‌های گزارش شده در مرجع [۱۳] مقایسه شد و هماهنگی خوبی بین نتایج مشاهده گردید.

#### مراجع

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., Portero, 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، شهریور ۱۳۸۷.
4. نجفی، ب. پیروزیناه، 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. Bhatti, H.N., Hanif, M.A., Qasim, M., and Rehman, A., "Biodiesel production from waste tallow", Fuel, 87, pp 2961-2966, 2008.
7. Lam, S.C.A., "Biodiesel droplet combustion", MSc thesis, Windsor, Ontario, Canada, 2007.
8. Altiparmak, D., Keskin, A., Koca, A., and Gürü, M., "Alternative fuel properties of tall oil fatty acid methyl ester-diesel fuel blends", Bioresource Technology, 98, pp241-246, 2007.
9. Preyra-Irajo, G.A., Izquierdo, N.G., Covi, M., Nolasco, S.M., Quiroz, F., and Aguirrezábal, L.A.N., "Variability in sunflower oil quality for biodiesel production: A simulation study", Biomass and Bioenergy, 33, pp 459-468, 2009.
10. Giannelos, P.N., Sxizas, S., Lois, E., Zannikos, and F., 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.
11. Elkotb, M.M., "Fuel atomization for spray modeling", Prog. Energy Comb. Sci., 8, pp 61-91, 1982.
12. 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.

13. 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.
14. Shu, Q., Gao, J., Liao, Y., Wang, D. and Wang, J., “Estimation of the sauter mean diameter for biodiesels by the mixture topological index”, Renewable Energy, 36, pp 482-487, 2011.
15. Lee, C.S., Park, S.W., Known, S.I., “An experimental study on the atomization and combustion of biodiesel-blended fuels”, Energy Fuels, 19, pp 2201-2208, 2005.
16. Knothe, G., “Dependence of biodiesel fuel properties on the structure of fatty acid alkyl esters”, Fuel Processing Technology, 86, pp 1059-1070, 2005.
17. Allen, C.A.W., “Properties of biodiesel fuel atomization characteristics based on measured properties”, Ph.D. thesis, DalTech, Dalhousie University, Nova Scotia, Canada, 1998.
18. Shu, Q., Yang, B., Yang, J., Qing, S., “Predicting the viscosity of biodiesel fuels based on the mixture topological index method”, Fuel, 86, pp 1849-1854, 2007.
19. 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, 4, pp. 644–647, 2007.
20. 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, 9, pp 53-58, 2002.
21. Yuan, H., Yang, B. and Yang, J., “ Prediction properties of biodiesel fuels using Mixture Topological Index” , Journal of American Oil Chemists Society, 86, pp. 375-382, 2009.