بررسی و مقایسه پایداری تولید سوخت‌های دیزل و بیودیزل با استفاده از رویکرد تقاضای اکسرژی تجمعی

مجید خانعلی [۱،*]، هما حسین زاده بندبافها [۲]

۱. گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران (آدرس پست الکترونیک khanali@ut.ac.ir)

۲. گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران (آدرس پست الکترونیک homa.hosseinzadeh@ut.ac.ir)

چکیده

در پاسخ به نگرانی‌های زیست‌محیطی ناشی از مصرف انرژی فسیلی و با توجه به لزوم رشد و توسعه اقتصاد پایدار، تولید و استفاده از منابع انرژی پاک مانند سوخت‌های زیستی در بسیاری از نقاط جهان رو به افزایش است. در میان انواع مختلف سوخت‌های زیستی، سوخت‌های زیستی مایع همچون بیودیزل به‌عنوان جایگزین برای همتای فسیلی خود یعنی سوخت دیزل که در بخش حمل‌ونقل مورداستفاده قرار می‌گیرد، بسیار مهم و کاربردی است. علی‌رغم ویژگی‌های مطلوب بیودیزل، تولید آن با مصرف چشم‌گیر حامل‌های انرژی و همچنین مواد مصرفی مبتنی بر منابع فسیلی همراه است که این حقیقت می‌تواند تولید پایدار آن را با مشکل مواجه سازد. ابزارهای مختلفی برای بررسی پایداری تولید سوخت‌های زیستی وجود دارد که در پژوهش حاضر از رویکرد تقاضای اکسرژی تجمعی و همچنین درجه تجمعی کمال به‌منظور بررسی پایداری جریان اکسرژی در تولید بیودیزل‌های نسل اول (تولیدشده از روغن کلزا و سویا) و نسل دوم (تولیدشده از روغن پالم و روغن پسماند خوراکی) و مقایسه آن با سوخت دیزل استفاده شده است. نتایج این مطالعه نشان داد که اگرچه تولید بیودیزل از زیست‌توده نسل اول منجر به حذف مقدار بیش‌تری از اکسرژی از طبیعت خواهد شد، اما بیش از ٦٥ درصد آن مربوط به انرژی‌های تجدید پذیر مبتنی بر زیست‌توده است که معضلات و چالش‌های انرژی‌های فسیلی را ندارند. این در حالی است که بیش از ۹۹ درصد تقاضای اکسرژی تجمعی در تولید سوخت دیزل مربوط به انرژی فسیلی است. همچنین تولید بیودیزل نسل دوم از روغن پسماند نسبت به دیزل و همچنین تولید بیودیزل نسل اول به طرز چشم‌گیری منجر به کاهش میزان کل اکسرژی حذف‌شده از طبیعت شده است. این نتیجه به‌خوبی اهمیت ارزش‌دهی به پسماندهای مختلف و تبدیل آن‌ها به مواد متنوع را نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی:

بیودیزل، پایداری انرژی، تقاضای اکسرژی تجمعی، درجه تجمعی کمال، روغن پسماند خوراکی

*نویسنده مسئول

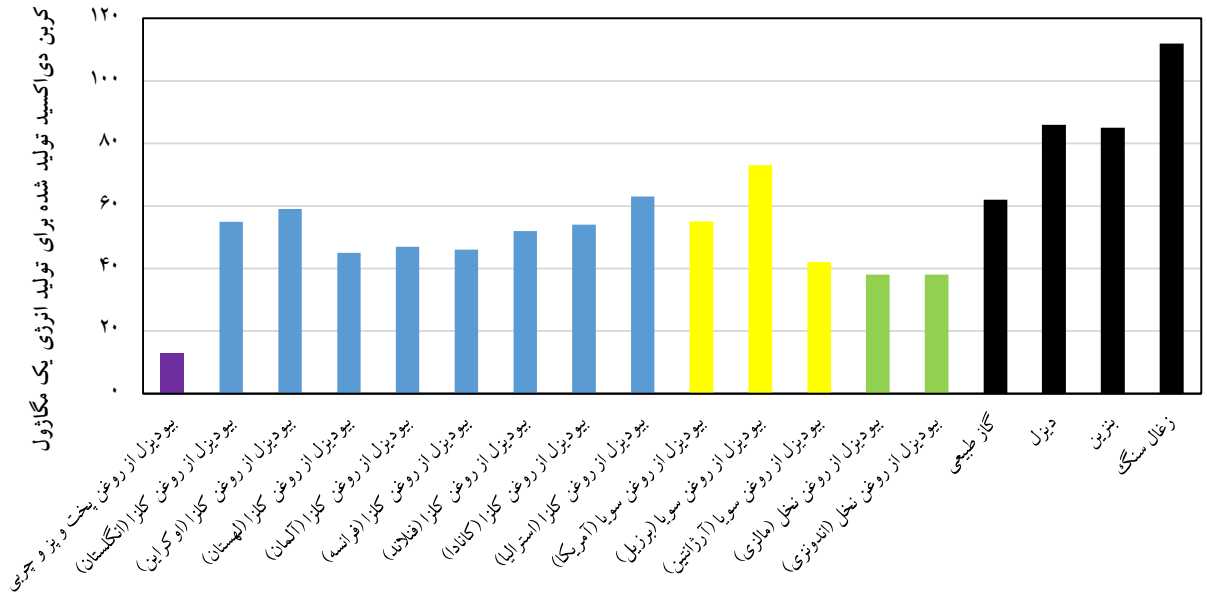
بررسی و مقایسه پایداری تولید سوخت‌های دیزل و بیودیزل با استفاده از رویکرد تقاضای اکسرژی تجمعی

مقدمه

باوجود رشد مصرف انرژی در بخش‌های مختلف، بخش حمل‌ونقل سهم عمده‌ای از مصرف جهانی انرژی را به خود اختصاص داده است [۱]. در حال حاضر، سوخت‌های فسیلی مانند نفت، بنزین و دیزل برای رفع نیاز انرژی در بخش حمل و نقل، نقش مهمی را ایفا می‌نمایند [۲]. بااین‌حال، احتراق سوخت‌های فسیلی با میزان بالای انتشار گازهای نامطلوب مانند ذرات جامد معلق، هیدروکربن‌های نسوخته، کربن مونوکسید، کربن دی‌اکسید، اکسیدهای نیتروژن، اکسیدهای گوگرد و سایر گازهای نامطلوب همراه است که تهدیدی جدی برای محیط‌زیست و سلامت انسان به شمار می‌روند [۳]. با توجه به اهمیت حفظ سلامت انسان و همچنین پایداری محیط‌زیست، تلاش برای جایگزینی کامل یا جزئی این حامل‌های انرژی با حامل‌های انرژی تجدیدپذیر، پایدار و دوستدار محیط‌زیست ضروری است [۴]. بر اساس پژوهش‌های مختلف در میان منابع جایگزین برای سوخت‌های فسیلی، بیودیزل به دلیل خواص فیزیکی-شیمیایی مشابه با سوخت دیزل و همچنین انتشار کم‌تر گازهای نامطلوب به‌شدت موردتوجه قرارگرفته است [۵].

بیودیزل که با عنوان متیل/اتیل استرهای مونوالکیلی زنجیره بلند اسیدهای چرب نیز شناخته می‌شود، اغلب از طریق فرآیند ترانس‌استریفیکاسیون روغن‌های زیستی نظیر روغن‌های گیاهی، چربی‌های حیوانی و جلبک‌ها با الکل‌های سبک در حضور یک کاتالیزگر قلیایی به دست می‌آید [۶]. ازآنجاکه کربن موجود در روغن‌های گیاهی یا چربی حیوانات از کربن دی‌اکسید موجود در هوا منشأ گرفته است، بیودیزل نقش بسیار کم‌تری در بروز پدیده گرمایش جهانی نسبت به همتای فسیلی خود دارد. این خصوصیت بیودیزل می‌تواند در راستای تحقق سیاست‌های کاهش میزان گرمایش جهانی و تغییرات اقلیمی مورداستفاده قرار گیرد. شکل (۱)، انتشار گازهای معادل کربن دی‌اکسید را برای تولید انرژی یک مگاژول از سوخت‌های مختلف، ازجمله بیودیزل تولیدشده از مواد مختلف، مقایسه می‌کند.

-



شکل ۱- مقایسه میزان انتشار کربن دی‌اکسید معادل تولیدشده به ازای هر مگاژول انرژی از سوخت‌های فسیلی و بیودیزل تولیدی از مواد مختلف [۷].

همانطور که در شکل (۱) مشخص است میزان کربن دی اکسید تولیدی در سوخت های مشتق شده از زیست توده از سوخت‌های فسیلی بسیار کم‌تر است. همچنین بازده احتراق بالاتر، تجزیه‌پذیری زیستی بیش‌تر، کاهش انتشار آلاینده‌هایی مانند اکسیدهای گوگرد، هیدروکربن‌ها و کربن مونوکسید، کاهش بو و دوده، ایمنی بیش‌تر به هنگام استفاده، افزایش روغن کاری موتور، عدد ستان بالاتر، نقطه اشتعال بالاتر ازجمله مزایای فنی و زیست‌محیطی بیودیزل نسبت به سوخت دیزل به شمار می‌آید [۸].

علی‌رغم ویژگی‌های مطلوب بیودیزل، تولید آن از منابع مختلف با نگرانی‌های مختلفی همراه است. رقابت بر سر زمین‌های زراعی و منابع آب آبیاری از اصلی‌ترین نگرانی در رابطه با تولید بیودیزل از دانه‌های روغنی (نسل اول بیودیزل) به شمار می‌رود [۹]. همچنین تولید دانه‌های روغنی مستلزم مصرف چشم‌گیر مواد و انرژی است. یک‌راه حل امیدوارکننده در رابطه با تقابل سوخت و غذا، استفاده از روغن‌های پسماند، چربی‌ها و یا تولید و استفاده از گیاهان روغنی غیرخوراکی (نسل دوم بیودیزل) کشت‌شده در زمین‌های باکیفیت پایین است [۱۰]. با این‌وجود، تولید بیودیزل از روغن‌های باکیفیت کم‌تر مانند روغن‌های پسماند منجر به مصرف انرژی و مواد بیش‌تری در فرآیند ترانس‌استریفیکاسیون می‌شود. بدیهی است که عمده حامل‌های انرژی و همچنین مواد مصرفی در تولید بیودیزل مبتنی بر سوخت‌های فسیلی هستند که این حقیقت می‌تواند تولید پایدار آن‌ها را با مشکل مواجه کند.

درمجموع سه معیار انرژی، اقتصادی و زیست‌محیطی در ارزیابی پایداری یک فرآیند، به‌ویژه برای صنعت سوخت‌های زیستی، اهمیت دارند [۱۱]. بدیهی است عدم پایداری مصرف انرژی عواقب جبران‌ناپذیری را به دنبال خواهد داشت. ازاین‌رو، ابزارهای مختلفی برای بررسی پایداری سامانه‌های تولیدی مختلف ارائه‌شده است که می‌توانند ریشه ناپایداری را در سامانه‌ها شناسایی کرده و مسیر را برای افزایش پایداری تولید فراهم سازد. ارزیابی چرخه زندگی، ارزیابی انرژی، ارزیابی امرژی، ارزیابی فنی-اقتصادی، ارزیابی اکسرژی و بسیاری دیگر از روش‌ها، ابزارهای شناخته‌شده‌ای برای ارزیابی پایداری انرژی، اقتصادی و زیست‌محیطی هستند. از میان روش‌های مختلف ارزیابی، تقاضای انرژی تجمعی[1] یکی از مهم‌ترین روش‌ها برای مطالعه و کمی سازی مصرف انرژی بر اساس یک رویکرد گهواره تاگور است که می‌تواند تقاضای کل انرژی برای تولید یک محصول یا انجام یک فرآیند در طول چرخه زندگی آن، از استخراج مواد تا مدیریت پسماند را محاسبه نماید [۱۲]. تجزیه‌وتحلیل گهواره تا گور یا روش ارزیابی چرخه زندگی که تحت عنوان تعادل بوم‌شناسی خوانده می‌شود، یک روش آگاهانه و کل‌نگر در ارزیابی اثرات زیست‌محیطی در تمامی مراحل گوناگون زندگی یک محصول/خدمت شامل تولید مواد خام، توزیع، کاربرد، دفع و دورریز است. شایان ذکر است که یک ارتباط قوی بین تقاضای انرژی تجمعی و اثرات مهم زیست‌محیطی مانند تخلیه منابع بیولوژیکی و پتانسیل گرم شدن کره زمین نیز وجود دارد [۱۳]. بااین‌حال، این روش مبتنی بر قانون اول ترمودینامیک است و تنها بر نهاده‌هایی که دارای ارزش انرژی هستند، تمرکز می‌کند [۱۴]. در مقابل، تقاضای اکسرژی تجمعی[2] مبتنی بر قانون دوم ترمودینامیک است و منابع غیر انرژی مانند مواد معدنی و فلزات را نیز شامل می‌شود. این شاخص برای به تصویر کشیدن حذف کامل اکسرژی از طبیعت برای تولید یک محصول یا انجام یک فرآیند معرفی‌شده است [۱۵]. بنابراین، تقاضای اکسرژی تجمعی یک شاخص مناسب برای مطالعه انرژی در چرخه زندگی سامانه‌های مرتبط با تولید سوخت‌های زیستی به شمار می‌رود.

بر اساس آنچه ذکر شد، تولید پایدار بیودیزل باید در اولویت قرار گیرد، ازاین‌رو، مطالعه حاضر به‌منظور بررسی پایداری مصرف انرژی در تولید انواع مختلف بیودیزل نسل اول (تولیدشده از روغن کلزا و سویا) و نسل دوم (تولیدشده از روغن پالم و روغن پسماند خوراکی)، جریان اکسرژی را در چرخه زندگی تولید بیودیزل کاوش کرده و آن را با سوخت دیزل مقایسه نموده است. نتایج این مطالعه جهت تدوین سیاست‌ها در چگونگی تولید پایدار انواع مختلف بیودیزل مفید خواهد بود.

[1] Cumulative energy demand (CED)
[2] Cumulative energy demand (CExD)

مواد و روش‌ها

طبق پژوهش‌های مختلف، استفاده از روغن‌ها و چربی‌ها به‌طور مستقیم در موتور دیزل منجر به بروز چالش‌های مختلفی ازجمله چسبندگی نازل افشانک، اتمیزه‌شدن ضعیف سوخت، کاهش دوام موتور، سایش بالاتر موتور، هزینه‌های بالاتر برای نگهداری موتور و انتشار بیش‌تر آلاینده‌ها می‌شود [۱۶]. محتوی بالای اسید چرب، گرانروی بالای ذاتی، فراریت کم و تشکیل صمغ به دلیل اکسیده‌شدن و پلیمریزاسیون در زمان ذخیره کردن و احتراق ازجمله مهم‌ترین عواملی هستند که منجر به بروز این چالش‌ها می‌شوند [۱۷]. با توجه به این محدودیت‌ها، روش‌های مختلفی مانند رقیق‌سازی، پیرولیز (آذر کافت)، ریز- امولسیون[1] و ترانس‌استریفیکاسیون برای رفع مشکلات ناشی از استفاده مستقیم روغن‌ها و چربی‌ها در موتور دیزل پیشنهادشده است [۱۸]. از میان روش‌های ذکرشده، به دلیل هزینه پایین، سادگی و بازده بالای تبدیل، ترانس‌استریفیکاسیون در حال حاضر بهترین روشی است که برای تولید بیودیزل از روغن‌های موجود به‌طور گسترده مورداستفاده قرار می‌گیرد. در طی فرآیند ترانس‌استریفیکاسیون، روغن و یا چربی‌های استخراج‌شده در حضور کاتالیزگر یا کاتالیزگر زیستی (اسیدها، بازها و آنزیم‌ها) با الکل واکنش نشان می‌دهند. اتانول، متانول، بوتانول، ایزوپروپانول، ترت-بوتانول و اکتانول ازجمله الکل‌های مورداستفاده در فرآیند ترانس‌استریفیکاسیون هستند. بااین‌حال، به دلیل هزینه کم متانول نسبت به سایر الکل‌ها، به‌طورمعمول از این الکل در فرآیند ترانس‌استریفیکاسیون استفاده می‌شود. همچنین کاتالیزگر مورداستفاده در تولید تجاری بیودیزل معمولاً کاتالیزگر قلیایی پتاسیم هیدروکسید است.

در طی فرآیند ترانس‌استریفیکاسیون از طریق چندین واکنش برگشت‌پذیر متوالی، تری گلیسیریدها به دی گلیسیرید و به دنبال آن دی گلیسیریدها به مونوگلیسیریدها تبدیل می‌شوند . سرانجام، این فرآیند با تبدیل مونوگلیسیریدها به گلیسرول پایان می‌یابد. به‌طور موازی با هر مرحله از این واکنش، یک استر چرب آزاد می‌شود، به عبارت بهتر، از یک مولکول تری گلیسیرید سه مولکول آلکیل استر اسید چرب تولید می‌شود (رابطه ۱).

$$\begin{array}{l} CH_2-OCOR^1 \\ | \\ CH-OCOR^2+3CH_3OH \xleftrightarrow{catalyst} \\ | \\ CH_2-OCOR^3 \end{array} \quad \begin{array}{l} CH_2OH \quad R^1COOCH_3 \\ | \\ CHOH+R^2COOCH_3 \\ | \\ CH_2OH \quad R^3COOCH_3 \end{array} \qquad (۱)$$

تری گلیسیرید متانول گلیسرول متیل استر

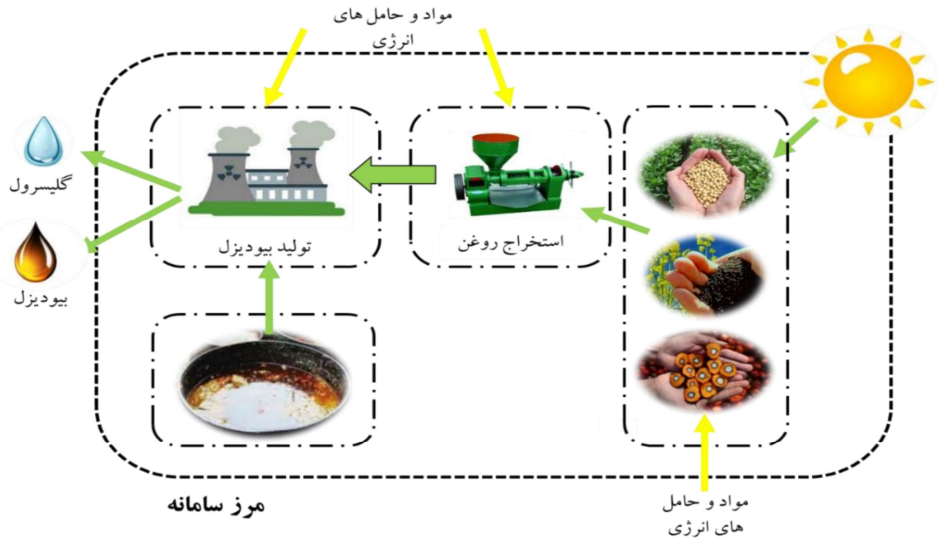
در پژوهش تولید بیودیزل بر اساس دو نوع روغن خوراکی یعنی سویا و کلزا به‌عنوان بیودیزل‌های نسل اول، روغن پالم و روغن پسماند خوراکی به‌عنوان بیودیزل‌های نسل دوم مورد ارزیابی قرار گرفتند.

مطابق با استاندارد ایزو، هدف از یک پژوهش مبتنی بر چرخه زندگی باید به‌طور کامل و به‌وضوح مشخص باشد [۱۹]. به عبارت بهتر، برنامه موردنظر، دلایل انجام پژوهش و مخاطب پژوهش نباید به‌صورت مبهم بیان شوند. با توجه به این مطلب، هدف کلی از این مطالعه، ارزیابی جریان اکسرژی تولید بیودیزل از استخراج مواد اولیه تا پایان مرحله تولید به‌منظور تعیین میزان حذف اکسرژی از طبیعت و شناسایی منشأ آن و مقایسه آن با تولید سوخت دیزل است. به‌طورمعمول، مخاطب این هدف را در سطح کلان سیاست‌گذاران و مدیران حمل‌ونقل و در سطح خرد مصرف‌کنندگان و رانندگان وسایل نقلیه تشکیل می‌دهند. برای دستیابی به هدف ذکرشده، واحد عملکردی، سامانه موردبررسی و مرزهای آن باید به‌دقت مشخص و توصیف شوند.

[1] Micro-emulsion

اگرچه تعریف واحد عملکردی ساده به نظر می‌رسد، اما تعیین دقیق این ویژگی یک مسئله اساسی در پژوهش‌های مرتبط با چرخه زندگی محصول است. به دلیل این واقعیت که این ویژگی به شکل نسبت نیست، باید به‌گونه‌ای انتخاب شود که قابل‌سنجش باشد و امکان مقایسه نتایج پژوهش‌های مختلف را با یکدیگر فراهم آورد. ازاین‌رو، مقایسه محصولات مختلف توسط رویکرد ارزیابی چرخه زندگی تنها در صورتی معنی‌دار است که این محصولات از واحد عملکردی یکسان استفاده کنند [۲۰]. به‌طورمعمول در پژوهش‌های مرتبط با چرخه زندگی در تولید سوخت‌های مختلف، جرم سوخت تولیدی و همچنین میزان محتوای انرژی سوخت به‌عنوان واحد عملکردی انتخاب‌شده‌اند. در این پژوهش تولید ۱,۲ کیلوگرم بیودیزل که ارزش حرارتی معادل با یک کیلوگرم سوخت دیزل را دارد؛ به‌عنوان واحد عملکردی در نظر گرفته‌شده است.

از سوی دیگر، مرزهای یک سامانه بر اساس هدف کلی پژوهش مشخص می‌شود؛ باید کلیه فرآیندهای موجود در سامانه تولید محصول/ارائه خدمت را طبق دستورالعمل‌های تعیین‌شده توسط استاندارد ایزو درج کند [۱۹]. زیرا مرز سامانه دامنه تحلیل را مشخص می‌کند و کلیه نهاده‌های ورودی و ستانده‌های خروجی را که باید موردتوجه قرار گیرد، نشان می‌دهد. مرز سامانه ممکن است تنها یک بخش از فرآیند تولید محصول/ارائه خدمت (دروازه تا دروازه) باشد. اما اگر تصمیم‌گیرندگان قصد داشته باشند تجزیه‌وتحلیل را در سطح وسیع‌تری انجام دهند، مرز باید شامل کل فرآیند و یا به عبارت بهتر یک نگرش گهواره تا گور باشد که همه جزئیات را از استخراج مواد اولیه گرفته تا از مدیریت پسماند پوشش دهد. در پژوهش حاضر مرز کلی سامانه از استخراج مواد خام شروع و با تولید سوخت‌های بررسی‌شده پایان می‌یابد (شکل ۲)



شکل ۲ – مرز سامانه تولید انواع مختلف بیودیزل در پژوهش حاضر.

بر اساس استاندارد ایزو؛ تحلیل سیاهه، فهرست موجودی و یا موجودی چرخه زندگی شامل جمع‌آوری داده‌ها و شناسایی روش‌های محاسبه به منظور اندازه‌گیری جریان‌های ورودی و خروجی مرتبط در فرآیند تولید محصول و یا ارائه خدمت است. در این مرحله، محاسبه‌های مربوط به تعادل مواد و انرژی برای اندازه‌گیری جریان مواد و انرژی به ازای واحد عملکردی انجام می‌شود [۱۹]. به‌طورکلی، در پژوهش‌های مرتبط با چرخه زندگی، مرحله تحلیل سیاهه از نظر محاسباتی فشرده‌ترین مرحله پژوهش است، زیرا شامل توسعه جریان فرآیندهای درگیر باهدف جمع‌آوری داده‌ها، اعتبارسنجی آن‌ها، سازمان‌دهی و محاسبه آن‌ها بر اساس واحد عملکردی موردنظر است [۲۱]. در این پژوهش دو مجموعه داده برای تکمیل تحلیل سیاهه مورد استفاده قرارگرفته است: داده‌های پس‌زمینه‌ای و داده‌های پیش‌زمینه در تولید محصول. داده‌های

پس‌زمینه شامل داده‌های مرتبط با تهیه مواد و حامل‌های انرژی و حمل‌ونقل آن‌ها، به دلیل گستردگی و عدم دسترسی به داده‌های واقعی، از پایگاه داده اکواینونت[1] نسخه ۳,۰ موجود در نرم‌افزار سیماپرو گردآوری‌شده است. از سوی دیگر، داده‌های پیش‌زمینه مربوط به مقادیر مواد و حامل‌های انرژی مصرف‌شده در سراسر چرخه تولید بیودیزل از مطالعات مختلف استخراج شده است. در نهایت برای ارزیابی تقاضای اکسرژی تجمعی از نرم‌افزار سیماپرو استفاده شده است. لازم به ذکر است که تقاضای اکسرژی تجمعی شامل رده اثرهای "تجدید ناپذیر، فسیلی"، "تجدید ناپذیر، هسته‌ای" ،"تجدید ناپذیر، اولیه"، "تجدید ناپذیر، مواد معدنی"، "تجدید ناپذیر، فلزات"، "تجدید پذیر، جنبشی"، "تجدید پذیر، پتانسیل"، "تجدید پذیر، خورشیدی"، "تجدید پذیر، زیست‌توده" و "تجدید پذیر، آب" است.

علاوه بر محاسبه شاخص تقاضای اکسرژی تجمعی، این مطالعه درجه تجمعی کمال[2] را برای تجزیه‌وتحلیل بیش‌تر جریان اکسرژی در تولید سوخت‌های مختلف کاوش می‌کند. درجه تجمعی کمال در حقیقت به‌عنوان نسبت محتوای اکسرژی محصول نهایی (سوخت) به کل تقاضای اکسرژی تجمعی تعریف می‌شود [۲۲]. لازم به ذکر است که درجه تجمعی کمال بالاتر به معنای صرفه‌جویی بهتر و مصرف کارآمدتر ورودی‌ها در سامانه است.

نتایج و بحث

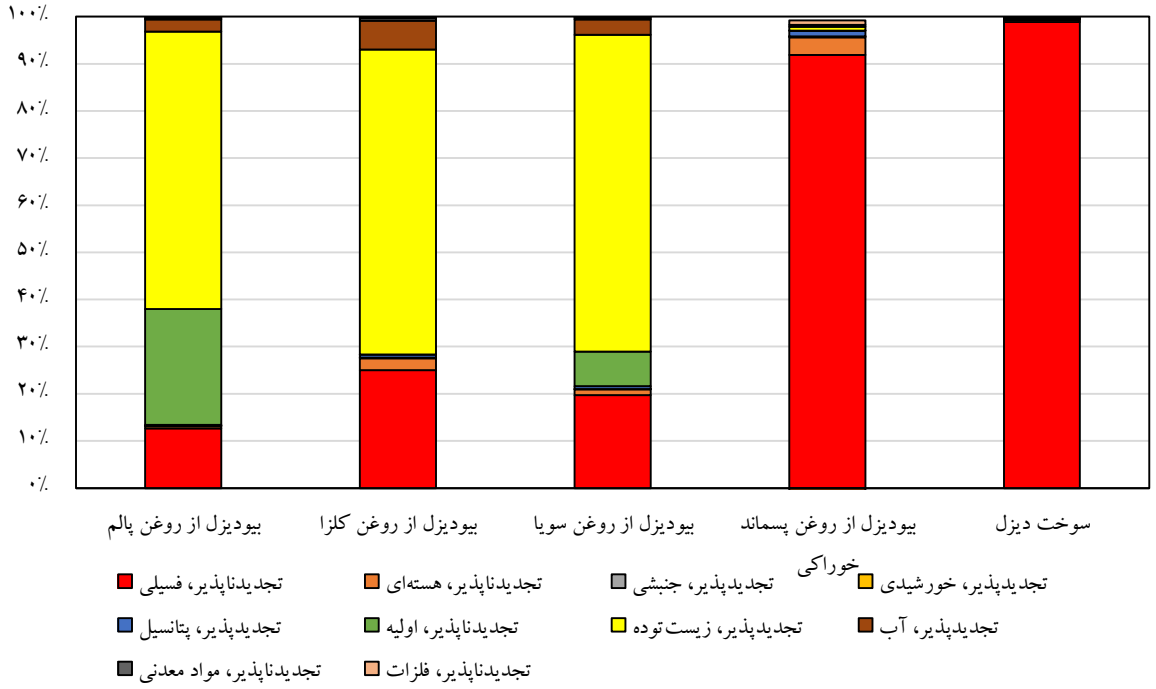
نتایج حاصل از ارزیابی تقاضای اکسرژی تجمعی برای تولید بیودیزل از منابع مختلف و همچنین سوخت دیزل برحسب واحد عملکردی در جدول ۱ ذکرشده‌اند. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، بیودیزل تولیدشده از روغن کلزا و به دنبال آن بیودیزل تولیدشده از سویا بیش‌ترین تقاضای اکسرژی را در چرخه زندگی‌شان به خود اختصاص داده‌اند. تجزیه‌وتحلیل نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که بیش‌ترین مشارکت در مصرف این میزان اکسرژی مربوط به دانه روغنی است. بااین‌وجود، همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده‌شده است، در فرآیند تولید آن‌ها بیش از ۶۵ درصد اکسرژی حذف‌شده از طبیعت به دلیل استفاده از انرژی تجدید پذیر (زیست‌توده) است. این در حالی است که اگرچه تولید هر کیلوگرم دیزل نسبت به بیودیزل تولیدشده از دانه کلزا و سویا و همچنین روغن پالم اکسرژی کم‌تری را تقاضا می‌کند؛ اما ۹۹ درصد این انرژی به شکل انرژی تجدید ناپذیر فسیلی است (شکل ۳). علاوه بر این‌که برخلاف انرژی فسیلی، انرژی تجدید پذیر به شکل زیست‌توده در مدت کوتاهی تولید می‌شود؛ احتراق آن به طرز چشم‌گیری منجر به افت گازهای نامطلوبی مانند گوگرد دی‌اکسید، کربن مونوکسید و هیدروکربن‌های نسوخته می‌شود [۲۳]. بر اساس نتایج، تولید بیودیزل از روغن پسماند نسبت به دیزل و همچنین تولید بیودیزل از منابع دیگر به طرز چشم‌گیری منجر به کاهش میزان کل اکسرژی حذف‌شده از طبیعت شده است. این نتیجه به‌خوبی اهمیت ارزش‌دهی به پسماندهای مختلف و تبدیل آن‌ها به مواد متنوع را نشان می‌دهد.

جدول ۱- تقاضای اکسرژی تجمعی در تولید سوخت‌های موردبررسی بر اساس واحد عملکردی.

رده اثر	واحد	بیودیزل از روغن پالم	بیودیزل از روغن کلزا	بیودیزل از روغن سویا	بیودیزل از روغن پسماند خوراکی	سوخت دیزل
کل	مگاژول	۶۱,۳۶	۸۵,۸۱	۶۷,۹۲	۹,۸۳	۵۸,۲۷
تجدید ناپذیر، فسیلی	مگاژول	۷,۷۳۵	۲۱,۵۰	۱۳,۳۶	۹,۱۸	۵۷,۶۰
تجدید ناپذیر، هسته‌ای	مگاژول	۰,۳۴۵	۲,۱۲۶	۰,۸۷۶	۰,۳۷۱	۰,۳۱۲
تجدید پذیر، جنبشی	مگاژول	۰,۰۲۰	۰,۰۷۷	۰,۰۵۱	۰,۰۲۱۳	۰,۰۱۵۸
تجدید پذیر، خورشیدی	مگاژول	۰,۰۰۰۳	۰,۰۰۴۱	۰,۰۰۰۸	۰,۰۰۰۰۲	۰,۰۰۰۳
تجدید پذیر، پتانسیل	مگاژول	۰,۱۳۲	۰,۶۲۹	۰,۳۸۹	۰,۱۲۵۸	۰,۰۹۶۰

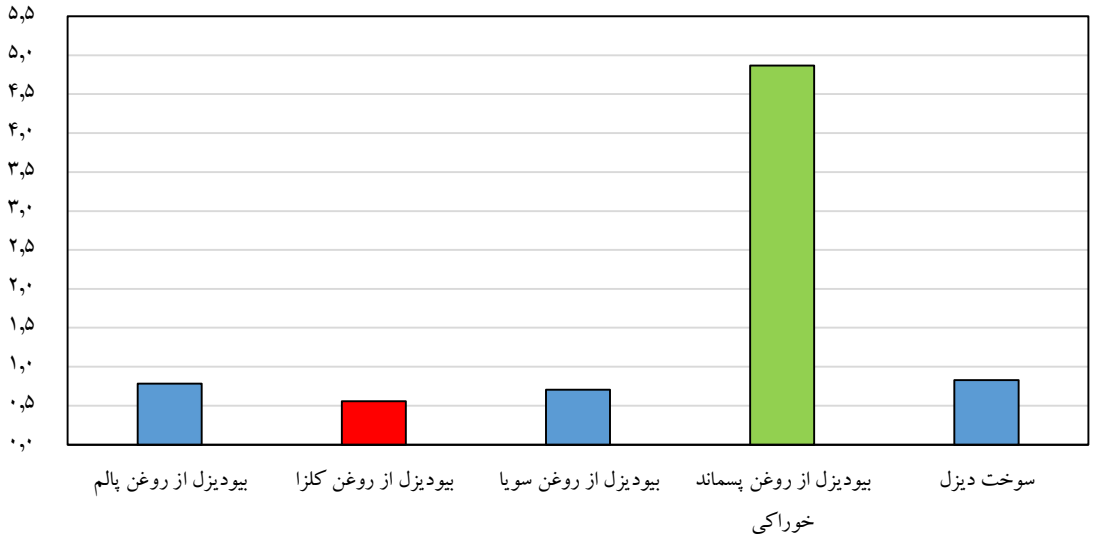
[1] EcoInvent
[2] Cumulative degree of perfection (CDP)

تجدید ناپذیر، اولیه	مگاژول	۱۵,۰۵	۰,۰۰۲۸	۴,۹۷	۰,۰۰۱۱	۰,۰۰۰۳
تجدید پذیر، زیست‌توده	مگاژول	۳۶,۱۱	۵۵,۴۹	۴۵,۶۵	۰,۷۲۰	۰,۰۵۹۷
تجدید پذیر، آب	مگاژول	۱,۶۰۲	۵,۲۵۸	۲,۲۲۰	-۰,۰۷۸	۰,۱۲۱۴
تجدید ناپذیر، مواد معدنی	مگاژول	۰,۱۳۷	۰,۴۴۶	۰,۱۹۴	۰,۰۴۶۹	۰,۰۴۴۶
تجدید ناپذیر، فلزات	مگاژول	۰,۲۱۵	۰,۲۶۷	۰,۱۹۵	۰,۰۹۵۳	۰,۰۲۴۸



شکل ۳- سهم هر یک از انواع اکسرژی مورد تقاضا برای تولید سوخت‌های موردبررسی در پژوهش حاضر.

برای درک بهتر تقاضای اکسرژی در تولید سوخت‌های بررسی‌شده درجه تجمعی کمال محاسبه و نتایج آن در شکل ۴ ارائه‌شده است. نتایج نشان می‌دهد که این شاخص بین ۰,۵۶ برای بیودیزل تولیدشده از روغن کلزا تا ۴,۸۷ برای تولید بیودیزل از روغن پسماند خوراکی متغیر است. این نتیجه نیز بر این حقیقت که تولید بیودیزل از پسماند در مقایسه با سایر سوخت‌ها از پایداری بیش‌تری ازنظر مصرف انرژی برخوردار است، تأکید می‌کند.



شکل ٤- درجه تجمعی کمال برای تولید سوخت‌های موردبررسی در پژوهش حاضر.

بر اساس گزارش ارائه‌شده به دفتر سازمان ملل متحد در ایران، سالیانه حدود ۵۰۰ هزار تن روغن پسماند خوراکی در ایران تولید می‌شود که معمولاً همراه با زباله‌های جامد شهری در محل دفن زباله دفع شده و یا در فاضلاب شهری تخلیه می‌شوند. بااین‌حال، دفع روغن پسماند خوراکی در محل‌های دفن زباله می‌تواند آب‌وخاک را آلوده کرده و متعاقباً زیست‌بوم را آشفته کند، درحالی‌که تخلیه در فاضلاب شهری نیز می‌تواند باعث کاهش قطر لوله‌های فاضلاب و مسدود شدن لوله‌ها و درنتیجه ایجاد مشکلات اقتصادی و زیست‌محیطی شود. همچنین، روغن پسماند خوراکی دارای حلالیت کمی در آب است که منجر به اثرات سوئی بر روی گیاهان و جانوران آبزی می‌شود؛ زیرا حضور آن در آب کاهش میزان اکسیژن محلول در آب و همچنین نور خورشید واردشده در منابع آبی را به دنبال دارد. روغن پسماند خوراکی همچنین می‌تواند مانند عایقی خاک را از هوا و آب جدا کرده و متعاقباً ارگانیسم‌های خاکی مانند کرم‌ها و باکتری‌ها را از بین ببرد. علاوه بر این، موش‌ها و حیوانات موذی از روغن پسماند خوراکی تغذیه می‌کنند که منجر به تکثیر آن‌ها و درنتیجه خطرات آن برای سلامتی انسان می‌شود [۲۴]. با توجه به موارد ذکرشده تولید بیودیزل از روغن پسماند خوراکی نه‌تنها منجر به پایداری مصرف انرژی در تولید سوخت می‌شود، بلکه از اثرات زیست‌محیطی ناشی از عدم تیمار روغن کاسته و بر پایداری زیست‌محیطی نیز می‌افزاید. بدیهی است که هزینه روغن پسماند خوراکی به‌مراتب بسیار کم‌تر از هزینه روغن‌های گیاهی است؛ ازاین‌رو، استفاده از روغن پسماند خوراکی پایداری اقتصادی تولید بیودیزل را نیز تضمین می‌کند.

علی‌رغم این حقیقت که تولید بیودیزل از روغن پسماند خوراکی می‌تواند تا حد زیادی پایداری تولید بیودیزل را افزایش دهد، هنوز چگونگی جمع‌آوری آن، به‌استثنای جمع‌آوری از کارخانه‌های بزرگ صنایع غذایی، چالش‌برانگیز است؛ بنابراین، در حال حاضر تولید بیودیزل هنوز بر روغن مشتقات از دانه‌های روغنی خوراکی استوار است. ازاین‌رو، تولید دانه‌های روغنی باید به سمت پایداری بیش‌تر سوق داده شوند. بااین‌وجود، عقب‌ماندگی شدید در تولید دانه‌های روغنی در کشور و وابستگی حدود ۸۴ درصدی آن به واردات، نه‌تنها امکان تولید بیودیزل از آن‌ها را محدود کرده است بلکه امنیت غذایی کشور را نیز مورد تهدید جدی قرار داده است. از طرفی بیش‌ترین ارز کشور در واردات محصولات کشاورزی استراتژیک، صرف واردات این گروه از محصولات و فرآورده‌های آن می‌شود که هرساله این واردات به دلیل افزایش مصرف سرانه و ازدیاد جمعیت بیش‌تر می‌شود. این در حالی است که پایداری تولید گندم و غلات کشور به کشت دانه‌های روغنی در تناوب آن بستگی دارد که اگر کشت دانه‌های روغنی را در تناوب غلات قرار نگیرد قطعاً پایداری تولید گندم و سایر غلات از

دست می‌رود و کشور مجبور به واردات این محصولات نیز خواهد شد. بر اساس هدف‌گذاری انجام‌شده، قرار بود تا پایان سال ۱۳۹۸، سطح زیر کشت کلزا به ۷۰۰ هزار هکتار و تولید دانه کلزا به ۹۰۰ هزار تن برسد؛ اما در حال حاضر سطح زیر کشت کلزا کم‌تر ۲۰۰ هزار هکتار و تولید دانه کلزا هم ۳۵۰ هزار تن است (http://ayaronline.ir/1399/09/302683.html). علی‌رغم اقلیم چهارفصل و پتانسیل بالای تولید در بخش کشاورزی، عوامل متعدد همچون بی‌توجهی مسئولان به اجرای قانون خرید تضمینی، تأخیر در پرداخت مطالبات، کمبود ماشین‌های برداشت ریزدانه و رانت جویی واردکنندگان مانع توسعه کشت دانه‌های روغنی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین محصولات استراتژیک شده است. بنابراین مدل فعلی مدیریت بازار دانه‌های روغنی ناکارآمد و نیازمند اصلاح است. برنامه‌ریزی برای رسیدن به خودکفایی نسبی در تولید دانه‌های خوراکی، شکستن انحصار واردات دانه‌های روغنی، ورود مستقیم کشاورزان و تولیدکنندگان به بازار ازجمله راه‌کارهای پیشنهادی برای بهبود وضعیت فعلی است. ازآنجایی‌که چشم‌انداز آینده تمام کشورها مبتنی بر استفاده از سوخت‌های زیستی و جایگزینی آن با سوخت دیزل است، تدوین سیاست‌های صحیح برای خودکفایی در تولید دانه‌های روغنی نه‌تنها منجر به تضمین امنیت غذایی است، بلکه صادرات روغن‌های گیاهی و بیودیزل مشتق شده از آن می‌تواند نقش مهمی در اقتصاد بدون نفت ایفا نماید.

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر باهدف بررسی جریان اکسرژی در تولید چند نمونه بیودیزل متعلق به نسل اول (بیودیزل تولیدشده از روغن کلزا و سویا) و دوم (بیودیزل تولیدشده از روغن پالم و روغن پسماند خوراکی) و همچنین مقایسه آن‌ها با سوخت دیزل ارائه‌شده است. در این پژوهش تقاضای اکسرژی تجمعی و همچنین درجه تجمعی کمال به‌عنوان دو رویکرد مهم در رابطه با مباحث اکسرژی سامانه‌های تولیدی مورد استفاده قرار گرفت. نتایج این مطالعه نشان داد که اگرچه تولید بیودیزل از زیست‌توده نسل اول منجر به حذف مقدار بیش‌تری از اکسرژی از طبیعت خواهد شد، اما بیش از ۶۵ درصد آن مربوط به انرژی‌های تجدید پذیر مبتنی بر زیست‌توده است که معضلات و چالش‌های انرژی‌های فسیلی را ندارند. این در حالی است که بیش از ۹۹ درصد تقاضای اکسرژی تجمعی در تولید سوخت دیزل مربوط به انرژی فسیلی است. نتایج همچنین نشان داد که تولید بیودیزل از روغن پسماند خوراکی به طرز چشم‌گیری تقاضای اکسرژی تجمعی را کاهش می‌دهد. بر اساس نتایج، درجه تجمعی کمال در بازه ۰٫۵۶ برای بیودیزل تولیدشده از روغن کلزا تا ۴٫۸۷ برای تولید بیودیزل از روغن پسماند خوراکی متغیر است. این نتیجه نیز بر این حقیقت که تولید بیودیزل از پسماند در مقایسه با سایر سوخت‌ها از پایداری بیش‌تری ازنظر مصرف انرژی برخوردار است، تأکید می‌کند. بااین‌حال تولید بیودیزل از روغن پسماند هنوز با چالش‌هایی همراه است و در نتیجه زیست‌توده اصلی برای تولید بیودیزل روغن مشتق شده از دانه‌های روغنی است. بااین‌وجود، عقب‌ماندگی شدید در تولید دانه‌های روغنی در کشور و وابستگی حدود ۸۴ درصدی آن به واردات، امکان تولید بیودیزل از دانه‌های روغنی را در کشور محدود ساخته است. در پایان می‌توان گفت تدوین سیاست‌های صحیح برای خودکفایی در تولید دانه‌های روغنی نه‌تنها منجر به تضمین امنیت غذایی است، بلکه صادرات روغن‌های گیاهی و بیودیزل مشتق شده از آن می‌تواند جایگزین مناسبی برای نفت به‌عنوان یک نهاده صادراتی ارزشمند کشور باشد.

مراجع

1. Salam, S., Verma, T.N. 2019. Appending empirical modelling to numerical solution for behaviour characterisation of microalgae biodiesel. Energy Conversion and Management, 180:496–510.

2. Silitonga, A. S., Mahlia, T. M. I., Kusumo, F., Dharma, S., Sebayang, A. H., Sembiring, R. W., and Shamsuddin, A. H. 2019. Intensification of Reutealis trisperma biodiesel production using infrared radiation: Simulation, optimisation and validation. Renewable Energy, 133:520-527.

3. Watts, N., Amann, M., Ayeb-Karlsson, S., Belesova, K., Bouley, T., Boykoff, M., ... and Costello, A. 2018. The Lancet

Countdown on health and climate change: from 25 years of inaction to a global transformation for public health. The Lancet, 391(10120):581-630.

4. Arunkumar, M., Kannan, M., and Murali, G. 2019. Experimental studies on engine performance and emission characteristics using castor biodiesel as fuel in CI engine. Renewable Energy, 131:737-744.

5. Sakthivel, G., Sivaraja, C. M., and Ikua, B. W. 2019. Prediction OF CI engine performance, emission and combustion parameters using fish oil as a biodiesel by fuzzy-GA. Energy, 166:287-306.

6. Hosseinzadeh-Bandbafha, H., Tabatabaei, M., Aghbashlo, M., Khanali, M., and Demirbas, A. 2018. A comprehensive review on the environmental impacts of diesel/biodiesel additives. Energy Conversion and Management, 174:579-614.

7. GOV.UK. Renewable Transport Fuel Obligation (RTFO) order. 2008. Available from: http://www.dft.gov.uk/pgr/roads/environment/rtfo/govrecrfa.pdf

8. Demirbas, A. 2007. Importance of biodiesel as transportation fuel. Energy policy, 35(9):4661-4670.

9. Aghbashlo, M., Hosseinpour, S., Tabatabaei, M., and Soufiyan, M. M. 2019. Multi-objective exergetic and technical optimization of a piezoelectric ultrasonic reactor applied to synthesize biodiesel from waste cooking oil (WCO) using soft computing techniques. Fuel, 235:100-112.

10. Tabatabaei, M., Aghbashlo, M., Dehhaghi, M., Panahi, H. K. S., Mollahosseini, A., Hosseini, M., and Soufiyan, M. M. 2019. Reactor technologies for biodiesel production and processing: a review. Progress in Energy and Combustion Science, 74:239-303.

11. Delrue, F., Setier, P. A., Sahut, C., Cournac, L., Roubaud, A., Peltier, G., and Froment, A. K. 2012. An economic, sustainability, and energetic model of biodiesel production from microalgae. Bioresource technology, 111:191-200.

12. McManus, M. C. 2012. Environmental consequences of the use of batteries in low carbon systems: The impact of battery production. Applied Energy, 93:288-295.

13. Bahlawan, H., Poganietz, W. R., Spina, P. R., and Venturini, M. 2020. Cradle-to-gate life cycle assessment of energy systems for residential applications by accounting for scaling effects. Applied Thermal Engineering, 171:115062.

14. Alvarenga, R. A., Lins, I. D. O., and Almeida Neto, J. A. D. 2016. Evaluation of abiotic resource LCIA methods. Resources, 5(1):13.

15. Bösch, M. E., Hellweg, S., Huijbregts, M. A., and Frischknecht, R. 2007. Applying cumulative exergy demand (CExD) indicators to the ecoinvent database. The International Journal of Life Cycle Assessment, 12(3):181-190.

16. Srivastava, N., Srivastava, M., Gupta, V. K., Manikanta, A., Mishra, K., Singh, S., ... and Mishra, P. K. 2018. Recent development on sustainable biodiesel production using sewage sludge. 3 Biotech, 8(5):1-11.

17. Mishra, V. K., and Goswami, R. 2018. A review of production, properties and advantages of biodiesel. Biofuels, 9(2):273-289.

18. Tripathi, D. K., Singh, S., Singh, S., Pandey, R., Singh, V. P., Sharma, N. C., ... and Chauhan, D. K. 2017. An overview on manufactured nanoparticles in plants: uptake, translocation, accumulation and phytotoxicity. Plant Physiology and Biochemistry, 110:2-12.

19. ISO. 14040 International standard. Environmental Management–Life Cycle Assessment–Principles and Framework. 2006. International Organisation for Standardization, Geneva, Switzerland. Available from: https://www.iso.org/standard/37456.html

20. Peuportier, B. L. P. 2001. Life cycle assessment applied to the comparative evaluation of single family houses in the

French context. Energy and buildings, 33(5):443-450.

21. Altun-Çiftçioğlu, G. A., Gökulu, O., Kadırgan, F., and Kadırgan, M. A. N. 2016. Life cycle assessment (LCA) of a solar selective surface produced by continuous process and solar flat collectors. Solar energy, 135:284-290.

22. Amiri, Z., Asgharipour, M. R., Campbell, D. E., and Armin, M. 2020. Extended exergy analysis (EAA) of two canola farming systems in Khorramabad, Iran. Agricultural Systems, 180:102789.

23. Hosseinzadeh-Bandbafha, H., Tabatabaei, M., Aghbashlo, M., Khanali, M., Khalife, E., Shojaei, T. R., and Mohammadi, P. 2020. Consolidating emission indices of a diesel engine powered by carbon nanoparticle-doped diesel/biodiesel emulsion fuels using life cycle assessment framework. Fuel, 267:117296.

24. Singh-Ackbarali, D., Maharaj, R., Mohamed, N., and Ramjattan-Harry, V. 2017. Potential of used frying oil in paving material: solution to environmental pollution problem. Environmental Science and Pollution Research, 24(13):12220-12226.

Investigating and comparing the sustainability of diesel and biodiesel production using the cumulative exergy demand approach

Majid Khanali, Homa Hosseinzadeh-Bandbafha

Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering and Technology, College of Agriculture and Natural Resources, Tehran University

Abstract

In response to environmental concerns about fossil fuel consumption and the need for growth and development of sustainable economic, the production and use of clean energy resources such as biofuels are growing in many parts. Among the various types of biofuels, liquid biofuels such as biodiesel are very important and practical as an alternative to its fossil counterpart, i.e., diesel fuel used in the transportation sector. Despite the desirable properties of biodiesel, its production is associated with significant consumption of energy carriers and materials based on fossil fuels, which can hamper its sustainable production. There are various tools to evaluate the sustainability of biofuel production; the present study has used the cumulative exergy demand approach and the cumulative degree of perfection to assess the sustainability of exergy flow in the production of first-generation (produced from rapeseed and soybean oil) and second-generation (produced from palm oil and waste cooking oil) biodiesels and compare it with diesel fuel. This study showed that although biodiesel production from the first generation biomass leads to the removal of more exergy from nature, more than 65% of it is related to biomass-based renewable energy that does not have the problems and challenges of fossil fuels. In comparison, more than 99% of the cumulative demand for exergy in diesel fuel production is related to fossil fuels. Also, the production of second-generation biodiesel from waste cooking oil compared to production of diesel as well as the first-generation biodiesel, has significantly reduced the total amount of exergy removed from nature. This result clearly shows the importance of valuing different wastes and converting them into various materials.

Keywords: Biodiesel, Energy sustainability, Cumulative exergy demand, Cumulative degree of perfection, Waste cooking oil

*Corresponding author
E-mail: khanali@ut.ac.ir