

ارزیابی انرژی، ردپای کربن و چرخه حیات در تولید روغن‌های گیاهی و بیودیزل

نوشین قلی پور زنجانی^{۱*}

۱- پژوهشگاه استاندارد، گروه پژوهشی پتروشیمی و پلیمر، کرج، n.gholipour@standard.ac.ir

خلاصه

این مطالعه با رویکرد ارزیابی چرخه حیات (LCA) و با تأکید بر کمی‌سازی مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای، فرآیندهای تولید روغن‌های گیاهی و بیودیزل را در یک واحد صنعتی واقعی تحلیل کرده است. محاسبات بر اساس داده‌های مصرف سالانه الکتریسیته، گاز طبیعی و نفت‌گاز در مراحل روغن‌کشی، تصفیه و بسته‌بندی انجام شده و با استفاده از ضرایب نشر استاندارد، ردپای کربن هر بخش برآورد گردیده است. نتایج نشان می‌دهد که سهم انتشار مربوط به حمل‌ونقل دانه خام و روغن تصفیه‌شده اهمیت دارد و مصرف مستقیم انرژی در کارخانه شامل الکتریسیته، گاز و سوخت مایع تنها ۹,۴۶۷ تن از کل انتشار را تشکیل می‌دهد. متوسط ردپای کربن نهایی برای هر تن روغن خوراکی تولیدی ۵,۵۴ تن دی‌اکسیدکربن معادل محاسبه شده که با دامنه گزارش‌شده در مطالعات جهانی همخوانی دارد. در بخش تولید بیودیزل، فرآیند ترانس‌استریفیکاسیون با کاتالیست‌های همگن و ناهمگن به عنوان روش برتر از نظر مصرف انرژی و بازده واکنش معرفی شده، هرچند که نیازمند تصفیه اولیه روغن و کنترل دقیق شرایط عملیاتی است. فناوری‌های نوین مانند استخراج اولتراسونیک، مایکروویو و تصفیه فیزیکی با کاهش مراحل فرآوری و مصرف انرژی حرارتی و شیمیایی، پتانسیل بالایی برای بهینه‌سازی انرژی در خطوط تولید دارند. همچنین استفاده از به‌کارگیری انرژی‌های تجدیدپذیر نظیر خورشید و زیست‌توده در مقیاس مزرعه، می‌تواند تا ۰,۲۷۴ تن به ازای هر تن دانه، از انتشار مرتبط با مرحله کشاورزی بکاهد. در سطح کلان، تحقق اقتصاد دورانی و کاهش ردپای انرژی این صنعت مستلزم یکپارچه‌سازی سیستم‌های ارزیابی، بهینه‌سازی زنجیره تأمین و گذار تدریجی به مواد اولیه با کربن پایین و انرژی‌های تجدیدپذیر است.

کلمات کلیدی: دانه‌های روغنی، ردپای کربن، روغن‌های خوراکی، بیودیزل، انرژی

۱. مقدمه

ساخت بیودیزل در مقایسه با نفت‌گاز، کم‌هزینه‌تر و ساده‌تر است و می‌توان آن را به هر نسبتی با دیزل ترکیب کرد. همچنین این سوخت با دارا بودن محتوای اکسیژن و فاقد ترکیبات آروماتیک بودن، انتشار ذرات معلق و گازهای گلخانه‌ای را کاهش می‌دهد و مزایایی مانند تجدیدپذیری، ایمنی بالاتر و عدد ستان مناسب دارد [۱].

بیودیزل با دارا بودن خاصیت روان‌کنندگی بالا، ضمن کاهش خوردگی و رسوب‌گیری در سیستم سوخت‌رسانی، هزینه‌های نگهداری را کاهش می‌دهد و انتشار آلاینده‌های مضر را نیز به‌طور محسوسی کم می‌کند. همچنین تولید این سوخت تجدیدپذیر می‌تواند وابستگی به واردات سوخت فسیلی را کاهش دهد، برای کشاورزی ارزش افزوده ایجاد کرده و به توسعه اقتصادی کمک نماید [۲]. اگرچه در حال حاضر قیمت تولید بیودیزل بالاتر و انتشار اکسیدهای نیتروژن از معایب آن محسوب

می‌شود، اما با کاهش منابع فسیلی و پیشرفت فناوری، این سوخت در آینده‌ای نزدیک گزینه‌ای رقابتی و پاک برای استفاده در موتورهای خواهد بود [3].

برخی شرکت‌هایی مانند شرکت هیتاچی انرژی، پایبندی به توسعه پایدار را با به‌کارگیری روش ارزیابی چرخه حیات LCA و ایجاد شفافیت در عملکرد زیست‌محیطی محصولات خود نشان می‌دهد. آنها یک مدل LCA ویژه (CRADLE-TO-GRAVE) برای ترانسفورماتورهای خود توسعه داده‌اند [4]. این مدل با رعایت استانداردهای بین‌المللی مانند EN 50693 و EN 15804 ساخته شده و انواع دسته‌های زیست‌محیطی را در نظر می‌گیرد. فرآیند اصلی مدل، کمی‌سازی دقیق جریان‌های ورودی و خروجی به طبیعت، از جمله مواد خام، انرژی و انواع انتشارات است [4].

بررسی‌ها نشان می‌دهد مقدار انتشار گازهای گلخانه‌ای در تولید روغن‌های گیاهی در مزارع خانوادگی به نوع تولید، روش آماده‌سازی خاک و اندازه مزرعه بستگی دارد. روش‌های جدید آماده‌سازی خاک در مقایسه با خاک‌ورزی سنتی با گاوآهن و ادوات ثانویه، بار محیطی کمتری دارد و از لحاظ انرژی کارآمدتر است. مزارع خانوادگی پتانسیل بالایی برای تأمین انرژی از منابع تجدیدپذیر مانند خورشید، باد و زیست‌توده دارند. استفاده از این منابع در ماشین‌آلات و فرآیندهای کشاورزی به کاهش ردپای کربنی روغن‌های گیاهی کمک می‌کند. بدین ترتیب، مزارع می‌توانند هم به استقلال انرژی دست یابند و هم عملکرد زیست‌محیطی خود را بهبود بخشند [5].

در این مقاله ضمن بررسی فرایندهای تولید روغن‌های گیاهی و تولید بیودیزل، چرخه حیات روغن و میزان ردپای کربن با در نظر گرفتن میزان انرژی‌های مصرفی در فرایند تولید یک واحد تصفیه روغن گیاهی بررسی می‌گردد.

۲. فرایند تولید روغن‌های گیاهی

تولید مدرن روغن‌های گیاهی بر پایه اقتصاد دورانی* و کاهش ضایعات استوار است و از فناوری‌های پیشرفته برای بهینه‌سازی بازده و کیفیت استفاده می‌کند [6]. مرحله اول آماده‌سازی دانه با سیستم‌های نظارت هوشمند و حسگرهای نوری برای شناسایی و حذف خودکار ناخالصی‌ها با دقت بالا آغاز می‌شود [7]. پوسته‌گیری با استفاده از آسیاب‌های ضربه‌ای با قابلیت تنظیم دقیق انجام می‌شود تا آسیب به لپه (جایی که روغن ذخیره شده) به حداقل برسد و کیفیت پروتئین کنجاله حفظ شود [8]. مرحله خردایش توسط آسیاب‌های غلطکی با قابلیت کنترل رطوبت و دما انجام می‌گیرد تا از اکسیداسیون اولیه روغن جلوگیری شود [8]. فرآیند پخت (حرارت‌دهی) امروزه در خشک‌کن‌های دوار یا استک‌کوکرها با کنترل دقیق پارامترها انجام می‌شود که فعالیت آنزیم لیپاز را متوقف و راندمان استخراج را بیش از ۹۸٪ می‌کند [9].

فرآیند اکستروژن به‌طور فزاینده‌ای جایگزین فلکس سنتی شده است، زیرا ساختار متخلخلی ایجاد می‌کند که استخراج با حلال را بسیار کارآمدتر می‌سازد [10]. در مرحله استخراج، روش پرس سرد برای روغن‌های با ارزش غذایی بالا (مثل روغن زیتون بکر یا روغن دانه‌های خاص) با حفظ آن‌تی‌اکسیدان‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. با این حال، استخراج با حلال با هگزان همچنان روش غالب صنعتی است، اما تحقیقات بر یافتن حلال‌های سبز مانند ایزوپروپانول یا مخلوط‌های اتانول-آب متمرکز است تا اثرات زیست‌محیطی کاهش یابد [11]. بازیابی حلال در سیستم‌های تقطیر مدرن با راندمان بیش از ۹۹.۹٪ انجام می‌شود و از فناوری بازیابی حرارتی برای صرفه‌جویی انرژی بهره می‌برد [11].

* Circular economy

تصفیه فیزیکی به دلیل مزایای زیست‌محیطی و حفظ بیشتر توکوفرول‌ها (ویتامین E)، در حال جایگزینی با تصفیه شیمیایی سنتی برای روغن‌های با اسیدیته اولیه پایین است [۱۲]. در تصفیه فیزیکی، مرحله دمودورایزیشن پیشرفته همزمان اسیدهای چرب آزاد را حذف و ترکیبات فرار را جدا می‌کند و نیاز به مرحله جداگانه خنثی‌سازی شیمیایی را مرتفع می‌سازد [۱۲]. بی‌رنگ‌سازی با استفاده از خاک‌های رنگ‌بر فعال‌شده اسیدی یا حتی فیلترهای غشایی نانومتری انجام می‌شود که دقت بالاتر و تولید پسماند کمتری دارند [13]. فرآیند وینترایزیشن امروزه با کنترل دقیق نرخ سردکردن و کریستال‌سازی، به‌صورت کاملاً خودکار انجام می‌شود تا شفافیت روغن در دمای پایین تضمین شود [۸]. یکی از مراحل کلیدی جدید، حذف موم (دواکسینگ) مخصوصاً در روغن آفتابگردان است که با سردکردن و فیلتراسیون ویژه انجام می‌شود تا از کدورت روغن جلوگیری کند [۱۳]. در خط تولید یکپارچه مدرن، از پایش آنلاین کیفیت با طیف‌سنجی نزدیک به مادون قرمز (NIR) برای اندازه‌گیری اسید چرب آزاد، رطوبت و سایر پارامترها استفاده می‌شود [۷، ۸]. مدیریت پسماند جنبه حیاتی دارد؛ کنجاله باقیمانده به عنوان خوراک دامی با پروتئین بالا فرآوری می‌شود و صمغ‌های جدا شده (لسیتین) به عنوان امولسیفایر در صنایع غذایی بازیابی می‌گردند [8]. فناوری‌های استخراج اولتراسونیک و میکروویو به عنوان روش‌های کم‌مصرف و سریع در مقیاس نیمه‌صنعتی برای استخراج روغن از برخی دانه‌ها در حال توسعه است [11]. بسته‌بندی با گازهای بی‌اثر (مانند نیتروژن) در بطری‌های دارای سد نوری برای افزایش ماندگاری و حفظ خواص روغن بدون نیاز به افزودن آنتی‌اکسیدان‌های مصنوعی رایج شده است [۱۴].

روند کلی صنعت به سمت پالایش ملایم است تا ترکیبات زیست‌فعال مطلوب مانند استرول‌های گیاهی و توکوفرول‌ها تا حد امکان در روغن نهایی حفظ شوند [۱۲]. بنابراین، فرآیند تولید امروزی روغن‌های گیاهی، تلفیقی از مهندسی پیشرفته، اتوماسیون بالا و نگاه کل‌نگر به پایداری زیست‌محیطی و ارزش تغذیه‌ای محصول نهایی است [۷، ۱۱].

۳. تولید سوخت از روغن

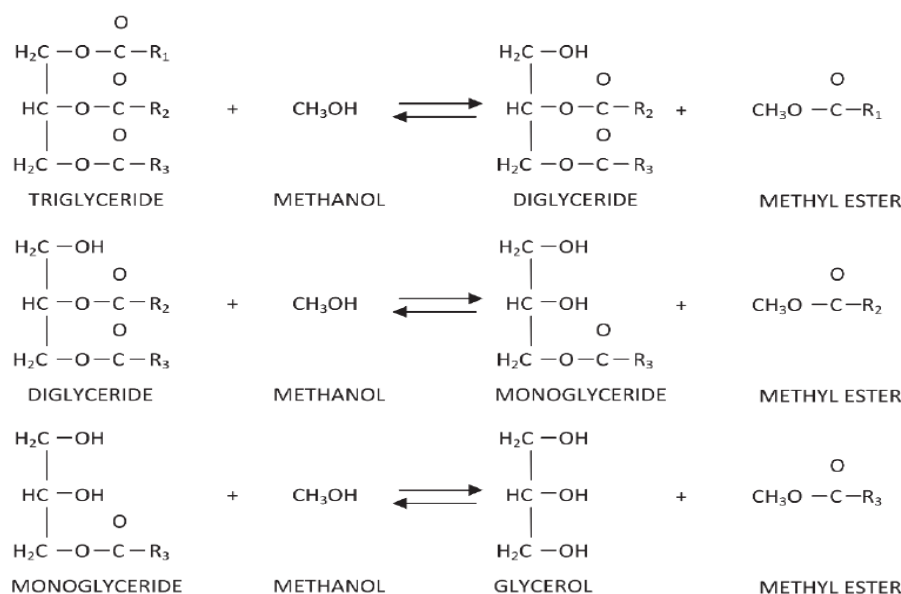
استفاده مستقیم از روغن‌های گیاهی در موتورهای دیزل به دلیل گرانروی بالا و مشکلاتی مانند انسداد و رسوب امکان‌پذیر نیست. گرانروی بالا منجر به کاهش جریان در لوله‌ها، انسداد فیلترها، افزایش هزینه پمپ کردن و کاهش قابلیت پودر شدن می‌شود و حتی مخلوط کردن آن‌ها با سوخت دیزل نیز یک راه‌حل ناپایدار و موقتی است [15]. برای کاربرد مناسب، باید ساختار مولکولی روغن‌ها از طریق فرآیندهای شیمیایی تغییر یابد. سه روش اصلی برای این اصلاح شامل پیرولیز، میکروامولسیون و تبادل استری است. هدف این فرآیندها، سازگار کردن روغن‌ها با موتورهای دیزل موجود و جلوگیری از آسیب‌های عملیاتی است [2, 15].

کراکینگ حرارتی (پیرولیز) با شکستن مولکول‌های بزرگ در غیاب هوا، روغن‌های گیاهی و چربی‌ها را به ترکیباتی با گرانروی پایین‌تر تبدیل می‌کند. این فرآیند اگرچه خواصی مانند گرانروی را بهبود می‌بخشد، اما باعث تغییر برخی مشخصات دیگر مانند افزایش نقطه ابری شدن و کاهش کیفیت احتراق می‌شود. در نهایت، هزینه بالای اجرای این روش، آن را به گزینه‌ای غیراقتصادی برای تولید سوخت تبدیل می‌کند [۱۶، ۱۷].

میکروامولسیون یک روش برای بهبود خواص روغن‌های گیاهی است که مایعی شفاف و پایدار از ذرات روغن، آب، سورفکتانت و کوسورفکتانت ایجاد می‌کند. در این روش با افزودن موادی مانند الکل‌ها و نیترات‌های آلکیل، ویژگی‌هایی مانند ویسکوزیته کاهش و عدد ستان بهبود می‌یابد. این تغییرات باعث ایجاد ویژگی‌های پاششی مناسب و ترغیب به استفاده از این تکنیک می‌شود. با این حال، استفاده طولانی‌مدت از سوخت حاصل می‌تواند منجر به مشکلاتی مانند رسوب کربن و چسبندگی انژکتور شود [۱۷، ۱۸].

یکی از روش‌های بکار گرفته شده جهت سازگاری روغن به عنوان سوخت، رقیق‌سازی است. در این روش با استفاده از اتانول خالص، ویسکوزیته روغن گیاهی را کاهش می‌دهند، لیکن این نوع اختلاط برای استفاده طولانی مدت در موتور مناسب نمی‌باشد [۲].

در میان روش‌های تبدیل روغن به سوخت، واکنش تبادل استری (ترانس استریفیکاسیون) متداول‌ترین و کارآمدترین روش برای تولید بیودیزل محسوب می‌شود. این فرآیند شامل واکنش شیمیایی یک روغن یا چربی (تری‌گلیسرید) با یک الکل (معمولاً متانول) در حضور یک کاتالیست است [۱۷]. محصولات این واکنش، متیل استرهای اسید چرب (بیودیزل) و گلیسرول هستند که پس از انجام واکنش از یکدیگر جدا می‌شوند. واکنش به صورت سه مرحله برگشت پذیر متوالی پیش می‌رود و مونوگلیسرید و دی‌گلیسرید به عنوان محصولات میانی تشکیل می‌شوند [۱۶]. این روش در مقایسه با سایر روش‌ها مانند پیرولیز یا میکروامولسیون، به تجهیزات کم‌تری نیاز دارد و از عملکرد بهتری برخوردار است. با این حال، این فرآیند نیز نیازمند تصفیه اولیه روغن (مانند حذف اسیدهای چرب آزاد) و کنترل دقیق شرایط واکنش است [۳].



شکل ۱- شماتیک واکنش ترانس استریفیکاسیون تری گلیسرید [۱۹]

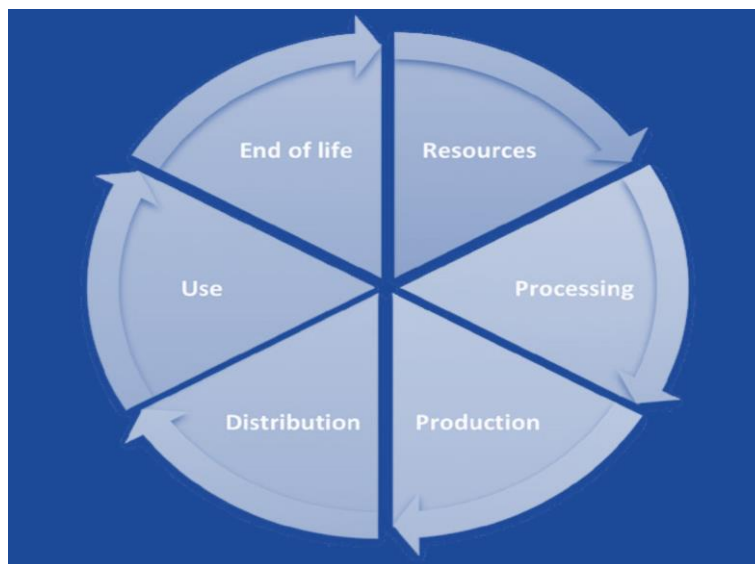
معادله عمومی واکنش استری کردن (۱) حاصل از جمع ۳ معادله ارائه شده در شکل ۱ می‌باشد [۱۹].



محصول اصلی واکنش ترانس استریفیکاسیون، بیودیزل (متیل استر) است که به عنوان سوخت در موتورهای دیزل به کار می‌رود. محصول جانبی این فرآیند، گلیسرین است که ماده‌ای با کاربردهای گسترده در صنایعی مانند داروسازی، آرایشی، کشاورزی و مواد شیمیایی محسوب می‌شود [۱۹].

کاتالیست‌های مورد استفاده در فرآیند تولید بیودیزل از طریق واکنش تبادل استری به دو دسته اصلی همگن (بازی و اسیدی و آنزیم) و ناهمگن (جامد) تقسیم می‌شوند. انتخاب نوع مناسب کاتالیست، که به کیفیت خوراک اولیه بستگی دارد، یک گام

تعیین‌کننده در فرآیند تولید است. معیار اصلی برای انتخاب بهترین کاتالیست، دستیابی به حداکثر بازده تولید متیل استر (بیودیزل) همراه با حداقل مقدار اسید چرب آزاد در محصول نهایی است [۲۰]:



شکل ۲- ارزیابی چرخه حیات در تولید و مصرف روغن

۴. ارزیابی چرخه حیات (LCA) *

بازار جهانی خواهان کاهش اثرات زیست محیطی و انتشار گازهای گلخانه‌ای است و چارچوب اقتصاد دورانی نقشی کلیدی در برآورده سازی این خواسته دارد. بسیاری از شرکتها برای کاهش این اثرات در زنجیره تأمین خود، به دنبال همکاری با شرکای تجاری در طول زنجیره ارزش هستند [۲۱]. استراتژی توسعه پایدار زیست محیطی[†] نیز همکاری با تأمین‌کنندگان برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و ترویج روش‌های پایدار را هدف گرفته و برخی شرکت ها مانند شرکت اورستد قصد دارد تا سال ۲۰۴۰ تولید انرژی بدون کربن در زنجیره تامین خود داشته باشد [۲۱].

ارزیابی چرخه حیات (LCA) یک روش جامع و مبتنی بر علم است که تأثیرات زیست‌محیطی یک محصول، خدمت یا سیستم را از آغاز تا پایان عمر آن بررسی و اندازه‌گیری می‌کند. این ارزیابی شامل سنجش مصرف انرژی و منابع و نیز انتشار آلاینده‌ها در تمام مراحل زندگی محصول است. مراحل اصلی شامل تولید مواد اولیه، ساخت، استفاده، نگهداری و پایان عمر محصول می‌شود [۴، ۲۲]. در دنیایی با محدودیت کربن، رویکرد همکاری محور برای استفاده موثر از تجهیزات موجود از طریق خدمات پایدار، ارزش بالایی خواهد داشت. تمرکز بر میزان نشر کربن زیرساخت شبکه، هم در تولید جدید و هم در توسعه خدمات پایدار، یک جهت‌گیری ضروری در این مسیر است [۴].

* Life cycle assessment

[†] Environmental sustainability strategy

مطالعه LCA مطابق با استاندارد ISO در چهار مرحله تعریف شده است: تعریف هدف و محدوده، تحلیل موجودی، ارزیابی تأثیرات و در نهایت تفسیر نتایج [23]. انعطاف‌پذیری این روش به کاربران اجازه می‌دهد تا از آن در زمینه‌های مختلفی مانند توسعه محصول، تصمیم‌گیری استراتژیک و بازاریابی استفاده کنند [۴، ۲۳، ۲۴].

هدف نهایی، به حداقل رساندن تأثیرات منفی زیست‌محیطی یک فرایند یا یک محصول در کل چرخه حیات آن‌ها و در سرتاسر زنجیره ارزش کسب‌وکار است. در مجموع، LCA ابزاری قدرتمند برای درک و مدیریت هزینه‌های پنهان زیست‌محیطی محصولات و حرکت به سوی اقتصاد دورانی است. [۴]

در این مقاله، منابع متداول انتشار معادل دی‌اکسیدکربن (CO_2e) در فرآیند تولید روغن شامل موارد زیر در نظر گرفته شده است (شکل ۲):

- الف) انتشار CO_2e ناشی از حمل و نقل دانه روغنی.
- ب) انتشار CO_2e ناشی از مصرف برق، گاز و سوخت مایع برای روغن کشی.
- ج) انتشار CO_2e ناشی از تصفیه روغن.
- د) انتشار CO_2e ناشی از مصرف برق فرآیند پرکردن ظروف
- ه) انتشار CO_2e ناشی از مرحله حمل و نقل بسته های روغن تصفیه شده به محل مصرف.

منابع متداول انتشار معادل دی‌اکسیدکربن (CO_2e) در فرآیند تولید بیودیزل از روغن نیز شامل موارد زیر است:

- الف) انتشار CO_2e ناشی از تولید روغن جدید.
- ب) انتشار CO_2e ناشی از حمل و نقل روغن جدید. به محل انجام فرایند استریفیکاسیون
- ج) انتشار CO_2e ناشی از فرایند تولید بیودیزل.
- د) انتشار CO_2e ناشی از مصرف برق فرآیند پرکردن ظروف
- ه) انتشار CO_2e ناشی از مصرف سوخت و برق در انتقال بیودیزل به محل مصرف

در این بررسی به محاسبات میزان نشر دی اکسیدکربن در فرایند تولید روغن نباتی پرداخته شده و محاسبات CFP طبق معادله (۱) انجام می‌گیرد:

$$CFP = activity (unit) \cdot EF_{CO_2-e} (t CO_2-e/unit) \quad (1)$$

که در آن CFP کل برحسب ($tonCO_2-e$) تعیین می‌شود و activity پارامتری مانند مصرف انرژی الکتریکی برحسب kWh و EF_{CO_2-e} فاکتور نشر است [۲۳].
برای الکتریسته، فاکتور نشر متوسط $0.668 tCO_2e/MWh$ در محاسبات استفاده می‌شود [۲۲].

۴. داده های اولیه

میزان مصرف انرژی سالانه در یک واحد تولید روغن نباتی طبق پیوست آگاهی دهنده استاندارد ملی ۹۶۵۲ در نظر گرفته شده که مطابق جدول ۱ می‌باشد [۲۵].

جدول ۱- پارامترهای مربوط به مصرف انرژی

ردیف	منبع انرژی	واحد	میزان مصرف سالانه متوسط [۲۵]	ضریب نشر tCO ₂ e/unit [۲۶]	میزان نشر tCO ₂ e
۱	برق مصرفی	MWh	۱۰۷۴۲	۰/۶۶۸	۷۱۷۵,۷
۲	گاز طبیعی مصرفی	m ³	۷۷۳۹۳۹۹	۰.۰۰۳ ton/kg	۲۳۲.۲
۳	نفت گاز مصرفی	lit	۲۴۷۶۸۰۰	۰/۰۰۰۸۳۲	۲۰۶۰.۷

جدول ۲ میزان متوسط خوراک ورودی سالانه آن واحد تولیدی برای فرایند روغن کشی را نشان می‌دهد [۲۵]. دانه‌های مورد استفاده دانه سویا، کلزا و آفتابگردان در نظر گرفته شده‌اند که جزو مصرف معمول در تولید روغن گیاهی هستند.

جدول ۲- خوراک ورودی واحد تولیدی روغن

ردیف	دانه	میزان ورودی سالانه [۲۵] (ton)	ضریب نشر tCO ₂ e/ton oil seed [۵]	نشر دی اکسید کربن tCO ₂ e
۱	دانه سویا	۱۲۸۹۵۲	۰.۲۶۷	۳۴۴۳۰
۲	دانه کلزا	۱۵۶۲۸	۰.۲۵۰	۳۹۱۰
۳	دانه آفتابگردان	۱۱۹۸۴	۰.۲۷۴	۳۲۸۳

۵. کمی‌سازی ردپای کربن:

در این پژوهش محاسبات نشر دی‌اکسیدکربن معادل هر فعالیت در فرایند تولید روغن از مرحله ورود دانه‌های روغنی تا خارج کردن از واحد تولیدی انجام گرفته است.

۵-۱ نشر CO₂ در تولید دانه روغنی

با فرض تولید دانه روغنی از یک مزرعه با اندازه متوسط و استفاده از کود و افت کش و روش‌های متداول کاشت و برداشت، آماده سازی خاک و استخراج مکانیکی دانه، میزان ضریب نشر دی‌اکسیدکربن برای دانه آفتابگردان معادل ۰.۲۷۴ tCO₂e/ton oil seed و برای دانه کلزا ۰.۲۵۰ tCO₂e/ton oil seed و برای سویا میانگین آنها یعنی معادل ۰.۲۶۷ tCO₂e/ton oil seed در نظر گرفته شد [۵]. براساس محاسبات انجام شده در جدول ۲ میزان نشر دی اکسید کربن ناشی از دانه‌های روغنی معادل ۴۱۶۲۴ tCO₂e می‌باشد.

۵-۲ نشر CO₂ ناشی از انتقال دانه به واحد تولیدی

- مسافت انتقال دانه (۱۵۶۵۶۳ton) به واحد تصفیه روغن ۳۰۰ km در نظر گرفته شد.
- فاکتور نشر برای وسیله نقلیه دیزلی HGV (>۳۰ ton) معادل ۱/۳۷۷ kgCO₂/(ton.km) در نظر گرفته شد. [۴]
- میزان نشر مربوط به حمل و نقل = ۶۴۶۷۶ ton CO₂

- ۳-۵ نشر CO_2 ناشی از میزان مصرف منابع انرژی الکتریسیته، نفت گاز و گاز طبیعی در تولید روغن
- با فرض اینکه $1m^3$ گاز طبیعی معادل $0.01 kg$ باشد میزان نشر بر اساس مصرف منابع انرژی طبق جدول یک محاسبه شد. که جمعا معادل $9467 tCO_2e$ می باشد.

۴-۵ نشر CO_2 ناشی از مواد استفاده شده در فرایند تصفیه روغن

محاسبات برای فرایندهای تصفیه شامل صمغ گیری؛ بوگیری و رنگبری و بسته بندی در ظروف PET می باشد که طبق جدول ۳ در نظر گرفته شد. مقادیر وزن مواد مورد استفاده برای یک سال به طور فرضی در نظر گرفته شده اند. میزان کل نشر دی اکسیدکربن معادل $3.408 tCO_2e$ محاسبه شد.

جدول ۳- LCA برای تولید روغن تصفیه شده

نشر دی اکسیدکربن tCO_2e	ضریب نشر دی اکسیدکربن [۲۶] $kgCO_2e/kg$	میزان مصرفی kg	مواد مورد استفاده در فرایند و بسته بندی
۰.۴۹۴	۲.۴۷۰	۲۰۰	مخازن استیل برای ماشین های فرایند
۰.۰۸۷	۰.۴۳۸	۲۰۰	هیدروکسید سدیم (صمغ گیری)
۰.۵۵۵	۲.۷۷۶	۲۰۰	اسید فسفریک (صمغ گیری)
۰.۱۹۳	۰.۹۶۳	۲۰۰	اسید سیتریک (صمغ گیری)
۰.۰۵۹	۰.۱۹۷	۳۰۰	بنتونیت (رنگبری)
۲.۰۲	۲.۰۲۰	۱۰۰۰	PET ظرف

۵-۵ نشر CO_2 ناشی از انتقال روغن به محل مصرف

- انتقال کل روغن ها و محصولات جانبی $(170272 ton)$ (طبق جدول ۴) به محل مصرف (فاصله $300 km$)
- فاکتور نشر برای وسیله نقلیه دیزلی $HGV (30 ton) = 1/377 kgCO_2/(ton.km)$ [۴]
- میزان نشر مربوط به حمل و نقل $70339 tCO_2 =$

جدول ۴- میزان محصول تولیدی در یک سال

مقدار ton	محصول	ردیف
۲۴۳۵۱	روغن سویا	۱
۱۰۳۷۵۱	کنجاله سویا	۲
۴۸۵۵	روغن کلزا	۳
۱۰۲۹۸	کنجاله کلزا	۴
۴۳۸۸	روغن آفتابگردان	۵
۶۰۲۷	کنجاله آفتابگردان	۶
۹۵۴	لسیتین	۷
۱۵۶۴۸	پروتئین سویا	۸

۶-۵ میزان کل نشر CO₂ ناشی از کل فرایند

استفاده از LCA اجازه می‌دهد که رفتار زیست محیطی فرایند کمی سازی شود. میزان کل نشر CO₂ برای تولید روغن در واحد در نظر گرفته شده در یک سال، معادل ۱۸۶۱۰۹ tCO₂ می‌باشد که با توجه به تولید ۳۳۵۹۴ton روغن خوراکی در این واحد، میزان متوسط نشر دی اکسید کربن معادل ۵.۵۴tCO₂ برای هر تن روغن می‌باشد. که با میزان ارائه شده در مقالات دیگر تطابق دارد و اختلاف آن می‌تواند به عواملی مانند فاصله محل تولید روغن از محل کاشت دانه روغنی مربوط باشد [۲۶].

در یک پژوهش انتشار گازهای گلخانه‌ای از چهار روغن گیاهی (کلزا، سویا، پالم، آفتابگردان) ارزیابی شده یافته‌ها نشان داده که میانه‌ی انتشار برای بیشتر سیستم‌ها، ۳.۸۱ کیلوگرم دی‌اکسیدکربن معادل به ازای هر کیلوگرم روغن تصفیه‌شده است [۲۶]. در میان محصولات مختلف، روغن سویا با ۴.۲۵ کیلوگرم بالاترین و روغن کلزا با ۲.۴۹ کیلوگرم پایین‌ترین میزان انتشار را به خود اختصاص دادند [۲۶]. این مطالعه مشخص کرده که هزینه‌ی کربنی ناشی از تغییر کاربری اراضی، عامل اصلی تعیین‌کننده در نوسان انتشار بین سیستم‌ها است. تبدیل پوشش‌های گیاهی طبیعی با ظرفیت ذخیره‌سازی کربن بالا به زمین‌های کشاورزی، بدون توجه به نوع محصول، انتشار قابل توجهی ایجاد می‌کند [۲۶]. بر این اساس، توسعه‌ی کشت در زمین‌های با پتانسیل ذخیره‌ی کربن پایین و همزمان جنگل‌کاری مجدد در مناطق با پتانسیل بالا، می‌تواند ضمن کاهش انتشار خالص، بهره‌وری را نیز افزایش دهد. فراتر از بحث کاربری اراضی، فرصت‌های مشخصی برای بهبود پایداری در سیستم‌های فعلی نیز وجود دارد. افزایش عملکرد محصول در کنار محدود کردن مصرف نهاده‌های پُرکربن مانند کودها، یک راهبرد کلیدی است. به‌ویژه برای روغن پالم، استفاده‌ی گسترده‌تر از فناوری‌های جذب متان در فرآیند آسیاب‌کاری، یک فرصت بزرگ برای کاهش اثرات زیست‌محیطی محسوب می‌شود [۲۶].

مقدار انتشار گازهای گلخانه‌ای در تولید روغن‌های گیاهی در مزارع خانوادگی به روش تولید، نوع خاک‌ورزی و اندازه مزرعه بستگی دارد و استفاده از خاک‌ورزی حفاظتی و انرژی‌های تجدیدپذیر می‌تواند ردپای کربنی را کاهش داده و به استقلال انرژی و بهبود عملکرد زیست‌محیطی کمک کند [۵].

اگرچه تولیدکنندگان در تلاش برای توسعه راه‌حل‌های اقتصاد دورانی هستند، سرعت این تحول با یک تلاش صنعتی یکپارچه می‌تواند افزایش یابد و هنگامی که سیستم ارزیابی توسط تامین‌کنندگان به اشتراک گذاشته و درک شود، آن‌ها می‌توانند راه‌حل‌ها و کل زنجیره ارزش خود را برای پاسخگویی به انتظارات مشتری بهینه کنند [۲۱]. این تغییر به‌طور کامل در کوتاه‌مدت رخ نمی‌دهد و صنعت نیازمند یادگیری و تطبیق تدریجی است؛ به‌عنوان مثال، درخواست ارزیابی چرخه حیات کامل در مرحله اول عملی نیست، اما استفاده از داده‌های طراحی نمونه یا تخمین ساده‌شده در آن مرحله معتبر خواهد بود. فناوری و فرآیندهای فعلی تولید روغن به این هدف کمک می‌کنند و در آینده با اقداماتی مانند استفاده از ضایعات در یک مسیر مناسب و مواد بازیافتی و مواد دیگر با ردپای کربنی بسیار کمتر و قابل ردیابی، سهم بیشتری خواهند داشت [۲۱].

۶. نتیجه‌گیری

تحقق اقتصاد دورانی و کاهش ردپای کربن در صنعت روغن‌های گیاهی و بیودیزل، نیازمند رویکردی یکپارچه و چندوجهی شامل بهینه‌سازی فرآیندهای تولید، کاربرد فناوری‌های پاک، مدیریت پایدار کاربری اراضی، توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر و استقرار سیستم‌های ارزیابی چرخه حیات است. اگرچه پیشرفت‌های فناورانه مانند تصفیه فیزیکی، حلال‌های سبز و پایش هوشمند، مسیر را هموار کرده‌اند، سرعت این تحول در گرو همکاری همه‌جانبه تنظیم‌کنندگان، تولیدکنندگان و

مصرف‌کنندگان و ایجاد شفافیت در عملکرد زیست‌محیطی زنجیره تأمین است. در این مسیر، ارزیابی چرخه حیات به عنوان ابزاری علمی و عملیاتی، امکان شناسایی نقاط بحرانی انتشار و اولویت‌بندی اقدامات اصلاحی را فراهم می‌آورد و گذار تدریجی اما پایدار به سمت تولید سبزتر را تضمین می‌کند. مقررات بهره‌وری انرژی برای کاهش تلفات و ردپای کربن ضروری است، اما تحقق اقتصاد دورانی در صنعت نیازمند تلاشی یکپارچه‌تر است. این گذار با ایجاد سیستم‌های ارزیابی مشترک برای بهینه‌سازی زنجیره تأمین و به کارگیری فناوری‌هایی مانند مواد بازیافتی قابل‌ردیابی، به تدریج ممکن می‌شود.

۷. مراجع

1. Murugesan, A., C. Umarani, T.R. Chinnusamy, M. Krishnan, et al., (2009) "Production and analysis of bio-diesel from non-edible oils—A review". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **13**(4): p. 825-834.
2. Balat, M. and H. Balat, (2008) "A critical review of bio-diesel as a vehicular fuel". *Energy Conversion and Management*, **49**(10): p. 2727-2741.
3. Amin, S., (2009) "Review on biofuel oil and gas production processes from microalgae". *Energy Conversion and Management*, **50**(7): p. 1834-1840.
4. Bhaba Das, Goizeder Pajaro, Ed G.teNyenhuis, and G. Kablouti, (2024) "Investigating the environmental benefits of oil reclamation – A case study". *Transformers Magazine*, **11**(3): p. 80-90.
5. Al-Mansour, F., V. Jejčić, and T. Poje, (2022) "Carbon footprint of vegetable oils produced on family farms", in *14th conference of Sustainable Environmental and Energy Protection*.
6. Janicka, P., J. Płotka-Wasyłka, N. Jatkowska, A. Chabowska, et al., (2022) "Trends in the new generation of green solvents in extraction processes". *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, **37**: p. 100670.
7. Mansoor, S., S. Iqbal, S. Popescu, S. Kim, et al., (2025) "Integration of smart sensors and IOT in precision agriculture: trends, challenges and future perspectives". *Frontiers in Plant Science*.
8. Midhun, J., D. Stephi, K. Muthamil Selvi, Y. Kameshwari, et al., (2023) "Effect of emerging pretreatment methods on extraction and quality of edible oils: A review". *Food and Humanity*, **1**: p. 1511-1522.
9. Dunford, N., (2022) "Enzyme aided oil and oilseed processing: opportunities and challenges". *Current Opinion in Food Science*, **48**: p. 100943.
10. Yadav, N., D. Suvedi, A. Sharma, S. Khanal, et al., (2025) "Extrusion technology in food processing: Principles, innovations and applications in sustainable product development". *Food and Humanity*, **5**: p. 100672.
11. Chemat, F., M.A. Vian, and G. Cravotto, (2012) "Green extraction of natural products: concept and principles." *Int J Mol Sci*, **13**(7): p. 8615-8627.
12. Chandrasekar, V., C. Sampath, P. Belur, and R. Iyyaswami, (2014) "Refining of edible oils: A critical appraisal of current and potential technologies". *International Journal of Food Science & Technology*, **50**.
13. Sarode, M. and R. Subramanian, (2006) "Membrane Technology in Degumming, Dewaxing, Deacidifying, and Decolorizing Edible Oils". *Critical reviews in food science and nutrition*, **46**: p. 569-92.

14. Gupta, M.K., (2017) "*Chapter 9 - Finished Product Storage and Handling, in Practical Guide to Vegetable Oil Processing (Second Edition)*", M.K. Gupta, Editor. AOCS Press. p. 249-260.
15. Demirbaş, A., (2009) "*Biofuels securing the planet's future energy needs*", Energy Conversion and Management - ENERG CONV MANAGE, **50**: p. 2239-2249.
16. Gumba, R.E., S. Saallah, M. Misson, C.M. Ongkudon, et al., (2016) "*Green biodiesel production: a review on feedstock, catalyst, monolithic reactor, and supercritical fluid technology*". Biofuel Research Journal, **3**(3): p. 431-447.
17. Fukuda, H., A. Kondo, and H. Noda, (2001) "*Biodiesel fuel production by transesterification of oils*". Journal of Bioscience and Bioengineering, **92**(5): p. 405-416.
18. Ma, F. and M.A. Hanna, (1999) "*Biodiesel production: a review*". Journal Series Agricultural Research Division, Institute of Agriculture and Natural Resources, University of Nebraska-Lincoln. I. Bioresource Technology, **70**(1): p. 1-15.
19. Issariyakul, T. and A. Dalai, (2014) "*Biodiesel from vegetable oils*". Renewable and Sustainable Energy Reviews, **31**: p. 446-471.
20. Canakci, M. and J. Gerpen, (2003) "*A Pilot Plant to Produce Biodiesel from High Free Fatty Acid Feedstocks*". Transactions of the ASAE, **46**.
21. Krzysztof Kulasek, Edvin Lindgren, Elin Johansson, Mercedes Jul, et al., (2020) "*Towards net zero emissions – The role of circularity in transformers*". Transformer magazine, **7**: p. 51-58.
22. Das, B., (2022) "*Investigating the impact of transformer specification on the life cycle carbon emissions: A case study for Middle East Countries*". Transformers Magazine, **9**(3).
23. ISO14067, (2018) "*Greenhouse gases – Carbon footprint of products – Requirements and guidelines for quantification*".
24. Ha, S., H. Jang, C. Park, and B. Jeong, (2026) "*A prospective life cycle assessment framework for sustainable renewable fuels in international shipping: Hydrogen based e fuels*". Renewable and Sustainable Energy Reviews, **226**: p. 116219.
25. INSO9652, (1399) "روغن نباتی (تصفیه روغن نباتی و روغن کشی دانه های روغنی) - معیار مصرف انرژی در فرایند تولید"، سازمان ملی استاندارد ایران.
26. Alcock, T.D., D.E. Salt, P. Wilson, and S.J. Ramsden, (2022) "*More sustainable vegetable oil: Balancing productivity with carbon storage opportunities*". Science of The Total Environment, **829**: p. 154539.