

چالش‌ها و چشم‌اندازهای بیودیزل در صنعت انرژی‌های سبز

آریانا میرخلف‌زاده^۱

۱- دانشجوی کارشناسی شیمی کاربردی دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات Rnmirkhalaf@gmail.com

خلاصه

بیودیزل به عنوان یکی از مهم‌ترین سوخت‌های زیستی نسل اول، از استرهای مونوآلکیل اسیدهای چرب حاصل از روغن‌های گیاهی و چربی‌های حیوانی تشکیل شده است [۱][۶]. این سوخت زیستی تجدیدپذیر، به دلیل قابلیت استفاده در موتورهای احتراق تراکمی بدون تغییر عمده، و همچنین مزایای زیست‌محیطی نظیر کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلاینده‌هایی مانند CO، SO₂ و ذرات معلق، جایگزینی پایدار برای سوخت‌های فسیلی محسوب می‌شود [۷][۸]. با این حال، هزینه بالای مواد اولیه، محدودیت منابع خوراک، رقابت با تولیدات غذایی و پیچیدگی‌های فرآیند ترانس‌استریفیکاسیون از چالش‌های اصلی در مسیر تجاری‌سازی بیودیزل هستند [۷][۲]. پژوهش‌های اخیر، تمرکز ویژه‌ای بر توسعه فناوری‌های نوین از جمله ترانس‌استریفیکاسیون فوق بحرانی، استفاده از کاتالیزورهای ناهمگن و بهره‌گیری از روغن‌های پسماند و جلبک‌ها برای کاهش هزینه‌ها و ارتقای بازده تولید داشته‌اند [۴][۹]. این مقاله با بررسی جامع منابع علمی، ضمن مرور فرآیندها و فناوری‌های مختلف تولید بیودیزل، به تحلیل چالش‌ها و ارائه چشم‌اندازهای توسعه پایدار آن در مقیاس صنعتی می‌پردازد [۷][۳].

کلمات کلیدی: بیودیزل، ترنس‌استریفیکیشن، سوخت زیستی، انرژی‌های تجدیدپذیر، سوخت سبز، الکترولیز

۱. مقدمه

در دهه‌های اخیر، رشد جمعیت جهانی، گسترش شهرنشینی، و افزایش تقاضا برای انرژی، موجب شده است تا منابع سوخت‌های فسیلی با فشار بی‌سابقه‌ای مواجه شوند. در کنار این مسئله، افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای و پیامدهای زیست‌محیطی ناشی از احتراق سوخت‌های فسیلی، از جمله گرمایش جهانی، باران‌های اسیدی، و آلودگی هوا، سیاست‌گذاران و پژوهشگران را به سمت یافتن جایگزین‌های پایدار، تجدیدپذیر و کم‌کربن سوق داده است [۷][۸]. در چنین شرایطی، بیودیزل (Biodiesel) به عنوان یکی از مهم‌ترین و موفق‌ترین سوخت‌های زیستی نسل اول، جایگاهی ویژه در میان منابع انرژی تجدیدپذیر پیدا کرده است [۶][۸].

بیودیزل نوعی سوخت زیستی مایع است که از استرهای مونوآلکیل اسیدهای چرب (Fatty Acid Methyl/Ethyl Esters – FAMES/FAEEs) تشکیل شده و معمولاً از روغن‌های گیاهی، چربی‌های حیوانی، یا روغن‌های پسماند تولید می‌شود. این سوخت به دلیل شباهت زیاد در خواص فیزیکی و شیمیایی با گازوئیل فسیلی، می‌تواند بدون نیاز به تغییرات عمده در موتورهای احتراق تراکمی مورد استفاده قرار گیرد [۶][۸]. فرآیند اصلی تولید آن، ترانس‌استریفیکاسیون (Transesterification) نام دارد که در آن

یک تری‌گلیسرید با الکل (اغلب متانول یا اتانول) در حضور یک کاتالیزور واکنش داده و منجر به تشکیل استرهای متیل یا اتیل اسیدهای چرب و گلیسرول می‌شود [۷][۸][۹].

از دیدگاه زیست‌محیطی، بیودیزل دارای مزایای متعددی است. یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های آن، کاهش قابل توجه انتشار گازهای گلخانه‌ای (GHG) نسبت به گازوئیل فسیلی است؛ زیرا چرخه تولید و مصرف بیودیزل تا حد زیادی کربن خنثی است — یعنی میزان CO_2 آزاد شده در هنگام احتراق تقریباً برابر با مقدار CO_2 جذب‌شده توسط گیاه در فرایند فتوسنتز است [۷]. افزون بر این، بیودیزل عاری از ترکیبات گوگردی بوده و در نتیجه، انتشار SO_2 و ذرات معلق (PM) را کاهش می‌دهد. همچنین، استفاده از آن سبب کاهش انتشار مونوکسیدکربن (CO) و هیدروکربن‌های نسوخته (HCs) می‌شود [۱] [۸]. به همین دلایل، بیودیزل در بسیاری از کشورها به عنوان یکی از ارکان مهم در کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و دستیابی به اهداف اقلیمی توافق پاریس شناخته شده است [۱] [۹].

از نظر اقتصادی، بیودیزل فرصتی ارزشمند برای افزایش امنیت انرژی ملی و استقلال از واردات نفت خام فراهم می‌کند. بسیاری از کشورها، با تکیه بر منابع خوراک داخلی نظیر دانه‌های روغنی، جلبک‌ها و روغن‌های بازیافتی، توانسته‌اند بخشی از نیاز سوخت خود را به‌طور بومی تأمین کنند. این ویژگی، به‌ویژه برای کشورهای در حال توسعه که از منابع کشاورزی غنی برخوردارند، فرصتی برای توسعه پایدار و ایجاد اشتغال محلی فراهم می‌کند [۷][۸].

با وجود تمامی این مزایا، توسعه و گسترش تجاری بیودیزل با چالش‌های قابل توجهی همراه است. یکی از مهم‌ترین این چالش‌ها، هزینه بالای مواد اولیه است که بیش از ۷۰٪ هزینه کل تولید را شامل می‌شود [۹]. استفاده از روغن‌های خوراکی مانند سویا، کلزا و نخل علاوه بر گران بودن، منجر به رقابت با بخش غذایی و در نتیجه افزایش قیمت مواد غذایی می‌شود [۷]. به همین دلیل، توجه پژوهشگران به سمت استفاده از منابع غیرخوراکی و پسماندی مانند روغن پخت‌وپز مصرف‌شده، چربی حیوانی، روغن جتروفا و جلبک‌های میکروسکوپی جلب شده است [۸][۹].

از دیدگاه فنی نیز، فرآیند ترانس‌استریفیکاسیون سنتی که معمولاً در حضور کاتالیزورهای قلیایی انجام می‌شود، دارای محدودیت‌هایی است؛ از جمله تشکیل صابون در اثر وجود آب یا اسیدهای چرب آزاد، نیاز به مراحل جداسازی و خالص‌سازی پیچیده برای حذف گلیسرول، و دشواری در بازیابی کاتالیزور [۷][۹]. در سال‌های اخیر، فناوری‌های نوین مانند ترانس‌استریفیکاسیون فوق بحرانی، آنزیمی و کاتالیزوری ناهمگن معرفی شده‌اند که می‌توانند بسیاری از این مشکلات را برطرف سازند [۸][۹]. این روش‌ها با حذف نیاز به مراحل شست‌وشوی مایع و کاهش مصرف انرژی، بازده فرآیند را افزایش می‌دهند و به توسعه صنعتی پایدارتر کمک می‌کنند.

افزون بر جنبه‌های فنی و اقتصادی، چالش‌های زیست‌محیطی و اجتماعی نیز در مسیر توسعه بیودیزل وجود دارد. کشت گسترده گیاهان روغنی ممکن است به تغییر کاربری زمین، تخریب جنگل‌ها و کاهش تنوع زیستی منجر شود [۷]. به همین دلیل، پژوهش‌ها به سمت استفاده از منابعی مانند جلبک‌های ریز (microalgae) که نیازی به زمین زراعی حاصلخیز ندارند و توانایی بالایی در جذب CO_2 دارند، گسترش یافته است [۸].

از سوی دیگر، بررسی‌های علمی نشان داده‌اند که ترکیب اسیدهای چرب در خوراک اولیه تأثیر مستقیمی بر خواص فیزیکی و عملکرد بیودیزل دارد؛ به‌طور مثال، استرهای دارای زنجیره‌های بلند و اشباع، موجب افزایش عدد ستان و کاهش نقطه‌ای ابر می‌شوند، در حالی که استرهای دارای پیوندهای دوگانه، سیالیت بیشتری در دمای پایین دارند [۶]. بنابراین، انتخاب مناسب خوراک و ترکیب‌بندی هدفمند استرها، نقش مهمی در بهینه‌سازی عملکرد بیودیزل در شرایط اقلیمی مختلف دارد.

با توجه به موارد فوق، روشن است که بیودیزل صرفاً یک سوخت جایگزین ساده نیست، بلکه مجموعه‌ای چندبُعدی از چالش‌ها و فرصت‌ها را در حوزه‌های انرژی، محیط‌زیست، کشاورزی و اقتصاد دربرمی‌گیرد. بررسی دقیق‌تر این ابعاد، به‌ویژه در

زمینه‌های بهبود فناوری تولید، انتخاب مواد اولیه پایدار، و سیاست‌های حمایتی دولتی، برای دستیابی به توسعه‌ی صنعتی و تجاری گسترده‌ی بیودیزل ضروری است [۷][۹]

هدف این مقاله، ارائه‌ی تحلیلی جامع از چالش‌ها، مزایا و چشم‌اندازهای آینده‌ی بیودیزل بر اساس منابع علمی معتبر است. در بخش‌های بعدی، ابتدا به معرفی خوراک‌ها و ویژگی‌های آن‌ها پرداخته می‌شود، سپس فرآیندهای اصلی تولید و فناوری‌های نوین بررسی خواهند شد، و در نهایت، محدودیت‌ها، راهکارها و مسیرهای آینده توسعه‌ی بیودیزل مورد بحث قرار می‌گیرند.

۲. تاریخچه و ضرورت توسعه‌ی بیودیزل

مسئله‌ی تأمین انرژی، یکی از بنیادی‌ترین دغدغه‌های بشری در قرن بیستم و بیست‌ویکم محسوب می‌شود. از آغاز انقلاب صنعتی تا به امروز، وابستگی اقتصاد جهانی به سوخت‌های فسیلی مانند نفت، گاز طبیعی و زغال‌سنگ، منجر به توسعه‌ی بی‌سابقه‌ی صنایع، حمل‌ونقل و فناوری‌های تولیدی شده است. اما در عین حال، این اتکای بیش از اندازه به سوخت‌های فسیلی، پیامدهای منفی گسترده‌ای در ابعاد زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی ایجاد کرده است. افزایش دمای کره‌ی زمین، تشدید پدیده‌ی گلخانه‌ای، تخریب اکوسیستم‌ها، باران‌های اسیدی، آلودگی هوا و بحران سلامت عمومی از جمله آثار نامطلوبی هستند که مستقیماً از احتراق گسترده‌ی سوخت‌های فسیلی ناشی می‌شوند [۷] [۱۵].

در دهه‌های اخیر، شواهد علمی آشکار نشان می‌دهند که انتشار دی‌اکسیدکربن ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی، بیشترین سهم را در تغییرات اقلیمی جهانی دارد. از طرفی، ذخایر نفت خام جهان محدود است و برآوردها حاکی از آن است که با نرخ فعلی مصرف، بسیاری از ذخایر اقتصادی نفت در نیمه‌ی دوم قرن بیست‌ویکم به پایان خواهند رسید. در نتیجه، توجه جهانی به سمت منابع انرژی تجدیدپذیر معطوف شده است؛ منابعی مانند انرژی خورشیدی، بادی، زمین‌گرمایی و سوخت‌های زیستی. در میان این گزینه‌ها، سوخت‌های زیستی جایگاه ویژه‌ای دارند، زیرا برخلاف انرژی‌های الکتریکی نو، قابلیت استفاده‌ی مستقیم در موتورهای احتراقی و زیرساخت‌های موجود را دارند [۸] [۲].

یکی از مهم‌ترین انواع سوخت‌های زیستی، بیودیزل است. بیودیزل به‌صورت کلی به استرهای مونوالکیلی اسیدهای چرب گفته می‌شود که از منابع زیستی مانند روغن‌های گیاهی یا چربی‌های حیوانی به دست می‌آیند. این سوخت از لحاظ عملکردی شباهت زیادی به گازوئیل دارد و می‌تواند به راحتی در موتورهای دیزلی موجود استفاده شود، بدون اینکه نیاز به تغییرات عمده در ساختار موتور باشد [۶]. از این جهت، بیودیزل یکی از عملی‌ترین و نزدیک‌ترین جایگزین‌ها برای سوخت‌های فسیلی به شمار می‌رود.

تاریخچه‌ی استفاده از روغن‌های گیاهی در موتورهای دیزلی به سال ۱۸۹۳ میلادی بازمی‌گردد، زمانی که رودلف دیزل، مخترع موتور دیزل، نخستین نمونه‌ی موتور خود را با روغن بادام‌زمینی آزمایش کرد. او در سخنرانی‌های خود پیش‌بینی کرده بود که «در آینده، موتورهای دیزلی می‌توانند با سوخت‌هایی از منابع گیاهی کار کنند که در کشورهای کشاورزی تولید می‌شوند» [۷]. اما پس از جنگ جهانی دوم و گسترش سریع صنعت نفت، به دلیل ارزانی و در دسترس بودن سوخت‌های فسیلی، ایده‌ی استفاده از روغن‌های گیاهی به حاشیه رفت. تنها پس از بحران نفتی دهه‌ی ۱۹۷۰، هنگامی که قیمت نفت به شدت افزایش یافت و امنیت انرژی در بسیاری از کشورها تهدید شد، پژوهشگران و دولت‌ها دوباره به مفهوم سوخت‌های زیستی بازگشتند [۷][۸].

در همین دوره، پروژه‌های متعددی در کشورهای مختلف، از جمله ایالات متحده، آلمان، فرانسه و برزیل، آغاز شد تا امکان تولید و استفاده‌ی صنعتی از بیودیزل بررسی شود. نخستین کارخانه‌های آزمایشی بیودیزل در دهه‌ی ۱۹۸۰ میلادی در اروپا راه‌اندازی شدند و از دهه‌ی ۱۹۹۰ به بعد، تولید صنعتی بیودیزل به صورت جدی در کشورهای اروپایی گسترش یافت. در آلمان و فرانسه، بیودیزل عمدتاً از روغن کلزا (Rapeseed oil) تولید می‌شود، در حالی که در ایالات متحده از روغن سویا و در آسیای جنوب شرقی از روغن پالم به عنوان منابع اصلی استفاده می‌گردد [۹].

یکی از مهم‌ترین عوامل گسترش تولید بیودیزل، جنبه‌های زیست‌محیطی آن است. بیودیزل به دلیل دارا بودن اکسیژن در ساختار مولکولی خود، احتراق کامل‌تری نسبت به گازوئیل فسیلی دارد و در نتیجه انتشار گازهای آلاینده نظیر منوکسید کربن (CO)، ذرات معلق (PM) و هیدروکربن‌های نسوخته (HC) را به طور محسوسی کاهش می‌دهد [۸]. علاوه بر این، از آنجا که بیودیزل از منابع زیستی تجدیدپذیر تولید می‌شود، چرخه‌ی کربن بسته‌ای دارد؛ یعنی دی‌اکسید کربن آزادشده در فرآیند احتراق بیودیزل، پیش‌تر توسط گیاهان در فرآیند فتوسنتز جذب شده است. این ویژگی، بیودیزل را از منظر کربن‌خنثی بودن نسبت به سوخت‌های فسیلی برتر می‌سازد [۶][۱۰].

از سوی دیگر، اهمیت بیودیزل فقط به جنبه‌ی زیست‌محیطی محدود نمی‌شود، بلکه مزایای اقتصادی و اجتماعی قابل توجهی نیز دارد. در بسیاری از کشورها، تولید بیودیزل از محصولات کشاورزی داخلی موجب افزایش درآمد کشاورزان، ایجاد فرصت‌های شغلی جدید در مناطق روستایی و افزایش امنیت انرژی ملی شده است [۷]. همچنین استفاده از منابع محلی برای تولید سوخت، باعث کاهش وابستگی کشورها به واردات نفت خام و تثبیت اقتصادی در برابر نوسانات بازار جهانی انرژی می‌شود.

از منظر سیاست‌گذاری، بسیاری از کشورها استفاده از بیودیزل را در قالب الزام‌های قانونی و اهداف توسعه‌ی پایدار در برنامه‌های ملی خود گنجانده‌اند. اتحادیه‌ی اروپا در سال ۲۰۰۹ با تصویب «دستورالعمل انرژی‌های تجدیدپذیر (RED)» مقرر کرد که تا سال ۲۰۲۰، حداقل ۱۰٪ از انرژی مصرفی در بخش حمل‌ونقل باید از منابع تجدیدپذیر تأمین شود [۸]. در ایالات متحده نیز «قانون استاندارد سوخت‌های تجدیدپذیر (RFS)» تولید سالانه‌ی بیودیزل را تا سال ۲۰۲۵ به بیش از ۵ میلیارد گالن هدف‌گذاری کرده است.

در ایران نیز با وجود وفور منابع نفتی، مسئله‌ی آلودگی هوا، کاهش ذخایر فسیلی و افزایش تقاضای سوخت، ضرورت حرکت به سمت سوخت‌های زیستی را اجتناب‌ناپذیر ساخته است. به‌ویژه در کلان‌شهرهایی نظیر تهران، تبریز و اصفهان که غلظت آلاینده‌های ناشی از وسایل نقلیه از حد مجاز فراتر رفته است، توسعه‌ی بیودیزل می‌تواند نقشی حیاتی در بهبود کیفیت هوا ایفا کند. علاوه بر آن، ایران دارای ظرفیت بالایی در تولید دانه‌های روغنی، روغن‌های پسماند رستورانی و چربی‌های حیوانی است که می‌توانند به عنوان مواد اولیه‌ی ارزان و در دسترس برای تولید بیودیزل مورد استفاده قرار گیرند.

بنابراین، ضرورت توسعه بیودیزل را میتوان در سه محور اصلی خلاصه کرد:

۱. **محور زیست‌محیطی:** کاهش آلودگی، کنترل انتشار گازهای گلخانه‌ای و سازگاری با سیاست‌های جهانی اقلیمی.
 ۲. **محور اقتصادی:** ایجاد ارزش افزوده از ضایعات و منابع کشاورزی، توسعه اقتصاد روستایی و کاهش وابستگی نفت.
 ۳. **محور اجتماعی و امنیت انرژی:** پایداری تأمین سوخت، افزایش استقلال انرژی و تنوع‌بخشی به منابع سوخت ملی.
- با توجه به این سه بعد اساسی، بیودیزل نه تنها به عنوان یک سوخت جایگزین بلکه به عنوان بخشی از راه‌حل جامع توسعه پایدار در بخش انرژی مطرح می‌شود. در نتیجه، بررسی علمی و عملی روش‌های تولید، ویژگی‌ها و فناوری‌های مربوط به آن، اهمیت بنیادینی در سیاست‌های انرژی قرن حاضر دارد [۶] [۹]

۳. منابع تأمین و ویژگی‌های مواد اولیه‌ی تولید بیودیزل

در فرآیند تولید بیودیزل، انتخاب نوع ماده‌ی اولیه یکی از اساسی‌ترین عوامل تعیین‌کننده‌ی بازده، کیفیت محصول و هزینه‌ی تمام‌شده‌ی تولید است. مواد اولیه‌ی بیودیزل عمدتاً از سه گروه اصلی تشکیل می‌شوند: روغن‌های گیاهی، چربی‌های حیوانی و روغن‌های پسماند (Waste oils). هر یک از این منابع ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاصی دارند که می‌تواند تأثیر مستقیمی بر بازدهی فرآیند، میزان تبدیل، کیفیت استر متیل تولیدی و حتی ویژگی‌های سوختی بیودیزل نهایی داشته باشد [۶].

در میان این منابع، روغن‌های گیاهی رایج‌ترین و در دسترس‌ترین مواد اولیه برای تولید بیودیزل در جهان هستند. این روغن‌ها معمولاً شامل تری‌گلیسریدهایی هستند که از سه مولکول اسید چرب و یک مولکول گلیسرول تشکیل شده‌اند. بسته به نوع گیاه، ساختار اسیدهای چرب در روغن تفاوت دارد و این تفاوت‌ها، خواص فیزیکی و شیمیایی بیودیزل نهایی را تعیین می‌کند. برای مثال، در روغن کلزا و سویا، درصد بالایی از اسیدهای چرب غیراشباع مانند اولئیک و لینولئیک وجود دارد که باعث کاهش ویسکوزیته و بهبود خاصیت احتراقی بیودیزل می‌شود. در مقابل، روغن پالم و نارگیل به دلیل دارا بودن مقدار زیادی اسیدهای چرب اشباع (مانند پالمیتیک و لوریک اسید)، بیودیزلی با نقطه‌ی ریزش بالاتر و پایداری اکسیداتیو بیشتر تولید می‌کنند [۸].

از دیدگاه جهانی، روغن سویا در آمریکای شمالی و جنوبی، روغن کلزا در اروپا و روغن پالم در جنوب شرق آسیا بیشترین سهم را در تولید بیودیزل دارند [۹]. به‌طور خاص، اتحادیه‌ی اروپا بیش از ۸۰٪ بیودیزل خود را از روغن کلزا تولید می‌کند، زیرا این گیاه نه تنها بازده روغن بالایی دارد، بلکه در آب‌وهوای معتدل اروپا به‌خوبی رشد می‌کند و نیاز آبی نسبتاً کمی دارد. در کشورهای استوایی مانند مالزی و اندونزی نیز، به‌دلیل فراوانی نخل روغنی، روغن پالم به عنوان ماده‌ی اولیه‌ی اصلی استفاده می‌شود. هرچند که روغن پالم از نظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه است، اما برداشت و توسعه‌ی مزارع آن در جنگل‌های استوایی، نگرانی‌های زیست‌محیطی جدی مانند جنگل‌زدایی و از بین رفتن تنوع زیستی را به دنبال داشته است [۸].

چربی‌های حیوانی، دومین منبع مهم تولید بیودیزل هستند. این چربی‌ها از منابعی مانند پیه گاو، چربی مرغ، یا ضایعات فرآوری گوشت به‌دست می‌آیند. مزیت اصلی چربی‌های حیوانی، قیمت پایین و فراوانی آن‌ها به عنوان محصولات جانبی صنایع غذایی است. با این حال، این منابع معمولاً دارای مقدار قابل توجهی اسیدهای چرب اشباع هستند که منجر به افزایش نقطه‌ی انجماد و کاهش عملکرد بیودیزل در دماهای پایین می‌شوند. بنابراین، بیودیزل تولیدشده از چربی‌های حیوانی معمولاً در مناطق گرمسیری یا در ترکیب با بیودیزل‌های گیاهی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۷].

در سال‌های اخیر، روغن‌های پسماند (Waste cooking oils) و روغن‌های استفاده‌شده‌ی رستورانی به عنوان گزینه‌های بسیار جذاب برای تولید بیودیزل مطرح شده‌اند. این روغن‌ها که در غیر این صورت به عنوان ضایعات دفع می‌شوند و مشکلات زیست‌محیطی به وجود می‌آورند، می‌توانند با تبدیل به بیودیزل، علاوه بر کاهش هزینه‌های تولید، اثرات زیست‌محیطی ناشی از دفع نامناسب را نیز از بین ببرند. با این حال، چالش اصلی استفاده از روغن‌های پسماند، مقدار بالای اسیدهای چرب آزاد (FFA) و وجود ناخالصی‌هایی مانند آب، ذرات معلق و ترکیبات اکسیدشده است که در فرآیند ترانس‌استریفیکاسیون مشکلاتی ایجاد می‌کنند و بازده واکنش را کاهش می‌دهند [۹].

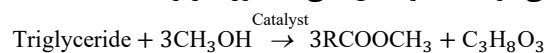
برای حل این مشکلات، معمولاً پیش از انجام واکنش اصلی، یک مرحله‌ی پیش‌تصفیه (Pretreatment) انجام می‌شود. در این مرحله، روغن‌های پسماند با اسیدهایی مانند اسید سولفوریک یا فسفریک تیمار می‌شوند تا اسیدهای چرب آزاد به استر تبدیل شوند و آب و ناخالصی‌ها حذف گردند. این مرحله باعث بهبود کیفیت ماده‌ی اولیه و افزایش بازده فرآیند نهایی می‌شود. از منظر علمی، ترکیب اسیدهای چرب موجود در روغن اولیه تأثیر مستقیمی بر خواص نهایی بیودیزل دارد. مثلاً هرچه درصد اسیدهای چرب غیراشباع در روغن بالاتر باشد، بیودیزل حاصل روان‌تر بوده و نقطه‌ی اشتعال پایین‌تری دارد، اما در مقابل، مقاومت کمتری در برابر اکسیداسیون از خود نشان می‌دهد. در حالی که روغن‌هایی با درصد بالای اسیدهای چرب اشباع، بیودیزلی با پایداری حرارتی و اکسیداتیو بیشتر ولی با خواص سردی ضعیف‌تر تولید می‌کنند [۶]. بنابراین، انتخاب و ترکیب مواد اولیه، می‌تواند به صورت هدفمند برای بهبود یک ویژگی خاص از بیودیزل (مانند پایداری یا عملکرد در هوای سرد) انجام گیرد. در برخی تحقیقات جدید، برای ارتقای کارایی، از ترکیب چند نوع روغن به صورت هم‌زمان استفاده می‌شود. مثلاً مخلوط روغن پالم و سویا می‌تواند بیودیزلی با تعادل بهتری بین نقطه‌ی ریزش و پایداری اکسیداتیو ایجاد کند. این نوع از طراحی‌های ترکیبی به‌ویژه برای مناطق جغرافیایی خاص بسیار مفید هستند.

علاوه بر منابع متداول، پژوهش‌ها در سال‌های اخیر به سمت استفاده از منابع غیرخوراکی و غیررقابتی با امنیت غذایی حرکت کرده‌اند. در این میان، روغن جاتروفا، کاستور و الگهای میکروسکوپی به عنوان منابع نسل دوم و سوم بیودیزل مطرح شده‌اند. گیاه جاتروفا می‌تواند در خاک‌های فقیر و نیمه‌خشک رشد کند و نیازی به زمین‌های زراعی حاصل‌خیز ندارد؛ در نتیجه با تولید مواد غذایی رقابت نمی‌کند. از سوی دیگر، ریزجلبک‌ها پتانسیل فوق‌العاده‌ای برای تولید روغن دارند؛ زیرا محتوای روغنی برخی گونه‌های آن‌ها تا ۷۰٪ جرم خشک می‌رسد و می‌توان آن‌ها را در محیط‌های کنترل‌شده بدون استفاده از زمین زراعی کشت داد [۸].

در نهایت، انتخاب منبع مناسب برای تولید بیودیزل باید بر اساس مجموعه‌ای از فاکتورها شامل دسترس‌پذیری، هزینه، پایداری زیست‌محیطی، محتوای FFA و درصد اسیدهای چرب اشباع و غیراشباع انجام گیرد. کشورهای مختلف، بسته به شرایط اقلیمی و کشاورزی خود، منابع متفاوتی را انتخاب می‌کنند. در ایران نیز با توجه به حجم بالای روغن‌های پسماند، ضایعات صنایع غذایی و قابلیت کشت گیاهان روغنی مانند کلزا، آفتابگردان و جاتروفا، ترکیبی از این منابع می‌تواند برای تولید اقتصادی و پایدار بیودیزل مورد استفاده قرار گیرد [۹].

۴. واکنش ترانس استریفیکاسیون و تأثیر نوع کاتالیزور

اصلی ترین فرآیند تولید بیودیزل در مقیاس صنعتی، واکنش ترانس استریفیکاسیون است. در این واکنش، تری گلیسریدهای موجود در روغن یا چربی با یک الکل (معمولاً متانول یا اتانول) در حضور یک کاتالیزور مناسب واکنش داده و استرهای مونوالکیلی (یعنی بیودیزل) و گلیسرول تولید می شوند [۹]. واکنش کلی به صورت زیر است:



در این واکنش، کاتالیزور نقش کلیدی در سرعت و بازده تبدیل دارد. بسته به نوع کاتالیزور، فرآیند ترانس استریفیکاسیون می تواند به سه دسته اصلی تقسیم شود: قلیایی، اسیدی و بدون کاتالیزور [۹].

در فرآیند قلیایی، از کاتالیزورهایی مانند سدیم هیدروکسید (NaOH)، پتاسیم هیدروکسید (KOH) یا متوکسید سدیم (NaOCH₃) استفاده می شود. این روش به دلیل سرعت بالای واکنش، هزینه ی پایین و بازدهی زیاد، متداول ترین روش تولید صنعتی بیودیزل است. با این حال، وجود آب و اسیدهای چرب آزاد در روغن اولیه می تواند باعث تشکیل صابون شود که جداسازی گلیسرول و فاز بیودیزل را دشوار می کند و بازده را کاهش می دهد [۹]. به همین دلیل، مواد اولیه در این روش باید پیش از واکنش خشک و تصفیه شوند.

در فرآیند اسیدی، معمولاً از اسید سولفوریک یا هیدروکلریک به عنوان کاتالیزور استفاده می شود. این روش برای روغن هایی که دارای مقدار زیادی اسید چرب آزاد هستند (مانند روغن های پسماند یا چربی های حیوانی)، بسیار مناسب تر است، زیرا اسیدها قادرند اسیدهای چرب آزاد را به استر تبدیل کنند و مشکل صابون سازی را برطرف نمایند. هرچند که سرعت واکنش در این روش پایین تر و زمان واکنش طولانی تر است [۳] [۹].

در روش های جدیدتر، استفاده از کاتالیزورهای جامد (هتروژنی) مانند اکسیدهای فلزی مورد توجه قرار گرفته است. مزیت این نوع کاتالیزورها در این است که می توانند پس از واکنش به راحتی جدا و بازیافت شوند، در حالی که کاتالیزورهای مایع قلیایی یا اسیدی قابل بازیافت نیستند و آلودگی شیمیایی ایجاد می کنند. علاوه بر این، کاتالیزورهای جامد پایداری بیشتری دارند و می توانند در فرآیندهای پیوسته ی صنعتی استفاده شوند [۷] [۳].

در سال های اخیر، پژوهشگران همچنین فرآیندهای بدون کاتالیزور را توسعه داده اند، که در آن متانول در شرایط فوق بحرانی (دمای ۳۵۰ تا ۴۰۰ درجه سانتی گراد و فشار ۴۵ تا ۶۰ مگاپاسکال) به طور مستقیم با روغن واکنش می دهد. این روش با راندمان بسیار بالا (تا ۹۸٪ تبدیل به FAME) عمل می کند و نیاز به جداسازی پیچیده ندارد [۹]. علاوه بر این، چون در این روش هیچ کاتالیزوری استفاده نمی شود، مشکلات صابون سازی و آلودگی شیمیایی نیز وجود ندارد. با این حال، هزینه ی بالا و نیاز به تجهیزات مقاوم در برابر فشار، استفاده ی گسترده از این روش را در مقیاس صنعتی محدود کرده است.

یکی دیگر از فناوری های نوین در این حوزه، استفاده از کاتالیزورهای آنزیمی (لیپازها) است. این کاتالیزورها می توانند در دمای پایین عمل کرده و نسبت به ناخالصی های موجود در روغن حساسیت کمتری داشته باشند. از آنجایی که واکنش در شرایط ملایم و بدون تشکیل صابون انجام می شود، بیودیزل حاصل خلوص بالاتری دارد و جداسازی گلیسرول آسان تر است. مشکل اصلی این روش، قیمت بالای آنزیم ها و پایداری محدود آن ها در چرخه های واکنشی متوالی است [۹].

در مجموع، انتخاب نوع کاتالیزور و شرایط واکنش بستگی مستقیمی به نوع ماده ی اولیه، ترکیب اسیدهای چرب، مقدار FFA، هدف تولید (پیوسته یا ناپیوسته بودن فرآیند) و امکانات فنی دارد.

۵. روش‌های نوین تولید بیودیزل با تمرکز بر فرآیند الکترولیز

با پیشرفت فناوری و افزایش نیاز جهانی به انرژی‌های تجدیدپذیر، پژوهش‌های بسیاری در زمینه‌ی ارتقای روش‌های تولید بیودیزل صورت گرفته است. اگرچه فرآیند ترانس‌استریفیکاسیون قلیایی هنوز متداول‌ترین روش تولید صنعتی است، اما معایب آن از جمله مصرف بالای انرژی، زمان طولانی واکنش، دشواری در جداسازی فازها، تشکیل صابون و نیاز به خالص‌سازی مداوم، سبب شده است تا توجه محققان به سوی روش‌های نوینی جلب شود که بازدهی بالاتر و آلودگی کمتری دارند. یکی از مهم‌ترین و امیدبخش‌ترین این روش‌ها، فرآیند الکترولیز در تولید بیودیزل است [۵].

در روش الکترولیز، از جریان الکتریکی به عنوان نیروی محرک واکنش‌های شیمیایی استفاده می‌شود. این روش بر مبنای تجزیه‌ی الکتروشیمیایی تری‌گلیسریدها و تبدیل آن‌ها به استرهای اسید چرب طراحی شده است. در واقع، در این فرآیند، الکترون‌ها نقش کاتالیزور را ایفا می‌کنند و دیگر نیازی به کاتالیزورهای قلیایی یا اسیدی نیست؛ بنابراین، بسیاری از مشکلات فرآیندهای مرسوم مانند تشکیل صابون، آلودگی زیست‌محیطی و هزینه‌های بالای تصفیه حذف می‌گردد. از سوی دیگر، به دلیل حذف مرحله‌ی خنثی‌سازی و شست‌وشو با آب، میزان پسماند کاهش یافته و تولید گلیسرول خالص‌تر و با ارزش افزوده‌ی بیشتر حاصل می‌شود [۹][۵].

در این روش معمولاً از الکترودهایی با جنس مقاوم به خوردگی مانند نیکل، پلاتین یا فولاد ضد زنگ استفاده می‌شود. چربی‌ها یا روغن‌های گیاهی در مجاورت متانول یا اتانول قرار گرفته و در حضور جریان الکتریکی مستقیم، واکنش تبدیل تری‌گلیسریدها به متیل یا اتیل استر انجام می‌شود. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که با بهینه‌سازی چگالی جریان و دمای واکنش، بازده تبدیل می‌تواند به بیش از ۹۵ درصد برسد، در حالی که زمان واکنش به طور چشمگیری کاهش می‌یابد. افزون بر این، در این روش برخلاف ترانس‌استریفیکاسیون معمولی، حضور اسیدهای چرب آزاد یا آب تأثیر منفی بر فرایند ندارد، زیرا الکترون‌ها مستقیماً واکنش را هدایت می‌کنند و نیاز به محیط قلیایی حذف می‌شود [۱۱][۵].

از دیگر مزایای قابل توجه روش الکترولیز می‌توان به دوام تجهیزات، سهولت کنترل واکنش و امکان پیوسته‌سازی فرآیند در مقیاس صنعتی اشاره کرد. حذف استفاده از مواد شیمیایی خورنده مانند سود سوزآور (سدیم هیدروکسید) و پتاس سوزآور (پتاسیم هیدروکسید) نه تنها هزینه‌های ایمنی و دفع پسماند را کاهش می‌دهد، بلکه سبب می‌شود محصول نهایی از خلوص بالاتری برخوردار باشد. همچنین، انرژی الکتریکی مصرفی در فرآیند می‌تواند از منابع تجدیدپذیر مانند انرژی خورشیدی یا بادی تأمین شود و در نتیجه کل چرخه‌ی تولید بیودیزل به سمت پایداری زیست‌محیطی حرکت کند [۵][۸].

مقایسه‌ی روش الکترولیز با سایر روش‌های نوین نشان می‌دهد که این فرآیند از نظر زیست‌محیطی و اقتصادی برتری‌های چشمگیری دارد. برای مثال، در روش‌های فوق بحرانی، گرچه بازده تولید بالا است، اما هزینه‌ی تجهیزات مقاوم به فشار و دمای بالا مانع گسترش صنعتی آن می‌شود. در روش آنزیمی نیز اگرچه واکنش در دمای پایین و بدون تولید مواد جانبی انجام می‌گیرد، اما آنزیم‌ها بسیار گران و حساس هستند و در مقیاس صنعتی بازده اقتصادی پایین‌تری دارند. در مقابل، روش الکترولیز ضمن حفظ بازده بالا، به دمای واکنش پایین‌تر، فشار معمولی و تجهیزات ارزان‌تر نیاز دارد و همچنین قابلیت ترکیب با فناوری‌های کمکی مانند فراصوتی (اولتراسونیک) و میدان‌های الکترومغناطیسی را دارد که می‌توانند سرعت و بازده واکنش را به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش دهند [۹][۵].

بر اساس مطالعات انجام شده، در صورت استفاده از سیستم‌های الکترولیز چند مرحله‌ای، می‌توان حتی روغن‌های پسماند، روغن‌های با درصد بالای اسید چرب آزاد و چربی‌های حیوانی سنگین را بدون نیاز به تصفیه‌ی اولیه به بیودیزل تبدیل کرد. این ویژگی، اهمیت بالایی برای پایداری اقتصادی و زیست‌محیطی دارد؛ زیرا استفاده از روغن‌های پسماند موجب کاهش فشار بر منابع خوراکی و جلوگیری از رقابت غذایی می‌شود. به همین دلیل، الکترولیز در بسیاری از کشورها به عنوان یکی از فناوری‌های نسل سوم تولید بیودیزل مورد توجه قرار گرفته است [۱۳][۵].

از نظر فنی، چالش‌های این روش بیشتر مربوط به بهینه‌سازی پارامترهایی مانند شدت جریان، فاصله‌ی الکترودها و نوع حلال است. انتخاب الکترود مناسب نقش کلیدی در کارایی واکنش دارد، زیرا باید هم هدایت الکتریکی بالا داشته باشد و هم در برابر خوردگی مقاوم باشد. همچنین، طراحی سلول الکترولیز به گونه‌ای که حباب‌های گاز حاصل از واکنش مانع انتقال جرم نشوند، از مسائل مهم مهندسی این فرآیند است. بهبود این پارامترها می‌تواند راه را برای تولید صنعتی در مقیاس بالا هموار کند. پژوهش‌های اخیر نشان داده‌اند که ترکیب الکترولیز با استفاده از نانومواد رسانا، بازده واکنش را تا حدود ۲۰ درصد افزایش داده و انرژی مصرفی را به طور قابل توجهی کاهش می‌دهد [۹][۵].

در مجموع، روش الکترولیز را می‌توان یکی از پایدارترین و کارآمدترین فناوری‌های نوین تولید بیودیزل دانست که توانایی رقابت با فرآیندهای مرسوم را دارد. حذف کاتالیزورهای قلیایی و اسیدی، کاهش چشمگیر پسماندها، صرفه‌جویی در انرژی، کاهش هزینه‌های جداسازی و تصفیه، و امکان استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر برای تأمین برق مورد نیاز، از جمله مهم‌ترین مزایای این فناوری هستند. با وجود چالش‌هایی نظیر نیاز به سرمایه‌گذاری اولیه برای طراحی سیستم‌های الکترولیز صنعتی، انتظار می‌رود در آینده با بهبود بازده الکترودها و استفاده از فناوری‌های هوشمند کنترل فرایند، این روش به یکی از ارکان اصلی تولید صنعتی بیودیزل تبدیل شود [۸][۵][۹].

۶. چالش‌ها، محدودیت‌ها، و ملاحظات زیست‌محیطی در تولید بیودیزل

با وجود آنکه بیودیزل به عنوان یک سوخت پاک، تجدیدپذیر و سازگار با محیط زیست شناخته می‌شود، اما فرآیند تولید و به‌کارگیری آن با چالش‌ها و محدودیت‌هایی همراه است که در صورت عدم کنترل دقیق، می‌تواند بر کارایی اقتصادی و پایداری زیست‌محیطی آن تأثیرگذار باشد. یکی از مهم‌ترین این چالش‌ها، رقابت بین تولید سوخت و تأمین مواد غذایی است. استفاده از روغن‌های خوراکی نظیر سویا، کلزا و پالم برای تولید بیودیزل، در بسیاری از کشورها موجب افزایش قیمت مواد غذایی و فشار بر منابع کشاورزی شده است. این مسئله به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه، که امنیت غذایی در اولویت است، منجر به نگرانی‌های اقتصادی و اجتماعی گسترده گردیده است [۹]. به همین دلیل، تمرکز بر منابع غیرخوراکی مانند دانه جاتروفا، چربی‌های حیوانی، روغن‌های پسماند و حتی جلبک‌ها به عنوان گزینه‌های جایگزین در دستور کار بسیاری از پژوهش‌ها و صنایع قرار گرفته است. این مواد علاوه بر کاهش رقابت با بخش خوراکی، هزینه‌ی تولید را نیز به‌طور محسوسی کاهش می‌دهند و درعین حال موجب بازیافت مواد زاید و کاهش آلودگی می‌شوند [۵].

چالش دیگر در مسیر صنعتی سازی بیودیزل، هزینه های بالای فرآیند و مشکلات فنی در مراحل جداسازی و تصفیه است. فرآیند ترانس استریفیکاسیون معمولی نیازمند مقادیر قابل توجهی الکل، کاتالیزور و آب برای شست و شو و خالص سازی محصول است. در این میان، تشکیل صابون ناشی از حضور اسیدهای چرب آزاد و آب، مانع اصلی در جداسازی گلیسرول و بیودیزل است که علاوه بر کاهش بازدهی، سبب افزایش هزینه تصفیه و دفع پساب ها می شود [۹]. همچنین در فرآیندهای قلیایی، حضور یون های سدیم یا پتاسیم ممکن است به ایجاد امولسیون پایدار بین لایه های استر و گلیسرول منجر شود و کارایی جداسازی را مختل کند. علاوه بر این، بی توجهی به کنترل دما و فشار در حین واکنش، می تواند موجب تخریب حرارتی برخی از متیل استرها، خصوصاً استرهای با زنجیره های غیر اشباع، و در نتیجه کاهش کیفیت سوخت تولیدی شود.

از دیدگاه زیست محیطی، هرچند بیودیزل نسبت به دیزل فسیلی تا حدود ۷۵٪ کاهش در انتشار گازهای گلخانه ای ایجاد می کند، اما اثرات زیست محیطی آن تنها محدود به مرحله احتراق نیست، بلکه کل چرخه عمر تولید نیز باید مدنظر قرار گیرد [۵]. مصرف انرژی در مراحل پیش تصفیه روغن ها، استفاده از متانول پتروشیمیایی (که منبعی غیر تجدید پذیر دارد) و تولید پسماندهای شیمیایی مانند صابون ها و محلول های قلیایی از جمله مواردی است که می تواند از پایداری زیست محیطی فرایند بکاهد. بنابراین جایگزینی متانول با اتانول زیستی یا بیومتانول حاصل از منابع تجدید پذیر، به عنوان یک راهکار مؤثر برای ارتقای پایداری فرآیند مطرح شده است [۹]. همچنین بازیافت متانول از فاز گلیسرینی و استفاده مجدد از آن می تواند از آلودگی های شیمیایی بکاهد و هزینه های کل چرخه تولید را کاهش دهد.

از دیگر ملاحظات مهم در حوزه پایداری، مدیریت مناسب گلیسرول خام تولیدی است که حدود ده درصد از کل محصول واکنش را تشکیل می دهد. گلیسرول به دلیل ناخالصی های فراوان (مانند متانول، کاتالیزور، صابون و آب)، به راحتی قابل استفاده نیست و در صورت رهاسازی در محیط، می تواند باعث آلودگی منابع آب و خاک شود. به همین دلیل، استفاده از روش های تصفیه زیستی و شیمیایی گلیسرول و تبدیل آن به محصولات با ارزش مانند پروپان دیول یا استونونیتریل در حال توسعه است که ضمن حل مشکل زیست محیطی، ارزش اقتصادی فرایند بیودیزل را افزایش می دهد [۵].

در نهایت، باید توجه داشت که توسعه پایدار بیودیزل نیازمند رویکردی جامع است که نه تنها جنبه فنی و اقتصادی، بلکه پیامدهای زیست محیطی و اجتماعی را نیز دربرگیرد. تنها در این صورت می توان ادعا کرد که بیودیزل به عنوان یک سوخت جایگزین واقعی، توانایی رقابت با سوخت های فسیلی را در بلندمدت خواهد داشت.

۷. چالش ها و محدودیت های تولید بیودیزل در مقیاس صنعتی

تولید بیودیزل در مقیاس صنعتی اگرچه از منظر زیست محیطی و پایداری انرژی بسیار مطلوب است، اما با مجموعه ای از چالش های فنی، اقتصادی و عملیاتی مواجه است که گسترش آن را در بسیاری از کشورها با محدودیت روبه رو ساخته است [۵].

یکی از مهم ترین این چالش ها، کیفیت و ترکیب مواد اولیه است. چربی ها و روغن های گیاهی یا حیوانی که برای تولید بیودیزل استفاده می شوند، دارای مقادیر متفاوتی از اسیدهای چرب آزاد (FFA) و آب هستند. وجود این ترکیبات سبب بروز واکنش های جانبی، از جمله تشکیل صابون و امولسیون های پایدار در فرآیند ترانس استریفیکاسیون می شود که به صورت مستقیم بر بازده تولید و خلوص بیودیزل تأثیر منفی دارد [۱۲][۹]. در مواردی که مقدار اسید چرب آزاد زیاد است، جداسازی لایه های بیودیزل و گلیسرول دشوار می شود و بخش قابل توجهی از محصولات جانبی در فاز بیودیزل باقی می ماند.

از سوی دیگر، انتخاب نوع کاتالیزور و کنترل شرایط واکنش اهمیت بسزایی دارد. کاتالیزورهای قلیایی نظیر NaOH و KOH در مقیاس صنعتی به دلیل بازده بالا متداول هستند، اما این مواد نسبت به حضور آب و اسیدهای چرب آزاد بسیار حساس اند و در چنین شرایطی به سرعت غیرفعال می‌شوند. در نتیجه، ضرورت پیش‌تصفیه و خشک‌سازی مواد اولیه پیش از ورود به فرآیند، هزینه و پیچیدگی تولید را افزایش می‌دهد [۵]. همچنین در روش‌های بدون کاتالیزور که از متانول فوق بحرانی استفاده می‌شود، اگرچه مشکل حساسیت کاتالیزور حذف می‌گردد، اما دمای بالا (۳۵۰ تا ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد) و فشار بسیار زیاد (۴۵ تا ۶۰ مگاپاسکال) نیاز به تجهیزات گران‌قیمت فولادی و کنترل دقیق فرایند دارد که از منظر اقتصادی چالش‌برانگیز است [۹].

مسائل اقتصادی و هزینه‌ای نیز از مهم‌ترین موانع گسترش صنعتی بیودیزل محسوب می‌شوند. سهم عمده‌ای از هزینه کل تولید (حدود ۷۰ تا ۸۰ درصد) مربوط به قیمت مواد اولیه است [۵]. در بسیاری از کشورها، روغن‌های خوراکی نظیر سویا، کلزا یا پالم که مواد اولیه اصلی هستند، هم‌زمان در بازار غذایی نیز تقاضای بالایی دارند و این امر سبب ایجاد رقابت بین تولید سوخت و تأمین غذا می‌شود. از این رو، استفاده از روغن‌های پسماند، چربی‌های حیوانی یا منابع غیرخوراکی مانند روغن جاتروفا و جلبک‌های میکروسکوپی، از منظر پایداری بسیار مورد توجه قرار گرفته است، هرچند هنوز نیازمند توسعه زیرساخت‌های جمع‌آوری، پالایش و ذخیره‌سازی مناسب است [۹][۱۰].

از منظر زیست‌محیطی نیز اگرچه بیودیزل آلاینده‌ی کمتری نسبت به سوخت‌های فسیلی دارد، اما تولید آن در مقیاس وسیع می‌تواند پیامدهایی همچون افزایش مصرف زمین‌های کشاورزی، استفاده گسترده از کودها و سموم شیمیایی، و تخریب زیست‌بوم‌های طبیعی به دنبال داشته باشد. به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه، گسترش کاشت گیاهان روغنی برای تولید سوخت ممکن است منجر به تغییر کاربری اراضی و تهدید امنیت غذایی شود. از سوی دیگر، تولید گلیسرول خام به‌عنوان محصول جانبی فرآیند ترانس‌استریفیکاسیون، در مقادیر زیاد چالش‌هایی برای دفع یا بازیافت آن ایجاد کرده است [۹][۱۱].

در حوزه‌ی فنی نیز، پایداری اکسیداسیونی بیودیزل و مسائل مربوط به انبارداری و انتقال مطرح است. بیودیزل به دلیل وجود زنجیره‌های اسید چرب غیراشباع، در مقایسه با دیزل فسیلی، پایداری اکسیداتیوی پایین‌تری دارد و در تماس با هوا، نور یا دمای بالا، به تدریج اکسید و اسیدی می‌شود که این امر می‌تواند موجب خوردگی مخازن و فیلترها گردد. همچنین، نقطه‌ی ابری و نقطه‌ی ریزش بالای بیودیزل نسبت به دیزل معمولی، استفاده از آن را در مناطق سردسیر محدود می‌کند. ترکیب بیودیزل با افزودنی‌های پایدارکننده و ضدیخ یکی از راهکارهای فنی برای رفع این چالش است [۹][۱۲][۱۴].

در مجموع، چالش‌های پیش روی تولید بیودیزل را می‌توان در سه محور اصلی دسته‌بندی کرد: اولاً، محدودیت‌های فنی و فرآیندی که شامل مشکلاتی مانند تشکیل صابون در حضور اسیدهای چرب آزاد (FFA) بالا، کاهش بازده واکنش در مواد اولیه با کیفیت پایین و نیاز به دما و فشارهای بالاتر در روش‌های بدون کاتالیزور است. این محدودیت‌ها موجب کاهش راندمان تبدیل تری‌گلیسریدها به استرها شده و نیازمند کنترل دقیق شرایط واکنش و پیش‌تصفیه مناسب مواد اولیه است.

ثانیاً، محدودیت‌های اقتصادی که مهم‌ترین آن هزینه بالای تأمین مواد اولیه و تجهیزات صنعتی است. به‌ویژه در مواردی که از روغن‌های خوراکی استفاده می‌شود، هزینه تولید به‌شدت افزایش یافته و توجیه اقتصادی را کاهش می‌دهد. علاوه بر این، هزینه‌های انرژی، کاتالیزورها و فرآیندهای پس‌تصفیه نیز به مجموع هزینه‌ها افزوده می‌شود و باعث می‌گردد که بدون حمایت‌های دولتی یا مدل‌های اقتصادی کارآمد، تولید بیودیزل در مقیاس وسیع دشوار باشد.

ثالثاً، چالش‌های زیست‌محیطی از جمله تأثیر بر کاربری زمین و اکوسیستم‌ها، پایداری محصول و مدیریت جانبی‌های فرآیند مانند گلیسرول و آب ناشی از واکنش‌ها اهمیت دارند. انتخاب نامناسب مواد اولیه یا عدم بازیافت مؤثر گلیسرول می‌تواند بخش قابل توجهی از مزایای زیست‌محیطی بیودیزل را خنثی کند.

با توجه به این محدودیت‌ها، توسعه پایدار صنعت بیودیزل نیازمند توازی اقدامات علمی و فناوری با سیاست‌های اقتصادی و حمایتی است. از یک سو، پژوهش‌های علمی باید بر بهبود فناوری تولید، ارتقای کیفیت مواد اولیه و افزایش بازده واکنش متمرکز شود و از سوی دیگر، سیاست‌های اقتصادی باید به تأمین منابع ارزان، پایدار و غیرخوراکی کمک کند. تنها از طریق این رویکرد ترکیبی است که بیودیزل می‌تواند جایگاه واقعی خود را به‌عنوان یک سوخت تجدیدپذیر، پاک و اقتصادی در سبد انرژی کشورها به دست آورد [۱۵] [۹].

۸. نقش بیودیزل در امنیت انرژی و توسعه پایدار ملی

امنیت انرژی یکی از ارکان اساسی توسعه پایدار در هر کشور است. افزایش جمعیت، رشد صنعتی و وابستگی شدید به سوخت‌های فسیلی موجب شده است که بسیاری از کشورها به دنبال یافتن منابع جایگزین باشند تا هم نیازهای انرژی خود را تأمین کنند و هم از نوسانات بازار جهانی نفت و اثرات زیست‌محیطی ناشی از آن بکاهند. در این میان، بیودیزل به‌عنوان یک سوخت تجدیدپذیر، پاک و بومی، نقشی کلیدی در تقویت امنیت انرژی ملی و پایداری زیست‌محیطی ایفا می‌کند [۸]. این سوخت با قابلیت تولید از منابع گوناگون مانند روغن‌های گیاهی، چربی‌های حیوانی و حتی پسماندهای صنعتی، به کشورها این امکان را می‌دهد که بخشی از وابستگی خود به واردات سوخت‌های فسیلی را کاهش دهند و در مسیر خودکفایی انرژی گام بردارند.

یکی از مزایای بنیادی بیودیزل، قابلیت تولید در مقیاس ملی با تکیه بر منابع داخلی است. کشورهایی که دارای زمین‌های کشاورزی وسیع یا منابع قابل توجهی از پسماندهای روغنی و دامی هستند، می‌توانند از این ظرفیت برای تولید سوخت زیستی بهره‌برداری کنند. برای مثال، کشت گیاهانی مانند کلزا، آفتابگردان، پنبه‌دانه یا حتی جلبک‌های دریایی، امکان تأمین خوراک موردنیاز واحدهای تولید بیودیزل را فراهم می‌کند. از سوی دیگر، به‌کارگیری پسماندهای روغن‌های مصرف‌شده در صنایع غذایی، ضمن کاهش آلودگی زیست‌محیطی، هزینه‌ی تولید بیودیزل را به‌طور چشمگیری کاهش می‌دهد. این دو عامل — در دسترس بودن خوراک و مقرون‌به‌صرفه بودن تولید — از مؤلفه‌های اصلی در افزایش پایداری انرژی ملی به‌شمار می‌روند [۶].

از دیدگاه زیست‌محیطی نیز، نقش بیودیزل در توسعه پایدار بسیار برجسته است. سوزاندن بیودیزل در موتورهای احتراق داخلی در مقایسه با دیزل فسیلی موجب کاهش قابل توجه گازهای گلخانه‌ای، ذرات معلق، منوکسیدکربن و ترکیبات گوگردی می‌شود. بر اساس مطالعات انجام‌شده، میزان انتشار دی‌اکسیدکربن ناشی از احتراق بیودیزل حدود ۷۰ تا ۸۰ درصد کمتر از سوخت‌های فسیلی است، زیرا کربن آزادشده در فرآیند سوختن بیودیزل پیش‌تر در چرخه‌ی رشد گیاهان از جو جذب شده است. این ویژگی موجب می‌شود بیودیزل در مقایسه با سوخت‌های فسیلی دارای چرخه‌ی کربن بسته باشد و اثر خالص انتشار گازهای گلخانه‌ای آن نزدیک به صفر گردد [۸]. در نتیجه، گسترش مصرف بیودیزل نه تنها به بهبود کیفیت هوا و کاهش تغییرات اقلیمی کمک می‌کند بلکه در راستای تعهدات بین‌المللی کشورها برای کاهش اثرات زیست‌محیطی نیز گامی مؤثر است.

از منظر اقتصادی، توسعه‌ی صنعت بیودیزل می‌تواند موتور محرک اشتغال و رونق روستاها باشد. با راه‌اندازی واحدهای تولید بیودیزل در مناطق کشاورزی، فرصت‌های شغلی جدیدی در حوزه‌ی کاشت، برداشت، فرآوری و توزیع ایجاد می‌شود. همچنین ایجاد زنجیره‌ی ارزش از تولید خوراک اولیه تا فرآوری نهایی، به رشد صنایع جانبی مانند تولید کاتالیزور، طراحی راکتورهای زیستی و خدمات حمل‌ونقل کمک می‌کند. در بسیاری از کشورها، سیاست‌گذاران انرژی از بیودیزل نه تنها به عنوان سوخت جایگزین بلکه به عنوان ابزار توسعه‌ی متوازن منطقه‌ای و کاهش فقر روستایی بهره می‌برند [۶]. برای نمونه، در برزیل و هند، دولت‌ها با اعطای تسهیلات مالی و معافیت‌های مالیاتی، کشاورزان کوچک را به کشت گیاهان روغنی ترغیب کرده‌اند تا هم درآمد پایدار داشته باشند و هم در زنجیره‌ی تأمین سوخت ملی نقش‌آفرینی کنند.

از نظر راهبردی، یکی از جنبه‌های حیاتی بیودیزل، کاهش آسیب‌پذیری کشورها در برابر بحران‌های انرژی جهانی است. نوسانات قیمت نفت خام، تحریم‌های بین‌المللی و چالش‌های ژئوپلیتیکی همواره امنیت انرژی کشورها را تهدید می‌کنند. تولید بیودیزل از منابع داخلی به کشورها کمک می‌کند تا در شرایط بحرانی نیز تأمین سوخت حیاتی حمل‌ونقل و بخش‌های صنعتی خود را تضمین کنند. علاوه بر این، با توسعه‌ی فناوری‌های نوین مانند الکترولیز و ترانس‌استریفیکاسیون فوق بحرانی، می‌توان این تولید داخلی را با بازدهی بالاتر، هزینه‌ی کمتر و آلودگی کمتر انجام داد. این امر ضمن تقویت استقلال انرژی، کشور را به سمت تحقق اهداف کلان توسعه‌ی پایدار و کربن خنثی سوق می‌دهد [۳] [۹].

از دیدگاه اجتماعی، گسترش استفاده از بیودیزل باعث افزایش آگاهی زیست‌محیطی، تغییر الگوی مصرف انرژی و تقویت مسئولیت‌پذیری شهروندان در قبال محیط‌زیست می‌شود. با جایگزینی تدریجی بیودیزل به جای دیزل فسیلی در ناوگان‌های حمل‌ونقل عمومی، کشاورزی و صنایع سبک، نه تنها مصرف سوخت‌های آلاینده کاهش می‌یابد بلکه فرهنگ استفاده از انرژی‌های پاک در جامعه نهادینه می‌شود. این تغییر فرهنگی یکی از پایه‌های توسعه‌ی پایدار است؛ چرا که توسعه تنها به رشد اقتصادی محدود نمی‌شود بلکه مستلزم ایجاد تعادل میان ابعاد اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی است.

با وجود تمام مزایا، باید توجه داشت که برای تحقق کامل نقش بیودیزل در امنیت انرژی، برنامه‌ریزی دقیق، حمایت دولتی و سیاست‌گذاری منسجم ضروری است. سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های تولید، ایجاد مشوق‌های مالی، وضع استانداردهای کیفی، آموزش نیروی انسانی و حمایت از پژوهش‌های فناورانه از جمله اقداماتی است که می‌تواند مسیر توسعه‌ی بیودیزل را تسریع کند. همچنین استفاده از ترکیبات بیودیزل با سوخت‌های فسیلی می‌تواند گام میانی مؤثری برای گذار تدریجی به سمت سوخت‌های کاملاً تجدیدپذیر باشد.

در نهایت، می‌توان نتیجه گرفت که بیودیزل نه تنها یک سوخت جایگزین بلکه یک ابزار راهبردی برای تحقق امنیت انرژی، توسعه‌ی پایدار و عدالت اقتصادی است. این سوخت با تکیه بر منابع داخلی، کاهش آلودگی، تقویت اشتغال و پایداری زیست‌محیطی، می‌تواند به عنوان یکی از پایه‌های اصلی سیاست انرژی آینده‌ی کشورها مطرح شود. چنانچه سرمایه‌گذاری علمی و سیاست‌گذاری هدفمند در این حوزه به‌طور پیوسته ادامه یابد، بیودیزل قادر خواهد بود جایگاهی اساسی در تحقق اهداف جهانی توسعه‌ی پایدار و گذار به اقتصاد سبز ایفا کند [۶] [۸] [۴].

۹. فناوری‌های نوین و چشم‌انداز آینده در تولید بیودیزل

با گسترش نیاز جهانی به انرژی‌های تجدیدپذیر و محدودیت منابع فسیلی، پژوهش‌ها در زمینه بیودیزل به‌سوی روش‌های نوین‌تر و پایدارتر هدایت شده‌اند. بیودیزل به‌عنوان یک سوخت زیستی نسل اول در ابتدا عمدتاً از روغن‌های خوراکی نظیر سویا، کلزا و پالم تولید می‌شد، اما امروزه تمرکز علمی و صنعتی در سطح جهان به‌سوی بهبود فرآیند، کاهش هزینه‌ها و استفاده از منابع غیرخوراکی سوق یافته است. این تغییر جهت نه‌تنها از نظر زیست‌محیطی بلکه از منظر اقتصادی و سیاست‌گذاری انرژی نیز اهمیت ویژه‌ای دارد، زیرا استفاده‌ی گسترده از منابع خوراکی برای تولید سوخت، سبب بروز رقابت غذایی و افزایش قیمت مواد خوراکی می‌شود [۱۱] [۹].

یکی از مهم‌ترین مسیرهای توسعه‌ی آینده، جایگزینی کاتالیزورهای همگن قلیایی با کاتالیزورهای ناهمگن و آنزیمی است. در فرآیندهای مرسوم، استفاده از بازهایی چون سدیم هیدروکسید و متوکسید سدیم، اگرچه بازدهی واکنش را افزایش می‌دهد، اما مشکلاتی همچون تشکیل صابون، دشواری در جداسازی گلیسرول و آلودگی محیطی را در پی دارد. پژوهشگران به‌منظور رفع این چالش‌ها، کاتالیزورهای جامد نظیر زئولیت‌ها، اکسیدهای فلزی و نانوکاتالیزورها را توسعه داده‌اند که قابلیت استفاده‌ی چندباره و پایداری بالا دارند [۵]. استفاده از کاتالیزورهای ناهمگن سبب می‌شود فرآیند جداسازی محصولات جانبی ساده‌تر شده و هزینه‌های تصفیه نهایی کاهش یابد. همچنین استفاده از کاتالیزورهای آنزیمی (به‌ویژه لیپازها) از جمله روش‌های زیست‌سازگار در حال رشد است که ضمن عملکرد مؤثر در دما و فشار پایین، آلودگی پساب و پسماند را به حداقل می‌رساند. هرچند این روش هنوز به‌دلیل هزینه‌ی بالای آنزیم‌ها و حساسیت آن‌ها به الکل، در مقیاس صنعتی گسترش کامل نیافته است، اما پیش‌بینی می‌شود با توسعه‌ی فناوری تثبیت آنزیم‌ها و زیست‌راکتورهای نوین، در آینده جایگزین فرآیندهای شیمیایی سنتی شود [۵].

از دیگر مسیرهای نوین، به‌کارگیری فناوری‌های الکتروشیمیایی و الکترولیز در تولید بیودیزل است. این فناوری با بهره‌گیری از جریان الکتریکی مستقیم، می‌تواند فرآیند ترانس‌استریفیکاسیون را بدون نیاز به کاتالیزورهای شیمیایی انجام دهد. در این روش، انرژی الکتریکی باعث فعال‌سازی مولکول‌های الکل و تسریع واکنش با تری‌گلیسریدها می‌شود، در نتیجه سرعت تشکیل متیل‌استر افزایش می‌یابد و نیاز به حرارت بالا یا مواد قلیایی حذف می‌شود. مزیت این فناوری در کاهش تولید پسماند، عدم تشکیل صابون و سهولت بازیافت گلیسرول است. پژوهش‌های اخیر نشان داده‌اند که استفاده از سلول‌های الکترولیتی در محیط متانولی یا اتانولی می‌تواند راندمان تبدیل را تا بیش از ۹۵ درصد افزایش دهد، در حالی که دمای واکنش کمتر از روش‌های قلیایی است. علاوه بر آن، این فناوری با منابع انرژی پاک مانند برق خورشیدی یا بادی قابل تلفیق است و از این‌رو می‌تواند در آینده به‌عنوان یکی از ستون‌های تولید بیودیزل پایدار مطرح شود [۵].

در کنار پیشرفت‌های فنی در فرآیند، تحول در منابع اولیه نیز یکی از ارکان اصلی آینده‌ی بیودیزل است. پژوهش‌های جدید تمرکز ویژه‌ای بر روغن‌های غیرخوراکی، پسماندهای صنعتی، روغن‌های سرخ‌کردنی مصرف‌شده و جلبک‌های ریز دارند. استفاده از جلبک‌ها به‌دلیل سرعت رشد بالا، عدم رقابت با منابع غذایی، توانایی جذب دی‌اکسیدکربن و میزان بالای چربی، گزینه‌ای بسیار امیدبخش محسوب می‌شود. از هر هکتار مزرعه‌ی جلبک می‌توان چندین برابر بیشتر از گیاهان زمینی روغن خام استخراج کرد. این مزیت، در کنار توانایی رشد در آب‌های شور و فاضلاب‌های صنعتی، جلبک‌ها را به گزینه‌ای پایدار و اقتصادی برای تولید بیودیزل در آینده تبدیل کرده است [۱۳] [۹].

از منظر فرآیندی نیز فناوری‌های نوینی همچون ترانس استریفیکاسیون فوق بحرانی، استفاده از امواج مایکروویو، فراصوت و کمک حلال‌ها در حال جایگزینی روش‌های سنتی هستند. در روش فوق بحرانی، متانول یا اتانول در شرایط فشار و دمای بسیار بالا (۳۵۰ تا ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد و ۴۵ تا ۶۰ مگاپاسکال) به حالت فوق بحرانی درمی‌آید که در آن حلالیت الکل و روغن یکسان شده و واکنش در محیطی همگن و بسیار سریع انجام می‌گیرد. این روش نه تنها از کاتالیزور بی‌نیاز است بلکه می‌تواند اسیدهای چرب آزاد و تری‌گلیسریدها را به‌طور هم‌زمان به متیل استرها تبدیل کند. هرچند هزینه‌ی اولیه‌ی تجهیزات بالا است، اما بازدهی، خلوص محصول و سرعت واکنش، آن را به یکی از امیدبخش‌ترین فناوری‌های صنعتی آینده بدل کرده است [۹][۱۲]. علاوه بر این، پژوهشگران با بهره‌گیری از امواج مایکروویو و اولتراسونیک، فرآیند اختلاط و نفوذ بین روغن و الکل را تسریع کرده‌اند. این روش‌ها با ایجاد حباب‌های میکروسکوپی و گرمایش موضعی، سبب افزایش سطح تماس واکنش‌دهنده‌ها و کوتاه شدن زمان واکنش از چند ساعت به چند دقیقه می‌شوند. در نتیجه، مصرف الکل و انرژی به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. این فناوری‌ها هنوز در مقیاس نیمه‌صنعتی آزمایش می‌شوند، اما نتایج اولیه نشان داده است که ترکیب امواج مایکروویو با واکنش الکتروشیمیایی، می‌تواند فرآیند تولید بیودیزل را با حداقل مصرف انرژی و بدون تولید پسماندهای خطرناک به انجام رساند [۵]. چشم‌انداز آینده‌ی تولید بیودیزل بر پایه‌ی توسعه‌ی سیستم‌های خودکار، فرآیندهای پیوسته و بهره‌وری انرژی بالا است. شرکت‌هایی مانند Lurgi و Desmet Ballestra در اروپا و شرق آسیا در حال طراحی راکتورهای چندمرحله‌ای هستند که در دما و فشار ملایم کار کرده و قابلیت پردازش انواع روغن‌های خام و پسماند را دارند. چنین فناوری‌هایی ضمن حفظ کیفیت بیودیزل مطابق با استانداردهای جهانی هزینه‌ی تولید را به‌طور چشمگیری کاهش می‌دهند و امکان بومی‌سازی در مقیاس ملی را فراهم می‌کنند [۱۰][۱۱].

در مجموع می‌توان گفت که آینده‌ی تولید بیودیزل در گرو تلفیق سه محور اصلی است: نوآوری فنی، پایداری زیست‌محیطی و اقتصاد فرآیند. روش‌های نوین مبتنی بر الکترولیز، ترانس استریفیکاسیون فوق بحرانی و زیست کاتالیزورها، مسیر حرکت صنعت را از وابستگی به مواد شیمیایی خطرناک به سوی فرآیندهای سبز و کارآمد تغییر داده‌اند. با ادامه‌ی این روند و سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های فناورانه، بیودیزل می‌تواند در آینده نه تنها جایگزینی برای دیزل فسیلی باشد، بلکه به‌عنوان یکی از ارکان اصلی توسعه‌ی پایدار انرژی در جهان شناخته شود [۹][۱۴].

۱۰. نتیجه‌گیری

بیودیزل به عنوان یک سوخت تجدیدپذیر و دوستدار محیط زیست، از طریق روش‌های متعددی تولید می‌شود که هر یک مزایا و محدودیت‌های خاص خود را دارند. بر اساس منابع بررسی‌شده، روش ترانس استریفیکاسیون قلیایی با کاتالیزور همگن در حال حاضر بهترین گزینه برای تولید صنعتی بیودیزل است. این روش به دلیل نرخ تبدیل بالا، امکان استفاده از طیف گسترده‌ای از روغن‌ها و چربی‌ها، تجهیزات نسبتاً ساده و هزینه سرمایه اولیه پایین، به ویژه با بهره‌گیری از تکنولوژی‌های پیشرفته مانند Desmet Ballestra، در صنعت ترجیح داده می‌شود [۹][۱۵].

روش ترانس استریفیکاسیون با متانول فوق بحرانی گزینه‌ای مناسب برای مواد اولیه با اسیدهای چرب آزاد بالا و روغن‌های پسماند است و قابلیت تبدیل مستقیم FFA به استر را بدون تشکیل صابون دارد، اما هزینه بالای تجهیزات و مصرف انرژی زیاد آن، مانع استفاده گسترده صنعتی می‌شود [۹][۱۰].

روش آنزیمی پتانسیل بالایی برای کاهش مشکلات مربوط به صابون‌سازی و استفاده از مواد اولیه با کیفیت پایین دارد، اما هزینه بالای آنزیم‌ها، سرعت پایین‌تر واکنش و نبود تجربه صنعتی گسترده، محدودیت اصلی آن محسوب می‌شود [۹].

روش الکترولیز نیز یک فناوری نوین و امیدبخش است که امکان تولید FAME بدون نیاز به کاتالیزور شیمیایی و کاهش مشکلات جداسازی را فراهم می‌کند، اما هنوز بیشتر در سطح آزمایشگاهی و نیمه‌صنعتی مورد استفاده قرار گرفته و به صورت گسترده در صنعت اجرا نشده است [۵][۹].

با توجه به مزایا و معایب روش‌های مختلف، انتخاب روش مناسب برای تولید بیودیزل باید بر اساس نوع ماده اولیه، مقیاس تولید، هزینه سرمایه و انرژی، و اهداف محیط زیستی و اقتصادی انجام شود. بنابراین، روش ترانس استریفیکاسیون قلیایی با کاتالیزور همگن، با پیش‌تیمار مناسب مواد اولیه و بهره‌گیری از فناوری‌های صنعتی پیشرفته، به عنوان رویکردی اقتصادی، پربازده و عملی برای تولید بیودیزل در مقیاس صنعتی توصیه می‌شود.

۱۱. مراجع

1. D. C. Panadare, V. K. Rathod (2015), "Applications of Waste Cooking Oil Other Than Biodiesel: A Review"
2. Dyneshwar, G. Aniruddha, B. P. and Virendra, K. R., (2013) "Optimization of biodiesel production in a hydrodynamic cavitation reactor using used frying oil"
3. Mehedi Hassan Pranta, Haeng Muk Cho (2025), "A comprehensive review of the evolution of biodiesel production technologies".
4. Ejaz M. Shahid, Younis Jamal (2008), "A review of biodiesel as vehicular fuel".
۵. کامبیز تحویل‌داری، مریم هلمی (۱۳۹۲) تهیه سوخت سبز بیودیزل از روغن سوخته آشپزی به دو روش الکترولیز و رفلاکس در حضور کاتالیست کلینوپتیلولیت.
6. Avhad, M. R, Marchetti, J. M., 2015, "A review on recent advancement in catalytic materials for biodiesel production."
7. A.K. Hossain and P.A. Davies, (2010) "Plant oils as fuels for compression ignition engines: A technical review and life-cycle analysis"
- 8.
۹. ابوالفضل خلخالی، محمدجواد سرانجام (۱۳۹۵)، بهینه‌سازی موتور بیودیزل با هدف کاهش آلاینده‌های محیط زیست.
۱۰. فرید حقیقت شعار، جواد طریقی (۱۳۹۹)، مروری بر روش‌ها، شرایط، مواد اولیه، و تکنولوژی‌های مختلف تولید بیودیزل.
11. Ramin Nabizadeh Sodeh Sadjadi, I.L. García, Zohreh Bahmani, Kamyar Yaghmaeian, Abbas Norouzian Baghani, Bahram Kamarehie Amir Hossein Mahvi, Masud Yunesian, (2025) "Energy and cost analysis of bottom waste cooking oil (B-WCO) based solid alcohol biofuel and supernatant waste cooking oil (S-WCO) based biodiesel".

12. Haseeb Yaqoob, et al (2021), “*Potential of Waste Cooking Oil Biodiesel as Renewable Fuel in Combustion Engines: A Review*”.
13. Demirbas, A. (2005), “*Biodiesel production from vegetable oils via catalytic and non-catalytic supercritical methanol transesterification methods*”.
14. Mengmeng Yue, et al (2024), “*Recent advances of biodiesel production enhanced by external field via heterogeneous catalytic transesterification system*”.
15. Yonas Desta Bizualem, Amare Gashu Nurie (2024), “*A review on recent biodiesel intensification process through cavitation and microwave reactors: Yield, energy, and economic analysis*”.