Archive of SID
نشریه علمی- پژوهشی سوخت و احتراق
سال سیزدهم، شماره اول، بهار ۱۳۹۹

بررسی اثرات زیست‌محیطی تولید بیواتانول از ضایعات سیب‌زمینی

علی متولی[۱*]، میلاد تیموری عمران[۲]، برات قبادیان[۳] و غلامحسن نجفی[۴]

۱- استادیار مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ایران، a.motevali@sanru.ac.ir
۲- دانشجوی کارشناسی‌ارشد مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ایران، miladtomran@yahoo.com
۳- استاد مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، ghobadib@modares.ac.ir
۴- دانشیار مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، g.najafi@modares.ac.ir
* نویسنده مخاطب
(تاریخ دریافت:۹۸/۰۳/۲۹، دریافت آخرین اصلاحات: ۹۸/۰۵/۱۴، پذیرش: ۹۸/۰۶/۱۱)

چکیده: نگرانی از افزایش آلودگی محیط زیست و افزایش گازهای گلخانه‌ای، حاصل از استفاده سوخت‌های فسیلی، محققان را به سمت استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر سوق داده است. در پژوهش حاضر، به بررسی اثرات زیست‌محیطی تولید سوخت بیواتانول از ضایعات سیب‌زمینی از مرحله کشاورزی تا مرحله تولید بیواتانول (خردکردن و له‌کردن و تولید مالت، هیدرولیز آنزیمی، تخمیر و آبگیری) پرداخته شد. بررسی زیست‌محیطی داده‌های به‌دست‌آمده با استفاده از روش ارزیابی چرخه حیات در قالب ۱۵ گروه تاثیر و ۴ شاخص نهایی انجام شد و تابع کارکردی آن تولید یک کیلوگرم بیواتانول درنظر گرفته شد. نتایج به‌دست‌آمده از گروه‌های تاثیر در دو مرحله کشاورزی و تولید بیواتانول نشان داد که مرحله کشاورزی در تمامی گروه‌های تاثیر، به‌جز گروه تاثیر سرطان‌زایی، مقادیر بالاتری نسبت‌به مراحل تولید بیواتانول در کارگاه (تولید مالت، هیدرولیز، تخمیر و آبگیری) دارد. همچنین، نتایج نشان داد بالاترین سهم در ایجاد گروه‌های تاثیر مختلف مربوط‌به مصرف انرژی الکتریسیته، فولاد، ماشین‌های کشاورزی، نیتروژن، فسفات و انتشار آلاینده‌های مستقیم از سطح مزرعه و کارگاه است. مقایسه بین شاخص‌های نهایی مختلف نشان می‌دهد که شاخص سلامتی انسان‌ها به‌ازای تولید یک کیلوگرم سوخت بیواتانول ۹/۹۰ برابر نسبت‌به کیفیت اکوسیستم، ۱/۲۸ برابر نسبت‌به تغییرات اقلیم و ۱/۴۸ برابر نسبت‌به منابع دارای اثرات مخرب زیست‌محیطی است.

کلیدواژگان: اثرات زیست‌محیطی، بیواتانول، ضایعات سیب‌زمینی، ارزیابی چرخه حیات

مقدمه

یکی از مهم‌ترین مسائلی که در سال‌های اخیر کلیه کشورهای جهان با آن سروکار دارند مسئله تامین انرژی است. کاهش ذخایر منابع فسیلی از یک سو و نگرانی از افزایش آلودگی محیط‌زیست و افزایش گازهای گلخانه‌ای حاصل از استفاده سوخت‌های فسیلی از سوی دیگر، محققان را به‌سمت تولید و استفاده از سوخت‌های تجدیدپذیر با منبع زیستی سوق داده است. یکی از مهم‌ترین انواع سوخت‌های زیستی بیواتانول است[۲،۱]. بیواتانول یا اتانول زیستی الکلی است دوکربنی به‌فرمول شیمیایی C_2H_5OH که برخلاف اکثر الکل‌های دیگر، عمدتا از مواد اولیه زیستی با منشا قندی و نشاسته‌ای و یا سلولزی تولید می‌شود. فرایند تولید بیواتانول از محصولات کشاورزی شامل بخش مزرعه‌ای (تولید محصولات نشاسته‌ای یا قندی) و بخش صنعتی (تبدیل محصولات نشاسته‌ای یا قندی به بیواتانول) است. به‌منظور بررسی اثرات زیست‌محیطی تولید سوخت‌های زیستی مانند بیواتانول، لازم است تا تمامی پارامترهای موثر زیست‌محیطی از زمان کاشت محصول کشاورزی مورد نظر تا زمان فرآوری و تبدیل‌شدن آن به یک فرآورده سوختی به‌دقت مورد بررسی قرار گیرد و روش‌هایی توسعه یابد که به درک بهتر و شناسایی دقیق‌تر این پیامدها بپردازد[۲]. در سال‌های اخیر، ارزیابی چرخه زندگی به ابزار مناسبی برای بررسی و تعیین میزان تأثیرات

www.SID.ir

Archive of SID

زیست‌محیطی در تولید محصولات کشاورزی و سوخت‌های زیستی تبدیل شده است، به‌طوری که در بسیاری از کشورها از آن به‌عنوان ابزاری برای تصمیم‌گیری‌های کلان در برنامه‌ریزی‌ها استفاده می‌شود. به‌طور کلی، می‌توان گفت ارزیابی چرخه زندگی روشی برای تعیین تمام تأثیرات محیطی مرتبط با یک محصول، فرایند یا خدمات و تمام آلاینده‌های منتشرشده و مواد زائد رهاشده به طبیعت است[۳-۶].

امروزه، در بخش مزرعه‌ای، به‌منظور تولید بیشتر محصولات کشاورزی در واحد سطح، استفاده از عملیات مکانیزاسیون و ماشین رواج یافته است و این امر سبب شد تا کشاورزی همپای صنعت وارد سامانه تولید انبوه شود. بعد از جنگ جهانی دوم، عملاً استفاده از نهاده‌های کشاورزی کمکی، به‌ویژه کودهای شیمیایی، برای تولید محصولات کشاورزی به‌سرعت توسعه یافت و کمی بعد آفت‌کش‌ها وارد عمل شدند[۷]. در نگاه اول، استفاده از این نهاده‌ها (کودها و سموم شیمیایی) سبب افزایش عملکرد و ارتقاءکیفیت محصولات شده، ولی در عین حال باعث به‌وجودآمدن آثار مخربی، همچون آلوده‌کردن محیط زیست به‌خصوص آب‌های زیرزمینی، تجمع مواد آلاینده نظیر نیترات در اندام‌های مصرفی محصولات کشاورزی و در نتیجه به‌خطرافتادن سلامت و بهداشت انسان، می‌شود[۸]. محدودیت منابع سوخت‌های فسیلی در جهان و مصرف بالای انرژی در زمینه تولید نهاده‌های کشاورزی (انواع کودها و سموم شیمیایی) و همچنین اثرات نامطلوب استفاده نامناسب از این نهاده‌ها بر سلامتی انسان‌ها و محیط زیست، سبب شد تا روند جریان مصرف انرژی و مصرف نهاده‌های کشاورزی به‌دقت مورد بررسی قرار گیرد[۹]. نتایج پژوهش‌ها نشان می‌دهد که کشاورزی یکی از بخش‌های مهم تاثیرگذار بر محیط زیست بوده، به‌طوری که ۲۰٪ از حجم کل گازهای گلخانه‌ای مربوط به این بخش است[۱۱،۱۰]. همچنین، در بخش صنعتی تولید بیواتانول، استفاده از مخمرها (برای انجام واکنش‌ها)، دستگاه‌ها (برای خردکردن محصولات کشاورزی، انجام واکنش‌های هیدرولیز و تخمیر و فرایند آبگیری از بیواتانول تولیدی) و انرژی الکتریسیته (برای راه‌اندازی سامانه‌های مورد نیاز) رایج است که لازم است تا اثرات زیست‌محیطی هر کدام مورد بررسی قرار گیرد[۱۲،۶]. بیواتانول حاصل از فرایند تخمیر دارای مقدار زیادی آب است که در فرایند تقطیر تا ۹۶ درصد خالص می‌شود. به‌علت وجود میزان بالای آب در این محصول و خرابی اجزای مکانیکی و خوردگی موتور، محصول نهایی باید کمتر از ۰/۵ درصد حجمی آب داشته باشد[۱۴،۱۳]. بیواتانول بالای ۹۹ درصد را نمی‌توان از تقطیر ساده به‌دست آورد، زیرا ترکیب اتانول و آب در بالای ۹۶ درصد مخلوط آزئوتروپ تشکیل می‌دهد. دمای نقطه‌جوش آب ۱۰۰ درجه سلسیوس، اتانول ۷۸/۴ درجه سلسیوس و مخلوط آزئوتروپ آب و اتانول ۷۸/۲ درجه سلسیوس است[۱۵]. برای جداسازی آب و اتانول در غلظت بالا از روش‌هایی مثل تراوش تبخیری[۱]، تقطیر استخراجی[۲] و جذب[۳] استفاده می‌شود[۱۶]. روش جذب سطحی در موادی مثل زئولیت‌ها، سیلیکاژل و کربن‌های فعال انجام می‌شود که زئولیت، به‌دلیل قطر حفره کوچک، برای جداسازی اتانول و آب مناسب است[۱۷].

یکی از مهم‌ترین محصولات کشاورزی در کشور ایران سیب‌زمینی است که دارای ضایعات فراوان و محتوی نشاسته بالایی است. نشاسته سیب‌زمینی ترکیبی است با وزن مولکولی زیاد و با فرمول $(C_6H_{11}O_5)n$ که در فرایند تخمیر تبدیل به الکل می‌شود و قابلیت بالقوه در تولید بیواتانول دارد[۱۸-۲۰]. در پژوهشی، به ارزیابی بازده انرژی و اثرات زیست‌محیطی تولید بیواتانول از سیب‌زمینی شیرین، با استفاده از روش ارزیابی چرخه حیات (LCA)[۴]، پرداخته شد[۲۱]. هدف از این پژوهش بررسی تمام مراحل چرخه حیات تولید بیواتانول شامل مراحل کاشت، داشت، برداشت، حمل‌ونقل و فرایند تبدیل سیب‌زمینی شیرین به بیواتانول بود. نتایج نشان داد که نسبت انرژی در تولید بیواتانول از سیب‌زمینی شیرین ۱/۴۸ و انرژی خالص به‌دست‌آمده ۶/۵۵ MJ/L بود. همچنین، تلفات نیتریت از کودهای نیتروژن و فسفات منبع اصلی یوتریفیکاسیون[۵] بود.

1. Pervaporation
2. Extractive Distillation
3. Adsorption
4. Life cycle assessment
5. Eutrophication

www.SID.ir

Archive of SID

در پژوهش دیگری در کشور تایلند، به بررسی ارزیابی چرخه حیات زیست‌محیطی و اثرات اجتماعی تولید بیواتانول از دو محصول کاساوا و نیشکر پرداخته شد. نتایج نشان داد که میزان آلودگی گازهای گلخانه‌ای در حدود CO_2eq/GJ ۲۶-۳۹ برای سوخت بیواتانول بود. همچنین، نتایج نشان داد که اثر پارامتر تغییر کاربری مستقیم زمین در تولید بیواتانول سبب افزایش اثر گازهای گلخانه‌ای به‌میزان ۱۰-۳۷٪ شد[۲۲].

در پژوهشی، به بررسی چرخه حیات تولید بیواتانول از محصول وتیور[1] در کشور هند پرداخته شد. نتایج مقایسه چرخه حیات نشان داد که آلودگی گاز CO_2 و تخریب منابع فسیلی به‌ترتیب به‌میزان ۹۵٪ و ۲۳٪ در حالت استفاده تنها از بیواتانول و به‌میزان ۹۹٪ و ۱۷٪ در حالت استفاده بیواتانول و فورفورال[2] نسبت‌به سوخت فسیلی و فورفورال کاهش یافت[۶]. در پژوهش دیگری، به بررسی ارزیابی چرخه حیات تولید بیواتانول از محصولات مختلف کشاورزی پرداخته شد. نتایج نشان داد که آلودگی گازهای گلخانه‌ای برای تولید هر کیلوگرم اتانول زیستی از ۰/۷ تا ۱/۵ $kg\ CO_2eq$ و از ۱/۳ تا ۲ $kg\ CO_2\ eq$ تا انتهای مرحله زندگی این محصول است. همچنین، میزان آلودگی گازهای گلخانه‌ای برای تولید هر کیلوگرم اتانول به‌دست‌آمده از سوخت فسیلی ۱/۳ $kg\ CO_2\ eq$ و برای انتهای زندگی این محصول ۳/۷ $kg\ CO_2\ eq$ است[۲۳].

در پژوهش دیگری، به بررسی اثرات زیست‌محیطی تولید بیواتانول از کاه گندم در کشور انگلستان (UK) با استفاده از تکنیک ارزیابی چرخه حیات پرداخته شد. در این پژوهش، ۵ روش پیش‌آماده‌سازی مورد بررسی قرار گرفت و مزایا و معایب آن با توجه به اثرات زیست‌محیطی استخراج شد. نتایج نشان داد که ازبین روش‌های به‌کار گرفته شده، استفاده از آنزیم‌ها، برای آماده‌سازی، بهتر از سایر روش‌ها بود. همچنین، بررسی پارامترهای زیست‌محیطی نشان داد که استفاده از روش‌های آماده‌سازی با آب داغ، بخار داغ و اکسیداسیون تر، برای تولید بیواتانول از کاه، دارای اثرات سوء زیست‌محیطی پایین‌تری نسبت‌به تولید سوخت بنزین از نفت خام داشت[۲۱].

پژوهش دیگری نیز، به بررسی اثرات زیست‌محیطی (گرمایش جهانی، تخریب لایه ازون، اکسیداسیون فتوشیمیایی، اسیدی‌شدن، سمی‌شدن، یوتریفیکاسیون، تخلیه منابع آبی و تخلیه منابع فسیلی) در تولید بیواتانول از کاه گندم پرداخت. نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل ارزیابی چرخه حیات در تولید بیواتانول و بنزین نشان داد که میزان گازهای آلاینده و گلخانه‌ای برای تولید بیواتانول با ترکیب E85 به‌میزان ۷۳٪ و برای ترکیب E15 به‌میزان ۱۳٪ کاهش می‌یابد[۲۴]. پژوهش‌های دیگری در ارتباط با سوخت‌های زیستی، با استفاده از تکنیک ارزیابی چرخه حیات، انجام شد که عبارت‌اند از: تولید بیواتانول از نیشکر[۲۵]، ذرت[۲۶]، کود دامی[۲]، تولید بیواتانول از مواد لیگنوسلولزی[۲۷]، بررسی عوامل تاثیرگذار بر انرژی مصرفی و گازهای گلخانه‌ای متصاعدشده در فرآیند تولید بیواتانول از مواد لیگنوسلولزی[۲۸]، بررسی تولید نسل دوم بیواتانول[۲۹]، بررسی چرخه سیستم کشت محصولات مختلف برای تولید انرژی[۳۰]، بررسی تولید بیواتانول در استان چیانگشو چین[۳۱]، تولید بیواتانول از کاساوا در کلمبیا[۳۲]، تولید بیواتانول از ساقه‌های سورگوم شیرین[۳۳]، تولید بیواتانول از ملاس نیشکر در ایران[۳۴]، تولید بیواتانول از تراشه‌های چوبی[۳۵] و بررسی انرژی مصرفی و گازهای گلخانه‌ای تولیدی در تولید بیواتانول در کشور امریکا[۳۶].

برپایه آمارهای موجود، به‌طور متوسط، ۳۰- ۳۵ درصد از محصولات کشاورزی ایران ضایع می‌شود[۳۷] که این مقدار ۶ برابر متوسط جهانی[۳۸] و معادل غذای حدود ۱۵-۲۰ میلیون نفر است که این بیانگر بالابودن ضایعات در کشور ایران است. در کشور ایران، سیب‌زمینی در بین محصولات زراعی پرمصرف، با دارابودن ضایعات۲۰-۲۵ درصدی، یکی از آسیب‌پذیرترین محصولات کشاورزی محسوب می‌شود[۳۹]. با درنظرگرفتن مشکلات ناشی از سوخت‌های فسیلی و مسائل زیست‌محیطی مرتبط با احتراق سوخت بنزین از یک طرف و ضایعات حجم عظیمی از سیب‌زمینی در ایران چه در سطح مزرعه و چه پس از آن، به‌نظر می‌رسد که بتوان بخش عمده‌ای از این ضایعات را به بیواتانول، سوختی جایگزین بنزین، تبدیل کرد که تحقیق

1. vetiver
2. furfural

www.SID.ir

Archive of SID

حاضر گامی در این راستاست. بررسی منابع مختلف نشان داد که بررسی روند انرژی مصرفی و اثرات زیست‌محیطی، به‌منظور تولید سوخت زیستی بیواتانول از محصولات مختلف کشاورزی، نیازمند تحلیلی دقیق در ارتباط با مراحل کاشت، داشت، برداشت، حمل‌ونقل و فرآوری این محصولات است. در پژوهش حاضر، ضایعات سیب‌زمینی به‌عنوان محصول اولیه برای تولید بیواتانول درنظر گرفته شد. بررسی‌ها نشان می‌دهد تاکنون پژوهشی در ارتباط با ارزیابی چرخه حیات تولید بیواتانول از سیب‌زمینی و اثرات زیست‌محیطی آن از مرحله کشاورزی تا تولید بیواتانول با استفاده از هیدرولیز آنزیمی و آبگیری از اتانول با استفاده از زئولیت انجام نشده است. پژوهش حاضر به بررسی ارزیابی چرخه حیات از مرحله کشاورزی تا تولید و خالص‌سازی بیواتانول (کاشت، داشت، برداشت سیب‌زمینی، آماده‌سازی، هیدرولیز و تخمیر و خالص‌سازی) از سیب‌زمینی می‌پردازد.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش، به‌منظور بررسی اثرات زیست‌محیطی تولید سوخت بیواتانول از ضایعات سیب‌زمینی، نیازمند جمع‌آوری داده‌های مربوطبه تولید سیب‌زمینی در مزرعه (مرحله کشاورزی) و فرایند تبدیل سیب‌زمینی به بیواتانول (هیدرولیز، تخمیر و آبگیری) در آزمایشگاه و کارگاه است. بر این اساس، روش‌های مختلفی برای بررسی اثرات زیست‌محیطی در فعالیت‌های کشاورزی وجود دارد که عبارت‌اند از: نقشه‌برداری زیست‌محیطی، ارزیابی چرخه حیات، ارزیابی اثرات زیست‌محیطی، سامانه چندعاملی، رهیافت برنامه‌نویسی خطی چندگانه و شاخص‌های زیست‌محیطی-کشاورزی که روش ارزیابی چرخه حیات مناسب‌ترین رویکرد برای ارزیابی این فعالیت‌هاست[۴۰،۴]. براساس استاندارد ISO-14040، ارزیابی چرخه حیات دارای چهار بخش بیان هدف، تعیین ورودی‌ها و خروجی‌های سامانه، ارزیابی اثرات زیست‌محیطی و تفسیرآن‌هاست.

هدف

اولین گام در روش ارزیابی چرخه حیات بیان هدف و مشخص‌کردن واحد کارکردی و تعیین مرز سیستم است. در این پژوهش، هدف بررسی اثرات زیست‌محیطی گروه‌های تاثیر (شاخص‌ها) مختلف در بخش تولید سیب‌زمینی و فرآوری آن به‌منظور تولید سوخت بیواتانول است. دامنه ارزیابی برای یک محصول کشاورزی باید به‌وضوح کارکرد سیستم مورد نظر را مشخص کند[۳]. سه واحد کارکردی متفاوت، برای ارزیابی محصولات کشاورزی، براساس واحد سطح، واحد پول و واحد جرم ماده تولیدی پیشنهاد شده است[۴۱]. واحد کارکردی در پژوهش حاضر تولید یک کیلوگرم سوخت بیواتانول است و مرزهای سیستم برای تولید یک کیلوگرم بیواتانول در شکل ۱ آورده شد.

بررسی ورودی‌ها و خروجی‌ها در فرایند تولید بیواتانول

بررسی داده‌های ورودی و خروجی در سامانه تولید بیواتانول از ضایعات سیب‌زمینی در دو مرحله انجام شد. مرحله اول شامل بخش‌های مختلف کشاورزی اعماز فرایند آماده‌سازی، کاشت، داشت، برداشت و حمل‌ونقل در فرایند تولید سیب‌زمینی بود. مرحله دوم شامل بخش‌های مختلف تولید بیواتانول در کارگاه شامل فرایند له‌کردن سیب‌زمینی (تولید مالت)، هیدرولیز، تخمیر و در نهایت فرایند آبگیری اتانول به‌منظور تولید بیواتانول با خلوص ۹۹/۶٪ بود. داده‌های مرحله تولید سیب‌زمینی در بخش کشاورزی از استان همدان و رقم تولیدی آگریا تهیه شد. میزان مورد نیاز هر یک از نهاده‌ها به‌ازای تولید یک کیلوگرم بیواتانول در فرایند کشاورزی در جدول ۱ آورده شده است. همچنین، نهاده‌های مربوطبه فرایند تولید بیواتانول در کارگاه، اعماز فرایند شست‌وشو، تمیزکردن، خردکردن و له‌کردن غده‌های سیب‌زمینی و هیدورلیز آنزیمی (اکوستون، نوعی آنزیم آلفاآمیلاز) و تخمیر (با استفاده از مخمر ساکارومایسس)، در جدول ۱ آورده شده است. بیواتانول تولیدی در این مرحله دارای خلوص ۹۶٪ بوده و برای استفاده در موتورهای احتراقی باید به خلوص ۹۹/۶٪ برسد. فرایند آبگیری از بیواتانول ۹۶٪ با استفاده از ستون زئولیت انجام شد. ذکر این نکته لازم است که داده‌های مربوطبه بخش کشاورزی با استفاده از پرسش‌نامه و مصاحبه با کشاورزان و داده‌های مربوطبه بخش‌های مختلف تولید بیواتانول از کارشناسان و مهندسین در بخش تولید این سوخت جمع‌آوری شد.

www.SID.ir

Archive of SID

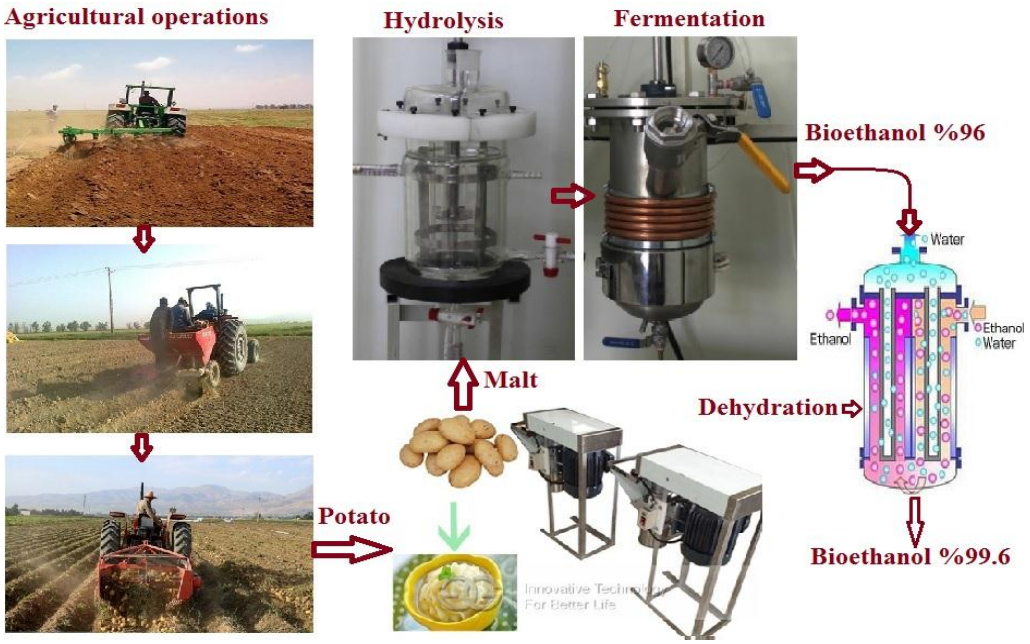

Figure 1- Boundaries of bioethanol production cycle from planting to bioethanol production

شکل ۱- مرزهای چرخه تولید بیواتانول از مرحله کاشت تا تولید بیواتانول

جدول ۱- نهاده‌های ورودی در فرایند تولید بیواتانول در مراحل مختلف

Table 1- Inputs in the bioethanol production process at different stages

Input	Unit	Agricultural operation	Bioethanol production
Diesel	L	0.0372	0
Nitrogen (N)	kg	0.0553	0
Phosphorus (P2O5)	kg	0.0769	0
Potassium (K2O)	kg	0.0531	0
Herbicide	kg	0.00041	0
Fungicide	kg	0.00038	0
Insecticide	kg	0.00035	0
Water	m3/ha	0.8464	0.0121
Electricity	kWh	0.1525	0.8659
Human Labor	h	0.1314	0.2499
Electromotor	kg	0	0.00057
Steel	kg	0.0711	0.0342

آلاینده‌های مستقیم از سطح مزرعه و کارگاه تولید بیواتانول (از مرحله خردکردن تا آبگیری) در جدول ۲ آورده شده است. آلاینده‌های مستقیم از سطح مزرعه مربوطبه احتراق سوخت دیزل در موتور تراکتور، به‌منظور آماده‌سازی زمین برای عملیات کاشت و همچنین عملیات‌های داشت و برداشت، بود. همچنین، آلاینده‌های دیگر از سطح مزرعه مربوطبه کودها و سموم مختلف شیمیایی و نیروی کارگری در سطح مزرعه بود که مقادیر هر یک از آلاینده‌ها به‌ازای تولید یک کیلوگرم بیواتانول در جدول ۲ آورده شد. ضرایب مربوطبه آلاینده‌های دیزل از پایگاه داده‌ای Ecoinvent 3.1 مربوطبه نرم‌افزار سیماپرو استخراج شد. همچنین، میزان انتشارات آلاینده‌ها در سطح مزرعه مانند فسفات با استفاده از روش مرجع [۱۰]، انتشارات آلاینده‌های نیتروژن از روش IPCC, 2006، انتشارات سموم از روش ون‌دربرگ و همکاران[1] [۴۳] و انتشارات آلاینده‌های دی‌اکسیدکربن از نیروی انسانی به‌روش موسوی اول و همکاران[۴۴] محاسبه شد. همچنین، در بخش تولید بیواتانول، به‌دلایل مشکلاتی ازجمله غیرانتخابی‌بودن واکنش‌های هیدرولیز، بهره پایین، تشکیل محصولات جانبی در حین عمل هیدرولیز، نیاز به

1. Van den Berg et al.

www.SID.ir

Archive of SID

شرایط دمای بالا، نیاز به خنثی‌سازی پس از فرایند و مشکلات خوردگی اسید در هیدرولیز اسیدی، از روش هیدرولیز آنزیمی [۴۵] استفاده شد. همچنین، در فرایند هیدرولیز، تخمیر و آبگیری، آلاینده‌های مستقیم مربوطبه نیروی متخصص در انجام آزمایش‌ها بود. داده‌های مربوطبه آبگیری اتانول با استفاده از روش ستون زئولیت جمع‌آوری شد.

جدول ۲- خروجی‌های آلاینده‌های مستقیم در فرایند تولید بیواتانول از سطح مزرعه و کارگاه

Table 2- Direct outputs emission in the bioethanol production process from the field and manufactory

Emissions	Coefficient	Amount Emissions (kg)
Direct emission to air- diesel combustion		
Carbon dioxide (CO_2)	74.5 (g/MJ)	0.155957475
Sulfur dioxide (SO_2)	2.41E-02 (g/MJ)	5.04507E-05
Methane (CH_4)	3.08E-03 (g/MJ)	6.44764E-06
Benzene (C_6H_6)	1.74E-04 (g/MJ)	3.6425E-07
Cadmium (Cd)	2.39E-07 (g/MJ)	5.0032E-10
Chromium (Cr)	1.19E-06 (g/MJ)	2.49113E-09
Copper (Cu)	4.06E-05 (g/MJ)	8.49916E-08
Nitrogen monoxide (N_2O)	2.86E-03 (g/MJ)	5.98709E-06
Nickel (Ni)	1.67E-06 (g/MJ)	3.49596E-09
Zink (Zn)	2.39E-05 (g/MJ)	5.0032E-08
Benzo (a) pyrene	7.16E-07 (g/MJ)	1.49887E-09
Ammonia (NH_3)	4.77E-04 (g/MJ)	9.98547E-07
Selenium (Se)	2.39E-07 (g/MJ)	5.0032E-10
PAH (polycyclic hydrocarbons)	7.85E-05 (g/MJ)	1.64331E-07
Hydro carbons (HC, as NMVOC)	6.80E-02 (g/MJ)	0.00014235
Nitrogen oxides (NO_x)	1.06 (g/MJ)	0.002218992
Carbon monoxide (CO)	1.50E-01 (g/MJ)	0.000314008
Particulates (b2.5 μm)	1.07E-01 (g/MJ)	0.000223993
Direct emission to air- chemical Poisons		
Herbicide	0.3	0.000122753
Fungicide	0.3	0.000115436
Insecticide	0.3	0.000104947
Direct emission by human labor- agriculture operation		
Carbon dioxide (CO_2)	0.7	0.092
Direct emission by human labor- bioethanol production		
Carbon dioxide (CO_2)	0.7	0.175
Direct emission to water		
NO_3^-	-	0.033634808
Phosphate	-	0.175033669
Direct emission to Soil		
Herbicide	0.3	0.000286423
Fungicide	0.3	0.000269351
Pesticides	0.3	0.000244875

ارزیابی اثرات زیست‌محیطی

ارزیابی اثرات به بررسی بزرگی و پیامدهای بالقوه زیست‌محیطی تولید یک محصول می‌پردازد. این بخش شامل طبقه‌بندی، نرمال‌سازی و وزن‌دهی است که مراحل نرمال‌سازی و وزن‌دهی در بررسی فرایند ارزیابی چرخه حیات اختیاری است. انجام نرمال‌سازی سبب می‌شود تا تمامی شاخص‌های طبقات اثر دارای واحدی یکسان شوند و امکان مقایسه آن‌ها تسهیل شود. در مرحله وزن‌دهی، اهمیت نسبی بار محیطزیستی شناسایی‌شده در مراحل طبقه‌بندی و نرمال‌سازی از طریق وزن‌دهی آن‌ها مشخص و قابل مقایسه می‌شوند[۴۶]. به‌منظور بررسی اثرات زیست‌محیطی تولید بیواتانول از ضایعات سیب‌زمینی، داده‌های جمع‌آوری‌شده با استفاده از روش Impact 2002 تحلیل شد. این روش تحلیل دارای ۱۵ شاخص میانی و ۴ شاخص نهایی زیست‌محیطی است که یکی از روش‌های بسیار مناسب برای بررسی تاثیرات نهایی است. ۴ شاخص نهایی خروجی در روش تحلیل Impact 2002 شامل سلامتی انسان‌ها، کیفیت اکوسیستم، تغییرات اقلیمی و منابع است. گروه‌های تاثیر میانی ایجادکننده شاخص سلامتی انسان‌ها شامل گروه‌های طبقاتی سرطان‌زا و غیرسرطان‌زابودن، تنفس مواد معدنی و آلی، تابش

www.SID.ir

Archive of SID

یونیزه و تخریب لایه ازون است. همچنین، گروه‌های تاثیر میانی ایجادکننده شاخص تغییرات اقلیم گروه تاثیر گرمایش جهانی بوده و گروه‌های تاثیر میانی ایجادکننده شاخص کیفیت اکوسیستم شامل تغییر کاربری اراضی، سمیت محیط‌های خاکی و آبی، سرشارسازی آبی، اسیدی-نیتراتشدن خاک و گروه‌های تاثیر میانی ایجادکننده منابع شامل گروه‌های طبقاتی انرژی‌های غیرتجدیدشونده و استخراج مواد معدنی است.

تفسیر نتایج

مرحله تفسیر نتایج یکی از مراحل بسیار مهم در بررسی اثرات زیست‌محیطی تولید محصول نهایی است. در این مرحله نقش هریک از نهاده‌های ورودی در ایجاد نقاط داغ زیست‌محیطی مورد تفسیر و بررسی قرار گرفته و راه‌کارها و پیشنهادهای کاربردی به‌منظور اصلاح نقاط داغ و کاهش اثرات سوء زیست‌محیطی ارائه می‌شود.

نتایج و بحث

اثرات زیست‌محیطی تولید بیواتانول از سیب‌زمینی در قالب ۱۵ شاخص زیست‌محیطی میانی (گروه طبقه‌بندی) در دو مرحله شامل ۱- مرحله کشاورزی (تولید سیب‌زمینی) و ۲- مرحله آزمایشگاهی تولید بیواتانول (آماده‌سازی نمونه‌ها، هیدرولیز، تخمیر و آبگیری) مورد بررسی قرار گرفت. بررسی و مقایسه گروه‌های تاثیر در دو مرحله مختلف (جدول ۳) نشان داد که مرحله کشاورزی در تمامی گروه‌های تاثیر، به‌جز گروه تاثیر سرطان‌زایی، مقادیر بالاتری نسبت‌به مراحل تولید بیواتانول در کارگاه (تولید مالت، هیدرولیز، تخمیر و آبگیری) دارد. یکی از مهم‌ترین دلایل بالابودن شاخص سرطان‌زابودن در مراحل مختلف تولید بیواتانول در کارگاه مصرف بالای الکتریسیته در فرایندهای مختلف خرد و له‌کردن غده‌های سیب‌زمینی، افزایش دمای مالت (افزایش دما با استفاده از هیترهای برقی بود)، به‌منظور انجام هیدرولیز مالت و تولید دکسترین و به‌هم‌زدن آن، تخمیر و به‌هم‌زدن مخلوط (به‌هم‌زدن مخلوط هیدرولیزشده با استفاده از پره‌هایی که توسط الکتروموتور به‌چرخش در می‌آمدند) و در نهایت ایجاد خلا در ستون زئولیت با استفاده از پمپ خلا، به‌منظور آبگیری اتانول، است. تمامی مراحل یادشده در آزمایش‌های صورت‌گرفته با استفاده از انرژی الکتریسیته انجام شد و این انرژی سهم بالایی در انجام این فرایندها داشت، در حالی که در بخش کشاورزی فقط پمپاژ آب با استفاده از انرژی الکتریسیته انجام شد. باید توجه داشت که تولید الکتریسیته در نیروگاه‌ها، برمبنای سوزاندن گاز طبیعی، گازوییل، مازوت و غیره اتفاق می‌افتد که مصرف این سوخت‌ها سبب تولید گازهای آلاینده مانند ذرات معلق در هوا (P.M.<10, P.M.<2.5)، NO_X، SO_X و غیره شده و این عامل سبب می‌شود تا پتانسیل گروه تاثیر سرطان‌زایی افزایش یابد.

بررسی گروه‌های تاثیر دیگر نشان از بالابودن سهم کشاورزی دارد که از دلایل مهم این نتایج آلاینده‌های مستقیم و غیرمستقیم ناشی از مصرف سوخت دیزل، کودها و سموم مختلف شیمیایی در بخش کشاورزی است (جدول ۲). مصرف بالای سوخت دیزل در بخش تولید سیب‌زمینی، که دلیل آن فرسوده‌بودن تجهیزات و ماشین‌های آماده‌سازی، کاشت، داشت و برداشت است، می‌تواند آلاینده‌های زیادی در سطح مزرعه ایجاد کند. همچنین، مصرف بالای کودهای فسفات و نیتروژن در طول فرایند رشد سبب تولید گازهای N_2O، NO_x، CO_2، NH_3 به هوا و NO_3^- و فسفات به آب و فلزات سنگین مانند Cd، Cu، Zn و غیره در خاک می‌شود. این آلاینده‌ها پتانسیل بالایی در ایجاد انواع سمیت‌های مختلف در خاک، آب، اسیدی‌شدن هوا، محیط‌های آبی، گرمایش جهانی، تخریب لایه ازون، تنفس مواد آلی و غیرآلی دارند. همچنین، مصرف نهاده‌های کشاورزی، مانند انواع کودهای شیمیایی فسفات و پتاس، سبب تخلیه منابع غیرآلی شده و مقادیر این گروه تاثیر در فرایند کشاورزی نسبت‌به فرایند تولید بیواتانول افزایش می‌یابد. ونگ و همکاران با بررسی گروه‌های تاثیر در تولید بیواتانول از سیب‌زمینی شیرین نشان دادند که بالاترین سهم تخریب مربوط‌به بخش تولید بیواتانول در کارگاه است و بعد از آن بخش کشاورزی دارای بالاترین سهم بود[۴۸]. یکی از دلایل پایین‌بودن سهم تبدیل مواد اولیه (سیب‌زمینی) به بیواتانول در پژوهش حاضر این بود که فرایند هیدرولیز

www.SID.ir

Archive of SID

به‌صورت آنزیمی و عملیات آبگیری با استفاده از زئولیت انجام پذیرفت، در حالی که در پژوهش ونگ و همکاران فرایند هیدرولیز به‌صورت اسیدی و عملیات آبگیری به‌روش حرارتی صورت پذیرفت که حجم آلاینده‌های تولیدی افزایش و به‌دنبال آن میزان تخریب گروه‌های تاثیر افزایش یافت[۴۸].

جدول ۳- بررسی گروه‌های تاثیر در مراحل مختلف کشاورزی و تولید بیواتانول

Table 3- Investigation of impact groups at different stages of agriculture and bioethanol

Impact category	Unit	Agriculture	Ethanol production
Carcinogens	kg C2H3Cl eq	0.048548	0.073713
Non-carcinogens	kg C2H3Cl eq	0.028942	0.010258
Respiratory inorganics	kg PM2.5 eq	0.001711	0.00059
Ionizing radiation	Bq C-14 eq	10.57899	2.544488
Ozone layer depletion	kg CFC-11 eq	11.5E-08	6.93E-08
Respiratory organics	kg C2H4 eq	0.000569	0.000256
Aquatic ecotoxicity	kg TEG water	123.6217	52.43566
Terrestrial ecotoxicity	kg TEG soil	26.23884	10.80771
Terrestrial acid/nutri	kg SO2 eq	0.039487	0.011608
Land occupation	m2org.arable	0.04252	0.002019
Aquatic acidification	kg SO2 eq	0.009236	0.004459
Aquatic eutrophication	kg PO4 P-lim	0.000657	8.75E-05
Global warming	kg CO2 eq	1.402298	0.847093
Non-renewable energy	MJ primary	15.64311	13.83855
Mineral extraction	MJ surplus	0.316474	0.084194

بررسی تاثیر نهاده‌های ورودی بر ۱۵ گروه تاثیر مختلف، به‌منظور تولید یک کیلوگرم بیواتانول، در شکل ۲ آورده شده است. بررسی نتایج نشان داد که بالاترین سهم در ایجاد گروه‌های تاثیر مختلف مربوطبه مصرف انرژی الکتریسیته، فولاد، ماشین‌های کشاورزی، نیتروژن، فسفات و انتشار آلاینده‌های مستقیم از سطح مزرعه و کارگاه است. گروه تاثیر سرطانزابودن ناشی از انتشار فلزات سنگین به هوا و آب است که نهاده‌های ورودی، مانند الکتریسیته، کودهای نیتروژن و فسفات، می‌توانند بالاترین سهم را در ایجاد این شاخص داشته باشند (شکل ۳). کودهای شیمیایی با انتشار فلزات سنگین مانند Cd، Cu، Zn، Pb، Ni، Cr، Hg، NO_3^- و فسفات به خاک و آب و انتشار گازهای آلاینده مانند N_2O، NO_x، NH_3، CH_4، CO_2 و غیره به هوا سبب افزایش این گروه تاثیر می‌شوند. بررسی سمیت محیط‌های آبی و خاکی نیز نشان می‌دهد که سهم کودهای نیتروژنه و فسفات، به‌دلیل انتشار فلزات سنگین از طریق مصرف این کودها، افزایش یافته و سهم این نهاده‌ها در ایجاد این گروه‌های تاثیر افزایش می‌یابد. بررسی گروه تاثیر یوتریفیکاسیون نشان داد سهم کود فسفات و نیتروژنه در ایجاد این گروه بالاست که دلیل آن افزایش ناخواسته در تولید زیست‌توده از طریق ورود عناصر غذایی ازجمله نیترات و فسفات به اکوسیستم‌های زمینی و آبی است. بررسی جدول ۱ نشان داد که به‌ازای تولید یک کیلوگرم بیواتانول میزان مصرف کود فسفات نسبت‌به سایر کودها بالاتر بوده و به‌دنبال آن انتشار عنصر فسفر بالاست و سهم این کود شیمیایی در ایجاد این گروه تاثیر افزایش می‌یابد. بررسی گروه تاثیر گرمایش جهانی نیز نشان داد که آلاینده‌های مستقیم از سطح مزرعه، نیتروژن و الکتریسیته بالاترین سهم در ایجاد این گروه تاثیر را دارند. یکی از مهمترین دلایل سهم بالای این نهاده‌ها در ایجاد گروه تاثیر گرمایش جهانی انتشار آلاینده‌های CO_2، CH_4 و N_2O در سطح مزرعه در اثر احتراق سوخت و نیروی کارگری (تنفس و تولید دی‌اکسیدکربن) است که جز آلاینده‌های مستقیم از سطح مزرعه و تاثیرگذار بر گرمایش جهانی است. همچنین، آلاینده‌های غیرمستقیم در اثر تولید کود نیتروژن که دارای مصرف انرژی بالا بوده و همچنین آلاینده‌های غیرمستقیم در اثر احتراق سوخت در نیروگاه‌ها به‌منظور تولید الکتریسیته سهم بالایی را در ایجاد این گروه تاثیر دارند. نتایج به‌دست‌آمده از بررسی اثرات زیست‌محیطی تولید بیواتانول از نیشکر در ایران نشان داد که کود فسفات، نیتروژن و انرژی الکتریسیته، به‌منظور پمپاژ آب برای آبیاری، بالاترین سهم در ایجاد گروه‌های تاثیر را شامل می‌شدند[۲۵]، در حالی که نتایج پژوهش دیگری در تولید بیواتانول نشان می‌دهد که مصرف کودهای شیمیایی بالاترین سهم در ایجاد گروه‌های تاثیر را شامل می‌شوند[۲۶].

www.SID.ir

Archive of SID

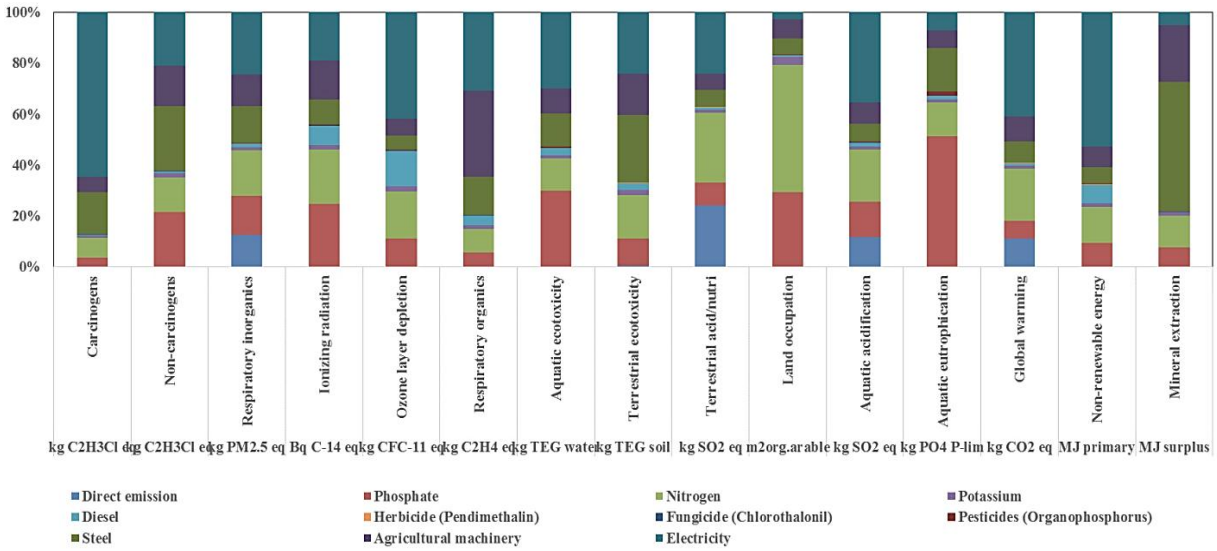

Figure 2- The contribution of inputs to the bioethanol production cycle from potatoes to creating different impact groups

شکل ۲- سهم هر یک از نهاده‌های ورودی در چرخه تولید بیواتانول از سیب‌زمینی در ایجاد گروه‌های تاثیر مختلف

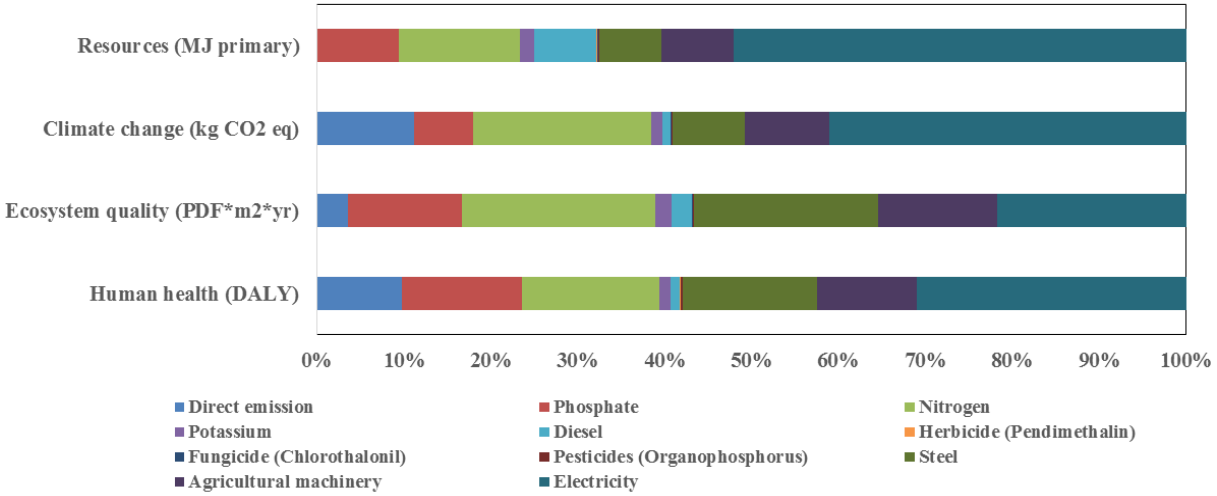

Figure 3- The contribution of each input inputs to the bioethanol production cycle from potatoes to creating endpoint environmental indicators

شکل ۳- سهم هر یک از نهاده‌های ورودی در چرخه تولید بیواتانول از سیب‌زمینی در ایجاد شاخص‌های نهایی زیست‌محیطی

شاخص نهایی منابع نشانگر انرژی لازم، به‌منظور ایجاد منابع جدید در آینده، در مصرف منابع غیرتجدیدپذیر است. شکل ۳ سهم هر یک از نهاده‌های ورودی را در ایجاد شاخص‌های نهایی زیست‌محیطی تولید یک کیلوگرم بیواتانول نشان می‌دهد. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد، الکتریسیته، نیتروژن، فسفات، ماشین‌های کشاورزی و استیل مورد استفاده برای ساخت تجهیزات مختلف تولید بیواتانول (دستگاه خرد و له‌کردن، هیدرولیز، مخمر و آبگیری) دارای سهم بالایی در ایجاد شاخص‌های نهایی زیست‌محیطی‌اند. در ایجاد شاخص نهایی منابع دو گروه تاثیر انرژی‌های غیرتجدیدشونده و استخراج مواد معدنی تاثیرگذار است. بررسی این شاخص نهایی نشان می‌دهد که انرژی الکتریسیته و سوخت دیزل جزء انرژی‌های غیرتجدیدشونده بوده و با مصرف آن‌ها سهم این گروه تاثیر (شاخص میانی زیست‌محیطی) در ایجاد شاخص نهایی منابع افزایش می‌یابد.

www.SID.ir

Archive of SID

همچنین، مصرف فسفات، پتاس، نیتروژن، فولاد و ماشین‌های کشاورزی جزء استخراج مواد معدنی قرار گرفته و با افزایش میزان مصرف در این نهاده‌ها به‌ازای تولید یک کیلوگرم بیواتانول سهم این گروه تاثیر در ایجاد شاخص نهایی افزایش خواهد یافت. یکی از راه‌کارهای مهم در تعدیل نقاط داغ در ایجاد شاخص نهایی منابع در فرایند تولید بیواتانول استفاده از روش‌های نوین در تولید بیواتانول است. یکی از این روش‌ها می‌تواند کاهش زمان هیدرولیز و تخمیر بوده و یا استفاده از آنزیم‌هایی که در دمای پایین‌تری فرایند هیدرولیز را انجام می‌دهند. این دو راهبرد می‌توانند مصرف انرژی را در طول فرایند تبدیل سیب‌زمینی به بیواتانول کاهش داده و اثرات سوء زیست‌محیطی را تعدیل کند. همچنین، در بخش کشاورزی، به‌منظور کاهش کودهای شیمیایی، می‌توان با استفاده از آزمایش‌های خاک و یا استفاده از فناوری‌های کشاورزی دقیق میزان مصرف این نهاده شیمیایی را کاهش داد و به‌دنبال آن اثرات سوء زیست‌محیطی را تعدیل کرد.

شاخص نهایی تغییرات اقلیم متاثر از گروه پتانسیل گرمایش جهانی بوده و شاخص گرمایش جهانی عمدتا تحت تاثیر سه گاز آلاینده مهم CO_2، CH_4 و N_2O است که این گازها در فرایند تولید بیواتانول می‌تواند از مصرف انرژی الکتریسیته، نیتروژن و انتشارات آلاینده سطح مزرعه تولید شود. بررسی نتایج در تولید بیواتانول از کاساوا[۴۷] نشان داد که در بخش مزرعه‌ای کودهای نیتروژون و فسفات بالاترین سهم در ایجاد گازهای گلخانه‌ای و به‌دنبال آن تغییرات اقلیم را دارند.

شاخص سلامتی انسان‌ها مبین این امر است که استفاده از نهاده‌های مختلف ورودی با ایجاد آلاینده‌های مختلف در فرایند تولید بیواتانول به چه میزان بر سلامتی انسان‌ها به‌طور روزانه تاثیرگذار است. شاخص نهایی سلامتی انسان‌ها ناشی از گروه‌های طبقاتی سرطان‌زا و غیرسرطان‌زابودن، تنفس مواد معدنی و آلی، تابش یونیزه و تخریب لایه ازون است که این گروه‌های طبقاتی ناشی از عناصر سنگین و انتشار آلاینده‌ها به آب، هوا و خاک است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که الکتریسیته با سهم ۳۱/۰۳ درصد، نیتروژن با سهم ۱۵/۸۷ درصد و فسفات با سهم ۱۳/۷۹ درصد بالاترین سهم در ایجاد شاخص نهایی سلامتی انسان‌ها را دارد. تخریب لایه ازون در اثر تولید گازهای CFC[1]، در اثر مصرف انواع سموم و کودهای شیمیایی، سبب ایجاد آسیب‌های مختلفی به سلامتی انسان‌ها (مثل سرطان پوست) و جانداران (مانند خسارت‌های مولکولی به مواد) و صدمه به گیاهان و حیوانات می‌شود که به‌علت افزایش عبور اشعه ماورا بنفش رخ می‌دهد. تنفس مواد معدنی و مواد آلی نیز در اثر تنفس ذرات معلق در هوا می‌تواند سبب آسیب به سلامتی شده و منشا اصلی آن می‌تواند آلاینده‌های ناشی از نیروگاه‌ها، احتراق سوخت در موتورها و یا تجزیه کودهای شیمیایی از سطح مزارع باشد.

همچنین، گروه‌های تاثیر میانی ایجادکننده شاخص کیفیت اکوسیستم شامل تغییر کاربری اراضی، سمیت محیط‌های خاکی و آبی، سرشارسازی آبی، اسیدی-نیترات‌شدن خاک است. همان‌طور که از شکل ۳ پیداست، نیتروژن با سهم ۲۲/۲۷ درصد، الکتریسیته با سهم ۲۱/۷۷ درصد، استیل با سهم ۲۱/۱۹ درصد، ماشین‌های کشاورزی با سهم ۱۳/۶۹ درصد و فسفات با سهم ۱۳/۱۵ درصد بالاترین سهم در ایجاد شاخص کیفیت اکوسیستم را دارند. بررسی‌ها نشان می‌دهد سمیت‌های محیط‌های آبی و خاکی با انتشار فلزات سنگین از کودهای شیمیایی به‌طور مستقیم در ارتباط بوده و همچنین تولید فولاد، به‌منظور ساخت تجهیزات تولید بیواتانول و ماشین‌های کشاورزی به‌منظور انجام امور مختلف کشاورزی، سبب ایجاد آلاینده‌های زیادی در هوا، آب و خاک شده و درنهایت توسعه و گسترش اکوسیستم را دچار اختلال کرده و زندگی رستنی‌ها، درختان و گیاهان را با مشکل مواجه می‌سازد. بررسی نتایج در تولید بیواتانول نشان داد که فرایند آبگیری از بیواتانول بالاترین سهم در ایجاد اثرات سوء زیست‌محیطی را به‌همراه خواهد داشت[۲].

بررسی شاخص‌های نهایی وزن‌دهی‌شده زیست‌محیطی در فرایند تولید بیواتانول، به‌منظور مقایسه میزان تخریب هر یک از شاخص‌ها، در شکل ۴ نشان می‌دهد که بالاترین و پایین‌ترین میزان تخریب به‌میزان ۲۹۱/۵۵ و ۲۹/۴۶ µP به‌ترتیب مربوط‌به شاخص‌های آسیب به سلامتی انسان‌ها و کیفیت اکوسیستم است. یکی از دلایل پایین‌بودن میزان آسیب به کیفیت اکوسیستم

1. Chlorofluorocarbons

www.SID.ir

Archive of SID

نقش گروه‌های تاثیر در ایجاد این شاخص است. از آنجا که بالاترین سهم در ایجاد گروه‌های تاثیر مختلف مصرف انرژی الکتریسیته در آن‌ها بود و از آنجا که گروه‌های تاثیرگذار در ایجاد شاخص آسیب به کیفیت اکوسیستم کمترین تاثیر را از انرژی الکتریسته می‌پذیرند، مقادیر نهایی وزن‌دهی‌شده مربوطبه این شاخص نسبت‌به سایر شاخص‌ها پایین بود. در عین حال، از آنجا که گروه‌های تاثیرگذار بر شاخص سلامتی انسان‌ها به‌شدت تحت تاثیر آلاینده‌های معلق در هوا بوده و نیروگاه‌های تولید برق بزرگ‌ترین بخش آلاینده در تولید یک کیلوگرم بیواتانول را به‌خود اختصاص داده‌اند، می‌توان گفت که شاخص نهایی سلامتی انسان‌ها دارای مقادیر بالاتری است. مقایسه بین شاخص‌های مختلف نشان می‌دهد که شاخص سلامتی انسان‌ها به‌ازای تولید یک کیلوگرم سوخت بیواتانول ۹/۹۰ برابر نسبت‌به کیفیت اکوسیستم، ۱/۲۸ برابر نسبت‌به تغییرات اقلیم و ۱/۴۸ برابر نسبت‌به منابع دارای اثرات مخرب زیست‌محیطی است. به‌نظر می‌رسد یکی از دلایل مهم در ایجاد نقاط داغ زیست‌محیطی در تولید بیواتانول بخش تبدیل غده‌های سیب‌زمینی به بیواتانول بوده و باید بر روی روش‌های جدید و مدرن‌تر تولید این زیست‌سوخت پژوهش‌های بیشتری صورت پذیرد. در یک نگاه کلی‌تر باید درنظر داشت که در این پژوهش فرض شده است که تمامی آلاینده‌ها در بخش تولید بیواتانول به محیط (هوا، آب و خاک) منتقل شده، در حالی که در واقعیت این طور نیست و بخشی از گازهای تولیدشده در هوا جذب گیاه شده و گیاه سیب‌زمینی با فتوسنتز این گازها تولید کربوهیدرات کرده و یا در بخش مواد انتشاریافته به خاک نیز بخشی توسط گیاه جذب می‌شود. از این رو و به‌دلیل عدم وجود اطلاعات کافی از میزان جذب این آلاینده‌ها توسط گیاه، پژوهش حاضر به‌صورت سیکل باز درنظر گرفته شد. به‌عنوان مثال، کل میزان CO_2 تولیدی در فرایند تولید یک کیلوگرم بیواتانول ۰/۴۲۳ بوده، اما تولید یک کیلوگرم بنزین با خلوص PPM ۱۰۰ سولفور در حدود ۰/۵۹۳ کیلوگرم تولید CO_2 به‌همراه خواهد داشت.

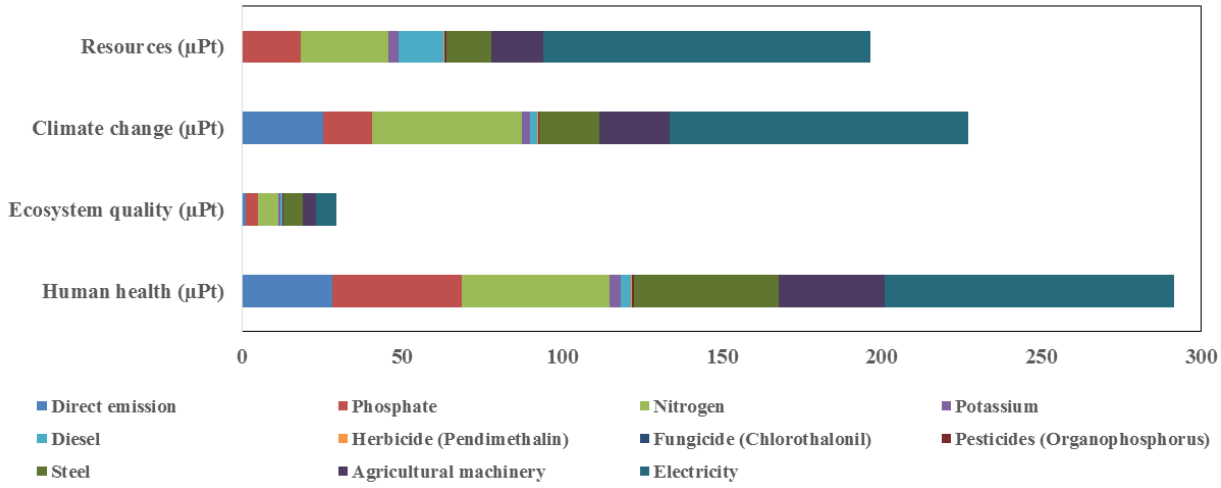

Figure 4- Comparison of the weighted endpoint environmental indicators in the production of one kg bioethanol from potatoes

شکل ۴- مقایسه شاخص‌های نهایی وزن‌دهی‌شده زیست‌محیطی در تولید یک کیلوگرم بیواتانول از سیب زمینی

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر به بررسی اثرات زیست‌محیطی چرخه تولید یک کیلوگرم بیواتانول از ضایعات سیب‌زمینی از مزرعه تا کارگاه پرداخته است و شاخص‌های زیست‌محیطی در قالب ۱۵ گروه تاثیر میانی و ۴ شاخص نهایی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که بیشترین آلاینده در بخش مزرعه‌ای مربوطبه کودهای شیمیایی فسفات و نیتروژن بوده، در حالی که در بخش تبدیل و تولید بیواتانول در کارگاه بیشترین سهم آلاینده‌ها مربوطبه استفاده از انرژی الکتریکی، به‌منظور تامین انرژی حرارتی،

www.SID.ir

Archive of SID

به‌هم‌زنی موثر و آبگیری، بود. همچنین، بالاترین سهم در ایجاد شاخص‌های نهایی زیست‌محیطی اعم‌از آسیب به سلامتی انسان‌ها، کیفیت اکوسیستم، تغییرات اقلیم و منابع به‌ترتیب مربوط‌به الکتریسیته، نیتروژن، فسفات، ماشین‌های کشاورزی و استیل (فولاد) بود. نتایج به‌دست‌آمده از شاخص‌های نهایی وزن‌دهی‌شده نشان داد که شاخص آسیب به سلامتی انسان‌ها نسبت‌به سه شاخص دیگر، یعنی کیفیت اکوسیستم، تغییرات اقلیم و منابع، دارای بالاترین میزان است.

منابع

1. A. G. Bayrakci Ozdingis and G. Kocar, "Current and future aspects of bioethanol production and utilization in Turkey," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 2018, pp. 2196–2203.
2. A. Azevedo, F. Fornasier, M. Silva Szarblewski, R .C. Souza Schneider, M. Hoeltz and D. Souza, "Life cycle assessment of bioethanol production from cattle manure," *Journal of Cleaner Production*, 162, 2017, pp. 1021–1030.
3. G. Rebitzer, T. Ekvall, R. Frischknecht, D. Hunkeler, G. Norris, T. Rydberg and D. W. Pennington, "Life cycle assessment: Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications," *Environment International*, 30, 2004, pp. 701–720.
4. F. Brentrup, J. Küsters, J. Lammel, P. Barraclough and H. Kuhlmann, "Environmental impact assessment of agricultural production systems using the life cycle assessment (LCA) methodology II. The application to N fertilizer use in winter wheat production systems," *European Journal of Agronomy*, 20, 2004, pp. 265–279.
5. M. Cellura, S. Longo and M. Mistretta, "Life Cycle Assessment (LCA) of protected crops: an Italian case study," *Journal of Cleaner Production*, 28, 2012, pp. 56–62.
6. J. Kenthorai Raman and E. Gnansounou, "LCA of bioethanol and furfural production from vetiver," *Bioresource Technology*, 185, 2015, pp. 202–210.
7. B. Kamkar and M. Mahdavi Damghani, *Principles of sustainable agriculture*, Publications University of Mashhad, 2008.
8. C. G. Kim, *Developing Policies for Agriculture and the Environment, Food and Fertilizer Technology Center*, Korea Rural Economic Institute, 2001, Working Paper.
9. C. M. Gasol, X. Gabarrell, A. Anton, M. Rigola, J. Carrasco, P. Ciria and J. Rieradevall, "Life cycle assessment of a Brassica carinata bioenergy cropping system in southern Europe," *Biomass and Bioenergy*, 31, 2007, pp. 543–555.
10. T. Nemecek and T. kagi, *Life cycle inventories of agricultural production systems*, data Ecoinvent Center, V2.0, Ecoinvent Report (No.15 Zurich and Debendorf Swit zerlano), 2007.
11. F. Brentrup, J. Küsters, J. Lammel and H. Kuhlmann, "Methods to estimate on-field nitrogen emissions from crop production as an input to LCA studies in the agricultural sector," *international journal of life cycle assessment*, 5, 2000, pp. 349– 357.
12. S. Papong, C. Rewlay-ngoen, N. Itsubo and P. Malakul, "Environmental life cycle assessment and social impacts of bioethanol production in Thailand," *Journal of Cleaner Production*,157, 2017, pp. 254–266.
13. H. Bayraktar, "Experimental and theoretical investigation of using gasoline–ethanol blends in spark-ignition engines," *Renewable energy*, 30, 2005, pp. 1733–1747.
14. A. Avilés Martínez, J. Saucedo-Luna, J. G. Segovia-Hernandez, S. Hernandez, F. I. Gomez-Castro and A. J. Castro-Montoya, "Dehydration of bioethanol by hybrid process liquid–liquid extraction/extractive distillation," *Industrial & engineering chemistry research*, 51, 2011, pp. 5847–5855.
15. T. Tsuru and J. Wang, *Pervaporation. Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*, 2010.
16. A. A. Kiss, J. David and P. C. Suszwalak, "Enhanced bioethanol dehydration by extractive and azeotropic distillation in dividing-wall columns," *Separation and Purification Technology*, 86, 2012, pp. 70–78.
17. D. M. Leo, *Adsorption of water and ethanol vapors on 3A and 4A molecular sieve zeolites*, Doctoral dissertation, State University of New York at Buffalo, School of Engineering and Applied Sciences, 2007.
18. A. Devi Chintagunta, S. Jacob and R. Banerjee, "Integrated bioethanol and biomanure production from potato waste," *Waste Management*, 49, 2016, pp. 320–325.
19. D. Arapoglou, Th. Varzakas, A. Vlyssides and C. Israilides. "Ethanol production from potato peel waste (PPW)," *Waste Management*, 30, 2010, pp. 1898–1902.
20. B. Jeddou Khawla, M. Sameh, G. Imen, F. Donyes, G. Dhouha, E. Ghorbel Raoudha and N. Oumèma ,"Potato peel as feedstock for bioethanol production: A comparisonof acidic and enzymatic hydrolysis," *Industrial Crops and Products*, 52, 2014, pp. 144–149.
21. L. Wang, J. Littlewood and R. J. Murphy, "Environmental sustainability of bioethanol production from wheat straw in the UK," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 28, 2013, pp. 715–725.
22. S. Papong, C. Rewlay-ngoen, N. Itsubo and P. Malakul. "Environmental life cycle assessment and social impacts of bioethanol production in Thailand," *Journal of Cleaner Production*, 157, 2017, pp. 254–266.
23. I. Muñoz, K. Flury, N. Jungbluth, G Rigarlsford, L. Milài Canals and H. King. "Life cycle assessment of bio-based ethanol produced from different agricultural feedstocks," *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 19, 2014, pp. 109–119.

www.SID.ir

Archive of SID

24. A. L .Borrion, M C. McManus and G P. Hammond, "Environmental life cycle assessment of bioethanol production from wheat straw" *Biomass and Bioenergy*, 47, 2012, pp. 9–19.
25. M. Soleymani, A. Keyhani and M. Omid, "Life cycle assessment bioethanol production from Sugarcane in Iran," *Journal of agricultural engineering*, 40, 2018, pp. 13–27.
26. C. Pieragostini, P. Aguirre, M. C. Mussati, "Life cycle assessment of corn based ethanol production in Argentina," *Science of the Total Environment*, 472, 2014, pp. 212–225.
27. M. Morales, J. Quintero, R. Conejeros and G. Aroca, "Life cycle assessment of lignocellulosic bioethanol: environmental impacts and energy balance," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 2015, pp. 1349–1361.
28. K. Gerbrandt, P. Lin Chu, A. Simmonds, K. A. Mullins, H. L. MacLean, W. M. Griffin and B. A. Saville, "Life cycle assessment of lignocellulosic ethanol: a review of key factors and methods affecting calculated GHG emissions and energy use," *Current Opinion in Biotechnology*, 38, 2016, pp. 63–70.
29. E. I. Wiloso, R. Heijungs and G. R. Snoo, "LCA of second generation bioethanol: A review and some issues to be resolved for good LCA practice," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 2012, pp. 5295–5308
30. P. Goglio, E. Bonari and M. Mazzoncini, "LCA of cropping systems with different external input levels for energetic purposes," *Biomass and bioenergy*, 42, 2012, pp. 33–42.
31. W. Shuai, N, Chen, B. Li, Zhou D and J. Gao,"Life cycle assessment of common reed (Phragmites australis (Cav) Trin.ex Steud) cellulosic bioethanol in Jiangsu Province, China," *Biomass and Bioenergy*, 92, 2016, pp. 40–47.
32. J. Botero Agudelo, H. Castaño Peláez and C. Naranjo Merino, "Life Cycle Assessment for bioethanol produced from cassava in Colombia," *Producción + Limpia*, 6, 2012, pp. 69–77.
33. P. N. Aguilar-Sánchez, F. S. avarro-Pineda, J. C. Sacramento-Rivero and L. F. Barahona-Pérez. "Life-cycle assessment of bioethanol production from sweet sorghum stalks cultivated in the state of Yucatan, Mexico," *Clean Technologies Environmental Policy*, 20, 2018, pp. 1685–1696.
34. S. S. Farahani and M. A. Asoodar, "Life cycle environmental impacts of bioethanol production from sugarcane molasses in Iran," *Environmental Science and Pollution Research*, 24, 2017, pp. 22547–22556.
35. J. Shadbahr, Y. Zhang and F. Khan, "Life Cycle Assessment of Bioethanol Production from Woodchips with Modifications in the Pretreatment Process" *Applied Biochemistry Biotechnology*, 175, 2015, pp. 1080-1091.
36. H. Cai, J. B. Dunn, Z. Wang, J. Han and M. Q. Wang. "Life-cycle energy use and greenhouse gas emissions of production of bioethanol from sorghum in the United States," *Biotechnology Biofuels*, 6, 2013, pp. 141.
37. F, Baiat, "Assessment Dissipation factor at different stages of agricultural products and ways to deal with it," *conference methods prevention loss scientific resources*, pp. 216–226, The Academy of Sciences of the Islamic Republic of Iran, Tehran, 2004. (in Persian)
38. M. M. Jowker, "The importance of horticultural extension in reducing postharvest losses in Iran," ISHS Acta horticulture 627, *IV international symposium on horticultural Education, Extension and Training*, Perth, Australia, 2005.
39. M. Yosef allahi, R. Kamiab Kalantari and A, Dirkevandi , "Investigating the Possibility of using Potato Mineral Silage in Feeding Animal Ruminants" *Applied Scientific Conference on the Use of Agricultural, Urban and Industrial Wastes in Poultry and Aquatic Diets*, Tabriz university, Tabriz, 2012.(in Persian)
40. M. Finkbeiner, A. Inaba, R. B. H. Tan, K. Christiansen and H. J. Klüppel, "The new international standards for life cycle assessment," ISO 14040 and ISO 14044, *International Journal of Life Cycle Assessment*, 1, 2006, pp. 80–85.
41. T. Nemecek, D. Dubois, O. Huguenin-Elie and G. Gaillard, "Life cycle assessment of Swiss farming systems: I. Integrated and organic farming," *Agricultural Systems*, 104, 2011, pp. 217–232.
42. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Guidelines for national greenhouse gas inventories. In: Eggleston, H.S., Buendia, Miwa K., Ngara, T., Tanabe, K. (Eds.), Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. Japan: IGES, 2006. http://www.ipccnggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.htm.
43. F. Van den Berg, R. Kubiak, W. G. Benjey, M. S. Majewski, S. R. Yates, G. L. Reeves and A. M. A. Van der Linden. "Emission of pesticides into the air," *Water Air and Soil Pollution*, 115, 1999, pp. 195–218.
44. SH. Mousavi-Avval, S. Rafiee, M. Sharifi, S. Hosseinpour, B. Notarnicola and G. Tassielli, et al., "Use of LCA indicators to assess Iranian rapeseed production systems with different residue management practices," *Ecological Indicator*, 80, 2017, pp. 31–9.
45. M. Abassian, *Design, Manufacture and Evaluation of Laboratory Apparatus for the Production of Sugar from Potato Waste for the Production of Bioethanol*. MSc Thesis, Mechanical & Biosystems Engineering Department, Tarbiat Modares University, Tehran, 2012. (In Persian)
46. P. Roy, D. Nei, T. Orikasa, Q. Xu, H. Okadome, N. Nakamura and T. Shiina, "A review of life cycle assessment (LCA) on some food products," *Journal of Food Engineering*, 90, 2009, pp. 1–10.
47. J. Jiao, J. Li and Y. Bai, "Uncertainty analysis in the life cycle assessment of cassava ethanol in China," *Journal of Cleaner Production*, 206, 2019, pp. 438–451.
48. M. Wang, Y. Shi, X. Xia, D. Li and Q. Chen. "Life-cycle energy efficiency and environmental impacts of bioethanol production from sweet potato," *Bioresource Technology*, 133, 2013, pp. 285–292.

www.SID.ir

Archive of SID

English Abstract

Investigation of environmental impact of bioethanol production from potato waste

Ali Motevali[1*], Milad Teymori-Omran[2], Barat Ghobadian[3] and Gholam Hassan Najafi[4]

1- Department of Biosystem Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran, a.motevali@sanru.ac.ir
2- Department of Biosystem Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran, miladtomran@yahoo.com
3- Department of Biosystem Engineering, Tarbiat Modarres University, Tehran, Iran, ghobadib@modares.ac.ir
4- Department of Biosystem Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, g.najafi@modares.ac.ir
*Corresponding author

(Received: 2019.6.29, Received in revised form: 2019.08.05, Accepted: 2019.09.02)

Concerns about increasing environmental pollution and increasing greenhouse gas emissions from fossil fuels have led researchers to use renewable energy. In this research, the environmental impacts of bioethanol production from potato waste were investigated from the agricultural stage to the production stage of bioethanol (crushing and malt production, enzymatic hydrolysis, fermentation and dehydration). Investigation of environmental impact of the data collection was done using a life cycle assessment method in the form of 15 impact groups and 4 final indicators, and its functional unit was considered to produce one kg of bioethanol. The results obtained from the impact groups in two stages of agriculture and bioethanol production showed that the agricultural stage in all the affected groups except the carcinogenicity group had higher values than the stages of bioethanol production. Also the results showed that the highest contribution to creating different impact groups is related to energy consumption of electricity, steel, agricultural machinery, nitrogen, phosphate and direct emission of pollutants from the field and manufactory. The comparison between different environmental endpoints indicators shows that the human health index is 9.90 times higher than ecosystem quality, 1.28 times higher than climate change and 1.48 times higher than that of resources with destructive effects on bioethanol fuel production.

Keywords: Environmental Impact, Bioethanol, Potato waste, Life cycle assessment

www.SID.ir