تحقیقات سامانه‌ها و مکانیزاسیون کشاورزی/جلد ۲۳/ شماره ۸۱/بهار ۱۴۰۱/ص ۹۲-۷۵
سایت مجله: https://www.amsr.areeo.ac.ir

مقاله علمی– پژوهشی

ارزیابی زیست‌محیطی گذر از تولید مرسوم شکر به سمت تولید تحت پالایشگاه زیستی به عنوان یک راهبرد پایدار برای دستیابی به اقتصاد زیستی– چرخه‌ای

محمد چناری[1] و مجید خانعلی[2*]، محمد شریفی و هما حسین‌زاده بندبافها

۱، ۲، ۳ و ۴- به ترتیب دانشجوی دکتری؛ دانشیاران؛ و فارغ‌التحصیل دکتری؛ گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران
تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۴/۱

چکیده

پژوهش حاضر با هدف بررسی و مقایسهٔ خسارت‌های زیست‌محیطی تولید شکر خام در کشت و صنعت‌های استان خوزستان تحت چارچوب مرسوم خطی و تحت چارچوب دیدگاه اقتصاد زیستی-چرخه‌ای اجرا شد. هدف از انتقال سامانه‌های تولیدی با اقتصاد خطی به سامانه‌های تولیدی با اقتصاد زیستی-چرخه‌ای در واقع حذف پسماند، افزایش کارایی مصرف مواد و انرژی و تولید محصولات متنوع زیستی در جهت افزایش پایداری سامانه‌های تولیدی از جمله سامانه‌های تولید غذاست. نتایج این پژوهش نشان داد که تولید هر تن شکر خام تحت چارچوب اقتصاد خطی خسارت ۱۶۷/۴۱ پوینتی را به دنبال دارد که تولید و احتراق گاز طبیعی در فراوری نیشکر بیشترین مشارکت را در ایجاد این خسارت دارد. در مقابل، نتایج این پژوهش نشان داد که گذر از اقتصاد خطی و رسیدن به اقتصاد زیستی-چرخه‌ای که در آن ملاس و باگاس به عنوان دو پسماند مهم صنایع شکر به ترتیب به الکل و سوخت تبدیل می‌شوند کاهشی ۱۹۳ درصدی در خسارت زیست‌محیطی کل به دنبال دارد. این نتیجه‌گیری تأکید می‌کند که تولید شکر تحت اقتصاد زیستی-چرخه‌ای نه تنها راه‌حل مناسبی برای مدیریت پسماند موجود است بلکه به شکلی چشمگیر در کاهش خسارت‌های زیست‌محیطی ناشی از تولید نیشکر و فراوری آن نقش دارد.

واژه‌های کلیدی

اقتصاد خطی، امنیت غذایی، پیامدهای زیست‌محیطی، توسعه پایدار

مقدمه

به رغم تلاش‌ها برای پایان یافتن گرسنگی در جهان، پیش‌بینی می‌شود که حدود ۶۶۰ میلیون نفر در سال ۲۰۳۰ همچنان با گرسنگی مواجه باشند (Anon, 2021). این در حالی است که پدیده‌های نوظهور و پیامدهای آن مانند آنچه در بحران همه‌گیری ویروس کرونا روی داد، ممکن است معادلات را به هم ریزند و ناامنی غذایی را تشدید کنند. افزایش ناامنی غذایی، دستیابی به یکی از مهم‌ترین هدف‌های توسعهٔ پایدار یعنی "جهان بدون گرسنگی" و پایان دادن به همه شکل‌های سوء تغذیه را به چالش می‌کشد. این در حالی است که پژوهش‌های مختلف به نقل از گزارش سازمان خواربار و کشاورزی بیان کرده‌اند که حدود ۱/۶ میلیارد تن غذا، یعنی حدود یک سوم غذای تولید شده، سالانه در جهان دور ریخته می‌شود (Chowdhury, 2021). این میزان پسماند نه تنها منجر به خسارت ۱/۲ تریلیون دلاری می‌شود، بلکه می‌تواند انتشار سالانه ۳/۳ میلیارد تن کربن‌دی‌اکسید به جو را در پی دارد. سیاست‌گذاران، مدیران اجرایی، دانشمندان و تولیدکنندگان مواد غذایی در پرتو این چالش‌ها در جستجوی

*نگارنده مسئول: Email: khanali@ut.ac.ir
http://doi: 10.22092/AMSR.2022.357611.1408

راهبردهای انقلابی جدید برای افزایش پ ایداری سامانه‌های تولید غذا، چه در بخش کشاورزی و چه در بخش فراوری هستند. برای دستیابی به تولید پاک‌تر محصولات غذایی در توافق با اصول اقتصاد «سبز»، یعنی کاهش خطرهای زیست‌محیطی و کمبودهای زیست‌محیطی، راهبردهای پیشنهادی به شدت بر بهره‌برداری کامل از منابع مختلف موجود در این سامانه‌ها تکیه دارند (Chen & Zhang, 2015).

در میان راهبردهای پیشنهاد شده، تغییر از اقتصاد خطی به اقتصاد چرخه‌ای یکی از بهترین راه‌حل‌ها برای حذف پسماند و استفادهٔ دوباره آن و در نتیجه افزایش پایداری تولید است. به طورکلی، این رویکرد در تضاد با فعالیت‌های اقتصادی خطی است که محدودیت‌های زیست‌محیطی و آسیب‌های بلندمدتی را که به جامعه و محیط‌زیست وارد می‌شود نادیده می‌گیرد. با این‌حال، اقتصاد چرخه‌ای مستلزم نوآوری‌های زیست‌محیطی نیز هست که بتوانند حلقهٔ چرخهٔ زندگی سامانه‌های تولید محصولات مختلف از جمله مواد غذایی را ببندند و میزان تولید پسماند را به کمترین حد ممکن برسانند. (Scheel, 2016). لازم است یادآوری شود که در سامانه‌های زیستی، مانند سامانه‌های کشاورزی-غذایی، اقتصاد چرخه‌ای می‌تواند حتی پایدارتر از سایر صنایع باشد (Mohan *et al.*, 2019). زیرا علاوه بر افزایش کارایی منابع مورد استفاده و تبدیل آن به مواد با ارزش افزوده بالا و مصرف چندین‌بارهٔ آنها، منابع زیستی موجود نیز می‌توانند تبدیل به مواد مختلف زیستی از جمله زیست سوخت‌ها شوند که به عنوان جایگزینی پایدار برای منابع فسیلی شناخته می‌شوند (Khounani *et al.*, 2021).

ایدهٔ اقتصاد زیستی-چرخه‌ای را در عمل می‌توان با استفاده از رویکرد پالایشگاه‌های زیستی نشان داد. به طورکلی، پالایشگاه زیستی از این نظر شبیه به پالایشگاه نفت است که هدف آن تولید محصولات متعدد است، اما به جای مواد مبتنی بر سوخت‌های فسیلی، با استفاده از پسماندهای زیستی، محصولات زیستی متنوعی تولید می‌کند (Aghbashlo *et al.*, 2018). پژوهش‌های مختلف نشان می‌دهند که سامانه‌های کشاورزی و مواد غذایی دارای تمام اجزای لازم برای ادغام مؤثر در قالب یک پالایشگاه زیستی هستند. بر این اساس، ایدهٔ پالایشگاه زیستی، یعنی «تولید هم‌زمان محصولات کشاورزی و محصولات زیستی به دست آمده از پسماندهای کشاورزی مواد غذایی در سامانه‌های کشاورزی و مواد غذایی» طی چند سال گذشته مورد توجه بسیاری از محققان در سراسر جهان قرار گرفته است. پالایشگاه زیستی نیشکر نمونه‌ای خوب از مهندسی سبز است، زیرا محصولات جانبی نیشکر یا لیگنوسلولزها می‌توانند برای منافع اقتصادی در مرکز تولیدی جدید، ارزش‌گذاری شوند و در نتیجه شغل‌هایی را برای اعتلای اجتماعی ایجاد و به ادامهٔ کار کمک کنند (Nieder-Heitmann *et al.*, 2019). در این زمینه و در ارتباط با پایداری زیست‌محیطی پالایشگاه‌های زیستی شکر پژوهش‌های مختلفی شده است که نتایج امیدوارکننده‌ای را نشان داده‌اند. به طور مثال، در پژوهشی در خصوص بررسی پایداری زیست‌محیطی تولید شکر در حالت مرسوم و همچنین در چارچوب چند نمونه زیست-پالایشگاه، نتایج نشان داد که تولید الکتریسیته و اتانول از ضایعات شکر و استفاده از ویناس به عنوان کود، عملکرد زیست‌محیطی مطلوبی را در تولید شکر از خود به جای می‌گذارد. بر اساس این پژوهش تولید شکر تحت چارچوب پالایشگاه زیستی ذکر شده منجر به ۳۳ درصد کاهش در تغییرات آب و هوایی و ۶۲ درصد کاهش در اسیدی شدن خاکی خواهد شد. همچنین اختناق دریاچه‌ای، سمیت انسان،

اکسیداسیون فتوشیمیایی، تشکیل ذرات معلق، سمیت آبی و تقلیل منابع به ترتیب ۱۶/۶۶، ۵/۱۳، ۸۹/۸۵، ۶۰، ۵ و ۲۱/۶۶ درصد کاهش نشان داده‌اند (Silalertruksa *et al.*, 2017).

در میان محصولات مختلف کشاورزی، نیشکر با سطح زیر کشت در حدود ۱۰۰ هزار هکتار یکی از مهم‌ترین محصولات کشاورزی ایران است (Kaab *et al.*, 2019). اهمیت صنایع مرتبط با فراوری نیشکر در ایران به حدی است که بعد از صنایع نفت و گاز، بزرگ‌ترین مجموعه‌های تولیدی کشور مرتبط با آن هستند. با توجه به نیاز کشور به این محصول راهبردی و جلوگیری از واردات بی‌رویه آن و مهم‌تر از آن استعداد کم‌نظیر زمین‌های استان خوزستان، در سال ۱۳۶۲ شورای شکر تشکیل و طی پژوهش‌هایی که از سال ۱۳۶۳ تا ۱۳۶۵ صورت گرفت، ضرورت تأسیس شرکت توسعهٔ نیشکر و صنایع جانبی به تصویب مجلس رسید و این شرکت در سال ۱۳۶۹ تأسیس شد. در این راستا، تولید و فراوری نیشکر با بهره‌گیری از انواع کودها و سموم شیمیایی، فعالیت مکانیزاسیون در خلال عملیات کاشت، داشت و برداشت، تولید پساب‌ها و پسماندهایی که در محیط رها می‌شوند، بر شرایط زیست‌بوم و بهداشتی محیط اثر می‌گذارند و سبب آلودگی آب، خاک و هوا و مهم‌تر از آن باعث کاهش بهره‌وری منابع خواهند شد. هرچند برای کاهش حجم بالای ضایعات در این صنعت تلاش‌های بسیاری شده است، با این‌حال هنوز هم ضایعات خروجی در زنجیره تولید این محصول چشمگیر است. از این‌رو، ادامهٔ تولید شکر به صورت فعلی آن را در آیندهٔ نه چندان دور دچار مخاطره می‌سازد. بنابراین در حال حاضر، گذر از تولید مرسوم شکر به سمت تولید آن بر اساس اقتصاد زیستی-چرخه‌ای با تکیه بر تولید مواد جدید از ضایعات زنجیره تولید شکر در جهت دستیابی به تولید پایدار شکر تحت یک پالایشگاه زیستی ضروری است.

از سوی دیگر، اگرچه شاید عنوان می‌شود که کشور ایران غنی از منابع فسیلی است و نیازی به محصولات زیستی ندارد، اثرهای نامطلوب ناشی از احتراق سوخت‌های فسیلی روی سلامت انسان و همچنین محیط‌زیست به خوبی شناخته شده است (Hosseinzadeh-Bandbafha *et al.*, 2019). بنابراین جایگزینی هر چه سریع‌تر سامانه‌های انرژی زیستی با سامانه‌های انرژی فسیلی در تمامی بخش‌های تولیدی و صنایع از جمله صنایع شکر در ایران و سایر کشورها ضروری است.

به طور کلی پسماند عمده صنایع نیشکر باگاس و ملاس هستند. باگاس تفاله‌ای است که پس از استخراج شکر از نیشکر حاصل می‌شود و دارای کاربردهای فراوانی است. اما یکی از مصارف جالب توجه آن، استفاده از این ماده به عنوان سوخت زیستی برای تولید انرژی است (Silva *et al.*, 2014). استفاده از باگاس به عنوان مادهٔ اولیه برای تولید انرژی به جای سوخت‌های فسیلی می‌تواند منجر به استفاده نکردن از سوخت‌های فسیلی و حفظ آنها شود. این سوخت همچنین می‌تواند در دیگر بخش‌ها و صنایع تولیدی نیز استفاده شود. اگرچه تولید مواد دیگری مانند کاغذ ارزش افزوده بالاتری را به دنبال دارد، اما یکی از مهم‌ترین مشکلات زیست‌محیطی در صنایع شکر آلایندگی بیش از حد ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی است (Kaab *et al.*, 2019). بنابراین، استفاده از باگاس به عنوان سوخت زیستی در شرایط حاضر ارجح است. ملاس نیز می‌تواند در تولید محصولات دیگر مانند فرآورده‌های تخمیری مانند الکل استفاده شود (Valderrama *et al.*, 2020). شایان ذکر است که سوخت‌های زیستی می‌توانند از نظر فنی جانشین همهٔ سوخت‌های فسیلی شوند. با این‌حال، تولید آنها باید به سامانه‌هایی محدود شود که مزایای پایداری را تضمین کنند. چندین نگرانی زیست‌محیطی مرتبط با سامانه‌های انرژی

زیستی از جمله تغییر کاربری زمین، جنگل‌زدایی و همچنین سمیت انسانی و زیست‌محیطی ناشی از استفاده از مواد شیمیایی و کود وجود دارد (Von Blottnitz & Curran, 2007). پالایشگاه‌های زیستی مبتنی بر محصولات کشاورزی با تولید هم‌زمان محصولات کشاورزی، سوخت‌های زیستی و انرژی زیستی می‌تواند تا حد زیادی این مشکلات موجود در سامانه‌های مرسوم تولید انرژی زیستی را حل کند. با این همه، هر سامانهٔ تولیدی جدید قبل از تجاری‌سازی باید به طور جامع از نظر فنی و محیطی با سامانه مرسوم مقایسه شود تا به شناسایی فرصت‌ها و محدودیت‌های محیطی در زنجیره تولید کمک کند.

در جهت ارزیابی زیست‌محیطی فرایندهای مختلف رویکردهای متنوعی ارائه شده است که یکی از پرکاربردترین این رویکردها "ارزیابی چرخهٔ زندگی" شناخته می‌شود. این رویکرد پرکاربرد که در پژوهش‌های محیطی و فرآیندهای تصمیم‌گیری برای زنجیره‌های تولیدی است، بر اساس استانداردهای ارائه شده توسط ایزو، استانداردسازی شده و به عنوان ابزاری علمی برای بررسی اثرهای زیست‌محیطی در سراسر زنجیرهٔ تولید یا خدمات از گهواره تا گور به کار گرفته می‌شود (Anon, 2006a, 2006b). علاوه بر این، ارزیابی چرخهٔ زندگی می‌تواند برای ارزیابی‌های زیست‌محیطی مقایسه‌ای بین دو یا چند محصول یا سامانه استفاده شود؛ بنابراین، ارزیابی چرخهٔ زندگی ابزار قدرتمندی برای انتخاب محصولات تمیزتر و سبزتر است؛ به عبارت دیگر، ارزیابی چرخهٔ زندگی روشی قابل اعتماد برای تشخیص بهترین مسیرهای توسعهٔ پایدار است (Bicer & Dincer, 2018). بر این اساس، این پژوهش از این روش برای ارزیابی و مقایسهٔ پایداری زیست‌محیطی یک پالایشگاه کشاورزی زیستی مبتنی بر شکر با سامانهٔ معمولی تولید شکر استفاده می‌کند.

مواد و روش‌ها

جمع‌آوری داده‌ها

پژوهش حاضر در سال ۱۳۹۹ در کشت و صنعت-های نیشکر استان خوزستان اجرا شد. بر اساس اطلاعات موجود، این کشت و صنعت‌ها با حجم عظیمی از ملاس و باگاس روبه‌رو هستند که تیمار نشدن آنها معضلات زیست‌محیطی قابل توجهی در پی دارد؛ بنابراین، نیاز به انتقال از وضعیت کنونی به تولید شکر تحت یک اقتصاد زیستی-چرخه‌ای است. برای رسیدن به این هدف، در ابتدا تمام اطلاعات موجود (بر مبنای میانگین نهاده‌های مصرفی طی سال ۹۹) در خصوص تولید نیشکر و اطلاعات مرتبط با فراوری نیشکر و تولید یک تن شکر خام با مراجعه حضوری به مزارع از طریق مصاحبه با کارگران، کارشناسان و مدیران شاغل در صنعت فراوری نیشکر جمع‌آوری شد که به ترتیب در جدول ۱ نشان داده شده است.

ارزیابی چرخهٔ زندگی

هر پژوهش ارزیابی چرخهٔ زندگی دارای چهار مرحله اصلی است: تعیین هدف و دامنه، تجزیه و تحلیل سیاهه، ارزیابی اثرها، و تفسیر نتایج به دست‌آمده از مرحلهٔ ارزیابی اثرها در جهت تصمیم‌گیری‌ها، ارائهٔ پیشنهادها و شناسایی محدودیت‌ها و فرصت‌ها (Anon, 2006a, 2006b). در ادامه، مراحل ذکر شده برای این پژوهش بررسی می‌شوند.

تعیین هدف و دامنهٔ کاربرد در ارزیابی چرخهٔ زندگی

برابر استانداردهای ایزو ۱۴۰۴۰ و ۱۴۰۴۴ (Anon, 2006a, 2006b)، در تعریف هدف ارزیابی چرخهٔ زندگی، دلایل اجرای پژوهش باید به وضوح مشخص شود. تعریف صحیح هدف و دامنهٔ کاربرد هر پروژهٔ ارزیابی چرخهٔ زندگی، باعث حرکت در مسیر صحیح کل فرآیند می‌شود و به دستیابی به

معنی‌دارترین نتایج می‌انجامد. هدف اصلی پژوهش حاضر عبارت است از ارزیابی تولید شکر به صورت مرسوم و تولید آن تحت چارچوب پالایشگاه‌های زیستی به منظور شناسایی و تعیین آسیب‌های زیست‌محیطی تولید شکر در حالت مرسوم و همچنین روند تغییر اثرهای زیست‌محیطی تولید شکر با رویکرد اقتصادی زیستی-چرخه‌ای. برای دستیابی به این هدف، تعریف مرزهای سامانه مورد بررسی و همچنین واحد عملکردی ضروری است. از آنجا که در پژوهش‌های ارزیابی چرخهٔ زندگی محصولات کشاورزی-غذایی به طور معمول، واحد عملکردی بر اساس جرم محصول تولیدی است (Noya *et al.*, 2018)، در این پژوهش یک تن شکر خام به عنوان واحد عملکردی انتخاب شده است. همچنین مرز سامانه زنجیرهٔ تولید شکر را در برمی‌گیرد که از کشت نیشکر در مزرعه شروع می‌شود و به تولید شکر در کارخانه پایان می‌گیرد. یادآوری می‌شود که مرز سامانه در پالایشگاه زیستی تبدیل باگاس به جای گاز طبیعی و تبدیل ملاس به الکل را نیز در بر می‌گیرد.

جدول ۱- مقدار نهاده‌های مصرفی در چرخهٔ زندگی تولید شکر از مزرعه تا پایان فراوری

Table 1- The amount of inputs in the life cycle of sugar production from the farm to the end of processing

مقدار نهاده‌های مصرفی به ازای هر هکتار مزرعه نیشکر (۸۳ تن نیشکر در هکتار*) Amount of inputs per hectare of sugarcane field (83 tons of sugarcane per hectare)			مقدار نهاده‌های مصرفی به ازای فراوری نیشکر و تولید یک تن شکر خام Amount of inputs for sugarcane processing and production per unit of raw sugar		
نهاده‌ها (Inputs)	واحد (Unit)	مقدار (Amount)	نهاده‌ها (Inputs)	واحد (Unit)	مقدار (Amount)
سوخت دیزل به منظور استفاده در ادوات کشاورزی (Diesel fuel for use in agricultural machinery)	MJ	11567	نیشکر (Sugarcane)	kg	7692
			آب (Water)	m^3	5180
الکتریسیته به‌منظور آبیاری (Electricity for irrigation)	kWh	2165	کاستیک سودا (Sodium hydroxide)	kg	1
			سدیم کربنات (Sodium carbonate)	kg	3
آب آبیاری** (Irrigation water)	m^3	42480	تریپل سوپر فسفات (Triple superphosphate)	kg	0.55
			ضد چسب (Anti-adhesive)	1	0.071
قلمه نیشکر (Sugarcane seedlings)	kg	1030	سنگ‌آهک (Lime)	kg	90
			کلسیم هیپوکلریت (Calcium hypochlorite)	kg	0.476
کود اوره (نیتروژن خالص) (Urea fertilizer)	kg	168.2	ضد رسوب (Anti-fouling)	kg	0.025
			ضد باکتری (Anti-bacterial)	kg	0.004
کود فسفات (فسفر خالص) (Phosphate fertilizer)	kg	55.2	گوگرد (Sulfur)	kg	0.004
			کربن فعال (Activated carbon)	kg	0.23
کود پتاسیم (پتاسیم خالص) (Potassium fertilizer)	kg	26	آلومینیم سولفات (Aluminum sulfate)	kg	1.468
			کمک منعقد کننده (Coagulant aid)	kg	4.4
آمونیوم سولفات (گوگرد خالص) (Ammonium sulfate)	kg	19.5	سیتریک اسید (Citric acid)	kg	0.015
			هیدرازین (Hydrazine)	kg	0.011
علف‌کش‌ها (ماده مؤثر) (Herbicides)	kg	19.79	سدیم تری فسفات (Sodium triphosphate)	kg	0.27
			الکتریسیته (Electricity)	kWh	116.2
حمل‌ونقل (Transportation)	t.km	2014	سوخت دیزل (Diesel)	l	2.9
			گاز طبیعی (Natural gas)	MJ	20904.14

* متوسط عملکرد نیشکر در تمامی کشت و صنعت‌های نیشکر در خوزستان که به صورت خالص و با کسر میزان تراش، خاشاک و ناخالصی‌های همراه نیشکر برداشت شده همانند خاک، گل و غیره مدنظر قرار گرفته است.

** مجموع آبی که به مصرف گیاه می‌رسد و آبی که در جریان زهکشی، کانال آبرسانی و تبخیر در مزرعه هدر می‌رود.

تجزیه و تحلیل سیاهه در ارزیابی چرخهٔ زندگی

سیاههٔ چرخهٔ زندگی یا همان فهرست ورودی‌ها و خروجی‌های چرخهٔ زندگی دومین مرحله از مراحل پژوهش‌های ارزیابی چرخهٔ زندگی، شامل جمع‌آوری داده‌ها و محاسبه است با هدف کمی‌سازی ورودی‌ها و خروجی‌های چرخهٔ زندگی محصول (Anon, 2006a, 2006b). لازم است گفته شود ازآنجا که در این گام از ارزیابی چرخه زندگی داده‌ها به شکلی صحیح و دقیق جمع‌آوری می‌شوند، نبود یا کمبود داده می‌تواند بزرگ‌ترین چالش در این مرحله از پژوهش‌های ارزیابی چرخهٔ زندگی باشد. در این پژوهش، همان‌طور که در بخش جمع‌آوری داده‌ها گفته شد، داده‌های مرتبط با میزان مصرف مواد و حامل‌های انرژی ورودی به سامانهٔ تولیدی و میزان تولید محصولات خروجی از سامانه به طور مستقیم جمع‌آوری شده‌اند (جدول ۱). برای تعیین میزان انتشار ناشی از مصرف مواد و انرژی به آب، هوا و خاک در سامانهٔ مورد بررسی مانند نشر گازهای احتراق که به طور مستقیم قابل اندازه‌گیری نیستند از روابط و ضرایب موجود در منابع استفاده شده است (Nemecek *et al.*, 2007). انتشار ناشی از کاربرد سموم و کودها و همچنین انتشار ناشی از آتش زدن بقایای نیشکر از طریق مصاحبه با کارشناسان و اطلاعات موجود در کشت و صنعت استخراج و در جدول ۲ نشان داده شده‌اند. انتشار مستقیم ناشی از فراوری نیشکر نیز از همین طریق استخراج، و در جدول ۳ ذکر شده است. انتشار مربوط به احتراق گاز طبیعی در دیگ‌های بخار از پایگاه داده اکوایونونت[1] استخراج شده است. داده‌های مربوط به اثرهای زیست‌محیطی از تولید مواد و حامل‌های انرژی (از استخراج مواد اولیه تا ورود به سامانه) از پایگاه داده‌های موجود همچون اکوایونونت موجود در نرم‌افزار سیماپرو[2] استخراج شده است.

جدول ۲- انتشارات مستقیم ناشی از مصرف کود و سموم و آتش زدن بقایای نیشکر به ازای هر هکتار مزرعه نیشکر*

Table 2- Direct emissions from fertilizer and pesticide consumption and burning of sugarcane residues per hectare of sugarcane field

نوع ماده (Type of substances)	واحد (Unit)	مقدار (Amount)
انتشار به هوا (Emissions to air)		
دی‌نیتروژن مونوکسید از طریق نیترات‌زدایی (Dinitrogen monoxide through nitrification)	kg	19.8
اکسیدهای نیتروژن از طریق نیترات‌زدایی (Nitrogen oxides through nitrification)	kg	46.6
آمونیاک از طریق تبخیر اوره (Ammonia through evaporation of urea)	kg	4.7
انتشار به آب (Emissions to water)		
شستشوی نیترات (Nitrate washing)	kg	78.2
رواناب فسفر (Phosphorus runoff)	kg	2.8
رواناب علف‌کش‌ها (Herbicides runoff)	kg	0.06
انتشار ناشی از سوزاندن بقایای نیشکر (Emissions from burning sugarcane residues)		
متان (Methane)	kg	10
دی‌نیتروژن مونوکسید (Dinitrogen monoxide)	kg	0.7
اکسیدهای نیتروژن (Nitrogen oxides)	kg	39.3
اکسیدهای گوگرد (Sulfur oxides)	kg	4.8
ترکیبات آلی فرار غیر متان (Non-methane volatile organic compounds)	kg	25.7

* از آنجا که کربن دی‌اکسید آزاد شده ناشی از سوزاندن نیشکر به عنوان یک انتشار کوتاه‌مدت معرفی شده است، در بررسی اثرهای زیست‌محیطی محاسبه نشده است (Renouf *et al.*, 2010).

1- Ecoinvent 2- SimaPro

جدول ۳- مقدار پسماند و انتشار مستقیم ناشی از فراوری نیشکر برای تولید هر تن شکر خام

Table 3-- The amount of waste and direct emissions from sugarcane processing to produce each ton of raw sugar

(Amount) مقدار	(Unit) واحد	(Type of substances) نوع ماده	
420	kg	(Filter mud)	گِل فیلتر
65	kg	(Filter cake)	گل صافی
450	kg	(Molasses)	ملاس
3068	kg	(Bagasse)	باگاس
3	l	(Industrial sludge treatment plant)	لجن تصفیه‌خانه صنعتی
8	l	(Sanitary sludge treatment plant)	لجن تصفیه‌خانه بهداشتی
301	l	(Industrial sludge wastewater treatment)	لجن تصفیه‌خانه آب صنعتی
1.896	m^3	(Industrial wastewater)	فاضلاب صنعتی
1.2	m^3	(Human wastewater)	فاضلاب انسانی
0.35	l	(Waste oil from cooking lime)	روغن ضایعاتی پخت آهک
19.2	kg	(Chemical oxygen demand)	تقاضای اکسیژن شیمیایی
6.4	kg	(Biochemical oxygen demand)	تقاضای اکسیژن بیوشیمیایی
13.2	kg	(Water soluble solids)	مواد جامد انحلال‌پذیر در آب
0.36	kg	(Phosphate)	فسفات
0.1	kg	(Oil and grease)	روغن و گریس
1.7	kg	(Water suspended matter)	مواد معلق در آب
1.3	kg	(Sulfur dioxide)	گوگرد دی‌اکسید
1.3	kg	(Nitrogen oxides)	اکسیدهای نیتروژن
0.62	kg	(Volatile organic compounds)	ترکیبات آلی فرار
0.002	kg	(Methane)	متان
0.25	kg	(Dinitrogen monoxide)	دی‌نیتروژن مونوکسید

ارزیابی اثرهای چرخهٔ زندگی

ارزیابی اثرهای چرخهٔ زندگی، بخشی از ارزیابی چرخهٔ زندگی است که هدف آن دریافتن و ارزیابی بزرگی و اهمیت پیامدهای بالقوه زیست‌محیطی سامانه به واسطهٔ چرخهٔ زندگی محصول است (Anon, 2006a; 2006b). ارزیابی اثرهای چرخهٔ زندگی می‌کوشد تا ارتباطی بین محصول یا فرآیند و اثرهای زیست‌محیطی بالقوه‌اش برقرار سازد. در واقع، هدف ارزیابی اثرهای چرخهٔ زندگی، تبدیل نتایج کمی مربوط به بخش تحلیل سیاهه به نتایج کیفی و قابل فهم است. روش‌های مختلفی برای ارزیابی اثرهای چرخه زندگی مطرح شده که در این پژوهش از روش رسپی[1] به عنوان یکی از جدیدترین روش‌های ارزیابی اثرهای چرخهٔ زندگی استفاده شده است که دامنهٔ کاربرد آن در سطح جهان است.

نتایج و بحث

اثرهای زیست‌محیطی تولید یک تن شکر خام در مزرعه

در این بخش، ابتدا اثرهای زیست‌محیطی ناشی از تولید نیشکر در مزرعه به ازای واحد عملکردی، یعنی یک تن شکر خام تولیدی، بررسی شده است. بر اساس نتایج مندرج در جدول ۴، از میان ردهٔ اثر تغییرات آب و هوایی روی سلامت انسان، تخریب لایهٔ ازن، سمیت برای انسان، تشکیل اکسیدان فتوشیمیایی، تشکیل ذرات معلق و پرتوهای یونیزان، که در ارتباط مستقیم با سلامت انسان هستند، ردهٔ اثر تغییرات آب و هوایی روی سلامت انسان بیشترین سهم را دارد. تغییرات آب و هوایی خطر ابتلا به بیماری را از راه افزایش دما، باران‌های شدید و سیلاب‌های مکرر و اثرهای طوفان افزایش می‌دهد. به طور ویژه، تغییرات آب و هوایی می‌توانند منجر به افزایش بیماری‌های تنفسی و قلبی عروقی، جراحات

1- ReCiPe

و مرگ‌های زودرس مربوط به رویدادهای شدید آب و هوایی، بیماری‌های ناشی از غذا و آب و سایر بیماری‌های عفونی و تهدید سلامت روان انسان شوند. شکل ۱ نشان می‌دهد که بیش از ۶۰ درصد این ردهٔ اثر مربوط به انتشار ناشی از کاربرد کود و سموم (به ویژه کود اوره) و آتش زدن بقایای نیشکر است. در پژوهشی مشابه در زمینهٔ نشر کربن‌دی‌اکسید معادل از مزارع تولید نیشکر در استرالیا بیشترین مشارکت به انتشارات مزرعه‌ای ناشی از مصرف کودهای شیمیایی به ویژه نشر دی‌نیتروژن مونوکسید ناشی از مصرف کودهای نیتروژن دار نسبت داده شده است (Renouf *et al.*, 2010). در مزارع نیشکر آفریقای جنوبی نیز نتیجهٔ مشابهی در خصوص مشارکت‌کنندگان اصلی در نشر کربن‌دی‌اکسید معادل گزارش شده است (انتشارات ناشی از مصرف کودهای شیمیایی و سپس انتشارات ناشی از آتش زدن بقایای نیشکر) (Pryor *et al.*, 2017). بیشترین سهم در انتشار گازهای گلخانه‌ای برای کشت نیشکر در تایلند نیز به سوزاندن بقایای نیشکر در خلال برداشت نیشکر و نشر دی‌نیتروژن مونوکسید ناشی از کاربرد کودهای حاوی نیتروژن نسبت داده شده است (Silalertruksa & Gheewala, 2018). از این‌رو، راهکارهایی که منجر به کاهش استفاده از کودهای شیمیایی و کاهش بقایای نیشکر می‌شوند، می‌توانند منجر به کاهش نشر کربن‌دی‌اکسید معادل و در نتیجه پایداری بیشتر تولید نیشکر در مزارع شوند. به طور مثال، پژوهش‌ها نشان داده‌اند که استفاده از ترکیبات آلی به جای کودهای شیمیایی می‌تواند منجر به کاهش نشر کربن‌دی‌اکسید معادل شود.

استفاده از لجن تولیدی صنایع مختلف در مزارع نیشکر به دلیل داشتن مقادیری غنی از مواد معدنی می‌تواند تا ۲۶/۵ درصد نشر گازهای گلخانه‌ای را کاهش دهد (de Medeiros Silva *et al.*, 2020). گرچه استفاده از کودهای آلی می‌تواند منجر به کاهش نشر گازهای گلخانه‌ای شوند، استفادهٔ مناسب و بهینهٔ کودهای شیمیایی و حتی کودهای آلی نباید از نظر دور بماند. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که مقادیر مناسب کود نه تنها می‌تواند عملکرد نیشکر را تا ۹۰ تن در هکتار برساند (عملکرد نیشکر در پژوهش حاضر ۸۳ تن در هکتار است)، بلکه هزینه‌های کشاورزی نیشکر را نیز کاهش دهد. به دلیل افزایش عملکرد نیشکر در واحد سطح، انتشار ناشی از کودهای شیمیایی به ازای هر تن محصول تولیدی کاهش خواهد یافت. این در حالی است که استفادهٔ نادرست و مازاد کودهای شیمیایی و کودهای آلی نه تنها منجر به افزایش عملکرد نیشکر نمی‌شود بلکه هزینه‌های زیاد و مخاطرات زیست‌محیطی قابل توجهی را برای تولید نیشکر ایجاد می‌کند. برداشت نیشکر با استفاده از تجهیزات مکانیزه می‌تواند حجم بقایا را کاهش دهد و در نتیجه منجر به حذف سهم قابل توجهی از انتشارات ناشی از سوزاندن بقایای نیشکر شود (Sawaengsak & Gheewala, 2017).

پژوهش‌ها تأکید می‌کنند تغییر عملیات برداشت از دستی به مکانیزه، به دلیل مصرف بیشتر ادوات کشاورزی و سوخت فسیلی توسط آنها، منجر به افزایش ۶ درصد در نشر کربن می‌شود، در حالی‌که به دلیل تثبیت کربن آلی خاک، برداشت مکانیزه منجر به کاهشی نزدیک به ۲۵ درصد در نشر گازهای گلخانه‌ای در تولید نیشکر خواهد شد (Renouf *et al.*, 2010). هرچند پژوهش‌ها ادعا می‌کنند که برداشت مکانیزه نیشکر می‌توانند به بیکاری خیل عظیمی از کارگران مشغول در مزارع نیشکر بینجامد، اما این کارگران و سایر افراد را از قرار گرفتن در معرض گازهای مضر ناشی از سوزاندن بقایای نیشکر حفظ می‌کند (Prasara-A *et al.*, 2019). بنابراین، برای پایداری هم‌زمان اجتماعی و زیست‌محیطی تولید نیشکر باید پژوهش‌های مختلفی صورت گیرد تا الگوی مناسبی

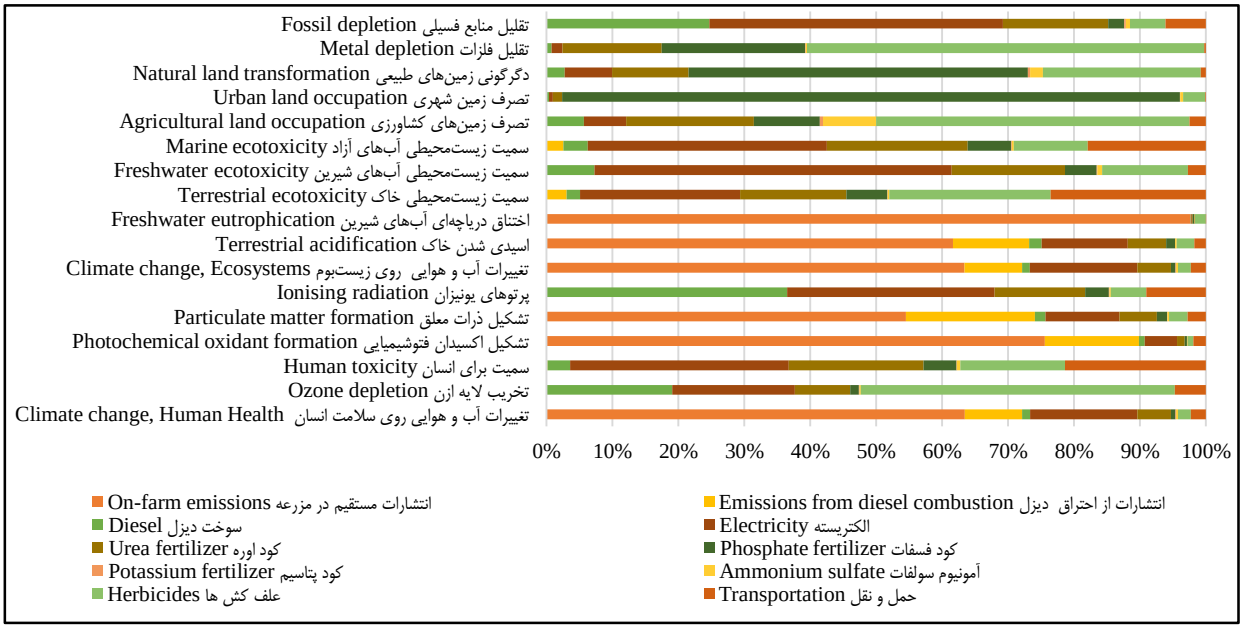
برای برداشت نیشکر در مناطق مختلف در اختیار نیشکرکاران قرار دهد. برداشت نیشکر در همهٔ کشت و صنعت‌های نیشکر خوزستان، به استثنای کشت و صنعت هفت‌تپه، به صورت تمام مکانیزه با دروگر است اما به دلایل فنی، کاهش راندمان برداشت، افزایش هزینه‌های سرویس، نگهداری و تعمیرات و خطر آتش‌سوزی دستگاه در برداشت سبز، نیشکر همچنان به صورت سوخته برداشت می‌شود.

در ردهٔ اثر تغییرات آب و هوایی روی زیست‌بوم، اسیدی شدن خاک، اختناق دریاچه‌ای آب‌های شیرین، سمیت زیست‌محیطی خاک، سمیت زیست‌محیطی آب‌های شیرین، سمیت زیست‌محیطی آب‌های آزاد، تصرف زمین‌های کشاورزی، تصرف زمین شهری و دگرگونی زمین‌های طبیعی، که به طور ویژه در تخریب زیست‌بوم مشارکت می‌کنند، تغییرات آب و هوایی روی زیست‌بوم که به طور عمده مربوط به انتشارات ناشی از کاربرد کود و سموم و آتش زدن بقایا است، بیشترین نقش را دارند. این نتیجه نشان می‌دهد که به منظور پایداری تولید نیشکر اولین گام کاهش انتشارات ناشی از کاربرد کود و سموم و آتش زدن بقایاست. دو ردهٔ اثر تقلیل فلزات و تقلیل منابع فسیلی به طورکلی نشانگر تقلیل منابع هستند. همان‌طور که جدول ۴ نشان می‌دهد سهم تقلیل منابع فسیلی، در مقایسه با تقلیل فلزات در تولید نیشکر، بسیار چشمگیر است. بر اساس شکل ۱، الکتریسیته (مورد استفاده برای آبیاری) و به دنبال آن سوخت دیزل مورد استفاده برای ادوات کشاورزی مشارکت‌کنندگان اصلی در این ردهٔ اثر هستند. در پژوهشی مشابه در آفریقای جنوبی، الکتریسیتهٔ مورد نیاز برای آبیاری و سوخت مورد نیاز ادوات بیشترین سهم را در تقلیل منابع فسیلی تولید نیشکر دارند (Pryor *et al.*, 2017). در تولید نیشکر در استرالیا نیز تولید کود اوره، مصرف سوخت فسیلی برای ادوات کشاورزی و الکتریسیتهٔ مورد نیاز برای آبیاری بیشترین سهم را در تقلیل منابع تجدید ناپذیر دارند (Renouf *et al.*, 2010).

جدول ٤- اثرهای زیست‌محیطی تولید یک تن شکر خام

Table 4- Environmental impacts of producing per ton of raw sugar

کل (Total)	فراوری نیشکر Sugarcane) (processing	کشت نیشکر Sugarcane) (cultivation	واحد (Unit)	رده اثر (Impact category)
2.55E-03	1.25E-03	1.30E-03	DALY	تغییرات آب و هوایی روی سلامت انسان (Climate change, Human Health)
4.12E-07	1.89E-07	2.23E-07	DALY	تخریب لایه ازن (Ozone depletion)
4.29E-05	2.58E-05	1.72E-05	DALY	سمیت برای انسان (Human toxicity)
4.26E-07	1.13E-07	3.13E-07	DALY	تشکیل اکسیدان فتوشیمیایی (Photochemical oxidant formation)
8.20E-04	3.28E-04	4.91E-04	DALY	تشکیل ذرات معلق (Particulate matter formation)
3.60E-07	1.11E-07	2.49E-07	DALY	پرتوهای یونیزان (Ionising radiation)
1.45E-05	7.10E-06	7.36E-06	species.yr	تغییرات آب و هوایی روی زیست‌بوم (Climate change, Ecosystems)
5.89E-08	2.55E-08	3.34E-08	species.yr	اسیدی شدن خاک (Terrestrial acidification)
1.72E-08	5.44E-09	1.18E-08	species.yr	اختناق دریاچه‌ای آب‌های شیرین (Freshwater eutrophication)
1.35E-08	5.80E-09	7.68E-09	species.yr	سمیت زیست‌محیطی خاک (Terrestrial ecotoxicity)
2.19E-09	1.75E-09	4.42E-10	species.yr	سمیت زیست‌محیطی آب‌های شیرین (Freshwater ecotoxicity)
2.06E-10	1.20E-10	8.55E-11	species.yr	سمیت زیست‌محیطی آب‌های آزاد (Marine ecotoxicity)
3.82E-08	1.84E-08	1.99E-08	species.yr	تصرف زمین‌های کشاورزی (Agricultural land occupation)
5.56E-08	1.39E-08	4.17E-08	species.yr	تصرف زمین شهری (Urban land occupation)
6.05E-09	2.84E-09	3.21E-09	species.yr	دگرگونی زمین‌های طبیعی (Natural land transformation)
1.35E-01	2.82E-02	1.07E-01	$	تقلیل فلزات (Metal depletion)
7.00E+01	5.00E+01	2.00E+01	$	تقلیل منابع فسیلی (Fossil depletion)



شکل ۱- مشارکت هر یک از نهاده‌ها در ایجاد آسیب‌های زیست‌محیطی ناشی از تولید یک تن شکر خام در مزرعه

Fig. 1- Contribution of each input in environmental impacts due to the production of per ton of raw sugar on the farm

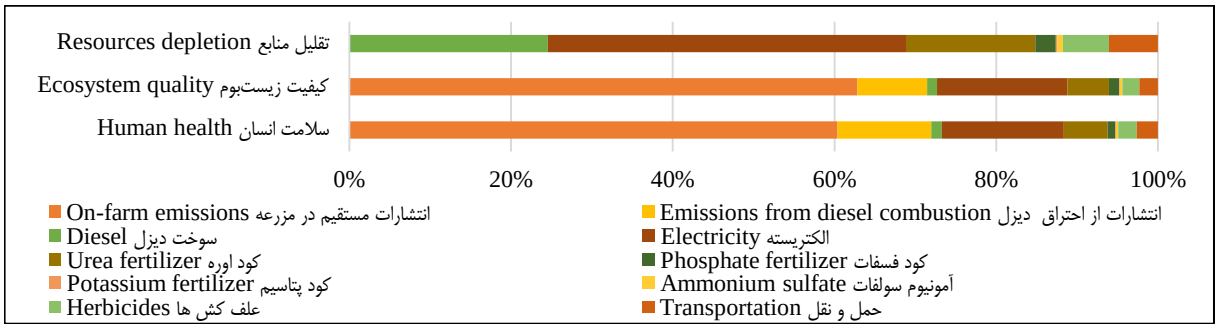
در جدول ۵ خسارت‌های زیست‌محیطی ناشی از تولید یک تن شکر خام در مزرعه نشان داده شده است. لازم است گفته شود که رده‌بندی با رویکرد نقطهٔ پایانی رویکرد خسارت محور نیز شناخته می‌شود، نتایج تحلیل سیاهه را به ردهٔ اثرهای محدودتری شامل رده خسارت سلامت انسان، کیفیت زیست‌بوم و تقلیل منابع تبدیل می‌کند که از جمله نگرانی‌های اصلی زیست‌محیطی هستند. از آنجایی‌که نتایج این بخش برای مردم عادی قابلیت درک و فهم ساده‌ای دارد، بیشتر مورد توجه غیرمتخصصان قرار می‌گیرد. بر اساس نتایج مندرج در جدول ۵ تولید نیشکر به منظور فراوری هر تن شکر خام منجر به خسارت $۱/۸۳\times۱۰^{-۳}$ دالی[1] به سلامت انسان، $۷/۴۸\times۱۰^{-۶}$ گونه در سال[2] به زیست‌بوم و ۲۰ دلار به منابع می‌شود. بر اساس شکل ۲، انتشارات ناشی از کاربرد کود و سموم و آتش زدن بقایا در ردهٔ خسارت سلامت انسان و کیفیت زیست‌بوم و الکتریسیتهٔ مصرفی به منظور آبیاری در ردهٔ خسارت تقلیل منابع بیشترین سهم را دارد.

جدول ۵- خسارت‌های زیست‌محیطی تولید یک تن شکر خام

Table 5- Environmental damages of producing per ton of raw sugar

رده خسارت (Damage category)		واحد (Unit)	کشت نیشکر (Sugarcane cultivation)	فراوری نیشکر (Sugarcane processing)	کل (Total)
سلامت انسان	(Human health)	DALY	1.81E-03	1.61E-03	3.42E-03
کیفیت زیست‌بوم	(Ecosystem quality)	species.yr	7.48E-06	7.17E-06	1.46E-05
تقلیل منابع	(Resources depletion)	$	2.01E+01	5.01E+01	7.02E+01

1- DALY (Disability-Adjusted Life Year)
2- Species.Year



شکل ۲- مشارکت هر یک از نهاده‌ها در ایجاد خسارت‌های زیست‌محیطی ناشی از تولید یک تن شکر خام در مزرعه

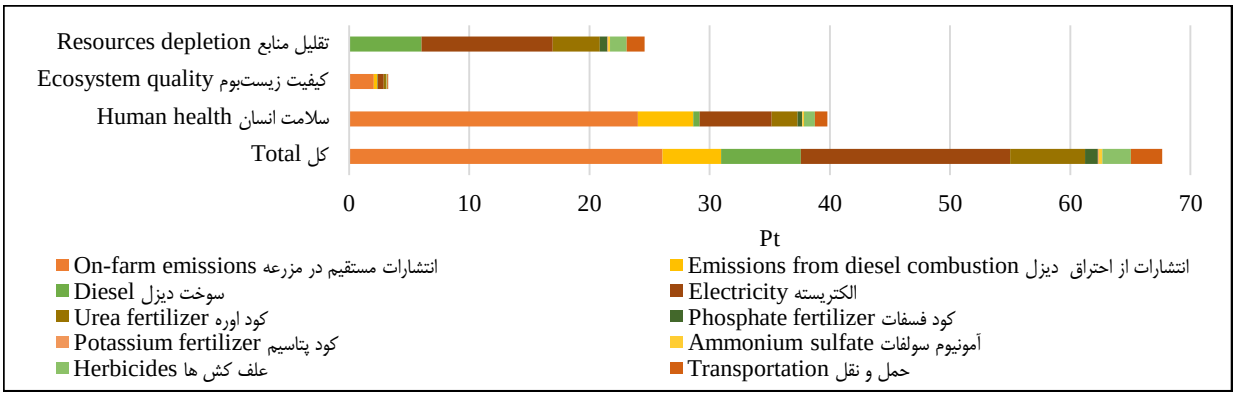
Fig. 2- Contribution of each input in environmental damages due to the production of per ton of raw sugar on the farm

جدول ۶ نتایج وزن‌دهی اثرهای زیست‌محیطی تولید نیشکر را به منظور فراوری هر تن شکر خام نشان می‌دهد. وزن‌دهی به دو دلیل اصلی مفید است. نخست اینکه نتایج ارزیابی چرخهٔ زندگی را به عنوان یک نمرهٔ واحد ارائه می‌دهد که این امر امکان مقایسه را برای محصولات و فرآیندهای مختلف فراهم می‌آورد و به تسهیل در تصمیم‌گیری می‌انجامد. دوم اینکه توضیح یک نمرهٔ واحد برای اثرهای زیست‌محیطی بسیار ساده‌تر از توضیح در مورد چندین نمرهٔ مختلف برای هر محصول یا فرآیند است. از آنجاکه یکی از هدف‌های اصلی این پژوهش مقایسه بین تولید شکر بر اساس روش مرسوم و رویکرد اقتصاد زیستی-چرخه‌ای است، علاوه بر ردهٔ اثر و ردهٔ خسارت، نتایج وزن‌دهی نیز گفته شده است. بر اساس نتایج مندرج در جدول ۶ و شکل ۳، خسارت به سلامت انسان بیشترین سهم را در خسارت نهایی زیست‌محیطی تولید یک تن شکر خام ناشی از فعالیت‌های مزرعه‌ای نشان می‌دهد در حالی‌که خسارت به زیست‌بوم‌ها به مراتب کمتر است. این نتیجه‌گیری نشان می‌دهد به دلیل نقش چشمگیر انتشارات ناشی از کاربرد کود و سموم و آتش زدن بقایا در خسارت نهایی زیست‌محیطی در تولید نیشکر، اولین گام، مدیریت مصرف کود و مدیریت بقایای نیشکر است.

جدول ٦- خسارت‌های زیست‌محیطی وزن‌دار شده تولید یک تن شکر خام

Table 6- Weighted environmental damages of producing per ton of raw sugar

کل (Total)	فراوری نیشکر (Sugarcane processing)	کشت نیشکر (Sugarcane cultivation)	واحد (Unit)	ردهٔ خسارت (Damage category)	
75.14	35.35	39.79	Pt	(Human health)	سلامت انسان
6.39	3.13	3.26	Pt	(Ecosystem quality)	کیفیت زیست‌بوم
85.89	61.29	24.60	Pt	(Resources depletion)	تقلیل منابع
167.41	99.76	67.65	Pt	(Total)	کل



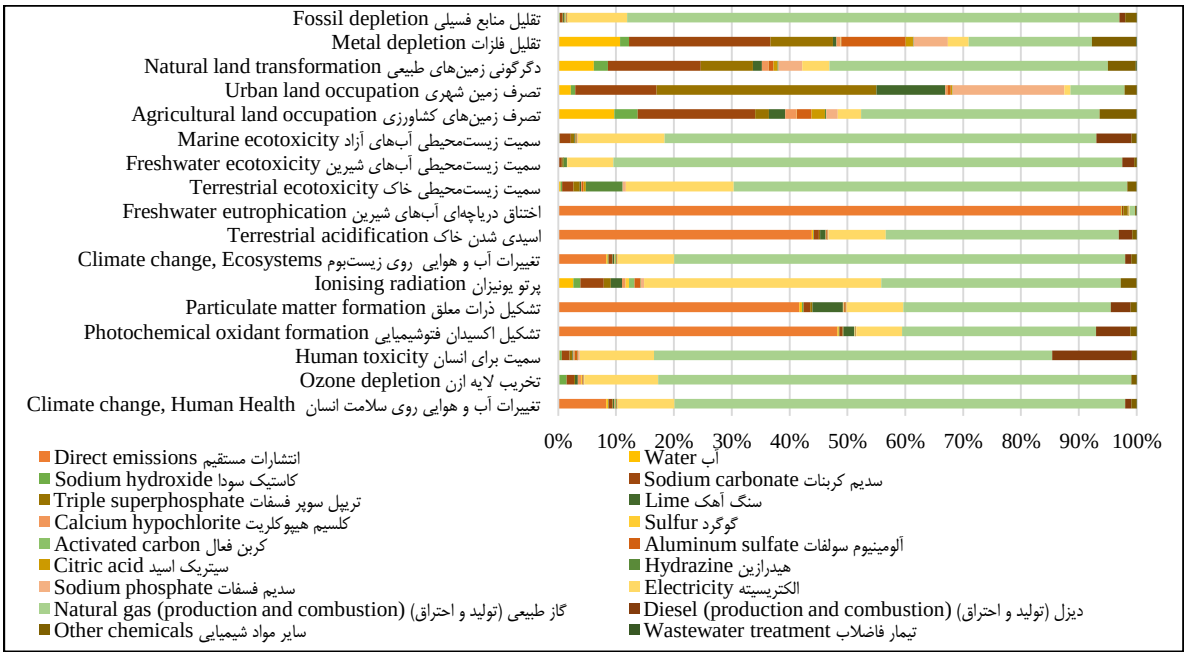
شکل ۳- مشارکت هر یک از نهاده‌ها در ایجاد خسارت‌های زیست‌محیطی وزن‌دار شده ناشی از تولید یک تن شکر خام در مزرعه

Fig. 3- Contribution of each input in weighted environmental damages due to the production of per ton of raw sugar on the farm

اثرهای زیست‌محیطی تولید یک تن شکر خام در کارخانه

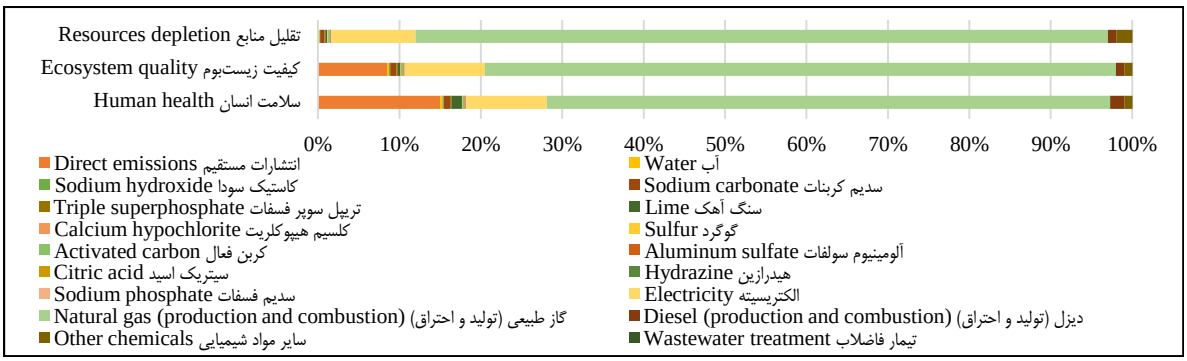
بنا بر نتایج ذکر شده در جدول ۴، بیشترین سهم در رده‌های اثر مرتبط با سلامت انسان ناشی از تولید هر تن شکر خام در کارخانه، مربوط به ردهٔ اثر تغییرات آب و هوایی روی سلامت انسان است. بر اساس شکل ۴ حدود ۸۰ درصد آن ناشی از تولید و مصرف گاز طبیعی است. در کارخانه‌های تولید شکر در اندونزی نیز بیشترین سهم گازهای گلخانه‌ای منتشر شده به سوخت‌های فسیلی نسبت داده شده است (Gunawan *et al.*, 2019). برای فراوری نیشکر در کارخانه‌های شکر در مکزیک نیز نتیجه مشابهی گزارش شده است که عمده نشر گازهای گلخانه‌ای به سوخت‌های فسیلی مصرفی نسبت داده شده است (Garc a *et al.*, 2016). بسیاری دیگر از پژوهش‌ها نیز نتایج مشابهی را دربارهٔ نقش چشمگیر سوخت‌های فسیلی در فراوری نیشکر گزارش داده‌اند. در زمینهٔ جایگزینی سوخت‌های فسیلی با سایر منابع تجدیدپذیر کربن پژوهش‌های گسترده‌ای شده است که نشان داده‌اند زیست‌توده به عنوان منبع عظیم کربن به طور مستقیم یا فراوری شده می‌تواند جایگزین سوخت‌های فسیلی شود. همان‌طور که گفته شد، فراوری نیشکر دو پسماند مهم باگاس و ملاس را به همراه دارد که به عنوان زیست‌توده می‌تواند تبدیل به منابع تولید انرژی شوند. تبدیل این زیست‌توده‌ها به منابع انرژی، علاوه بر کاهش مخاطرات زیست‌محیطی، حجم عظیمی از پسماند و درنتیجه اثرهای زیست‌محیطی ناشی از آن را حذف می‌کند. در زمینهٔ ردهٔ اثرهای مرتبط باکیفیت زیست‌بوم نیز ردهٔ اثر تغییرات آب و هوایی روی زیست‌بوم بیشترین مشارکت را دارد. در زمینهٔ رده اثرهای مرتبط با تقلیل منابع نیز گاز طبیعی نقش اصلی را بازی می‌کند. در فراوری نیشکر در اندونزی نیز نتیجه مشابهی گزارش شده است (Gunawan *et al.*, 2019).

بر اساس نتایج مندرج در جدول ۵، فراوری نیشکر به منظور تولید هر تن شکر خام منجر به خسارت $۱/۶۱\times۱۰^{-۳}$ دالی به سلامت انسان، $۷/۱۷\times۱۰^{-۶}$ گونه در سال به زیست‌بوم و ۵۰ دلار به منابع می‌شود. بر اساس شکل ۵ در هر سه رده خسارت، گاز طبیعی (تولید و احتراق) بیشترین مشارکت را دارد. نتایج وزن‌دهی مندرج در جدول ۶ همچنین نشان می‌دهد که در میان ردهٔ خسارت‌های مورد بررسی، فراوری نیشکر به دلیل مصرف گاز طبیعی بیشترین آسیب را به منابع وارد کرده است (شکل ۶). این نتیجه تأکید می‌کند برای پایداری تولید شکر، تغییر منبع انرژی مورد استفاده در کارخانه فراوری شکر الزامی است.



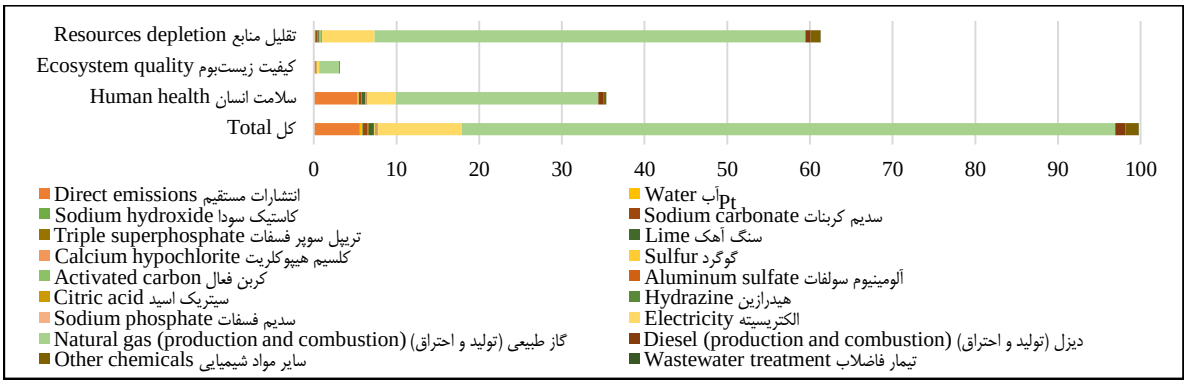
شکل ٤- مشارکت هر یک از نهاده‌ها در ایجاد آسیب‌های زیست‌محیطی ناشی از تولید یک تن شکر خام در کارخانه

Fig. 4- Contribution of each input in environmental impacts due to the production of per ton of raw sugar on the factory



شکل ٥- مشارکت هر یک از نهاده‌ها در ایجاد خسارت‌های زیست‌محیطی ناشی از تولید یک تن شکر خام در کارخانه

Fig. 5- Contribution of each input in environmental damages due to the production of per ton of raw sugar on the factory



شکل ٦- مشارکت هر یک از نهاده‌ها در ایجاد خسارت‌های زیست‌محیطی وزن‌دار شده ناشی از تولید یک تن شکر خام در کارخانه

Fig. 6- Contribution of each input in weighted environmental damages due to the production of per ton of raw sugar on the factory

بررسی اثرهای زیست‌محیطی تولید هر تن شکر خام تحت رویکرد اقتصاد زیستی- چرخه‌ای

همان‌طور که گفته شد، انتقال از تولید خطی به تولید چرخه‌ای لازمهٔ پایداری صنایع و خدمات مختلف از جمله صنایع کشاورزی- غذایی است. در این رویکرد، پسماندهای موجود به جای دور ریخته شدن تبدیل به مواد باارزش افزوده می‌شوند و به نوبهٔ خود در چرخهٔ تولید قرار می‌گیرند و سپس جایگزین محصولات مرسوم مبتنی بر سوخت‌های فسیلی می‌شوند. در پژوهش حاضر، باگاس جایگزین گاز طبیعی و الکل تولید شده از ملاس جایگزین الکل صنعتی (تولید شده از اتیلن) شده است. اگرچه در حال حاضر تولید الکل از ملاس به صورت تجاری وجود دارد، اما هنوز به طور کامل جایگزین الکل تجاری تولید شده از اتیلن نیست. از این‌رو، هرچه میزان الکل تولید شده از ملاس بیشتر شود تولید الکل مبتنی بر مواد فسیلی کمتر خواهد شد. به طورکلی، انتقال از تولید مرسوم شکر به سمت تولید تحت پالایشگاه زیستی منجر به بهبود ۴۵ درصدی در خسارت به سلامت انسان، ۳۶ درصدی در خسارت به زیست‌بوم و ۳۳۵ درصدی در خسارت به منابع می‌شود (جدول ۷). بر اساس نتایج به دست آمده، انتقال از تولید خطی شکر به سمت تولید زیستی- چرخه‌ای منجر به کاهش ۱۹۳ درصد در خسارت زیست‌محیطی کل می‌شود. شکل ۷ نشان می‌دهد که استفاده از باگاس به عنوان منبع سوختی مشکل خسارت به منابع را به طور کامل حل می‌کند. استفاده از باگاس به جای گاز طبیعی هزینهٔ انرژی را نیز به شدت کاهش می‌دهد؛ بنابراین می‌توان گفت اهمیت باگاس در عرصه انرژی، گرچه منبع سبز به حساب می‌آید و دوستداران محیط‌زیست به شدت به آن خوش‌بین هستند، صرفاً زیست‌محیطی نیست.

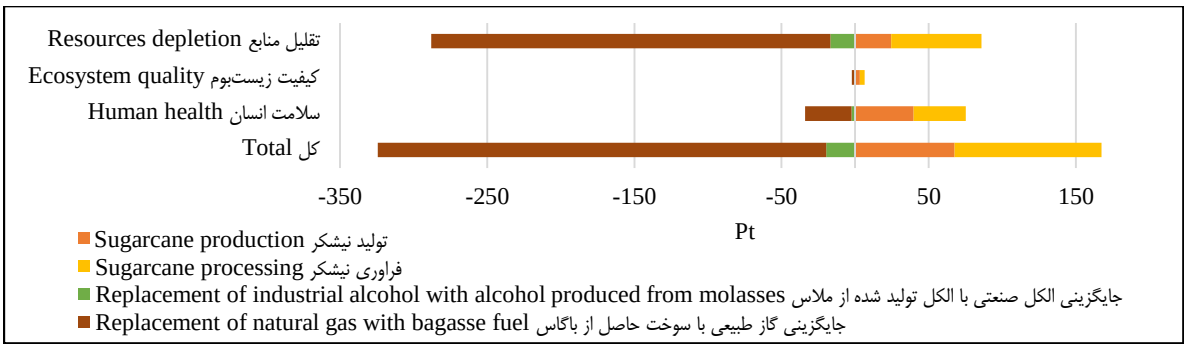
در پژوهشی مشابه در تایلند نشان داده شده است که تبدیل باگاس به منبع انرژی برای تولید بخار و الکتریسیته و تبدیل ملاس به الکل تحت چارچوب پالایشگاه زیستی شکر به کاهش ۲۱ درصد در منابع فسیلی ناشی از تولید شکر می‌انجامد (Silalertruksa *et al.*, 2017). در پژوهشی دیگر در ارتباط با تولید شکر تحت پالایشگاه زیستی در آفریقای جنوبی، تولید و فراوری مواد و انرژی‌های زیستی منجر به کاهش حداقل ۷۰ درصد در منابع فسیلی شده است به ویژه هنگامی‌که پالایشگاه زیستی از پسماند موجود برای تولید سوکسینیک اسید و پلی هیدروکسی بوتیرات استفاده می‌کند (Nieder-Heitmann *et al.*, 2019). به طورکلی این نتیجه‌گیری نشان می‌دهد که در زمینهٔ افزایش پایداری پالایشگاه‌های زیستی شکر باید سناریوهای مختلفی را از نظر زیست‌محیطی بررسی کرد تا بهترین مواد و انرژی تولید از نظر نوع و حجم تولید شناسایی شود و پایداری تولید شکر افزایش یابد. تولید انرژی از باگاس نیاز به فرایند پیچیده و مواد اولیه ندارد اما ممکن است تبدیل باگاس به مواد باارزش افزوده بالاتر مانند کاغذ نه تنها منجر به بهبود عملکرد زیست‌محیطی تولید شکر شود بلکه عملکرد اقتصادی تولید شکر را نیز افزایش دهد. تولید محصولات مختلف می‌تواند به استخدام طیف گسترده‌ای از متقاضیان به کار نیز بینجامد. پیشتر اشاره شد که یکی از راهکارها برای کاهش اثرهای زیست‌محیطی ناشی از آتش زدن بقایای نیشکر در مزارع استفاده از روش‌های مکانیزه است که به کاهش استفاده از نیروی کار و بیکاری آنها منجر می‌شود. با این‌همه، راه‌اندازی خطوط تولید مواد مختلف مبتنی بر پسماند فراوری شکر مانند کاغذ، فیبر و غیره می‌تواند امکان اشتغال دائم را برای افراد متقاضی کار ایجاد کند. بنابراین توصیه می‌شود در پروژه‌های آینده تمرکز بیشتری روی تولید محصولات متنوع‌تر در پالایشگاه‌های زیستی شکر داشت تا علاوه بر حفظ پایداری زیست‌محیطی، پایداری اقتصادی و اجتماعی تولید شکر نیز تضمین شود. در سال‌های اخیر چالش‌های زیادی در زمینهٔ

قیمت شکر در ایران وجود داشته است که تولید مواد مختلف در زنجیره تولید شکر می‌تواند منجر به برقراری تعادل بین قیمت تولیدکننده و قیمت ترجیحی خریداران شود.

جدول ۷- خسارت‌های زیست‌محیطی وزن‌دار شده تولید یک تن شکر خام تحت دو رویکرد متفاوت

Table 7- Weighted environmental damage of producing per ton of raw sugar under two different approaches

ردهٔ خسارت (Damage category)	واحد (Unit)	روش مرسوم (Conventional method)	پالایشگاه زیستی (Biorefinery)	درصد تغییر (Percentage change)
سلامت انسان (Human health)	Pt	75.14	41.22	45
کیفیت زیست‌بوم (Ecosystem quality)	Pt	6.39	4.09	36
تقلیل منابع (Resources depletion)	Pt	85.89	-202.27	335
کل (Total)	Pt	167.41	-156.96	193



شکل ۷- تأثیر گذر از تولید خطی شکر به تولید تحت چارچوب اقتصاد زیستی-چرخه‌ای روی خسارت‌های زیست‌محیطی وزن‌دار شده در تولید هر تن شکر خام

Figure 7- The effect of the transition from linear production of sugar to production under the circular bioeconomy framework on weighted environmental damage in the production of per ton of raw sugar

نتیجه‌گیری

یکی از مهم‌ترین رویکردهای تولید در حال حاضر تولید در چارچوب اقتصاد زیستی-چرخه‌ای است. این رویکرد در تلاش است تا با استفاده از پسماندهای موجود به‌عنوان ماده اولیه تولید مواد و انرژی نه تنها مشکل پسماند را حل کند بلکه در جهت افزایش کارایی انرژی، کاهش مشکلات زیست‌محیطی، ایجاد مشاغل پایدار و افزایش درآمد صنایع مختلف از جمله صنایع کشاورزی- غذایی گام‌های محکمی بردارد. در این راستا، پژوهش حاضر ابتدا به بررسی زیست‌محیطی تولید شکر خام در وضعیت مرسوم پرداخت و پس از آن اثرهای زیست‌محیطی تولید شکر خام را تحت یک چارچوب زیستی- چرخه‌ای بررسی کرد و نشان داد که برای تولید هر تن شکر خام در مزرعه ۶۷/۶۵ پوینت خسارت به محیط‌زیست وارد می‌شود که خسارت به سلامت بیشترین سهم را دارد. این خسارت عمدتاً ناشی از مصرف کودهای شیمیایی و آتش زدن بقایای نیشکر است. استفاده از کود با منشأ آلی و برداشت مکانیزهٔ نیشکر می‌تواند این مشکل را تا حد زیادی کاهش دهد. یکی از منابع آلی که می‌تواند به عنوان کود مورد استفاده قرار گیرد، ویناس خروجی در فراوری نیشکر است که تأثیر آن روی مسایل زیست‌محیطی تولید نیشکر می‌تواند در پژوهش‌های آینده بررسی شود. فراوری نیشکر و تبدیل آن به هر تن شکر خام منجر به خسارت ۹۹/۷۶ پوینتی[1]

1- Point (Pt)

می‌شود که عمدتاً به دلیل تولید و مصرف گاز طبیعی است. اگرچه ممکن است این مصرف بالای گاز طبیعی به دلیل ناکارآمدی تجهیزات موجود باشد، اما به هر حال گاز طبیعی فراورده فسیلی و تجدیدناپذیر است که مشارکت آن در ایجاد گرمایش جهانی و آسیب به سلامت انسان و زیست‌بوم بارها به میان آمده است؛ بنابراین جایگزینی گاز طبیعی با سوخت‌های زیستی که سهم کمتری در نشر کربن دارند، می‌تواند تا حد زیادی به پایداری زیست‌محیطی تولید شکر کمک کند. نتایج این پژوهش نشان داد که انتقال از تولید خطی شکر به تولید زیستی- چرخه‌ای به شکلی چشمگیر منجر به کاهش خسارت‌های زیست‌محیطی به ویژه خسارت به منابع می‌شود. به عبارت بهتر، تولید خطی هر تن شکر خام به خسارت ۱۶۷/۴۱ پوینتی می‌انجامد، در حالی‌که تحت پالایشگاه زیستی این میزان تا ۱۹۳ درصد کاهش می‌یابد. به عبارت بهتر، تولید شکر تحت اقتصاد زیستی- چرخه‌ای به دلیل استفاده از پسماندهای موجود و تبدیل آنها به مواد باارزش افزوده و در نتیجه پرهیز از تولید و استفادهٔ منابع فسیلی منجر به اثرهای مثبت زیست‌محیطی خواهد شد. اگرچه نتایج این پژوهش مطلوب ارزیابی می‌شود اما باگاس و ملاس و سایر پسماندهای موجود در صنایع شکر می‌توانند به صورت موادی ارزش‌گذاری شوند که ازنظر اقتصادی ارزشمندتر هستند. بنابراین پیشنهاد می‌شود که پژوهش‌های آینده، پالایشگاه‌های زیستی شکر در ایران را بر اساس محصولات زیستی متنوع‌تری مورد بررسی زیستی، اقتصادی و اجتماعی قرار دهند.

مراجع

Aghbashlo, M., Mandegari, M., Tabatabaei, M., Farzad, S., Mojarab Soufiyan, M., & Görgens, J. F. (2018). Exergy analysis of a lignocellulosic-based biorefinery annexed to a sugarcane mill for simultaneous lactic acid and electricity production. *Energy*, *149*, 623-638.

Anon. (2021). The state of food security and nutrition in the world 2021 (*Report*). IFAD, UNICEF, WFP, & WHO. Transforming Food Systems for Food Security, Improved Nutrition and Affordable Healthy Diets for All. FAO Rome, Italy.

Anon. (2006a). ISO. *14040 International standard*. Environmental Management–Life Cycle Assessment–Principles and Framework, International Organisation for Standardization, Geneva, Switzerland. Available at: https://www.iso.org.

Anon. (2006b). ISO. *14044 International standard*. Environmental Management–Life Cycle Assessment–Requirements and Guidelines, International Organisation for Standardization, Geneva, Switzerland. Available at: https://www.iso.org.

Bicer, Y., & Dincer, I. (2018). Life cycle assessment of ammonia utilization in city transportation and power generation. *Journal of Cleaner Production*, *170*, 1594-1601.

Chen, H. G., & Zhang, Y. H. P. (2015). New biorefineries and sustainable agriculture: Increased food, biofuels, and ecosystem security. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *47*, 117-132.

Chowdhury, T. H. (2021). Technical-economical analysis of anaerobic digestion process to produce clean energy. *Energy Reports*, *7*, 247-253.

de Medeiros Silva, W. K., Neves, T. I., de Souza Silva, C., Carvalho, M., & Abrah O, R. (2020). Sustainable enhancement of sugarcane fertilization for energy purposes in hot climates. *Renewable Energy*, *159*, 547-552.

Garc a, C. A., Garc a-Trevi O, E. S., Aguilar-Rivera, N., & Armend Riz, C. (2016). Carbon footprint of sugar production in Mexico. *Journal of Cleaner Production*, *112*, 2632-2641.

Gunawan, T. B., Romli, M., & Noor, E. (2019). Life Cycle assessment of cane-sugar in indonesian sugar mill: energy use and GHG emissions. IOP Conference Series. *Materials Science and Engineering*,

536, 12059.

Hosseinzadeh-Bandbafha, H., Khalife, E., Tabatabaei, M., Aghbashlo, M., Khanali, M., Mohammadi, P., Shojaei, T. R., & Soltanian, S. (2019). Effects of aqueous carbon nanoparticles as a novel nanoadditive in water-emulsified diesel/biodiesel blends on performance and emissions parameters of a diesel engine. *Energy Conversion and Management*, *196*, 1153-1166.

Kaab, A., Sharifi, M., Mobli, H., Nabavi-Pelesaraei, A., & Chau, K. (2019). Combined life cycle assessment and artificial intelligence for prediction of output energy and environmental impacts of sugarcane production. *Science of The Total Environment*, *664*, 1005-1019. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.02.004.

Khounani, Z., Hosseinzadeh-Bandbafha, H., Moustakas, K., Talebi, A. F., Goli, S. A. H., Rajaeifar, M. A., Khoshnevisan, B., Jouzani, G. S., Peng, W., & Kim, K. H. (2021). Environmental life cycle assessment of different biorefinery platforms valorizing olive wastes to biofuel, phosphate salts, natural antioxidant, and an oxygenated fuel additive (triacetin). *Journal of Cleaner Production*, *278*, 123916.

Mohan, S. V., Dahiya, S., Amulya, K., Katakojwala, R., & Vanitha, T. K. (2019). Can circular bioeconomy be fueled by waste biorefineries-A closer look. *Bioresource Technology Reports*, *7*, 100277.

Nemecek, T., Kägi, T., & Blaser, S. (2007). Life cycle inventories of agricultural production systems. *Final Report Ecoinvent v2.* 0 No, 15.

Nieder-Heitmann, M., Haigh, K. F., & Görgens, J. F. (2019). Life cycle assessment and multi-criteria analysis of sugarcane biorefinery scenarios: Finding a sustainable solution for the South African sugar industry. *Journal of Cleaner Production*, *239*, 118039.

Noya, I., González-García, S., Bacenetti, J., Fiala, M., & Moreira, M. T. (2018). Environmental impacts of the cultivation-phase associated with agricultural crops for feed production. *Journal of Cleaner Production*, *172*, 3721-3733.

Prasara-A, J., Gheewala, S. H., Silalertruksa, T., Pongpat, P., & Sawaengsak, W. (2019). Environmental and social life cycle assessment to enhance sustainability of sugarcane-based products in Thailand. *Clean Technologies and Environmental Policy*, *21*(7), 1447-1458.

Pryor, S. W., Smithers, J., Lyne, P., & van Antwerpen, R. (2017). Impact of agricultural practices on energy use and greenhouse gas emissions for South African sugarcane production. *Journal of Cleaner Production*, *141*, 137-145.

Renouf, M. A., Wegener, M. K., & Pagan, R. J. (2010). Life cycle assessment of Australian sugarcane production with a focus on sugarcane growing. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, *15*(9), 927-937.

Sawaengsak, W., & Gheewala, S. H. (2017). Analysis of social and socio-economic impacts of sugarcane production: A case study in Nakhon Ratchasima province of Thailand. *Journal of Cleaner Production*, *142*, 1169-1175.

Scheel, C. (2016). Beyond sustainability. Transforming industrial zero-valued residues into increasing economic returns. *Journal of Cleaner Production*, *131*, 376-386.

Silalertruksa, T., & Gheewala, S. H. (2018). Land-water-energy nexus of sugarcane production in Thailand. *Journal of Cleaner Production*, *182*, 521-528.

Silalertruksa, T., Pongpat, P., & Gheewala, S. H. (2017). Life cycle assessment for enhancing environmental sustainability of sugarcane biorefinery in Thailand. *Journal of Cleaner Production*, *140*, 906-913.

Silva, D. A. L., Delai, I., Montes, M. L. D., & Ometto, A. R. (2014). Life cycle assessment of the sugarcane bagasse electricity generation in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *32*, 532-547.

Valderrama, C., Quintero, V., & Kafarov, V. (2020). Energy and water optimization of an integrated bioethanol production process from molasses and sugarcane bagasse: A Colombian case. *Fuel*, *260*, 116314.

Von Blottnitz, H., & Curran, M. A. (2007). A review of assessments conducted on bio-ethanol as a transportation fuel from a net energy, greenhouse gas, and environmental life cycle perspective. *Journal of Cleaner Production*, *15*(7), 607-619.

Agricultural Mechanization and Systems Research/Vol.23/No.81/spring 2022/P:75-92
Journal Home Page: https://amsr.areeo.ac.ir

Research Paper

Environmental Assessment of the Transition from Conventional Sugar Production to Biorefinery Production as a Sustainable Strategy to Achieve a Circular Bioeconomy

M. Chenari, M. Khanali*, M. Sharifi, H. Hosseinzadeh-Bandbafha

*Corresponding Author: Associate Professor of Agricultural Mechanization Engineering, Department of Agricultural Machinery Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: khanali@ut.ac.ir
Received: 26 January 2022, Accepted: 22 June 2022
http://doi: 10.22092/AMSR.2022.357611.1408

Abstract

This study aimed to investigate and compare the environmental damage of raw sugar production in the cultivation and industry of Khuzestan province under a conventional linear framework and a circular bioeconomy perspective. The purpose of transition from production systems under linear economy to circular bioeconomy is to eliminate waste, increase the efficiency of materials and energy, and the production of biodiversity products to increase the sustainability of production systems, including food production systems. This study showed that the production per ton of raw sugar under the framework of linear economy leads to a loss of 167.41 Pt, which production and combustion of natural gas in sugarcane processing have the largest share in causing this damage. In comparison, the results of this study showed that the transition from a linear economy to a circular bioeconomy in which molasses and bagasse as the two major wastes of the sugar industry are converted into alcohol and fuel, respectively, resulted in a 193% reduction in total environmental damage. This result emphasizes that sugar production under the circular bioeconomy not only is a viable solution for existing waste management but also significantly reduces the environmental damage caused by sugarcane production and processing.

Keywords: Environmental Consequences, Food Security, Linear Economy, Sustainable Development

© 2022 Agricultural Mehanization and Systems Research, Karaj, Iran. This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license)