



Evaluation of Inputs Affecting Energy and Environmental Indices in Grain and Sweet Corn Production

Nima Shahbazi¹ | Naser Majnoun Hosseini² ✉ | Mohammad Reza Jahansuz³ | Ashkan Jalilian⁴

1. Department of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: nima.shahbazi@ut.ac.ir
2. Corresponding Author, Department of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: mhosseini@ut.ac.ir
3. Department of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: jahansuz@ut.ac.ir
4. Department of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: ashkanjalilian@ut.ac.ir

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received: January 29, 2025

Received in revised form:

March 03, 2025

Accepted: March 15, 2025

Published online: September

23, 2025

Keywords:

Agricultural sustainability, ecological impacts, environmental pollution, input efficiency, resource productivity.

Extended Abstract

Introduction. Industrial agricultural production, in the absence of input consumption, is insufficient to meet the food demands of the country's population. However, the imbalanced consumption of these inputs leads to detrimental environmental effects. To optimize input usage and minimize environmental harm, it is crucial to identify the most frequently consumed and impactful inputs in agricultural systems. The purpose of this study was to evaluate the effective inputs influencing energy and environmental indicators in the cultivation of grain corn and sweet corn in Karaj city.

Materials and Methods. Data for the analysis was collected from both research farms and farmers' fields in the region. The analysis was performed using life cycle assessment (LCA) and the ReCiPe 2016 method, which helps to assess the environmental impacts of agricultural systems by evaluating inputs and outputs across their entire life cycle. This study was conducted at the Educational-Research Farm of the College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran (Karaj), in 2021. The geographical coordinates of the farm are 51 degrees east longitude, 35 degrees and 48 minutes north latitude, with an elevation of 1321 meters above sea level. According to the meteorological station report, the region has a cold and dry climate, with an average annual precipitation of approximately 250 millimeters over the past 30 years. The experimental design was carried out on a farm that served as a control, reflecting regional cropping patterns and agricultural management practices prevalent in the area. Two types of corn—grain corn (cultivar 704) and sweet corn (cultivar Super Sweet Magroot)—were planted over a 1000 square meter area. All planting, maintenance, and harvesting operations followed local practices. Fertilization rates for grain corn included 500 kg ha⁻¹ of urea, 150 kg ha⁻¹ of triple superphosphate, and 130 kg ha⁻¹ of potassium. On the other hand, sweet corn received 400 kg ha⁻¹ of urea, 200 kg ha⁻¹ of triple superphosphate, and 150 kg ha⁻¹ of potassium. The crops were planted at a density of 75,000 plants per hectare.

Results and Discussion. The results revealed that the energy input for grain corn was 30,029.6 MJ ha⁻¹, while the energy input for sweet corn was slightly lower at 28,951.3 MJ ha⁻¹. Regarding energy output, sweet corn produced 446,600 MJ ha⁻¹, which was approximately 213% higher than the 142,590 MJ ha⁻¹ observed for grain corn. This indicates a significantly higher energy output for sweet corn when combined with its energy efficiency index of 0.76, compared to 0.32 for grain corn, illustrates that sweet corn is more energy-efficient than grain corn. Grain corn, however, contributed more significantly to air pollution, accounting for 61.8% of the environmental impact, as well as resource consumption. On the other hand, sweet corn posed greater environmental challenges related to water use (57%) and soil degradation (67.9%) due to its higher consumption of manure, phosphorus, and micronutrients. The environmental assessment of input usage highlighted that chemical fertilizers and diesel fuel had the highest contributions to pollutant emissions in both systems, with sweet corn farming also resulting in a higher human health damage index compared to grain corn. This higher damage index in sweet corn farming is attributed to the nature of the inputs used, including fertilizers and fuel, which are associated with significant environmental and health impacts.

Conclusion. The study emphasizes the importance of adopting more sustainable agricultural practices. The need for optimizing the use of chemical fertilizers and reducing diesel fuel consumption is crucial in mitigating environmental pollutants and ensuring the sustainability of agricultural production systems. By minimizing reliance on high-emission inputs, the environmental impacts of both grain corn and sweet corn farming could be substantially reduced. In addition, further research into alternative practices and technologies could enhance the sustainability of corn production systems, paving the way for more eco-friendly agricultural practices that meet food production needs without compromising environmental health. Ultimately, the findings highlight the necessity for farmers and policymakers to focus on more sustainable management strategies, not only to optimize input usage but also to balance agricultural productivity with environmental preservation. Reducing environmental pollution from agricultural activities and enhancing resource efficiency will be key factors in achieving long-term sustainability for corn farming and other similar agricultural systems. Future studies could explore the use of precision agriculture, organic farming methods, and innovative fertilization techniques to further improve sustainability and reduce the negative environmental footprint of agricultural systems.

Cite this article: Shahbazi, N., Majnoun Hosseini, N., Jahansuz, M.R., & Jalilian, A. (2025). Evaluation of inputs affecting energy and environmental indices in grain and sweet corn production. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 56(3), 97-110. Doi: 10.22059/ijfcs.2025.389066.655124.





انتشارات دانشگاه تهران

علوم گیاهان زراعی ایران

شماره الکترونیکی: ۸۰۸۲-۲۴۲۳

Homepage: <https://ijfcs.ut.ac.ir/>

برآورد نهاده‌های مؤثر بر شاخص‌های انرژی و زیست‌محیطی تولید ذرت شیرین و ذرت دانه‌ای

نیما شهبازی^۱ | ناصر مجنون حسینی^۲ | محمد رضا جهانسوز^۳ | اشکان جلیلیان^۴

۱. گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: nima.shahbazi@ut.ac.ir
۲. نویسنده مسئول، گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: mhoseini@ut.ac.ir
۳. گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: jahansuz@ut.ac.ir
۴. گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: ashkanjalilian@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۱۰ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۲/۱۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۲۵ تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۷/۰۱ کلیدواژه‌ها: آلودگی محیط زیست، بهره‌وری منابع، پایداری کشاورزی، تأثیرات زیست‌محیطی، کارایی نهاده‌ها.	تولیدات کشاورزی صنعتی بدون مصرف نهاده‌ها نمی‌توانند پاسخگوی نیاز غذایی مردم کشور باشند و مصرف بی‌رویه نهاده‌ها اثرات مخرب زیست‌محیطی را به همراه دارد. برای بهینه‌سازی مصرف نهاده‌ها ابتدا نهاده‌های پرمصرف باید شناسایی شوند. در این پژوهش، با هدف شناسایی نهاده‌های مؤثر در شاخص‌های انرژی و زیست‌محیطی در دو گیاه ذرت دانه‌ای و ذرت شیرین در شهرستان کرج در سال ۱۴۰۰، اطلاعات مورد نیاز از سیستم مزرعه تحقیقاتی و مزارع کشاورزان منطقه جمع‌آوری شد. این تحقیق بر اساس ارزیابی چرخه زندگی و روش ReCiPe 2016 مورد بررسی قرار گرفت. نتایج مقایسه سیستم‌های کشت ذرت دانه‌ای و ذرت شیرین نشان داد که انرژی ورودی در ذرت دانه‌ای ۳۰۰۲۹/۶ مگاژول در هکتار و در ذرت شیرین ۲۸۹۵۱/۳ مگاژول بود. انرژی خروجی ذرت شیرین (۴۴۶۶۰۰ مگاژول)، حدود ۲۱۳ درصد بیشتر از ذرت دانه‌ای (۱۴۲۵۹۰ مگاژول) بود. شاخص بهره‌وری انرژی در ذرت شیرین ۰/۷۶ و در ذرت دانه‌ای ۰/۳۲ کیلوگرم بر مگاژول بود. از نظر زیست‌محیطی، ذرت دانه‌ای سهم بیشتری در آلودگی هوا (۶۱/۸٪) داشت، درحالی‌که ذرت شیرین با سهم بیشتر آلودگی در آب (۵۷٪) و خاک (۶۷/۹٪) چالش بیشتری در این بخش‌ها ایجاد کرد. بررسی نهاده‌های مصرفی نشان داد کودهای شیمیایی (نیترोजن، فسفر و پتاسیم) و سوخت دیزلی بیشترین سهم را در انتشار آلاینده‌ها داشتند. به‌طور کلی، برای افزایش پایداری تولید ذرت براساس نتایج حاصل، بهینه‌سازی مصرف کودهای شیمیایی و سوخت دیزلی به منظور کاهش آلاینده‌ها ضروری است.

استناد: شهبازی، ن.، مجنون حسینی، ن.، جهانسوز، م.ر.، و جلیلیان، ا. (۱۴۰۴). برآورد نهاده‌های مؤثر بر شاخص‌های انرژی و زیست‌محیطی تولید ذرت شیرین و ذرت دانه‌ای. *علوم گیاهان زراعی ایران*، ۵۶(۳)، ۹۷-۱۱۰. DOI: 10.22059/ijfcs.2025.389066.655124



© نویسندگان

ناشر: موسسه انتشارات دانشگاه تهران.

۱. مقدمه

محصول ذرت پس از گندم و برنج در ایران اهمیت ویژه‌ای دارد که به دلیل کاربردهای فراوان آن در صنایع مختلف از جمله خوراک انسان، دام، داروسازی و صنایع غذایی توجه خاصی به آن شده است. ذرت به عنوان یکی از عمده‌ترین گیاهان زراعی در جذب و ذخیره انرژی آزاد روی زمین شناخته می‌شود و به همین دلیل به آن "پادشاه غلات" گفته می‌شود (Hossein *et al.*, 2024). ذرت دانه‌ای و ذرت شیرین جایگاه ویژه‌ای در سیستم تناوبی با سایر گیاهان زراعی دارد، به همین دلیل از دو منظر انرژی و زیست‌محیطی اهمیت خاصی دارد (Hossein *et al.*, 2024). محیط زیست و کشاورزی به دلیل وابستگی به منابع و فرآیندهای طبیعی به شکلی پیچیده به هم پیوسته‌اند. لذا، فعالیت‌های کشاورزی می‌توانند تأثیرات مثبت و منفی بر محیط زیست داشته باشند. از جمله تأثیرات منفی آن می‌توان به استفاده بیش از حد مواد شیمیایی کشاورزی، کودها و منابع انرژی تجدیدناپذیر، تصرف اراضی، تخریب زیستگاه‌های حیات وحش و کاهش تنوع اکوسیستم اشاره کرد (Jalilian *et al.*, 2023). در واکنش به رشد جمعیت، کاهش اراضی زراعی و افزایش استانداردهای زندگی، میزان استفاده از ورودی‌های پرانرژی در سیستم‌های تولید کشاورزی به‌طور چشم‌گیری افزایش یافته است. تولید و مصرف غذا به شکل فعلی، ناپایداری فزاینده‌ای در سیستم‌های کشاورزی ایجاد کرده است. با این حال، اتکای شدید این سیستم‌ها به انرژی، از عوامل اصلی بروز مشکلات زیست‌محیطی همچون آلودگی آب‌های زیرزمینی و گرمایش جهانی به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه به شمار می‌رود. آلودگی آب‌های زیرزمینی می‌تواند نتیجه فعالیت‌های رایج بسیاری باشد از جمله استفاده نادرست از کودها و آفت‌کش‌ها، کودهای شیمیایی و حیوانی، سوختن سوخت‌های فسیلی، دفع زباله‌های دامی و کشاورزی و بهره‌گیری از مواد شیمیایی (Jalilian *et al.*, 2023).

در تحقیقات مرتبط با علوم کشاورزی و مدیریت زراعی، هدف اصلی ارتقای تولید است که باید همزمان با بهبود کارایی انرژی و افزایش بهره‌وری اقتصادی صورت پذیرد. در این راستا، مدیریت بهینه نهاده‌های مصرفی در فرآیندهای تولید، اهمیت کلیدی پیدا می‌کند. بهره‌گیری از راهکارهای علمی و عملی مناسب می‌تواند از هدررفت منابع جلوگیری کرده و به افزایش پایداری در سیستم‌های تولیدی منجر شود (Javam *et al.*, 2020). افزایش بهره‌وری در مصرف انرژی و مدیریت بهینه منابع انرژی، یک راهبرد کلیدی برای کاهش اثرات زیان‌بار زیست‌محیطی مرتبط با مصرف انرژی در فرآیندهای تولید مواد غذایی است. این رویکرد نه تنها موجب صرفه‌جویی اقتصادی می‌شود، بلکه با حفظ منابع فسیلی و کاهش آلودگی هوا، نقشی اساسی در ارتقای پایداری بلندمدت سیستم‌های تولیدی ایفا می‌کند (Jalilian *et al.*, 2023). به همین دلیل، تحقیقات بسیاری روی مدیریت انرژی متمرکز شده است. استفاده ناپایدار از نهاده‌های کشاورزی مانند کودهای شیمیایی، سموم و سوخت‌های فسیلی، می‌تواند منجر به پیامدهای زیست‌محیطی جدی نظیر گرمایش جهانی، کاهش تنوع زیستی و تخریب کیفیت خاک و هوا شود. برای حفظ تعادل زیست‌محیطی، مدیریت پایدار نهاده‌ها به عنوان گامی اساسی در جهت توسعه پایدار باید مورد توجه قرار گیرد (Mostashari-Rad *et al.*, 2021a). روش‌های مختلفی برای ارزیابی اثرات زیست‌محیطی وجود دارد که می‌تواند شامل نقشه‌برداری خطرات زیست‌محیطی (ERM)، ارزیابی چرخه زندگی (LCA)، ارزیابی اثرات زیست‌محیطی (EIA)، سیستم چندعاملی (MAS)، روش برنامه‌ریزی خطی چندگانه (LP) و شاخص‌های زیست‌محیطی-کشاورزی (AEI) باشد. روش LCA به‌طور گسترده‌ای در تحقیقات برای بررسی اثرات زیست‌محیطی منابع مختلف انرژی استفاده شده است. با این روش، امکان تعیین میزان آلاینده‌ی یک محصول از جمله آلاینده‌ی هوا، خاک و آب وجود دارد (Kim *et al.*, 2009; Mostashari-Rad *et al.*, 2021b). ارزیابی تأثیرات زیست‌محیطی چهار رقم ذرت بر اساس نرخ‌های مختلف کود نیتروژن نشان داد با افزایش نرخ نیتروژن، میزان انتشار گازهای CH_4 ، CO_2 ، NO_x ، N_2O ، NH_3 و SO_2 افزایش می‌یابد، درحالی‌که میزان محصول ذرت افزایش نیافت (Sadeghi & Noorhosseini, 2020). یوسفی و همکاران (2014) نتیجه گرفتند که کاهش استفاده از کودهای شیمیایی و سوخت دیزل در تولید ذرت برای مدیریت بهتر جریان انرژی، کاهش پتانسیل گرمایش جهانی و بحران‌های زیست‌محیطی ضروری است. بررسی دیگری روی گیاه ذرت نشان داد سهم انرژی مستقیم و غیر مستقیم در تولید ذرت به‌ترتیب ۶۱/۵۹ و ۳۸/۴۱ درصد می‌باشد، همچنین بیشترین اثر مخرب بر محیط زیست را نهاده‌های شیمیایی ایجاد کردند (Hossein *et al.*, 2024). بررسی‌های دیگر نیز نشان می‌دهد در فرآیند تولید محصولات کشاورزی صنعتی و فشرده حدود ۱۵ درصد از کل انتشارات CO_2 جهان تولید می‌شود (Mostashari-Rad *et al.*, 2021a). کشت ذرت با

مالج‌های پلاستیکی موجب افزایش ۱۳ درصدی عملکرد گیاه نسبت به شاهد شد، اما به دلیل مصرف پلاستیک و سایر نهاده‌های شیمیایی، شاخص آسیب به گرمایش جهانی را نسبت به شاهد افزایش داد (Gao *et al.*, 2022). بنابراین، با توجه به اهمیت ذرت دانه‌ای و ذرت شیرین در مصارف خوراکی و دامی کشور، و همچنین بررسی و مقایسه اثرات زیست‌محیطی و انرژی تولید این محصولات، پژوهش حاضر با هدف ارزیابی شاخص‌های زیست‌محیطی و انرژی تولید این دو گیاه تابستانه در شرایط آب و هوایی کرج انجام شد.

۲. روش‌شناسی پژوهش

این آزمایش در مزرعه آموزشی-پژوهشی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران (کرج) در سال ۱۴۰۰ اجرا شد. مشخصات جغرافیایی محل اجرای، به طول جغرافیایی ۵۱ درجه شرقی، عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۴۸ دقیقه شمالی و ارتفاع از سطح دریا ۱۳۲۱ متر است. بر اساس گزارش ایستگاه هواشناسی، این منطقه دارای آب و هوای سرد و خشک می‌باشد و میانگین ۳۰ ساله بارندگی آن حدود ۲۵۰ میلی‌متر است. طرح آزمایشی در مزرعه به عنوان شاهد نسبت به منطقه انجام شد، به‌طوری‌که براساس الگوی کشت و مدیریت زراعی منطقه، دو گیاه ذرت دانه‌ای (رقم ۷۰۴) و ذرت شیرین (رقم سوپر سوئیت ماگرووت) در مساحت ۱۰۰۰ متر مربع کشت شد. تمامی مراحل کاشت، داشت و برداشت براساس شیوه کشت منطقه انجام شد، همچنین سطوح کودی ۵۰۰ کیلوگرم اوره، ۱۵۰ کیلوگرم سوپر فسفات تریپل و ۱۳۰ کیلوگرم پتاسیم برای ذرت دانه‌ای و ۴۰۰ کیلوگرم در هکتار اوره، ۲۰۰ کیلوگرم سوپر فسفات تریپل و ۱۵۰ کیلوگرم پتاسیم برای ذرت شیرین استفاده شد. تراکم ذرت دانه‌ای و شیرین ۷۵ هزار بوته در هکتار بود. نهاده‌های مصرفی در فرآیند تولید ذرت دانه‌ای و ذرت شیرین براساس میانگین منطقه در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. نهاده‌های مصرف‌شده در کشت ذرت دانه‌ای و ذرت شیرین در یک هکتار.

Inputs	Unit	Grain Corn	Sweet Corn
Human labor	h ha ⁻¹	360	420
Machinery	h ha ⁻¹	9.4	6.4
Diesel fuel	L ha ⁻¹	140	90
Nitrogen	kg ha ⁻¹	230	184
Phosphate	kg ha ⁻¹	70	92
Potassium	kg ha ⁻¹	65	75
Micronutrients	kg ha ⁻¹	8	20
Manure	kg ha ⁻¹	6000	16000
Chemical biocides	L ha ⁻¹	5	5
Seed	kg ha ⁻¹	25	25
Output	kg ha ⁻¹	9700	22000

در محصول ذرت، نیتروژن به‌صورت تقسیط و به نسبت یک‌سوم در مرحله دو برگ، یک‌سوم در مرحله شش برگ (آغاز رشد طولی ساقه)، و یک‌سوم در زمان ظهور گل‌تاجی اعمال شد. آبیاری و کنترل علف‌های هرز نیز بر اساس شیوه‌های متداول کشت در منطقه انجام شد. با در نظر گرفتن تطابق نتایج کشت مزرعه‌ای با روش‌های مرسوم منطقه و ارائه راهکارهای زراعی مرتبط با اثرات زیست‌محیطی در چارچوب ارزیابی چرخه حیات (LCA)، صفات عملکرد ذرت دانه‌ای و ذرت شیرین در پایان فصل اندازه‌گیری شد. نمونه‌برداری از دو گیاه ذرت شیرین و ذرت دانه‌ای از سطح پنج متر مربع و در سه تکرار انجام شد. کشت به‌صورت مکانیزه و با استفاده از ردیف‌کار خطی انجام شد. آبیاری نیز بر اساس نیاز گیاه و مطابق با الگوی آبیاری مزرعه تحقیقاتی صورت پذیرفت. در تمامی مراحل، با استفاده از اطلاعات میدانی جمع‌آوری‌شده از مزارع استان، تلاش شد مراحل کشت مطابق با الگوی رایج منطقه اجرا شود. نتایج حاصل در مزرعه، همچنین کلیه اطلاعات مورد نیاز آماری در مراحل کاشت، داشت و برداشت ذرت

شیرین و ذرت دانه‌ای در شرایط آب و هوایی استان البرز جهت ارزیابی شاخص‌های انرژی و اثرات زیست‌محیطی مورد بررسی جمع‌آوری شد. برای تعیین میزان انرژی معادل نهاده‌ها و ستانده‌ها از ضرایب انرژی متناظر هر یک استفاده شد (جدول ۲).

جدول ۲. ضرایب انرژی ورودی و خروجی در کشت ذرت دانه‌ای و ذرت شیرین.

Inputs and Outputs	Unit	Coefficient equivalent (MJ unit ⁻¹)	Reference
Inputs			
Human labor	h	1.96	(Kaab <i>et al.</i> , 2019)
Machinery	h	62.70	(Ghasemi-Mobtaker <i>et al.</i> , 2020)
Diesel fuel	L	56.31	(Nabavi-Pelesaraei <i>et al.</i> , 2018)
Nitrogen	kg	66.14	(Nabavi-Pelesaraei <i>et al.</i> , 2018)
Phosphate	kg	12.44	(Nabavi-Pelesaraei <i>et al.</i> , 2018)
Potassium (K ₂ O)	kg	11.15	(Nabavi-Pelesaraei <i>et al.</i> , 2018)
Micronutrients	kg	120	(Hesampour <i>et al.</i> , 2022)
Manure	kg	0.30	(Tuti <i>et al.</i> , 2012)
Herbicide	kg	238	(Kaab <i>et al.</i> , 2019)
Insecticide	kg	101	(Ozkan <i>et al.</i> , 2004)
Grain Maize Seed	kg	14.7	(Zahedi <i>et al.</i> , 2015)
Sweet corn Seed	kg	15.7	(Mohammadzadeh <i>et al.</i> , 2018)
Outputs			
Grain Seed	kg	14.7	(Mohammadzadeh <i>et al.</i> , 2018)
Sweet corn	kg	20.03	(Kokten <i>et al.</i> , 2018)

بنابراین، انرژی معادل نهاده‌های بذری، کودهای شیمیایی، سموم شیمیایی، نیروی انسانی، سوخت دیزل و الکتریسیته مصرفی از ضرب میزان مصرف هر یک از آن‌ها در ضریب انرژی ویژه آن نهاده طبق رابطه (۱) به دست می‌آید:

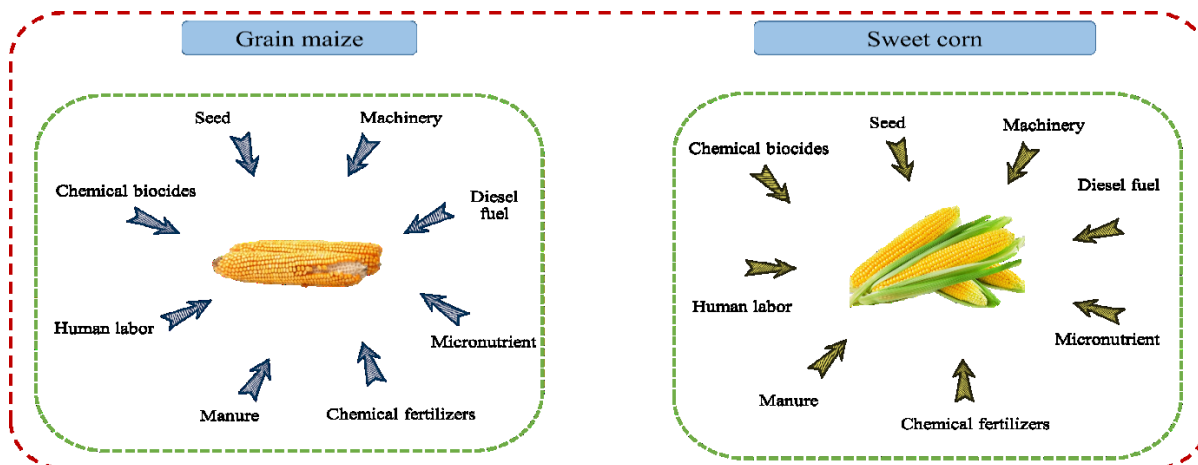
$$E_{\text{input}} = I_{\text{consumption}} \times ec_{\text{input}} \quad (\text{رابطه ۱})$$

که در آن E_{input} انرژی معادل نهاده‌های مصرفی برحسب مگاژول، $I_{\text{consumption}}$ میزان نهاده مصرفی (نیروی انسانی، سوخت دیزل و ...) برحسب واحد آن و واحد ec_{input} محتوای انرژی نهاده برحسب مگاژول بر واحد می‌باشد. برای ارزیابی میزان انرژی مصرفی و تولیدشده در فرآیند تولید محصول، از شاخص‌های متعددی استفاده شد که این شاخص‌ها امکان شناخت دقیق‌تری از وضعیت انرژی در بخش کشاورزی را فراهم می‌کنند. شاخص‌هایی مانند نسبت انرژی (رابطه ۲)، بهره‌وری انرژی (رابطه ۳)، انرژی ویژه (رابطه ۴) و افزوده خالص انرژی (رابطه ۵) محصول محاسبه شد تا به تحلیل جامع‌تری از کارایی انرژی کمک نمایند (Jalilian *et al.*, 2023). در این روابط Yield عملکرد محصول در هکتار، Output energy انرژی خروجی سیستم، Input energy انرژی ورودی سیستم در هکتار می‌باشد.

در پژوهش حاضر، ارزیابی چرخه زندگی به منظور تحلیل اثرات زیست‌محیطی تولید ذرت شیرین و ذرت دانه‌ای استفاده شد.

$$\begin{aligned} \text{Energy Ratio} &= \text{Output energy (MJ ha}^{-1}\text{)} / \text{Input energy (MJ ha}^{-1}\text{)} && (\text{رابطه ۲}) \\ \text{Energy Productivity} &= \text{Yield (kg ha}^{-1}\text{)} / \text{Input energy (MJ ha}^{-1}\text{)} && (\text{رابطه ۳}) \\ \text{Specific Energy} &= \text{Input energy (MJ ha}^{-1}\text{)} / \text{Yield (kg ha}^{-1}\text{)} && (\text{رابطه ۴}) \\ \text{Net Energy Gain} &= \text{Output energy (MJ ha}^{-1}\text{)} - \text{Input energy (MJ ha}^{-1}\text{)} && (\text{رابطه ۵}) \end{aligned}$$

در این تحقیق، واحد کارکردی به عنوان یک هکتار از محصولات تولیدی ذرت دانه‌ای و ذرت شیرین تعیین شد که تمامی آلایندگی‌های تولید و منتشرشده بر اساس نهاده‌های مصرف‌شده برای تولید این میزان محصول در هکتار مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. یکی از مراحل مهم و ضروری در تعیین هدف و دامنه تحقیق، انتخاب مرز سامانه است. اهمیت این موضوع زمانی نمایان می‌شود که مشکلات زیست‌محیطی مرتبط با سامانه‌های کشاورزی حتی پس از برداشت محصول و در طول مراحل پس از برداشت ادامه پیدا کنند (Khoshnevisan *et al.*, 2013). مرز سامانه مورد مطالعه در این تحقیق مطابق با شکل ۱ توصیف شده است.



شکل ۱. مرز سامانه مورد مطالعه تولید کشت ذرت دانه‌ای و ذرت شیرین.

محاسبه اثرات زیست‌محیطی تولید محصول بر اساس روش 2016 ReCiPe انتخاب شد (Mostashari-Rad *et al.*, 2020). در این روش، سه نقطه نهایی شامل سلامت انسان، منابع و اکوسیستم‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرند. برای ارزیابی سلامت انسان از واحد DALY استفاده می‌شود که معادل یک خسارت است؛ یعنی معادل از دست‌دادن یک سال از عمر یک فرد یا آن که فردی به مدت چهار سال با معلولیت ۲۵ درصد زندگی کند. اکوسیستم‌ها با واحد species.yr اندازه‌گیری می‌شوند که نشان‌دهنده از دست‌رفتن تمام گونه‌ها از یک متر مربع در طول یک سال است. همچنین، واحد منابع 2013 USD به کار می‌رود که ارزش اقتصادی منابع را بر حسب دلار نشان می‌دهد. این روش ۱۷ نقطه میانی دارد. در پایان این بخش با بی‌بعد کردن هر سه شاخص و جمع آن‌ها، شاخص آسیب وزن‌دهی شده^۳ به‌دست خواهد آمد که این مقدار نماینده بخش LCA می‌باشد. به‌منظور انجام محاسبات ارزیابی چرخه زندگی از نرم‌افزار SimaPro V. 9.6 استفاده شد. همچنین برای رسم اشکال نیز از نرم‌افزار اکسل استفاده شد.

۳. یافته‌های پژوهش و بحث

۳-۱. شاخص‌های انرژی و سهم انرژی نهاده‌ها در سیستم‌های تولید ذرت دانه‌ای و ذرت شیرین

نتایج بررسی میزان انرژی ورودی و خروجی سیستم‌های کشت ذرت دانه‌ای و ذرت شیرین نشان داد که مقدار مصرف نهاده‌های نیروی انسانی، کود دامی، کود فسفر، کود پتاسیم و ریزمغذی‌ها در کشت ذرت شیرین بیشتر از کشت ذرت دانه‌ای بود (جدول ۳). همچنین نتایج نشان داد مقدار نهاده بذر برای کشت ذرت شیرین بیشتر از کشت ذرت دانه‌ای می‌باشد که این امر به دلیل معادل انرژی بالاتر آن بود (جدول ۱). انرژی لازم برای نهاده نیروی کار به‌ترتیب برای دو محصول ذرت شیرین و ذرت دانه‌ای ۸۲۳/۲ و ۷۰۵/۶ مگاژول بر هکتار می‌باشد که ۱۶/۶۶ درصد برای ذرت شیرین بیشتر از ذرت دانه‌ای می‌باشد که این افزایش به دلیل برداشت دستی ذرت شیرین در مرحله شیرینی جهت مصرف تازه‌خوری می‌باشد (جدول ۳). مجموع انرژی مصرفی در ذرت دانه‌ای ۱۷۷۶۷/۷ مگاژول در هکتار بود که نسبت به ذرت شیرین با ۱۶۵۵۰/۵ مگاژول در هکتار ۷/۳۵ درصد انرژی ورودی بالاتری داشت، این افزایش به دلیل مصرف کود نیتروژن بالاتر در کشت ذرت دانه‌ای بود، درحالی‌که دیگر نهاده‌ها همچون فسفر، پتاس و کود ریزمغذی در ذرت شیرین بالاتر از ذرت دانه‌ای بود (جدول ۳). به‌طور کلی نتایج نشان داد که ذرت دانه‌ای با مجموع انرژی ورودی ۳۰۰۲۹/۶ مگاژول در هکتار نسبت به ذرت شیرین با مجموع انرژی ورودی ۲۸۹۵۱/۴ مگاژول در هکتار در حدود ۳/۷ درصد انرژی ورودی بالاتری دارد، درحالی‌که انرژی خروجی ذرت شیرین با ۴۴۶۶۰۰ مگاژول در هکتار نسبت به ذرت دانه‌ای با ۱۴۲۵۹۰ مگاژول در هکتار، ۲۱۳/۲ بالاتر بود که نشان‌دهنده عملکرد وزنی بالاتر و همچنین معادل انرژی بیشتر نسبت به عملکرد ذرت دانه‌ای است (جدول ۳). انرژی خروجی رابطه مستقیمی با میزان عملکرد و ضریب انرژی آن دارد، از این رو عملکرد ذرت شیرین با توجه به

2. Midpoint

3. Total weighted damage

مقدار قابل توجه آن موجب انرژی خروجی بالاتر نسبت به ذرت دانه‌ای می‌گردد. بررسی سهم هر یک از نهاده‌ها در انرژی ورودی هر سیستم کشت ذرت نشان داد در کشت ذرت دانه‌ای، بیشترین سهم به ترتیب مربوط به کودهای شیمیایی (۵۹/۱۶٪)، سوخت دیزلی (۲۶/۲۶٪) و کود دامی (۵/۹۹٪) بود، کمترین سهم نیز با ۱/۲۵ درصد مربوط به بذر بود (جدول ۳). در تولید ذرت شیرین نیز بیشترین سهم مربوط به کودهای شیمیایی، سوخت دیزلی و کود دامی بود (جدول ۳). نتایج این بخش نشان می‌دهد در جهت کاهش انرژی ورودی کشت ذرت اولویت‌بندی با نهاده‌هایی می‌باشد که سهم عمده‌ای از انرژی ورودی را به خود اختصاص داده‌اند که این امر می‌تواند به کشاورزی پایدارتر منجر شود. افزایش ماده آلی خاک، استفاده از کودهای دامی که نسبت به کودهای شیمیایی معادل انرژی پایین‌تری دارند و همچنین کم‌خاک‌ورزی می‌تواند در کاهش نهاده‌های پر انرژی مؤثر باشد.

جدول ۳. میزان انرژی ورودی و خروجی برای کشت ذرت دانه‌ای و ذرت شیرین در هکتار.

Inputs	Grain (MJ ha ⁻¹)	Energy Input Share (%)	Sweet corn (MJ ha ⁻¹)	Energy Input Share (%)
Human labor	705.6	2.34%	823.2	2.84%
Machinery	589.38	1.96%	401.28	1.38%
Diesel fuel	7883.4	26.25%	5067.90	17.50%
Chemical fertilizers	17767.75		16550.49	
Nitrogen	15212.2		12169.76	
Phosphate	870.8	59.16%	1144.48	57.16%
Potassium (K ₂ O)	724.75		836.25	
Micronutrients	960		2400	
Manure	1800	5.99%	4800	16.59%
Chemical biocides	916		916	
Herbicide	714	3.05%	714	3.16%
Insecticide	202		202	
Seed	367.5	1.25%	392.5	1.37%
Inputs Energy	30029.63	100%	28951.37	100%
Output Energy	142590		446600	

بررسی شاخص‌های انرژی در دو کشت ذرت شیرین و ذرت دانه‌ای نشان داد که شاخص نسبت انرژی در کشت ذرت شیرین به ۱۵/۴۳ و در کشت ذرت دانه‌ای به ۴/۷۵ رسید. این ارقام نشان‌دهنده آن است که شاخص نسبت انرژی در کشت ذرت شیرین حدود ۲۲۴ درصد بیشتر از ذرت دانه‌ای است (جدول ۴). شاخص نسبت انرژی به عنوان معیاری برای سنجش نسبت انرژی خروجی به ورودی تعریف می‌شود. این نسبت با افزایش انرژی خروجی که نمایانگر بازدهی بالاتر سیستم است یا کاهش انرژی ورودی، بهبود می‌یابد. ارزیابی شاخص بهره‌وری انرژی که بیانگر مقدار محصول تولیدشده (بر حسب کیلوگرم) به ازای هر مگاژول انرژی ورودی است نشان داد این شاخص برای ذرت شیرین ۰/۷۶ و برای ذرت دانه‌ای ۰/۳۲ کیلوگرم بر مگاژول می‌باشد (جدول ۴). بر این اساس، شاخص بهره‌وری انرژی در کشت ذرت شیرین حدود ۱۳۷ درصد بیشتر از کشت ذرت دانه‌ای است. کاهش میزان انرژی ورودی و افزایش بازدهی محصول در واحد سطح از عوامل مؤثر در بهبود این شاخص به شمار می‌روند، ویژگی که در کشت ذرت شیرین قابل مشاهده است. شاخص شدت انرژی که میزان انرژی مصرفی برای تولید محصول را نشان می‌دهد، بیانگر آن است که این مقدار در کشت ذرت دانه‌ای بالاتر از ذرت شیرین است. به‌طور دقیق‌تر، شدت انرژی برای ذرت شیرین ۱/۳۲ و برای ذرت دانه‌ای ۳/۱ مگاژول بر کیلوگرم محاسبه شد (جدول ۴). همچنین، ارزیابی شاخص افزوده خالص انرژی نشان داد که این مقدار در کشت ذرت شیرین به ۴۱۷۶۴۸/۶ مگاژول بر کیلوگرم و در کشت ذرت دانه‌ای به ۱۱۲۵۶۰/۴ مگاژول بر کیلوگرم می‌رسد (جدول ۴). نتایج نشان داد که شاخص مذکور برای کشت ذرت شیرین ۲۷۱ درصد بیشتر از کشت ذرت دانه‌ای است که این اختلاف به عملکرد بالاتر ذرت شیرین در مقایسه با ذرت دانه‌ای بازمی‌گردد. بررسی انرژی‌های مصرفی نشان داد که انرژی مستقیم (مرتبط با فعالیت‌های مزرعه) در کشت ذرت شیرین ۵۸۹۱ و در کشت ذرت دانه‌ای ۸۵۸۹ مگاژول بود (جدول ۴). از سوی دیگر، انرژی غیر مستقیم (مرتبط با نهاده‌هایی مانند کود شیمیایی که خارج از مزرعه تولید می‌شوند) به ترتیب در کشت ذرت شیرین و ذرت دانه‌ای به ۲۳۰۶۰/۳ و ۲۱۴۴۰/۶ مگاژول رسید (جدول ۴). مقدار انرژی تجدیدپذیر در کشت ذرت شیرین ۱۲۱۵/۷ و در کشت ذرت دانه‌ای

۱۰۷۳،۱ مگاژول بود. همچنین، انرژی تجدیدناپذیر مصرفی برای کشت ذرت شیرین ۲۷۷۳۵/۷ و برای ذرت دانه‌ای ۲۸۹۵۶/۵ مگاژول اندازه‌گیری شد. این ارقام نشان می‌دهد که انرژی تجدیدناپذیر مصرفی در کشت ذرت دانه‌ای حدود ۴/۴ درصد بیشتر از کشت ذرت شیرین است.

جدول ۴. شاخص‌های انرژی مورد محاسبه برای کشت ذرت دانه‌ای و ذرت شیرین.

Index	Unit	Grain corn	Sweet corn
Energy Ratio	Ratio	4.75	15.43
Energy Productivity	kg MJ ⁻¹	0.32	0.76
Specific Energy	MJ kg ⁻¹	3.10	1.32
Net Energy Gain	MJ ha ⁻¹	112560.37	417648.63
Direct Energy	MJ ha ⁻¹	8589	5891.10
Indirect Energy	MJ ha ⁻¹	21440.63	23060.27
Renewable Energy	MJ ha ⁻¹	1073.1	1215.70
Non-renewable Energy	MJ ha ⁻¹	28956.53	27735.67

در پژوهشی دیگر که روی کشت ذرت دانه‌ای در سیستم‌های مختلف خاک‌ورزی انجام شد، مشخص شد که بیشترین میزان انرژی مصرفی مربوط به کودهای شیمیایی، ماشین‌آلات کشاورزی و سوخت دیزلی است. همچنین بالاترین بازده انرژی و افزوده خالص انرژی در سیستم کم‌خاک‌ورزی با استفاده از دیسک به‌دست آمده است (Afzali Gorouh *et al.*, 2021). پژوهشی دیگر نشان داد انرژی مستقیم، غیر مستقیم، تجدیدپذیر و غیر قابل تجدیدپذیر در کشت ذرت به‌ترتیب ۶۱/۶، ۳۸/۴، ۱۶/۰۳ و ۸۳/۹۷ درصد می‌باشد، همچنین بهره‌وری انرژی، تولید انرژی، انرژی خالص و انرژی ویژه به‌ترتیب برابر با ۴۱/۴، ۲۰/۰۲ کیلوگرم بر مگاژول، ۶۷۵۳۷۹/۸۴ مگاژول در هکتار و ۴/۸۸ مگاژول بر کیلوگرم بودند (Hosseini *et al.*, 2024). بررسی دیگری نشان داد عملکرد دانه ذرت با اندازه مزرعه تغییر نمی‌کند، اما افزایش اندازه مزرعه باعث کاهش نرخ‌های ورودی‌های کشاورزی، تخلیه انرژی، و انتشار گازهای گلخانه‌ای در واحد سطح (هر هکتار) و افزایش کارایی استفاده از انرژی شد. ورودی‌های کشاورزی مرتبط با کود و سوخت تأثیر عمده‌ای در تغییرات کارایی استفاده از انرژی داشت (Zhang *et al.*, 2021). مطالعه دیگری نشان داد استفاده بهینه از کود نیتروژن موجب کاهش ۴۵ درصدی انرژی غیر قابل تجدیدپذیر و افزایش ۷۴ درصد کارایی استفاده از انرژی شد (Yao *et al.*, 2022). بررسی شاخص انرژی در گیاه گندم نشان داد سهم کود نیتروژن در انرژی مصرفی در حدود ۵۵ تا ۶۸ درصد و سوخت مصرفی بین ۱۵ تا ۳۱ درصد می‌باشد (Khalaj *et al.*, 2023). تحقیق در زمینه بهره‌وری انرژی در تولید گندم و کلزا در شهرستان خرمشهر نشان داد که میزان مصرف انرژی در هر هکتار از مزارع گندم و کلزا به‌ترتیب معادل ۴۱۸۱۰ و ۳۳۵۱۷ مگاژول بوده است. این مطالعه نشان داد که بیشترین سهم مصرف انرژی مربوط به نهاده‌های الکتریسته، کود نیتروژن و سوخت بوده است (Khodaei Joghani *et al.*, 2022). نتایج تحقیق دیگری که بر سیستم‌های کشت بامیه انجام شد نشان داد که عمده مصرف انرژی مربوط به نهاده‌های سوخت دیزلی و کودهای شیمیایی بوده است (Jalilian *et al.*, 2023). در بررسی مصرف انرژی در فرآیند تولید پنبه در استان گلستان مشخص شد که حدود ۳۰ درصد از انرژی غیر مستقیم صرف تولید کود نیتروژن می‌شود، درحالی‌که ۳۹ درصد از انرژی مستقیم به بکارگیری نیروی انسانی اختصاص دارد. این نتایج اهمیت بالای مصرف انرژی را در مراحل مختلف تولید پنبه، به‌ویژه در تولید کود و استفاده از نیروی کار نشان می‌دهند (Arefi *et al.*, 2018). مطالعه بهره‌وری انرژی در تولید گندم و کلزا در شهرستان خرمشهر نشان داد که کارایی مصرف انرژی برای گندم برابر با ۱/۳۲ و برای کلزا برابر با ۲/۱۵ بود (Khodaei Joghani *et al.*, 2022). مقایسه شاخص‌های انرژی گندم و زعفران نشان داد بهره‌وری انرژی برای زعفران و گندم به‌ترتیب ۰/۰۰۰۱۹ و ۰/۰۹۷ کیلوگرم به ازای مگاژول انرژی می‌باشد و بالاترین سهم از انرژی ورودی به مزارع گندم به کود نیتروژن و سوخت و برای زعفران به بنه و الکتریسته اختصاص داشت (Khorramdel *et al.*, 2020).

۳-۲. ارزیابی شاخص‌های زیست‌محیطی ذرت دانه‌ای و ذرت شیرین

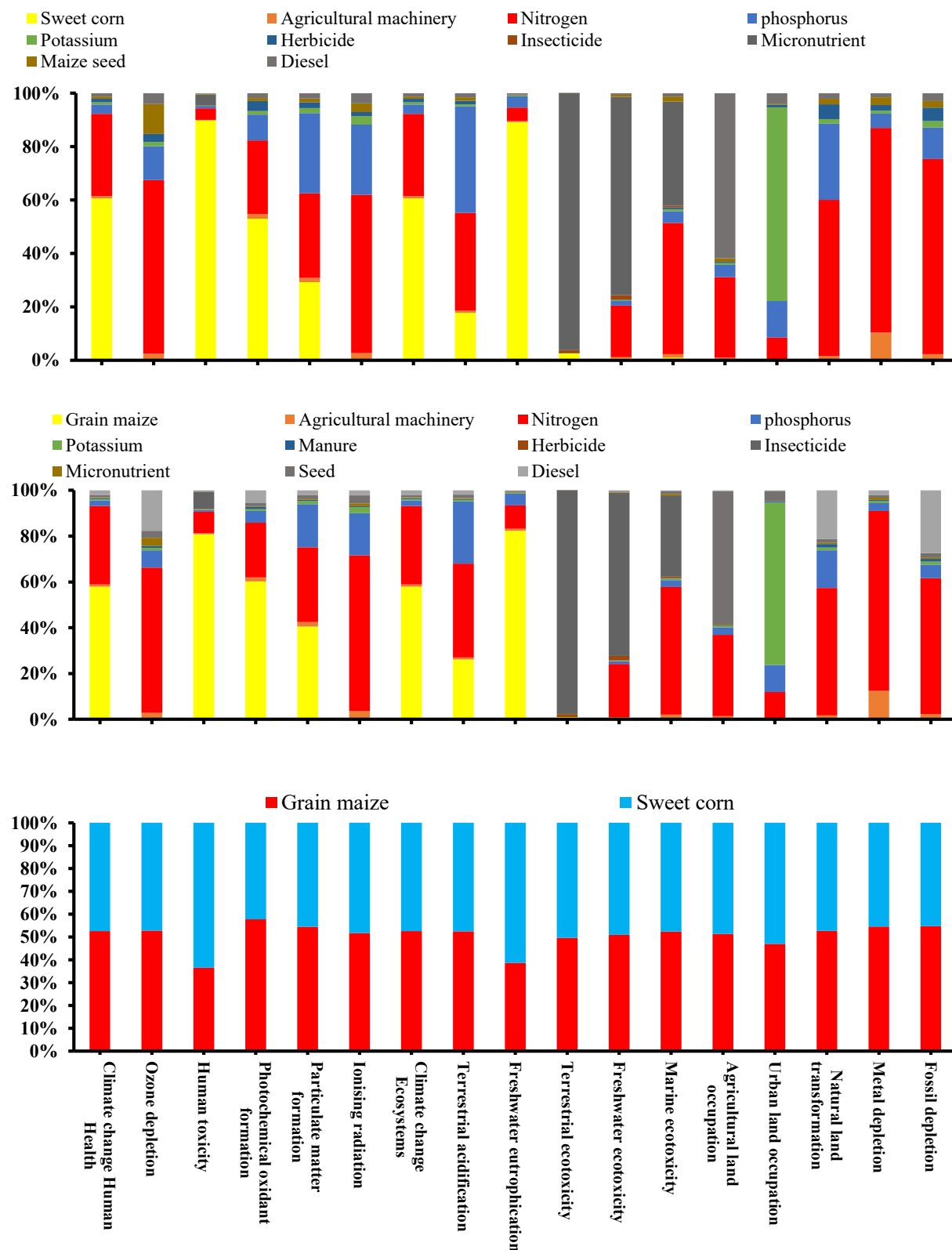
یافته‌های این پژوهش در شاخص‌های میانی روش ReCiPe 2016 نشان داد که در کشت ذرت دانه‌ای و ذرت شیرین، انتشار مستقیم آلاینده‌ها از فرآیند تولید نهاده‌های ورودی به سیستم در مقایسه با انتشارات غیر مستقیم که ناشی از مصرف نهاده‌ها در

مزرعه است، سهم بیشتری در شاخص‌هایی مانند تغییرات اقلیمی، سمیت انسانی، تخریب اکوسیستم و اوتروفیکاسیون آب‌های شیرین داشته است (شکل ۲). علاوه بر این، در شاخص‌های دیگری نظیر تخریب لایه ازن، تغییرات کاربری زمین و کاهش منابع فسیلی، کودهای شیمیایی حاوی نیتروژن، فسفر و پتاسیم به همراه سوخت دیزل بیشترین نقش را در تولید آلاینده‌ها ایفا کردند (شکل ۲). بررسی مقایسه‌ای دو سیستم تولید ذرت دانه‌ای و ذرت شیرین نشان داد در اکثر شاخص‌های میانی، سهم ذرت دانه‌ای در انتشار آلاینده‌ها بیشتر می‌باشد؛ با این حال ذرت شیرین با سهم ۶۳ درصدی در شاخص سمیت انسان و ۶۱ درصدی در اوتروفیکاسیون آب شیرین نسبت به ذرت دانه‌ای میزان آلاینده‌ی بیشتری تولید می‌کند. با این حال میانگین سهم ذرت دانه‌ای از انتشارات زیست‌محیطی در ۱۷ شاخص میانی ۲۰۱۶ ReCiPe ۵۰/۷ درصد و سهم ذرت شیرین ۴۹/۲ درصد می‌باشد (شکل ۲). بنابراین هر دو کشت ذرت دانه‌ای و ذرت شیرین سهم برابری در انتشارات ۱۷ شاخص میانی دارند و می‌بایست بهینه‌سازی مصرف نهاده‌ها جهت کاهش انتشارات در هر دو کشت صورت گیرد.

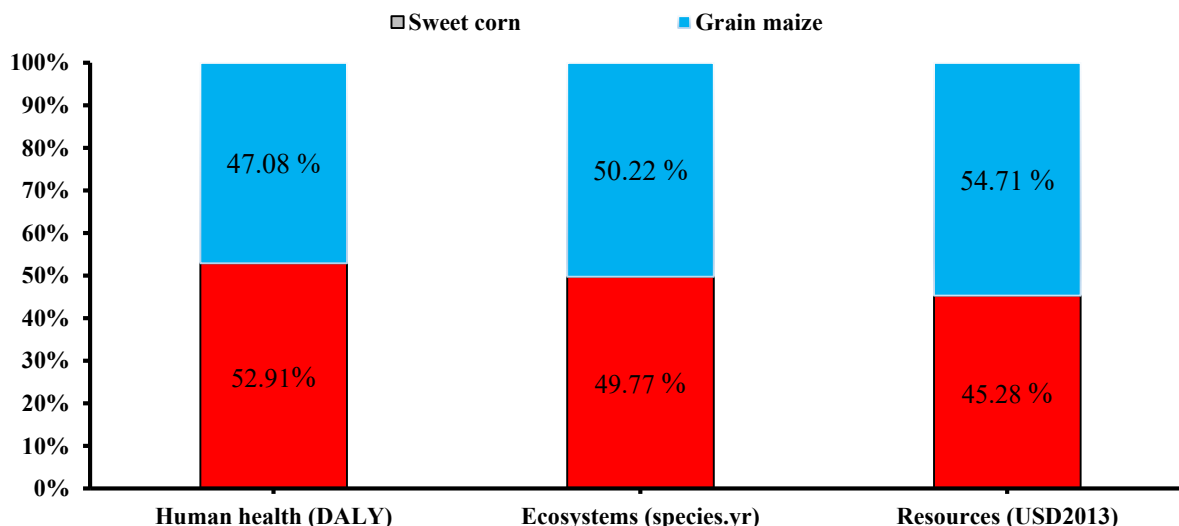
بررسی شاخص‌هایی زیست‌محیطی نشان داد در شاخص خسارت به سلامت انسان سهم ذرت شیرین ۵۲/۹۱ درصد می‌باشد که نسبت به ذرت دانه‌ای ۵/۸ درصد بالاتر می‌باشد، این میزان نشان می‌دهد در شرایط برابر کشت، ذرت شیرین به دلیل نهاده‌های مصرفی خود سهم بیشتری در خسارت به سلامت انسان دارد (شکل ۳). در بخش خسارت به اکوسیستم هر دو کشت ذرت دانه‌ای و ذرت شیرین سهم برابری دارند که این برابری نشان می‌دهد اقدامات ضروری در جهت کاهش آلاینده در هر دو کشت باید انجام شود. این اقدامات با توجه به سهم نهاده‌های شیمیایی و دیزلی در بخش شاخص‌های میانی مشخص شده است که باید در اولویت بهینه‌سازی قرار گیرد. در بخش خسارت به منابع نیز سهم ذرت دانه‌ای بالاتر بود، این اختلاف می‌تواند به دلیل مصرف نهاده شیمیایی و همچنین سوخت دیزلی باشد.

بررسی انتشار ناشی از تولید در یک هکتار ذرت شیرین و ذرت دانه‌ای نشان داد در بخش انتشار آلاینده به هوا بجز در N_2O در دیگر آلاینده‌ها سهم ذرت دانه‌ای بالاتر بود (جدول ۵). به‌طور میانگین سهم ذرت دانه‌ای در انتشارات زیست‌محیطی به هوا حدود ۶۱/۸۱ درصد و سهم ذرت شیرین ۳۸/۱۹ درصد می‌باشد. به نظر می‌رسد سهم بالاتر ذرت دانه‌ای نسبت به ذرت شیرین به دلیل مصرف سوخت دیزلی بالاتر در این کشت و همچنین مصرف کود نیتروژن بیشتر می‌باشد. در هر دو کشت میزان آلاینده‌های CO_2 ، NO و N_2O بیشتر از دیگر آلاینده‌ها بود. در بخش انتشار آلاینده به آب سهم ذرت شیرین به‌طور میانگین ۵۷ درصد و سهم ذرت دانه‌ای ۴۲ درصد بود که اختلاف ۱۵ درصدی می‌تواند به دلیل مصرف کود دامی و فسفر بیشتر در کشت ذرت شیرین باشد (جدول ۵). با توجه به سهم کود دامی بالاتر در ذرت شیرین سهم عناصر فسفر و نیتروژن در این کشت بیشتر از کشت ذرت دانه‌ای می‌باشد، از این‌رو میزان انتشار آلاینده‌ها به آب افزایش یافته است. کاهش این آلاینده‌ها که موجب آلودگی آب‌های زیر زمینی می‌شود ضروری می‌باشد که این اقدام می‌بایست در هر دو کشت انجام شود. در بخش انتشارات آلاینده‌ها به خاک نیز نتایج نشان داد بیشترین میزان آلاینده‌ی در سه عنصر مس، روی و قلع (Cu, Zn & Pb) است و سهم ذرت شیرین با ۶۷/۹ درصد نسبت به ذرت دانه‌ای حدود ۳۵ درصد بالاتر می‌باشد. این افزایش به دلیل مصرف کود دامی، فسفر و ریز مغذی بالاتر نسبت به ذرت دانه‌ای است (جدول ۵).

بررسی سیستم کشت ذرت در هند نشان می‌دهند که کوددهی، آبیاری، کاشت و برداشت تأثیرات زیست‌محیطی قابل توجهی دارند که در این میان کوددهی بیشترین تأثیر را دارد (Kumar et al., 2024). بر اساس نتایج پژوهش دیگری، کشت ذرت بیشترین تأثیر را بر شاخص‌های سمیت زیستی و پتانسیل گرمایش جهانی داشته است. در این میان، کود نیتروژن به‌عنوان اصلی‌ترین عامل تولید آلاینده‌های زیست‌محیطی شناخته شد (Mirzaei et al., 2023). همچنین، بررسی اثرات زیست‌محیطی تولید محصولات کشاورزی مانند بامیه و خیار نشان داد که کودهای شیمیایی و سوخت دیزلی بیشترین سهم را در ایجاد آسیب‌های زیست‌محیطی دارند (Jalilian et al., 2023). بررسی‌ها نشان داده‌اند که در تولید ذرت و گندم، کودهای شیمیایی و آفت‌کش‌ها بیشترین نقش را در تولید آلاینده‌های زیست‌محیطی ایفا می‌کنند (Fantin et al., 2017).



شکل ۲. شاخص‌های میانی برای کشت ذرت دانه‌ای و ذرت شیرین.



شکل ۳. مقایسه سهم اثرات زیست‌محیطی نهایی بر سلامت انسان، اکوسیستم و منابع در دو نوع کشت ذرت دانه‌ای و ذرت شیرین.

جدول ۵. انتشارات ناشی از تولید ذرت دانه‌ای و ذرت شیرین به هوا، آب و خاک.

Emissions to Air	Unit	Grain	Sweet corn
Carbon dioxide (CO ₂)	kg ha ⁻¹	1.21E+03	9.12E+02
Nitrogen oxides (NO _x)	kg ha ⁻¹	9.41E+00	5.76E+00
Carbon monoxide (CO)	kg ha ⁻¹	1.18E+00	6.54E-01
Particulates (b2.5 μm)	kg ha ⁻¹	8.44E-01	4.66E-01
Hydro carbons (HC, as NMVOC)	kg ha ⁻¹	5.36E-01	2.96E-01
Sulfur dioxide (SO ₂)	kg ha ⁻¹	1.90E-01	1.05E-01
Methane (CH ₄)	kg ha ⁻¹	2.43E-02	1.34E-02
Dinitrogen monoxide (N ₂ O)	kg ha ⁻¹	5.05E+00	5.42E+00
Ammonia (NH ₃)	kg ha ⁻¹	3.76E-03	2.08E-03
Benzene	kg ha ⁻¹	1.37E-03	7.58E-04
Emissions to Water			
Nitrate	kg ha ⁻¹	4.25E+01	4.57E+01
Phosphorus	kg ha ⁻¹	2.18E+00	3.75E+00
Emissions to Soil			
Cd (Cadmium)	mg	16848.00	32226.50
Cu (copper)	mg	616315.50	1608161.50
Zn (Zinc)	mg	2996850.50	7688464.50
Pb (lead)	mg	1352147.50	1266118.50
Ni (Nickel)	mg	133539.50	324133.10
Cr (chromium)	mg	157949.50	247696.10
Hg (Mercury)	mg	588.50	1438.40
Fe (Iron)	mg	800.00	2000.00
B (Boron)	mg	80.00	200.00
Mn (Manganese)	mg	816.00	2040.00
Mo (Molybdenum)	mg	800.00	2000.00

پژوهش دیگری نیز مشخص کرد که تولید ذرت بیشترین آسیب را به شاخص میانی مرتبط با سلامت انسان وارد کرده است و در این میان، مصرف کودهای شیمیایی اثرگذاری بالایی بر این شاخص داشته است (Kumar *et al.*, 2023). همچنین، مقایسه‌ای میان تولید ذرت دانه‌ای و ذرت شیرین نشان داد که اثرات زیست‌محیطی تولید ذرت دانه‌ای به‌طور کلی بیشتر است. در این تحقیق، کودهای شیمیایی عمدتاً بر شاخص گرمایش جهانی تأثیرگذار بودند؛ درحالی‌که آفت‌کش‌ها بیشترین آسیب را به شاخص سمیت آب‌های شیرین وارد کردند (Giusti *et al.*, 2023). بررسی دیگری نشان داد بهبود مصرف سوخت‌های دیزلی سهم قابل توجهی در

کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای دارد. همچنین نتایج نشان داد که اثرات زیست‌محیطی و اقتصادی تولید ذرت با توجه به مناطق جغرافیایی، منابع آبی و هیبریدهای بذر ذرت متفاوت است (Li et al., 2021).

۴. نتیجه‌گیری

نتایج مقایسه سیستم‌های تولید ذرت دانه‌ای و ذرت شیرین نشان داد که هر یک از این کشت‌ها دارای مزایا و چالش‌های خاص خود هستند. از نظر بهره‌وری انرژی، ذرت شیرین با شاخص بهره‌وری انرژی بالاتر و شدت انرژی کمتر نسبت به ذرت دانه‌ای عملکرد بهتری دارد. این امر ناشی از بازدهی وزنی بالاتر و معادل انرژی بیشتر آن است. با این حال، از منظر زیست‌محیطی، هر دو سیستم چالش‌های قابل توجهی در تولید آلاینده‌ها دارند. ذرت دانه‌ای سهم بیشتری در انتشار آلاینده‌های هوا و منابع داشت؛ درحالی‌که ذرت شیرین به دلیل مصرف بیشتر کود دامی، فسفر و ریزمغذی‌ها، آلودگی بیشتری در آب و خاک ایجاد کرد. شاخص‌های زیست‌محیطی نشان دادند که کودهای شیمیایی و سوخت دیزلی نقش عمده‌ای در آلاینده‌های تولیدی هر دو کشت دارند. بنابراین، بهینه‌سازی مصرف این نهاده‌ها می‌تواند به کاهش قابل توجه آلاینده‌ها کمک کند. از سوی دیگر، شاخص خسارت به سلامت انسان برای ذرت شیرین بالاتر از ذرت دانه‌ای بود که به دلیل ماهیت نهاده‌های مصرفی در این کشت است. انجام مطالعات تکمیلی برای بهینه‌سازی سیستم‌های کشت و کاهش اثرات زیست‌محیطی، با تأکید بر ارزیابی روش‌های نوین مدیریت منابع می‌تواند به کشاورزی پایدار و کاهش اثرات منفی زیست‌محیطی هر دو نوع کشت ذرت کمک کند.

۵. منابع

- Afzali Gorouh, H., Azadshahraki, F., & Shafie, L. (2021). Measurement of energy indices in corn production under different tillage systems. *Agricultural Mechanization and Systems Research*, 22(77), 51–68. <https://doi.org/10.22092/ERAMS.2020.127145.1322>. (In Persian).
- Arefi, R., Soltani, A., & Ajamnoroezi, H. (2018). Estimation of fuel and energy consumption and indicators of cotton production in Golestan Province (Iran). *Journal of Agroecology*, 10(3), 853–874. <https://doi.org/10.22067/jag.v10i3.62349>. (In Persian).
- Fantin, V., Righi, S., Rondini, I., & Masoni, P. (2017). Environmental assessment of wheat and maize production in an Italian farmers' cooperative. *Journal of Cleaner Production*, 140, 631–643. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2016.06.136>.
- Gao, N., Wei, Y., Zhang, W.W., Yang, B., Shen, Y., Yue, S., & Li, S. (2022). Carbon footprint, yield and economic performance assessment of different mulching strategies in a semi-arid spring maize system. *Science of the Total Environment*, 826, 154021. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2022.154021>.
- Ghasemi-Mobtaker, H., Kaab, A., & Rafiee, S. (2020). Application of life cycle analysis to assess environmental sustainability of wheat cultivation in the west of Iran. *Energy*, 193, 116768. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116768>.
- Giusti, G., Almeida, G.F.D., Apresentação, M.J.D.F.D., Galvão, L.S., Knudsen, M.T., Djomo, S.N., & Silva, D.A.L. (2023). Environmental impacts management of grain and sweet maize through life cycle assessment in São Paulo, Brazil. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20(6), 6559–6574. <https://doi.org/10.1007/S13762-022-04418-Y/METRICS>.
- Hesampour, R., Hassani, M., Hanafiah, M.M., & Heidarbeigi, K. (2022). Technical efficiency, sensitivity analysis and economic assessment applying data envelopment analysis approach: A case study of date production in Khuzestan State of Iran. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 21(3), 197–207. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2021.08.003>.
- Hossein, H.Y., Azizpanah, A., Namdari, M., & Shirkhani, H. (2024). Environmental life cycle assessment of corn production in tropical regions. *Scientific Reports*, 14(1), 20036. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-70923-4>.
- Jalilian, A., Jahansouz, M.R., Ghasemi Mobtaker, H., Oveisi, M., & Moghadam, H. (2023). Evaluation of energy indicators in monoculture, intercropping, and agroforestry systems of okra (*Abelmoschus esculentus* L.) production in Khuzestan Province. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 54(2), 141–154. <https://doi.org/10.22059/ijfcs.2022.348292.654938>. (In Persian).
- Jalilian, A., Jahansuz, M.R., Oveisi, M., & Moghadam, H. (2023). Evaluation of environmental indicators of okra (*Abelmoschus esculentus* L.) production in monoculture, intercropping and agroforestry systems in Khuzestan Province. *Journal of Researches in Mechanics of Agricultural Machinery*, 12(1), 95–110. <https://doi.org/10.22034/jrmam.2023.13972.602>. (In Persian).

- Javam, M., Ghasemi Nejad Raeini, M., & Marzban, A. (2020). Economic analysis of Okra production systems in Khuzestan Province. *Agricultural Mechanization and Systems Research*, 21(74), 33–46. <https://doi.org/10.22092/ERAMS.2018.121717.1256>. (In Persian).
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.004>.
- Khalaj, M., Gholami Parashkoochi, M., & Mohammad Zamani, D. (2023). Use of life cycle assessment and modeling techniques for prediction of energy-environmental indicators in different wheat production systems. *Environmental and Sustainability Indicators*, 18, 100237. <https://doi.org/10.1016/J.INDIC.2023.100237>. (In Persian).
- Khodaei Joghani, A., Taki, M., & Matoorian, H. (2022). Evaluating energy productivity, greenhouse gas emission, global warming potential and sustainability index of wheat and rapeseed agroecosystems in Khorramshahr. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 32(1), 309–324. <https://doi.org/10.22034/saps.2021.44507.2634>. (In Persian).
- Khorramdel, S., Nassiri Mahallati, M., Latifi, H., & Farzaneh Belgerdi, M.R. (2020). Comparison between energy, environmental and economical indicators of irrigated wheat and saffron agroecosystems in Khorasan-e Razavi Province. *Journal of Saffron Research*, 8(1), 29–54. <https://doi.org/10.22077/jsr.2020.2892.1116>. (In Persian).
- Khoshnevisan, B., Rafiee, S., Omid, M., Yousefi, M., & Movahedi, M. (2013). Modeling of energy consumption and GHG (greenhouse gas) emissions in wheat production in Esfahan province of Iran using artificial neural networks. *Energy*, 52, 333–338. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2013.01.028>.
- Kim, S., Dale, B.E., & Jenkins, R. (2009). Life cycle assessment of corn grain and corn stover in the United States. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 14(2), 160–174. <https://doi.org/10.1007/S11367-008-0054-4/METRICS>.
- Kokten, K., Kaplan, M., Gökdoğan, O., & öte., ve. (2018). Determination of energy use efficiency of maize (*Zea mays* Intendata) production in Turkey. *Fresenius Environmental Bulletin*. <http://dspace.adiyaman.edu.tr:8080/xmlui/handle/20.500.12414/5400>.
- Kumar, R., Bhardwaj, A., Singh, L.P., & Singh, G. (2024). Environmental and economical assessment of maize cultivation in Northern India. *Process Integration and Optimization for Sustainability*, 8(1), 165–179. <https://doi.org/10.1007/s41660-023-00358-3>.
- Li, S., Thompson, M., Moussavi, S., & Dvorak, B. (2021). Life cycle and economic assessment of corn production practices in the western US corn belt. *Sustainable Production and Consumption*, 27, 1762–1774. <https://doi.org/10.1016/J.SPC.2021.04.021>.
- Mirzaei, M., Gorji Anari, M., Saronjic, N., Sarkar, S., Kral, I., Gronauer, A., Mohammed, S., & Caballero-Calvo, A. (2023). Environmental impacts of corn silage production: Influence of wheat residues under contrasting tillage management types. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(1), 171. <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10675-8>.
- Mobtaker, H.G., Akram, A., & Keyhani, A. (2012). Energy use and sensitivity analysis of energy inputs for alfalfa production in Iran. *Energy for Sustainable Development*, 16(1), 84–89. <https://doi.org/10.1016/J.ESD.2011.10.009>.
- Mohammadzadeh, A., Vafabakhsh, J., Mahdavi Damghani, A., & Deihimfard, R. (2018). Assessing environmental impacts of major vegetable crop production systems of East Azerbaijan province in Iran. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 64(7), 967–982. <https://doi.org/10.1080/03650340.2017.1405260>.
- Mostashari-Rad, F., Ghasemi-Mobtaker, H., Taki, M., Ghahderijani, M., Kaab, A., Chau, K., & Nabavi-Pelesaraei, A. (2021a). Exergoenvironmental damages assessment of horticultural crops using ReCiPe2016 and cumulative exergy demand frameworks. *Journal of Cleaner Production*, 278, 123788. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123788>.
- Mostashari-Rad, F., Ghasemi-Mobtaker, H., Taki, M., Ghahderijani, M., Kaab, A., Chau, K.W., & Nabavi-Pelesaraei, A. (2021b). Exergoenvironmental damages assessment of horticultural crops using ReCiPe2016 and cumulative exergy demand frameworks. *Journal of Cleaner Production*, 278, 123788. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2020.123788>.
- Mostashari-Rad, F., Ghasemi-Mobtaker, H., Taki, M., Ghahderijani, M., Saber, Z., Chau, K.W., & Nabavi-Pelesaraei, A. (2020). Data supporting midpoint-weighting life cycle assessment and energy forms of cumulative exergy demand for horticultural crops. *Data in Brief*, 33, 106490. <https://doi.org/10.1016/J.DIB.2020.106490>.
- Mousavi-Avval, S.H., Rafiee, S., Jafari, A., & Mohammadi, A. (2011). Improving energy use efficiency of canola production using data envelopment analysis (DEA) approach. *Energy*, 36(5), 2765–2772. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2011.02.016>.
- Nabavi-Pelesaraei, A., Pakravan-Charvadeh, M.R., & Ghasemi-Mobtaker, H. (2022). Predicting output energy and greenhouse gas emissions in peanut production: A case study in Astaneh-Ashrafiyeh county of Guilan

- province. *Iranian Journal of Agricultural Economics and Development Research*, 53(1), 145–168. <https://doi.org/10.22059/IJAEDR.2021.306056.668924>. (In Persian).
- Nabavi-Pelesaraei, A., Rafiee, S., Mohtasebi, S.S., Hosseinzadeh-Bandbafha, H., & Chau, K.W. (2018). Integration of artificial intelligence methods and life cycle assessment to predict energy output and environmental impacts of paddy production. *Science of the Total Environment*, 631–632, 1279–1294. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2018.03.088>.
- Ozkan, B., Akcaoz, H., & Fert, C. (2004). Energy input–output analysis in Turkish agriculture. *Renewable Energy*, 29(1), 39–51. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(03\)00135-6](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(03)00135-6).
- Sadeghi, S.M., & Noorhosseini, S.A. (2020). Investigating the environmental impacts for four varieties of corn based on nitrogen fertilizer consumption through life cycle assessment (LCA). *Journal of Environmental Science and Technology*, 22(6), 361–377. <https://doi.org/10.22034/JEST.2019.23742.3284>.
- Taki, M., Soheili-Fard, F., Rohani, A., Chen, G., & Yildizhan, H. (2018). Life cycle assessment to compare the environmental impacts of different wheat production systems. *Journal of Cleaner Production*, 197, 195–207. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2018.06.173>.
- Tuti, M.D., Prakash, V., Pandey, B.M., Bhattacharyya, R., Mahanta, D., Bisht, J.K., Kumar, M., Mina, B.L., Kumar, N., Bhatt, J.C., & Srivastva, A.K. (2012). Energy budgeting of colocasia-based cropping systems in the Indian sub-Himalayas. *Energy*, 45(1), 986–993. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2012.06.056>.
- Yao, Z., Zhang, W., Wang, X., Lu, M., Zhang, W., Liu, D., Gao, X., Chen, Y., & Chen, X. (2022). Environmental impacts, human health, and energy consumption of nitrogen management for maize production in subtropical region. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(50), 75636–75650. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-20898-4>.
- Yousefi, M., Damghani, A.M., & Khoramivafa, M. (2014). Energy consumption, greenhouse gas emissions and assessment of sustainability index in corn agroecosystems of Iran. *Science of the Total Environment*, 493, 330–335. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2014.06.004>.
- Zahedi, M., Mondani, F., & Eshghizadeh, H.R. (2015). Analyzing the energy balances of double-cropped cereals in an arid region. *Energy Reports*, 1, 43–49. <https://doi.org/10.1016/J.EGYR.2014.11.001>.
- Zhang, W., Qian, C., Carlson, K.M., Ge, X., Wang, X., & Chen, X. (2021). Increasing farm size to improve energy use efficiency and sustainability in maize production. *Food and Energy Security*, 10(1), e271. <https://doi.org/10.1002/fes3.271>.