

ORIGINAL RESEARCH PAPER

Assessment of Environmental Impacts of Some Plants in Crop Rotation with Soybeans Using SimaPro Software (Vr 9.5)

Eskandari^{1*}, H. and Mosavian², S. N.

1 and 2. Associate Professor and Assistant Professor Department of Agriculture, Payame Noor University, Tehran, Iran.

*: Corresponding Author

Email: eskandari@pnu.ac.ir

Received: 2025/11/28

Accepted: 2025/12/29

Introduction

Soybean, as one of the most important plant-based protein sources in the world, plays a vital role in human nutrition, animal feed, and various industries. This oilseed crop is recognized as a functional food due to its high protein content, essential amino acids, isoflavones, and bioactive compounds. Soybean is crucial for both human and animal nutrition, accounting for 28% of global oil production and approximately 60% (ranked first) of the world's animal feed protein supply. This highlights the impossibility of eliminating soybean from the livestock industry. Monocropping (cultivating the same crop on a piece of land over consecutive years) is a major constraint in soybean production. For instance, four-year monocropping can reduce soybean grain yield by up to 18.7%. Therefore, implementing a proper crop rotation system is essential to mitigate the drawbacks of monocropping and ensure sustainable production. However, previous studies on rotational crops with soybean have primarily focused on yield enhancement, neglecting their environmental impacts. Management strategies should be designed to ensure sustainability from economic, agronomic, and environmental perspectives. A valuable tool for assessing the environmental impacts of crop production processes is Life Cycle Assessment (LCA), which provides a comprehensive approach to evaluating the environmental footprint of agricultural products across all production stages. Accordingly, this study aimed to evaluate the environmental effects of seven proposed rotational crops to identify the most suitable plants for soybean rotation systems. The assessment considered their influence on key environmental health categories, including human health, natural resources, and ecosystems.

Materials and Methods

Impact analysis of crops on human health, ecosystems and resources was carried out using SimaPro vr 9.5.0. Method used for comparison was ReCiPe 2016 endpoint (H) V1.08/world (2010) H/A/characterization. The environmental damage data of plants was calculated based on the production of one kg of plants.

Results and Discussion

The studied crops (corn, alfalfa, rye, wheat, barley, rapeseed, and chickpea) influenced 22 impact categories across ecosystems, human health, and environmental resources. With the exception of rye's water consumption and terrestrial ecosystem impacts, all crops demonstrated negative environmental effects, indicating detrimental consequences for ecological health categories. Notably, rye exhibited positive environmental effects regarding water use and terrestrial ecosystems. The results showed that wheat and rye caused the most environmental damage in all three environmental categories (human health, ecosystems, and resources). While the least environmental damage belonged to alfalfa. The percentage of damage that wheat and rye cultivation inflicted on the human health category was obtained as 83% and 80% higher than alfalfa, respectively. After wheat and rye, the most damage to this category belonged to barley, which was about 60% higher than alfalfa. The results showed that all studied crops (corn, alfalfa, rye, wheat, barley, rapeseed, and chickpea) had their greatest environmental impact on human health, as the majority of environmental effects across all crops were associated with the human health category. Following human health, ecosystems were the second most affected category. The crops' impact on the resources category was negligible. Therefore, it can be concluded that when evaluating the environmental effects of these crops for soybean rotation systems, particular attention should be paid to their impacts on human health. Based on these findings, wheat and rye showed the most negative environmental impacts and are therefore not recommended for soybean rotation systems from an environmental perspective. In contrast, alfalfa and rapeseed, which demonstrated fewer negative environmental effects, can be utilized in rotation with soybeans. This approach would allow for both satisfactory grain yield and significant prevention of environmental degradation. However, considering wheat's economic importance and its crucial role in global food security, economic factors must be incorporated into final decision-making. Additional research is needed to determine whether wheat's environmental impacts in soybean rotation systems outweigh its economic benefits and the costs required to mitigate its negative environmental effects.

Conclusion

According to the findings of this research, among the crops proposed for rotation with soybeans, wheat and rye had the most negative impact on all three environmental categories: natural resources, ecosystems, and human health. In contrast, alfalfa production showed the lowest environmental impact. Based on the environmental effects of the evaluated crops, alfalfa and rapeseed are recommended as the most suitable options for rotation with soybeans to increase grain yield of soybean and reducing negative impacts of environment.

Keywords: ecosystem, environmental resources, human health

Citations: Eskandari, H. and Mosavian, S. N. (2026). Assessment of Environmental Impacts of Some Plants in Crop Rotation with Soybeans Using SimaPro software (Vr 9.5), *Plant Production Technology*, 25(2), 117-127.

<https://doi.org/10.22084/ppt.2025.31089.2162>

© 2025 The Author(s). Bu- Ali Sina University Publication. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Online ISSN: 2476-5651

Print ISSN: 2476-6321

ارزیابی اثرات زیست‌محیطی برخی گیاهان در تناوب زراعی با سویا با استفاده از نرم‌افزار

سیماپرو (Vr 9.5)

Assessment of Environmental Impacts of Some Plants in Crop Rotation with Soybeans Using SimaPro Software (Vr 9.5)

حمداله اسکندری^{۱*} و سیدنادر موسویان^۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۰۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۱۳

(مقاله پژوهشی)

چکیده

تناوب زراعی، نقش مهمی در دستیابی به تولید بالا در سویا دارد. در این مورد، هفت گیاه ذرت، یونجه، چاودار، گندم، جو، کلزا و نخود برای قرارگیری در تناوب زراعی با سویا پیشنهاد شده‌اند که اثرات زیست‌محیطی گیاهان مورد توجه قرار نگرفته است. بر این اساس، در مطالعه حاضر کوشش شد تا اثرات زیست‌محیطی هفت گیاه زراعی پیشنهاد شده مورد ارزیابی قرار گیرد تا بهترین گیاهان برای قرارگیری در تناوب زراعی با سویا با در نظر گرفتن تأثیر آن‌ها بر برخی طبقات مرتبط با سلامت زیست‌محیطی (شامل سلامت انسان، منابع محیطی و اکوسیستم‌ها) معرفی شوند. بدین منظور، اثرات زیست‌محیطی گیاهان فوق با استفاده از تکنیک ارزیابی چرخه حیات و کاربرد نرم‌افزار سیماپرو (Vr 9.5) مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که بیشترین خسارت زیست‌محیطی (از نظر هر سه طبقه‌ی سلامت انسان، منابع محیطی و اکوسیستم‌ها) از طرف گندم و چاودار ایجاد شد. با این حال، اثر چاودار بر مصرف آب و اکوسیستم‌های خشکی منفی به دست آمد. این موضوع نشان می‌دهد که چاودار از نظر زیست‌محیطی بر مصرف آب و اکوسیستم‌های خشکی اثر مثبت دارد. یونجه، کمترین سطح خسارت به سلامت انسان را داشت، به طوری که درصد خسارتی که کاشت گندم و چاودار به طبقه‌ی سلامت انسان وارد می‌کند به ترتیب ۸۳ و ۸۰ درصد بیشتر از یونجه بود. نتایج نشان داد که تمامی گیاهان مورد بررسی، بیشترین اثر زیست‌محیطی را بر سلامت انسان داشتند، چرا که بیشترین سهم اثر زیست‌محیطی در تمامی گیاهان مورد بررسی به طبقه‌ی سلامت انسان تعلق داشت. اثر هر هفت گیاه بر مصرف منابع محیطی، ناچیز بود. به‌طور کلی، با در نظر گرفتن هر سه طبقه خسارت (سلامت انسان، اکوسیستم‌ها و منابع محیطی) گندم و چاودار، نامناسب‌ترین گیاه برای قرارگیری در تناوب زراعی با سویا بودند و کمترین خسارت زیست‌محیطی به یونجه و سپس کلزا اختصاص داشت. بر این اساس، می‌توان گیاهان زراعی یونجه و کلزا را برای قرارگیری در تناوب زراعی با سویا پیشنهاد نمود تا ضمن تولید عملکرد مناسب سویا، اثرات سوء تولید بر محیط‌زیست نیز به حداقل برسد.

واژه‌های کلیدی: اکوسیستم، منابع محیطی، سلامت انسان

ارجاع به مقاله: اسکندری، ح.، موسویان، س. ن. (۱۴۰۴). ارزیابی اثرات زیست‌محیطی برخی گیاهان در تناوب زراعی با سویا با استفاده از نرم‌افزار سیماپرو (Vr 9.5)، مجله فناوری تولیدات گیاهی، ۲۵(۲)، ۱۱۷-۱۲۷. <https://doi.org/10.22084/ppt.2025.31089.2162/>

حق نشر متعلق به نویسنده (گان) است و نویسنده تحت مجوز Commons Creative License Attribution (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>) به مجله اجازه می‌دهد مقاله‌ی چاپ شده را در

سامانه به اشتراک بگذارد، منوط بر اینکه حقوق مؤلف اثر حفظ و به انتشار اولیه مقاله در این مجله اشاره شود.



شاپا چاپی: ۶۳۲۱-۲۴۷۶

شاپا الکترونیکی: ۵۶۵۱-۲۴۷۶

۱ و ۲. به ترتیب دانشیار و استادیار، گروه کشاورزی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران.

* نویسنده مسئول Email: eskandari@pnu.ac.ir

۱. مقدمه

سویا (*Glycine max*)، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین منابع گیاهی پروتئین در جهان، نقش حیاتی در تغذیه انسان، خوراک دام و صنایع مختلف ایفا می‌کند. این گیاه دانه روغنی، به‌دلیل محتوای بالای پروتئین (حدود ۴۰-۳۵ درصد)، اسیدهای آمینه ضروری، ایزوفلاون‌ها و ترکیبات زیست‌فعال، به‌عنوان یک ماده غذایی فراسودمند شناخته می‌شود (Hughes et al., 2023). همچنین، کشت سویا به‌عنوان یک محصول پایدار، در کاهش اثرات تغییرات آب و هوایی از طریق تثبیت زیستی نیتروژن خاک مؤثر است (De Bauw et al., 2024). با افزایش تقاضای جهانی برای پروتئین و توسعه محصولات گیاهی، سویا به‌عنوان یک پتانسیل مهم و کلیدی برای جایگزینی پروتئین حیوانی مطرح شده است (Messina et al., 2023). گزارش شده است که در سال ۲۰۲۴، تولید جهانی روغن از سویا مقدار ۶۲/۸ میلیون تن بود که به معنی سهم ۲۸ درصدی و رتبه دوم سویا از کل تولید روغن در جهان (رتبه اول، پالم با ۳۶ درصد سهم جهانی) است (USDA, 2024). همچنین در سال ۲۰۲۴، حدود ۲۵۰ میلیون تن کنجاله از سویا تولید شده است که نشان می‌دهد سهم جهانی سویا در تامین پروتئین خوراک دام حدود ۶۰ درصد (رتبه اول) است. به‌عبارت‌دیگر، حذف سویا از صنعت دامپروری، غیرممکن است (USDA, 2024).

تک‌کشتی (کشت تنها یک گیاه در یک قطعه زمین زراعی در طی سال‌های متوالی)، یک محدودیت مهم در تولید سویا است. گزارش شده است که چهار سال تک‌کشتی باعث کاهش ۱۸/۷ درصدی عملکرد دانه سویا می‌شود (Zhang et al., 2023). همچنین کاهش کربن آلی خاک به میزان ۲۳ درصد (Chen et al., 2024) و افزایش شیوع بیماری‌های ریشه به میزان ۳۰ درصد (Liu and Li, 2023) از دیگر اثرات تک‌کشتی سویا عنوان شده است؛ بنابراین، برای حصول اطمینان از کشت موفق سویا، اعمال تناوب زراعی مناسب برای کاهش معایب تک‌کشتی و پایداری تولید ضروری است.

تناوب زراعی، که به‌صورت کشت تعدادی از گیاهان غیرمشابه با هم (از نظر خصوصیات مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی) در طول سال‌های متوالی در یک قطعه زمین زراعی تعریف می‌شود، از طریق تأثیر بر خاک، کاهش رشد علف‌های هرز و بیمارگرها باعث بهبود رشد و عملکرد گیاهان

زراعی، از جمله سویا، می‌شود (Payne, 2015). گزارش شده است که وجود ذرت در تناوب زراعی با سویا، علاوه‌بر اینکه باعث بهبود ساختار خاک و افزایش نفوذپذیری آن می‌شود، بیماری‌های ریشه از جمله نماتد ریشه را نیز کاهش می‌دهد (Pederson and Lauer, 2003). در یک مطالعه دیگر مشاهده شد که کشت یونجه، ضمن اینکه حاصلخیزی خاک را برای سویا افزایش می‌دهد موجب کاهش جمعیت آفات از جمله سوسک سویا می‌شود (Stanger and Lauer, 2008). چاودار نیز به‌عنوان گیاهی مناسب برای قرارگیری در تناوب زراعی با سویا گزارش شده است چرا که باعث کاهش جمعیت علف‌های هرز می‌شود و رطوبت خاک را برای کشت بعدی حفظ می‌کند (Snapp et al., 2005). در یک پژوهش، نتیجه گرفته شد که قرارگیری گندم در تناوب زراعی باعث افزایش ۸-۱۲ درصدی عملکرد دانه سویا می‌شود (Carciochi et al., 2020). جو، به دلیل مقاومت به خشکی و کاهش فشار به منابع آبی و همچنین زودرسی که زمان کافی برای کشت سویا فراهم می‌آورد و در نهایت باعث افزایش عملکرد دانه سویا به میان ۱۰-۱۵ درصد می‌شود گیاه مناسبی برای قرارگیری در تناوب زراعی با سویا است (Li et al., 2022). کلزا (Kirkegaard et al., 2008) و نخود (Gan et al., 2015) به‌دلیل بهبود مواد آلی خاک و شکستن چرخه بیماری‌های سویا، به‌عنوان گیاهان مناسب برای تناوب زراعی با سویا معرفی شدند.

پیامدهای زیست‌محیطی نامطلوبی که در زمان تولید گیاهان زراعی بروز پیدا می‌کند، بر اهمیت توجه به ملاحظات زیست‌محیطی در پرورش محصولات زراعی افزوده است. در واقع، استراتژی‌های مدیریتی باید به‌گونه‌ای باشد که هم از نظر اقتصادی و زراعی و هم از نظر زیست‌محیطی پایدار باشد.

یک روش مفید برای ارزیابی اثرات زیست‌محیطی در فرایند تولید محصولات زراعی روش ارزیابی چرخه حیات^۱ است که در یک رویکرد جامع، مراحل تولید محصولات را از نظر زیست‌محیطی بررسی می‌کند (Esfahani et al., 2018). در یک گزارش که به بررسی اثرات زیست‌محیطی تولید ذرت با استفاده از ارزیابی چرخه حیات پرداخته شد، مشاهده گردید که بیشترین اثر زیست‌محیطی تولید ذرت بر ایجاد سمیت برای اکوسیستم‌های آبی است و در بروز این سمیت، مصرف

گندم بر منابع آبی (از طریق کاهش آلودگی) را کاهش دهد (Hashemi et al., 2022). در یک مطالعه دیگر در مورد تناوب زراعی سویا-ذرت، چرخه حیات با استفاده از نرم‌افزار سیمپرو ارزیابی و گزارش شد که اثرات زیست‌محیطی با کاربرد تناوب زراعی تا حدود ۱۵ درصد (به دلیل کاهش مصرف مواد شیمیایی) کمتر می‌شود (Villarino et al., 2021).

۲. مواد و روش‌ها

ارزیابی چرخه حیات به‌عنوان روشی جامع و استاندارد بین‌المللی (ISO14044 and 14040) برای این پژوهش انتخاب شد، چرا که قادر است تمامی اثرات زیست‌محیطی را از گهواره تا گور (از استخراج منابع تا تولید) را به‌صورت کمی ارزیابی کند و از نگاه تک‌بعدی به مسائل زیست‌محیطی جلوگیری کند. این روش، ابزاری قدرتمند برای مقایسه سیستماتیک گزینه‌های مختلف بر پایه یک واحد عملکردی مشترک (در این پژوهش mpt) است. برای مقایسه اثرات زیست‌محیطی هفت گیاه پیشنهاد شده برای قرارگیری در تناوب زراعی با سویا (شامل ذرت، یونجه، چاودار، گندم، کلزا، جو و نخود) از نرم‌افزار سیمپرو (ورژن ۹/۵) استفاده شد. نرم‌افزار سیمپرو به دلیل دارا بودن پایگاه‌های داده معتبر (مانند Ecoinvent)، شفافیت در محاسبات و قابلیت انطباق با استانداردهای ISO انتخاب شد. برای این منظور، هر کدام از گیاهان به‌عنوان یک فرایند تولید در نرم‌افزار تعریف گردید. این نرم‌افزار به پایگاه‌های اطلاعاتی متصل است و داده‌های مربوط به هر گیاه را می‌تواند براساس میانگین جهانی و با اتصال به پایگاه‌های داده‌ای محاسبه نماید. بر این اساس، داده‌های مربوط به تولید هر کدام از گیاهان (شامل ورودی‌ها و خروجی‌های فرایندهای تولید، محصول تولید شده، حمل‌ونقل) از پایگاه داده‌ای اکواینونت (Eco-invent 3- allocation, cut off by classification- system) استخراج گردید. شایان‌ذکر است که جزئیات مربوط به مواد مصرفی در مراحل مختلف تولید، در پایگاه داده اکواینونت تعریف شده و این مطالعه از طریق فراخوانی فرایندهای آماده در نرم‌افزار سیمپرو و بر پایه این پایگاه داده انجام گرفته است. این پایگاه، به‌عنوان جامع‌ترین و پرکاربردترین پایگاه داده موجود در ارزیابی چرخه حیات شناخته می‌شود که شامل داده‌های میانگین جهانی برای فرایندهای کشاورزی است. این

کودهای شیمیایی نقش مهمی دارد (Hossein et al., 2024). در یک پژوهش دیگر نیز، اثرات زیست‌محیطی هشت گیاه زراعی شامل یولاف، باقلا، جو، سیب‌زمینی، ذرت، کانولا، یونجه و گندم مورد بررسی قرار گرفت و نتیجه گرفته شد که تولید کانولا، بیشترین خسارت زیست‌محیطی را به‌دنبال داشت، در حالی که یونجه و یولاف خسارت کمی را به محیط زیست تحمیل نمودند و به همین دلیل، قرارگیری آنها در تناوب زراعی پیشنهاد گردید (Kazemi and Eskandari, 2025).

طبق نتایج تحقیقات مختلف، هفت گیاه ذرت، یونجه، چاودار، گندم، کلزا و نخود برای حفظ و بهبود عملکرد دانه برای قرار گرفتن در تناوب زراعی با سویا پیشنهاد شده‌اند. با این حال، قرارگیری این گیاهان در تناوب زراعی با سویا تنها با در نظر گرفتن اثر آنها بر عملکرد دانه مورد توجه قرار گرفته است، ولی اثرات احتمالی زیست‌محیطی که کشت این گیاهان به‌دنبال دارد در نظر گرفته نشده است. بر این اساس، در تحقیق حاضر تلاش شده است که گیاهان پیشنهاد شده برای قرار گرفتن در تناوب زراعی با سویا از نظر اثرات زیست‌محیطی (با ارزیابی چرخه حیات) مورد مقایسه قرار بگیرند و گیاهانی که دارای کمترین اثرات منفی بر محیط زیست هستند جهت طرح‌ریزی برنامه تناوب زراعی سویا معرفی شوند. در پژوهش‌های ارزیابی اثرات زیست‌محیطی، نرم‌افزار سیمپرو به‌عنوان ابزار اصلی برای مدل‌سازی و تجزیه و تحلیل چرخه عمر استفاده می‌شود. این نرم‌افزار، در حوزه‌ی ارزیابی چرخه حیات بر پایه روش‌شناسی استانداردهای بین‌المللی ISO14040 و ISO14044 بنا شده است و امکان مدل‌سازی دقیق سیستم‌های پیچیده، استفاده از پایگاه‌های داده‌ای معتبر و محاسبه طیف وسیعی از شاخص‌های اثرگذاری را فراهم می‌کند. قابلیت‌های این نرم‌افزار، آن را به یک انتخاب استاندارد در مطالعات ارزیابی اثرات زیست‌محیطی محصولات کشاورزی تبدیل کرده است (Werbet et al., 2016). کاربردهای گسترده سیمپرو در مطالعات کشاورزی پایدار به‌خوبی مستند شده است (Perea et al., 2021; Vasquez Ibarra et al., 2023). در یک مطالعه، اثرات زیست‌محیطی استفاده از کودهای شیمیایی، دامی و زیستی در تولید گندم با استفاده از نرم‌افزار سیمپرو ارزیابی و نتیجه گرفته شد که جایگزینی بخشی از کود شیمیایی با کود زیستی می‌تواند تا حدود ۲۵ درصد بار زیست‌محیطی تولید

می‌کند. واحد این شاخص معمولاً دلار آمریکا³ است (Berger *et al.*, 2020). در نهایت، سیاهه انتشار و اثرات گیاهان بر سه طبقه سلامت انسان، اکوسیستم‌ها و منابع محیطی تهیه گردید تا براساس آن بهترین گیاه برای قرارگیری در تناوب زراعی با سبب‌زمینی (براساس کمترین خسارت زیست‌محیطی) معرفی گردد. همچنین برای یکسان‌سازی مقایسه بین سیستم‌هایی با نهاده‌ها و محصولات ناهمگون (مانند مصرف آب، کود، عملکرد دانه) نیاز به واحد عملکردی مرجع⁴ مشترک بود. در این مطالعه، واحد عملکردی انتخاب شده mpt° (مخفف مواد، محصول، حمل‌ونقل) بود. این واحد، کلیه جریان‌های ورودی (شامل مواد اولیه و نهاده‌های کشاورزی)، خروجی اصلی (محصول) و عملیات حمل‌ونقل مرتبط در چرخه عمر هر محصول را در برمی‌گیرد و به‌عنوان پایه‌ای برای محاسبه تمامی شاخص‌های زیست‌محیطی به‌کار می‌رود. استفاده از این واحد جامع، تضمین می‌کند که مقایسه‌ها بر مبنای یک معیار یکپارچه و قابل اطمینان انجام شده است. این رویکرد، مطابق با استانداردهای ISO14040 و اصول پایه‌ای ارزیابی چرخه حیات است (Guinee, 2002). برای مقایسه مستقیم قدرت اثرگذاری هر گیاه بر هر یک از طبقات سلامت انسان، اکوسیستم‌ها و منابع، داده‌ها به‌صورت نسبی⁶ نرمال‌سازی⁷ شدند. بدین ترتیب، مقدار اثر هر گیاه در هر طبقه، به‌صورت درصدی⁸ نسبت به بیشترین مقدار در آن دسته نشان داده می‌شود. در این حال، عدد ۱۰۰ درصد، نشان‌دهنده‌ی گیاهی با بیشترین اثر در یک طبقه خاص است و اعداد دیگر، میزان اثر نسبی گیاهان دیگر را نسبت به آن معیار نشان می‌دهد. این رویکرد، شناسایی گیاهانی که بیشترین و کمترین نقش را در ایجاد هر نوع اثر ایفا می‌کنند را به‌صورت دیداری تسهیل می‌نماید. لازم به ذکر است که مقادیر اثرگذاری در روش ارزیابی چرخه حیات، خروجی مدل‌سازی نرم‌افزار بوده و ماهیت داده‌های تجربی تکرارپذیر ندارند؛ از این‌رو امکان به‌کارگیری آزمون‌های آماری مرسوم (مانند آنالیز واریانس) در این مطالعه موضوعیت نداشته و مقایسه‌ها براساس نمودارهای نسبی ارائه شده است.

انتخاب، قابلیت تکرارپذیری نتایج این مطالعه با سایر مطالعات بین‌المللی را فراهم می‌آورد. بر این اساس، این پژوهش، یک مطالعه مبتنی بر داده‌های ثانویه یا کتابخانه‌ای است. به این معنی که از داده‌های از پیش تولید شده در پایگاه‌های داده‌ای معتبر (در این مورد پایگاه Ecoinvent) برای مدل‌سازی استفاده شده است. این رویکرد به دلیل صرفه‌جویی در زمان و هزینه، دسترسی به داده‌هایی که اندازه‌گیری میدانی آن‌ها بسیار دشوار است و همچنین امکان مقایسه با سایر مطالعات، انتخاب شد. داده‌ها با استفاده از روش ReCiPe 2016 Endpoint (H) v (2010) 1.08/world مقایسه شدند، چراکه این روش، طیف وسیعی از اثرات زیست‌محیطی را به سه معیار نهایی شامل سلامت انسان، کیفیت اکوسیستم و مصرف منابع خلاصه می‌کند. این خلاصه‌سازی، تفسیر نتایج و تصمیم‌گیری را آسان‌تر می‌کند و یک نمای کلی و یکپارچه از عملکرد زیست‌محیطی را ارائه می‌دهد. شاخص سلامت انسان، اثرات بالقوه‌ای که سیستم بر سلامتی و رفاه انسان می‌گذارد را به صورت کمی نشان می‌دهد. این اثرات، به‌طور عمده از طریق آلودگی هوا، ذرات معلق، آلودگی آب و خاک (مواد شیمیایی سمی) و تغییرات آب و هوایی به انسان منتقل می‌شوند. واحد اندازه‌گیری شاخص سلامت انسان معمولاً سال تعدیل شده عمر بر اثر ناتوانی¹ است که ترکیبی از سال‌های از دست رفته عمر به دلیل مرگ زودرس و سال‌های زندگی با ناتوانی را نشان می‌دهد (Huijbregts *et al.*, 2017). شاخص اکوسیستم‌ها نیز اثرات سیستم بر سلامت و تنوع سیستم‌های زیست‌محیطی خشکی و آبی را اندازه می‌گیرد. مهم‌ترین مکانیسم‌های اثرگذاری شامل اسیدی شدن خاک و آب، غنی‌سازی عناصر غذایی که منجر به شکوفایی جلبک‌های مضر و مرگ آبزیان می‌شود و سمیت برای گیاهان و جانوران است. واحد این شاخص گونه در سال² است که نشان‌دهنده از دست رفتن تنوع زیستی در یک بازه زمانی است (Fantke *et al.*, 2023). شاخص منابع نیز بر مصرف و تخلیه منابع طبیعی، به ویژه منابع فسیلی و معدنی تمرکز دارد. این دسته، کمبود آینده منابع را به دلیل استخراج و مصرف آن‌ها در چرخه تولید اندازه‌گیری

3. USD2013

4. Functional unit

5. mpt= material, product, transport

6. Relative comparison

7. Normalized

8. Effect (%)

1. Daly

2. Species. year

۳. نتایج و بحث

از آنجا که داده‌ها براساس میانگین جهانی از پایگاه‌های داده‌ای استخراج گردید، نتایج نیز براساس میانگین جهانی به‌دست‌آمده است. براساس نتایج به‌دست‌آمده، گیاهان موردبررسی شامل ذرت، یونجه، چاودار، گندم، جو، کلزا و نخود بر ۲۲ طبقه از مجموع طبقات اکوسیستم‌ها، سلامت انسان و منابع محیطی اثرگذار بودند (جدول ۱). به‌جز در مورد چاودار در مورد مصرف آب و اکوسیستم‌های خشکی، اثر سایر گیاهان مورد بررسی طبقات زیست‌محیطی مثبت بود که نشان‌دهنده‌ی اثر منفی آن‌ها بر طبقات مرتبط با سلامت محیط‌زیستی دارد. اثر چاودار بر مصرف آب و اکوسیستم‌های خشکی منفی به‌دست آمد. این موضوع نشان می‌دهد که چاودار از نظر زیست‌محیطی بر مصرف آب و اکوسیستم‌های خشکی اثر مثبت دارد (جدول ۱). در نتایج ارزیابی چرخه حیات، ممکن است مقادیر منفی دیده شود. این فرایند، مطابق با استاندارد بین‌المللی ISO14044 و رویه‌های محاسباتی نرم‌افزار، نشان‌دهنده‌ی شرایطی است که خروجی‌های سیستم مورد مطالعه (در مطالعه حاضر، وجود یک محصول در تناوب زراعی) منجر به اجتناب از باز محیطی زیستی در مقیاس کلان می‌شود. به‌طور مشخص، وقتی یک سیستم، جایگزین سیستم دیگری با بار محیط زیستی بالاتر می‌شود (مانند جایگزینی یک محصول کم‌نیاز با یک محصول پرنیاز)، اثر زیست‌محیطی مرتبط با تولید آن نهاده‌ها یا فرایندهای جایگزین شده، از کل بار سیستم کسر می‌شود. این کسر شدن، در خروجی نهایی به‌صورت یک مقدار منفی نشان داده می‌شود و دال بر اثر مثبت حاصل آن سیستم در آن دسته خاص است (López-Maldonado et al., 2023). در این مورد، عدد منفی چاودار نشان‌دهنده‌ی اثر خالص مثبت این گیاه است که به‌دلیل اجتناب از مصرف منابع و کاهش بار آلاینده‌ی در مقایسه با سایر گزینه‌های کشت در حوزه مصرف آب و اکوسیستم‌های خشکی می‌باشد.

نتایج نشان داد که گندم و چاودار در هر سه طبقه زیست‌محیطی (سلامت انسان، اکوسیستم‌ها و منابع) بیشترین خسارت را به محیط‌زیست وارد می‌کنند. درحالی‌که کمترین میزان خسارت زیست‌محیطی به یونجه تعلق داشت (شکل ۱). درصد خسارتی که کاشت گندم و چاودار به طبقه‌ی سلامت انسان وارد می‌کند به‌ترتیب ۸۳ و ۸۰ درصد بیشتر از یونجه

به‌دست آمد. بعد از گندم و چاودار، بیشترین خسارت وارد شده به این طبقه به جو تعلق داشت که حدود ۶۰ درصد بیشتر از یونجه بود (شکل ۱). از دلایلی که می‌تواند برای عملکرد ضعیف زیست‌محیطی گندم و چاودار در نظر گرفت این است که به‌طور معمول، این دو گیاه، نیاز به نیتروژن بالایی دارند. از طرف دیگر، تولید و مصرف کودهای نیتروژنی، یکی از بزرگ‌ترین منابع انتشار گازهای گلخانه‌ای (به‌ویژه اکسید نیتروژن) و همچنین عامل غنی‌سازی غذایی^۱ در آب‌ها می‌باشد که به‌طور مستقیم بر سلامت انسان و اکوسیستم‌ها اثر منفی دارد (Cucek et al., 2021). علاوه‌براین، مدیریت آفات و بیماری‌ها در این محصولات ممکن است به کاربرد بیشتر آفت‌کش‌ها منجر شود که بر سمیت زمین‌زیستی و آب‌زیستی می‌افزاید. از سوی دیگر، عملکرد برتر زیست‌محیطی یونجه را می‌توان به ویژگی‌های ذاتی این گیاه نسبت داد. یونجه، یک تثبیت‌کننده قوی نیتروژن مولکولی هوا می‌باشد. این توانایی، نیاز به مصرف کودهای نیتروژنی را به‌شدت کاهش می‌دهد و در نتیجه از بار محیط‌زیستی مرتبط با تولید و مصرف این کودها می‌کاهد. همچنین، سیستم ریشه‌ای عمیق و چندساله یونجه، به بهبود ساختار خاک و جلوگیری از فرسایش کمک می‌کند که یک مزیت اکوسیستمی مثبت محسوب می‌شود که در نتایج ارزیابی چرخه حیات منعکس می‌شود (Skinner et al., 2023). یافته‌های این مطالعه از نظر رتبه‌بندی عملکرد محیط‌زیستی گیاهان، با نتایج سایر پژوهش‌ها همخوانی دارد. برای مثال، مطالعه‌ای که بر روی تناوب‌های زراعی در اروپا انجام شد، گندم را به‌دلیل مصرف بالای نهاده‌ها به‌عنوان یکی از محصولات با بار محیط‌زیستی بالا شناسایی کرد (Weiss and Leip, 2021).

Table 1: The impact of crop species on different category of environmental health

| | Impact category | Unit | Crops | | | | | | |
|----|--|---------------|----------|----------|-----------|----------|----------|----------|----------|
| | | | Maize | Alfalfa | Rye | Wheat | Barely | Rapeseed | Pea |
| 1 | Water consumption, aquatic ecosystems | Species. year | 4.98E-13 | 5.85E-16 | 8.63E-14 | 4.21E-13 | 3.02E-13 | 2.98E-16 | 3.88E-14 |
| 2 | Water consumption, terrestrial ecosystem | Species. year | 5.62E-10 | 5.63E-12 | -1.29E-10 | 1.71E-9 | 1.15E-9 | 8.66E-12 | 2.57E-10 |
| 3 | Water consumption, human health | Daly | 3.17E-8 | 8.85E-10 | 1.58E-7 | 2.26E-7 | 1.67E-7 | 1.11E-9 | 1.13E-7 |
| 4 | Fossil resource scarcity | USD2013 | 0.0309 | 0.00864 | 0.0468 | 0.049 | 0.04 | 0.0394 | 0.0334 |
| 5 | Mineral resource scarcity | USD2013 | 0.000441 | 0.000177 | 0.001 | 0.000908 | 0.000878 | 0.000173 | 0.000607 |
| 6 | Land use | Species. year | 6.3E-9 | 4.09E-9 | 2.31E-8 | 2.81E-8 | 1.62E-8 | 2.83E-8 | 2.7E-8 |
| 7 | Human non-carcinogenic toxicity | Daly | 1.77E-5 | 5.2E-6 | 3.74E-5 | 3.33E-5 | 2.71E-5 | 7.1E-6 | 1.85E-5 |
| 8 | Human carcinogenic toxicity | Daly | 4.16E-6 | 7.4E-7 | 4.8E-6 | 5.32E-6 | 4.54E-6 | 6.49E-9 | 2.93E-6 |
| 9 | Marine ecotoxicity | Species. year | 1.01E-8 | 2.98E-9 | 1.99E-8 | 1.84E-8 | 1.51E-8 | 3.2E-9 | 1.05E-8 |
| 10 | Freshwater ecotoxicity | Species. year | 9.71E-12 | 1.66E-12 | 1.38E-11 | 1.27E-11 | 1.02E-11 | 2.94E-11 | 1.07E-11 |
| 11 | Terrestrial ecotoxicity | Species. year | 1.38E-11 | 5.76E-12 | 2.63E-11 | 2.38E-11 | 2E-11 | 3.27E-12 | 3.81E-11 |
| 12 | Marine eutrophication | Species. year | 1.4E-12 | 1.46E-13 | 7.44E-12 | 3.39E-12 | 4.43E-12 | 9.98E-12 | 5.97E-12 |
| 13 | Freshwater eutrophication | Species. year | 1.65E-10 | 5.08E-11 | 1.9E-10 | 4.19E-10 | 1.3E-10 | 1.53E-10 | 1.3E-10 |
| 14 | Terrestrial acidification | Species. year | 1.04E-9 | 6.33E-10 | 1.1E-9 | 1.66E-9 | 1.03E-9 | 3.29E-9 | 3.89E-10 |
| 15 | Ozon formation, terrestrial ecosystems | Species. year | 2.13E-10 | 7.19E-11 | 3.21E-10 | 3.5E-10 | 2.84E-10 | 1.26E-10 | 2.89E-10 |
| 16 | Fine particulate matter formation | Daly | 8.3E-7 | 3.79E-7 | 8.66E-7 | 1.14E-6 | 8.07E-7 | 1.29E-6 | 5.12E-7 |
| 17 | Ozon formation, human health | Daly | 1.49E-9 | 4.98E-10 | 2.22E-9 | 2.43E-9 | 1.97E-9 | 8.79E-10 | 2.01E-9 |
| 18 | Ionizing radiation | Daly | 4.38E-10 | 1.07E-10 | 9.48E-10 | 7.52E-10 | 6.62E-10 | 2.23E-10 | 5.18E-10 |
| 19 | Stratospheric ozone depletion | Daly | 1.17E-8 | 3.65E-9 | 2.86E-8 | 2.8E-8 | 2.09E-8 | 4.02E-8 | 1.12E-8 |
| 20 | Global warming, freshwater ecosystems | Species. year | 3.05E-13 | 5.74E-14 | 3.42E-13 | 3.92E-13 | 2.96E-13 | 3.17E-13 | 2.1E-13 |
| 21 | Global warming, terrestrial ecosystems | Species. year | 1.12E-8 | 2.1E-9 | 1.26E-8 | 1.44E-8 | 1.08E-8 | 1.16E-8 | 7.71E-9 |
| 22 | Global warming, human health | Daly | 5.6E-6 | 1.05E-6 | 6.28E-6 | 7.18E-6 | 5.42E-6 | 5.81E-6 | 3.85E-6 |

Comparing processes; Method: ReCiPe 2016 Endpoint (E) v1.03/Characterization

نمود. نتایج مشابهی توسط سایر محققین در مورد اثر برخی گیاهان در تناوب زراعی با سیب‌زمینی گزارش شد (Kazemi and Eskandari, 2025). بر این اساس و با توجه به نتایج به‌دست‌آمده می‌توان گفت که گندم و چاودار بیشترین اثرات منفی را محیط‌زیست داشتند و از نظر ملاحظات زیست‌محیطی برای قرار گرفتن در تناوب زراعی با سویا قابل توصیه نیستند ولی از آنجا که یونجه و کلزا اثرات منفی کمتری بر محیط‌زیست داشتند، می‌توان آنها را در تناوب زراعی با سویا استفاده کرد تا ضمن به‌دست آوردن عملکرد دانه مناسب، از تخریب محیط‌زیست نیز تا حد زیادی جلوگیری شود. با این حال، با توجه به اهمیت اقتصادی گندم و نقش مهم آن در امنیت غذایی جهان، باید بررسی اقتصادی نیز در تصمیم‌گیری نهایی لحاظ شود. اینکه آیا اثرات زیست‌محیطی گندم در زمان قرارگیری در تناوب زراعی با سویا بیش از اثرات اقتصادی کسب شده از گندم و هزینه‌های انجام شده برای رفع و یا کاهش اثرات منفی گندم بر محیط‌زیست است یا خیر به تحقیقات و ارزیابی‌های بیشتر نیاز دارد. همچنین باید اضافه شود که اگرچه این مطالعه بر پایه پایگاه‌های داده معتبر جهانی انجام شده، اما مهم است که به محدودیت‌های آن نیز اشاره شود. این نتایج براساس داده‌های میانگین جهانی به‌دست آمده‌اند و ممکن است در مقیاس مزرعه‌ای و تحت شرایط اقلیمی و مدیریتی خاص، متفاوت باشند. برای تعمیم دقیق‌تر نتایج، انجام مطالعات ارزیابی چرخه حیات، مبتنی بر داده‌های میدانی محلی پیشنهاد می‌شود.

به‌طور مشابه، مطالعه‌ای دیگر گزارش کرد که یونجه به‌دلیل کاهش نیاز به کود نیتروژن، یکی از گزینه‌های مطلوب برای بهبود پایداری محیط‌زیستی در سیستم‌های کشاورزی است (Pugesgaard et al., 2023). این همخوانی، نتایج پژوهش حاضر را تأیید می‌کند روند مشابهی در مورد اثر گیاهان بررسی شده بر اکوسیستم‌ها مشاهده گردید به‌طوری‌که نتایج نشان داد که تولید گندم و چاودار بیشترین و تولید یونجه کمترین خسارت زیست‌محیطی را به دنبال داشت (شکل ۱). در مورد منابع نیز نتایج نشان داد که بیشترین خسارت زیست‌محیطی با تولید گندم و چاودار رخ می‌دهد. از نظر تأثیر بر اکوسیستم‌ها، اثر سه گیاه نخود، کلزا و جو تقریباً یکسان بود ولی اثر کلزا بر منابع در مقایسه با اکوسیستم‌ها تا حدودی افزایش نشان داد (شکل ۱). اگر چه تأثیر کلزا بر اکوسیستم‌ها و منابع زیاد بود ولی اثر این گیاه بر سلامت انسان، بعد از یونجه، دارای کمترین مقدار بود (شکل ۱).

نتایج نشان داد که تمامی گیاهان مورد بررسی، بیشترین اثر زیست‌محیطی را بر سلامت انسان داشتند، چراکه بیشترین سهم اثر زیست‌محیطی در تمامی گیاهان مورد بررسی به طبقه‌ی سلامت انسان تعلق داشت (شکل ۲). بعد از سلامت انسان، اکوسیستم‌ها بیشترین تأثیر را پذیرفتند. اثر گیاهان مورد بررسی بر طبقه‌ی منابع ناچیز بود (شکل ۲). بر این اساس، می‌توان نتیجه گرفت که برای بررسی اثرات زیست‌محیطی ذرت، یونجه، چاودار، گندم، جو، کلزا و نخود برای قرارگیری در تناوب با سویا باید به اثر آنها بر سلامت انسان توجه بیشتری

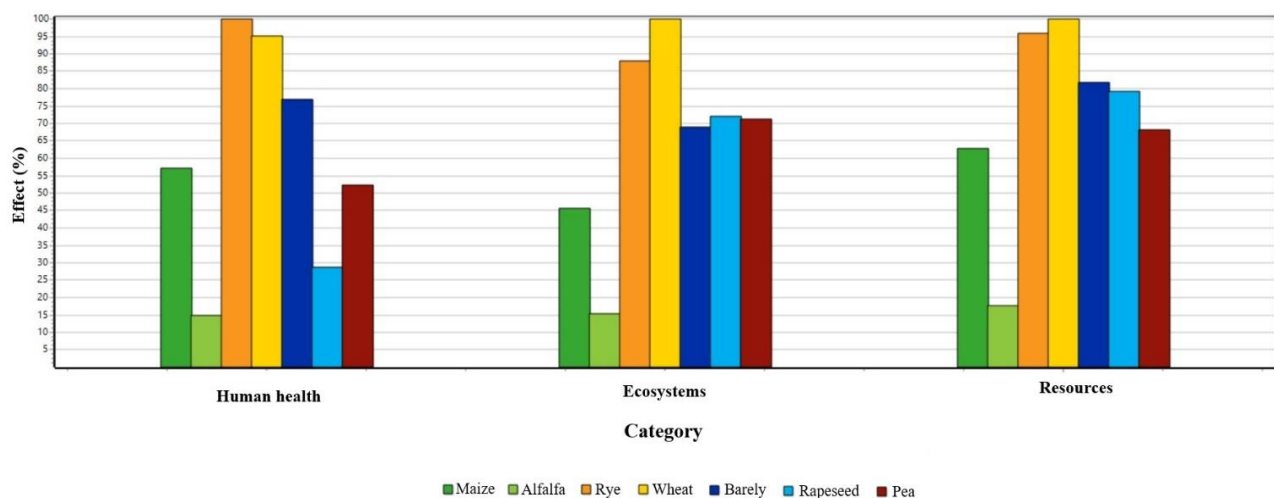


Fig. 1: Effect of proposed crop on resources, ecosystems and human health

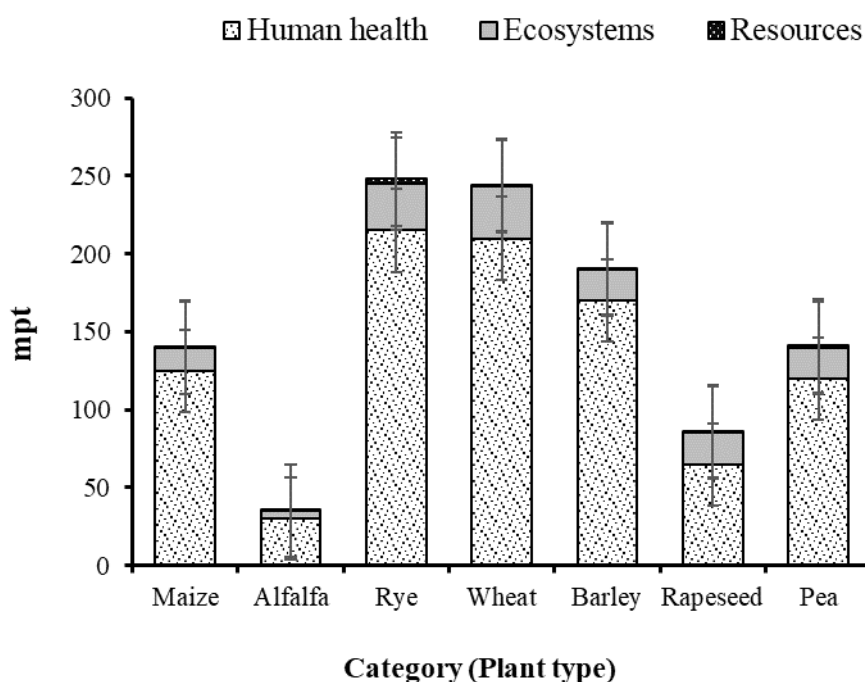


Fig. 2: The distribution of the impact of plants on resources, ecosystems and human health according to plant type Comparing processes; Method: ReCiPe 2016 Endpoint (E) v1.03/Single score

۴. نتیجه گیری کلی

یونجه نیز کمترین تأثیر زیست محیطی را دارا بود. با در نظر گرفتن اثرات زیست محیطی گیاهان معرفی شده، می توان گیاهان یونجه و کلزا را برای قرارگیری در تناوب زراعی با سویا پیشنهاد داد.

از بین گیاهانی که برای قرار گرفتن در تناوب زراعی با سویا معرفی شدند، گندم و چاودار بیشترین تأثیر منفی را بر سه طبقه منابع محیطی، اکوسیستم ها و سلامت انسان داشت. تولید

۵. منابع

- Berger, M., Sonderegger, T., Alvarenga, R., Bach, V., Cimprich, A., Dewulf, J. and Young, S. B. (2020). Mineral resources in life cycle impact assessment: part II – recommendations on application-dependent use of existing methods and on future method development needs. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 25(4), 798-813.
- Carciochi, W. D., Schwalbert, R., Andrade, F. H., Corassa, G. M., Carter, P., Gaspar, A. P., Schmidt, J. and Ciampitti, I. A. (2020). Soybean yield, biological N₂ fixation, and response to nitrogen fertilizer in preceding crop rotations. *Agronomy Journal*, 112(3), 2051-2065. <https://doi.org/10.1002/agj2.20157>
- Chen, Y., Liu, K. and Zhang, W. (2024). Effects of 10-year soybean monoculture on soil organic carbon dynamics. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 349, 108453. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108453>
- Cucek, L., Klemeš, J. J., and Kravanja, Z. (2022). A review of foot printing analysis for greenhouse gas emissions and water use. *Journal of Cleaner Production*, 363, 132303. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132303>
- De Bauw, P., Merckx, R., Boluwase, O. and Vandamme, E. (2024). Soybean cultivation as a sustainable alternative for soil health and food security: A Review. *Agronomy for Sustainable Development*, 44(2), 45. <https://doi.org/10.1007/s13593-024-00956-6>
- Esfahani, S. M. J., Naderi Mahdei, K., Saadi, H. and Dourandish, A. (2018). Evaluate the environmental impact of silage corn production in south Khorasan province. *Journal of Agroecology*, 10(1), 281-298. (In Persian). <https://doi.org/10.22067/jag.v10i1.60850>
- Fantke, P., Aurisano, N., Bare, J., Backhaus, T., Bulle, C., Chapman, P. M. and Jolliet, O. (2023). Toward harmonizing ecotoxicity characterization in life cycle impact assessment. *Environmental Science and Technology*, 57(26), 9710-9721.
- Gan, Y., Hamel, C., O'Donovan, J. T., Cutforth, H., Zentner, R. P., Campbell, C. A., Niu, Y. and Poppy, L. (2015). Legume-based rotations enhance soybean yield and soil health. *Field Crops Research*, 172, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2014.12.002>
- Guinée, J. B. (2002). Handbook on life cycle assessment: Operational guide to the ISO standards. Springer, Netherlands.

- Hashemi, S. S., Pourmasoumi, M. and Eskandari, S. (2022). A comparative life cycle assessment of different fertilization scenarios for wheat production: A case study in Iran. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(60), 90233-90245.
- Hosseini, H. Y., Aizpanah, A., Namdari, M. and Shirkhani, H. (2024). Environmental life cycle assessment of corn production in tropical regions. *Scientific Reports*, 14, 20036. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-70923-4>
- Hughes, G., Ryan, D.J., Mukherjea, R. and Schasteen, C.S. (2023). Soy protein: A comprehensive review of composition, health benefits, and applications comprehensive. *Reviews in Food Science and Food Safety*, 22(3), 1447-1482. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13126>
- Huijbregts, M. A., Steinmann, Z. J., Elshout, P. M., Stam, G., Veronesi, F., Vieira, M. and van Zelm, R. (2017). ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 22(2), 138-147.
- Kazemi, K. and Eskandari, H. (2025). Scheduling a crop rotation program for potato based on some environmental considerations. *Plant Production Technology*, 17(1), 29-36. (In Persian). <https://doi.org/10.22084/ppt.2025.30250.2145>
- Kirkegaard, J. A., Sarwar, M., Wong, P. T. W., Mead, A., Howe, G. and Newell, M. (2008). Bio-fumigation and enhanced mineralization in canola-soybean rotations. *Plant and Soil*, 307(1-2), 239-252. <https://doi.org/10.1007/s11104-008-9598-0>
- Li, Y., Zhang, H., Wang, X., Liu, J., Chen, S. and Zhang, W. (2022). Barley as a preceding crop improves soybean yield and soil health in semi-arid regions. *Field Crops Research*. 287, 108665. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2022.108665>
- Liu, Y., Wang, H. and Li, J. (2023). Continuous soybean cropping enhances root disease incidence by altering soil microbial communities. *Plant Disease*, 107(8), 2156-2165. <https://doi.org/10.1094/PDIS-11-22-2634-RE>
- López-Maldonado, G., Sébastien, L. and Blanc, I. (2023). Addressing negative values in Life Cycle Assessment: A review of current practices and recommendations for interpreting environmental credits. *Journal of Cleaner Production*, 414, 137518
- Messina, M., Duncan, A., Glenn, A. and Mariotti, F. (2023). The role of soy in plant-based diets: health benefits and sustainability. *Trends in Food Science and Technology*, 132, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.03.010>
- Payne, R.W. (2015). The design and analysis of long-term rotation experiments. *Agronomy Journal*. 107 (2), 772-785. <https://doi.org/10.2134/agronj2012.0411>
- Pedersen, P. and Lauer, J. G. (2003). Corn and soybean response to rotation sequence, row spacing, and tillage system. *Agronomy Journal*, 95(4), 965-971. <https://doi.org/10.2134/agronj2003.0965>
- Perea, R. G., García, I. F., Ballesteros, R. and Ortega, J. F. (2023). Life cycle assessment of crop rotation systems using irrigation: A case study in the Spanish context. *Journal of Environmental Management*, 345, 118890
- Pugesgaard, S., Schelde, K., Ugarte, C. M., and Jørgensen, U. (2023). Carbon footprint of perennial grass-forage legume mixtures for bioenergy production. *GCB Bioenergy*, 15(4), 450-465. <https://doi.org/10.1093/g3journal/jkad028>
- Skinner, R. H., Dell, C. J. and Dell, E. J. (2023). Ecosystem services from perennial forages in crop rotations: A review. *Agronomy Journal*, 115(3), 1015-1033. <https://doi.org/10.1002/agj2.21345>
- Snapp, S. S., Swinton, S. M., Labarta, R., Mutch, D., Black, J. R., Leep, R., Nyiraneza, J. and O'Neil, K. (2005). Evaluating cover crops for benefits, costs and performance within cropping system niches. *Agronomy Journal*, 97(1), 151-156. <https://doi.org/10.2134/agronj2005.0151>
- Stanger, T. F. and Lauer, J. G. (2008). Corn and soybean rotation response to tillage and alfalfa. *Agronomy Journal*, 100(4), 1058-1066. <https://doi.org/10.2134/agronj2007.0310>
- United States Department of Agriculture (USDA). (2024). Oilseeds: World markets and trade. Available at: <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/app/index.html#/app/downloads>
- Vásquez-Ibarra, L., Rebolledo-Leiva, R., Angulo-Meza, L., González-Araya, M. C. and Iriarte, A. (2021). The joint use of life cycle assessment and data envelopment analysis methodologies for eco-efficiency assessment: A critical review, taxonomy and future research. *Science of The Total Environment*, 762, 143125.
- Villarino, S. H., Látterra, P., Pinto, P. and Fernández, M. E. (2021). Life cycle assessment of soybean-based crop rotations in the Argentinean Pampas: a comparison between continuous and rotational cropping. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 26(8), 1563-1577.
- Weiss, F. and Leip, A. (2021). Environmental impacts of organic and conventional agricultural products—Are the differences captured by life cycle assessment? *Journal of Environmental Management*, 289, 112450. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112450>
- Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E. and Weidema, B. (2016). The Eco-invent database version 3 (part I): overview and methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(9), 1218-1230.
- Zhang, L., Wang, X. and Chen, H. (2023). Long-term continuous soybean cropping impacts on yield and soil quality. *Soil and Tillage Research*, 225, 105542. <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105542>