Plant Production Technology/ Volume 26/ Issu 1/ Pages 51-62/ Spring and Summer 2026
https://doi.org/ 10.22084/ppt.2026.32160.2181

ORIGINAL RESEARCH PAPER

Evaluation of Recommended Plants for Rotation with Maize Based on Environmental Considerations to Select the Most Compatible Crop

Alizadeh Amraie[1*], A.

1. Instructor, Department of Agriculture, Payame Noor University, Tehran, Iran
*: Corresponding Author Email: aali-andi@pnu.ac.ir

Received: 2025/12/31 Accepted: 2026/05/02

Introduction
Maize (*Zea mays*) is a global staple crucial for food, feed, and biofuel. However, continuous monoculture leads to soil degradation and environmental issues. Crop rotation, especially with legumes, is a key strategy to enhance soil health and system sustainability. While crops like alfalfa, rye, wheat, canola, chickpea, soybean, flax, and sunflower are proposed for rotation with maize, comprehensive studies comparing their full environmental footprints are limited. This study aims to fill this gap by conducting a comparative Life Cycle Assessment (LCA) of these eight rotation crops to identify those with the lowest environmental burdens, thereby informing the design of sustainable maize-based cropping systems.

Material and Methods
The study followed the ISO 14040 and 14044 standards for LCA. The modeling was performed using SimaPro software (v9.5) with the Ecoinvent database (v3.9, cut-off model), providing globally averaged inventory data for inputs (seeds, fertilizers, pesticides, fuel) and yields for each crop. The functional unit was the Material Product Transport (mpt) unit, encompassing all input, product, and transport flows. The life cycle impact assessment was conducted using the ReCiPe 2016 Endpoint (v1.08) method with its default weighting set. This method aggregates impacts into three endpoint categories: damage to Human Health (measured in DALY), damage to Ecosystems (measured in species.year), and resource scarcity (Resources, measured in USD). Results for each crop in each category were calculated in absolute mpt values and normalized to a percentage scale (Effect%) relative to the highest-impacting crop within that specific category to facilitate visual comparison. No further weighting was applied to maintain objectivity.

Results and Discussion
The LCA revealed that all eight crops impacted 22 midpoint categories. Flax (Linum usitatissimum) consistently demonstrated the highest negative environmental impact across all three endpoint categories. In the normalized results (Effect%), Flax scored 100% in Human Health, Ecosystems, and Resources. Its mpt values were also the highest (e.g., 503 for Human Health, 70 for Ecosystems, 6 for Resources). In stark contrast, Alfalfa (Medicago sativa) exhibited the lowest environmental burden, with normalized scores of only 8% for Human Health, 9% for Ecosystems, and 12% for Resources, and the lowest corresponding mpt values. Wheat, Rye, and Soybean showed relatively high negative impacts, particularly on Human Health and Ecosystems. Canola had significant effects on Ecosystems and Resources but a lower impact on Human Health. Sunflower and Chickpea presented intermediate impacts. A notable exception was the negative characterization factor for Rye concerning water consumption and terrestrial ecosystems (-1.29E-10), indicating a net positive environmental effect in this specific area due to avoided burdens, likely from its role as a cover crop in reducing nitrate leaching and soil erosion. The poor environmental performance of Flax, Wheat, and Rye can be attributed to their high reliance on external inputs, particularly nitrogen fertilizers. The production and application of synthetic nitrogen fertilizers are major contributors to greenhouse gas emissions (e.g., nitrous oxide), aquatic eutrophication, and acidification, directly impacting human health and ecosystems. Furthermore, their pest management may require more pesticide applications. Conversely, Alfalfa's superior profile stems from its inherent biological nitrogen fixation capability, drastically reducing the need for synthetic N fertilizers. Its deep, perennial root system also improves soil structure and prevents erosion, providing additional ecosystem benefits. These findings align with previous studies highlighting high-input cereals as significant environmental burdens and praising alfalfa for enhancing agro-ecosystem sustainability.

Conclusion

From a purely environmental perspective, Alfalfa is the most favorable crop for inclusion in a rotation system with maize, offering the lowest impact across human health, ecosystems, and resource use. Flax is the least favorable option due to its substantially higher environmental footprint. Crops like Wheat, Rye, and Soybean also carry considerable burdens and should be chosen with caution if environmental impact is a primary concern. Canola, Chickpea, and Sunflower represent intermediate choices. The positive net effect of Rye on water and terrestrial ecosystems underscores the value of cover crops in specific impact categories. It is crucial to note that these results are based on global average data; local conditions, management practices, and economic factors will influence final decision-making. Therefore, while this LCA provides a robust scientific basis for environmentally-informed choices, optimal rotation design must integrate these findings with agronomic suitability and economic feasibility. Future studies using region-specific inventory data are recommended for localized applications.

Keywords: Ecosystem, environmental resources, human health life cycle assessment, sustainable production.

Citations: Alizadeh Amraie, A. (2026). Evaluation of Recommended Plants for Rotation with Maize Based on Environmental Considerations to Select the Most Compatible Crop. Plant Production Technology, 26(1), 51-62.

https://doi.org/ 10.22084/ppt.2026.32160.2181

© 2022 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

فنآوری تولیدات گیاهی/ جلد بیست و ششم/ شمارهٔ اول/ صفحات ۵۱-۶۲/ بهار و تابستان ۱۴۰۵
https://doi.org/ 10.22084/ppt.2026.32160.2181

ارزیابی برخی گیاهان توصیه شده برای قرارگیری در تناوب زراعی با ذرت براساس برخی ملاحظات زیست‌محیطی به‌منظور انتخاب سازگاترین گیاه

Evaluation of Recommended Plants for Rotation with Maize Based on Environmental Considerations to Select the Most Compatible Crop

اشرف عالی‌زاده امرایی[1*]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۱۲
(مقاله پژوهشی)

چکیده

تناوب زراعی، راهکاری کلیدی برای کاهش اثرات منفی کشت مداوم و افزایش پایداری در تولید ذرت است. این پژوهش با هدف ارزیابی اثرات زیست‌محیطی هشت گیاه پیشنهادی برای تناوب با ذرت (گندم، آفتابگردان، سویا، چاودار، نخود، کتان، یونجه و کلزا) با استفاده از روش ارزیابی چرخه حیات انجام شد. مدل‌سازی با بهره‌گیری از نرم‌افزار سیماپرو (نسخه ۹.۵) و پایگاه داده اکوینونت انجام پذیرفت. تحلیل اثرات با روش ReCiPe 2016 در سه معیار نهایی سلامت انسان، اکوسیستم‌ها و مصرف منابع انجام شد. نتایج نشان داد که تمامی گیاهان مورد مطالعه بر ۲۲ طبقه اثرگذار بودند. در بین گیاهان، کتان بیشترین اثر منفی را در تمامی معیارها داشت؛ به‌طوری‌که در معیارهای سلامت انسان، اکوسیستم و منابع بالاترین مقادیر mpt را ثبت کرد. در مقابل، یونجه کمترین اثر منفی را در سلامت انسان (۸ درصد)، اکوسیستم (۹ درصد) و منابع (۱۲درصد) نشان داد. گندم، چاودار و سویا نیز اثرات منفی قابل‌توجهی، به ویژه بر سلامت انسان و اکوسیستم داشتند. اثر مثبت چاودار بر مصرف آب و اکوسیستم‌های خشکی (مقدار منفی) نشان‌دهنده مزیت زیست‌محیطی آن در این حیطه خاص است. عملکرد ضعیف زیست‌محیطی کتان را می‌توان به نیاز بالای آن‌ها به نهاده‌های خارجی مانند کودهای نیتروژنی مرتبط دانست، در حالی که برتری یونجه ناشی از توانایی تثبیت بیولوژیک نیتروژن و سیستم ریشه‌ای عمیق آن است. در نتیجه، از دیدگاه زیست‌محیطی، یونجه به‌عنوان مطلوب‌ترین گزینه برای تناوب با ذرت شناخته شد، در حالی که کتان نامناسب‌ترین گزینه ارزیابی گردید. تصمیم‌گیری نهایی باید با درنظرگرفتن همزمان معیارهای اقتصادی و عملکردی انجام پذیرد.

واژه‌های کلیدی: ارزیابی چرخه حیات، بوم‌نظام، تولید پایدار، سلامت انسان، منابع محیطی

ارجاع به مقاله: عالی‌زاده امرایی، ا. (۱۴۰۵). تأثیر ارزیابی برخی گیاهان توصیه شده برای قرارگیری در تناوب زراعی با ذرت بر اساس برخی ملاحظات زیست‌محیطی به‌منظور انتخاب سازگاترین گیاه ، *مجله فنآوری تولیدات گیاهی*، ۲۶(۱)، ۵۱-۶۲.
https://doi.org/ 10.22084/ppt.2026.32160.2181/

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 الکترونیکی: ۲۴۷۶-۵۶۵۱ **شاپا چاپی:** ۲۴۷۶-۶۳۲۱

۱. مربی گروه علمی کشاورزی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران
*: نویسنده مسئول Email: aali-andi@pnu.ac.ir

۱. مقدمه

ذرت (*Zea mays*) به‌عنوان یکی از مهم‌ترین غلات در جهان، نقش برجسته‌ای در تغذیه انسان، خوراک دام، صنایع غذایی و تولید انرژی (بیوفیول) ایفا می‌کند. این گیاه غله‌ای به دلیل ارزش غذایی بالا، انعطاف‌پذیری در فرآورده‌ها و کاربرد گسترده‌اش در صنایع مختلف، یکی از پایه‌های امنیت غذایی جهانی شناخته می‌شود. در سال ۲۰۲٤، ذرت همچنان یکی از پرمحصول‌ترین محصولات کشاورزی و از لحاظ مقدار تولید در میان غلات پیشرو است؛ ایالات‌متحده‌آمریکا با سهم حدود ۳۱٪ از تولید جهانی ذرت در صدر تولیدکنندگان قرار دارد و کشورهای دیگر نظیر چین نیز بخش مهمی از تولید را به‌خود اختصاص داده‌اند (USDA-FAS-2024).

یکی از چالش‌های مهم در تولید ذرت، تک‌کشتی است که در آن ذرت در سال‌های متوالی در یک قطعه زمین زراعی کشت می‌شود. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که تک‌کشتی ذرت می‌تواند منجر به کاهش تنوع میکروارگانیسم‌های مفید خاک و کاهش کیفیت ساختار خاک شود، کاهش مواد آلی و افزایش خطر فرسایش و نابسامانی در تعادل عناصر غذایی خاک را به دنبال دارد (Ghimire *et al.*, 2019). در مقابل، به‌کارگیری تناوب زراعی مناسب – به‌ویژه زمانی که شامل گیاهان لگومینوز (مانند شبدر، یونجه یا سویا در دوره‌های چرخشی) باشد – می‌تواند باروری خاک، ذخیره کربن آلی، فعالیت‌های میکروبی و بهره‌وری عناصر غذایی را افزایش دهد و اثرات منفی تک‌کشتی را کاهش دهد (Wang *et al.*, 2023).

تناوب زراعی، که به‌صورت کشت متوالی گیاهان غیرمشابه از نظر ویژگی‌های مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی در یک قطعه زمین زراعی تعریف می‌شود، از طریق بهبود خصوصیات خاک، کاهش فشار علف‌های هرز و بیمارگرها و تنظیم چرخه عناصر غذایی می‌تواند رشد و عملکرد گیاهان زراعی، از جمله ذرت را به‌طور معنی‌داری افزایش دهد (Payne, 2015). در میان گیاهان مختلف، سویا (*Glycine max*) یکی از مهم‌ترین گزینه‌ها برای قرارگیری در تناوب زراعی با ذرت محسوب می‌شود؛ به‌طوری که متاآنالیزها نشان داده‌اند تناوب ذرت–سویا سبب افزایش نیتروژن خاک، بهبود سلامت خاک و کاهش بروز بیماری‌های ریشه ذرت، به‌ویژه بیماری‌های قارچی نظیرفوزاریوم می‌شود (Ruis *et al.*, 2021). گندم (*Tititicum aestivum*) نیز به‌عنوان یک غله زمستانه، با افزایش ورودی بقایای گیاهی و بهبود پایداری ساختار خاک، نقش مؤثری در افزایش ذخایر کربن و نیتروژن خاک و کاهش فرسایش پس از کشت ذرت ایفا می‌کند (King and Blesh, 2022). به‌طور مشابه، یونجه (*Medicago sativa*) به‌دلیل سیستم ریشه‌ای عمیق و تثبیت زیستی نیتروژن، باعث افزایش تنوع میکروبی خاک، افزایش ماده آلی و کاهش آبشویی نیتروژن در سامانه‌های تناوبی ذرت می‌شود (McDaniel *et al.*, 2020).در میان لگوم‌ها، نخود (*Cicer arientimun*) با کاهش وابستگی به کودهای نیتروژنی و افزایش تنوع زیستی خاک، گزینه‌ای مناسب برای تناوب با ذرت معرفی شده است و نقش مهمی در پایداری سامانه‌های زراعی ایفا می‌کند (Snapp *et al.*, 2021). همچنین، کلزا (*Brassica napus*) به‌دلیل ترشحات آللوپاتیک ریشه، قادر است چرخه بیماری‌های خاکزاد ذرت، به‌ویژه قارچ‌هایی مانند ریزوباکتریا را مختل کند و سلامت ریشه را بهبود بخشد (Harker *et al.*, 2023). آفتابگردان (*Helianthus annuus*) با ریشه‌های عمیق خود می‌تواند فسفر تثبیت‌شده در لایه‌های عمیق خاک را آزاد کرده و دسترس‌پذیری فسفر برای ذرت را افزایش دهد؛ علاوه بر این، کاهش شدت برخی بیماری‌های ریشه ذرت در تناوب با آفتابگردان گزارش شده است (Zhang *et al.*, 2023). از سوی دیگر، چاودار پاییزه (*Secale sereale*) به‌عنوان کشت پوششی در تناوب‌های مبتنی بر ذرت، با جذب نیترات باقی‌مانده خاک، موجب کاهش آبشویی نیتروژن و کنترل علف‌های هرز از طریق اثرات آللوپاتیک می‌شود (Kaspar *et al.*, 2022). در نهایت، کتان (*Linum usitatissimum*) به‌عنوان یک گیاه دانه روغنی، به‌دلیل ترشحات ریشه‌ای با خاصیت ضدقارچی، موجب کاهش جمعیت قارچ‌های بیماری‌زای ذرت به‌ویژه فوزاریوم شده و علاوه بر مزایای زیست‌محیطی، از نظر اقتصادی نیز می‌تواند تنوع درآمدی برای نظام‌های زراعی فراهم آورد (Yau *et al.*, 2022). به‌طور کلی، استفاده از این گیاهان در تناوب زراعی با ذرت، با بهبود سلامت خاک، افزایش بهره‌وری عناصر غذایی و کاهش فشار تنش‌های زیستی، نقش کلیدی در پایداری تولید ذرت ایفا می‌کند.

افزایش شدت و گستره پیامدهای زیست‌محیطی ناشی از تولید محصولات زراعی، از جمله آلودگی آب‌ها، تخریب

خاک، انتشار گازهای گلخانه‌ای و افت تنوع زیستی، موجب شده است که توجه به ملاحظات زیست‌محیطی به یکی از ارکان اصلی مدیریت سامانه‌های کشاورزی تبدیل شود. در این چارچوب، استراتژی‌های مدیریتی نوین باید به‌گونه‌ای طراحی شوند که به‌طور هم‌زمان بهره‌وری زراعی، سودآوری اقتصادی و پایداری زیست‌محیطی را تضمین کنند و از انتقال فشارهای زیست‌محیطی از یک بخش به بخش دیگر جلوگیری نمایند. در این میان، روش ارزیابی چرخه حیات (LCA = Life cycle Assessment) به‌عنوان یکی از جامع‌ترین و پذیرفته‌شده‌ترین ابزارها برای سنجش اثرات زیست‌محیطی سامانه‌های تولید کشاورزی شناخته می‌شود. این روش با در نظر گرفتن کل چرخه تولید – از تأمین نهاده‌ها و عملیات مزرعه‌ای تا برداشت و گاهی فرآوری–امکان شناسایی نقاط بحرانی اثرگذاری زیست‌محیطی را فراهم می‌سازد (Finnveden *et al.*,2009). مطالعات متعدد نشان داده‌اند که LCA می‌تواند مبنای علمی معتبری برای بهینه‌سازی مدیریت نهاده‌ها، انتخاب الگوی کشت و طراحی تناوب‌های زراعی پایدار باشد.

در زمینه تولید ذرت، نتایج پژوهش‌های مبتنی بر LCA حاکی از آن است که مصرف کودهای شیمیایی، به‌ویژه کودهای نیتروژنی، سهم عمده‌ای در بروز اثرات زیست‌محیطی دارد. این اثرات عمدتاً در قالب سمیت اکوسیستم‌های آبی، اوتریفیکاسیون و اسیدی‌شدن محیط‌های طبیعی بروز می‌یابند که به‌طور مستقیم با آبشویی نیترات و فسفر و انتشار ترکیبات واکنش‌پذیر نیتروژن مرتبط هستند (Huibregts *et al.*, 2017) . در یک مطالعه اخیر مبتنی بر LCA بر تولید ذرت، نشان داده شد که بالاترین سهم اثرات زیست‌محیطی ذرت به شاخص سمیت اکوسیستم‌های آبی اختصاص دارد و مدیریت نامناسب کودهای شیمیایی نقش کلیدی در تشدید این پیامد ایفا می‌کند (Hosseini *et al.*, 2024). از سوی دیگر، مقایسه اثرات زیست‌محیطی محصولات مختلف زراعی با استفاده از رویکرد LCAنشان می‌دهد که نوع گیاه زراعی و جایگاه آن در تناوب کشت می‌تواند تفاوت‌های قابل‌توجهی در شدت اثرات زیست‌محیطی ایجاد کند. در یک پژوهش تطبیقی که اثرات زیست‌محیطی هشت گیاه زراعی شامل یولاف، باقلا، جو، سیب‌زمینی، ذرت، کلزا، یونجه و گندم بررسی شد، مشخص گردید که تولید کلزا بیشترین بار زیست‌محیطی را به سامانه تحمیل می‌کند، در حالی که یونجه و یولاف کمترین خسارت زیست‌محیطی را نشان دادند .بر همین اساس، استفاده از این گیاهان در تناوب زراعی به‌عنوان راهکاری مؤثر برای کاهش اثرات زیست‌محیطی کل سامانه تولید پیشنهاد شد (Kazemi and Eskandari, 2025). به‌طورکلی، این یافته‌ها نشان می‌دهد که ترکیب ارزیابی چرخه حیات با طراحی هوشمندانه تناوب‌های زراعی می‌تواند نقش تعیین‌کننده‌ای در کاهش اثرات زیست‌محیطی تولید محصولات زراعی، به‌ویژه ذرت، و حرکت به‌سوی کشاورزی پایدار ایفا کند.

با توجه به پیامدهای زیست‌محیطی ناشی از تولید محصولات زراعی، توسعه استراتژی‌های مدیریتی که هم از نظر بهره‌وری اقتصادی و عملکرد محصول و هم از نظر پایداری زیست‌محیطی بهینه باشند، اهمیت فراوان یافته است. در این راستا، تناوب زراعی به‌عنوان یک ابزار کلیدی برای کاهش اثرات منفی تک‌کشتی و بهبود سلامت خاک شناخته می‌شود . هرچند مطالعات گذشته گیاهان مختلفی از جمله یونجه، چاودار، گندم، کلزا، نخود، سویا، کتان و ذرت را برای قرارگیری در تناوب با ذرت پیشنهاد کرده‌اند، اما تمرکز غالباً بر اثرات عملکردی و زراعی این گیاهان بوده و پیامدهای زیست‌محیطی تولید آنها به‌طور جامع مورد بررسی قرار نگرفته است. هدف اصلی این تحقیق، ارزیابی و مقایسه اثرات زیست‌محیطی هشت گیاه مناسب برای تناوب با ذرت با استفاده از روش ارزیابی چرخه زندگی است تا گیاهانی که کمترین اثرات منفی بر محیط زیست دارند، برای طراحی برنامه‌های تناوب زراعی پایدار ذرت شناسایی شوند. این ارزیابی، علاوه بر فراهم کردن اطلاعات لازم برای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی، امکان هم‌راستا کردن اهداف عملکرد محصول و پایداری زیست‌محیطی را نیز فراهم می‌کند.

۲. مواد و روش‌ها

در این پژوهش، ارزیابی چرخه حیات بر اساس استانداردهای بین‌المللی ISO 14040 و ISO 14044 با رویکرد «گهواره تا گور» انجام شد. این چارچوب امکان بررسی جامع آثار زیست‌محیطی سامانه‌های تولیدی را از مرحله استخراج و تأمین نهاده‌ها تا تولید محصول نهایی فراهم می‌کند و بستری مناسب برای مقایسه سیستماتیک گزینه‌های مختلف کشاورزی

بر پایه یک واحد عملکردی مشترک فراهم می‌سازد. در این مطالعه، واحد عملکردی به‌صورت مواد، محصول، حمل و نقل (material–product–transport) mpt در نظر گرفته شد که مجموعه جریان‌های ورودی شامل مواد اولیه و نهاده‌های کشاورزی، خروجی اصلی (محصول تولیدی) و عملیات حمل‌ونقل مرتبط با تولید هر محصول را در بر می‌گیرد. استفاده از این واحد عملکردی یکسان موجب شد تمامی گزینه‌های تناوبی براساس یک مبنای مقایسه‌ای یکنواخت و قابل‌اتکا ارزیابی شوند. (Guinee *et al.*, 2011).

برای مقایسه آثار زیست‌محیطی، هشت گیاه پیشنهادی برای قرارگیری در تناوب با ذرت شامل گندم، آفتابگردان، سویا، چاودار، نخود، کتان، یونجه و کلزا مورد بررسی قرار گرفتند. مدل‌سازی چرخه حیات این محصولات با استفاده از نرم‌افزار SimaPro نسخه ۹.۵ انجام شد.

نرم‌افزار SimaPro یکی از پرکاربردترین ابزارهای تخصصی در مطالعات ارزیابی چرخه حیات است که امکان مدل‌سازی، تحلیل و مقایسه سیستم‌های تولیدی را بر پایه استانداردهای بین‌المللی فراهم می‌کند. این نرم‌افزار با بهره‌گیری از پایگاه‌های داده معتبر جهانی مانندEcoinvent ، قابلیت تعریف دقیق فرایندها، ردیابی جریان‌های ورودی و خروجی و محاسبه شاخص‌های زیست‌محیطی در سطوح مختلف را داراست. همچنین، SimaPro امکان به‌کارگیری روش‌های شناخته‌شده ارزیابی اثرات، از جمله ReCiPe ، را فراهم می‌کند و به دلیل شفافیت در ساختار محاسباتی و گستردگی کاربرد در پژوهش‌های علمی، به‌عنوان یکی از ابزارهای مرجع در مطالعات LCA شناخته می‌شود. در این پژوهش از نسخه ۹.۵ این نرم‌افزار برای مدل‌سازی و تحلیل چرخه حیات گیاهان مورد بررسی استفاده شد. انتخاب این نرم‌افزار به دلیل انطباق با استانداردهای بین‌المللی LCA ، دسترسی به پایگاه‌های داده معتبر و امکان تحلیل دقیق اثرات زیست‌محیطی صورت گرفت. در محیط نرم‌افزار، هر یک از گیاهان به‌عنوان یک فرایند تولیدی مستقل تعریف شد و کلیه مراحل مرتبط با تولید آن در قالب یک سیستم یکپارچه مدل‌سازی گردید.

داده‌های مورد نیاز برای مدل‌سازی شامل مقادیر نهاده‌های مصرفی (بذر، کودهای شیمیایی نیتروژنه، فسفاته و پتاسه، و سموم دفع آفات)، مصرف سوخت ماشین‌آلات در مراحل کاشت، داشت و برداشت، و همچنین میزان عملکرد محصول بود. این اطلاعات از پایگاه داده Ecoinvent نسخه ۳.۹ با مدل سیستمی cut-off استخراج شد. استفاده از این پایگاه داده به دلیل جامعیت، اعتبار علمی و ارائه مقادیر میانگین جهانی انتخاب گردید. بهره‌گیری از داده‌های یکنواخت و استاندارد موجب شد مقایسه بین گیاهان مختلف بدون تأثیرپذیری از تغییرات منطقه‌ای و مدیریتی انجام شود و یک چارچوب تحلیلی پایه برای ارزیابی نسبی گزینه‌های تناوبی فراهم گردد.

برای تحلیل اثرات زیست‌محیطی از روش ReCiPe 2016 Endpoint(نسخه ۱.۰۸) استفاده شد. این روش اثرات زیست‌محیطی را در سه شاخص نهایی شامل سلامت انسان، کیفیت اکوسیستم و مصرف منابع خلاصه می‌کند و امکان تفسیر یکپارچه نتایج را فراهم می‌سازد. شاخص سلامت انسان بیانگر پیامدهای بالقوه ناشی از انتشار آلاینده‌ها بر رفاه و طول عمر انسان است که عمدتاً از طریق آلودگی هوا، آب و خاک و نیز تغییرات اقلیمی بروز می‌کند و معمولاً با واحد DALY بیان می‌شود (Huijbregts *et al.*, 2017).

شاخص اکوسیستم‌ها اثرات سیستم تولیدی بر پایداری و تنوع زیستی محیط‌های خشکی و آبزی را نشان می‌دهد که تحت تأثیر فرایندهایی مانند اسیدی‌شدن، اوتریفیکاسیون و سمیت زیست‌محیطی قرار می‌گیرد و با واحد species.year گزارش می‌شود. شاخص منابع نیز میزان مصرف و کاهش منابع طبیعی، به‌ویژه منابع فسیلی و معدنی، را نشان می‌دهد و بیانگر هزینه‌های بالقوه تحمیل‌شده به نسل‌های آینده است (Fanthe *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 به‌دلیل استخراج و مصرف آن‌ها در چرخه تولید اندازه‌گیری می‌کند. واحد این شاخص معمولاً دلار آمریکا است. یک عدد بزرگ‌تر (مثبت) به معنای مصرف بی‌پرواتر منابع و ایجاد هزینه بیشتر برای آیندگان است. بنابراین، مقادیر کمتر مطلوب‌تر هستند (Berger *et al.*, 2020). به‌منظور مقایسه کمی گزینه‌های مختلف تناوبی، نتایج هر یک از شاخص‌های نهایی به‌صورت جداگانه نرمال‌سازی شد. لذا، مقدار اثر زیست‌محیطی هر گیاه در هر شاخص نسبت به بیشترین مقدار مشاهده‌شده در همان شاخص به‌صورت درصد بیان گردید. این رویکرد امکان مقایسه مستقیم شدت اثرات

زیست‌محیطی میان گزینه‌های مختلف را فراهم کرده و شناسایی گیاهانی با بیشترین و کمترین اثرات را تسهیل می‌کند. در پایان، سیاهه انتشار و مقادیر شاخص‌های نهایی برای هر یک از گیاهان استخراج و براساس بررسی همزمان نتایج نرمال‌شده در سه شاخص سلامت انسان، اکوسیستم و مصرف منابع، مناسب‌ترین گزینه برای قرارگیری در تناوب با ذرت از دیدگاه زیست‌محیطی معرفی شد.

۳. نتایج و بحث

از آنجا که داده‌ها بر اساس میانگین جهانی از پایگاه‌های داده‌ای استخراج گردید، نتایج نیز براساس میانگین جهانی به‌دست آمده است. براساس نتایج به‌دست‌آمده، گیاهان مورد بررسی شامل گندم، آفتابگردان، سویا، چاودار، نخود، کتان، یونجه و کلزا 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 (با مقدار 1.29E-10-) اثر سایر گیاهان بر تمامی طبقات زیست‌محیطی مثبت بود که نشان‌دهنده‌ی اثر منفی آن‌ها بر طبقات مرتبط با سلامت محیط‌زیستی دارد (جدول ۱). اثر چاودار بر مصرف آب و اکوسیستم‌های خشکی منفی به‌دست آمد (جدول ۱). این موضوع نشان می‌دهد که چاودار از نظر زیست‌محیطی بر مصرف آب و اکوسیستم‌های خشکی اثر مثبت دارد. 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 بار محیط‌زیستی در مقیاس کلان می‌شود. به طور 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 خالص آن سیستم در آن دسته خاص است (Lopez-Maldonado *et al.*, 2023) در این مورد، عدد منفی چاودار نشان‌دهنده‌ی اثر خالص مثبت این گیاه است که به دلیل اجتناب از مصرف منابع و کاهش بار آلایندگی در مقایسه با سایر گزینه‌های کشت در حوزه مصرف آب و اکوسیستم‌های خشکی می‌باشد. در پژوهشی که در مورد عدس انجام گرفت گزارش گردید که چاودار در مجموع با کاهش مصرف آب، بر طبقه‌ی مصرف آب در اکوسیستم‌های خشکی نقش مثبت دارد (Eskandari and Mosavian, 2025) که با نتایج تحقیق حاضر مطابقت دارد.

نتایج ارزیابی اثرات نسبی (Effect%) نشان داد که در طبقه سلامت انسان، گیاه کتان با ۱۰۰درصد بیشترین اثر منفی و یونجه با هشت درصد کمترین اثر منفی را دارد. پس از کتان، چاودار (٤٤ درصد)، سویا (٤٣ درصد) و گندم (٤١ درصد) بیشترین سهم را در خسارت به سلامت انسان داشتند (شکل ۱). در طبقه اکوسیستم نیز کتان (۱۰۰ درصد) بیشترین و یونجه (۹ درصد) کمترین اثر منفی را نشان داد. سویا (۷۸ درصد) و آفتابگردان (٥٤ درصد) در رتبه‌های بعدی اثر منفی بر اکوسیستم قرار گرفتند. در مورد منابع محیطی، مجدداً کتان (۱۰۰درصد) بیشترین اثر منفی و یونجه (۱۲درصد) کمترین اثر منفی را به خود اختصاص داد. آفتابگردان (۸۷ درصد) و گندم (٦٠درصد) نیز اثرات منفی قابل‌توجهی بر منابع نشان دادند (شکل ۱).

از دیدگاه شاخص mpt نیز روند مشابهی مشاهده شد. در زمینه سلامت انسان، کتان بیشترین تاثیر منفی و یونجه کمترین تأثیر منفی را به‌دنبال داشتند (شکل ۲). در خصوص اثر بر اکوسیستم، کتاب با مقدار (۷۰) و یونجه با مقدار (۸) کمترین مقادیر را به‌خود اختصاص دادند. بر این اساس می‌توان بیشترین بار زیست‌محیطی را به کتان و کمترین آن را به یونجه نسبت داد (شکل ۲).

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

Impact category			Crops							
		Unit	Wheat	Sunflower	Soybean	Rye	Pea	Flax	Alfalfa	Rapeseed
1	Global warming, Human health	DALY	7.18E-6	9.02E-6	2.98E-5	6.28E-6	3.85E-6	1.22E-5	1.05E-6	8.39E-6
2	Global warming, Terrestrial ecosystems	Species. yr	1.44E-8	1.8E-8	5.96E-8	1.26E-8	7.71E-9	2.44E-8	2.1E-9	1.68E-8
3	Global warming, Freshwater ecosystems	Species. yr	3.92E-13	4.92E-13	1.63E-12	3.42E-13	2.1E-13	6.65E-13	5.74E-14	4.58E-13
4	Stratospheric ozone depletion	DALY	2.8E-8	9.54E-9	1.56E-8	2.86E-8	1.12E-8	4.66E-8	3.65E-9	3.4E-8
5	Ionizing radiation	DALY	7.52E-10	1.01E-9	4.61E-10	9.48E-10	5.18E-10	1.18E-9	1.07E-10	2.63E-10
6	Ozone formation, Human health	DALU	2.43E-9	2.33E-9	2.37E-9	2.22E-9	2.01E-9	5.78E-9	4.98E-10	1.21E-9
7	Fine particulate matter formation	DALY	1.14E-6	7.35E-7	1.56E-6	8.66E-7	5.12E-7	8.77E-6	3.19E-7	1.15E-6
8	Ozone formation, Terrestrial ecosystems	Species. yr	3.5E-10	3.34E-10	3.774E-10	3.21E-10	2.89E-10	8.3E-10	7.19E-11	1.73E-10
9	Terrestrial acidification	Species. yr	1.66E-9	1.03E-9	5.78E-10	1.1E-9	3.89E-10	7.72E-9	6.33E-10	2.84E-9
10	Freshwater eutrophication	Species. yr	4.19E-10	7.4E-11	1.49E-10	1.9E-10	1.3E-10	1.01E-9	5.08E-11	2.28E-10
11	Marin eutrophication	Species. yr	3.39E-12	3.03E-12	2.77E-12	7.44E-12	5.97E-12	1.34E-11	1.46E-13	8.13E-12
12	Terrestrial ecotoxicity	Species. yr	2.38E-11	1.17E-11	2.22.E-11	2.63E-11	3.81E-11	3.82E-11	5.76E-12	3.09E-12
13	Freshwater ecotoxicity	Species. yr	1.27E-11	3.35E-11	1.73E-11	1.38E-11	1.07E-11	2.87E-11	1.66E-12	1.83E-11
14	Marine ecotoxicity	Species. yr	1.84E-8	3.54E-9	8.3E-9	1.99E-8	1.05E-8	4.74E-8	2.98E-9	4.36E-9
15	Human carcinogenic toxicity	DALY	5.32E-6	1.79E-8	2.46E-6	4.8E-6	2.93E-6	7.31E-6	7.4E-7	6.04E-9
16	Human non-carcinogenic toxicity	DALY	3.33E-5	7.2E-6	1.48E-9	3.74E-5	1.85E-5	8.84E-5	5.2E-6	1.04E-5
17	Land use	Species. yr	2.81E-8	4.98E-8	3.16E-8	2.31E-8	2.7E-8	5.17E-8	4.09E-9	3.06E-8
18	Mineral resource scarcity	USD	0.000908	0.000127	0.000323	0.001	0.000607	0.00117	0.000177	0.00023
19	Fossil resource scarcity	USD	0.049	0.0739	0.0365	0.0468	0.0334	0.0848	0.00864	0.041
20	Water consumption, Human health	DALY	2.26E-7	3.04E-9	4.23E-9	1.58E-7	1.13E-7	1E-7	8.85E-10	1.36E9-
21	Water consumption, Terrestrial ecosystem	Species. yr	1.71E-9	1.26E-10	3.61E-11	-1.29E-10	2.57E-10	8.58E-10	5.63E-12	6.18E-11
22	Water consumption, aquatic ecosystems	Species. yr	4.21E-13	2.91E-14	1.84E-14	8.63E-14	3.388E-14	2.13E-18	5.85E-16	2.97E16

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

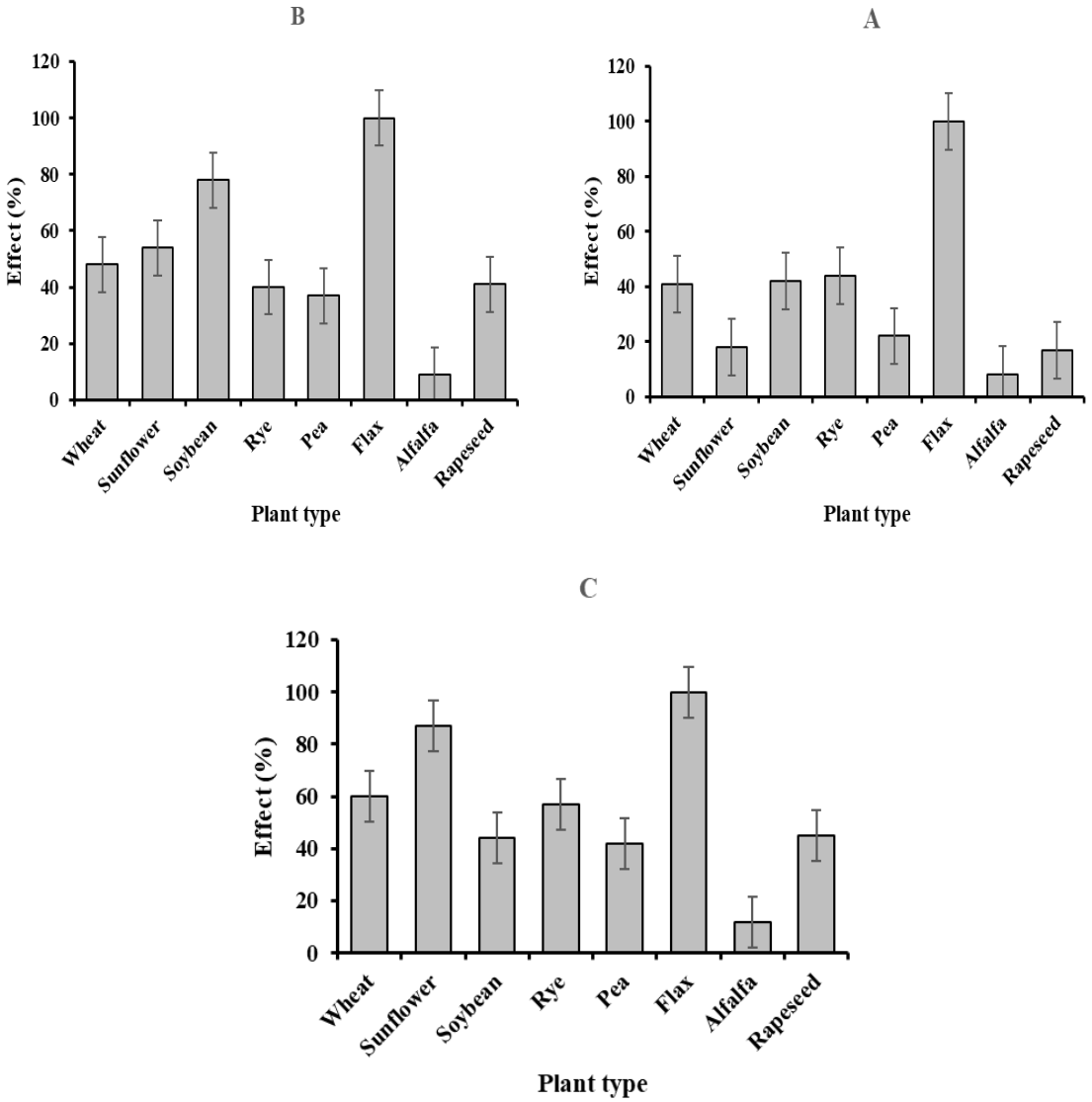


Fig. 1: The percentage effect of proposed plants for the crop rotation with lentil on human health (A), ecosystems (B) and resources (C)
Comparing processes; Method: ReCiPe 2016 Endpoint (E) v1.03/Damage assessment

بر این اساس، کتان در تمامی طبقات و براساس هر دو شاخص، به‌وضوح بیشترین اثر منفی زیست‌محیطی را دارد. در مقابل، یونجه به‌طور پیوسته کمترین اثر منفی را در تمامی دسته‌بندی‌ها نشان می‌دهد که آن را به گزینه‌ای بسیار مطلوب از دیدگاه محیط‌زیستی تبدیل می‌کند. عملکرد ضعیف زیست‌محیطی گیاهانی مانند کتان، گندم و چاودار را می‌توان به عواملی مانند نیاز بالای آن‌ها به نهاده‌های خارجی (به‌ویژه کودهای نیتروژنی که یکی از بزرگ‌ترین منابع انتشار گازهای گلخانه‌ای و غنی‌سازی غذایی آب‌ها هستند) و نیز احتمالاً نیاز به مدیریت شدیدتر آفات نسبت داد (Cucek *et al.*, 2021). از سوی دیگر، عملکرد برتر زیست‌محیطی یونجه را می‌توان به ویژگی‌های ذاتی این گیاه مانند تثبیت بیولوژیک نیتروژن (که نیاز به کود نیتروژنی را کاهش می‌دهد)، سیستم ریشه‌ای عمیق و چندساله (که به بهبود ساختار خاک و جلوگیری از فرسایش کمک می‌کند) نسبت داد (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 به عنوان یکی از محصولات با بار محیط‌زیستی بالا شناسایی کرد (Weiss and Leio, 2021). در مطالعه‌ای دیگر یونجه به دلیل کاهش نیاز به کود نیتروژن، یک گزینه‌ی مطلوب برای بهبود پایداری

محیط‌زیستی در سیستم‌های کشاورزی معرفی شد (Pugesgaard *et al.*, 2023). این همخوانی، نتایج پژوهش حاضر را تأیید می‌کند.

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، می‌توان گفت که کتان به دلیل داشتن بار محیط‌زیستی بسیار بالا در تمامی ابعاد، گزینه مناسبی برای تناوب با ذرت از دیدگاه محیط‌زیست محض نیست. گیاهان گندم، چاودار و سویا نیز اثرات منفی نسبتاً بالایی، به‌ویژه بر سلامت انسان و اکوسیستم نشان دادند. در مقابل، یونجه به طور مشخص بهترین عملکرد زیست‌محیطی را داشت .کلزا نیز با وجود اثرات قابل‌توجه بر اکوسیستم و منابع، اثر کمتری بر سلامت انسان داشت و می‌تواند در کنار نخود و آفتابگردان به‌عنوان گزینه‌های با اثرات میانه مورد توجه قرار گیرند. با این‌حال، باید تاکید کرد که این نتایج بر پایه داده‌های میانگین جهانی به‌دست آمده‌اند و ممکن است در مقیاس مزرعه‌ای و تحت شرایط اقلیمی، خاکی و مدیریتی خاص، متفاوت باشند. همچنین، تصمیم‌گیری نهایی برای انتخاب گیاه تناوبی باید با در نظر گرفتن توأم معیارهای زیست‌محیطی، اقتصادی و امنیت غذایی صورت پذیرد. برای تعمیم دقیق‌تر نتایج، انجام مطالعات ارزیابی چرخه حیات مبتنی بر داده‌های میدانی محلّی پیشنهاد می‌شود.

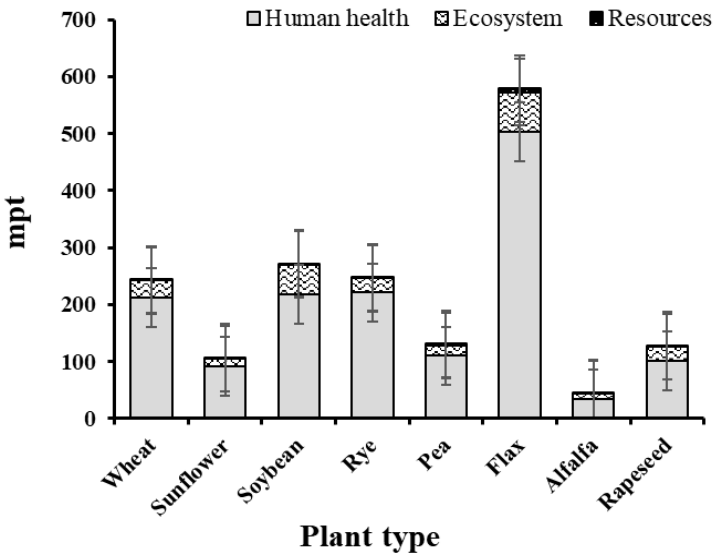


Fig. 2: The distribution of the impact of plants on resources, ecosystems and human health according to plant type Comparing processes; Method: ReCiPe 2016 Endpoint (E) v1.03/Single score

٤. نتیجه‌گیری کلی

بیشترین اثر زیست‌محیطی گیاهان پیشنهادشده برای قرارگیری در تناوب زراعی با ذرت، بر سلامت انسان بود. گیاهان بررسی‌شده اثر زیست‌محیطی ناچیزی بر مصرف منابع داشتند. بیشترین اثرات زیست‌محیطی بر طبقه سلامت انسان به کتان تعلق داشت، درحالی‌که یونجه از این نظر دارای کمترین اثرات زیست‌محیطی بود. آفتابگردان، نخود و کلزا نیز اثرات زیست-محیطی کمی نشان دادند. بر این اساس، برای کاهش بار زیست‌محیطی در برنامه تناوب زراعی ذرت، توصیه می‌شود که تا حد امکان کتان و بعد از آن سویا در برنامه تناوب زراعی قرار نگیرند و از یونجه و در اولویت بعدی از آفتابگردان، نخود و کلزا استفاده شود. بااین‌حال، با توجه به اینکه در این پژوهش از داده‌های میانگین جهانی استفاده گردید و همچنین اگرچه این روش برای دستیابی به هدف مقایسه سیستماتیک ضروری بود، امّا برای ارائه راهکارهای عملیاتی در یک اقلیم یا نظام زراعی خاص (مانند شرایط نیمه‌خشک ایران)، انجام مطالعات بعدی با تمرکز بر داده‌های بومی و محلی پیشنهاد می‌گردد.

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.

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

Eskandari, H., and Mosavian, S.N. (2025). Environmental Assessment of Crops for Lentil-Based Rotations: Identifying the Most Sustainable Options. Iranian Journal of Pulses Research. (In press). (In Persian). http://10.22067/ijpr.2025.95720.1119

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.

Finnveden, G., Hauschild, M. Z., Ekvall, T., Guinée, J., Heijungs, R., Hellweg, S. and Suh, S. (2009). Recent developments in life cycle assessment. *Journal of Environmental Management, 91*(1), 1-21. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.06.018

Ghimire, R., Norton, J. B. and Pendall, E. (2019). Alfalfa-grass biomass, soil organic carbon, and total nitrogen under different management approaches in an irrigated agroecosystem. *Plant and Soil, 441*(1-2), 1-18. https://doi.org/10.1007/s11104-019-04067-0

Guinee, J. B., Heijungs, R. and De Koning, A. (2011). Handbook on Life Cycle Assessment: Operational Guide to the ISO Standards. Springer, Netherlands.

Harker, K. N., O'Donovan, J. T. and Blackshaw, R. E. (2023). Canola (*Brassica napus*) rotation effects on soilborne diseases of subsequent crops: A review. *Canadian Journal of Plant Pathology, 45*(1), 1-14. https://doi.org/10.1080/07060661.2022.2138335

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

Kaspar, T. C., Kladivko, E. J., Singer, J. W. and Morse, S. (2022). Rye cover crop effects on soil water, nitrate, and weed pressure in a maize-soybean rotation. *Agronomy Journal, 114*(1), 1-15. https://doi.org/10.1002/agj2.20956

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

King, A. E. and Blesh, J. (2022). Soil carbon and nitrogen dynamics in a maize-wheat-soybean rotation under conventional and conservation tillage. *Agriculture, Ecosystems and Environment, 326*, 107797. https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107797

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

McDaniel, M. D., Tiemann, L. K. and Grandy, A. S. (2020). Does agricultural crop diversity enhance soil microbial biomass and organic matter dynamics? A meta-analysis. *Ecological Applications, 30*(4), e02074. https://doi.org/10.1002/eap.2074

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

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

Ruis, S. J., Blanco-Canqui, H., Jasa, P. J. and Slater, G. A. (2021). Cover crop impacts on soil physical properties: A review. *Soil Science Society of America Journal, 85*(5), 1527-1575. https://doi.org/10.1002/saj2.20287

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

Stam, G., Verones, 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.

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

Wang, Y., Li, C., Tu, C., Hoyt, G. D., DeForest, J. L. and Hu, S. (2023). Long-term effects of crop rotation and fertilization on soil microbial communities and enzyme activities. *Soil Biology and Biochemistry, 176*, 108867. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2022.108867

Weiss, F. and Leip, A. (2021). Greenhouse gas emissions from the EU livestock sector: A life cycle assessment carried out with the CAPRI model. *Agriculture, Ecosystems and Environment, 310*, 107326. https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107326

Yau, S. K. and Nimah, M. (2021). The effect of preceding crops on yield and yield components of lentil (*Lens culinaris* Medik.) in a semi-arid Mediterranean environment. *Journal of Agricultural Science*, *159*, 214-223. https://doi.org/10.1017/S0021859621000313

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