



Development of a Cropping Pattern for Major Agricultural Products of the Jiroft Plain Based on Water Footprint and Life Cycle Assessment (LCA)

Mojtaba Mandegari Kohan^{1*}, Halimeh Piri^{1*} and Mahdi Keykha^{1*}

1- Department of Water Engineering, College of Water and Soil, University of Zabol, Zabol, Iran

(* - Corresponding author's Email: h_piri2880@uoz.ac.ir)

Received: 03-01-2026
Revised: 04-05-2026
Accepted: 09-05-2026
Available Online: 04-04-2026

How to cite this article:

Mandegari Kohan, M., Piri, H., & Keykha, M. (2026). Development of a cropping pattern for major agricultural products of the Jiroft plain based on Water Footprint and Life Cycle Assessment (LCA). *Journal of Agroecology*, 18(1), 139-164. (In Persian with English abstract)
<https://doi.org/10.22067/AGRY.2026.97323.1267>

Introduction

Due to the adverse impacts of agricultural production activities on the environment, particularly water and soil pollution, and pressure on limited natural resources, determining an optimal cropping pattern is one of the most important management decisions. Such a decision should be made in a way that, while maintaining crop productivity and satisfactory yields, minimizes the environmental impacts associated with the use of fertilizers, pesticides, and water. Simultaneous assessment of environmental impacts and water consumption can provide valuable guidance for sustainable cropping planning in arid and water-scarce regions. The objective of this study was to evaluate the environmental impacts and water consumption of eight major agricultural crops: barley, wheat, canola, maize, cucumber, onion, potato, and tomato in the arid region of Jiroft using the Life Cycle Assessment (LCA) approach and analysis of green, blue, and grey water footprints.

Materials and Methods

To this end, data on input consumption, including chemical fertilizers, pesticides, fuel, and energy, as well as crop yields, were collected, and environmental impacts were calculated in three categories: human health, ecosystem quality, and resource depletion. For accurate estimation of crop water requirements and green and blue water footprints, climatic and precipitation data for the period 1993–2023 obtained from the Iranian Meteorological Organization were used, and actual crop water consumption was calculated based on effective rainfall, evapotranspiration, and crop growth period. The grey water footprint was also determined based on chemical fertilizer use and its potential impacts on water quality.

Results and Discussion

The results showed that cereal and oilseed crops such as canola, wheat, barley, and maize imposed the highest environmental burdens. Canola exhibited the greatest negative impact with a single-score value of 86.19 points, compared with cucumber (4.09 points) and onion (5.65 points). In the human health category, canola caused the highest damage (65.23 points), whereas vegetables and tuber crops showed much lower impacts. Regarding ecosystem quality, canola had the highest negative effect (20.25 points), while barley showed the lowest impact (0.33 points). In terms of resource depletion, wheat contributed the most (0.289 points), followed by canola (0.176 points). Water footprint analysis indicated that cereals had the highest blue and grey water consumption, with total



Authors retain the copyright. This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

 <https://doi.org/10.22067/AGRY.2026.97323.1267>

water footprints of barley and wheat reaching 2508.19 and 2164.57 $\text{m}^3.\text{t}^{-1}$, respectively, whereas vegetables and tuber crops such as potato had the lowest water footprint ($182.41 \text{ m}^3.\text{t}^{-1}$). The combined results of LCA and water footprint analysis consistently demonstrated that input-intensive and water-demanding crops such as canola and cereals exert substantial pressure on water resources and the environment, while vegetables and tuber crops have comparatively lower impacts.

Conclusion

Based on the LCA results and the crop's environmental burdens, cultivation priority should be given to those with the lowest environmental impacts. Accordingly, vegetables such as cucumber and onion, as well as tuber crops like potato—which exhibit significantly lower environmental burdens—should be prioritized for cultivation. Subsequently, maize and high-input cereals such as wheat and barley may be cultivated. Canola, due to its high environmental burden, should be placed last in the cropping priority and cultivated only under careful management of inputs and water resources in order to reduce pressure on the ecosystem and the region's limited resources. According to the results, the water footprint and Life Cycle Assessment (LCA) analyses provide consistent and complementary findings. Crops with higher environmental burdens in the LCA, such as canola and cereals, also exhibit the highest blue and grey water consumption, exerting greater pressure on the region's water resources. In contrast, crops with lower environmental burdens, such as vegetables and tuber crops, have smaller water footprints and place less strain on water resources. Based on these findings, prioritizing the cultivation of low-impact crops along with optimized management of inputs and water resources can significantly reduce environmental burdens and water consumption. This study demonstrates that integrating Life Cycle Assessment (LCA) with water footprint analysis is an effective tool for sustainable agricultural planning and for reducing pressure on limited environmental resources.

Keywords: Ecosystem health, Environmental sustainability, Resource depletion, Sustainable cultivation pattern, Water resources management

مقاله پژوهشی

جلد ۱۸، شماره ۱، بهار ۱۴۰۵، ص ۱۶۴-۱۳۹

تدوین الگوی کشت محصولات عمده کشاورزی دشت جیرفت براساس ردپای آب و ارزیابی چرخه حیات LCA

مجتبی ماندگاری کهن^۱، حلیمه پیری^{۱*} و مهدی کیخا^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۱۹

چکیده

هدف این مطالعه، بررسی اثرات زیست‌محیطی و مصرف آب در هشت محصول عمده کشاورزی جیرفت با استفاده از روش ارزیابی چرخه حیات (LCA) و تحلیل ردپای آب می‌باشد. برای این منظور، داده‌های مصرف نهاده‌ها شامل کودهای شیمیایی، سموم دفع آفات، سوخت و انرژی، و عملکرد محصول جمع‌آوری و اثرات زیست‌محیطی در سه دسته سلامت انسان، بوم‌نظام و تخلیه منابع بررسی شد. برای انجام کار، ابتدا ردپای آب آبی، سبز و خاکستری محصولات محاسبه شد و سپس برای ارزیابی پایداری زیست‌محیطی سیستم‌های کشت و تولید محصول، از شاخص ارزیابی چرخه حیات (LCA) برپایه استاندارد ISO 14040 استفاده گردید. نتایج تحلیل LCA بیانگر آن بود که محصولات دانه‌ای و روغنی از جمله کلزا (*Brassica napus*)، گندم (*Triticum aestivum*)، جو (*Hordeum vulgare*) و ذرت (*Zea mays*) در مقایسه با سایر محصولات بررسی شده، فشار زیست‌محیطی بیشتری بر منابع طبیعی وارد می‌کنند. به‌طور مشخص، کلزا با ۸۶/۱۹ Pt به‌عنوان پراثرترین محصول از نظر پیامدهای زیست‌محیطی شناسایی شد، درحالی‌که خیار و پیاز با مقادیر ۴/۰۹ Pt و ۵/۶۵ Pt در پایین‌ترین سطح اثرات زیست‌محیطی قرار گرفتند. در دسته سلامت انسان، کلزا با ۶۵/۲۳ Pt بیشترین آسیب را ایجاد کرد، درحالی‌که سبزیجات و گیاهان غده‌ای اثرات بسیار پایین‌تری داشتند. در زمینه بوم‌نظام، کلزا با ۲۰/۲۵ Pt بالاترین اثر منفی و جو با ۰/۳۳ Pt پایین‌ترین اثر را داشت. در تخلیه منابع، گندم با ۰/۲۸۹ Pt بیشترین سهم را داشت و کلزا با ۰/۱۷۶ Pt در رتبه بعدی قرار گرفت. تحلیل ردپای آب نشان داد که غلات بیشترین مصرف آب آبی و خاکستری را دارند، به‌طوری‌که ردپای آب کل جو و گندم به‌ترتیب ۲۵۰۸/۱۹ و ۲۱۶۴/۵۷ مترمکعب بر تن بود، درحالی‌که سبزیجات و گیاهان غده‌ای مانند سیب‌زمینی (*Solanum tuberosum*) با ۱۸۲/۴۱ مترمکعب بر تن کمترین ردپای آب را داشتند. نتایج LCA و ردپای آب به‌طور همسو نشان دادند که محصولات پرنهاده و پرمصرف مانند کلزا و غلات فشار بالایی بر منابع آب و محیط زیست وارد می‌کنند، درحالی‌که سبزیجات و گیاهان غده‌ای کم‌اثر هستند.

واژه‌های کلیدی: الگوی کشت پایدار، پایداری زیست‌محیطی، تخلیه منابع، سلامت بوم‌نظام، مدیریت منابع آب

مقدمه

در صد از برداشت آب جهانی را به خود اختصاص داده است (FAO, 2017). این بخش علاوه بر نقش حیاتی در تأمین امنیت غذایی، از ارکان اصلی اقتصاد، اشتغال‌زایی و توسعه پایدار در بسیاری از کشورها محسوب می‌شود. با این حال، وابستگی شدید تولیدات کشاورزی به منابع آبی محدود، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، چالش‌های

رشد جمعیت جهانی، تغییر الگوهای مصرف غذایی و تشدید اثرات تغییر اقلیم موجب افزایش فشار بر منابع طبیعی به‌ویژه منابع آب شیرین شده است. در این میان، بخش کشاورزی به‌عنوان بزرگ‌ترین مصرف‌کننده آب شیرین در سطح جهان، سهمی حدود ۷۰ تا ۷۵

۱- گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران
(Email: h_piri2880@uoz.ac.ir)
(*)- نویسنده مسئول:

جدی در زمینه پایداری ایجاد کرده است.

در بسیاری از این مناطق، تداوم الگوهای کشت سنتی و فاقد انطباق با ظرفیت‌های واقعی منابع آب منجر به برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی، افت سطح آبخوان‌ها، افزایش شوری خاک و تخریب تدریجی بوم‌نظام‌های کشاورزی شده است (Gleeson et al., 2012). این روند نه تنها پایداری تولید را تهدید می‌کند، بلکه امنیت غذایی نسل‌های آینده را نیز در معرض خطر قرار می‌دهد. در چنین شرایطی، مدیریت بهینه منابع آب و بازنگری در الگوهای تولید کشاورزی به یک ضرورت اجتناب‌ناپذیر تبدیل شده است.

یکی از چالش‌های اساسی در این حوزه، عدم تطابق بین الگوی کشت و ظرفیت‌های بوم‌شناختی و هیدرولوژیکی مناطق مختلف است. در بسیاری از موارد، انتخاب محصولات کشاورزی نه براساس معیارهای علمی مرتبط با مصرف آب و پایداری محیط‌زیست، بلکه تحت تأثیر عوامل اقتصادی کوتاه‌مدت یا الگوهای سنتی انجام می‌شود. این مسئله موجب شده است که فشار مضاعفی بر منابع آب وارد شده و در کنار آن، مصرف بیش از حد نهاده‌های شیمیایی نیز آثار زیست‌محیطی گسترده‌ای ایجاد کند (Nemecek et al., 2008; Bylin et al., 2019).

از این منظر، حرکت به‌سوی کشاورزی پایدار مستلزم استفاده بهینه از منابع تولید به‌ویژه آب و زمین، و طراحی الگوهای کشت مبتنی بر ظرفیت‌های محیطی است. در این چارچوب، استفاده از ابزارهای کمی برای ارزیابی مصرف منابع و اثرات زیست‌محیطی محصولات کشاورزی اهمیت ویژه‌ای پیدا می‌کند. این ابزارها می‌توانند مبنای علمی لازم را برای تصمیم‌گیری در سطح مزرعه تا سیاست‌گذاری کلان فراهم کنند.

یکی از مهم‌ترین شاخص‌های توسعه‌یافته در این زمینه، مفهوم «ردپای آب» است. ردپای آب به‌عنوان شاخصی جامع، میزان مصرف مستقیم و غیرمستقیم آب در فرآیند تولید کالاها و خدمات را در سه مؤلفه آب سبز، آب آبی و آب خاکستری اندازه‌گیری می‌کند (Hoekstra et al., 2011). این شاخص نه تنها مصرف واقعی آب را در سطح تولید نشان می‌دهد، بلکه اثرات ناشی از آلودگی آب را نیز در نظر می‌گیرد و از این جهت ابزاری مناسب برای تحلیل فشار وارد بر منابع آب محسوب می‌شود.

ردپای آب به‌دلیل ماهیت چندبعدی خود، امکان مقایسه بین

محصولات مختلف کشاورزی را فراهم کرده و می‌تواند نقش مهمی در اصلاح الگوی کشت ایفا کند. مطالعات مختلف نشان داده‌اند که محصولات کشاورزی از نظر میزان ردپای آب، تفاوت‌های قابل توجهی دارند و انتخاب نادرست ترکیب کشت می‌تواند منجر به اتلاف گسترده منابع آبی شود (Mekonnen & Hoekstra, 2014). بنابراین، استفاده از این شاخص در برنامه‌ریزی کشاورزی می‌تواند به بهبود بهره‌وری آب و کاهش فشار بر منابع طبیعی کمک کند.

در مطالعات داخلی نیز نتایج مشابهی گزارش شده است. برای مثال، بررسی ردپای آب و بهره‌وری مصرف آب در محصولات مختلف در اقلیم‌های ایران نشان داده است که شرایط اقلیمی نقش تعیین‌کننده‌ای در کارایی مصرف آب دارد و برخی مناطق از نظر تولید محصولات خاص، کارایی بالاتری دارند (Piri & Mobaraki, 2021). همچنین در مطالعه‌ای در استان سیستان و بلوچستان، تفاوت قابل توجهی بین محصولات زراعی و باغی از نظر ردپای آب مشاهده شد، به‌طوری‌که برخی از محصولات مانند گندم و پسته^۱ دارای بالاترین میزان مصرف آب بودند (Piri & Sarani, 2020). این نتایج نشان می‌دهد که مدیریت منطقه‌ای الگوی کشت براساس شاخص‌های کمی می‌تواند نقش مهمی در کاهش فشار بر منابع آب ایفا کند.

با وجود اهمیت بالای ردپای آب، این شاخص به‌تنهایی قادر به پوشش تمامی اثرات زیست‌محیطی ناشی از تولید محصولات کشاورزی نیست. فرآیند تولید در بخش کشاورزی علاوه بر مصرف آب، شامل مصرف انرژی، استفاده از نهاده‌های شیمیایی، انتشار گازهای گلخانه‌ای و ایجاد اثرات منفی بر خاک و بوم‌نظام‌های طبیعی است. بنابراین، تحلیل جامع پایداری نیازمند رویکردی گسترده‌تر از صرفاً ارزیابی مصرف آب است.

در این راستا، «ارزیابی چرخه حیات (LCA)» به‌عنوان رویکردی استاندارد و جامع برای بررسی اثرات زیست‌محیطی محصولات در کل زنجیره تولید مطرح شده است. این روش، تمامی مراحل چرخه عمر یک محصول، از استخراج مواد اولیه، تولید، مصرف تا دفع نهایی را مورد ارزیابی قرار می‌دهد (ISO 14040, 2006; Pennington et al., 2004). ارزیابی چرخه حیات امکان بررسی هم‌زمان شاخص‌هایی مانند پتانسیل گرمایش جهانی، مصرف انرژی فسیلی، اسیدی شدن و اوتریفیکاسیون را فراهم می‌کند و در نتیجه تصویری جامع از اثرات زیست‌محیطی ارائه می‌دهد (Guinée et al., 2011).

دشت جیرفت با طول جغرافیایی ۵۷ درجه و ۲۵ دقیقه شمالی و عرض جغرافیایی ۲۷ درجه و ۳۰ دقیقه شرقی در جنوب شرقی ایران در استان کرمان واقع شده است. وسعت این دشت ۲۲۳۹/۲ کیلومتر مربع و ارتفاع آن از سطح دریا بین ۴۰۰ تا ۵۰۰ متر متغیر است. متوسط بارش سالانه آن ۱۷۰ میلی‌متر و متوسط رطوبت نسبی سالیانه در این منطقه ۵۵ درصد است. این شهرستان به علت قرار گرفتن در عرض‌های جنوبی کشور و واقع شدن در ارتفاع نه چندان بالا، دارای تابستان‌های گرم و رطوبت نسبی بالا و زمستان‌هایی معتدل و کوتاه است. درجه حرارت آن بین ۴- تا ۴۸+ درجه سانتی‌گراد متغیر می‌باشد. هلیل رود به طول ۴۰۰ کیلومتر، تنها رود دائمی استان کرمان است که از کوهستان‌های اطراف سرچشمه گرفته از مرکز شهر جیرفت می‌گذرد و برای بخش کشاورزی این منطقه بسیار حائز اهمیت است. ۵۰ درصد از سطح زیرکشت این شهرستان را باغات و ۵۰ درصد را محصولات زراعی که عمده آن گندم، جو، کلزا، ذرت، سورگوم^۱، شبدر^۲، سیر^۳، پیاز^۴، گوجه فرنگی^۵، خیار^۶ و سیب‌زمینی می‌باشد. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه در شکل ۱ نشان داده شده است.

محاسبه نیاز آبی گیاهان

از بین محصولات زراعی کشت‌شده دشت جیرفت، هشت محصول عمده شامل گندم، جو، کلزا، ذرت، گوجه‌فرنگی، سیب‌زمینی، خیار و پیاز انتخاب شد. سپس اطلاعات هواشناسی در دوره مطالعاتی ۱۳۷۲-۱۴۰۲ از سازمان هواشناسی کشور دریافت شد. اطلاعات مربوط به کودهای مصرفی و عملکرد هر محصول از سازمان جهاد کشاورزی استان کرمان اخذ گردید. برای برآورد حجم ردپای آب سبز، آبی، خاکستری محصولات مورد مطالعه از روش هوکسترا و چاپاگین (Hoekstra & Chapagain, 2008) در دوره آماری ۱۳۹۲ تا ۱۴۰۲ استفاده شد. برای محاسبه ردپای آب، تبخیر و تعرق گیاهان از روش فائوپن‌مانتیت و با استفاده از نرم‌افزار CROPWAT محاسبه شد.

مطالعات نشان داده‌اند که برخی از محصولات کشاورزی با وجود مصرف پایین آب، دارای اثرات زیست‌محیطی بالایی از نظر انتشار گازهای گلخانه‌ای هستند، درحالی‌که برخی دیگر ممکن است ردپای آب بالایی داشته، اما از نظر سایر شاخص‌های محیطی عملکرد بهتری داشته باشند (Notarnicola et al., 2017). این موضوع نشان می‌دهد که تکیه بر یک شاخص منفرد برای ارزیابی پایداری کافی نیست.

در سال‌های اخیر، رویکرد تلفیقی ردپای آب و ارزیابی چرخه حیات به‌عنوان یک چارچوب نوین برای تحلیل جامع پایداری سیستم‌های کشاورزی مورد توجه قرار گرفته است. ریدوت و پفیستر (Ridoutt & Pfister, 2010) نشان دادند که ترکیب این دو شاخص می‌تواند درک دقیق‌تری از ارتباط بین مصرف آب و سایر اثرات زیست‌محیطی فراهم کند. همچنین مطالعات دیگری تأکید کرده‌اند که این رویکرد تلفیقی می‌تواند به بهینه‌سازی الگوی کشت، افزایش بهره‌وری منابع و کاهش اثرات منفی زیست‌محیطی منجر شود (Zhang et al., 2018; Xu et al., 2019).

با وجود پیشرفت‌های علمی در این حوزه، کاربرد عملی این رویکردهای تلفیقی در فرآیند برنامه‌ریزی کشاورزی هنوز محدود است و در بسیاری از مناطق، الگوهای کشت بدون در نظر گرفتن تحلیل جامع زیست‌محیطی تدوین می‌شوند. این شکاف علمی و کاربردی نشان‌دهنده نیاز به توسعه چارچوب‌های یکپارچه برای تصمیم‌گیری در حوزه مدیریت منابع آب و کشاورزی پایدار است. در مجموع، استفاده هم‌زمان از شاخص ردپای آب و ارزیابی چرخه حیات می‌تواند مبنای علمی مناسبی برای طراحی الگوی کشت بهینه فراهم کند. این رویکرد نه تنها به کاهش مصرف منابع آب و بهبود بهره‌وری کمک می‌کند، بلکه زمینه‌ساز کاهش اثرات زیست‌محیطی، افزایش تاب‌آوری سیستم‌های کشاورزی و حرکت به‌سوی توسعه پایدار خواهد بود.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

4- Onion (*Allium cepa*)

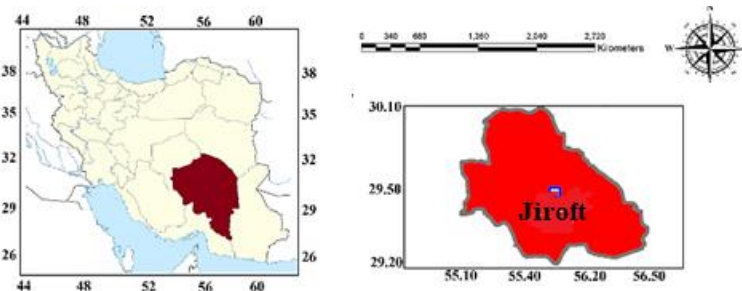
5- Tomato (*Solanum lycopersicum*)

6- Cucumber (*Cucumis sativus*)

1- Sorghum (*Sorghum bicolor*)

2- Clover (*Trifolium spp.*)

3- Garlic (*Allium sativum*)



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه
Fig. 1- Geographical location of the study area

بنابراین ردپای آب کل^۴ به صورت معادله ۳ بیان می‌گردد.

$$WF_t = WF_{green} + WF_{blue} + WF_{gray} \quad \text{معادله (۳)}$$

که در آن: WF_t : رد پای کل، WF_{green} : رد پای آب سبز، WF_{blue} : رد پای آب آبی و WF_{gray} : رد پای آب خاکستری می‌باشد. هر کدام از اجزای رد پای آب به شرح زیر محاسبه گردید:

ردپای آب سبز

مصرف آب در این دوره با توجه به محاسبه تبخیر و تعرق گیاه در طول دوره رشد، مورد بررسی قرار گرفت که در نهایت به صورت عددی با واحد مترمکعب بر تن بیان می‌شود. رد پای آب سبز محصول با استفاده از معادله ۴ محاسبه شد.

$$WF_{green} = \frac{CWU_{green}}{Y} \quad \text{معادله (۴)}$$

که در آن، WF_{green} : رد پای آب سبز (مترمکعب بر تن)، Y : عملکرد گیاه (تن در هکتار) است که بسته به نوع محصول به صورت عملکرد تر یا عملکرد خشک در نظر گرفته می‌شود و CWU_{green} : مقدار مصرف آب سبز گیاه (مترمکعب در هکتار) می‌باشد.

مقدار مصرف آب سبز گیاه از مجموع تبخیر و تعرق روزانه در طی فصل رشد گیاه به دست می‌آید (معادله ۵).

$$CWU_{green} = 10 \times \sum_{d=1}^T ET_{green} \quad \text{معادله (۵)}$$

که در آن، T : طول دوره رشد گیاه (روز)، ET_{green} : تبخیر و تعرق آب سبز (میلی‌متر در سال)، عدد ۱۰: تبخیر و تعرق را از میلی‌متر (ارتفاع) به حجم آب در سطح زمین (مترمکعب در هکتار) تبدیل می‌کند.

در این معادله فرض شده است که تنها وقتی آب سبز موجود در

$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta (Rn - G) + \gamma \frac{C_n}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + C_d U_2)} \quad \text{معادله (۱)}$$

$$ET_c = K_c \times ET_0 \quad \text{معادله (۲)}$$

که در آن، ET_0 : تبخیر و تعرق مرجع (mm.day^{-1}), ET_c : تبخیر و تعرق گیاه (mm.day^{-1}), K_c : ضریب گیاهی، Rn : تابش خالص ورودی به سطح گیاه ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{day}^{-1}$), G : شار گرمای خاک ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{day}^{-1}$), T_{mean} : میانگین دمای هوای روزانه ($^{\circ}\text{C}$), U_2 : میانگین روزانه سرعت باد در ارتفاع دو متری از سطح زمین (m.s^{-1}), e_s : فشار بخار اشباع (KPa), e_a : فشار بخار واقعی (KPa), $e_s - e_a$: کمبود فشار بخار اشباع (KPa), Δ : شیب منحنی فشار بخار اشباع ($\text{KPa}^{\circ}\text{C}^{-1}$), γ : ضریب سایکرومتری ($\text{KPa}^{\circ}\text{C}^{-1}$), C_n : ضریبی برای گیاه مرجع که مقدار آن ۹۰۰ می‌باشد ($\text{kg}^{\circ}\text{K.kj}^{-1}.\text{day}^{-1}$), C_d : ضریب باد برای گیاه مرجع که مقدار آن $0.34 / (\text{s.m}^{-1})$ می‌باشد و K_c : ضریب گیاهی است که از نشریه فائو ۵۶ اقتباس شده است.

محاسبات ردپای آب

اجزای رد پای آب در این تحقیق شامل رد پای آب سبز^۱، رد پای آب آبی^۲ و رد پای آب خاکستری^۳ می‌باشد. رد پای آب آبی، به حجم آب آبیاری مصرفی (آب‌های سطحی و زیرزمینی) که جهت تولید محصول به گیاه داده می‌شود، اشاره دارد. رد پای آب سبز، به سهم آب حاصل از بارندگی مؤثر مرتبط است و به حجم آبی اطلاق می‌شود که در مناطق غیر اشباع خاک به صورت رطوبت خاک ذخیره می‌شود و گیاه از آن استفاده می‌کند. رد پای آب خاکستری، به حجمی از آب شیرین اطلاق می‌شود که برای از بین بردن آلودگی‌های ایجاد شده ناشی از کشت گیاه و تولید محصول در محیط استفاده شده‌اند، مورد نیاز است.

همکاران (Hoekstra et al., 2011) می‌باشد. آژانس حفاظت محیط زیست آمریکا با توجه به پژوهش چاپاگین و همکاران (Chapagain et al., 2006)، حداکثر غلظت مجاز نیتروژن در منابع آب سطحی و زیرزمینی را ۱۰ میلی گرم بر لیتر توصیه کرده است. این استاندارد از زمانی اتخاذ شد که آب‌های ناشی از فعالیت کشاورزی دوباره جمع‌آوری می‌شدند و بعد از انتقال به منابع اولیه خود، در مصارف شهری مورد استفاده قرار می‌گرفتند. لذا لازم بود تا غلظت این عامل کمتر از یک آستانه قرار گیرد. از آنجایی که هیچ‌گونه اطلاعاتی در مورد غلظت طبیعی نیتروژن در آب و محیط در دسترس نبود، مقدار آن در این مطالعه صفر در نظر گرفته شد (Mekonnen & Hoekstra, 2011).

$$WF_{gray} = \frac{\alpha \times NAR}{C_{Max} - C_{Nat}} \times \frac{1}{Y} \quad \text{معادله (۱۰)}$$

که در آن، α : درصد تلفات کودهای نیتروژن، NAR: مقدار مصرف کود نیتروژن برای گیاه (کیلوگرم بر هکتار)، C_{Max} : غلظت بحرانی نیتروژن (کیلوگرم بر هکتار) و C_{Nat} : غلظت نیتروژن در آب دریافت‌کننده است.

شاخص زیست‌محیطی (شاخص ارزیابی چرخه حیات (LCA))

یکی از جامع‌ترین شاخص‌ها برای ارزیابی پایداری زیست‌محیطی سیستم‌های کشت و تولید محصول، شاخص ارزیابی چرخه حیات (LCA) بر پایه استاندارد ISO 14040 می‌باشد (Nabavi Pelesaraei et al., 2017). این روش شامل گردآوری و ارزیابی ورودی‌ها، خروجی‌ها و پیامدهای بالقوه محیط زیستی تولید نهایی یک محصول در سراسر چرخه حیات آن می‌باشد (ISO 14040, 2006). بدین ترتیب، هر مطالعه ارزیابی چرخه حیات دارای چهار مرحله تعیین هدف و حوزه مطالعه، ممیزی چرخه حیات (LCI)، ارزیابی اثر (LCIA) و تفسیر می‌باشد (Georgiopoulou & Lyberatos, 2018). شکل ۲ مراحل اجرای ارزیابی چرخه حیات را نشان می‌دهد.

خاک برای استفاده گیاه کافی نباشد، گیاه از آب آبی موجود استفاده می‌کند (Yousefi et al., 2016). از این رو، تبخیر و تعرق سبز گیاه از روش ارائه‌شده توسط هوکسترا و همکاران (Hoekstra et al., 2011) به دست می‌آید (معادله ۶).

$$ET_{green} = \min(ET_c, P_e) \quad \text{معادله (۶)}$$

که در آن: ET_c : مقدار تبخیر و تعرق گیاه و P_e : مقدار باران مؤثر می‌باشد.

ردپای آب آبی

ردپای آب آبی نیز مشابه ردپای آب سبز محاسبه می‌شود و به‌صورت زیر ارائه می‌گردد.

$$WF_{blue} = \frac{CWU_{blue}}{Y} \quad \text{معادله (۷)}$$

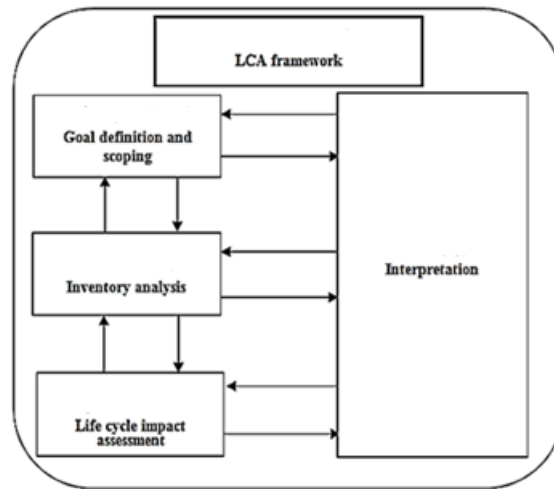
$$CWU_{blue} = 10 \times \sum_{d=1}^T ET_{blue} \quad \text{معادله (۸)}$$

$$ET_{blue} = \max(0, ET_c - P_e) \quad \text{معادله (۹)}$$

که در آن، CWU_{blue} : مقدار مصرف رد پای آب آبی گیاه (مترمکعب در هکتار) و ET_{blue} : تبخیر و تعرق آب آبی (میلی‌متر در سال) می‌باشد.

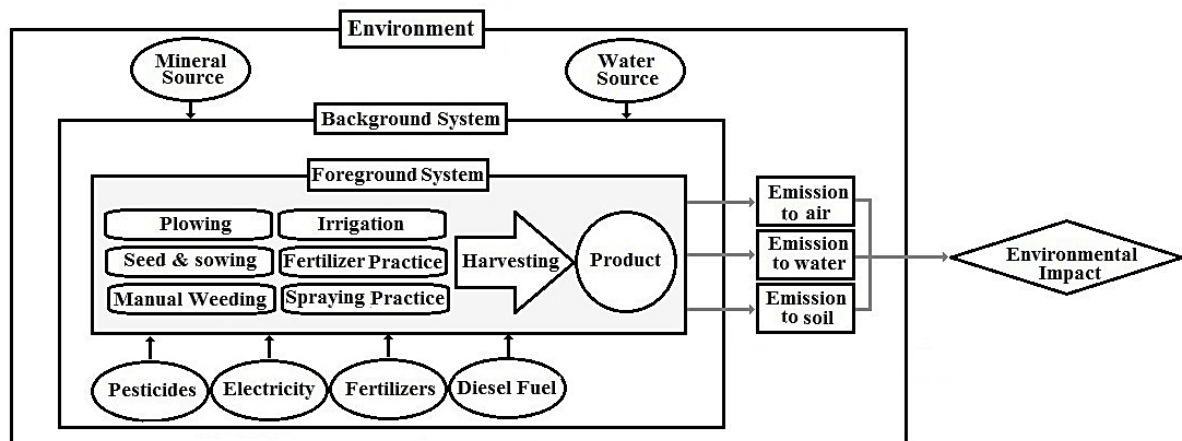
ردپای آب خاکستری

یکی دیگر از اجزای ردپای آب در تولید محصول، حجم آب مورد نیاز برای رقیق‌سازی کودهای کشاورزی با استفاده از رواناب یا نفوذ عمقی است که به آن آب خاکستری گفته می‌شود (Hoekstra et al., 2011). در این پژوهش، ردپای آب خاکستری تنها برای کودهای نیتروژن به‌عنوان منبع آلودگی آب محاسبه شده است. بدین منظور، تنها استفاده از کود از ته به‌عنوان منبع ایجاد آلودگی مورد مطالعه قرار گرفت. اطلاعات مربوط به میانگین میزان کود نیتروژن از جهاد کشاورزی استان گرفته شد. محاسبه براساس روش ارائه‌شده توسط چاپاگین و همکاران (Chapagain et al., 2006) و هوکسترا و



شکل ۲- مراحل اجرای ارزیابی چرخه حیات

Fig. 2- Stages of conducting a Life Cycle Assessment (LCA) (Georgiopoulou & Lyberatos, 2018)



شکل ۳- مرزهای تولید محصولات زراعی در روش ارزیابی چرخه حیات (LCA)

Fig. 3- System boundaries of agricultural product production in the Life Cycle Assessment (LCA) method (Rebitzer et al., 2004)

ارزیابی انتخاب شد (شکل ۳). واحد کارکردی نیز نشان‌دهنده معیاری کمی از عناصر تولید محصول نهایی است که اثرات محیطی بر مبنای آن محاسبه می‌گردد، باید مشخص گردد (Rebitzer et al., 2004). در این راستا، واحد کارکردی تولید یک تن از محصولات نهایی ذکر شده به ازای هر هکتار زمین در نظر گرفته شد.

تجزیه و تحلیل ورودی‌ها (LCI)

در این مرحله، کلیه ورودی‌ها و خروجی‌های سیستم تولید تحت

هدف، واحد کارکردی و مرزهای سیستم

بر این اساس، در مرحله اول باید محصول نهایی، مرزهای سیستم مورد مطالعه، واحد کارکردی و در نهایت فرض‌های مطالعه مشخص گردد. برای این کار از دستورالعمل پیشنهادات سیستم داده‌های بین‌المللی چرخه حیات^۱ استفاده می‌گردد. هدف از این مطالعه، ارزیابی تأثیرات زیست‌محیطی تولید محصولات مختلف در شهرستان جیرفت بود. با توجه به تعداد محصولات و داده‌های در دسترس در این طرح، محدوده از تولید منابع ورودی تا خروجی مزرعه به‌عنوان محدوده

کار گرفته شده است نیز از پایگاه داده‌های Ecoinvent version 3.11 استفاده گردید.

ارزیابی اثرات (LCIA)

در مرحله ارزیابی با هدف تجزیه و تحلیل کمی، نتایج بخش ممیزی چرخه حیات در قالب سه زیربخش طبقه‌بندی، نرمال سازی و وزن‌دهی تقسیم‌بندی می‌شود (Roy et al., 2009)؛ که مرحله طبقه‌بندی لازم و دو مرحله دیگر اختیاری می‌باشد. در مرحله طبقه‌بندی، هرکدام از مقادیر به‌دست‌آمده از بخش دو، یعنی مصرف منابع فسیلی، الکتریکی، کودهای شیمیایی، آفت‌کش‌ها و مصرف آب به اثرات زیست‌محیطی آن مرتبط می‌گردد. برای محاسبات اثرات زیست‌محیطی کشت محصولات مذکور در منطقه، از نرم‌افزار SimaPro V10.2 (Pré -Sustainability, 2018) و روش ReCiPe 2016 V1.1 (Huijbregts et al., 2017) استفاده شد. این روش که یکی از جدیدترین و به‌روزترین روش‌های ارزیابی تأثیر است، انتشارات و استخراج منابع را به تعداد محدودی از مقادیر اثرات زیست‌محیطی با استفاده از عوامل به اصطلاح مشخصه تبدیل می‌کند. عوامل مشخصه معمولاً در قالب دو سطح میانی و نقطه پایانی ارائه می‌گردد (Goedkoop et al., 2009). روش ReCiPe از این لحاظ دارای ۱۸ نقطه میانی و سه نقطه پایانی می‌باشد. شاخص‌های نقطه میانی بر مشکلات محیطی مستقل از جمله تغییر آب‌وهوا یا اسیدی شدن زمین متمرکز می‌باشد، اما شاخص‌های نقطه پایانی تأثیر زیست‌محیطی را در سه سطح تجمع بالاتر شامل ۱- تأثیر بر سلامت انسان (HT)، ۲- بوم‌نظام‌ها (EQ) و ۳- کمبود منابع (RC) نشان می‌دهند. به‌طوری‌که گرمایش جهانی، مصرف آب، تخریب لایه ازن، افزایش اوزون تروپوسفر، بیماری‌زایی، بیماری‌زایی سرطانی، تشعشع یونیزه‌کننده و پراکنش ذرات ریز موجب آسیب به سلامتی انسان می‌گردد. همچنین گرمایش جهانی، مصرف آب، اسیدی سازی خاک، سمیت آب شیرین، اوروفیکاسیون آب شیرین، اوروفیکاسیون دریایی، افزایش اوزون تروپوسفری، سمیت خاک، تغییر کاربری زمین و سمیت دریایی باعث اثر بر بوم‌نظام‌های زمینی و آبی می‌شود. در نهایت نیز تخلیه مواد معدنی و منابع فسیلی برای تولید انرژی و منابع ورودی به مزرعه موجب کاهش منابع و افزایش هزینه استخراج آن‌ها می‌شود.

بررسی که شامل داده‌های مربوط به مصرف منابع، انرژی و انتشار آلاینده‌های حاصل از هر یک از فعالیت‌های مرتبط با تولید محصولات زراعی و براساس واحد مرجع مطابق با استاندارد ISO 14040 جمع‌آوری می‌شود (Brenttrup et al., 2004). برای انجام این مرحله از دو مجموعه داده شامل پیش‌زمینه^۱ و پس‌زمینه^۲ استفاده می‌شود (Nabavi-Pelesaraei et al., 2017). پیش‌زمینه شامل همه انتشارات مستقیم ناشی از مصرف منابع ورودی برای تولید محصولات زراعی در سطح مزرعه می‌باشد که منجر به ورود این آلاینده‌ها به آب، خاک و هوا می‌شود. به‌طوری‌که در این مرحله، میزان مصرف نهاده‌های آب، گازوئیل، الکتریسیته، کودهای شیمیایی، کارگر، کود حیوانی، ماشین‌آلات کشاورزی و آفت‌کش‌ها و مقادیر آلاینده‌های انتشار یافته ناشی از کاربرد آن‌ها بر مبنای واحد عملکردی محاسبه شد. همچنین پس‌زمینه شامل انتشار آلاینده‌های ناشی از تولید منابع ورودی مصرف‌شده در سطح مزرعه است.

انتشار آلاینده‌ها در سطح مزرعه در چند بخش شامل انتشارات آلاینده‌های ناشی از احتراق گازوئیل، مصرف کودهای شیمیایی و سموم شیمیایی طبقه‌بندی شد. میزان تولید مستقیم گازهای آلاینده ناشی از مصرف یک لیتر گازوئیل براساس پایگاه داده U.S.LCI در جدول ۱ ارائه شده است (U.S.LCI, 2015). در جدول ۲ نیز ضرایب برای محاسبه انتشار مستقیم از مزرعه حاصل از کاربرد ورودی‌ها نشان داده شده است. آبشویی فسفات حاصل از مصرف کودهای فسفاته در آب‌های سطحی، آبشویی نیترات (NO_3^-) ناشی از مصرف کودهای نیترژنه به آب‌های زیرزمینی، دی‌نیتروژن مونوکساید (N_2O) و آمونیاک (NH_3) حاصل از مصرف کودهای شیمیایی و انتشار اکسیدهای نیترژن (NO_x) ناشی از کاربرد کودهای نیترژنه به هوا و دی‌اکسید کربن (CO_2) ناشی از فعالیت‌های انسانی به هوا با استفاده از مدل‌های انتشار محاسبه شد. میزان انتشار سموم شیمیایی در هوا و خاک با استفاده از روش وان دن برگ و همکاران (1999) محاسبه گردید. همچنین فلزات سنگین انتشار یافته به خاک به‌واسطه کاربرد کودهای شیمیایی در جدول ۳ براساس تحقیقات دورلینگر و همکاران (Durlinger et al., 2015) و موسوی اول و همکاران (Mousavi-Avval et al., 2017) برآورد شد. برای آلاینده‌های خارج از مزرعه، حاصل از مصرف کودهای شیمیایی، آفت‌کش‌ها، کاربرد ماشین‌آلات کشاورزی، الکتریسیته و گازوئیل که جهت تولید محصولات زراعی به

همچنین در این روش منابع مختلف عدم قطعیت و انتخاب‌های متفاوت براساس نظریه فرهنگی (Thompson et al., 1990) در سه دیدگاه یا سناریو فردگرایانه، سلسله مراتبی و برابری طلبانه گروه‌بندی می‌شوند. به‌طوری‌که دیدگاه فردگرایانه مبتنی بر اثرات کوتاه‌مدت ۲۰ ساله بوده و معتقد به تأثیر بلامنازع بر محیط زیست و سازگاری انسان است. دیدگاه سلسله مراتبی مبتنی بر اجماع علمی با توجه به چارچوب

زمانی و قابل قبول بودن سازوکارهای تأثیر در میان‌مدت (۱۰۰ سال) بنا نهاده شده است. همچنین دیدگاه برابری طلبانه بر مبنای چشم‌انداز پیشگیری و با در نظر گرفتن طولانی‌ترین بازه زمانی (۱۰۰۰ سال) قرار داده شده است (Huijbregts et al. 2017). در این مطالعه، با توجه به مدت زمان در نظر گرفته‌شده در دوره آتی، از روش فردگرایانه برای ارزیابی زیست‌محیطی مناطق مورد مطالعه استفاده شد.

جدول ۱- میزان تولید گازهای آلاینده ناشی از مصرف یک لیتر گازوئیل

Table 1- Amount of pollutant gas emissions resulting from the consumption of one liter of diesel fuel (Durlinger et al., 2015; Mousavi-Avval et al., 2017)

مشخصات Specifications	ضریب انتشار به هوا Air emission factor
آرسنیک Arsenic	6.65E-08
برلیوم Beryllium	4.99E-08
کادمیوم Cadmium	4.99E-08
دی اکسید کربن Carbon dioxide	002.73E
مونوکسید کربن Carbon monoxide	6.00E-04
کرومیوم Chromium	4.99E-08
مس Copper	9.97E-08
دیوکسین، ۲،۳،۷،۸ تتراکلرودینزوپ Dioxin, 2,3,7,8 Tetrachlorodibenzo-p	1.66E-12
کلراید هیدروژن Hydrogen chloride	8.38E-05
سرب Lead	1.50E-07
منگنز Manganese	9.97E-08
جیوه Mercury	4.99E-08
متان، فسیل Methane, fossil	6.10E-06

متان، دی کلرو Methane, dichloro-, HCC-30	5.36E-07
نیکل Nickel	4.99E-08
اکسید نیتروژن Nitrogen oxides	2.89E-03
ذرات معلق Particulates, > 2.5 µm, and <10 µm	1.20E-04
اتان، تتراکلر Ethene, tetrachloro	9.14E-09
فنل Phenols, unspecified	4.04E-07

جدول ۲- ضرایب مورد استفاده جهت محاسبه انتشار ناشی از مصرف منابع ورودی از سطح مزرعه

Table 2- Coefficients used to calculate emissions resulting from the consumption of input resources at the farm level

مشخصات Specifications	ضریب Coefficient	مرجع Source
انتشار ناشی از مصرف کودهای شیمیایی Emissions associated with the use of chemical fertilizers		
$\left[\frac{\text{Kg N}_2\text{O} - \text{N}}{\text{Kg N}_{\text{in fertilizers applied}}} \right]$	0.01 (to air)	(IPCC, 2006)
$\left[\frac{\text{Kg NH}_3 - \text{N}}{\text{Kg N}_{\text{in fertilizers applied}}} \right]$	0.1 (to air)	(IPCC, 2006)
$\left[\frac{\text{Kg N}_2\text{O} - \text{N}}{\text{Kg N}_{\text{in atmospheric deposition}}} \right]$	0.001 (to air)	(IPCC, 2006)
$\left[\frac{\text{Kg NO}_3^- - \text{N}}{\text{Kg N}_{\text{in atmospheric deposition}}} \right]$	0.1 (to water)	(IPCC, 2006)
$\left[\frac{\text{Kg NO}_x}{\text{Kg P}_{\text{in fertilizers applied}}} \right]$	0.02 (to water)	(IPCC, 2006)
$\left[\frac{\text{Kg P emission}}{\text{Kg N}_2\text{O}_{\text{from fertilizers and soil}}} \right]$	0.21 (to air)	(IPCC, 2006)
تبدیل انتشار Emission conversion		
Conversion from kg CO ₂ -C to kg CO ₂	$\left(\frac{44}{12} \right)$	IPCC (2006)
Conversion from kg N ₂ O-N to kg N ₂ O	$\left(\frac{44}{28} \right)$	IPCC (2006)
Conversion from kg NH ₃ -N to kg NH ₃	$\left(\frac{17}{14} \right)$	IPCC (2006)
Conversion from kg NO ₃ -N to kg NO ₃	$\left(\frac{62}{14} \right)$	IPCC (2006)
Conversion from kg P ₂ O ₅ to kg P	$\left(\frac{62}{164} \right)$	IPCC (2006)
انتشار از کارگر Emissions from labor		
$\left[\frac{\text{Kg CO}_2}{\text{man} - \text{h Human labor}} \right]$	0.7 (to air)	(Mousavi-Avval et al., 2017)

انتشار ناشی از آفت‌کش‌ها Emissions resulting from pesticides		
$\frac{\text{Kg effective material}}{\text{Kg biocides}}$	0.1 (to air)	(Margni et al., 2002)
$\frac{\text{Kg effective material}}{\text{Kg biocides}}$	0.85 (to soil)	(Margni et al., 2002)

جدول ۳- ضرایب استاندارد انتشار فلزات سنگین به خاک ناشی از مصرف کودهای شیمیایی

Table 3- Standard coefficients for heavy metal emissions to soil from chemical fertilizer application (Ecoinvent version 3.11)

کود شیمیایی Chemical fertilizer	انتشار فلزات سنگین به خاک Emission of heavy metals into soil						
	Hg	Cr	Ni	Pb	Zn	Cu	Cd
	(mg.kg ⁻¹)						
ضریب یک کیلوگرم کود نیتروژن Emission factor per kg of nitrogen fertilizer	6	26	203	5409	20.9	77.9	0.1
ضریب یک کیلوگرم کود فسفات Emission factor per kg of phosphate fertilizer	39.5	90.5	839	67	88.3	543	0.3
ضریب یک کیلوگرم کود پتاسیم Emission factor per kg of potassium fertilizer	0.1	4.8	6.2	0.8	2.5	5.8	0

$$CF_{E_{x,c,a}} = CF_{m_{x,c}} \times F_{M \rightarrow E,c,a} \quad \text{معادله (۱۳)}$$

که در آن، c: نمایانگر دیدگاه فرهنگی است، a: نشان‌دهنده ناحیه حفاظتی (سلامت انسان، بوم‌نظام‌های زمینی، بوم‌نظام‌های آب شیرین، بوم‌نظام‌های دریایی یا کمبود منابع)، x: نشان‌دهنده عامل تنش‌زا و $F_{M \rightarrow E,c,a}$: تبدیل نقطه میانی به نقطه پایانی برای دیدگاه فرهنگی c و منطقه حفاظتی a است. این عوامل نقطه میانی تا نقطه پایانی در هر دسته تأثیر ثابت هستند، زیرا سازوکارهای محیطی برای همه عوامل تنش‌زا پس از مکان تأثیر نقطه میانی در مسیر علت- معلولی یکسان در نظر گرفته می‌شوند. جدول ۴، ضرایب تبدیل عوامل میانی به نقطه پایانی برای آسیب به سلامت انسان، آسیب بوم‌نظام زمینی، آسیب بوم‌نظام آب شیرین، آسیب بوم‌نظام دریایی و کمبود منابع را برای دیدگاه فرهنگی فردگرا ارائه می‌دهد. در نهایت، نتایج اثرات زیست‌محیطی بررسی و برای هر سطح کود نیتروژن در هر دو منطقه مورد مطالعه، تفسیر منطقی ارائه شد.

در نهایت در بخش تفسیر نتایج، اثرات زیست‌محیطی مده بررسی شد. برای تجزیه و تحلیل اثرات زیست‌محیطی محصولات زراعی از نرم‌افزار SIMAPRO 10.3 استفاده شد. این نرم‌افزار می‌تواند اثرات زیست‌محیطی محصولات و خدمات را در سراسر مراحل چرخه زندگی آن‌ها اندازه‌گیری کرده و همچنین اثرات همه مراحل از استخراج مواد خام تا تولید، توزیع، استفاده و دفع را شناسایی نماید و ابزارهای حرفه‌ای را برای جمع‌آوری، ارزیابی و پایش کارایی زیست‌محیطی محصولات، فرایندها و خدمات مهیا کند. با استفاده از ماتریس

در مرحله نرمال‌سازی، سهم اثرات زیست‌محیطی سامانه تولید هر محصول در کل اثرات زیست‌محیطی منطقه مورد مطالعه مشخص می‌گردد (Brenttrup et al., 2004).

$$N_i = \frac{I_i}{I_{i,ref}} \quad \text{معادله (۱۱)}$$

که در آن، N_i : مقدار نرمال‌شده شاخص مربوط به گروه تأثیر i به‌ازای واحد عملکردی، I_i : مقدار محاسبه شده شاخص مربوط به گروه تأثیر i و $I_{i,ref}$: مقدار شاخص مربوط به هر گروه تأثیر در شرایط مرجع در استاندارد ISO 14040 می‌باشد. همچنین در مرحله نرمال‌سازی نیز جهت مقایسه آسان‌تر مقادیر به‌دست‌آمده، شاخص‌های طبقه‌بندی گروه‌های تأثیر، بدون بُعد می‌شوند. در مرحله وزن‌دهی نیز با توجه به پتانسیلی که هر اثر زیست‌محیطی برای آسیب زدن به محیط زیست دارد، یک وزن داده می‌شود و هر گروه تأثیر که دارای پتانسیل آسیب بیشتری باشد، وزن بیشتری به آن اختصاص می‌یابد. بر این اساس، شاخص‌های نرمال‌شده با استفاده از معادله ۱۲ وزن‌دهی می‌گردند.

$$W_{ijk} = \frac{C_{ijk}}{T_{ijk}} \quad \text{معادله (۱۲)}$$

که در آن، W_{ijk} : وزن مربوط به شاخص i در منطقه j در سال k، C_{ijk} : مقدار فعلی شاخص i در منطقه j در سال k و T_{ijk} : مقدار هدف برای شاخص i در منطقه j در سال k می‌باشد.

به جهت محاسبه به فاکتورهای مشخصه نهایی (CFe)، ضرایب ارائه شده در جدول ۴ در مقادیر مشخصه میانی (CFm) ضرب شده‌اند (Huijbregts et al., 2017).

معکوس، محاسبات مربوط به نظام تولید را انجام دهد و در نتیجه استفاده از الگوریتم‌های با کارایی بسیار بالا، امکان محاسبه هزاران فرآیند مرتبط به تولید، انتقال، فراوری و بازیافت یک محصول را فراهم نماید.

نتایج و بحث

در این پژوهش ابتدا محصولات به چهار دسته دانه‌های روغنی، غلات، صیفی‌جات و گیاهان غده‌ای دسته‌بندی شدند. جدول ۵، میانگین سطح زیرکشت، نیاز آبی و عملکرد این محصولات را در دروه آماری مورد مطالعه (۱۴۰۲-۱۳۷۲) نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بیشترین سطح زیرکشت اراضی کشاورزی منطقه به کشت غلات (گندم و ذرت دانه‌ای) اختصاص دارد.

متوسط ردپای آب محصولات مورد مطالعه در بخش آب سبز، آب

جدول ۴- ضرایب استاندارد تبدیل اثرات میانی به اثرات نهایی از دیدگاه فرهنگی فردگرایانه

Table 4- Standard conversion coefficients from midpoint to endpoint impacts from an individualist cultural perspective (Huijbregts et al., 2017)

اثر زیست‌محیطی Environmental impact	واحد Unit	I
سلامت انسان Human health		
تغییر اقلیم Climate change	Yr.kg ⁻¹ CO ₂ to air	8.1E-08
تخریب اوزون استراتوسفری Stratospheric ozone depletion	yr.kg ⁻¹ CFC11 to air	2.4E-04
تشعشع یونیزه‌کننده Ionizing radiation	yr.kg ⁻¹ Bq Co-60 to air	6.8E-09
پراکنش ذرات ریز Particulate matter dispersion	yr.kg ⁻¹ PM _{2.5} to air	6.3E-04
تشکیل اوزون تروپوسفری Tropospheric ozone formation	yr.kg ⁻¹ NO _x to air	9.1E-07
سرطان‌زایی Carcinogenicity	yr.kg ⁻¹ 1,4-DCB to air	3.3E-06
بیماری‌زایی غیرسرطانی Non-carcinogenic health effects	yr.kg ⁻¹ 1,4-DCB to air	6.7E-09
مصرف آب Water consumption	Yr.m ⁻³ water	3.1E-06
کیفیت بوم‌نظام خشکی Terrestrial ecosystem quality		
تغییر اقلیم Climate change	species.yr.kg ⁻¹ CO ₂ to air	5.3E-10
تشکیل اوزون تروپوسفری Tropospheric ozone formation	species.yr.kg ⁻¹ NO _x to air	1.3E-07
اسیدی شدن خاک Soil acidification	species.yr.kg ⁻¹ SO ₂ to air	2.1E-07
سمیت زمینی Terrestrial toxicity	species.yr.kg ⁻¹ 1,4- DCB to industrial soil	5.4E-08
مصرف آب Water consumption	species.yr.m ⁻³ water consumed	0
تغییر کاربری زمین Land use change	species.m ⁻² annual crop land	8.9E-09
کیفیت بوم‌نظام آبی Aquatic ecosystem quality		

آبی و آب خاکستری در جدول ۶ داده شده است. همان‌گونه که در جدول ۶ مشاهده می‌گردد، سهم آب سبز در تولید محصولات منطقه بسیار پایین است که علت آن، بارندگی‌های بسیار کم و خشکسالی‌های شدید در این منطقه کویری کشور می‌باشد. در محصولات زمستانه مانند گندم، جو و کلزا، مقدار ردپای آب سبز بیشتر از سایر محصولات بود که علت آن را می‌توان به بیشتر بودن باران مؤثر در فصل کشت این محصولات نسبت داد. سهم آب سبز در محصولات خارج از فصل مانند گوجه‌فرنگی و خیار نیز بالا بود، اما بالا بودن عملکرد در واحد سطح این محصولات سبب کاهش قابل ملاحظه ردپای سبز در تولید این محصولات شده است. بنابراین می‌توان گفت که راندمان آبیاری به‌طور قابل توجهی در کاهش مقدار رد پای آب مؤثر است (Roholamini et al., 2025).

تغییر اقلیم Climate change	species.yr.kg ⁻¹ CO ₂	1.5E-14
اوروفیکاسیون آب شیرین Freshwater eutrophication	species.yr.kg ⁻¹ P to fresh water	6.1E-07
سمیت آب شیرین Freshwater toxicity	species.yr.kg ⁻¹ 1,4- DCB to fresh water	7.0E-10
مصرف آب Water consumption	species.yr.m ⁻³ water consumed	6.0E-13
کیفیت بوم‌نظام دریایی Marine ecosystem quality		
سمیت دریایی Marine toxicity	species.yr.kg ⁻¹ 1,4-DCB	1.1E-10
یوتروفیکاسیون دریایی Marine eutrophication	species.yr.kg ⁻¹ N to marine water	1.7E-09
کمبود منابع Resource depletion		
مواد معدنی Minerals	minerals USD ₂₀₁₃ \$.kg ⁻¹ Cu	0.16
سوخت فسیلی Fossil fuel	fossils3 USD ₂₀₁₃ \$.kg ⁻¹ crude oil	0.46
	USD ₂₀₁₃ \$.kg ⁻¹ hard coal	0.03
	USD ₂₀₁₃ \$.Nm ⁻³ natural gas	0.30

جدول ۵- اطلاعات محصولات کشاورزی مورد مطالعه در شهرستان جیرفت (جهاد کشاورزی شهرستان جیرفت)

Table 5- Information on the agricultural crops studied in Jiroft County (Jihad agricultural city of jiroft)

نوع محصول Crop category	محصول Crop	سطح زیرکشت Cultivated area (ha)	میانگین عملکرد Yield (t.ha ⁻¹)	کود نیتروژن Nitrogen fertilizer (kg.ha ⁻¹)	تبخیر و تعرق Evapotranspiration (mm)	باران مؤثر Effective rainfall (mm)
دانه‌های روغنی Oilseeds	کلزا Canola	375	6.56	200	376.52	72.11
غلات Cereals	گندم Wheat	43,400	4.42	200	576.68	91.77
	جو Barley	8,500	3.11	150	472.23	81.73
	ذرت دانه‌ای Grain maize	23,150	8.46	250	918.20	3.27
صیفی‌جات Vegetables	گوجه‌فرنگی Tomato	8,878	39.95	250	501.62	77.45
	خیار Cucumber	4,220	38.67	250	419.56	79.41
	پیاز Onion	13,973	58.21	200	738.86	103.23
گیاهان غده‌ای Tuber crops	سیب‌زمینی Potato	18,073	38.15	250	312.37	52.39

نشان می‌دهد که منابع آب آبی شامل آب‌های سطحی و زیرزمینی، منابع آب برای محصولات کشاورزی دشت جیرفت می‌باشند. همچنین مشاهده می‌گردد که در بین محصولات مورد مطالعه، غلات بیشترین ردپای آب را دارا بودند. بالاتر بودن ردپای آب در غلات به علت بالاتر بودن ردپای آب آبی و خاکستری در این محصولات می‌باشد. عربی و همکاران (Arabi et al., 2012) و علم‌قلی نیا همکاران

یحیی‌زاده و همکاران (Yahyazadeh et al., 2021) در برآورد ردپای آب گوجه‌فرنگی در ایران نشان دادند که استان‌های جنوبی ایران دارای بالاترین سهم ردپای آب سبز در تولید گوجه‌فرنگی می‌باشند که مهم‌ترین دلیل آن، کشت خارج از فصل این گیاه در مناطق جنوبی ایران است که به قطب تولید گوجه‌فرنگی زمستانه نیز معروف هستند. بالا بودن ردپای آب آبی نسبت به ردپای آب سبز

(Aligholnia et al., 2015) نیز در تحقیقات خود به نتایج مشابه دست یافتند و بیان داشتند از بین محصولات زراعی، غلات بیشترین مصرف آب را دارد. از نظر ردپای آب خاکستری، گندم و جو بالاترین ردپای آب خاکستری (به ترتیب ۸۴۸/۴۱ و ۹۱۶/۶۶ مترمکعب بر تن) را دارا بودند. علت آن نیز بیشتر بودن آب در فصل کشت این گیاهان و تمایل زیاد کشاورزان به استفاده از کود جهت رشد و محصول بیشتر می باشد. این مسئله با توجه به سطح زیرکشت عمده این محصولات، ضرورت بررسی جوانب ناشی از این میزان مصرف آب در جزء خاکستری را حائز اهمیت می کند. در مجموع، رد پای آب جو (۲۵۰۸/۱۹ مترمکعب بر تن) بیشتر از رد پای آب گندم (۲۱۶۴/۵۷ مترمکعب بر تن) بود. این افزایش می تواند ناشی از ردپای خاکستری نیز باشد که مقدار آن در محصول جو بیشتر از محصول گندم بود و نشان از بالاتر بودن سهم جو در ایجاد آلودگی آب های منطقه می باشد. پیری و سارانی (Piri & Sarani, 2020) و یوسفی و همکاران (Yousefi et al., 2016) نیز در تحقیقات خود در خصوص ردپای آب جو و گندم در ورامین و زاهدان به نتایج مشابهی دست یافتند و علت بالاتر بودن ردپای آب جو نسبت به گندم را بالاتر بودن ردپای

آب خاکستری و مصرف بیشتر کود در این محصول بیان نمودند. کمترین ردپای آب خاکستری متعلق به صیفی جات بود که نشان دهنده تمایل کشاورزان به استفاده کمتر از کود در تولید این محصولات و اکولوژیک بودن آن ها می باشد. گیاهان غده ای و صیفی جات در مجموع ردپای آب خیلی کمتری نسبت به گیاهان روغنی و غلات داشتند. سیب زمینی با ۱۸۲/۴۱ مترمکعب بر تن، کمترین ردپای آب در بین محصولات کشاورزی مورد مطالعه منطقه جیرفت را داشت. براساس نتایج ردپای آب، محصولات با کمترین مصرف آب و اثر کمتر بر منابع آبی باید در اولویت کشت قرار گیرند و محصولات با بیشترین ردپای آب، به ویژه ردپای آب آبی و خاکستری، بهتر است پس از آن کشت شوند. بنابراین، صیفی جات مانند خیار و پیاز و گیاهان غده ای مانند سیب زمینی به دلیل پایین بودن ردپای آب، اولویت اولیه کشت را دارند، در حالی که غلات (گندم و جو) و محصولات روغنی مانند کلزا به دلیل مصرف بالای آب آبی و خاکستری بهتر است در مراحل بعدی کشت برنامه ریزی شوند تا فشار بر منابع آب منطقه کاهش یابد.

جدول ۶- مقادیر ردپای آب سبز، آب آبی و آب خاکستری محصولات کشاورزی مورد مطالعه

Table 6- Green, blue, and grey water footprint values of the agricultural crops studied

نوع محصول Crop category	محصول Crop	ردپای آب سبز Green water footprint	ردپای آب آبی Blue water footprint	ردپای آب خاکستری Grey water footprint	مجموع ردپای آب Total water footprint
(m ³ .ton ⁻¹)					
دانه های روغنی Oilseeds	کلزا Canola	109.92	465.58	495.42	1,070.92
غلات Cereals	گندم Wheat	207.63	1,108.53	848.41	2,164.57
	جو Barley	272.45	1,319.08	916.66	2,508.19
	ذرت دانه ای Grain maize	4.09	1,143.66	531.26	1,679.01
صیفی جات Vegetables	گوچه فرنگی Tomato	19.36	85.79	93.77	198.92
	خیار Cucumber	20.36	89.05	96.15	205.56
	پیاز Onion	17.79	110.87	64.65	193.31
گیاهان غده ای Tuber crops	سیب زمینی Potato	13.78	69.95	98.68	182.41

در ادامه، اثرات زیست‌محیطی تولید هر محصول مورد بررسی قرار گرفت تا براساس تأثیر تولید محصول بر محیط زیست نیز اولویت کشت محصولات مورد مطالعه تعیین گردد. به دلیل طولانی شدن مطلب، محصولات گندم، جو و کلزا که رد پای آب خاکستری بیشتری داشتند، مورد بررسی قرار گرفتند. شکل‌های ۴ تا ۶، سهم هر نهاده کشاورزی را در ایجاد اثرات زیست‌محیطی تولید محصولات مورد مطالعه نشان می‌دهد.

شکل ۴: نتایج ارزیابی زیست‌محیطی کشت جو بر اساس روش ارزیابی چرخه حیات (LCA) را نشان می‌دهد. نهاده‌های بررسی شده شامل کود نیتروژن، کود پتاسیم، کود فسفات، آفت‌کش^۱، گازوئیل^۲، ماشین‌آلات کشاورزی^۳ و الکتریسیته^۴ هستند. نتایج نشان می‌دهد که در کشت جو، بیشترین بار زیست‌محیطی از مصرف گازوئیل و کودهای شیمیایی به‌ویژه کود ازت ناشی می‌شود، درحالی‌که الکتریسیته و کود پتاسیم کمترین سهم را دارند. این الگو با دانش علمی LCA در محصولات غلات هم‌خوانی کامل دارد، زیرا تولید و مصرف کودهای نیتروژنی و سوخت‌های فسیلی مراحل پربار زیست‌محیطی در این سیستم‌ها هستند. این الگو نشان می‌دهد که ساختار نهاده‌محور سیستم‌های غلات، حتی در محصولی نسبتاً کم‌نهاده مانند جو، به شدت تحت تأثیر مصرف انرژی فسیلی و کودهای نیتروژنی است. تولید کود نیتروژن به دلیل وابستگی مستقیم به فرآیند انرژی بر هابر-بوش و مصرف گاز طبیعی، یکی از مراحل چرخه حیات است که بیشترین کربن را دارا می‌باشد، درحالی‌که مصرف گازوئیل در مراحل کاشت، داشت و برداشت، سهم غالبی در انتشار آلاینده‌های هوا دارد. مطالعات LCA در سیستم‌های غلات نیز به‌طور مکرر گزارش کرده‌اند که سوخت و کود نیتروژن مهم‌ترین نقاط داغ زیست‌محیطی^۵ در این سیستم‌ها هستند (Brenttrup et al., 2004; Nemecek et al., 2011).

در دسته سلامت انسان، گازوئیل با ۱/۹۶۳ واحد بیشترین آسیب را ایجاد می‌کند و پس از آن کود نیتروژن با ۱/۲۳۰ واحد (۳۷ درصد کمتر از گازوئیل)، ماشین‌آلات کشاورزی با ۱/۹۶۳ واحد (مشابه گازوئیل)، کود فسفات با ۰/۵۷۱ واحد (۷۱ درصد کمتر از گازوئیل)،

آفت‌کش با ۰/۶۲۲ واحد (۶۸ درصد کمتر)، کود پتاسیم با ۰/۰۵۲۶ واحد (۹۷ درصد کمتر) و الکتریسیته با ۰/۴۰۱ واحد (۸۰ درصد کمتر از گازوئیل) قرار دارند. گازوئیل و ماشین‌آلات (که عمدتاً مصرف‌کننده همان گازوئیل هستند) بیش از ۵۰ درصد کل آسیب به سلامت انسان را تشکیل می‌دهند. این آسیب عمدتاً از انتشار ذرات معلق (PM)، اکسیدهای نیتروژن (NOx) و دی‌اکسید گوگرد (SO₂) در احتراق دیزل ناشی می‌شود که مشکلات تنفسی و قلبی-عروقی ایجاد می‌کنند. کود ازت نیز با انتشار آمونیاک (NH₃) و N₂O سهم قابل توجهی دارد، درحالی‌که آفت‌کش‌ها از طریق سمیت مستقیم مواد فعالشان تأثیر می‌گذارند. غلبه گازوئیل و ماشین‌آلات در دسته سلامت انسان با منطق روش‌های ارزیابی اثر مانند ReCiPe و IMPACT 2002+ سازگار است، زیرا این روش‌ها انتشار ذرات معلق، NOx و SO₂ را به‌طور مستقیم به شاخص‌های بیماری‌های تنفسی و قلبی-عروقی مرتبط می‌کنند. تشابه سهم ماشین‌آلات و گازوئیل نیز بیانگر آن است که اثرات زیست‌محیطی ماشین‌آلات عمدتاً از مصرف سوخت آن‌ها ناشی می‌شود، نه از فرآیند ساخت تجهیزات. نتایج مشابهی در مطالعات LCA غلات گزارش شده است که نشان می‌دهد بیش از ۵۰ تا ۷۰ درصد آسیب‌های مرتبط با سلامت انسان به مصرف سوخت‌های فسیلی در عملیات مزرعه‌ای نسبت داده می‌شود (Cellura et al., 2012; Khoshnevisan et al., 2014).

در دسته بوم‌نظام، کود نیتروژن با ۰/۵۲۶ واحد پیش‌تاز است و کود فسفات با ۰/۱۱۴ واحد (۷۸ درصد کمتر از نیتروژن)، آفت‌کش با ۰/۱۵۴ واحد (۷۱ درصد کمتر)، گازوئیل با ۰/۰۳۱ واحد (۹۴ درصد کمتر)، ماشین‌آلات با ۰/۰۲۰ واحد (۹۶ درصد کمتر)، کود پتاسیم با ۰/۰۰۶ واحد (۹۹ درصد کمتر) و الکتریسیته با ۰/۰۱۸ واحد (۹۶ درصد کمتر از ازت) دنبال می‌کنند. کود نیتروژن به‌تنهایی بیش از ۶۰ درصد کل آسیب به بوم‌نظام را ایجاد می‌کند. دلیل اصلی، شست‌وشوی نیترات به آب‌های سطحی و زیرزمینی (اوروفیکاسیون)، اسیدی شدن خاک و انتشار N₂O است که تنوع زیستی آبزیان و خاکزیان را به شدت تهدید می‌کند. کود فسفات و آفت‌کش نیز از طریق روان‌آب^۶ سفر و سمیت بوم‌شناختی سهم دارند، اما گازوئیل و ماشین‌آلات در

4- Electricity
1- Hotspots
2- Runoff

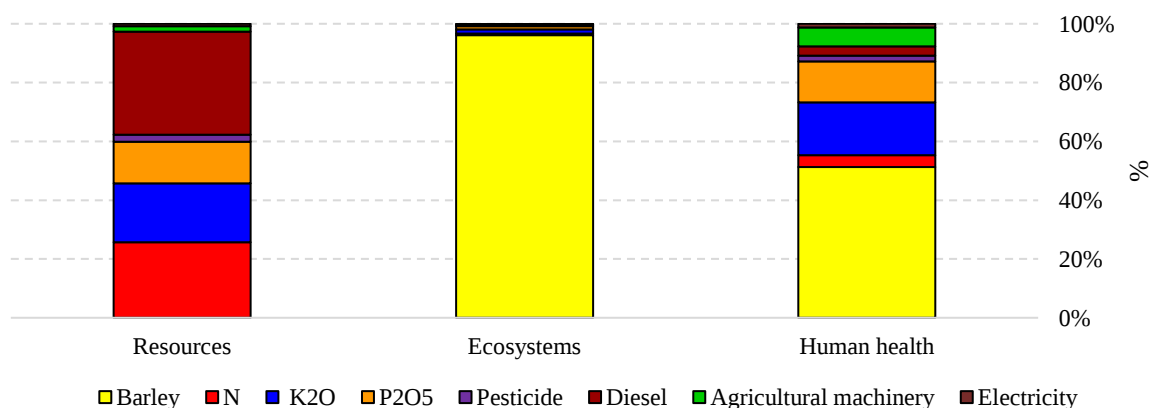
1- Pesticide
2- Diesel
3- Agricultural machinery

نشان می‌دهد. اگرچه کود نیتروژن نیز به دلیل مصرف گاز طبیعی در فرآیند تولید، سهم قابل توجهی دارد، اما مصرف مستقیم سوخت در مزرعه همچنان عامل غالب در این دسته محسوب می‌شود (Guinée, 2002; Cherubini et al., 2009).

به طور کلی، در کشت جو بیش از ۶۰-۷۰ درصد بار زیست‌محیطی از دو نهاده اصلی یعنی گازوئیل (و ماشین‌آلات مرتبط) و کود نیتروژن ناشی می‌شود. گازوئیل عمدتاً سلامت انسان و تخلیه منابع را تحت تأثیر قرار می‌دهد، در حالی که کود نیتروژن بیشترین آسیب را به بوم‌نظام و سهم قابل توجهی در دو دسته دیگر وارد می‌کند. کود فسفات و آفت‌کش سهم متوسط دارند، اما کود پتاسیم و الکتریسیته تأثیر بسیار ناچیزی نشان می‌دهند. این نتایج با مطالعات جهانی LCA غلات همخوانی دارد که نشان می‌دهد حدود ۴۰-۶۰ درصد بار کلی از مرحله مصرف سوخت و ۳۰-۵۰ درصد از کودهای نیتروژنی تأمین می‌شود. این نتایج نشان می‌دهد که کاهش بار زیست‌محیطی کشت جو بیش از هر چیز وابسته به مدیریت مصرف گازوئیل و بهینه‌سازی مصرف کود است. به کارگیری روش‌هایی مانند کاهش عملیات خاک‌ورزی، استفاده از ماشین‌آلات کارآمدتر و بهبود بهره‌وری مصرف نیتروژن می‌تواند به طور همزمان آسیب به سلامت انسان، بوم‌نظام و منابع طبیعی را کاهش دهد. مطالعات پیشین نیز تأکید کرده‌اند که افزایش کارایی نهاده‌ها، مؤثرترین راهکار برای ارتقای پایداری زیست‌محیطی سیستم‌های غلات است (Snyder et al., 2014; Lal, 2015).

این دسته تأثیر بسیار ناچیزی نشان می‌دهند. برتری قاطع کود نیتروژن در دسته آسیب به بوم‌نظام نشان‌دهنده حساسیت بالای محیط‌های خاکی و آبی به نشت ترکیبات نیتروژنی در سیستم‌های زراعی است. آبشویی نترات و رواناب نیتروژن موجب اوروفیکاسیون آب‌های سطحی، کاهش اکسیژن محلول و افت تنوع زیستی آبریان می‌شود، در حالی که انتشار N_2O و اسیدی شدن خاک، عملکرد بوم‌نظام‌های خشکی را نیز مختل می‌کند. پژوهش‌های متعدد LCA در محصولات غلات گزارش کرده‌اند که کود نیتروژن به‌تنهایی بیش از ۵۰ تا ۶۵ درصد آسیب‌های بوم‌نظامی را ایجاد می‌کند، در حالی که نقش فسفر و آفت‌کش‌ها ثانویه اما غیرقابل چشم‌پوشی است (Leip et al., 2015; Bouwman et al., 2013).

در دسته تخلیه منابع، گازوئیل با ۱۱۵٪ واحد بیشترین سهم را دارد و ماشین‌آلات کشاورزی با ۰/۰۰۶ واحد (۹۵ درصد کمتر از گازوئیل)، کود نیتروژن با ۰/۰۸۴ واحد (۲۷ درصد کمتر از گازوئیل)، کود فسفات با ۰/۰۴۷ واحد (۵۹ درصد کمتر)، آفت‌کش با ۰/۰۰۷ واحد (۹۳ درصد کمتر)، الکتریسیته با ۰/۰۰۲ واحد (۹۸ درصد کمتر)، کود پتاسیم با ۰/۰۰۶ واحد (۹۵ درصد کمتر) قرار دارند. بالاتر بودن میزان مصرف گازوئیل در دسته تخلیه منابع بیانگر وابستگی شدید سیستم کشت جو به منابع انرژی تجدیدناپذیر است. شاخص تخلیه منابع غیرزیستی در LCA عمدتاً مصرف سوخت‌های فسیلی و مواد معدنی محدود را منعکس می‌کند، از این رو مصرف مستقیم گازوئیل و انرژی نهفته در تولید نهاده‌ها، سهم بالاتری نسبت به سایر ورودی‌ها



شکل ۴- اثرات نهاده‌های کشاورزی و منابع ورودی بر سلامت انسان، بوم‌نظام و منابع در کشت جو

Fig. 4- Effects of agricultural inputs and input resources on human health, ecosystem, and resources in barley cultivation

شکل ۵، سهم هر نهاده کشاورزی را در ایجاد اثرات زیست‌محیطی کلی کشت کلزا براساس روش ارزیابی چرخه حیات نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که در کشت کلزا، بار زیست‌محیطی بسیار بالا عمدتاً از مصرف بالای کود فسفات، ماشین‌آلات کشاورزی، کود ازت و گازوئیل ناشی می‌شود، درحالی‌که الکتریسیته و آفت‌کش سهم نسبتاً کمتری دارند. این الگو با ویژگی‌های کشت صنعتی کلزا به‌عنوان یک محصول روغن‌دار پرنیاز به نهاده‌های شیمیایی و مکانیزاسیون سنگین کاملاً هم‌خوانی دارد و توضیح‌دهنده بار زیست‌محیطی بسیار بالای این محصول در مقایسه با غلات مانند جو و گندم است. الگوی مشاهده شده در کشت کلزا نشان می‌دهد که این محصول به‌دلیل ماهیت روغنی و عملکرد بالقوه بالا، وابستگی شدیدی به نهاده‌های شیمیایی و مکانیزاسیون دارد. نیاز بالای کلزا به فسفر برای توسعه ریشه، گل‌دهی و تشکیل دانه، در کنار عملیات مکانیزه سنگین باعث می‌شود که نقاط داغ زیست‌محیطی آن نسبت به غلات تشدید شود. مطالعات LCA در محصولات روغنی نیز گزارش کرده‌اند که کلزا در مقایسه با غلات، به‌ویژه از نظر سلامت انسان و تخلیه منابع، بار زیست‌محیطی بالاتری دارد که عمدتاً به مصرف بالای کودهای فسفات و سوخت‌های فسیلی مرتبط است (Brenttrup et al., 2004; Nemecek et al., 2011).

در دسته سلامت انسان، کود فسفات با ۱۰/۴۴۸ واحد، بیشترین آسیب را ایجاد می‌کند و پس از آن ماشین‌آلات کشاورزی با ۵،۳۶۸ واحد (۴۹ درصد کمتر از فسفات)، کود ازت با ۲/۴۶۱ واحد (۷۶ درصد کمتر)، گازوئیل با ۲/۴۶۸ واحد (۷۶ درصد کمتر)، آفت‌کش با ۱/۴۰۱ واحد (۸۷ درصد کمتر)، الکتریسیته با ۰/۷۶۱ واحد (۹۳ درصد کمتر) و کود پتاسیم با ۰/۱۰۵ واحد (۹۹ درصد کمتر از فسفات) قرار دارند. کود فسفات به‌تنهایی حدود ۴۵ درصد کل آسیب به سلامت انسان را تشکیل می‌دهد و همراه با ماشین‌آلات بیش از ۷۰ درصد سهم دارد. این سهم بسیار بالای فسفات ناشی از انتشار فلزات سنگین (مانند کادمیوم) و ذرات معلق در زنجیره تأمین فسفات معدنی است که اثرات تنفسی و سرطان‌زا ایجاد می‌کنند. ماشین‌آلات و گازوئیل نیز با انتشار ذرات PM، NOx و SO2 در احتراق دیزل تأثیرگذار هستند.

غلبه کود فسفات در دسته سلامت انسان نشان‌دهنده اهمیت زنجیره تأمین این نهاده در ارزیابی‌های LCA است. سنگ فسفات به‌طور طبیعی حاوی فلزات سنگینی مانند کادمیوم و سرب است که در مراحل استخراج، فرآوری و حمل‌ونقل آزاد شده و در شاخص‌های

سلامت انسان وزن بالایی دارند. روش‌های ارزیابی اثر مانند ReCiPe این آلاینده‌ها را با اثرات سرطان‌زایی و آسیب‌های مزمن مرتبط می‌کنند. مطالعات انجام شده روی سیستم‌های کشت کلزا نیز گزارش کرده‌اند که کود فسفات می‌تواند تا ۴۰-۵۰ درصد کل آسیب‌های مرتبط با سلامت انسان را به خود اختصاص دهد، به‌ویژه در سیستم‌های با مصرف بالای کود (Cellura et al., 2012; Leip et al., 2015).

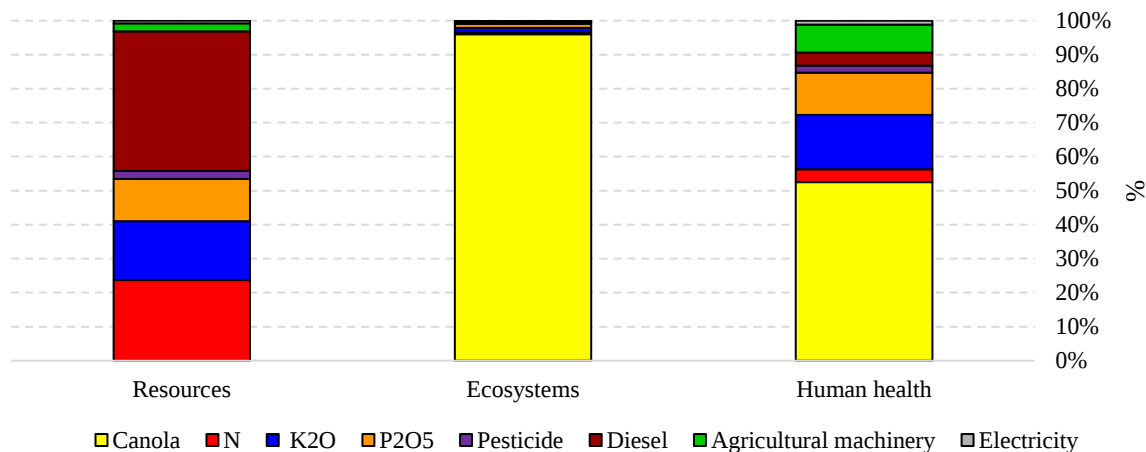
در دسته بوم‌نظام، کود نیتروژن با ۰/۴۶۳ واحد پیش‌تاز است و پس از آن کود فسفات با ۰/۲۱۶ واحد (۵۳ درصد کمتر از نیتروژن)، آفت‌کش با ۰/۰۳۵ واحد (۹۲ درصد کمتر)، گازوئیل با ۰/۰۷۹ واحد (۸۳ درصد کمتر)، ماشین‌آلات با ۰/۰۵۶ واحد (۸۸ درصد کمتر)، الکتریسیته با ۰/۰۳۵ واحد (۹۲ درصد کمتر) و کود پتاسیم با ۰/۱۲۴ واحد (۷۳ درصد کمتر از ازت) قرار دارد. کود ازت حدود ۴۵ درصد و همراه با کود فسفات بیش از ۶۵ درصد کل آسیب به بوم‌نظام را ایجاد می‌کند. دلیل اصلی، شست‌وشوی بالای نیترات و فسفات به آب‌های سطحی (اوروفیکا سیون شدید)، اسیدی شدن خاک و انتشار N2O است که تنوع زیستی آبزیان و خاکزیان را تهدید می‌کند. آفت‌کش در کلزا سهم کمتری نسبت به غلات دارد، احتمالاً به‌دلیل مدیریت متفاوت آفات در این محصول است. سهم بالای هم‌زمان کودهای نیتروژن و فسفات در دسته آسیب به بوم‌نظام بیانگر شدت فرآیند اوروفیکا سیون در سیستم‌های کشت کلزا است. کلزا به‌دلیل پوشش اولیه ضعیف و دوره رشد طولانی، مستعد شست‌وشوی نیترات و فسفر به آب‌های سطحی و زیرزمینی است. این پدیده منجر به شکوفایی جلبکی، کاهش اکسیژن محلول و افت شدید تنوع زیستی در بوم‌نظام‌های آبی می‌شود. پژوهش‌های LCA در کلزا نشان داده‌اند که مجموع اثرات بوم‌نظامی کودهای N و P معمولاً بیش از ۶۰ درصد کل آسیب را شامل می‌شود و از این نظر کلزا یکی از حساس‌ترین محصولات زراعی محسوب می‌شود (Bouwman et al., 2013; Payen et al., 2015).

در دسته تخلیه منابع، گازوئیل با ۰/۲۹۴ واحد بیشترین سهم را دارد و پس از آن کود نیتروژن با ۰/۱۷۰ واحد (۴۲ درصد کمتر از گازوئیل)، کود فسفات با ۰/۰۸۹ واحد (۷۰ درصد کمتر)، ماشین‌آلات با ۰/۰۱۷ واحد (۹۴ درصد کمتر)، کود پتاسیم با ۰/۱۲۴ واحد (۵۸ درصد کمتر)، آفت‌کش با ۰/۰۱۷ واحد (۹۴ درصد کمتر) و الکتریسیته با ۰/۰۰۶ واحد (۹۸ درصد کمتر از گازوئیل) قرار دارند. گازوئیل و کود

منابع) و کود ازت (در بوم‌نظام و منابع) ناشی می‌شود. نکته برجسته در مقایسه با جو و گندم، سهم بسیار بالای کود فسفات و ماشین‌آلات است که توضیح می‌دهد چرا کلزا در جدول کلی محصولات، بیشترین بار زیست‌محیطی را دارد. این نتایج با مطالعات جهانی LCA کلزا هم‌خوانی دارد که معمولاً مصرف بالای فسفر و عملیات مکانیزه را به‌عنوان نقاط داغ اصلی شناسایی می‌کنند. مقایسه نتایج کشت کلزا با محصولات غله‌ای مانند جو و گندم نشان می‌دهد که بار زیست‌محیطی بالاتر کلزا ناشی از ترکیب مصرف بالای کود فسفات، شدت مکانیزاسیون و نیاز قابل توجه به کود ازت است. این ویژگی‌ها کلزا را به محصولی با حساسیت زیست‌محیطی بالا تبدیل می‌کند، به‌گونه‌ای که حتی بهبودهای جزئی در مدیریت کود و سوخت می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر کاهش اثرات زیست‌محیطی آن داشته باشد. مطالعات پیشین نیز تأکید کرده‌اند که افزایش کارایی مصرف فسفر، کاهش عملیات مکانیزه غیرضروری و بهینه‌سازی مصرف ازت، مؤثرترین راهکارها برای ارتقای پایداری زیست‌محیطی کشت کلزا هستند (Lal, 2015; Snyder et al., 2014).

نیتروژن با هم بیش از ۶۵ درصد کل تخلیه منابع را تشکیل می‌دهند. مصرف بالای گازوئیل نشان‌دهنده مکانیزاسیون سنگین در کشت، برداشت و حمل کلزا است، درحالی‌که تولید کود نیتروژن نیز فرآیندی شدیداً انرژی‌بر است. غلبه گازوئیل در دسته تخلیه منابع نشان‌دهنده سطح بالای مکانیزاسیون در کشت کلزا، از آماده‌سازی زمین تا برداشت و حمل محصول است. شاخص تخلیه منابع غیرزیستی در LCA به‌طور مستقیم مصرف انرژی‌های فسیلی و منابع محدود را منعکس می‌کند، از این‌رو عملیات مزرعه‌ای پرمصرف انرژی، نقش تعیین‌کننده‌ای دارد. علاوه بر این، تولید کود ازت نیز به‌دلیل مصرف بالای گاز طبیعی، سهم قابل توجهی در این دسته دارد. نتایج مشابهی در مطالعات بین‌المللی LCA کلزا گزارش شده است که در آن‌ها سوخت و کود ازت به‌عنوان عوامل اصلی تخلیه منابع معرفی شده‌اند (Cherubini et al., 2009; Snyder et al., 2014).

به‌طور کلی، در کشت کلزا بیش از ۷۰-۸۰ درصد بار زیست‌محیطی از چهار نهاده اصلی یعنی کود فسفات (به‌ویژه در سلامت انسان)، ماشین‌آلات و گازوئیل (در سلامت انسان و تخلیه



شکل ۵- اثرات نهاده‌های کشاورزی و منابع ورودی بر سلامت انسان، بوم‌نظام و منابع در کشت کلزا

Fig. 5- Effects of agricultural inputs and input resources on human health, ecosystem, and resources in canola cultivation

زیست‌محیطی از مصرف کودهای شیمیایی به‌ویژه کود فسفات و کود نیتروژن و همچنین گازوئیل و ماشین‌آلات ناشی می‌شود، درحالی‌که الکتریسیته و آفت‌کش کمترین سهم را دارند. این الگو کاملاً با

شکل ۶، سهم هر نهاده کشاورزی را در ایجاد اثرات زیست‌محیطی کلی کشت گندم براساس روش ارزیابی چرخه حیات نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که در کشت گندم، مانند جو، بیشترین بار

ویژگی‌های کشت غلات دیم یا آبی در مقیاس وسیع هم‌خوانی دارد، جایی که نهاده‌های شیمیایی و مکانیزاسیون سنگین نقش غالب را ایفا می‌کنند. الگوی مشاهده‌شده در کشت گندم نشان می‌دهد که این محصول، مشابه سایر غلات، به شدت تحت تأثیر مصرف نهاده‌های شیمیایی و انرژی فسیلی قرار دارد. با وجود اینکه گندم نسبت به محصولات روغنی نیاز نهاده‌ای کمتری دارد، سطح زیرکشت گسترده و تکرار عملیات مکانیزه باعث می‌شود که اثر تجمعی کودهای شیمیایی و سوخت‌های فسیلی قابل توجه باشد. مطالعات LCA در سیستم‌های گندم نیز نشان داده‌اند که کودهای شیمیایی و گازوئیل به‌طور پایدار مهم‌ترین نقاط داغ زیست‌محیطی این محصول هستند، به‌ویژه در سیستم‌های آبی و نیمه‌خشک (Brenttrup et al., 2004; Nemecek et al., 2011).

در دسته سلامت انسان، کود فسفات با $4/714$ واحد بی‌شترین آسیب را ایجاد می‌کند و پس از آن ماشین‌آلات کشاورزی با $1/506$ واحد (۶۸ درصد کمتر از فسفات)، گازوئیل با $0/805$ واحد (۸۳ درصد کمتر)، کود نیتروژن با $1/113$ واحد (۷۶ درصد کمتر)، آفت‌کش با $0/492$ واحد (۹۰ درصد کمتر)، الکتروسیته با $0/343$ واحد (۹۳ درصد کمتر) و کود پتاسیم با $0/048$ واحد (۹۹ درصد کمتر از فسفات) قرار دارند. کود فسفات به‌تنهایی بیش از ۵۰ درصد کل آسیب به سلامت انسان را تشکیل می‌دهد. این سهم بالای فسفات عمدتاً ناشی از انتشار فلزات سنگین (مانند کادمیوم) و ذرات معلق در مراحل استخراج و تولید فسفات معدنی است که اثرات تنفسی و سرطان‌زا دارند. ماشین‌آلات و گازوئیل نیز از طریق انتشار ذرات PM و NOx سهم قابل توجهی دارند، درحالی‌که کود نیتروژن با انتشار آمونیاک تأثیرگذار است. غلبه کود فسفات در دسته سلامت انسان بیانگر اهمیت کیفیت و منبع فسفات معدنی مورد استفاده در کشت گندم است. وجود فلزات سنگین به‌ویژه کادمیوم در سنگ فسفات موجب افزایش قابل توجه شاخص‌های سمیت انسانی در روش‌های ارزیابی اثر مانند ReCiPe می‌شود. این موضوع در گندم از اهمیت بی‌شتری برخوردار است، زیرا این محصول به‌طور مستقیم در زنجیره غذایی انسان قرار دارد. نتایج مشابهی در مطالعات LCA گندم گزارش شده است که نشان می‌دهد کود فسفات می‌تواند بیش از ۴۰ تا ۵۵ درصد کل آسیب‌های مرتبط با سلامت انسان را به خود اختصاص دهد، حتی در شرایطی که مقدار مصرف آن کمتر از کود نیتروژن باشد (Cellura et al., 2012; Leip et al., 2015).

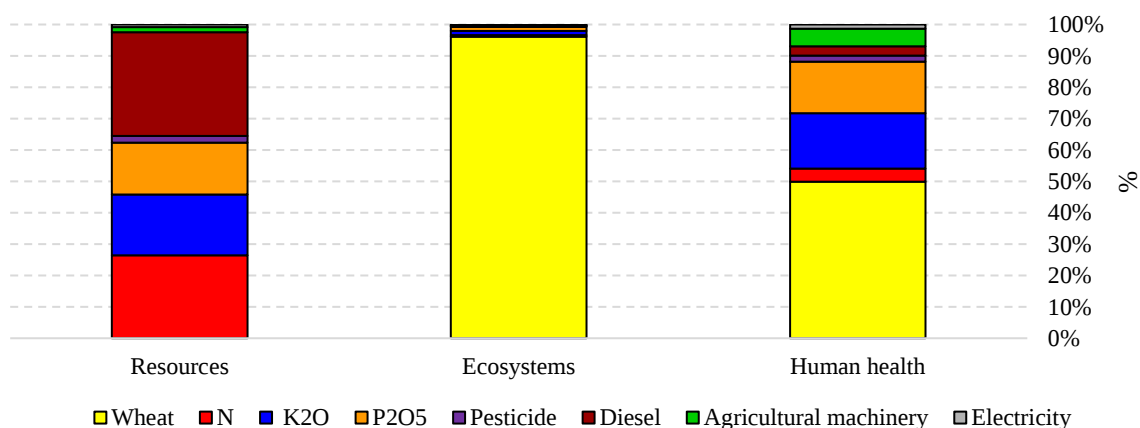
در دسته بوم‌نظام، کود نیتروژن با $0/488$ واحد پیش‌تاز است و پس از آن کود فسفات با $0/129$ واحد (۷۴ درصد کمتر از ازت)، آفت‌کش با $0/122$ واحد (۷۵ درصد کمتر)، گازوئیل با $0/26$ واحد (۴۷ درصد کمتر)، ماشین‌آلات با $0/015$ واحد (۹۷ درصد کمتر)، الکتروسیته با $0/016$ واحد (۹۷ درصد کمتر) و کود پتاسیم با $0/051$ واحد (۹۰ درصد کمتر از ازت) دنبال می‌کنند. کود نیتروژن به‌تنهایی حدود ۵۵ درصد کل آسیب به بوم‌نظام را ایجاد می‌کند. دلیل اصلی، شست‌وشوی نیترات به آب‌ها (اوروفیکا سیون)، اسیدی شدن خاک و انتشار N_2O است که تنوع زیستی را تهدید می‌کند. کود فسفات و آفت‌کش نیز از طریق روان‌آب فوسفور و سمیت بوم‌شناختی سهم مشابهی دارند، اما جالب اینکه گازوئیل در این دسته تأثیر کمتری نسبت به سلامت انسان نشان می‌دهد. برتری کود نیتروژن در دسته آسیب به بوم‌نظام نشان‌دهنده نقش کلیدی چرخه نیتروژن در اثرات زیست‌محیطی کشت گندم است. شست‌وشوی نیترات به آب‌های سطحی و زیرزمینی، انتشار N_2O و اسیدی شدن خاک، از مهم‌ترین مسیرهای اثرگذاری نیتروژن بر بوم‌نظام‌های آبی و خشکی محسوب می‌شوند. گندم به‌دلیل سطح زیرکشت وسیع و مصرف مکرر کود ازت، سهم بالایی در فرآیند اورتروفیکاسیون منطقه‌ای دارد. مطالعات پیشین LCA نیز گزارش کرده‌اند که کود ازت معمولاً ۵۰ تا ۶۰ درصد کل آسیب‌های بوم‌نظامی در کشت گندم را تشکیل می‌دهد، درحالی‌که نقش فوسفور و آفت‌کش‌ها در رتبه‌های بعدی قرار می‌گیرد (Bouwman et al., 2013; Payen et al., 2015).

در دسته تخلیه منابع، گازوئیل با $0/096$ واحد بی‌شترین سهم را دارد و پس از آن کود نیتروژن با $0/077$ واحد (۲۰ درصد کمتر از گازوئیل)، کود فسفات با $0/048$ واحد (۵۰ درصد کمتر)، ماشین‌آلات با $0/005$ واحد (۹۵ درصد کمتر)، کود پتاسیم با $0/051$ واحد (۴۷ درصد کمتر)، آفت‌کش با $0/006$ واحد (۹۴ درصد کمتر) و الکتروسیته با $0/003$ واحد (۹۷ درصد کمتر از گازوئیل) قرار دارند. گازوئیل و کود نیتروژن با هم بیش از ۶۵ درصد کل تخلیه منابع را تشکیل می‌دهند. این امر کاملاً منطقی است، زیرا گازوئیل به‌طور مستقیم سوخت فسیلی مصرفی در عملیات مزرعه است و تولید کود نیتروژن نیز فرآیندی شدیداً انرژی‌بر (وابسته به گاز طبیعی) محسوب می‌شود. غلبه گازوئیل در دسته تخلیه منابع بازتاب‌دهنده وابستگی بالای کشت گندم به انرژی‌های فسیلی در عملیات آماده‌سازی زمین، کاشت، داشت و برداشت است. شاخص تخلیه منابع غیرزیستی در LCA

LCA گندم هم‌خوانی دارد که معمولاً ۴۰-۶۰ درصد بار را به کودهای شیمیایی و ۲۰-۳۰ درصد را به مصرف سوخت نسبت می‌دهند. مقایسه نتایج کشت گندم با جو نشان می‌دهد که اگرچه الگوی کلی اثرات زیست‌محیطی در این دو محصول مشابه است، اما سهم بالاتر کود فسفات در آسیب به سلامت انسان در گندم، آن را از جو متمایز می‌کند. این تفاوت می‌تواند ناشی از نیاز تغذیه‌ای بالاتر گندم در برخی از خاک‌ها یا تفاوت در منبع و کیفیت کود فسفات مصرفی باشد. به‌طور کلی، کاهش بار زیست‌محیطی کشت گندم مستلزم بهبود کارایی مصرف کودهای شیمیایی به‌ویژه ازت و فسفر، و کاهش مصرف گازوئیل از طریق بهینه‌سازی عملیات مکانیزه است. پیشین نیز تأکید کرده‌اند که افزایش بهره‌وری نهاده‌ها، مؤثرترین راهکار برای ارتقای پایداری زیست‌محیطی سیستم‌های تولید گندم محسوب می‌شود (Lal, 2015; Snyder et al., 2014).

به‌طور مستقیم مصرف سوخت‌های فسیلی و منابع انرژی محدود را منعکس می‌کند، از این رو حتی مصرف متوسط گازوئیل در مقیاس وسیع سطح زیرکشت، اثر قابل توجهی ایجاد می‌کند. علاوه بر این، تولید کود ازت نیز به دلیل وابستگی به گاز طبیعی، سهم بالایی در تخلیه منابع دارد. نتایج مشابهی در مطالعات بین‌المللی LCA گندم گزارش شده است که مصرف سوخت و کود ازت را به عنوان عوامل اصلی تخلیه منابع معرفی می‌کنند (Cherubini et al., 2009; Snyder et al., 2014).

به‌طور کلی، در کشت گندم بیش از ۶۰-۷۰ درصد بار زیست‌محیطی از سه نهاده اصلی یعنی کود فسفات (به‌ویژه در سلامت انسان)، کود نیتروژن (به‌ویژه در بوم‌نظام) و گازوئیل (به‌ویژه در تخلیه منابع) ناشی می‌شود. نکته قابل توجه در مقایسه با جو، سهم بسیار بالای کود فسفات در آسیب به سلامت انسان است که احتمالاً به دلیل مصرف بالاتر فسفات در خاک‌های نیازمند به این عنصر یا تفاوت در منبع فسفات مورد استفاده بازمی‌گردد. این نتایج با مطالعات جهانی



شکل ۶- اثرات نهاده‌های کشاورزی و منابع ورودی بر سلامت انسان، بوم‌نظام و منابع در کشت گندم

Fig. 6- Effects of agricultural inputs and input resources on human health, ecosystem, and resources in wheat cultivation

کلی تک‌نقطه‌ای مجموع این اثرات ارائه شده است. مقایسه هم‌زمان هشت محصول زراعی نشان می‌دهد که نوع محصول و ساختار سیستم تولید، تعیین‌کننده اصلی شدت اثرات زیست‌محیطی است. محصولات دانه‌ای و روغن‌دار مانند کلزا، گندم، جو و ذرت به دلیل سطح زیرکشت وسیع، مصرف بالای کودهای شیمیایی و وابستگی شدید به مکانیزاسیون، بار زیست‌محیطی بسیار بالاتری نسبت به سبزیجات دارند (Roy et al., 2009; Nemecek & Kägi, 2007).

شکل ۷ نشان‌دهنده میزان اثرات زیست‌محیطی نهایی کشت هشت محصول کشاورزی مورد مطالعه شامل جو، کلزا، ذرت، خیار، پیاز، سیب‌زمینی، گوجه‌فرنگی و گندم براساس روش ارزیابی چرخه حیات می‌باشد. این اثرات در سه دسته اصلی آسیب نهایی تقسیم‌بندی شده‌اند: سلامت انسان، کیفیت بوم‌نظام که کاهش تنوع گونه‌های زیستی را بیان می‌کند و تخلیه منابع که انرژی اضافی لازم برای استخراج منابع کمیاب در آینده را نشان می‌دهد؛ در نهایت نیز امتیاز

سلامت انسان در محصولات دانه‌ای به‌ویژه کلزا، نشان‌دهنده نقش مستقیم نهاده‌های شیمیایی در ایجاد مخاطرات انسانی است (Fantke & Jolliet, 2016; Goedkoop et al., 2013). انتشار ذرات معلق، آمونیاک، اکسیدهای نیتروژن و ترکیبات سمی ناشی از کودها و آفت‌کش‌ها، با افزایش خطر بیماری‌های تنفسی، قلبی-عروقی و سرطان‌زایی مرتبط هستند. سبزیجات به‌دلیل مصرف محدود این نهاده‌ها، اثر بسیار ناچیزی بر سلامت انسان دارند (Roy et al., 2009).

در زمینه آسیب به بوم‌نظام، کلزا با ۲۰/۲۵ واحد بیشترین اثر منفی را دارد و گندم با ۹/۲۵ واحد (۵۴ درصد کمتر)، ذرت با ۷/۱۳ واحد (۶۵ درصد کمتر)، سیب‌زمینی با ۱/۰۰ واحد (۹۵ درصد کمتر)، گوجه‌فرنگی با ۱/۰۴ واحد (۹۵ درصد کمتر)، پیاز با ۱/۰۴ واحد (۹۵ درصد کمتر)، خیار با ۰/۹۵ واحد (۹۵ درصد کمتر) و جو با ۰/۳۳ واحد (۹۸ درصد کمتر از کلزا) در رتبه‌های بعدی هستند. کلزا بیش از ۲۱ برابر خیار و بیش از ۶۰ برابر جو به بوم‌نظام آسیب می‌رساند. این آسیب‌ها بیشتر از اسیدی شدن خاک، اوروفیکاسیون آب‌ها به‌دلیل شست‌وشوی نیتروژن و فسفر، و سمیت بوم‌شناختی سموم ناشی می‌شوند که تنوع زیستی را به شدت تهدید می‌کنند (Payen et al., 2015; Bouwman et al., 2013). کلزا به‌دلیل نیاز تغذیه‌ای بالا و پوشش اولیه ضعیف، مستعد شست‌وشوی عناصر غذایی و انتقال آن‌ها به بوم‌نظام‌های آبی است که منجر به کاهش شدید تنوع زیستی می‌شود. محصولات سبزی با مدیریت دقیق‌تر و چرخه رشد کوتاه‌تر، فشار بسیار کمتری بر بوم‌نظام‌های خاکی و آبی وارد می‌کنند (Nemecek & Kägi, 2007).

در دسته تخلیه منابع نیز، گندم با ۰/۲۸۹ واحد بیشترین مقدار را دارد و پس از آن ذرت با ۰/۲۵۳ واحد (۱۲ درصد کمتر از گندم)، کلزا با ۰/۱۷۶ واحد (۳۹ درصد کمتر از گندم)، جو با ۰/۳۳۱ واحد (فقط ۱۴ درصد بیشتر از گندم اما در کل بالا)، سیب‌زمینی با ۰/۰۴۹ واحد (۸۳ درصد کمتر از گندم)، گوجه‌فرنگی با ۰/۰۴۱ واحد (۸۶ درصد کمتر)، خیار با ۰/۰۴۲ واحد (۸۵ درصد کمتر) و پیاز با ۰/۰۲۹ واحد (۹۰ درصد کمتر از گندم) قرار دارند. محصولات غلات و روغن‌دار منابع را به مراتب بیشتر تخلیه می‌کنند.

به‌طور کلی، محصولات دانه‌ای به‌ویژه کلزا و غلات پرمصرف مانند ذرت و گندم به‌دلیل وابستگی شدید به کودهای نیتروژنی، سموم و ماشین‌آلات، بار زیست‌محیطی بسیار بالاتری (اغلب ۷ تا ۲۱ برابر) نسبت به سبزیجات دارند. برتری محصولات غله‌ای و دانه‌ای در تخلیه

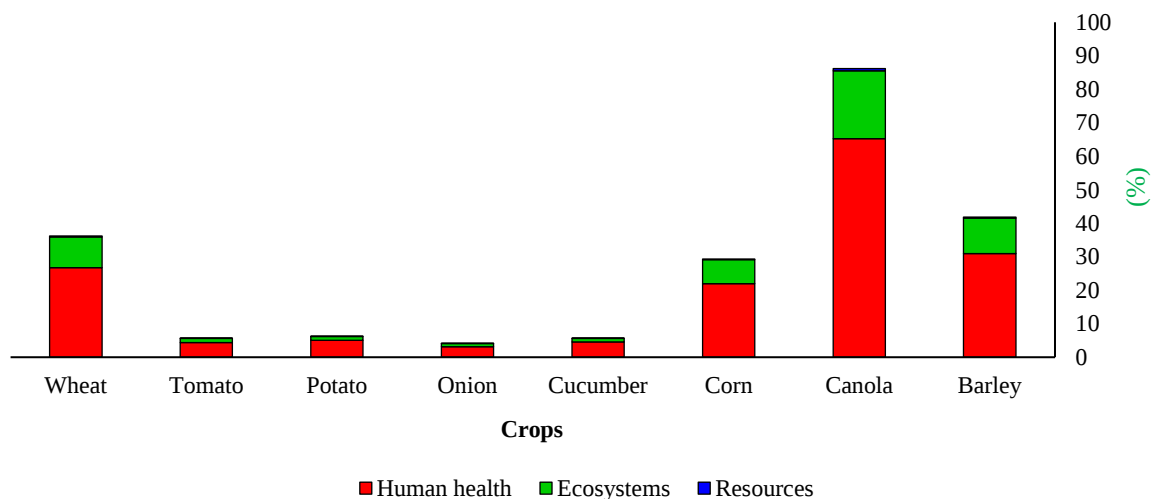
در مقابل، سبزیجات به‌دلیل دوره رشد کوتاه‌تر، نیاز کمتر به کود و سم، و شدت مکانیزاسیون پایین‌تر، اثرات زیست‌محیطی به‌مراتب کمتری نشان می‌دهند (Brenttrup et al., 2004; Nemecek et al., 2011). بررسی اثرات نهایی زیست‌محیطی نشان می‌دهد که کلزا با ۸۶/۱۹ واحد بیشترین بار را دارد و پس از آن گندم با ۳۶/۲۳ واحد (۵۸ درصد کمتر از کلزا)، جو با ۴۱/۸۵ واحد (۵۱ درصد کمتر از کلزا)، ذرت با ۲۹/۳۵ واحد (۶۶ درصد کمتر از کلزا)، سیب‌زمینی با ۶/۲۰ واحد (۹۳ درصد کمتر از کلزا)، گوجه‌فرنگی با ۵/۷۰ واحد (۹۳ درصد کمتر از کلزا)، پیاز با ۵/۶۵ واحد (۹۳ درصد کمتر از کلزا) و خیار با ۴/۰۹ واحد (۹۵ درصد کمتر از کلزا) قرار دارند. به عبارت دیگر، کشت یک واحد کلزا بیش از ۲۱ برابر خیار اثرات زیست‌محیطی منفی ایجاد می‌کند، درحالی‌که گندم و جو حدود نه برابر و ذرت حدود هفت برابر خیار بار دارند. این تفاوت چشمگیر عمدتاً ناشی از مصرف بالای کودهای نیتروژنی، سموم دفع آفات و سوخت ماشین‌آلات در محصولات دانه‌ای صنعتی است، درحالی‌که سبزیجات اغلب با دوره رشد کوتاه‌تر، برداشت دستی‌تر و نیاز کمتر به نهاده‌های شیمیایی کشت می‌شوند. برتری مطلق کلزا در امتیاز کلی تک‌نقطه‌ای نشان می‌دهد که تجمع اثرات نهاده‌های پرمصرف می‌تواند یک محصول را به نقطه داغ زیست‌محیطی تبدیل کند (Brenttrup et al., 2004; Nemecek et al., 2011). اختلاف بیش از ۲۰ برابری بین کلزا و محصولاتی مانند خیار و پیاز، صرفاً ناشی از تفاوت عملکرد یا زیست‌توده تولیدی نیست، بلکه نتیجه مصرف سنگین کودهای نیتروژنی و فسفات، سموم و سوخت‌های فسیلی است (Roy et al., 2009).

در دسته سلامت انسان، کلزا با ۶۵/۲۳ واحد پیش‌تاز است و پس از آن جو با ۳۰/۹۳ واحد (۵۳ درصد کمتر)، گندم با ۲۶/۹۵ واحد (۵۹ درصد کمتر)، ذرت با ۲۱/۹۷ واحد (۶۶ درصد کمتر)، سیب‌زمینی با ۵/۰۵ واحد (۹۲ درصد کمتر)، گوجه‌فرنگی با ۴/۳۴ واحد (۹۳ درصد کمتر)، پیاز با ۳/۱۰ واحد (۹۵ درصد کمتر) و خیار با ۳/۰۸ واحد (۹۵ درصد کمتر از کلزا) قرار دارند. کلزا بیش از ۲۱ برابر خیار و پیاز به سلامت انسان آسیب ایجاد می‌کند. این آسیب‌ها عمدتاً از انتشار ذرات معلق، آمونیاک، اکسیدهای نیتروژن و سموم ناشی از مصرف بالای کود و آفت‌کش به وجود می‌آیند که می‌توانند مشکلات تنفسی و سرطان‌زا ایجاد کنند. سبزیجات به‌دلیل مصرف کمتر این نهاده‌ها، تأثیر بسیار ناچیزی بر سلامت انسان دارند. تمرکز بالای آسیب به

بازنگری در اولویتهای الگوی کشت و مدیریت نهاده‌ها است. کاهش سهم محصولات پرنهاده مانند کلزا و غلات صنعتی، بهبود کارایی مصرف کود و سوخت، و گسترش کشت سبزیجات کم‌اثر می‌تواند نقش مهمی در کاهش بار زیست‌محیطی کشاورزی ایفا کند (Brenttrup et al., 2004; Roy et al., 2009; Nemecek & Kägi, 2007). LCA ابزار مؤثری برای شناسایی محصولات و نهاده‌های پرریسک و مبنای تصمیم‌گیری سیاست‌گذاران است (Goedkoop et al., 2013; Fantke & Joliet, 2016).

با توجه به نتایج LCA و بار زیست‌محیطی محصولات، اولویت کشت باید به محصولاتی با کمترین اثرات زیست‌محیطی اختصاص یابد. بنابراین، سبزیجاتی مانند خیار و پیاز و گیاهان غده‌ای مانند سیب‌زمینی که بار زیست‌محیطی بسیار پایین‌تری دارند، در اولویت کشت قرار گیرند. پس از آن می‌توان ذرت و غلات پرمصرف مانند گندم و جو را کشت کرد، و کلزا به دلیل بالاترین بار زیست‌محیطی، بهتر است در آخر و با مدیریت دقیق نهاده‌ها و منابع آبی کشت شود تا فشار بر بوم‌نظام و منابع محدود منطقه کاهش یابد.

منابع نشان‌دهنده وابستگی شدید این سیستم‌ها به انرژی‌های فسیلی و منابع تجدیدناپذیر است (Cherubini et al., 2009; Snyder et al., 2014). مصرف بالای گازوئیل در عملیات مکانیزه و انرژی نهفته در تولید کودهای شیمیایی به‌ویژه کود ازت، نقش اصلی را ایفا می‌کند. حتی اختلاف‌های نسبتاً کوچک در مقادیر مصرف سوخت، در مقیاس وسیع سطح زیرکشت، به تخلیه قابل توجه منابع منجر می‌شود (Roy et al., 2009). برای کاهش این اثرات، استفاده از کوددهی دقیق و هوشمند، جایگزینی بخشی از کودهای شیمیایی با کودهای اکولوژیک، اجرای تناوب زراعی مناسب، و گسترش کشت گلخانه‌ای کارآمد برای سبزیجات توصیه می‌شود. در غلات نیز مدیریت دقیق‌تر نهاده‌ها و کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی می‌تواند بار زیست‌محیطی را به‌طور قابل توجهی کاهش دهد. در نهایت، اگر هدف حرکت به سمت کشاورزی پایدارتر باشد، اولویت دادن به کشت سبزیجاتی مانند خیار و پیاز (که ۹۳ تا ۹۵ درصد بار کمتری دارند) و بهبود مدیریت در غلات و محصولات روغن‌دار، منطقی‌ترین راهکار به نظر می‌رسد. نتایج مقایسه‌ای نشان می‌دهد که حرکت به سمت کشاورزی پایدار مستلزم



شکل ۷- اثرات نهایی زیست‌محیطی کشت محصولات مختلف در منطقه جیرفت در سه گروه تأثیر سلامت انسان، بوم‌نظام و منابع

Fig. 7- Final environmental effects of cultivating different crops in jiroft region in three groups of human health, ecosystem and resources

می‌کنند. در مقابل، محصولات با بار زیست‌محیطی پایین‌تر مانند سبزیجات و گیاهان غده‌ای، ردپای آب کمی دارند و منابع آب را کمتر تخلیه می‌کنند. بنابراین، مدیریت کشت براساس LCA هم‌زمان می‌تواند بهینه‌سازی مصرف آب و کاهش اثرات محیط‌زیستی را

با توجه به نتایج، ردپای آب و ارزیابی چرخه حیات (LCA) نتایج هم‌سو و مکملی را نشان می‌دهند. محصولاتی که بار زیست‌محیطی بالاتری در LCA داشتند، مانند کلزا و غلات، هم بیشترین مصرف آب آبی و خاک‌ستری را دارند و هم فشار بیشتری بر منابع آب منطقه وارد

تضمین کند.

نتیجه‌گیری

نتایج این مطالعه نشان داد که اثرات زیست‌محیطی و مصرف آب در محصولات کشاورزی تحت تأثیر مستقیم نوع محصول، سطح زیرکشت و شدت استفاده از نهاده‌های کشاورزی قرار دارند. محصولات دانه‌ای و روغن‌دار مانند کلزا، گندم، جو و ذرت به دلیل مصرف بالای کودهای نیتروژنی و فسفات، سموم دفع آفات و سوخت‌های فسیلی ما به‌ازای تولید یک تن محصول، بیشترین بار زیست‌محیطی را در تمامی دسته‌های LCA شامل سلامت انسان، بوم‌نظام و تخلیه منابع نشان دادند. این محصولات همچنین بیشترین ردپای آب آبی و خاکستری را دارند که نشان‌دهنده فشار بالا بر منابع آب زیرزمینی و سطحی منطقه است. در مقابل، سبزیجات و گیاهان غده‌ای مانند خیار، پیاز و سیب‌زمینی هم بار زیست‌محیطی و هم ردپای آب بسیار پایین‌تری دارند، که به دلیل نیاز کمتر به نهاده‌های شیمیایی، دوره رشد کوتاه‌تر و برداشت دستی‌تر است. مقایسه نتایج LCA و ردپای آب نشان داد که هر دو شاخص هم‌سو بوده و می‌توانند به عنوان ابزارهای مکمل برای

شناسایی محصولات پرمصرف و پرریسک و مدیریت بهینه منابع آب و کاهش اثرات زیست‌محیطی مورد استفاده قرار گیرند. براساس این یافته‌ها، پیشنهاد می‌شود که اولویت کشت به محصولات کم‌اثر مانند سبزیجات و گیاهان غده‌ای داده شود و غلات و محصولات پرنهاده مانند کلزا با مدیریت دقیق نهاده‌ها و منابع آبی کشت شوند. همچنین به‌کارگیری روش‌های کشاورزی هوشمند شامل کوددهی بهینه، جایگزینی بخشی از کودهای شیمیایی با کودهای اکولوژیک، تناوب زراعی مناسب و افزایش بهره‌وری آبیاری، می‌تواند بار زیست‌محیطی و مصرف آب را به‌طور قابل توجهی کاهش دهد. این نتایج اهمیت برنامه‌ریزی هوشمند کشاورزی و اتخاذ سیاست‌های پایدار را در مناطق کم‌آب و کویری تأکید می‌کنند و می‌توانند راهنمای تصمیم‌گیری کشاورزان و سیاست‌گذاران برای حرکت به سمت کشاورزی پایدارتر و کم‌اثر بر محیط زیست باشند.

سپاسگزاری

این پژوهش با حمایت مالی دانشگاه زابل انجام شده است. کد پژوهانه IR-UOZ-GR-1837

References

1. Aligholnia, T., Rezaie, H., Bahmanesh, J., & Montaseri, M. (2015). Sustainable management of water resources to maximize water extraction using the water footprint approach. MSc. Thesis, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran. (In Persian).
2. Bouwman, A. F., Beusen, A. H. W., & Billen, G. (2013). Human alteration of the global nitrogen cycle and its environmental consequences. *Global Biogeochemical Cycles*, 27, 1-17. <https://doi.org/10.1002/gbc.20026>
3. Bouwman, A. F., Beusen, A. H. W., & Billen, G. (2013). Human alteration of the global nitrogen and phosphorus cycles. *Global Biogeochemical Cycles*, 27, 1-17. <https://doi.org/10.1002/gbc.20026>
4. Brentrup, F., Küsters, J., Lammel, J., & Kuhlmann, H. (2004). Environmental impact assessment of agricultural production systems using the life cycle assessment methodology. *European Journal of Agronomy*, 20, 247-264. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(03\)00024-8](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(03)00024-8)
5. Bylin, C., Misra, R., Murch, M., & Riegerink, W. (2004). Sustainable agriculture: Development of an on-farm assessment tool. MSc. Thesis, University of Michigan, Michigan, USA.
6. Cellura, M., Longo, S., & Mistretta, M. (2012). Life cycle assessment of energy and environmental impacts of cereal production in Italy. *Journal of Cleaner Production*, 28, 89-99. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.10.019>
7. Chapagain, A. K., Hoekstra, A. Y., Savenije, H. H. G., & Gautam, R. (2006). The water footprint of cotton consumption: An assessment of the impact of worldwide consumption of cotton products on the water resources in the cotton producing countries. *Ecological Economics*, 60, 186-203. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2005.11.027>
8. Cherubini, F., Bird, N. D., Cowie, A., Jungmeier, G., Schlamadinger, B., & Woess-Gallasch, S. (2009). Energy- and greenhouse gas-based LCA of bioenergy systems. *Bioresource Technology*, 100, 465-473. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.05.031>
9. Durlinger, B., Smeets, E., & van der Sluis, S. (2015). Agri-footprint methodology report. Blonk Consultants, Gouda, The Netherlands.

10. Fantke, P., & Jolliet, O. (2016). Life cycle human health impacts of pesticide exposure. *Environment International*, 94, 422-438. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.06.003>
11. FAO. (2017). Water for sustainable food and agriculture. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.
12. Georgiopoulou, E., & Lyberatos, G. (2018). Life cycle assessment of the use of alternative fuels in cement kilns: A review. *Journal of Environmental Management*, 216, 224-234. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.07.059>
13. Gleeson, T., Wada, Y., Bierkens, M. F. P., & van Beek, L. P. H. (2012). Water balance of global aquifers revealed by groundwater footprint. *Nature*, 488, 197-200. <https://doi.org/10.1038/nature11295>
14. Goedkoop, M., Heijungs, R., Huijbregts, M., De Schryver, A., Struijs, J., & van Zelm, R. (2013). ReCiPe 2016 – A harmonised life cycle impact assessment method: Report I: Characterisation.
15. Guinée, J. B. (Ed.). (2002). Handbook on Life Cycle Assessment: Operational Guide to the ISO Standards. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
16. Guinée, J. B., Heijungs, R., Huppes, G., Zamagni, A., Masoni, P., Buonamici, R., Ekvall, T., & Rydberg, T. (2011). Life cycle assessment: Past, present, and future. *Environmental Science & Technology*, 45(1), 90-96.
17. Hoekstra, A. Y., & Chapagain, A. K. (2008). Globalization of Water: Sharing the Planet's Freshwater Resources. Blackwell, Oxford, UK.
18. Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Aldaya, M. M., & Mekonnen, M. M. (2011). The water footprint assessment manual: Setting the global standard. Earthscan, London, UK.
19. Huijbregts, M. A. J., Steinmann, Z. J. N., Elshout, P. M. F., Stam, G., Verones, F., Vieira, M., Zijp, M., Hollander, A., & van Zelm, R. (2017). ReCiPe2016: A harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 22, 138-147. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1246-y>
20. ISO. (2006). ISO 14040: Environmental management—Life cycle assessment—Principles and framework. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
21. Khoshnevisan, B., Rafiee, S., Omid, M., & Mousazadeh, H. (2014). Environmental impact assessment of wheat production using life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 73, 20-27. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.12.029>
22. Lal, R. (2015). Restoring soil quality to mitigate soil degradation. *Sustainability*, 7, 5875-5895. <https://doi.org/10.3390/su7055875>
23. Leip, A., et al. (2015). Impacts of nitrogen use in agriculture on the environment. *Environmental Research Letters*, 10, 115004. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/11/115004>
24. Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2011). The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(5), 1577-1600. [doi:10.5194/hess-15-1577-2011](https://doi.org/10.5194/hess-15-1577-2011)
25. Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2014). Water footprint benchmarks for crop production: A first global assessment. *Ecological Indicators*, 46, 214-223. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.06.013>
26. Mousavi-Avval, S. H., Rafiee, S., Jafari, A., & Mohammadi, A. (2017). Life cycle assessment and optimization of energy consumption in oilseed production systems. *Journal of Cleaner Production*, 142, 449-460. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.111>
27. Nabavi-Pelesaraei, A., Rafiee, S., Mohtasebi, S. S., Hosseinzadeh-Bandbafha, H., & Chau, K. W. (2017). Energy consumption enhancement and environmental life cycle assessment in paddy production using optimization techniques. *Journal of Cleaner Production*, 162, 571-586. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.071>
28. Nemecek, T., & Kägi, T. (2007). Life cycle inventories of agricultural production systems. Ecoinvent Report No. 15, Swiss Centre for Life Cycle Inventories.
29. Nemecek, T., Dubois, D., Huguenin-Elie, O., & Gaillard, G. (2011). Life cycle assessment of Swiss farming systems: I. Integrated and organic farming. *Agricultural Systems*, 104, 217-232. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2010.10.002>
30. Notarnicola, B., Tassielli, G., Renzulli, P. A., Castellani, V., & Sala, S. (2017). Environmental impacts of food consumption in Europe. *Journal of Cleaner Production*, 140, 753-765. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.080>
31. Payen, S., Barles, S., & Cellura, M. (2015). Life cycle assessment of eutrophication impacts of agriculture. *Environmental Science & Technology*, 49, 11554-11562. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b02393>

32. Pennington, D. W., Potting, J., Finnveden, G., Lindeijer, E., Joliet, O., Rydberg, T., & Rebitzer, G. (2004). Life cycle assessment part 2: Current impact assessment practice. *Environment International*, 30, 721-739.
33. Pré Sustainability. (2018). SimaPro LCA software (Version 10.2). Pré Sustainability, Amersfoort, The Netherlands. Website: <https://pre-sustainability.com/simapro/>
34. Piri, H., & Mobaraki, M. (2021). Investigating water footprints and water consumption efficiency of potato, sugar beet, tomato and forage corn crops in different climates of Iran. *Journal of Water and Soil Conservation*, 27(6), 103-120. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22069/jwsc.2021.18398.3399>
35. Piri, H., & Sarani, R. (2020). Investigation of economic productivity of crop products in Sistan and Baluchestan province using the water footprint approach. *Iranian Soil and Water Research*, 51(5), 1093-1104. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/ijswr.2020.289567.668325>
36. Rebitzer, G., Ekvall, T., Frischknecht, R., Hunkeler, D., Norris, G., Rydberg, T., Schmidt, W.-P., Suh, S., Weidema, B. P., & Pennington, D. W. (2004). Life cycle assessment: Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications. *Environment International*, 30(5), 701-720. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2003.11.005>
37. Ridoutt, B. G., & Pfister, S. (2010). A revised approach to water footprinting to make transparent the impacts of consumption and production on global freshwater scarcity. *Global Environmental Change*, 20(1), 113-120. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2009.08.003>
38. Roholamini, N., Bazrafshan, O., & Nafarzadefan, A. (2025). Optimizing the cultivation area of agricultural products based on the water footprint framework (case study: Minab County). *Irrigation Sciences and Engineering*, 48(2), 49-64. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22055/jise.2024.45065.2098>
39. Roy, P., Nei, D., Orikasa, T., Xu, Q., Okadome, H., Nakamura, N., & Shiina, T. (2009). Life cycle assessment of agricultural products: A review. *Journal of Cleaner Production*, 17, 747-762. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2008.12.016>
40. Snyder, C. S., Bruulsema, T. W., Jensen, T. L., & Fixen, P. E. (2014). Review of greenhouse gas emissions from crop production systems and fertilizer management effects. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 133, 247-266. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2009.04.021>
41. Thompson, M., Ellis, R., & Wildavsky, A. (1990). Cultural Theory. Boulder, CO: Westview Press.
42. Xu, X., Lan, Y., Ren, C., & Wang, Z. (2019). Life cycle assessment of agricultural production systems: A case study of major crops. *Science of the Total Environment*, 682, 91-102.
43. U.S. Life Cycle Inventory Database (U.S. LCI). (2015). National Renewable Energy Laboratory (NREL), U.S. Department of Energy. Available at: <https://www.nrel.gov/lci/>
44. Yahyazadeh, M., Bazrafshan, O., & Esmaeilpour, Y. (2021). Assessing spatio-temporal changes of ecological water footprint and economic value of water in tomato production in Iran. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 14(6), 2047-2059. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/20.1001.1.20087942.2021.14.6.6.7>
45. Yousefi, H., Mohammadi, A., Nourollahi, Y., & Sadatinejad, J. (2016). Evaluation of water footprint index of crops in Tehran province. *Soil Conservation*, 24(6), 67-85. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22069/jwsc.2017.13718.2842>
46. Zhang, Y., Huang, G., Wang, L., & Zhang, X. (2018). Integrating water footprint and life cycle assessment for sustainable agricultural production. *Agricultural Systems*, 162, 11-21.