

کاربرد شاخص بهره‌وری انرژی در سیاست‌گذاری داده‌محور و انتقال نوآوری در کشاورزی: بررسی موردی گندم در سامانه‌های خاک‌ورزی البرز^۱

عادل طاهری حاجی‌وند^۲ و مهسا عباسی^۳

چکیده

افزایش نگرانی‌ها پیرامون بحران منابع پایه، کاهش بهره‌وری نهاده‌ها و پیامدهای محیط‌زیستی، لزوم بازنگری در نظام‌های تولید گندم ایران را دو چندان کرده است. پژوهش حاضر با هدف ارزیابی تطبیقی شاخص بهره‌وری انرژی بین دو سامانه خاک‌ورزی مرسوم و حفاظتی در کشتزارهای گندم استان البرز و کاربرد آن در سیاست‌گذاری انجام شد. این کار، بر پایه رویکرد داده‌برداری میدانی با مقایسه شاخص‌های انرژی و ارزیابی چرخه زندگی^۴ انجام شد. داده‌ها با استفاده از نرم‌افزارهای Excel 2021 و IBM SPSS Statistics 26 و برای ارزیابی چرخه زندگی نرم‌افزار SimaPro v9.0 با روش IMPACT 2002+ و اکاوی شدند. نتایج نشان دادند که کاهش مصرف کود نیتروژن (۳۸/۷٪) و سوخت دیزل (۲۵٪) بیشترین سهم را در کاهش بار محیط‌زیستی دارند. شاخص بهره‌وری انرژی از ۱/۲۳ به ۱/۳۷ و شدت مصرف انرژی از ۲۲/۱۸ به ۱۹/۹۴ مگاژول بر کیلوگرم گندم تغییر کرد. همچنین، شاخص‌های ارزیابی چرخه زندگی کاهش انتشار دی‌اکسیدکربن معادل ۲٪، تأثیر بر سلامت انسان ۲۳٪ و بوم‌نظام ۱۹٪ را نشان دادند. بنابراین توسعه با بهره‌گیری از شاخص‌های انرژی بر پایه پایش داده‌ها، همراه با آموزش هدفمند و آسان‌سازی دسترسی به فناوری‌های کشاورزی حفاظتی، می‌تواند دوره گذار به کشاورزی پایدار و تاب‌آور را در ایران شتاب بخشد و به‌عنوان راهبردی عملی در تصمیم‌سازی سیاست‌گذاران بخش کشاورزی مورد توجه قرارگیرد.

واژه‌های کلیدی: ارزیابی چرخه زندگی، بهره‌وری انرژی، خاک‌ورزی حفاظتی، سیاست‌گذاری، کشاورزی هوشمند، گندم.

مقدمه

گندم در سبد امنیت غذایی ایران نه تنها به‌عنوان محصولی با بیشترین سطح زیرکشت، بلکه به‌عنوان پایه اصلی پایداری معیشت خانوارهای روستایی و تضمین استقلال غذایی است. بر اساس آمار فائو (۲۰۲۳) و وزارت جهاد کشاورزی،

۱- تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۴/۳۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۳

۲- پست الکترونیک نویسنده مسئول: a.taheri@tabrizu.ac.ir

۳- به ترتیب، استادیار و دانش‌آموخته کارشناسی ارشد دانشگاه تبریز، تبریز.

4. Life cycle assessment (LCA)

سطح زیر کشت گندم ایران سالانه بیش از هشت میلیون هکتار است و میانگین تولید سالانه این محصول نیز در سال‌های گذشته در حدود ۱۱ میلیون تن برآورد می‌شود. فراهم آوردن چنین حجم زیادی از تولید، نقشی بنیادین در پایداری اجتماعی، اقتصادی و امنیت غذایی همه منطقه‌های کشور دارد و موجب شده سیاست‌گذاری و مدیریت آن همواره در اولویت ملی قرار گیرد (Ministry of Jihad Agriculture, Alborz, 2021; FAO, 2023).

با این حال، پایداری تولید گندم در دهه گذشته با فشارهای زیادی روبه‌رو شده است. بحران منابع آب و کاهش بارندگی‌ها، فرسایش و کاهش حاصلخیزی زمین‌ها، وابستگی سامانه تولید به نهاده‌های شیمیایی پرانرژی (به‌ویژه کودهای نیتروژن‌دار و سوخت‌های فسیلی)، افزایش هزینه‌های تولید و شدت گرفتن رقابت جهانی، چالش‌هایی است که چشم‌انداز تولید گندم را با تهدیدهای جدی روبه‌رو می‌کند (Statistical Center of Iran, 2023; Bakhshi *et al.*, 2024; Kumar *et al.*, 2024). حتی در شرایطی که سیاست خودکفایی در دستور کار قرار دارد، ادامه تکیه بر روش‌های مرسوم خاک‌ورزی و مدیریت سنتی نهاده‌ها، آسیب‌پذیری بوم‌نظام‌های زراعی را افزایش می‌دهد، فشار بر منابع آب و خاک را دوچندان و موجب افزایش انتشار آلاینده‌ها و گازهای گلخانه‌ای می‌شود (Houshyar & Grundmann, 2017; Abbasi, 2022).

بررسی‌های ملی و فراملی نشان می‌دهند که بخش زیادی از انرژی مصرفی در کشاورزی ایران به تولید و مصرف کود نیتروژن و عملیات مکانیزه اختصاص دارد و نرخ مصرف انرژی در کشت گندم کشور به طور چشمگیری بیشتر از میانگین جهانی است (Nobavi-Pelleh Serai *et al.*, 2018; Boschiero *et al.*, 2023). این موضوع افزون بر افزایش هزینه تولید، بهره‌وری اقتصادی و پایداری زیستی را اندک و نظام تولید را به الگوی انرژی‌بر و کم‌بازده تبدیل کرده است. این وضعیت با تشدید تأثیر تغییر اقلیم، اثرهای منفی بیشتری بر امنیت غذایی، معیشت روستایی و مدیریت منابع بوم‌شناختی کشور می‌گذارد.

بررسی‌های گذشته بیانگر این است که دگرگونی اساسی در پایداری کشاورزی به اصلاح مدیریت مصرف نهاده‌ها و بازنگری در شیوه‌های خاک‌ورزی وابسته است (Lal, 2015; Kassam *et al.*, 2021; Pishgar-Komleh *et al.*, 2021). خاک‌ورزی حفاظتی به‌عنوان یکی از محورهای نوآورانه در کشاورزی پایدار با حذف شخم ژرف، حفظ پسماندهای گیاهی و کاهش رفت و آمد ماشین، نه تنها کیفیت و ساختار خاک را بهبود می‌بخشد، بلکه مصرف انرژی، سوخت و نهاده‌های پرهزینه را به‌طور چشمگیری کاهش و بهره‌وری اقتصادی را افزایش می‌دهد (Bakhshi *et al.*, 2024; Noč *et al.*, 2025). پژوهش‌ها نشان داده‌اند که این سامانه‌ها افزون بر صرفه‌جویی در مصرف منابع، پیامدهای منفی انتشار آلاینده‌ها و تخریب بوم‌نظام را کاهش می‌دهند (Boschiero *et al.*, 2023).

در کنار دگرگونی‌های فنی، ابزارهای ارزیابی جامع مانند ارزیابی انرژی و ارزیابی چرخه زندگی نیز در دهه گذشته به عنوان ابزارهای کلیدی در سیاست‌گذاری بر پایه داده و تصمیم‌گیری مدیریتی مورد توجه قرار گرفته‌اند (Anonymous, 2006; Goula *et al.*, 2023; Aminifard *et al.*, 2024). این واکاوی‌ها امکان مقایسه کمی و کیفی انواع سامانه‌های کشت را از دید شاخص‌های انرژی، مصرف منابع و پیامدهای زیست‌محیطی فراهم آورده و زمینه‌ساز شناسایی گلوگاه‌ها و تدوین سیاست‌های بهینه در سطح ملی و منطقه‌ای شده‌اند.

در ایران، بیشتر پژوهش‌ها تنها به بررسی انرژی نهاده‌ها یا شاخص‌های اقتصادی نظام‌های کشت مرسوم پرداخته‌اند (Pishgar-Komleh *et al.*, 2021; Bakhshi *et al.*, 2024). در حالی که در بررسی‌های بین‌المللی (González *et al.*, 2019a,b; Zhao *et al.*, 2021a,b) از تلفیق واکاوی انرژی و چرخه زندگی برای ارزیابی جامع اثرهای

کاربرد شاخص بهره‌وری انرژی در سیاست‌گذاری داده‌محور و انتقال نوآوری در کشاورزی: بررسی موردی گندم در سامانه‌های خاک‌ورزی البرز محیط‌زیستی استفاده شده است. پژوهش حاضر این خلأ را با ترکیب داده‌های کشتزاری و مدل IMPACT 2002+ نرم‌افزار SimaPro v9.0 برطرف کرده و نخستین گام را در هم‌ترازی یافته‌های ایران با بررسی‌های جهانی برداشته است. باتوجه به جایگاه پژوهشی، آموزشی و سیاست‌گذاری استان البرز در تولید گندم ایران و آسیب‌پذیری شدید آن نسبت به بحران‌های طبیعی، پیاده‌سازی رویکردهای علمی و نوین مدیریت نهاده‌ها و بهبود بهره‌وری انرژی در این منطقه الزامی است. با توجه به همسانی شرایط اقلیمی و زراعی، نتایج این مدل را می‌توان به دیگر منطقه‌های نیمه‌خشک ایران، از جمله استان‌های همدان، قزوین و بخش‌هایی از آذربایجان شرقی گسترش داد. البته، در ناحیه‌های خشک‌تر کشور مانند منطقه‌های مرکزی و جنوبی، لازم است ضریب‌های مربوط به مصرف کود نیتروژن و سوخت دیزلی متناسب با شرایط اقلیمی بازتنظیم شوند.

پژوهش حاضر، با واکاوی تطبیقی شاخص بهره‌وری انرژی در دو سامانه خاک‌ورزی مرسوم و حفاظتی گندم در استان البرز، تلاش دارد ضمن بیان ظرفیت این شاخص برای سیاست‌گذاری بر پایه داده‌ها، آموزش کشاورزان و توسعه نوآوری مدیریتی، الگویی عملی برای گذار از کشاورزی سنتی به کشاورزی پایدار، هوشمند و آینده‌نگر معرفی کند. در این راستا، نتایج پژوهش حاضر می‌تواند زمینه‌ساز به کارگیری شاخص‌های انرژی در فرایند سیاست‌گذاری داده‌محور و برنامه‌های افزایش فناوری و آموزش کشاورزی کشور باشد.

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر، با رویکرد میدانی و واکاوی، به منظور مقایسه شاخص بهره‌وری انرژی در دو سامانه خاک‌ورزی مرسوم و حفاظتی در کشتزارهای گندم آبی استان البرز در سال ۱۴۰۲ انجام شد. استان البرز با اقلیم نیمه‌خشک، میانگین بارش ۲۵۰ میلی‌متر و خاک غالب رسی-لومی، از منطقه‌های کلیدی تولید گندم ایران است (Statistical Center of Iran, 2020). همه نمونه‌برداری‌ها در کشتزارهای گندم آبی با شرایط همسان اقلیمی انجام شد تا یکسانی داده‌ها حفظ شود. در ادامه، دو سامانه اصلی خاک‌ورزی این‌گونه تعریف می‌شوند، نخست خاک‌ورزی مرسوم که عبارت است از شخم ژرف، دیسک چندمرحله‌ای، آمیختن پسماند و رفت و آمد زیاد ماشین‌ها و مصرف زیاد نهاده‌های شیمیایی و همچنین خاک‌ورزی حفاظتی یعنی حذف شخم ژرف، حفظ پسماندهای گیاهی روی سطح خاک، کاهش رفت و آمد و عملیات ماشینی و مدیریت بهینه نهاده‌ها.

نمونه‌گیری و جمع‌آوری داده‌ها با استفاده از پیمایش میدانی، پرسشنامه، مصاحبه حضوری با کشاورزان، بازدیدهای میدانی و بهره‌گیری از منابع آماری معتبر انجام شد. نمونه‌گیری به‌صورت تصادفی طبقه‌بندی‌شده در ۴۰ کشتزار (۲۰ مورد مرسوم و ۲۰ مورد حفاظتی) صورت گرفت (Aminifard et al., 2024). در هر کشتزار، داده‌های مربوط به بذر، انواع کود، سم‌های شیمیایی، سوخت دیزل، برق مصرفی، آبیاری، شمار عملیات مکانیزه، نیروی کار انسانی و خروجی‌ها (عملکرد محصول و پسماند) به‌طور کامل ثبت و کنترل شد. به‌دلیل محدودیت حجم مقاله، از ارائه جدول‌های تفصیلی داده‌های خام در بخش نتایج پرهیز شده است. با این حال، تمامی شاخص‌های انرژی و زیست‌محیطی گزارش‌شده به‌طور مستقیم بر اساس همین داده‌های اولیه میدانی محاسبه شده‌اند. ضریب‌های استاندارد انرژی نهاده‌ها از منابع معتبر (Pishgar-Komleh et al., 2012; Azizi et al., 2015) و روش Kitani (1999) برای برآورد انرژی ماشین‌آلات به‌کار گرفته شد. در نهایت، انرژی ورودی و خروجی به‌صورت مگاژول بر هکتار محاسبه و واکاوی شد.

مهمترین شاخص‌های انرژی مورد نظر در پژوهش حاضر عبارتند از بهره‌وری انرژی (کیلوگرم محصول/مگاژول مصرفی)، کارایی انرژی و نسبت خروجی/ورودی، شدت مصرف انرژی (مگاژول بر کیلوگرم محصول) و در پایان سهم انرژی تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر برای هر سامانه. چکیده‌ای از داده‌ها و آزمون آماری برای مقایسه سامانه‌ها به کار رفت و برای تفسیر سیاستی و واکاوی روایتی، با سیاست‌های ملی کشاورزی کشور مقایسه شد (Karimi et al., 2024). داده‌های میدانی پس از کنترل کیفی و طبقه‌بندی در نرم‌افزار SPSS v26 و Excel 2021 واکاوی شدند. برای مقایسه میانگین شاخص‌های بهره‌وری انرژی، کارایی و شدت مصرف انرژی بین دو سامانه خاک‌ورزی (مرسوم و حفاظتی)، از آزمون مستقل t-Student استفاده شد. از آزمون ANOVA یک‌طرفه برای مقایسه بیش از دو گروه نهاده (مانند انواع کودها و سوخت‌ها) در سطح احتمال آماری ۵٪ بهره‌گیری شد. شاخص‌های کلیدی این پژوهش شامل بهره‌وری انرژی و شدت مصرف انرژی بر اساس استاندارد (1999) Kitani تعریف شدند (رابطه ۱). به بیان دیگر، بهره‌وری انرژی نشانگر مقدار محصول تولیدشده در هر واحد انرژی مصرفی است، در حالی که شدت مصرف انرژی بیانگر مقدار انرژی مورد نیاز برای تولید یک واحد محصول می‌باشد.

$$EP = Y / Ein$$

$$EI = Ein / Y$$

$$ENE = Eout - Ein$$

رابطه ۱

EP بهره‌وری انرژی، IE شدت مصرف انرژی، ENE انرژی خالص بوده و Y عملکرد محصول (کیلوگرم در هکتار). Ein کل انرژی ورودی (مگاژول در هکتار). Eout انرژی خروجی (مگاژول در هکتار) است. افزون بر شاخص‌های انرژی، شاخص‌های محیط‌زیستی شامل تأثیر گرمایش جهانی^۱، سلامت انسان (سال‌های تعدیل‌شده بر حسب ناتوانی)^۲ و کیفیت بوم‌نظام (کسری بالقوه ناپدیدشده گونه‌ها)^۳ و شاخص‌های اقتصادی شامل بهره‌وری اقتصادی^۴، هزینه انرژی^۵ و سود خالص^۶ برای مقایسه سامانه‌ها محاسبه شدند. در جمع‌آوری داده‌ها، محدودیت‌هایی از جمله تفاوت‌های خرداقلیمی کشتزار، دقت نسبی داده‌های خود اظهاری کشاورزان و محدودیت در اطلاعات دقیق برخی از ماشین‌ها وجود داشت. این محدودیت‌ها در تفسیر نتایج مورد توجه قرار گرفته‌اند.

نتایج

برای آسانی درک داده‌های کلیدی، جدول‌های ۱ تا ۳ چکیده‌ای از شاخصه‌های اصلی نتایج را نشان می‌دهند. این جدول‌ها به ترتیب، مصرف انرژی نهاده‌ها، شاخص‌های بهره‌وری انرژی و شاخص‌های محیط‌زیستی را بین دو سامانه خاک‌ورزی مقایسه می‌کنند.

1. Global warming potential (GWP)

2. Disability adjusted life years (DALY)

3. Potentially disappeared fraction of species (PDF·m²·yr)

4. Economic food production (EFP)

5. Energy cost (EC)

6. Gross profit (GP)

جدول ۱ - مصرف انرژی و نهاده‌ها در دو سامانه خاک‌ورزی گندم (مگاژول در هکتار).

نوع نهاده	سامانه مرسوم	سامانه حفاظتی	درصد تغییر
ماشین‌آلات	۲۴۶۲۵	۴۶۲۳	-۸۱
سوخت دیزل	۹۶۵۰	۲۴۵۰	-۷۵
کود نیتروژن	۱۴۶۱۴	۶۶۹۶	-۵۴
کود فسفات	۱۳۱۱	۶۲۲	-۵۲
کود پتاسیم	۹۰۴	۳۶۵	-۶۰
برق	۴۵۴۱	۲۴۸۰	-۴۵
جمع کل	۵۵۶۴۵	۱۷۲۳۶	-۶۹

نتایج حاصل از پژوهش حاضر در چهار مورد ارائه می‌گردد:

الف- مصرف نهاده‌ها و ساختار انرژی- مصرف انرژی کل در خاک‌ورزی حفاظتی تا بیش از ۵۰٪ نسبت به خاک‌ورزی مرسوم کاهش یافت. مهمترین دلایل‌های این کاهش، صرفه‌جویی معنی‌دار در مصرف سوخت دیزل، کود نیتروژن، ماشین‌ها و برق بود. سهم بذر و انرژی‌های تجدیدپذیر نیز در سامانه حفاظتی افزایش یافت.

جدول ۲ - شاخص‌های بهره‌وری و کارایی انرژی در دو سامانه.

شاخص	سامانه مرسوم	سامانه حفاظتی	درصد تغییر
انرژی ورودی (مگاژول بر هکتار)	۵۵۶۴۵	۱۷۲۳۶	-۶۹
انرژی خروجی (مگاژول بر هکتار)	۵۲۲۲۸	۵۰۹۶۳	-۲
نسبت خروجی/ورودی	۰/۹۴	۲/۹۶	+۲۱۵
بهره‌وری انرژی (کیلوگرم بر مگاژول)	۰/۵۱	۰/۷۵	+۴۷
شدت مصرف انرژی (مگاژول بر کیلوگرم)	۱/۹۵	۱/۰۲	+۴۸

ب- شاخص‌های بهره‌وری و کارایی انرژی- بهره‌وری انرژی در خاک‌ورزی حفاظتی، با افزایش ۴۷٪، بیشتر بود. یعنی برای هر واحد انرژی مصرفی، محصول بیشتری برداشت شد. همچنین، نسبت انرژی خروجی/ورودی و کارایی مصرف انرژی در خاک‌ورزی حفاظتی به تقریب دو برابر سامانه مرسوم شد. از سوی دیگر، شدت مصرف انرژی (انرژی ورودی در هر کیلوگرم محصول) تا نصف کاهش یافت.

پ- ساختار انرژی تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر- در سامانه حفاظتی، سهم انرژی تجدیدپذیر (مانند بذر و نیروی انسانی) افزایش یافته و در مقابل، سهم انرژی تجدیدناپذیر (سوخت، کود شیمیایی و ماشین‌ها) کاهش یافت و این تغییر ساختار، پایداری محیط‌زیستی و کاهش وابستگی به منابع آسیب‌زا را به همراه داشته است.

جدول ۳ - شاخص‌های محیط‌زیستی (روش + IMPACT 2002).

شاخص اثر محیط‌زیستی	سامانه مرسوم	سامانه حفاظتی	درصد تغییر
انتشار دی‌اکسید کربن معادل (کیلوگرم بر هکتار)	۹۰۰	۸۸۲/۵	-۲
آسیب به سلامت انسان (سال‌های تعدیل‌شده بر حسب ناتوانی $\times 10^{-3}$)	۰/۰۴۳	۰/۰۳۳	-۲۳
تخریب بوم‌نظام (کسری بالقوه ناپدید شده گونه‌ها $\times 10^3$ مترمربع در سال)	۲۲۴	۱۸۲	-۱۹
کاهش منابع طبیعی (مگاژول انرژی اولیه)	۵۲۳۰	۳۲۹۱	-۳۷

ت- **پیامدهای محیط‌زیستی و اقتصادی** - ارزیابی چرخه زندگی با استفاده از نرم‌افزار SimaPro v9.0 و روش IMPACT 2002+ (v2.15) نشان داد که کود نیتروژن (۳۸/۷٪)، کود فسفات (۲۰/۷٪) و سوخت دیزل (۱۳٪) بیشترین سهم را در بار محیط‌زیستی سامانه مرسوم داشتند. در سامانه حفاظتی با کاهش مصرف این نهاده‌ها، شاخص‌های گرمایش جهانی، تخریب بوم‌نظام و آسیب به سلامت انسان، به‌طور محسوسی کاهش یافت. البته، کاهش جزئی عملکرد در سامانه حفاظتی مشاهده شد که می‌تواند با آموزش و بهبود فن کاشت، مدیریت شود.

بحث

با توجه به نتایج به‌دست آمده سه مطلب زیر قابل بحث و ارائه هستند:

الف- جایگاه شاخص بهره‌وری انرژی

استفاده سیاست‌گذاران، مدیران و کشاورزان از شاخص بهره‌وری انرژی، می‌تواند ابزار ارزیابی و مبنای تصمیم‌گیری برای افزایش مدیریت کشتزار باشد. به ویژه در شرایط حاضر و با بحران منابع، این رویکرد داده‌محور، ارزیابی واقع‌بینانه و سیاست‌گذاری بر پایه داده‌ها را برای سطح‌های مختلف کشور آسان می‌سازد. نتایج حاصل از این پژوهش، از نظر کاهش مصرف انرژی نهاده‌ها و بهبود بهره‌وری، با یافته‌های بین‌المللی قابل مقایسه است. به ویژه، González *et al.* (2019a,b) در سامانه‌های خاک‌ورزی حفاظتی گندم در اسپانیا، کاهش تقریبی ۶۵٪ در مصرف سوخت فسیلی و ۵۰٪ در کل انرژی ورودی را گزارش کردند. Zhao *et al.* (2021a,b) در چین نیز کاهش میانگین ۵۵٪ انرژی نهاده‌ها را در شرایط نیمه‌خشک و افزایش نسبت خروجی/ورودی تا حدود ۲/۸ به دست آوردند. بررسی Singh *et al.* (2020) در شمال هند نیز الگوی همسانی از صرفه‌جویی ۴۵٪ در انرژی و بهبود ۴۰٪ در بهره‌وری انرژی را نشان داد. همسویی نتایج حاضر با این بررسی‌ها، بیانگر سازگاری روندهای انرژی در سامانه‌های حفاظتی گندم با الگوهای بهینه جهانی است و نشانه‌ای بر توانایی گسترش یافته‌ها به جاهای دارای اقلیم نیمه‌خشک ایران محسوب می‌شود.

کاربرد شاخص بهره‌وری انرژی در سیاست‌گذاری داده‌محور و انتقال نوآوری در کشاورزی: بررسی موردی گندم در سامانه‌های خاک‌ورزی البرز

ب- پیشنهاد کاربردی برای بهبود سیاست‌های بخش کشاورزی و مدیریت انرژی

- ۱- مدیریت هدفمند نهاده‌ها- ضروری است در سیاست‌های بخش کشاورزی، به مدیریت هدفمند مصرف نهاده‌ها، به‌ویژه کود نیتروژن و سوخت، توجه بیشتری شود.
- ۲- حمایت از توسعه مکانیزاسیون حفاظتی- نتایج پژوهش حاضر نشانگر این است که توسعه مکانیزاسیون حفاظتی می‌تواند سهم مؤثری در کاهش مصرف انرژی و اثرهای محیط‌زیستی داشته باشد.
- ۳- پایش و ارزیابی نهاده‌ها- استقرار سامانه‌های جمع‌آوری و واکاوی نهاده‌های کشتزار (داده‌نگاری دیجیتال) حتی برای کشتزارهای کوچک توصیه می‌شود.
- ۴- ارتباط نهاده‌های پژوهشی با بدنه اجرا- تشکیل شبکه مشورتی بین دانشگاه، دستگاه سیاست‌گذار و کشاورزان می‌تواند به آسانی انتقال دانش کمک کند.
- ۵- حمایت از نوآوری و آینده‌پژوهی- سرمایه‌گذاری بر پژوهش، آینده‌نگاری و تلفیق فناوری‌های داده‌محور و کشاورزی دقیق با سیاست‌گذاری ملی، از پیش‌نیازهای گذار به کشاورزی پایدار است.

پ- از نظر دشواری‌ها و چالش‌ها

برخی از دشواری‌های ساختاری همچون دسترسی محدود به ابزارهای بیوسیستمی (مکانیزاسیون) نوین، نبود چارچوب منسجم و استاندارد برای طراحی و اجرای آموزش‌های ترویجی، همراه با تفاوت‌های نامتوازن در محتوا، کیفیت و اثربخشی آموزش‌ها متناسب با شرایط اقلیمی، اقتصادی و اجتماعی منطقه‌ها، و وابستگی نسبی به نهاده‌های شیمیایی، همچنان به‌عنوان چالش‌هایی نیازمند پژوهش و سیاست‌گذاری تکمیلی باقی مانده‌اند. توجه هدفمند به این چالش‌ها در سیاست‌گذاری ملی و برنامه‌ریزی استانی، با تأکید بر بومی‌سازی آموزش‌ها در چارچوب استانداردهای ملی، ضروری است.

نتیجه‌گیری

این پژوهش با ارزیابی مقایسه‌ای شاخص‌های انرژی، محیط‌زیستی و اقتصادی در دو سامانه خاک‌ورزی مرسوم و حفاظتی در تولید گندم استان البرز نشان داد که سامانه خاک‌ورزی حفاظتی از نظر کارایی مصرف انرژی و پایداری محیط‌زیستی عملکرد برتری نسبت به سامانه مرسوم دارد. نتایج بیانگر کاهش بیش از ۵۰ درصدی مصرف کل انرژی، کاهش وابستگی به انرژی‌های فسیلی و نهاده‌های تجدیدناپذیر، و بهبود معنی‌دار شاخص‌های بهره‌وری انرژی در سامانه حفاظتی است. یافته‌های ارزیابی چرخه زندگی با استفاده از نرم‌افزار SimaPro v9.0 و روش IMPACT 2002+ نشان دادند که در سامانه خاک‌ورزی حفاظتی، پتانسیل گرمایش جهانی، اثر بر سلامت انسان و آسیب به کیفیت بوم‌نظام به‌ترتیب حدود ۲، ۲۳، ۱۹ و ۲۰٪ کاهش یافته است که بیانگر بهبود همزمان عملکرد محیط‌زیستی این سامانه است. اگرچه اجرای خاک‌ورزی حفاظتی با کاهش جزئی عملکرد محصول (حدود ۲ تا ۳٪) همراه بود، اما کاهش هزینه‌های تولید، افزایش بهره‌وری انرژی، و بهبود شاخص‌های محیط‌زیستی نشان می‌دهد که این سامانه از منظر پایداری بلندمدت، گزینه‌ای کارآمد برای تولید گندم در شرایط نیمه‌خشک محسوب می‌شود. در مجموع، نتایج این پژوهش بر ضرورت گذار هدفمند به سامانه‌های حفاظتی، همراه با حمایت‌های سیاستی، آموزشی و فناورانه، به‌عنوان راهبردی مؤثر برای ارتقای پایداری کشاورزی تأکید دارد.

منابع

- Abbasi, M. (2022). Energy analysis in wheat production: An Iranian perspective. *Agricultural Sustainability Science*, 22(3), 45–59.
- Aminifard, M. H., Movahedi Naeini, S.A.R., Mosavi, F., Rahimi, J., Ale Shaybani, M., Ahmadi, A. & Bagheri, A. (2024). Comparative life cycle assessment (LCA) of wheat production under different irrigation systems in a semi-arid region. *Journal of Environmental Management*, 351, 119475. Retrieved from: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.119475>
- Anonymous. (2006). *ISO 14040: Environmental management—Life cycle assessment—Principles and framework*. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization.
- Azizi, A., Rafiee, S., & Sharifi, M. (2015). Energy use efficiency of wheat production in Iran. *Energy Reports*, 1, 183–188. Retrieved from: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2015.04.008>
- Bakhshi, M., Maleki, A., Keyhani, A., Rafiee, S. & Yoo, S. (2024). Environmental impacts of different wheat production systems using life cycle assessment: A case study from northwest Iran. *Agricultural Water Management*, 292, 1082355. Retrieved from: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.1082355>
- Boschiero, M., De Laurentiis, V., Caldeira, C. & Sala, S. (2023). Comparison of organic and conventional cropping systems: A systematic review of life cycle assessment studies. *Environmental Impact Assessment Review*, 102, 107187. Retrieved from: <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2023.107187>
- FAO. (2023). *FAOSTAT agricultural data*. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization. Retrieved from: <https://www.fao.org/faostat/>
- González, P., Martínez, L. & Campos, J. (2019a). Life cycle assessment of conservation agriculture systems in semi-arid Mediterranean environments. *Journal of Cleaner Production*, 220, 458–474. Retrieved from: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.032>
- González, J., Romero, R. & Hernández, E. (2019b). Energy flow and environmental performance of conservation tillage systems in Mediterranean wheat farming. *Journal of Cleaner Production*, 225, 380–391. Retrieved from: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.231>
- Houshyar, E. & Grundmann, P. (2017). Environmental impacts of energy use in wheat tillage systems: A comparative life cycle assessment (LCA) study in Iran. *Energy*, 122, 11–24. Retrieved from: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.01.069>
- Karimi, M., Esfahanian, E. & Houshyar, E. (2024). Energy and environmental impacts assessment of different tillage practices in wheat production: Integrated application of artificial neural network and life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 434, 1401434. Retrieved from: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.1401434>
- Kassam, A., Friedrich, T., Derpsch, R. & Kienzle, J. (2021). Overview of the worldwide spread of conservation agriculture. *Field Actions Science Reports*, 24, 8–18.
- Kitani, O. (1999). *CIGR handbook of agricultural engineering, Volume V: Energy and biomass engineering*. St. Joseph, MI: ASAE.
- Lal, R. (2015). Sequestering carbon and increasing productivity by conservation agriculture. *Journal of Soil and Water Conservation*, 70(3), 55A–62A. Retrieved from: <https://doi.org/10.2489/jswc.70.3.55A>

- Noč, M., Pečan, U., Zupanc, V., Pintar, M. & Glavan, M. (2025). Assessing plant soil water availability in drought conditions: A comparative analysis of conventional and minimum tillage, example from Slovenia. *International Soil and Water Conservation Research*. Retrieved from: <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2025.07.003>
- Pishgar Komleh, S. H., Keyhani, A., Sefeedpari, P. & Rafiee, S. (2021). Environmental impact assessment of wheat production using different tillage systems: A case study from northwestern Iran. *Journal of Cleaner Production*, 279, 123837. Retrieved from: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123837>
- Singh, G., Kumar, A. & Sharma, R. (2020). Energy use pattern and conservation tillage performance for wheat cultivation in Indo-Gangetic plains. *Energy Reports*, 6, 320–327. Retrieved from: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.01.012>
- Zhao, W., Li, Q. & Zhang, S. (2021a). Energy efficiency and carbon footprint of wheat production in semi-arid China. *Agricultural Systems*, 189, 103051. Retrieved from: <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103051>
- Zhao, X., Liu, H. & Zhang, L. (2021b). Energy balance and environmental assessment of no-till wheat under semi-arid conditions in China. *Sustainability*, 13(18), 10215. Retrieved from: <https://doi.org/10.3390/su131810215>

The Role of Energy Productivity Index in Data-Driven Policy and Innovation Transfer in Agriculture: A Case Study of Wheat in Tillage Systems of Alborz Province

Taheri Hajivand, A.¹ and Abbasi, M.²

Rising concerns over resource crises, declining input productivity and environmental impacts have amplified the need to reform wheat production systems in Iran. This study aims to provide a comparative analysis of the energy productivity index and to elucidate the significance of data-driven, evidence-based policymaking by comparing conventional and conservation tillage systems in wheat farms of Alborz Province. Data were collected through field surveys, recording input consumption, energy inflows and outflows and environmental indicators and analyzed using validated coefficients and standard software. The results demonstrated that implementing conservation tillage led to a significant reduction (over 50%) in total energy consumption, saving fuel and nitrogen fertilizer, while markedly improving energy productivity and the output-input ratio. Furthermore, the share of renewable energy increased and negative environmental effects, including ecosystem damage and depletion of non-renewable resources were reduced. Life cycle assessment indicated that targeted management of fertilizer and fuel constitutes the most effective tools for minimizing the environmental footprint of wheat in the region. Thus, the development of energy indices and data-driven analysis, combined with targeted education and enhanced access to conservation mechanization technologies, can accelerate the transition to sustainable and resilient agriculture in Iran and serve as a practical strategy for informed policymaking in the agricultural sector.

Key words: Conservation tillage, Data-driven policymaking, Energy productivity, Smart agriculture, Wheat.

1. Corresponding author's Email: a.taheri@tabrizu.ac.ir

2. Assistant Professor and Graduated M.Sc. Student of University of Tabriz, Tabriz, respectively.