نشریه علمی پژوهشی دانش کشاورزی و تولید پایدار
جلد ۳۱ شماره ۴ / سال ۱۴۰۰ صفحات ۱۳۲-۱۱۷

Effect of Conservation Tillage and Irrigation Methods on Energy Use and Greenhouse Gas Emissions during Wheat Production

Sadegh Afzalinia[*1], Sayed Mansour Alavimanesh[2], Mashallah Zare[2]

Received: October 5, 2020 Accepted: February 25, 2021
1-Assoc. Prof., Dept. of Agricultural Engineering Research, Fars Research and Education Center for Agriculture and Natural Resources, AREEO, Shiraz, Iran.
2-Researcher, Dept. of Agricultural Engineering Research, Fars Research and Education Center for Agriculture and Natural Resources, AREEO, Shiraz, Iran.
[*]Corresponding Author Email: sja925@mail.usask.ca

Abstract

Background & Objective: Tillage and irrigation methods may affect energy use and greenhouse gas (GHG) emissions in production process of agricultural products. Effect of tillage and irrigation methods on energy indices, GHG emissions, and GHG emissions intensity during irrigated wheat production in Fars province was evaluated in this research.

Materials and Methods: This research was conducted in the form of a split plot experimental design with nine treatments and three replicates. Main plots were surface irrigation, tape drip irrigation, and sprinkler irrigation. No-till, reduced tillage, and conventional tillage were considered as sub plots. Energy indices, GHG emissions, and GHG emissions intensity were determined.

Results: All energy indices were significantly affected by irrigation methods, but tillage methods only had significant effect on input and output energies. Tape drip and sprinkler irrigation reduced input energy compared to the surface irrigation by 30.5 and 14.8%, respectively, and tape drip irrigation had the highest energy productivity (0.214 $kg.Mj^{-1}$). Conventional tillage had the highest input and output energies, while the minimum input and output energies were related to the no-till. Tape drip and sprinkler irrigation methods reduced the total GHG emissions compared to the surface irrigation (21.3 and 34.3%, respectively), but conservation tillage did not significantly decrease the total GHG emissions compared to the conventional tillage. Electricity for pumping irrigation water had the highest share in total energy use and GHG emissions.

Conclusion: Therefore, using pressurized irrigation methods especially tape drip irrigation in wheat production process would significantly reduce energy use and GHG emissions.

Keywords: Energy Indices, Global Warming, Irrigation, Tillage, Wheat

اثر خاک‌ورزی حفاظتی و روش آبیاری بر مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای در تولید گندم آبی

صادق افضلی‌نیا*[۱]، سید منصور علوی‌منش[۲]، ماشاء الله زارع[۲]

تاریخ دریافت: ۹۹/۷/۱٤ تاریخ پذیرش: ۹۹/۱۲/۷

۱-دانشیار بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی فارس، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، شیراز، ایران
۲-کارشناس بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی فارس، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، شیراز، ایران
*مسئول مکاتبه: Email: sja925@mail.usask.ca

چکیده

اهداف: روش‌های خاک‌ورزی و آبیاری مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای در تولید محصولات کشاورزی را تحت تأثیر قرار می‌دهند. در این پژوهش اثر روش‌های خاک‌ورزی و آبیاری بر شاخص‌های انرژی، مقدار و شدت انتشار گازهای گلخانه‌ای در تولید گندم آبی در استان فارس بررسی شد.

مواد و روش‌ها: پژوهش در قالب آزمایش کرت‌های خرد شده با نه تیمار و سه تکرار انجام شد. روش‌های آبیاری قطره‌ای نواری، سطحی و بارانی عامل اصلی و روش‌های خاک‌ورزی مرسوم، کم‌خاک‌ورزی و بی‌خاک‌ورزی عامل فرعی بودند. شاخص‌های انرژی، گازهای گلخانه‌ای و شدت آنها در تولید گندم آبی تعیین شدند.

یافته‌ها: اثر روش آبیاری و خاک‌ورزی بر عملکرد گندم معنی‌دار بود به گونه‌ای که آبیاری سطحی و خاک‌ورزی مرسوم بیشترین عملکرد را داشتند. روش آبیاری بر تمام شاخص‌های انرژی اثر معنی‌دار داشت، اما روش خاک‌ورزی فقط بر انرژی مصرفی و تولیدی اثر معنی‌دار داشت. آبیاری قطره‌ای و بارانی انرژی مصرفی را نسبت به سطحی ۲۹/٤ و ۱٤/۳ درصد کاهش دادند و آبیاری قطره‌ای بیشترین بهره‌وری مصرف انرژی (۰/۲۳۱ کیلوگرم بر مگاژول) را داشت. خاک‌ورزی مرسوم بیشترین انرژی مصرفی و تولیدی را داشت و کمترین انرژی مصرفی و تولیدی مربوط به بی‌خاک‌ورزی بود. آبیاری قطره‌ای و بارانی نسبت به سطحی، گازهای گلخانه‌ای را کاهش دادند (۲۱/۳ و ۳٤/۳ درصد)، اما روش‌های خاک‌ورزی حفاظتی کاهش معنی‌داری در گازهای گلخانه‌ای ایجاد نکردند. الکتریسته بیشترین سهم را از انرژی مصرفی و گازهای گلخانه‌ای داشت.

نتیجه‌گیری: استفاده از روش‌های آبیاری تحت فشار به ویژه آبیاری قطره‌ای در کاهش انرژی مصرفی و گازهای گلخانه‌ای در تولید گندم، بسیار مؤثر است.

واژه های کلیدی: آبیاری، خاک‌ورزی، شاخص‌های انرژی، گرمایش زمین، گندم

مقدمه

بنزین، گازوییل و برق منابع اصلی انرژی در کشاورزی می‌باشند (چن و همکاران ۲۰۱۵)، بنابراین سوخت‌های فسیلی بیشترین سهم را از انرژی مصرفی در کشاورزی دارند (سندل و همکاران ۲۰۱٤). انرژی‌های مصرفی در کشاورزی به انرژی مستقیم یا غیر مستقیم و انرژی تجدیدپذیر یا تجدیدناپذیر قابل دسته‌بندی هستند (رفیعی و همکاران ۲۰۱۰). وضعیت مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای در تولید محصولات کشاورزی باید به دقت سنجش و کنترل شوند تا خطرات زیست محیطی کاهش یافته و سرعت گرمایش زمین کندتر گردد. نسبت انرژی، انرژی خالص تولیدی، شدت انرژی و بهره‌وری انرژی شاخص های مهمی هستند که برای بررررسی تراز انرژی در تولید محصولات کشاورزی مورد استفاده قرار می گیرند.

مصرف انرژی و بهره‌وری آن در تولید گندم در تحقیقات زیادی بررسی شده است. بیلدیز (۲۰۱٦) مقادیر ۲/۳٦، ۸/۹٦ مگاژول بر کیلوگرم، ۰/۱۱۲ کیلوگرم بر مگاژول و ٤۸۹٦۰/۲ مگاژول بر هکتار را به ترتیب برای نسبت، شدت، بهره‌وری و انرژی خالص در تولید گندم در استان سمسان ترکیه گزارش نمود. همچنین، صفا و ساماراسینگ (۲۰۱۱) مصرف انرژی برای تولید گندم در نیوزیلند را ۲۲٥٦٦ مگاژول بر هکتار گزارش نمودند و بیان داشتند که کود با ٤۷ درصد و برق با ۲۲ درصد بیشترین سهم را انرژی مصرفی کل داشتند. انرژی مصرفی و تولیدی در فرایند تولید گندم در استان نیو سواث ویلز استرالیا نیز به ترتیب ۳۰۲۸ و ۲۷۸۷٤ کیلو وات ساعت بر هکتار گزارش گردید (خان و همکاران ۲۰۱۰). میسمی و جلالی (۲۰۲۰) میانگین مصرف انرژی و بهره‌وری انرژی گندم دیم در منطقه آق قلا در استان گلستان را به ترتیب ۱۳/۷ گیگاژول بر هکتار و ۰/۰۷ کیلوگرم بر هکتار برآورد نمودند. متوسط مصرف و تولید انرژی در فرایند تولید گندم در استان اصفهان به ترتیب ۸۰/۱ و ۳۸ گیگاژول بر هکتار برآورد شد و انرژی برق با ۳۹/٥ گیگاژول بر هکتار بیشترین سهم را از انرژی مصرفی کل داشت (خوشنویسان و همکاران ۲۰۱۳). انرژی مصرفی کل، نسبت انرژی و بهره‌وری انرژی برای تولید گندم در استان اردبیل به ترتیب ۳۸/۳٦ گیگاژول بر هکتار، ۳/۱۳ و ۰/۱٦ کیلوگرم بر مگاژول گزارش شد که کود با ۳۸/٤٥ درصد بیشترین سهم را از انرژی مصرفی داشت (شاهین و همکاران ۲۰۰۸).

حدود ۲۰ درصد از انتشار گازهای گلخانه‌ای در جهان مربوط به بخش کشاورزی است (سیمز و فلمینی ۲۰۱٤). انتشار اکسید نیتروژن از خاک به عنوان مهمترین منبع انتشار گازهای گلخانه‌ای در استان ویکتوریای استرالیا گزارش شده است (بیسواس و همکاران ۲۰۱۰). بر اساس گزارش بیسواس و همکاران (۲۰۰۸)، در فرایند تولید و حمل و نقل یک تن گندم در استرالیای جنوب غربی معادل ۱۷۱ کیلوگرم دی اکسیدکربن منتشر می گردد.

ممکن است مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای در فرایند تولید محصولات کشاورزی تحت تأثیر روش خاک‌ورزی و آبیاری قرار گیرد. نتایج تحقیقات در چین نشان داد که روش آبیاری بر مقدار انتشار گازهای گلخانه‌ای مؤثر است، به گونه‌ای که مقدار انتشار گازهای گلخانه‌ای در آبیاری قطره‌ای نواری در مقایسه با بقیه روش‌های آبیاری کمتر است (یه و همکاران ۲۰۲۰). همچنین نتایج تحقیقات اسپاکوتا و همکاران (۲۰۲۰) نشان داد که آبیاری بارانی و قطره‌ای در مقایسه با آبیاری غرقابی، انتشار گاز متان از خاک را کاهش داده و در کنترل گرمایش زمین مؤثرند. بنک و همکاران (۲۰۱۸) نشان دادند که انتشار گاز متان در ایالت ایلی نویز آمریکا تحت تأثیر روش خاک‌ورزی قرار نمی‌گیرد. همچنین بر اساس نتایج تحقیقات کراوس و همکاران (۲۰۱۷)، روش خاک‌ورزی اثر معنی‌داری بر

انتشار گازهای اکسید نیتروژن و متان در تولید گندم در سوییس ندارد. بر اساس نتایج تحقیقات چن و همکاران (۲۰۱۵)، انرژی مورد نیاز برای تولید محصولات دانه‌ای تحت شرایط دیم در استرالیا در سامانه کشت مستقیم کمتر از مقدار آن در خاک‌ورزی مرسوم می‌باشد. نتایج تحقیقات ماراسنی و کوکفیلد (۲۰۱۱) در کوییزلند استرالیا نشان داد که اثر تغییر روش خاک‌ورزی از مرسوم به بی‌خاک‌ورزی بر انتشار گازهای گلخانه‌ای مثبت ولی نسبتاً ناچیز است. استفاده از روش کم‌خاک‌ورزی به جای خاک‌ورزی مرسوم می‌تواند تا ۱۰ درصد مصرف سوخت در مزرعه را کاهش دهد (چن و بیلی ۲۰۰۹). همچنین روش‌های کم‌خاک‌ورزی و بی‌خاک‌ورزی در استان نیوسواث ویلز استرالیا مصرف انرژی را در مقایسه با خاک‌ورزی مرسوم به ترتیب ۱۲ و ۲٤ درصد کاهش می‌دهند (بیلی ۲۰۰۹). چن و همکاران (۲۰۰۸) نشان دادند که استفاده از کم‌خاک‌ورزی و کنترل ترافیک در کوییزلند استرالیا مصرف انرژی را ۲۰ درصد کاهش می‌دهد.

بر اساس نتایج به دست آمده از تحقیقات گذشته، روش‌های خاک‌ورزی و آبیاری می توانند انرژی مصرفی و گازهای گلخانه‌ای منتشر شده در فرایند تولید محصولات کشاورزی را تحت تأثیر قرار دهند، اما مقدار این تأثیر ممکن است با نوع خاک، شرایط اقلیمی و نوع محصول تغییر نماید. بنابراین، در این پژوهش اثر روش‌های مختلف خاک‌ورزی و آبیاری بر انرژی مصرفی، انرژی تولیدی، شاخص‌های انرژی، مقدار و شدت انتشار گازهای گلخانه‌ای در فرایند تولید گندم آبی در شرایط اقلیمی معتدل استان فارس بررسی شد.

مواد و روش ها

این پژوهش در قالب آزمایش کرت‌های خرد شده با طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با نه تیمار و سه تکرار در تناوب گندم–ذرت در شهرستان مرودشت به مدت دو سال اجرا شد. عامل اصلی روش‌های آبیاری شامل آبیاری قطره‌ای نواری، آبیاری سطحی و آبیاری بارانی بود و سه روش خاک‌ورزی مرسوم (CT)، کم‌خاک‌ورزی (RT) و بی‌خاک‌ورزی (NT) به عنوان عامل فرعی در نظر گرفته شدند. در تمام تیمارهای خاک‌ورزی، بقایای بریده شدهٔ گندم (خارج شده از انتهای کمباین) از مزرعه خارج شد و بقایای ایستاده در مزرعه حفظ شد، همچنین بقایای ذرت به طور کامل در کرت‌ها حفظ شد. در روش بی‌خاک‌ورزی، هیچ‌گونه عملیات خاک‌ورزی انجام نشد و با یک بار حرکت مستقیم‌کار در مزرعه کاشت انجام شد. در روش کم‌خاک‌ورزی، بستر بذر با استفاده از یک دستگاه خاک‌ورز مرکب در یک مرحله تهیه و در روش مرسوم برای تهیه بستر بذر از گاوآهن برگردان‌دار، دیسک و لولراستفاده شد. سپس ذرت رقم ۷۰٤ به مقدار ۲۵ کیلوگرم در هکتار با ردیف‌کار و گندم رقم چمران به مقدار ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار با خطی‌کار در کرت‌های با ابعاد ۲۰×٦ متر، کشت شد. گندم در آبان ماه کشت و اواخر خرداد ماه برداشت شد، در حالی که ذرت در اوایل تیرماه کشت و آبان ماه برداشت شد.

آبیاری بارانی با روش آب پاش و لوله لترال متحرک با آب پاش تنظیمی پیروت ZK30 با فشار کارکرد سه اتمسفر، آبدهی۰/۷ لیتر در ثانیه و شعاع پاشش ۱۹ متر با آرایش ۱۵×۲۰ متر مربع بود. برای این‌که آب پاشش شده در این روش آبیاری تیمارهای مجاور را تحت تأثیر قرار ندهد، فاصلهٔ کرت اصلی آبیاری بارانی با کرت اصلی مجاور ۲۰ متر در نظر گرفته شد. در روش آبیاری قطره‌ای نواری، فاصله قطره چکان‌ها ۲۰ سانتی‌متر، آبدهی هر قطره چکان ۱/۲ لیتر در ساعت و فاصله نوارها، ۷۵ سانتی‌متر بود و به ازاء هر سه خط کشت گندم و یک ردیف کشت ذرت یک لولهٔ آبیاری نواری استفاده شد. تیمار آبیاری سطحی به صورت کرت‌های نواری با لوله دریچه‌دار با فاصله دریچه ۷۵ سانتیمتر انتخاب شد. نیاز آبی از فرمول پنمن مانتیث اصلاح شده و با احتساب راندمان ۷۰، ۹۰ و ۵۰ درصد به ترتیب برای آبیاری بارانی، قطره‌ای نواری و سطحی (بر اساس نتایج آزمایش‌های اولیه)، محاسبه شد. آب داده شده به کرت‌ها

در هر نوبت و هر تیمار آبیاری با کنتور حجمی واسنجی شده (مدل TWMI 80 کارخانه آبفار با قطر داخلی ۸۰ میلی‌متر و خطای ۲٪±)، اندازه‌گیری شد. دور آبیـــاری برای هر سه روش آبیاری بر اساس میزان تبخیر و تعرق واقعی گیاه، ظرفیت ذخیرهٔ آب در خاک منطقه و نیز میزان تخلیهٔ مجاز رطوبتی تعیین و اعمال شد.

این پژوهش در تناوب گندم–ذرت به مدت دو سال اجرا شد و در این مقاله میانگین داده‌های دوساله گندم مورد استفاده قرار گرفت. برای محاسبهٔ شاخص‌های انرژی، مجموع انرژی نهاده‌ها و مجموع انرژی ستاده‌ها در تولید گندم آبی در هر یک از روش‌های خاک‌ورزی تعیین شد و با استفاده از معادلات موجود، شاخص‌های انرژی محاسبه شدند. برای محاسبهٔ انرژی‌های ورودی به سیستم، انرژی مربوط به بذر، علف‌کش، آفت‌کش، کودهای شیمیایی نیتروژنی، پتاسه و فسفاته بر حسب کیلوگرم، از حاصل ضرب هم‌ارز انرژی آن نهاده‌ها (جدول ۱) در مقدار استفاده از آنها به‌دست آمد. مقدار سوخت مصرفی در هر تیمار در هم‌ارز انرژی سوخت ضرب و مقدار انرژی سوخت مصرفی محاسبه شد. انرژی مربوط به ساخت ماشین‌ها با واحد مگاژول بر هکتار بر اساس عمر اقتصادی ماشین یا تأسیسات، ظرفیت مزرعه‌ای موثر، جرم ماشین و هم‌ارز انرژی و با استفاده از رابطه ۱ به‌دست آمد (کیتانی و همکاران ۱۹۹۹):

$$ME = \frac{M.E}{T.C_a} \qquad \text{(رابطه ۱)}$$

که در آن ME انرژی مربوط به ساخت ماشین (MJ/ha)، T عمر اقتصادی ماشین (h)، C_a ظرفیت مزرعه‌ای موثر ماشین (ha/h)، M جرم ماشین (kg)، و E هم‌ارز انرژی (MJ/kg) است. آب مصرفی با استفاده کنتور حجمی اندازه‌گیری و انرژی مصرفی برای استحصال آب آبیاری در تیمارهای مختلف هم به‌صورت مستقیم و هم به‌صورت غیرمستقیم محاسبه شد. انرژی مستقیم، انرژی لازم برای بالا آوردن و تحت فشار قرار دادن آب مورد نیاز در هر هکتار است که از رابطهٔ ۲ محاسبه شد (کیتانی و همکاران ۱۹۹۹):

$$DE = \frac{Q \times \rho \times g \times h}{\eta_1 \eta_2} \qquad \text{(رابطه ۲)}$$

که در آن DE انرژی مســـتقیم اســـتحصـــال آب (J/ha)، ρ چگالی آب (kg/m^3)، g شـــتاب جاذبه (m/s^2)، Q حجم آب مصـــرف شـــده برای تولید محصـــول در یک فصل زراعی (m^3/ha)، h هد دینامیکی چاه (m)، η_1

جدول ۱- هم‌ارز انرژی نهاده‌های مختلف

نهاده	هم‌ارز انرژی		منبع	نهاده	هم‌ارز انرژی		منبع
	مقدار	واحد			مقدار	واحد	
برق	۱۲/۰	*MJ/kWh*	کیتانی و همکاران، ۱۹۹۹	خطی‌کار	۱۳۳/۰	*MJ/kg*	کیتانی و همکاران، ۱۹۹۹
دیزل	٤٧/٨	*MJ/L*	کیتانی و همکاران، ۱۹۹۹	کودپاش	۱۳۳/۰	*MJ/kg*	کیتانی و همکاران، ۱۹۹۹
تراکتور	۱۳۸/۰	*MJ/kg*	کیتانی و همکاران، ۱۹۹۹	لولر	۱۳۳/۰	*MJ/kg*	کیتانی و همکاران، ۱۹۹۹
کمباین	۱۱٦/۰	*MJ/kg*	کیتانی و همکاران، ۱۹۹۹	نیتروژن	۷۸/۱	*MJ/kg*	کیتانی و همکاران، ۱۹۹۹
گاوآهن	۱۸۰/۰	*MJ/kg*	کیتانی و همکاران، ۱۹۹۹	فسفات	۱۷/٤	*MJ/kg*	کیتانی و همکاران، ۱۹۹۹
دیسک	۱٤۹/۰	*MJ/kg*	کیتانی و همکاران، ۱۹۹۹	سموم	۸۵/۰	*MJ/kg*	کیتانی و همکاران، ۱۹۹۹
فاروئر	۱۳۳/۰	*MJ/kg*	کیتانی و همکاران، ۱۹۹۹	دانه گندم	۱۳/۰	*MJ/kg*	کیتانی و همکاران، ۱۹۹۹
نهرکن	۱۳۳/۰	*MJ/kg*	کیتانی و همکاران، ۱۹۹۹	کاه گندم	۱۲/۵	*MJ/kg*	کیتانی و همکاران، ۱۹۹۹
مرزبند	۱۳۳/۰	*MJ/kg*	کیتانی و همکاران، ۱۹۹۹	حمل و نقل	۳/۰	*MJ/(t/km)*	کیتانی و همکاران، ۱۹۹۹
سمپاش	۱۲۹/۰	*MJ/kg*	کیتانی و همکاران، ۱۹۹۹				

راندمان پمپ (٪)، و η_2 بازده کل تبدیل انرژی و توان (٪) است که برای پمپ برقی ۲۰ درصد در نظر گرفته شد. انرژی غیرمستقیم شامل مواد خام، ساخت و انتقال کلیهٔ عواملی است که در آبیاری دخالت دارند که در این تحقیق ۱۸ درصد از انرژی مستقیم به‌عنوان انرژی غیرمستقیم در نظر گرفته شد (کیتانی و همکاران ۱۹۹۹).

به منظور محاسبهٔ انرژی خروجی، مقدار کاه و دانه گندم تولید شده در هم‌ارز انرژی مربوطه ضرب شد. شاخص‌های نسبت انرژی، انرژی خالص تولید شده در واحد سطح، بهره‌وری انرژی و شدت انرژی با استفاده از رابطه‌های ۳ تا ٦ محاسبه شدند (پیشگار و همکاران ۲۰۱۱):

رابطه (۳) $$ER = \frac{OE}{IE}$$

رابطه (٤) $$NEG = OE - IE$$

رابطه (٥) $$EP = \frac{Y}{IE}$$

رابطه (٦) $$SE = \frac{IE}{Y}$$

که در این رابطه‌ها ER نسبت انرژی، NEG انرژی خالص تولید شده (MJ/ha)، EP بهره‌وری انرژی (kg/MJ)، SE شدت انرژی (MJ/kg)، IE انرژی ورودی یا مصرفی (MJ/ha)، OE انرژی خروجی یا تولیدی (MJ/ha) و Y عملکرد محصول (kg/ha) می‌باشد. در این پژوهش، علاوه بر محاسبه شاخص‌های انرژی به‌عنوان معیار مقایسهٔ تیمارها، در هر تیمار سهم هر یک از نهاده‌های مصرفی از کل انرژی مصرف شده نیز مشخص شد.

در مراحل مختلف تولید، حمل و نقل و مصرف گازوئیل در فرایند تولید گندم، گازهای گلخانه‌ای متصاعد می‌شوند که با توجه به این که مقدار گازهای منتشر شده در مرحله حمل ونقل بسیار ناچیز می‌باشد (ماراسنی و همکاران ۲۰۰۷)، در این تحقیق فقط گازهای منتشر شده در مرحله تولید و مصرف گازوئیل در نظر گرفته شد. مقدار ۳/۱۵ کیلوگرم دی اکسید کربن معادل برای تمام گازهای منتشر شده در فرایند تولید و سوختن یک لیتر گازوئیل در نظر گرفته شد (ماراسنی و همکاران ۲۰۱۰). گازوئیل مصرف شده در مراحل تهیه زمین و کاشت گندم در تیمارهای مختلف اندازه گیری شدند، اما مصرف گازوئیل در مراحل داشت و برداشت با استفاده از اطلاعات موجود در منابع (کیتانی و همکاران ۱۹۹۹) برآورد گردید. با ضرب کردن مقدار کل گازوئیل مصرف شده در هر هکتار در عدد ۳/۱۵، معادل کل گازهای گلخانه‌ای انتشار یافته بر حسب وزن دی اکسیدکربن به دست آمد.

تمام مراحل تولید، بسته بندی، انبارداری و حمل و نقل مواد شیمیایی (کودهای شیمیایی، علف کش‌ها) مصرف شده در فرایند تولید گندم مستلزم مصرف انرژی است، بنابراین در این فرایند مقداری گاز گلخانه‌ای نیز متصاعد می‌شود. دی اکسیدکربن معادل گازهای گلخانه‌ای متصاعد شده در فرایند تولید، بسته بندی، انبارداری و حمل و نقل واحد جرم هرکدام از کودهای نیتروژن، فسفات و پتاس مصرف شده در تولید گندم با استفاده از فاکتورهای انتشار کربن توصیه شده توسط ال (۲۰۰٤) و فاکتور تبدیل جرم کربن به دی اکسید کربن محاسبه گردید. اکسید نیتروژن متصاعد شده از خاک در اثر استفاده از کود نیتروژن با استفاده از رابطه ۷ محاسبه گردید (اهالوران و همکاران ۲۰۰۸):

$$E = M \times EF \times C_g \qquad \text{(رابطه ۷)}$$

که در آن E اکسید نیتروژن متصاعد شده در سال از کود نیتروژن مصرف شده (کیلوگرم در هکتار)، M مقدار کود نیتروژن مصرف شده در هر هکتار (کیلوگرم بر هکتار)، EF ضریب انتشار که بر اساس توصیه اهالران و همکاران (اهالوران و همکاران ۲۰۰۸) برای سیستم کشت

آبی، ۰/۰۲۱ کیلو گرم اکسید نیتروژن به ازاء یک کیلوگرم نیتروژن مصرف شده در نظر گرفته شد و C_g فاکتور تبدیل جرم عنصری اکسید نیتروژن به جرم مولکولی آن (۱/۵۷) می باشد. برای تبدیل اکسید نیتروژن متصاعد شده به دی اکسید کربن معادل، مقدار محاسبه شده از فرمول فوق در ضریب تبدیل ۲۹۸ ضرب شد (ماراسنی و همکاران ۲۰۱۰).

آب مصرفی برای تولید گندم با استفاده از کنتور حجمی اندازه‌گیری شد و انرژی الکتریسیته مصرف شده برای پمپاژ آب آبیاری با استفاده از معادله ۲ محاسبه گردید. برای محاسبه دی اکسیدکربن متصاعد شده در اثر تولید و مصرف انرژی الکتریسیته، مقدار انرژی الکتریسیته در ضریب تبدیل ۲۵۱ کیلوگرم دی‌اکسید کربن بر گیگاژول (بی نام ۲۰۱۸) ضرب شد. گازهای گلخانه‌ای متصاعد شده در فرایند تولید ماشین‌های کشاورزی با استفاده از رابطه ۸ محاسبه شد (ماراسنی و همکاران ۲۰۰۷):

$$GHG_{fm} = W \times GHG_i \times F \quad \text{(رابطه ۸)}$$

که در آن GHG_{fm} مجموع گازهای گلخانه‌ای متصاعد شده در فرایند تولید ماشین‌های کشاورزی (کیلوگرم دی اکسیدکربن معادل در هکتار)، W وزن ماشین (کیلوگرم)، F قسمتی از عمر مفید ماشین که برای تولید گندم استفاده شده است و از معکوس حاصل ضرب عمر مفید ماشین و ظرفیت مزرعه‌ای مؤثر آن به دست می‌آید و GHG_i دی اکسید کربن معادل متصاعد شده در فرایند تولید یک کیلوگرم از ماشین مورد نظر می باشد. برای محاسبه GHG_i، انرژی مورد نیاز برای تولید واحد جرم ماشین‌ها با استفاده از اطلاعات فراهم شده توسط کیتانی و همکاران (کیتانی و همکاران ۱۹۹۹) بر حسب کیلووات ساعت بر کیلوگرم محاسبه شد و در ضریب تبدیل ۰/٤۱۱ که توسط ماراسنی و همکاران (ماراسنی و همکاران ۲۰۰۷) پیشنهاد شده بود (دی اکسید کربن معادل متصاعد شده در فرایند تولید یک کیلووات ساعت انرژی)، ضرب شد. مجموع گازهای گلخانه‌ای تولید شده در هر هکتار در فرایند تولید گندم، از جمع کردن جرم گازهای گلخانه‌ای متصاعد شده در قسمت‌های مختلف حاصل شد و شدت تولید گازهای گلخانه‌ای با استفاده از رابطه ۹ محاسبه شد:

$$GHGI = {}^{TGHG}/_{Y} \quad \text{(رابطه ۹)}$$

که در آن $GHGI$ شدت تولید گازهای گلخانه‌ای (کیلوگرم گاز متصاعد شده بر کیلوگرم محصول تولید شده)، $TGHG$ مجموع گازهای گلخانه‌ای تولید شده (کیلوگرم بر هکتار) و Y عملکرد محصول (کیلوگرم بر هکتار) می‌باشد. همچنین علاوه بر مقدار و شدت انتشار گازهای گلخانه‌ای، سهم هر کدام از نهاده‌های تولید از مجموع گازهای گلخانه‌ای متصاعد شده در فرایند تولید گندم آبی نیز تعیین شد.

نتایج و بحث

روش آبیاری اثر معنی‌داری (در سطح یک درصد) بر عملکرد دانه گندم، انرژی مصرفی، انرژی تولیدی ناخالص، نسبت انرژی، انرژی خالص تولیدی، بهره‌وری انرژی و شدت انرژی در فرایند تولید گندم آبی داشت (جدول ۲). دلیل اصلی اثر معنی‌دار روش آبیاری بر شاخص‌های انرژی، متفاوت بودن راندمان آبیاری و در نتیجه حجم آب مصرفی در این روش‌ها بود. روش خاک‌ورزی فقط عملکرد گندم، انرژی مصرفی و انرژی تولیدی ناخالص و خالص گندم را تحت تأثیر معنی‌دار قرار داد، در حالی که شاخص‌های نسبت انرژی و بهره‌وری انرژی تحت تأثیر معنی‌دار روش خاک‌ورزی قرار نگرفتند (جدول ۲). چون انرژی مصرفی مربوط به ماشین‌های کشاورزی، سوخت و سموم علف‌کش در روش‌های مختلف خاک‌ورزی متفاوت بود، بنابراین اثر روش خاک‌ورزی بر انرژی مصرفی گندم آبی معنی‌دار شد. از طرف دیگر، عملکرد گندم آبی نیز در تیمارهای مختلف خاک‌ورزی متفاوت بود، به همین دلیل اثر روش خاک‌ورزی بر انرژی تولیدی ناخالص و خالص نیز

معنی‌دار شد. همچنین اثر متقابل روش خاک‌ورزی و آبیاری بر همه شاخص‌های انرژی در سطح یک درصد معنی‌دار بود.

عملکرد دانه گندم در آبیاری سطحی نسبت به آبیاری بارانی و قطره‌ای نواری بیشتر بود (۵۵۴۱ کیلوگرم بر هکتار) و کمترین مقدار عملکرد گندم مربوط به آبیاری بارانی بود (۴۵۳۵ کیلوگرم بر هکتار). آبیاری سطحی بیشترین انرژی مصرفی (۸۱۷۶۰ مگاژول بر هکتار) را

جدول ۲- تجزیه واریانس داده‌های انرژی ورودی، انرژی خروجی و شاخص‌های انرژی (مقادیر F)

منابع تغییر	عملکرد دانه گندم	انرژی ورودی	انرژی خروجی	نسبت انرژی	انرژی تولیدی خالص	بهره‌وری انرژی	شدت انرژی
تکرار	۰/۱۶ ns	۰/۳۹ ns	۰/۱۶ **	۰/۰۴ ns	۰/۰۷ ns	۰/۱۲ ns	۰/۱۴ ns
روش آبیاری	۱۲/۰۳ **	۵۷/۹۵ **	۱۲/۰۳ **	۵۹۶/۳۰ **	۴۱/۳۵ **	۶۴۲/۷۵ **	۶۵۸/۴۹ **
روش خاک‌ورزی	۱۰/۳۴ **	۱۴/۶۵ **	۱۰/۳۴ **	۱/۸۷ ns	۷/۷۶ **	۱/۵۸ ns	۳/۵۷ *
اثر متقابل آبیاری و خاک‌ورزی	۲/۰۶ *	۱/۹۷ *	۲/۰۶ *	۲/۹۵ *	۲/۲۰ *	۲/۹۱ *	۳/۷۵ *

ns: عدم اختلاف معنی دار، *: اختلاف معنی دار در سطح پنج درصد و **: اختلاف معنی دار در سطح یک درصد می باشد.

به خود اختصاص داد و آبیاری بارانی (۷۰۰۸۲ مگاژول بر هکتار) و قطره‌ای نواری (۵۷۷۶۲ مگاژول بر هکتار) در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند، به گونه‌ای که روش‌های آبیاری قطره‌ای نواری و بارانی انرژی مصرفی را نسبت به آبیاری سطحی به ترتیب ۲۹/۴ و ۱۴/۳ درصد کاهش دادند (جدول ۳). مهمترین دلیل کاهش انرژی مصرفی در آبیاری قطره‌ای نواری و بارانی نسبت به آبیاری سطحی، راندمان بیشتر آبیاری و در نتیجه مصرف کمتر آب در این دو روش بود، زیرا بیش از ۵۰ درصد انرژی مصرفی در تولید گندم آبی مربوط به الکتریسیته مورد نیاز برای استحصال آب آبیاری می‌باشد (جدول ۴). از طرف دیگر به دلیل عملکرد بیشتر گندم در آبیاری سطحی (۵۵۴۱ کیلوگرم بر هکتار)، بیشترین انرژی ناخالص (۱۵۱۳۰۰ مگاژول بر هکتار) نیز در این روش آبیاری تولید شد و آبیاری قطره‌ای نواری و بارانی در مکان‌های بعدی قرار گرفتند، هرچند بین آبیاری سطحی و قطره‌ای نواری تفاوت معنی‌داری وجود نداشت. آبیاری قطره‌ای نواری به دلیل مصرف کمترین انرژی و تولید انرژی در حد آبیاری سطحی، دارای بیشترین نسبت انرژی، انرژی خالص و بهره‌وری انرژی و کمترین شدت انرژی بود (جدول ۳). نسبت انرژی در فرایند تولید گندم تحت هر سه روش آبیاری در این پژوهش بیشتر از یک بود و در نتیجه انرژی خالص تولیدی در هر سه روش آبیاری مثبت بود که نشان می‌دهد انرژی تولیدی در این روش‌ها بیش از انرژی مصرفی بوده‌است. بنابراین تولید گندم تحت این روش‌های آبیاری از نظر موازنه انرژی قابل توجیه می‌باشد، هر چند بهره‌وری مصرف انرژی در هر سه روش پایین بود. به عبارت دیگر، حتی در آبیاری قطره‌ای نواری که دارای بهترین بهره‌وری مصرف انرژی بوده است، با مصرف یک مگاژول انرژی فقط ۲۳۱ گرم گندم تولید شده است که مقدار کمی است. برای تولید یک کیلوگرم گندم در آبیاری قطرهای نواری ۴/۳۳ مگاژول انرژی مصرف شده است، در حالی که انرژی مصرف شده برای تولید یک کیلوگرم گندم در آبیاری سطحی و بارانی به ترتیب ۵/۹۲ و ۶/۲۰ مگاژول بوده است. نکته قابل ذکر این است که علیرغم این که انرژی مصرفی در آبیاری بارانی حدود ۱۵ درصد کمتر از آبیاری سطحی بوده، ولی آبیاری سطحی به دلیل عملکرد محصول بیشتر و در نتیجه انرژی تولیدی بیشتر، از بهره‌وری انرژی بالاتری برخوردار بوده است.

تولید گندم آبی در روش‌های بی‌خاک‌ورزی و کم‌خاک‌ورزی نسبت به تولید آن در خاک‌ورزی مرسوم

انرژی کمتری مصرف کرد، به گونه‌ای که مصرف انرژی در هر هکتار از مزرعه گندم به روش بی‌خاک‌ورزی و کم‌خاک‌ورزی در مقایسه با خاک‌ورزی مرسوم به ترتیب ۱۵/۹ و ۸/۵ درصد کاهش یافت (جدول ۳). کاهش مصرف انرژی در تولید گندم به روش خاک‌ورزی حفاظتی (بی‌خاک‌ورزی و کم‌خاک‌ورزی) نسبت به خاک‌ورزی مرسوم عمدتاً به دلیل مصرف کمتر آب، سوخت و ماشین‌های کشاورزی در خاک‌ورزی حفاظتی

جدول ۳- مقایسه میانگین شاخص‌های انرژی در تیمارهای مختلف

روش‌های آبیاری	عملکرد دانه گندم (kg. ha^{-1})	انرژی ورودی (MJ. ha^{-1})	انرژی خروجی (MJ. ha^{-1})	نسبت انرژی	انرژی تولیدی خالص (MJ. ha^{-1})	بهره‌وری انرژی (kg. MJ^{-1})	شدت انرژی (MJ. kg^{-1})
بارانی	٤٥٣٥b	٧٠٠٨٢b	١٢٣٨١٣b	١/٧٦c	٥٣٧٣١c	٠/١٦١c	٦/٢٠a
قطره‌ای نواری	٥٣٤٩a	٥٧٧٦٢c	١٤٦٠٦٦a	٢/٥٢a	٨٨٣٠٥a	٠/٢٣١a	٤/٣٣c
سطحی	٥٥٤١a	٨١٧٦٠a	١٥١٣٠٠a	١/٨٥b	٦٩٥٤٠b	٠/١٦٩b	٥/٩٢b
رروش‌های خاک‌ورزی		-	-	-	-	-	-
مرسوم	٥٦٥٦a	٧٦٠٤٧a	١٥٤٤٤٠a	٢/٠٧a	٧٨٣٩٣a	٠/١٨٩a	٥/٤٣b
کم‌خاک‌ورزی	٥١٠١b	٦٩٥٦٥b	١٣٩٢٨٦b	٢/٠٤a	٦٩٧٢١ab	٠/١٨٧a	٥/٤٤b
بی‌خاک‌ورزی	٤٦٦٨b	٦٣٩٩٢c	١٢٧٤٥٤b	٢/٠٢a	٦٣٤٦١b	٠/١٨٥a	٥/٥٧a
اثر متقابل آبیاری و خاک‌ورزی		-	-	-	-	-	-
بارانی مرسوم	٤٧٣٥bc	٧٣٧١١	١٢٩٢٨٩	١/٧٣	٥٥٥٧٨	٠/١٦٠	٦/٢٤a
بارانی کم‌خاک‌ورزی	٤٨٥٢b	٧٢٩٦٤	١٣٢٤٧٥	١/٨١	٥٩٥١١	٠/١٦٦	٦/٠٢a
بارانی بی‌خاک‌ورزی	٤٠١٧c	٦٣٥٧٢	١٠٩٦٧٥	١/٧٢	٤٦١٠٣	٠/١٥٨	٦/٣٤a
قطره‌ای مرسوم	٥٩٤٧a	٦٣٢٠١	١٦٢٣٧٤	٢/٥٧	٩٩١٧٣	٠/٢٣٥	٤/٢٦c
قطره‌ای کم‌خاک‌ورزی	٤٩٢٨b	٥٤٥٨٦	١٣٤٥٦٨	٢/٤٦	٧٩٩٨٢	٠/٢٢٦	٤/٤٣c
قطره‌ای بی‌خاک‌ورزی	٥١٧٣b	٥٥٤٩٩	١٤١٢٥٨	٢/٥٤	٨٥٧٥٩	٠/٢٣٣	٤/٣٠c
سطحی مرسوم	٦٢٨٧a	٩١٢٢٩	١٧١٦٥٨	١/٨٨	٨٠٤٢٩	٠/١٧٢	٥/٨١b
سطحی کم‌خاک‌ورزی	٥٥٢٣ab	٨١١٤٥	١٥٠٨١٤	١/٨٦	٦٩٦٧٠	٠/١٧٠	٥/٨٨b
سطحی بی‌خاک‌ورزی	٤٨١٣b	٧٢٩٠٦	١٣١٤٢٨	١/٨٠	٥٨٥٢٢	٠/١٥٦	٦/٠٦a

حروف متفاوت در هر ستون نشان دهنده اختلاف معنی‌دار بین اعداد آن ستون بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن است.

بود. کاهش مصرف انرژی در تولید محصولات کشاورزی به روش حفاظتی در مقایسه با تولید آن به روش مرسوم در نتایج تحقیقات گذشته نیز گزارش شده است (چن و همکاران ۲۰۰۸ و چن و بیلی ۲۰۰۹ و چن و همکاران ۲۰۱۵). در بین روش‌های مختلف خاک‌ورزی، خاک‌ورزی مرسوم بیشترین مقدار انرژی خروجی (تولیدی ناخالص) را داشت و با روش‌های خاک‌ورزی حفاظتی اختلاف معنی‌دار داشت، اما اختلاف بین کم‌خاک‌ورزی و بی‌خاک‌ورزی معنی‌دار نبود. با توجه به این که انرژی خروجی (تولیدی ناخالص) در تولید محصولات کشاورزی تابع عملکرد محصول است، بنابراین دلیل بیشتر بودن انرژی تولیدی ناخالص در روش خاک‌ورزی مرسوم، عملکرد بیشتر گندم در این روش بود (٥٦٥٦ کیلوگرم بر هکتار). علیرغم این که روش‌های کم‌خاک‌ورزی و بی‌خاک‌ورزی انرژی مصرفی در تولید گندم را نسبت به روش مرسوم کاهش دادند، اما به دلیل عملکرد کمتر در مقایسه با روش مرسوم (به ترتیب ٥١٠١ و ٤٦٦٨ کیلوگرم بر هکتار) و به تبع آن

کاهش انرژی تولیدی در این روش‌ها نسبت به روش مرسوم، اختلاف بین تیمارهای خاک‌ورزی از نظر نسبت، بهره‌وری و شدت انرژی معنی‌دار نشد. خاک‌ورزی مرسوم بیشترین و بی‌خاک‌ورزی کمترین انرژی خالص تولیدی را به خود اختصاص دادند و تفاوت بین آنها از نظر آماری معنی دار بود، در حالی که اختلاف بین خاک‌ورزی مرسوم و کم‌خاک‌ورزی و همچنین کم‌خاک‌ورزی و بی‌خاک‌ورزی معنی‌دار نبود. نتایج اثر متقابل روش خاک‌ورزی و آبیاری بر شاخص‌های انرژی نیز نشان داد که ترکیب روش خاک‌ورزی مرسوم با آبیاری قطره‌ای نواری بیشترین نسبت انرژی، انرژی خالص تولیدی و بهره‌وری انرژی (به ترتیب ۲/۵۷، ۹۹۱۷۳ مگاژول بر هکتار و ۰/۲۳۵ کیلوگرم بر مگاژول) و کمترین شدت انرژی (٤/۲٦ مگاژول بر کیلوگرم) را داشت و مناسب‌ترین تیمار از نظر شاخص‌های انرژی بود.

در فرایند تولید گندم آبی در هر سه روش آبیاری، انرژی مربوط به آب آبیاری (انرژی الکتریکی لازم برای استحصال آب آبیاری) بیشترین سهم را داشت (بیش از ٤٨ درصد) و سهم انرژی سم علف‌کش کمترین (کمتر از ۰/۷۹ درصد) بود (جدول ٤). انرژی الکتریکی مصرف شده برای استحصال آب آبیاری در فرایند تولید گندم آبی از ٤٨١٩٠ مگاژول بر هکتار در آبیاری سطحی به ۲۷۹۱٤ مگاژول بر هکتار در آبیاری قطره‌ای نواری کاهش پیدا کرد، بنابراین سهم انرژی مربوط به آب آبیاری (الکتریسیته) از کل انرژی مصرفی در تولید گندم آبی از ٥٨/٩٤ درصد در آبیاری سطحی به ٤٨/٣٣ درصد در آبیاری قطره‌ای نواری کاهش یافت. به عبارت دیگر، روش‌های آبیاری قطره‌ای نواری و بارانی کل انرژی مربوط به آبیاری (الکتریسیته) را نسبت به آبیاری سطحی به ترتیب ٤٢/١ و ١٩/٩ درصد کاهش دادند. بنابراین نقش روش آبیاری در مدیریت انرژی مصرفی در تولید محصولات کشاورزی آبی بسیار مهم است و برای کاهش انرژی مصرفی و افزایش بهره‌وری آن باید روش آبیاری با راندمان بالا مورد استفاده قرار گیرد. همچنین در تمام روش‌های آبیاری بیش از ٥٢ درصد از انرژی مصرفی کل، انرژی مستقیم بود (جدول ٤).

جدول ۴- سهم انرژی نهاده‌ها از کل انرژی مصرف شده در فرایند تولید گندم تحت روش‌های مختلف آبیاری

نهاده‌ها	آبیاری بارانی		آبیاری قطره‌ای نواری		آبیاری سطحی	
	انرژی مصرف شده ($MJ.\ ha^{-1}$)	سهم (%)	انرژی مصرف شده ($MJ.\ ha^{-1}$)	سهم (%)	انرژی مصرف شده ($MJ.\ ha^{-1}$)	سهم (%)
سوخت	۲٥۸۹	۳/٦۹	۲٥۸۹	٤/٤۸	۲٥۸۹	۳/۱۷
الکتریسیته برای استحصال آب آبیاری	۳۸٦۱۳	٥٥/۱۰	۲۷۹۱٤	٤۸/۳۳	٤۸۱۹۰	٥۸/۹٤
ماشین	۷٦٦٥	۱۰/۹٤	٥۷٤۰	۹/۹٤	۹۳۸۹	۱۱/٤۸
کود	۱٦۳۲۰	۲۳/۲۹	۱٦۳۲۰	۲۸/۲٥	۱٦۳۲۰	۱۹/۹٦
سم	٤٥٦	۰/٦٥	٤٥٦	۰/۷۹	٤٥٦	۰/٥٦
بذر	۲٦۰۰	۳/۷۱	۲٦۰۰	٤/٥۰	۲٦۰۰	۳/۱۸
حمل و نقل	۱۸۳۸	۲/٦۲	۲۱٤٤	۳/۷۱	۲۲۱٦	۲/۷۱
انرژی ورودی کل	۷۰۰۸۱	۱۰۰/۰۰	٥۷۷٦۲	۱۰۰/۰۰	۸۱۷٦۰	۱۰۰/۰۰
انرژی مستقیم	٤۱۲۰۲	٥۸/۷۹	۳۰٥۰۳	٥۲/۸۱	٥۰۷۷۹	٦۲/۱۱
انرژی غیرمستقیم	۲۸۸۷۹	٤۱/۲۱	۲۷۲٥۹	٤۷/۱۹	۳۰۹۸۱	۳۷/۸۹

نتایج این پژوهش همچنین نشان داد که در تمام روش‌های خاک‌ورزی، انرژی مربوط به آبیاری (الکتریسیته برای استحصال آب آبیاری) بیشترین سهم را از مجموع انرژی مصرف شده در فرایند تولید گندم آبی داشت و انرژی مربوط به کود در رتبه دوم قرار گرفت (جدول ۵). بر اساس نتایج پژوهش خوشنویسان و همکاران (۲۰۱۳) در استان اصفهان نیز برق مصرفی برای استحصال آب آبیاری بیشترین سهم را از مجموع انرژی مصرفی در فرایند تولید گندم آبی داشت. اما در استان اردبیل بیشترین سهم از مجموع انرژی مصرف شده در تولید گندم آبی مربوط به کود بود (شاهین و همکاران ۲۰۰۸) که دلیل آن هوای سرد و بارندگی بیشتر در استان اردبیل می باشد که مصرف آب برای تولید گندم را کاهش می‌دهد. سهم انرژی سوخت و ماشین‌های کشاورزی از مجموع انرژی مصرف شده در فرایند تولید گندم در روش‌های خاک‌ورزی حفاظتی نسبت به خاک‌ورزی مرسوم کاهش یافت، در حالی که سهم انرژی سموم شیمیایی در این روش‌ها نسبت به خاک‌ورزی مرسوم افزایش یافت. با توجه به این که سوخت و ماشین‌ها در مقایسه با سموم شیمیایی سهم بیشتری از انرژی کل مصرفی در فرایند تولید گندم آبی داشتند، بنابراین کاهش مصرف سوخت و ماشین‌ها در روش‌های خاک‌ورزی حفاظتی منجر به کاهش انرژی مصرفی کل در روش‌های حفاظتی نسبت به خاک‌ورزی مرسوم شد. بیش از ٥٦ درصد از انرژی مصرفی در فرایند تولید گندم در تمام روش‌های خاک‌ورزی، انرژی مستقیم بود.

جدول ۵- سهم انرژی نهاده‌ها از کل انرژی مصرف شده در فرایند تولید گندم تحت روش‌های مختلف خاک‌ورزی

نهاده‌ها	خاک‌ورزی مرسوم		کم‌خاک‌ورزی		بی‌خاک‌ورزی	
	انرژی مصرف شده ($MJ.\ ha^{-1}$)	سهم (%)	انرژی مصرف شده ($MJ.\ ha^{-1}$)	سهم (%)	انرژی مصرف شده ($MJ.\ ha^{-1}$)	سهم (%)
سوخت	۳۹٤۹	٥/۱۹	۲۲۳۲	۳/۲۱	۱٥۸۷	۲/٤۸
الکتریسیته	٤۲۰۰۷	٥٥/۲٤	۳۸۳٥٥	٥٥/۱٤	۳٤۳٥۳	٥۳/٦۸
ماشین	۸٦۰۷	۱۱/۳۲	۷٥۳۸	۱۰/۸٤	٦٦٤۹	۱۰/۳۹
کود	۱٦۳۲۰	۲۱/٤٦	۱٦۳۲۰	۲۳/٤٦	۱٦۳۲۰	۲٥/٥۰
سم	۲۹۹	۰/۳۹	٤۷۰	۰/٦۸	٥۹۹	۰/۹٤
بذر	۲٦۰۰	۳/٤۲	۲٦۰۰	۳/۷٤	۲٦۰۰	٤/۰٦
حمل و نقل	۲۲٦۳	۲/۹۸	۲۰٥۰	۲/۹٥	۱۸۸٥	۲/۹٥
انرژی ورودی کل	۷٦۰٤٥	۱۰۰/۰۰	٦۹٥٦٥	۱۰۰/۰۰	٦۳۹۹۳	۱۰۰/۰۰
انرژی مستقیم	٤٥۹٥٦	٦۰/٤۳	٤۰٥۸۷	٥۸/۳٤	۳٥۹٤۰	٥٦/۱٦
انرژی غیرمستقیم	۳۰۰۸۹	۳۹/٥۷	۲۸۹۷۷	٤۱/٦٦	۲۸۰٥۳	٤۳/۸٤

روش آبیاری اثر معنی‌داری بر مجموع گازهای گلخانه‌ای متصاعد شده در فرایند تولید گندم آبی داشت و تفاوت هر سه روش آبیاری از نظر این شاخص معنی‌دار بود (جدول ٦). آبیاری سطحی بیشترین مقدار گازهای گلخانه‌ای متصاعد شده را داشت (۱٦۸۸۹ کیلوگرم دی اکسیدکربن معادل در هکتار) و آبیاری بارانی (۱۳۳۰۰ کیلوگرم دی اکسیدکربن معادل در هکتار) و قطره‌ای نواری (۱۱۰۹٤ کیلوگرم دی اکسیدکربن معادل در هکتار) به ترتیب در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. بنابراین روش‌های آبیاری بارانی و قطره‌ای نواری مقدار گازهای گلخانه‌ای متصاعد شده را نسبت به آبیاری سطحی به ترتیب ۲۱/۳ و ۳٤/۳ درصد کاهش دادند. دلیل

اصلی کاهش مقدار گازهای گلخانه‌ای منتشر شده در روش‌های آبیاری تحت فشار نسبت به آبیاری سطحی، مصرف آب کمتر در این روش‌ها می‌باشد که باعث کاهش الکتریسته مورد نیاز برای استحصال آب شده است. کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در روش‌های آبیاری تحت فشار نسبت به آبیاری سحطی در نتایج تحقیقات گذشته نیز گزارش شده است (یه و همکاران ۲۰۲۰ و اسپاکوتا و همکاران ۲۰۲۰). آبیاری قطره‌ای نواری دارای کمترین شدت انتشار گازهای گلخانه‌ای بود (۲/٤۸ کیلوگرم دی اکسیدکربن معادل بر کیلوگرم گندم) و از این نظر با دو روش دیگر اختلاف معنی‌دار داشت، اما اختلاف بین آبیاری بارانی و سطحی معنی‌دار نبود. در آبیاری بارانی علیرغم این که مجموع گازهای گلخانه‌ای متصاعد شده به طور معنی‌داری کمتر از آبیاری سطحی بود، اما شدت انتشار گازهای گلخانه‌ای در این دو روش به هم نزدیک بود و اختلاف معنی‌دار نداشت که دلیل آن عملکرد بیشتر محصول در آبیاری سطحی نسبت به آبیاری بارانی بود.

جدول ۶- مقایسه میانگین مجموع و شدت گازهای گلخانه‌ای منتشر شده در تیمارهای مختلف

روش‌های آبیاری		مجموع گازهای گلخانه‌ای منتشر شده ($kg\ CO_2e.\ ha^{-1}$)	شدت انتشار گازهای گلخانه‌ای ($kg\ CO_2e\ .kg^{-1}dry\ grain$)
بارانی		۱۳۳۰۰ b	۳/۵۰ a
قطره‌ای نواری		۱۱۰۹٤ c	۲/٤۸ b
سطحی		۱٦۸۸۹ a	۳/٦٤ a
روش‌های خاک‌ورزی		-	-
مرسوم		۱۳۸٤۳ a	۲/۸۹ b
کم‌خاک‌ورزی		۱۳۷۳۲ a	۳/۱٦ b
بی‌خاک‌ورزی		۱۳۷۰۷ a	۳/۵٦ a
اثر متقابل آبیاری و خاک‌ورزی		-	-
بارانی	مرسوم	۱۳۳۸۲ b	۳/۳۰ b
بارانی	کم‌خاک‌ورزی	۱۳۲۷۱ b	۳/۲٤ b
بارانی	بی‌خاک‌ورزی	۱۳۲٤٦ b	۳/۹۵ b
قطره‌ای	مرسوم	۱۱۱۷٦ c	۲/۲۰ c
قطره‌ای	کم‌خاک‌ورزی	۱۱۰٦۵ c	۲/٦۵ c
قطره‌ای	بی‌خاک‌ورزی	۱۱۰٤۰ c	۲/۵۸ c
سطحی	مرسوم	۱٦۹۷۱ a	۳/۱٦ a
سطحی	کم‌خاک‌ورزی	۱٦۸٦۰ a	۳/۵۹ a
سطحی	بی‌خاک‌ورزی	۱٦۸۳۵ a	٤/۱۷ a

حروف متفاوت در هر ستون نشان دهنده اختلاف معنی‌دار بین اعداد آن ستون بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن است.

روش خاک‌ورزی اثر معنی‌داری بر مقدار گازهای گلخانه‌ای متصاعد شده نداشت، اما شدت انتشار گازهای گلخانه‌ای تحت تأثیر معنی‌دار روش خاک‌ورزی قرار گرفت (جدول ٦). با توجه به این که روش‌های خاک‌ورزی حفاظتی با کاهش مصرف انرژی سوخت و ماشین‌ها و افزایش مصرف انرژی سموم شیمیایی نهایتاً انرژی مصرفی در تولید گندم آبی را کاهش معنی‌دار دادند، انتظار این بود که مقدار گازهای گلخانه‌ای در این روش‌ها نیز نسبت به روش مرسوم کاهش معنی‌داری داشته باشد، اما این گونه نشد. دلیل این امر، نقش بیشتر سموم شیمیایی نسبت به سوخت و ماشین‌ها در تولید گازهای گلخانه‌ای بود. عدم تأثیر معنی‌دار روش خاک‌ورزی بر

مجموع گازهای گلخانه‌ای منتشر شده در تولید گندم در نتایج تحقیقات گذشته نیز گزارش شده‌است (کراوس و همکاران ۲۰۱۷ و بنک و همکاران ۲۰۱۸). خاک‌ورزی مرسوم کمترین شدت انتشار گازهای گلخانه‌ای را داشت و از این نظر با بی‌خاک‌ورزی اختلاف معنی‌دار داشت، اما اختلاف بین کم‌خاک‌ورزی و خاک‌ورزی مرسوم معنی‌دار نبود. کاهش معنی‌دار شدت انتشار گازهای گلخانه‌ای در روش‌های خاک‌ورزی مرسوم و کم‌خاک‌ورزی نسبت به بی‌خاک‌ورزی علیرغم یکسان بودن مجموع گازهای گلخانه‌ای آنها (از نظر آماری)، عملکرد بیشتر گندم در این روش‌ها نسبت به بی‌خاک‌ورزی بود. بررسی اثر متقابل روش آبیاری و خاک‌ورزی بر انتشار گازهای گلخانه‌ای نیز نشان داد که ترکیب آبیاری قطره‌ای با تمامی روش‌های خاک‌ورزی کمترین مقدار انتشار گازهای گلخانه‌ای و شدت انتشار آنها را داشتند.

در هر سه روش خاک‌ورزی، الکتریسیته برای استحصال آب آبیاری بیشترین سهم (بیش از ۷۶ درصد) را از مجموع گازهای گلخانه‌ای منتشر شده در فرایند تولید گندم آبی داشت و اکسید نیتروژن متصاعد شده از کود ازته رتبه دوم را به خود اختصاص داد (جدول ۷). نتایج نشان داد که در فرایند تولید گندم آبی تحت هر سه روش خاک‌ورزی، آبیاری تعیین کننده‌ترین عامل در تولید گازهای گلخانه‌ای است، بنابراین سیاست‌های کنترل آلودگی محیط زیست در تولید این محصول باید بر استفاده از روش‌های آبیاری با راندمان بالا متمرکز شود. در روش‌های خاک‌ورزی حفاظتی نسبت به خاک‌ورزی مرسوم، سهم سوخت‌های فسیلی و ماشین‌ها از مجموع گازهای گلخانه‌ای منتشر شده کاهش یافت، اما سهم مواد شیمیایی افزایش یافت.

جدول ۷- سهم نهاده‌های مختلف از مجموع گازهای گلخانه‌ای منتشر شده در تیمارهای مختلف خاک‌ورزی

منابع انتشار	خاک‌ورزی مرسوم		کم‌خاک‌ورزی		بی‌خاک‌ورزی	
	انتشار گاز گلخانه‌ای ($kg\ CO_2e.\ ha^{-1}$)	سهم (%)	انتشار گاز گلخانه‌ای ($kg\ CO_2e.\ ha^{-1}$)	سهم (%)	انتشار گاز گلخانه‌ای ($kg\ CO_2e.\ ha^{-1}$)	سهم (%)
سوخت‌های فسیلی	۲۶۰	۱/۸۸	۱۴۷	۱/۰۷	۱۰۵	۰/۷۶
مواد شیمیایی	۱۰۴۴	۷/۵۴	۱۰۹۳	۷/۹۶	۱۱۳۰	۸/۲۵
اکسید نیتروژن متصاعد شده از کود ازته	۱۸۰۸	۱۳/۰۶	۱۸۰۸	۱۳/۱۶	۱۸۰۸	۱۳/۱۹
الکتریسیته برای پمپاژ آب	۱۰۶۱۱	۷۶/۶۵	۱۰۶۱۱	۷۷/۲۷	۱۰۶۱۱	۷۷/۴۱
تولید ماشین‌های کشاورزی	۱۱۹	۰/۸۶	۷۲	۰/۵۳	۵۳	۰/۳۹
مجموع گازهای گلخانهای متصاعد شده	۱۳۸۴۳	۱۰۰/۰۰	۱۳۷۳۲	۱۰۰/۰۰	۱۳۷۰۷	۱۰۰/۰۰

سهم الکتریسیته برای استحصال آب آبیاری از مجموع گازهای گلخانه‌ای منتشر شده در فرایند تولید گندم آبی از ۸۱/۳۵ درصد در آبیاری سطحی به ۷۱/۶۱ درصد در آبیاری قطره‌ای نواری کاهش یافت که نشان دهنده نقش تعیین کننده روش آبیاری با راندمان بالا در کنترل آلودگی محیط زیست است (جدول ۸). همچنین در روش‌های آبیاری قطره‌ای نواری و آبیاری بارانی نسبت به آبیاری سطحی، گازهای گلخانه‌ای منشتر شده از مصرف الکتریسیته به ترتیب ۴۲/۲ و ۲۶/۱ درصد کاهش یافت. بنابراین استفاده از روش‌های آبیاری تحت فشار در تولید گندم آبی یکی از راهکارهای کاهش آلودگی محیط زیست می‌باشد.

جدول ۸- سهم نهاده‌های مختلف از مجموع گازهای گلخانه‌ای منتشر شده تحت روش‌های مختلف آبیاری

منابع انتشار	آبیاری بارانی		آبیاری قطره‌ای نواری		آبیاری سطحی	
	انتشار گاز گلخانه‌ای ($kg\ CO_2e.\ ha^{-1}$)	سهم (%)	انتشار گاز گلخانه‌ای ($kg\ CO_2e.\ ha^{-1}$)	سهم (%)	انتشار گاز گلخانه‌ای ($kg\ CO_2e.\ ha^{-1}$)	سهم (%)
سوخت‌های فسیلی	۱۷۱	۱/۲۸	۱۷۱	۱/۵٤	۱۷۱	۱/۰۱
مواد شیمیایی	۱۰۸۹	۸/۱۹	۱۰۸۹	۹/۸۲	۱۰۸۹	٦/٤٥
اکسید نیتروژن متصاعد شده از کود ازته	۱۸۰۸	۱۳/۵۹	۱۸۰۸	۱٦/۳۰	۱۸۰۸	۱۰/۷۰
الکتریسیته برای پمپاژ آب	۱۰۱۵۰	۷٦/۳۲	۷۹٤٤	۷۱/٦۱	۱۳۷۳۹	۸۱/۳۵
تولید ماشین‌های کشاورزی	۸۲	۰/٦۱	۸۲	۰/۷٤	۸۲	۰/٤۸
مجموع گازهای گلخانه‌ای	۱۳۳۰۰	۱۰۰/۰۰	۱۱۰۹٤	۱۰۰/۰۰	۱٦۸۸۹	۱۰۰/۰۰

نتیجه‌گیری

در این پژوهش مصرف انرژی و تولید گازهای گلخانه‌ای در فرایند تولید گندم آبی تحت روش‌های مختلف خاک‌ورزی و آبیاری بررسی شد. بر اساس نتایج این پژوهش، موارد زیر را می توان نتیجه گرفت:

۱- روش آبیاری اثر معنی‌داری بر انرژی مصرفی، انرژی تولیدی و شاخص‌های انرژی در فرایند تولید گندم آبی دارد، به گونه‌ای که آبیاری قطره‌ای نواری دارای کمترین انرژی مصرفی و شدت انرژی و بیشترین انرژی تولیدی، نسبت انرژی و بهره‌وری انرژی است و آبیاری سطحی و بارانی در رتبه‌های بعدی قرار دارند. بنابراین جایگزینی آبیاری سطحی با آبیاری قطره‌ای نواری انرژی مصرفی را ۳۰/۵ درصد کاهش و انرژی تولیدی خالص را ۳٦ درصد افزایش می دهد، ضمن این که سایر شاخص‌های انرژی را نیز بهبود می بخشد.

۲- انرژی مصرفی و انرژی تولیدی تحت تأثیر معنی‌دار روش خاک‌ورزی قرار می‌گیرد، به طوری که کمترین انرژی مصرفی و تولیدی مربوط به بی‌خاک‌ورزی و بیشترین انرژی مصرفی و تولیدی مربوط به خاک‌ورزی مرسوم می باشد. روش بی‌خاک‌ورزی علیرغم کاهش انرژی مصرفی در تولید گندم آبی، به دلیل عملکرد کمتر محصول و در نتیجه انرژی تولیدی کمتر، بهره‌وری انرژی را در تولید این محصول افزایش نمی‌دهد. بنابراین برای استفاده از مزیت کاهش انرژی مصرفی در بی‌خاک‌ورزی، باید با مدیریت مناسب اجرای بی‌خاک‌ورزی به ویژه مدیریت درست بقایای گیاهی، تلاش‌ها بر روی افزایش عملکرد محصول در این روش خاک‌ورزی متمرکز شود. در این صورت با ترکیب تیمار بی‌خاک‌ورزی و آبیاری قطره‌ای نواری در تولید گندم آبی، می توان بهترین بهره‌وری مصرف انرژی را به دست آورد.

۳- روش آبیاری اثر معنی‌داری بر مجموع گازهای گلخانه‌ای منتشر شده و شدت انتشار آنها در فرایند تولید گندم آبی دارد، به گونه‌ای که آبیاری قطره‌ای نواری مقدار و شدت انتشار گازهای گلخانه‌ای را نسبت به آبیاری سطحی به ترتیب ۳٤/۳ و ۳۱/۹ درصد کاهش می دهد. بنابراین استفاده از روش‌های آبیاری تحت فشار به ویژه آبیاری قطره‌ای نواری در تولید گندم آبی در کنترل آلودگی محیط زیست بسیار مؤثر است.

٤- با توجه به این که ترکیب روش بی‌خاک‌ورزی و آبیاری قطره‌ای نواری در تولید گندم آبی دارای کمترین انرژی مصرفی و گازهای گلخانه‌ای متصاعد شده است، بنابراین با مدیریت مناسب اجرای این روش خاک‌ورزی به ویژه مدیریت درست بقایای گیاهی، همه تلاش‌ها باید بر

افزایش عملکرد محصول در این روش خاک‌ورزی و رساندن آن به سطح عملکرد در خاک‌ورزی مرسوم متمرکز شود. در این صورت انرژی تولیدی در این روش خاک‌ورزی نیز افزایش یافته و بهره‌وری مصرف انرژی بهبود می‌یابد.

سپاسگزاری

از سازمان جهاد کشاورزی استان فارس به خاطر حمایت مالی از این تحقیق، تشکر و قدردانی می‌شود.

منابع مورد استفاده

Anonymous. 2018. Australian National Greenhouse Accounts: National Greenhouse Accounts Factors. Canberra: Commonwealth of Australia. Retrieved from: http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/au.

Baillie C. 2009. Energy and carbon accounting case study on Keytah, a project report for the Cotton

Research and Development Corporation CRDC. National Centre for Engineering in Agriculture, University of Southern Queensland, Toowoomba.

Behnke, GD, Zuber SM, Pittelkow CM, Nafziger ED, María B and Villamil MB. 2018. Long-term crop

rotation and tillage effects on soil greenhouse gas emissions and crop production in Illinois, USA. Agriculture, Ecosystems and. Environment, 261: 62-70.

Biswas WK, Barton L and Carter D. 2008. Global warming potential of wheat production in Western Australia: a life cycle assessment. Water and Environment Journal, 22: 6-16.

Biswas WK, Graham J, Kelly K and John MB. 2010. Global warming contributions from wheat, sheep meat

and wool production in Victoria, Australia: a life cycle assessment. Journal of Cleaner Production, 18 (14): 1386-1392.

Chen G and Baillie C. 2009. Development of a framework and tool to assess on-farm energy uses of cotton Production. Energy Conversion and Management, 50(5): 1256-1263.

Chen G, Kupke P and Baillie C. 2008. Opportunities to enhance energy efficiency and minimise greenhouse

Gases in Queensland's intensive agricultural sector, in A Knapp & P Perkins (eds). Improving the Capacity of Queensland Intensive Agriculture to Manage Climate Change, Queensland Farmer's Federation, and Brisbane.

Chen G, Maraseni T, Banhazi T and Bundschuh J. 2015. Benchmarking energy use on farm. RIRDC Publication No 15/059, pp 120.

Khan S, Khan MA and Latif N. 2010. Energy requirements and economic analysis of wheat, rice and barley Production in Australia. Soil Environment, 29(1): 61-68.

Khoshnevisan B, Rafiee Sh, Omid M, Yousefi M and Movahedi M. 2013. Modelling of energy

consumption and GHG (greenhouse gas) emissions in wheat production in Esfahan province of Iran using artificial neural networks. Energy, 52: 333-338.

Kitani O, Jungbluth T, Peart RM and Ramdani A. 1999. CIGR Handbook of Agricultural Engineers, Energy and Biomass Engineering. vol. 5, ASAE Publication, MI.

Krauss M, Ruser R, Müller T, Hansen S, Mäder P and Gattinger A. 2017. Impact of reduced tillage on

Greenhouse gas emissions and soil carbon stocks in an organic grass-clover ley-winter wheat cropping sequence. Agriculture, Ecosystems and. Environment, 239: 324-333.

Lal R. 2004. Carbon emission from farm operation. Environment International, 30, 981-990.

Maraseni TN and Cockfield G. 2011. Does the adoption of zero tillage reduce greenhouse gas emissions? An Assessment for the grains industry in Australia. Agricultural Systems, 104: 451-458.

Maraseni TN, Cockfield G and Apan A. 2007. A comparison of greenhouse gas emissions from inputs into farm enterprises in Southeast Queensland, Australia. Journal of Environmental Science and Health, Part A, 42: 11-19.

Maraseni TN, Cockfield G and Maroulis J. 2010. An assessment of greenhouse gas emissions: implications for the Australian cotton industry. Journal of Agricultural Science, 148: 501-510.

Maysami M and Jalali A. 2020. Evaluation of energy input-output in wheat crop cultivation in agro-industry Company of Mazare Novin Iranian (Agh Ghalla). Agricultural Science and Sustainable Production, 30(2): 333-346. (In Persian).

O'Halloran NJ, Fisher PD and Rab MA. 2008. Vegetable industry carbon footprint scoping study Preliminary estimation of the carbon footprint of the Australian vegetable industry. Discussion Paper 4. Sydney: Horticulture Australia Ltd.

Pishgar KSH, Keyhani A, Rafiee Sh and Sefeedpary P. 2011. Energy use and economic analysis of corn Silage production under three cultivated area levels in Tehran province of Iran. Energy, 36: 3335-3341.

Rafiee S, Mousavi-Avval SH and Mohammadi A. 2010. Modeling and sensitivity analysis of energy inputs for apple production in Iran. Energy, 35: 3301-3306.

Safa M and Samarasinghe S. 2011. Determination and modelling of energy consumption in wheat production using neural networks: A case study in Canterbury province, New Zealand. Energy, 36 (8): 5140-5147.

Sandell GR, Hopf J, Chen G and Yusaf T. 2014. The feasibility and development of alternative energy sources for cotton. National Centre for Engineering in Agriculture, Publication 1004527/1, USQ, Toowoomba.

Shahin S, Jafari A, Mobli H, Rafiee S and Karimi M. 2008. Effect of farm size on energy ratio for wheat Production: A case study from Ardabil province of Iran. American-Eurasian Journal of Agricultural & Environmental Sciences, 3(4): 604-608.

Sims REH and Flammini A. 2014. Energy-smart food-technologies, practices and policies. In Bundschuh, J. and Chen, G. (eds). Sustainable Energy Solutions in Agriculture, CRC Press, Taylor & Francis Books.

Spakota A, Haghverdi A, Avila CCE and Ying SC. 2020. Irrigation and greenhouse gas emissions: A review of field-based studies. Soil Systems, 4(20): 1-21.

Tongwane M, Mdlambuzi Th, Moeletsi M, Tsubo M, Mliswa V and Grootboom L. 2016. Greenhouse gas Emissions from different crop production and management practices in South Africa. Environmental Development, 19: 23-35.

Ye X, Li H, Zhang X, Ma J, Han B, Li W, Zou H, Zhang Y and Lin X. 2020. Impacts of irrigation methods on greenhouse gas emissions/absorptions from vegetable soils. Journal of Soils and Sediments, 20: 723-733.

Yildiz T. 2016. An input-output energy analysis of wheat production in Çarşamba district of Samsun Province. Journal of Agricultural Faculty of Gaziosmanpasa University, 33(3): 10-20.