نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۶، جلد ۱۹، بهمن - اسفند ۱۴۰۴، ص. ۱۰۳۱-۱۰۱۹

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 6, Vol. 19, Feb.-Mar. 2026, p. 1019-1031

مقاله علمی-پژوهشی

تحلیل کارایی انرژی در دو سامانه آبیاری بارانی در تولید سیب‌زمینی دشت‌های دهگلان استان کردستان

پیمان طهماسبی[1*]، حمید زارع ابیانه[2]، موسی اکبری پارسا[3]، کیوان طهماسبی[4]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۱۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۱۹

چکیده:

سیب‌زمینی به‌عنوان محصولی استراتژیک، به‌دلیل وابستگی تولید آن به نهاده‌های انرژی‌بر، نیازمند بررسی دقیق در زمینه مصرف انرژی است.هدف از این پژوهش ارزیابی الگو انرژی مصرفی محصول سیب‌زمینی در دو سامانه آبیاری بارانی کلاسیک ثابت با آبپاش‌های متحرک (سامانه A) و ویلموو (سامانه B)، است. اطلاعات مورد نیاز، شامل کل نهاده‌های ورودی (مصرفی) اعم از ساعات کارکرد ماشین‌ها، آب آبیاری، الکتریسیته مصرفی، کود مرغی، نیروی انسانی و غیره به‌صورت کاملاً تصادفی در ۴۰ مزرعه انتخابی به مساحت ۶۳ هکتار؛ در قالب پرسشنامه از کشاورزان در دشت‌های شهرستان دهگلان در طول فصل زراعی ۱۴۰۰-۱۴۰۱ استخراج شد. در پایان فصل آبی، میزان برق مصرفی مزارع در واحد هکتار از شرکت برق منطقه‌ای شهرستان مذکور، دریافت شد. مقدار کل انرژی‌های ورودی در سامانه A و B به‌ترتیب ۱۳۰۶۹۸/۰۶ و ۱۶۱۴۲۳/۷۷ مگاژول در هکتار محاسبه گردید. مقدار انرژی خروجی در دو سامانه A و B به‌ترتیب ۱۳۶۸۰۰ و ۱۴۷۶۰۰ مگاژول در هکتار محاسبه شد. بر این اساس مقادیر شاخص کارایی انرژی مصرفی در دو سامانه A و B به‌ترتیب ۱/۰۴ و ۰/۹۱ به‌دست آمد. سهم انرژی مستقیم در دو سامانه A و B، ۸۳۵۵۱/۱۵ و ۱۱۴۰۱۰/۳۸ مگاژول در هکتار و همچنین سهم انرژی‌های تجدیدپذیر که یکی از معیارهای پایداری بوم نظامی کشاورزی است، در سامانه A و B به‌ترتیب ۱۵۶۳۱/۸۸ و ۱۷۰۵۴/۵۶ مگاژول در هکتار برآورد شد. در کل با توجه به نتایج در دشت‌های شهرستان دهگلان به لحاظ جنبه‌های مصرف انرژی به‌نظر می‌رسد سامانه آبیاری بارانی کلاسیک ثابت با آبپاش‌های متحرک کاراتر از سامانه آبیاری بارانی ویلموو می‌باشد.

واژه های کلیدی: انرژی ورودی و خروجی، الکتریسیته، بهره‌وری آب، کود مرغی، ویلموو

مقدمه

سیب‌زمینی (Solanum tuberosum L.) به‌عنوان یکی از محصولات استراتژیک کشاورزی، جایگاه ویژه‌ای در تأمین امنیت غذایی جهان دارد و پس از برنج و گندم، سومین محصول پرمصرف در سطح جهانی محسوب می‌شود. در یک دهه اخیر، روند تولید این محصول به‌طور چشم‌گیری رو به افزایش بوده و کشورهای آسیایی با سهم غالب خود، بر بازار جهانی سیب‌زمینی تسلط یافته‌اند (Eyvazov and Aghayev., 2025). سطح زیرکشت سیب‌زمینی در جهان در حدود ۱۷/۳۴ میلیون هکتار برآورد شده است که از این میزان، سالانه نزدیک به ۳۷۰ میلیون تن سیب‌زمینی برداشت می‌شود. بر اساس داده‌های آماری منتشرشده، ایران با تولید تقریبی پنج میلیون تن سیب‌زمینی، در جایگاه سیزدهم تولیدکننده بزرگ این محصول در جهان قرار دارد (FAOSTAT., 2024). بر اساس آمارهای دریافتی از سازمان جهاد کشاورزی استان کردستان در سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۲ مساحت کشت سیب‌زمینی ۷۳۶۴ هکتار با تولید ۲۸۲۸۲۶ تن بود. استان کردستان بر اساس آمار سال زراعی ۱۴۰۰-۱۴۰۱ به لحاظ سهم سطح زیر کشت، تولید و عملکرد سیب‌زمینی به‌ترتیب رتبه‌های یازدهم، یازدهم و بیست‌ویکم را در کشور داشت (وزارت جهات

۱- دانشجوی دکتری گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان، ایران
۲- استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان، ایران
۳- کارشناس آزمایشگاه تحقیقاتی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان. ایران
۴- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران
(*- نویسنده مسئول: (Email: p.tahmaseni@agr.basu.ac.ir
DOI: 10.22034/idj.2025.538450.2617

کشاورزی، ۱۴۰۱). بر اساس اطلاعات آماری موجود، سیب‌زمینی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین و اساسی‌ترین محصولات زراعی استان کردستان محسوب می‌شود که به‌طور مستمر و در سطحی گسترده، به‌ویژه در دشت‌های حاصلخیز شهرستان دهگلان، کشت می‌گردد (طهماسبی و همکاران، ۱۴۰۳). با توجه به نقش برجسته این محصول در اقتصاد منطقه، اهمیت آن در تأمین امنیت غذایی و اثرات اجتماعی گسترده‌ای که به همراه دارد، مطالعه و تعیین شاخص‌های الگوی مصرف انرژی در فرایند تولید سیب‌زمینی در این استان، امری ضروری و اجتناب‌ناپذیر است.

منابع آب شیرین به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عناصر زندگی بر روی زمین، نیازمند مدیریت صحیح است (طهماسبی، ۱۴۰۳). رشد تصاعدی جمعیت و شتاب در فرآیندهای توسعه اقتصادی، منجر به اعمال فشارهای فزاینده و چندبعدی بر منابع محدود آب شیرین شده است؛ به‌طوری که تأمین پایدار این منبع راهبردی، همراه با مدیریت بهینه انرژی مورد نیاز برای استخراج، انتقال و بهره‌برداری از آن، به یکی از اساسی‌ترین و چالش‌برانگیزترین مسائل راهبردی جوامع انسانی در قرن بیست‌ویکم تبدیل گردیده است (طهماسبی، ۱۴۰۳؛ فرزام‌نیا و همکاران، ۱۴۰۲). فرآیند تولید محصولات کشاورزی به‌شدت وابسته به جریان انرژی ورودی در سطح مزرعه است؛ به‌عبارتی، کارایی و پایداری تولید تابعی از نحوه تأمین و مصرف انرژی در مراحل مختلف کشت و بهره‌برداری می‌باشد (طهماسبی و همکاران، ۱۴۰۳). بخش کشاورزی علاوه بر آن‌که به‌عنوان یکی از منابع بالقوه تولید انرژی به‌ویژه از طریق زیست‌توده و پسماندهای زراعی مطرح است، در عین حال، یکی از بزرگ‌ترین مصرف‌کنندگان انرژی در مقیاس جهانی نیز به‌شمار می‌رود (Bathaei and Štreimikienė., 2023). ازاین‌رو بخش کشاورزی و انرژی متأثر از هم‌دیگر می‌باشند (نراقی و همکاران، ۱۴۰۰؛ طایی‌سمیرمی و همکاران، ۱۴۰۲). انرژی یکی از شاخص‌های کلیدی در تولید محصولات کشاورزی به‌شمار می‌آید و بهره‌وری انرژی در این بخش، به مقدار تولید محصول به میزان انرژی مصرفی تعریف می‌شود. کشاورزی پایدار مستلزم تلاش مستمر برای افزایش بهره‌وری انرژی و بهبود کارایی مصرف آن است (الماسی و همکاران، ۱۳۸۷). مصرف انرژی در بخش کشاورزی ایران در سال ۱۳۸۰ حدود ۳۰/۳۵ میلیون بشکه معادل نفت خام بوده که این مقدار در سال ۱۳۹۰ به ۴۰/۶۸ میلیون بشکه معادل نفت خام افزایش یافته است. سهم بخش کشاورزی از کل مصرف انرژی در ایران در حدود ۳/۷۲ درصد گزارش شده است (بی‌نام، ۱۳۹۰). آبیاری به‌عنوان یکی از پرمصرف‌ترین نهاده‌های انرژی در تولیدات کشاورزی محسوب می‌شود (طهماسبی و زارع ابیانه، ۱۴۰۴). این موضوع به‌ویژه در سامانه‌های آبیاری تحت فشار مطرح است و طراحان باید بررسی‌های لازم را در این زمینه انجام داده و نیاز انرژی سامانه را در فرآیند طراحی به‌درستی تعیین کنند (FAO., 2002). متأسفانه در کشور ایران، هدف اصلی تولیدکنندگان بخش کشاورزی غالباً بیشینه‌سازی سود از طریق افزایش عملکرد محصول به حداکثر ممکن با بهره‌گیری هرچه بیش‌تر از نهاده‌های در دسترس است که این رویکرد منجر به مصرف بی‌رویه منابع می‌شود (فرزام‌نیا و همکاران، ۱۴۰۲). در حالی‌که افزایش بهره‌وری آب و انرژی، علاوه بر حفظ تعادل در مصرف نهاده‌ها و سطح تولید، موجب کاهش هزینه‌های اقتصادی و اجتماعی، و همچنین کاهش مخاطرات زیست‌محیطی در فرآیند تولید محصولات کشاورزی خواهد شد (طهماسبی و همکاران، ۱۴۰۴). زیرا استفاده کارا از منابع انرژی مصرف‌شده در تولید محصولات کشاورزی، یکی از مولفه‌های اصلی کشاورزی پایدار است (طهماسبی و همکاران، ۱۴۰۳). انرژی در حوضه کشاورزی به چهار دسته کلی طبقه‌بندی شده‌اند (Vahedi & Zarifneshat, 2021) : انرژی مستقیم، انرژی غیرمستقیم، انرژی تجدیدپذیر و انرژی تجدیدناپذیر؛ انرژی مستقیم به انرژی‌هایی اطلاق می‌شود که به‌طور مستقیم در مزرعه مورد استفاده قرار می‌گیرند؛ از جمله نیروی کار انسانی، سوخت مصرفی ماشین‌آلات و تجهیزات، و انرژی مورد نیاز برای آبیاری. در مقابل، انرژی غیرمستقیم مربوط به انرژی مصرف‌شده در تولید نهاده‌های کشاورزی مانند کودهای شیمیایی، سموم، بذر و ماشین‌آلات است که به‌طور غیرمستقیم در فرایند تولید نقش دارند. انرژی تجدیدپذیر شامل منابعی نظیر نیروی انسانی، آب، کودهای حیوانی و بذر می‌شود که قابلیت تجدید طبیعی دارند. در حالی‌که انرژی تجدیدناپذیر، نظیر سوخت‌های فسیلی، انرژی نهفته در تولید کودها و سموم شیمیایی، و انرژی مورد نیاز برای ساخت تجهیزات و تولید برق، منابعی محدود هستند که مصرف مداوم آن‌ها موجب کاهش ذخایر طبیعی خواهد شد. در فرآیند تولید محصولات کشاورزی، نهاده‌های انرژی‌بر نظیر سوخت، برق، ماشین‌آلات، بذر، کود و سموم، سهم چشم‌گیری از مصرف کل انرژی را به خود اختصاص می‌دهند. این نهاده‌ها نقش اساسی در بهره‌وری و عملکرد نهایی مزرعه ایفا می‌کنند، اما مصرف بی‌رویه یا مدیریت‌نشده آن‌ها می‌تواند منجر به اتلاف انرژی، افزایش هزینه‌های تولید و آسیب‌های زیست‌محیطی شود (Hamedani et al., 2011). از طرفی مصرف انرژی در کشاورزی با توجه به مصرف کودهای شیمیایی، سوخت‌های فسیلی، ماشین آلات و الکتریسیته برای تولید نهاده‌های مواد غذایی در حال افزایش است (FAO- NEXUS., 2014). آب و انرژی از نهاده‌های اساسی در سامانه‌های تولید کشاورزی محسوب می‌شوند و در کنار غذا، نقش حیاتی در ارتقای کیفیت زندگی انسان دارند (Han et al., 2020). مدیریت هم‌زمان و هماهنگ این سه منبع کلیدی، لازمه دستیابی به پایداری منابع در بخش کشاورزی است (Purwanto et al., 2021). دستیابی به این هدف، مستلزم آگاهی از شاخص‌های بهره‌وری آب و انرژی در سامانه‌های آبیاری است؛ چرا که چنین شناختی زمینه‌ساز استفاده

بهینه و کارآمد از این منابع محدود و ارزشمند خواهد بود (غلامی و همکاران، ۱۳۹۴). در همین راستا، توسعه و به‌کارگیری سامانه‌های نوین آبیاری، گامی مؤثر در جهت ارتقای بهره‌وری مصرف آب بوده است. علاوه بر این، ارزیابی دقیق میزان مصرف آب و انرژی، تعیین بهره‌وری آن‌ها، و تحلیل عملکرد نهاده‌ها در سامانه‌های آبیاری تحت فشار و مقایسه آن با دیگر روش‌های آبیاری، ضرورتی اجتناب‌ناپذیر در مسیر مدیریت پایدار منابع به شمار می‌رود (طهماسبی و همکاران، ۱۴۰۳).

سفره‌های آب زیرزمینی در بسیاری از کشورها از جمله ایران، به‌عنوان یکی از منابع اصلی تأمین آب آبیاری مزارع کشاورزی شناخته می‌شوند (السادات هدایتی و همکاران، ۱۴۰۴). کمبود منابع آب سطحی همراه با عواملی هم‌چون افزایش جمعیت، توسعه شهرنشینی و گسترش مزارع شیلات، منجر به بهره‌برداری بیش از حد از این منابع آبی، به ویژه در استان کردستان، شده است. یکی از دشت‌های حاصلخیز منطقه غرب کشور، دشت دهگلان با وسعت تقریبی ۹۸۳/۸۴ کیلومتر مربع است که در بخش شرقی شهرستان سنندج قرار دارد. در این دشت، بیش از ۹۶۵ حلقه چاه مجاز و غیرمجاز در حال فعالیت است. سامانه‌های آبیاری رایج در دشت دهگلان عمدتاً از نوع بارانی کلاسیک با آبپاش‌های ثابت و متحرک هستند؛ با این حال در برخی نقاط، سامانه‌های بارانی ویل‌موو (لوله‌های چرخ‌دار) و سنترپیوت (بازوی دوار مرکزی) نیز استفاده شده بود. این سامانه‌ها اگرچه از نظر پتانسیل و راندمان آبیاری بسیار مطلوب‌اند، ولی به انرژی زیادی نیاز دارند. در این دشت، تنها منبع تأمین انرژی برای ایستگاه‌های پمپاژ چاه‌های کشاورزی، الکتریسیته در سال زراعی مذکور بود. بنابراین نقش انرژی به‌ویژه الکتریسیته در سامانه‌های آبیاری تحت‌فشار حیاتی است. چرا که افت بی‌رویه سطح آب زیرزمینی، به دلیل استخراج بیش از حد، موجب کاهش تراز ایستابی و در نتیجه افزایش انرژی مورد نیاز برای پمپاژ می‌شود (Bayat et al., 2022). با توجه به روند سالانه کاهش سطح ایستابی، مصرف انرژی پمپاژ نیز رو به افزایش است، از این رو ارتقای کارایی انرژی به یکی از چالش‌های اساسی بخش کشاورزی در آینده‌ای نزدیک تبدیل شده است. برای مدیریت هوشمندانه و بهینه‌سازی مصرف انرژی در این سامانه‌ها، نخستین گام شناسایی و محاسبه نسبت انرژی ورودی به خروجی است؛ زیرا تولیدات کشاورزی و امنیت غذایی ارتباط مستقیم با تأمین انرژی دارند (Gholami et al., 2015). با توجه به نیاز روزافزون جمعیت به منابع غذایی، اولویت باید معطوف به پیاده‌سازی سامانه‌های پایدار با بهره‌وری انرژی بالا باشد. تحلیل جامع سامانه‌های کشاورزی به شناسایی کل انرژی مصرفی کمک می‌کند و امکان حفاظت از منابع محدود مانند زمین، آب و تنوع زیستی را برای نسل‌های آینده فراهم می‌آورد (Pimentel, Pimentel & Food, 1996). در نهایت، سامانه‌های آبیاری زمانی از منظر بهره‌وری انرژی در سطح مطلوب قرار دارند که علاوه بر عملکرد هیدرولیکی مناسب، مصرف انرژی آن‌ها نیز بهینه باشد (Sánchez-Sutil & Cano-Ortega, 2021). مطالعات مختلفی در مورد توازن انرژی در سامانه‌های زراعی به انجام رسیده است: اوزکان و همکاران، به تحلیل انرژی ورودی و خروجی در کشاورزی ترکیه به‌منظور تعیین مصرف انرژی در دوره ۲۰۰۰– ۱۹۷۵ پرداختند. نهاده‌های مورد نظر در محاسبات مصرف انرژی شامل نیروی انسانی، ماشین‌ها، الکتریسیته، گازوئیل، کودهای شیمیایی، بذر و انرژی خروجی شامل ۳۶ محصول کشاورزی بود. نتایج نشان داد که کل انرژی‌های ورودی و خروجی در طی زمان افزایش یافته اما نسبت انرژی خروجی به انرژی ورودی طی زمان کاهش پیدا کرده است. یعنی در حقیقت بخش کشاورزی در مصرف نهاده‌ها به‌صورت کارا عمل نکرده است(Ozkan et al., 2004). طهماسبی و همکاران (۱۴۰۳) در مطالعه‌ای مقایسه‌ای، کارایی انرژی دو سامانه آبیاری بارانی شامل سامانه کلاسیک ثابت–آبپاش متحرک و لوله چرخ‌دار را در کشت گندم آبی دشت دهگلان بررسی کردند. نتایج نشان داد که انرژی‌های ورودی و خروجی برای این دو سامانه به‌ترتیب ۶۹۱۸۹/۰۴ و ۸۵۹۴۳/۹۷ مگاژول در هکتار و ۱۱۰۷۰۰ و ۱۵۰۱۰۰ مگاژول در هکتار بود. بر این اساس، شاخص کارایی مصرف انرژی در این دو روش به‌ترتیب ۱/۶۰ و ۱/۷۵ درصد محاسبه شد. قدمی فیروزآبادی و اکبری (۱۴۰۲) در مطالعه‌ای به ارزیابی تأثیر انواع سامانه‌های آبیاری بر میزان مصرف آب و عملکرد گندم در استان همدان پرداختند. یافته‌های پژوهش نشان داد که میانگین حجم آب مصرفی در سامانه‌های آبیاری قطره‌ای، بارانی و سطحی به‌ترتیب برابر با ۴۱۵۳، ۴۰۹۰ و ۵۹۱۸ مترمکعب در هکتار بوده است. همچنین، عملکرد متوسط گندم در سامانه آبیاری قطره‌ای ۵۵۸۱ کیلوگرم در هکتار و در سامانه‌های بارانی و سطحی به‌ترتیب ۴۳۸۱ و ۳۰۰۰ کیلوگرم در هکتار گزارش شد. آلالی و همکاران مقدار انرژی مصرفی و شاخص‌های مختلف انرژی را برای دو محصول پیاز و سیب‌زمینی، استان الحجاب مراکش را محاسبه کردند، نتایج این پژوهش نشان داد میزان انرژی مصرفی پیاز و سیب‌زمینی به ترتیب ۱۰۷۴۸۳ و ۷۴۲۷۰ مگاژول در هکتار محاسبه گردید (Allali et al., 2017). زاهو و همکاران، طی مطالعه‌ای برروی صرفه‌جویی انرژی و آب آبیاری هنگام استخراج آب از چاه‌ها از دیدگاه پیوند انرژی و آب نشان دادند که ۷۵/۶ میلیارد کیلووات‌ساعت انرژی الکتریکی به دلیل اقدامات صرفه‌جویی در مصارف آب آبیاری، صرفه‌جویی شده است در حالی که کاهش سطح آب زیرزمین منجر به افزایش ۱۷۴/۴ میلیارد کیلووات-ساعت انرژی مصرفی (الکتریسیته) جهت پمپاژ آب از سال ۱۹۸۴ تا ۲۰۱۵ گردیده است (Zaho et al., 2020).

با وجود توجه گسترده به بحران کم‌آبی و رشد سامانه‌های آبیاری تحت‌فشار علل خصوص سامانه‌های آبیاری بارانی در دشت دهگلان استان کردستان، تاکنون پژوهشی درباره روند مصرف انرژی در این

سامانه‌ها انجام نشده است. افت مداوم تراز آبخوان‌ها باعث افزایش چشم‌گیر مصرف برق برای پمپاژ آب شده و سهم انرژی در تولید کشاورزی به‌ویژه محصول استراتژیک منطقه سیب‌زمینی را بالا برده است. بنابراین، این مطالعه با هدف تحلیل الگو مصرف انرژی و تعیین شاخص‌های بهره‌وری انرژی در دو سامانه آبیاری بارانی کلاسیک ثابت با آبپاش‌های متحرک و ویل‌موو (لوله‌های چرخ‌دار) انجام می‌شود تا راه‌کارهایی برای بهینه‌سازی انرژی و افزایش پایداری کشاورزی در این منطقه ارائه دهد.

مواد و روش‌ها

مشخصات جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

شهرستان دهگلان با مساحتی بالغ بر ۱۷۵۰ کیلومتر مربع، یکی از دشت‌های بسیار حاصلخیز استان کردستان به‌شمار می‌آید که نقش کلیدی در توسعه اقتصادی و کشاورزی منطقه ایفا می‌کند. این دشت‌ها که به‌عنوان قطب کشاورزی مکانیزه در غرب کشور شناخته می‌شوند، در فاصله ۴۵ کیلومتری شرق سنندج و در محدوده عرض جغرافیایی ۳۵ تا ۳۵/۵ درجه شمالی و طول جغرافیایی ۴۷/۷ تا ۴۷/۲ درجه شرقی نسبت به نصف‌النهار گرینویچ واقع شده‌اند. میانگین بارش سالانه در این شهرستان بین ۳۵۲ تا ۳۹۶ میلی‌متر بوده و ارتفاع متوسط آن از سطح دریا ۱۸۷۶ متر است. توپوگرافی منطقه عمدتاً ملایم بوده و دامنه ارتفاعات آن ۳۱۹ متر است؛ به‌طوری که بیشینه ارتفاع ۲۰۵۰ متر و کمینه آن ۱۷۳۱ متر ثبت شده است. سطح زیرکشت محصولات زراعی در دهگلان تقریباً ۱۹ هزار هکتار بوده و محصول سیب‌زمینی به عنوان محصول اصلی شناخته می‌شود که برای آبیاری آن از دو سامانه آبیاری بارانی کلاسیک ثابت با آبپاش-های متحرک (سامانه A) و سامانه ویلموو (سامانه B) استفاده می‌گردد.

جدول ۱- هم‌ارزی انرژی برای نهاده‌های ورودی و خروجی ؛(Kitani et al., 1999; طهماسبی و همکاران۱٤۰٤)

انرژی نهاده یا ستانده	واحد	معادل انرژی (مگاژول در واحد)
الف) انرژی نهاده ورودی		
نیروی انسانی	ساعت	۱/۹٦
تراکتور	ساعت	۱۳۸
ماشین‌ها	ساعت	٦۲/۷۰
سوخت گازوئیل	لیتر	٥٦/۳۱
کود نیتروژنه	کیلوگرم	٦٦/۱٤
کود پتاسه	کیلوگرم	۱۱/۱٥
گوگرد	کیلوگرم	۱/۱۲
ریزمغذی‌ها	کیلوگرم یا لیتر	۱۲۰
کود مرغی*	کیلوگرم	۰/٦۰
قارچ‌کش	کیلوگرم	۹۲
علف‌کش	کیلوگرم	۲۳۸
حشره‌کش	کیلوگرم	۱۹۹
آب آبیاری	لیتر یا مترمکعب	۱/۰۲
الکتریسیته	کیلووات-ساعت	۱۱/۹۳
بذر	کیلوگرم	۳/٦۰
ب) انرژی نهاده خروجی		
سیب‌زمینی	کیلوگرم	۳/٦۰

*با توجه به اطلاعات موجود، معادل انرژی کود مرغی به‌طور دقیق در منابع ذکر نشده است. با این حال، با توجه به این‌که کود مرغی حاوی مقادیر بالاتری از نیتروژن، فسفر و پتاسیم نسبت به کودهای حیوانی دیگر مانند کود گاوی است، بنابراین می‌توان تخمین زد که معادل انرژی آن بیش‌تر از کود گاوی (حیوانی) باشد. با توجه به این‌که معادل انرژی کود گاوی حدود ۰/۳ مگاژول بر کیلوگرم است، می‌توان برای کود مرغی مقداری بین ۰/۴ تا ۰/۸مگاژول بر کیلوگرم را به‌عنوان تخمین اولیه در نظر گرفت.

نحوه جمع‌آوری اطلاعات

اطلاعات مورد نیاز تحقیق شامل عملیات زراعی، میزان و نوع نهاده‌های مصرفی و عملکرد محصول سیب‌زمینی در این مطالعه از طریق مراجعه حضوری و تکمیل پرسشنامه، به‌صورت چهره‌به‌چهره توسط کشاورزان مربوطه در منطقه مذکور در سال ۱۴۰۰-۱۴۰۱ تهیه گردید و با استفاده از آمار و اطلاعات سازمان جهاد کشاورزی استان کردستان و نیز باتجربه‌ها، کارشناسان و متخصصان کشت محصول سیب‌زمینی در سطح شهرستان درستی این داده‌ها کنترل گردید. پس از جمع‌آوری داده‌ها برای هر پارامتر میانگین‌گیری شد. در مرحله بعدی داده‌های مربوط به انرژی ورودی و خروجی مورد نیاز برای تولید محصول سیب‌زمینی در هکتار مشخص گردید و برای تبدیل مقادیر مختلف نهاده‌ها (ورودی و خروجی) به واحد انرژی (مگاژول در هکتار) طبق جدول ۱ از ضرایب و هم‌ارزهای استاندارد انرژی استفاده گردید.

برآورد نهاده‌های مصرفی ورودی و خروجی در هر دو سامانه مذکور

در این پژوهش، به‌منظور تحلیل جامع مصرف انرژی در نظام زراعی سیب‌زمینی، کلیه نهاده‌های ورودی از جمله نیروی انسانی، ماشین‌آلات، سوخت، کودهای شیمیایی و آلی، سموم، آب آبیاری، الکتریسیته مصرفی (برق) و بذر مورد ارزیابی قرار گرفتند. ساعات کاری نیروی انسانی در مراحل مختلف از جمله شخم‌زنی، تسطیح، مرزبندی، دیسک‌زنی، آبیاری، کاشت، کودپاشی، سم‌پاشی، برداشت و حمل‌ونقل ثبت و با ضریب ۱/۹۶ مگاژول در ساعت به انرژی معادل تبدیل شد. عملکرد ادوات و ماشین‌آلات کشاورزی از مرحله کاشت تا برداشت و انتقال نیز بررسی شده و میزان سوخت مصرفی آن‌ها در عملیات مختلف مانند شخم، کوددهی، سم‌پاشی، برداشت و حمل‌ونقل به‌دقت اندازه‌گیری و با استفاده از ضرایب تبدیل استاندارد، به مگاژول در هکتار تبدیل گردید. همچنین، مقدار مصرف کودهای شیمیایی، به‌ویژه نیتروژن و فسفر، به‌عنوان عوامل مؤثر در تغذیه گیاه و افزایش عملکرد ثبت و انرژی آن محاسبه شد. در مزارع سیب‌زمینی به‌جای کود دامی از کود مرغی استفاده شد که با توجه به نبود ضریب انرژی مشخص برای آن، ضریبی معادل دو برابر کود دامی (۰/۶ مگاژول در هکتار) با نظر کارشناسان اعمال شد. مصرف سموم شیمیایی شامل قارچ‌کش، علف‌کش و حشره‌کش نیز ثبت و بر اساس نوع و مقدار مصرف، انرژی معادل آن‌ها محاسبه گردید. در خصوص آب آبیاری، منابع تأمین عمدتاً شامل آبخوان‌های زیرزمینی منطقه دهگلان بوده که برای بهره‌برداری از آن‌ها از پمپ‌های الکتریکی استفاده می‌شود؛ داده‌های برق مصرفی این پمپ‌ها از کنتورهای حجمی چاه‌های زراعی استخراج و با ضریب تبدیل انرژی الکتریکی، به مگاژول بر هکتار محاسبه و به‌عنوان یک نهاده مستقل در نظر گرفته شد. بذر مصرفی برای رقم جیلی سیب‌زمینی نیز به‌صورت دقیق در واحد سطح ثبت و انرژی معادل آن محاسبه گردید. در نهایت، عملکرد محصول نهایی به‌عنوان خروجی سامانه تولید در هکتار اندازه‌گیری و در تحلیل نهایی بهره‌وری انرژی لحاظ گردید. همچنین در این پژوهش، با توجه به ماهیت متفاوت برخی از نهاده‌ها که در زمره عوامل تولید غیرمصرفی هم‌چون تجهیزات آبیاری (شامل پمپ، لوله، کمربند، شیر خودکار و سایر ملزومات مشابه) و زمین زراعی به‌عنوان عامل تولید طبیعی، قرار داشتند، از تحلیل انرژی آن‌ها صرف‌نظر شده است. دلیل این تصمیم آن بود که این دسته از نهاده‌ها دارای عمر مفید بلندمدت بوده و در دوره‌های متعدد زراعی بدون نیاز به جایگزینی کامل، مجدداً مورد استفاده قرار می‌گیرند. بنابراین، از آن‌جا که در محاسبه مصرف انرژی این پژوهش تمرکز بر نهاده‌های مصرفی و قابل استهلاک در یک فصل زراعی است، تجهیزات با قابلیت استفاده بلندمدت و زمین که مصرف‌پذیر محسوب نمی‌شوند، در برآورد انرژی وارد نشده‌اند تا دقت تحلیل مصرف واقعی منابع در فصل مورد بررسی حفظ گردد.

سنجه‌های ارزیابی انرژی

با توجه به معادل‌سازی انرژی نهاده‌های مصرفی و تولیدی، شاخص‌های انرژی محاسبه گردید. این شاخص‌ها به‌منظور مقایسه کارایی سامانه‌های مورد مطالعه قرار گرفتند. محاسبات مربوط به این شاخص‌ها با استفاده از روابط ۱ تا ۴ صورت گرفت (Kaab et al., 2024). تمامی داده‌های ثبت‌شده در طول فرآیند زراعی به‌طور گسترده در نرم‌افزار Excel وارد و محاسبات لازم از طریق آن انجام شد. علاوه بر این، سهم هر یک از انواع انرژی‌ها شامل انرژی‌های مستقیم (شامل نیروی انسانی، سوخت دیزل، برق و آب آبیاری)، انرژی‌های غیرمستقیم (شامل سایر نهاده‌های ورودی به جز انرژی‌های مستقیم)، انرژی‌های تجدیدپذیر (شامل نیروی انسانی و بذر می‌شود) و انرژی‌های تجدیدناپذیر (که شامل سایر نهاده‌ها به‌جز انرژی‌های تجدیدپذیر است) محاسبه و ارزیابی گردید.

$$\text{کارایی انرژی} = \frac{\text{مقدار انرژی خروجی (مگاژول در هکتار)}}{\text{مقدار انرژی ورودی (مگاژول در هکتار)}} \quad (۱)$$

$$\text{انرژی خالص (مگاژول در هکتار)} = \text{انرژی خروجی (مگاژول در هکتار)} - \text{انرژی ورودی (مگاژول در هکتار)} \quad (۲)$$

$$\text{بهره‌وری انرژ مصرفی} = \frac{\text{عملکرد محصول (کیلوگرم در هکتار)}}{\text{انرژی ورودی (مگاژول در هکتار)}} \quad (۳)$$

$$\text{انرژی ویژه} \left(\frac{\text{مگاژول در کیلوگرم}}{\text{عملکرد محصول}}\right) = \frac{\text{انرژی ورودی} \left(\frac{\text{مگاژول در هکتار}}{\text{هکتار در کیلوگرم}}\right)}{\text{عملکرد محصول}} \quad (۴)$$

نتایج و بحث:

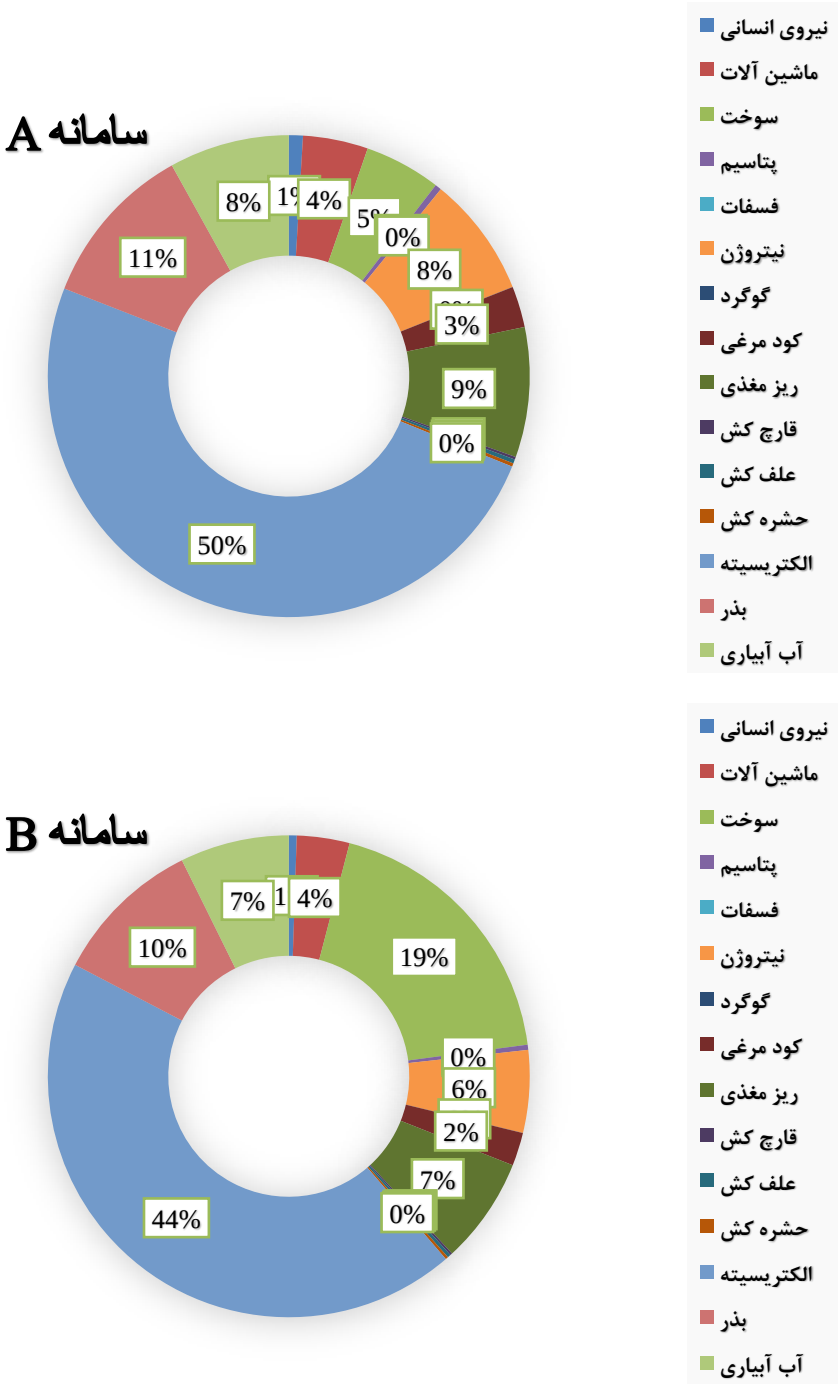
میزان انرژی نهاده‌های مصرفی (ورودی) جهت تولید محصول سیب‌زمینی (گونه جیلی) در دو سامانه آبیاری شامل: سامانه آبیاری بارانی A (سامانه کلاسیک ثابت با آبپاش‌های متحرک و B (سامانه ویلموو)، در جدول ۲ ارائه شده است. همچنین شکل‌های (۱) و (۲) سهم هر یک از نهاده‌های مصرفی (ورودی) را برای تولید محصول سیب‌زمینی مورد در هر دو سامانه را به تفکیک نمایش می‌دهد.

جدول ۲- میزان انرژی مصرفی نهاده‌ها در فرآیند تولید سیب‌زمینی (بر حسب مگاژول در هکتار)

انرژی نهاده‌ها	سیب‌زمینی	
	سامانه A	سامانه B
ورودی‌ها		
نیروی انسانی	۱۲۳۱/۸۸	۸۵۴/۵۶
ماشین‌آلات	۵۷۰۱۰/۳۰	۵۷۰۱۰/۳۰
سوخت (گازئیل)	۶۰۱۱/۲۰	۶۴۷۳/۶۰
نیتروژن	۹۹۲۱	۹۹۲۱
فسفره	۰	۰
پتاسه	۵۵۷/۵۰	۵۵۷/۵۰
گوگرد	۱۱/۲	۱۱/۲
ریزمغذی‌ها	۱۱۴۰۰	۱۱۵۲۰
کود حیوانی	۰	۰
کود مرغی	۳۶۰۰	۳۶۰۰
علف‌کش	۳۵۷	۳۵۷
قارچ‌کش	۲۳۰	۲۳۰
حشره‌کش	۲۹۸/۵۰	۲۹۸/۵۰
بذر سیب‌زمینی	۱۴۴۰۰	۱۶۲۰۰
الکتریسیته	۶۵۰۸۰/۲۳	۷۰۹۴۷/۸۸
آب آبیاری	۱۰۵۳۴/۲۵	۱۱۸۰۰/۹۳
کل انرژی ورودی	۱۸۱۹۹۸/۰۶	۱۶۱۴۲۳/۷۸
خروجی‌ها		
سیب‌زمینی	۱۳۶۸۰۰	۱۴۷۶۰۰
کل انرژی خروجی	۱۳۶۸۰۰	۱۴۷۶۰۰

در سامانه آبیاری A (سامانه آبیاری بارانی کلاسیک ثابت با آبپاش‌های متحرک)، میانگین مجموع انرژی مصرفی (ورودی) برای تولید سیب‌زمینی برابر با ۱۳۰۶۹۸/۰۶ مگاژول در هکتار محاسبه شد که عمده‌ترین سهم آن به انرژی الکتریسیته (برق مصرفی) با ۵۰ درصد (معادل ۶۵۰۸۰/۲۲ مگاژول در هکتار) اختصاص داشت. پس‌از آن، نهاده‌های مصرفی شیمیایی با ۲۰ درصد از کل انرژی ورودی (۲۶۱۵۱/۱ مگاژول در هکتار) در جایگاه دوم قرار گرفتند که در میان آن‌ها، کود نیتروژن و ریزمغذی‌ها به‌ترتیب با مصرف ۸/۰۹ و ۸/۷۲ درصد (معادل ۱۰۵۸۲/۴۰ و ۱۱۴۰۰ مگاژول در هکتار) به‌عنوان پرمصرف‌ترین نهاده شیمیایی شناخته شدند. سهم ترکیبی ماشین‌آلات و سوخت گازوئیل نیز قابل توجه بود و در مجموع ۹/۵۰ درصد (۱۲۴۱۵/۱۰مگاژول در هکتار) از انرژی مصرفی را شامل شد؛ به‌طوری که ماشین‌آلات ۴/۳۶ درصد (۵۷۱۰/۳ مگاژول در هکتار) و سوخت گازوئیل ۵/۱۲ درصد (۶۷۰۴/۸۰ مگاژول در هکتار) از این مقدار را به خود اختصاص دادند. سایر نهاده‌ها شامل بذر (۱۱/۰۱ درصد)، آب آبیاری (۸/۰۵ درصد)، نیروی انسانی (۰/۹۴درصد) و سم-های شیمیایی (۰/۶۷ درصد) به‌ترتیب با ۱۴۴۰۰، ۱۰۵۳۴/۲۵، ۱۲۳۱/۸۸ و ۸۸۵/۵۰ مگاژول در هکتار در رتبه‌های بعدی قرار

داشتند.میانگین عملکرد محصول سیب‌زمینی در سامانه A برابر با ۳۸۰۰۰ کیلوگرم در هکتار و مجموع انرژی خروجی آن معادل ۱۳۶۸۰۰مگاژول در هکتار به‌دست آمد.



شکل ۱- سهم هریک از نهاده‌های مصرفی در تولید محصول سیب‌زمینی سامانه A (سامانه آبیاری کلاسیک ثابت با آبپاش‌های متحرک) و سامانه B (سامانه آبیاری ویلموو)

میانگین کل انرژی مصرفی (ورودی) در هر هکتار کشت سیب‌زمینی در سامانه B (سامانه آبیاری بارانی ویلموو) برابر ۱۶۱۴۲۳/۷۷ مگاژول در هکتار برآورد شد که این مقدار تقریبا ۲۳ درصد بیش‌تر از سامانه A (سامانه آبیاری بارانی کلاسیک ثابت با

آبپاش‌های متحرک) است. در اکثر مزارع میزان انرژی نهاده‌های مصرفی به جزء (انرژی الکتریسیته، نیروی کارگری و آب مصرفی) اکثر نهاده‌های دیگر حدوداً باهم برابر بودند بنابراین اصلی‌ترین عامل تفاوت در میزان انرژی مزارع دو سامانه (A و B) در میزان حجم آب مصرفی (آب آبیاری) و الکتریسیته مصرفی (برق) بود. در سامانه (B)، انرژی الکتریسیته با سهم ۴۴ درصد (۷۰۹۴۷/۸۸ مگاژول در هکتار) بیش‌ترین میزان مصرف انرژی را به خود اختصاص داد و پس از آن نهاده‌های ماشین‌آلات و سوخت با مصرف ۳۶۱۱۷/۳۰ مگاژول در هکتار (۲۲/۳۷ درصد) در رتبه دوم قرار داشتند. کودهای شیمیایی با سهم ۱۵/۲۵ درصد (۲۴۶۱۷/۶۱ مگاژول در هکتار) در رتبه سوم قرار داشتند که در میان کودهای شیمیایی مصرف‌شده، ریزمغذی‌ها با سهم ۷/۱۳ درصد (۱۱۵۲۰ مگاژول در هکتار) و کود نیتروژن با سهم ۵/۵۳ درصد (۸۹۲۸/۹ مگاژول در هکتار) به دلیل مصرف بیش‌تر و ضریب انرژی بالاتر نسبت به سایر کودها، بیش‌ترین سهم را در میان کودها دارا بود. سایر نهاده‌ها شامل بذر مصرفی، آب آبیاری، سموم شیمیایی و نیروی انسانی به ترتیب ۱۰/۰۳، ۷/۳۱، ۰/۵۴ و ۰/۵۲ درصد از کل انرژی ورودی را تشکیل دادند. میانگین عملکرد و انرژی خروجی گندم آبی در سامانه B به‌ترتیب برابر با ۴۱۰۰۰ کیلوگرم در هکتار و ۱۴۷۶۰۰ مگاژول در هکتار گزارش شده است. با توجه به نقش کلیدی نهاده‌هایی نظیر الکتریسیته (برق)، سوخت (گازوئیل)، بذر، آب آبیاری و کودهای شیمیایی در ساختار مصرف انرژی مزارع سیب‌زمینی، مدیریت بهینه و هدفمند این منابع می‌تواند در کاهش مصرف انرژی، افزایش بهره‌وری و کاهش پیامدهای زیست‌محیطی مؤثر واقع شود. الکتریسیته، به‌عنوان منبع اصلی تأمین انرژی برای راه‌اندازی پمپ‌های آبیاری تحت فشار، سهم بالایی از کل انرژی ورودی را به خود اختصاص می‌دهد و مدیریت آن از طریق استفاده از پمپ‌های با راندمان بالا، زمان‌بندی دقیق آبیاری و کاهش تلفات انرژی در مسیر انتقال قابل تحقق است. به‌طور مشابه، آب آبیاری به‌ویژه در مناطق خشک، نهاده‌ای تعیین‌کننده در مصرف انرژی و پایداری تولید محسوب می‌شود و نیازمند بهره‌گیری از سامانه‌های نوین آبیاری، سنجش نیاز آبی گیاه و مدیریت رطوبت خاک برای جلوگیری از اتلاف منابع است. سوخت، به‌عنوان محرک اصلی ماشین‌آلات کشاورزی در تمامی مراحل تولید، نیازمند مدیریت اصولی است که شامل انتخاب تجهیزات با بازده بالا، تنظیم دقیق ادوات، اجرای عملیات زراعی در زمان مناسب و بهره‌گیری از روش‌های کم‌خاک‌ورزی می‌شود. بذر به‌عنوان عنصر کلیدی تولید، نیازمند استفاده از ارقام اصلاح‌شده و با کیفیت و رعایت تراکم بهینه کاشت و نگه‌داری مناسب پیش از کشت است. مدیریت مصرف کودهای شیمیایی نیز مستلزم انجام آزمون خاک، کاربرد توصیه‌های مبتنی بر نیاز واقعی گیاه، بهره‌گیری از کودهای آلی و زیستی، استفاده از روش‌های نوین کودهی و رویکردهای مدیریت تلفیقی آفات و بیماری‌ها با هدف کاهش مصرف بی‌رویه و حفاظت از منابع طبیعی است. در مجموع، اعمال یک نظام مدیریت یکپارچه، هوشمند و متناسب با شرایط اکولوژیک هر مزرعه می‌تواند گامی مؤثر در راستای تولید پایدار سیب‌زمینی باشد. بر اساس مطالعه قادرزاده و پیرمحمدیانی (۱۳۹۸)، متوسط انرژی مصرفی در کشت سیب‌زمینی در دشت‌های همدان ۶۰۷۸۳ مگاژول در هکتار گزارش شد. با این حال، میزان کل انرژی مصرفی در استان‌های مختلف کشور تفاوت قابل‌توجهی دارد؛ به‌عنوان مثال، این مقدار در استان‌های کردستان پایاب سد مخزنی سورال، توسط طهمسبی و همکاران (۱۴۰۴) ۹۲۵۴۷/۱۰ و استان همدان توسط همدانی و همکاران معادل ۹۲۲۹۶ مگاژول در هکتار گزارش شده است (Hamedani., 2011). همچنین در استان گلستان، فیض‌بخش و همکاران (۱۳۹۸) این مقدار را ۸۳۰۰۰ مگاژول و در استان آذربایجان شرقی، ایزدخواه شیشوان و همکاران (۱۳۸۹) به‌ترتیب برای سامانه‌های متداول و مکانیزه ۶۰۷۸۳ و ۵۲۶۳۵ مگاژول در هکتار اعلام کرده‌اند. این اختلاف‌ها عمدتاً به عواملی هم‌چون رقم کشت‌شده، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، دوره رشد، نوع سامانه آبیاری، منبع و موقعیت آب، منبع تأمین انرژی و سایر مؤلفه‌های فنی در مراحل کاشت، داشت و برداشت وابسته است. از طرفی دیگر اختلاف اصلی مشاهده‌شده در این مطالعه با مطالعات دیگر به تفاوت در مدیریت کشاورزی و نحوه استفاده از نهاده‌ها توسط بهره‌برداران و کشاورزان مربوط می‌شود. هرچند تأثیر میزان انرژی ورودی کم‌تر از تفاوت در بهره‌وری و کارایی انرژی است، اما شناسایی نهاده‌های مصرفی انرژی و تعیین سهم هرکدام در تولید محصول مورد نظر از اهمیت بالایی برخوردار است. برای مثال، برخلاف نتایج این مطالعه که نهاده الکتریسیته (برق) و کودهای شیمیایی به‌عنوان پرمصرف‌ترین نهاده گزارش شد، در شرایط منطقه‌ای نتایج متفاوتی مشاهده شده است. در مشهد، مواد شیمیایی بیش‌ترین سهم مصرف انرژی را داشتند (Ghorbani et al., 2011)، در همدان و گرگان سوخت‌های فسیلی غالب بودند (Ghasemi Mobtaker, 2020) و در سیستان و بلوچستان مصرف کودهای شیمیایی بیش‌ترین میزان را به خود اختصاص داد (Ziaei et al., 2013). دو نهاده‌ی ورودی نیروی انسانی و آفت‌کش‌ها (سموم شیمیایی) شامل قارچ‌کش، حشره‌کش و علف‌کش کم‌ترین سهم را در میان نهاده‌های مصرفی انرژی برای تولید محصولات سیب زمینی در هر دو سامانه آبیاری به خود اختصاص داده‌اند. نتایج مطالعات مختلف نیز این یافته را تأیید می‌کنند؛ به‌طوری‌که پژوهشگران مانند. طهماسبی و همکاران (۱۴۰۴)، طهماسبی و زارع ابیانه (۱۴۰۴)، طهماسبی و همکاران (۱۴۰۳) و مبتکر (۱۳۹۸) گزارش کرده‌اند که نهاده نیروی انسانی و سموم شیمیایی معمولاً کم‌ترین میزان انرژی ورودی (مصرفی) را در ساختار تولید محصولات کشاورزی دارد. یکی از دلایل پایین بودن مصرف انرژی نیروی انسانی در سامانه B نسبت به سامانه A، کاهش

استفاده از کارگر در عملیات‌هایی مانند کودپاشی و سم‌پاشی به دلیل کوچک بودن مالکیت مزارع (خرده‌مالکی) و همچنین نوع فرآیند آبیاری مکانیزه‌تر در این سامانه در فرایند آبیاری است، که موجب کاهش نیاز به نیروی انسانی می‌شود. از سوی دیگر، میزان مصرف آفت‌کش‌ها نیز به‌طور معمول در مقایسه با سایر نهاده‌ها سهم ناچیزی از انرژی ورودی داشته و وابسته به شرایط اقلیمی، شدت شیوع آفات و شیوه‌های مدیریت تلفیقی آفات است. در مجموع، این دو نهاده کم‌مصرف، تأثیر اندکی بر کل تراز انرژی تولید دارند، اما مدیریت صحیح آن‌ها از منظر سلامت محصول، کیفیت نهایی و پایداری محیط‌زیست همچنان حائز اهمیت است.

بررسی میزان مصرف نهاده‌های مختلف در دو سامانه آبیاری A و B نشان داد که الکتریسیته (برق) بیش‌ترین سهم را در میان نهاده‌های انرژی‌بر به خود اختصاص داده است. با توجه به روند جایگزینی برق به‌جای سوخت‌های فسیلی در سال‌های اخیر، برخی مطالعات برق را به‌عنوان مهم‌ترین نهاده ورودی انرژی در بخش کشاورزی معرفی کرده‌اند. مقایسه بین دو سامانه مذکور نشان می‌دهد که سامانه B در طول فصل رشد محصول سیب‌زمینی، حدود نه درصد برق بیش‌تری نسبت به سامانه A مصرف کرده است. این اختلاف ناشی از عوامل مختلف هیدرولیکی نظیر عمق سطح ایستابی، فاصله چاه تا مزرعه، وضعیت توپوگرافی، راندمان عملکرد الکتروموتور پمپ‌ها، دبی خروجی چاه و مدت زمان آبیاری است. در سامانه آبیاری کلاسیک ثابت با آبپاش‌های متحرک (سامانه A)، فشار کاری آبپاش حدود ۴۰ متر و در سامانه ویلموو (سامانه B) ۳۵ متر گزارش شده است که نشان می‌دهد سامانه B با فشار کم‌تری عمل می‌کند و در نتیجه به‌طور نظری مصرف انرژی کم‌تری دارد. با این حال، مدت زمان آبیاری در سامانه ویلموو بیش‌تر است که به‌واسطه فواصل جابه‌جایی بال‌ها (۲۱–۲۲ متر) و ویلموو (۱۵ متر) موجب افزایش زمان کارکرد پمپ و در نتیجه افزایش مصرف الکتریسیته می‌شود. بنابراین، با وجود فشار کاری کم‌تر در سامانه B، به دلیل زمان طولانی‌تر پمپاژ، مصرف نهایی الکتریسیته آن بیش‌تر از سامانه A خواهد بود. به‌منظور کاهش وابستگی به برق (الکتریسیته) شبکه و افزایش بهره‌وری انرژی، استفاده از منابع جایگزین نظیر پنل‌های خورشیدی پیشنهاد می‌شود؛ هرچند که توجیه‌پذیری اقتصادی این فناوری نیازمند بررسی‌های جامع فنی و مالی در شرایط بومی است. پژوهش (طهماسبی و همکاران، ۱۴۰۳) با اذعان به نقش مهم و بنیادین انرژی الکتریکی در سامانه‌های آبیاری تحت فشار و آسیب‌پذیری آن‌ها در برابر اختلالات تامین برق، به‌طور مشخص استفاده از سامانه‌های فتوولتائیک (دستگاه‌هایی هستند که انرژی نور خورشید را مستقیماً به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند، معمولاً با استفاده از سلول های نیمه‌رسانا مانند سیلیکون) را به‌عنوان یک راه‌کار کارآمد پیشنهاد دادند.

مقایسه روابط بین انرژی‌های ورودی و خروجی دو سامانه آبیاری A و B

داده‌های جدول ۲ نشان می‌دهد که میزان انرژی مصرف‌شده به ازای هر هکتار سیب‌زمینی در سامانه A کم‌تر از سامانه B است، با این حال، خروجی انرژی در سامانه B حدود ۷/۵ درصد بیش‌تر می‌باشد. این اختلاف عمدتاً به این دلیل است که اغلب مزارع دارای سامانه A تحت شرایط کم‌آبیاری قرار داشتند و با تنش آبی بیش‌تری مواجه بودند؛ زیرا اکثر این مزارع خرده‌مالکی بوده و در نتیجه، آب مورد نیاز در زمان مناسب در اختیارشان قرار نمی‌گرفت. همچنین، مطابق مطالعات انجام‌شده، شاخص‌های عملکردی مانند یکنواختی پخش آب در سامانه B نسبت به سامانه A از وضعیت بهتری برخوردار است (عباسی و همکاران، ۱۳۹۶) که این موضوع با عملکرد و انرژی خروجی بالاتر در سامانه B هم‌خوانی دارد. طبق اطلاعات جدول ۳، کارایی مصرف انرژی در سامانه A معادل ۱/۰۴ و در سامانه B برابر با ۰/۹۱ گزارش شده است، که نشان می‌دهد سامانه A از کارایی بالاتری برخوردار است. دلیل اصلی این تفاوت نیز به انرژی مصرفی بیش‌تر مزارع B به‌خصوص الکتریسیته و آب مصرفی مربوط بود. همچنین، بر اساس جدول ۳، بهره‌وری انرژی در سامانه A و سامانه B به‌ترتیب برابر با ۰/۲۹ و ۰/۲۵ کیلوگرم در مگاژول بوده است؛ به‌عبارتی، به ازای هر واحد انرژی مصرفی، در سامانه A حدود ۰/۲۹ واحد و در سامانه B حدود ۰/۲۵ واحد عملکرد حاصل شده است. مقدار انرژی ویژه و خالص به‌ترتیب برای سامانه A و سامانه B در تولید محصول سیب‌زمینی ۳/۴۳ مگاژول در کیلوگرم و ۶۱۰۱/۹۴ مگاژول در هکتار و ۳/۹۳ مگاژول در کیلوگرم و ۱۳۸۲۳/۷۷– مگاژول در هکتار به‌دست آمد. به عبارتی انرژی دریافتی در مزارع سامانه B، منفی است. انرژی ویژه برعکس بهره‌وری انرژی است لذا مقدار کم‌تر آن نشان می‌دهد که انرژی کم‌تری به ازای تولید هر واحد عملکرد مصرف شده است؛ بنابراین سامانه A از نظر سیر انرژی بدون توجه به بعد اقتصادی و فرهنگی منطقه برتر از سامانه B در تولید محصول سیب‌زمینی است (جدول ۳).

در جدول ۴ مقدار هر یک از انواع انرژی‌های مستقیم، غیرمستقیم، تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر در تولید محصول سیب‌زمینی، نتایج نشان می‌دهد همان‌طور که مشخص است سامانه B از نظر مصرف انرژی مستقیم، دارای مقادیر به‌مراتب بالاتری نسبت به سامانه A است. افزایش انرژی مستقیم در سامانه B عمدتاً ناشی از مصرف بیشتر منابع آبی (آب آبیاری) و الکتریسیته (برق مصرفی) است که خود بیان‌گر شدت بیش‌تر وابستگی به منابع غیرپایدار در این سامانه می‌باشد. همچنین، مقدار انرژی تجدیدناپذیر در سامانه B نسبت به سامانه A به شکل معناداری بیش‌تر است که این امر حاکی از مصرف بالاتر نهاده‌های شیمیایی و صنعتی و در نتیجه اثرات منفی

زیست‌محیطی بیش‌تر است. در مقابل، با وجود تفاوت اندک، سهم انرژی تجدیدپذیر در هر دو سامانه پایین بوده و این موضوع از دیدگاه اکولوژیکی نگران‌کننده است، زیرا استمرار چنین الگوهایی موجب کاهش تاب‌آوری سامانه کشاورزی در برابر بحران‌های انرژی در آینده خواهد شد. بنابراین، کاهش وابستگی به انرژی‌های تجدیدناپذیر و جایگزینی آن با منابع تجدیدپذیر، از جمله اقدامات کلیدی در راستای ارتقاء پایداری زیست‌محیطی و بهره‌وری انرژی در نظام تولید سیب‌زمینی به‌شمار می‌آید.

جدول ۳- روابط بین انرژی‌های ورودی و خروجی در تولید سیب‌زمینی

شاخص‌ها	واحد	مزارع	
		سامانه A	سامانه B
کارایی انرژی	-	۱/۰۴	۰/۹۱
انرژی ویژه	مگاژول در کیلوگرم	۳/۴۴	۳/۹۳
بهره‌وری انرژی	کیلوگرم در مگاژول	۰/۲۹	۰/۲۵
انرژی خالص	مگاژول در هکتار	۶۱۰۱/۹۵	-۱۳۸۲۳/۷۷

جدول ٤- مقادیر انرژی‌های مستقیم، غیرمستقیم، تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر در تولید سیب‌زمینی

نوع انرژی	واحد	سامانه A	سامانه B
انرژی مستقیم[الف]	مگاژول در هکتار	۸۳۵۵۱/۱۵	۱۱۴۰۱۰/۳۷
انرژی غیرمستقیم[ب]	مگاژول در هکتار	۴۷۱۴۶/۹۰	۴۷۴۱۳/۴۰
انرژی تجدیدپذیر[پ]	مگاژول در هکتار	۱۵۶۳۱/۸۹	۱۷۰۵۴/۵۶
انرژی تجدیدناپذیر[ت]	مگاژول در هکتار	۱۱۵۰۶۶/۱۸	۱۴۴۳۶۹/۲۱

الف) شامل نیروی انسانی، سوخت گازئیل و آب آبیاری

ب) شامل سایر نهاده‌های ورودی به استثنای انرژی‌های مستقیم

پ) شامل نیروی انسانی و بذر

ت) شامل سایر نهاده‌های ورودی به استثنای انرژی‌های تجدیدپذیر

نتیجه‌گیری

کل انرژی نهاده‌های ورودی جهت تولید محصول سیب‌زمینی در سامانه A (سامانه آبیاری کلاسیک ثابت با آبپاش‌های متحرک) و سامانه B (سامانه آبیاری ویلموو) به‌ترتیب ۱۰۵۳۴/۲۵ و ۱۱۸۰۰/۹۳مگاژول در هکتار بود. در نتیجه انرژی مصرفی در سامانه آبیاری بارانی ویلموو به خاطر مصرف بالای الکتریسیته و آب آبیاری به نسبت سامانه آبیاری بارانی کلاسیک ثابت با آبپاش‌های متحرک بیش‌تر بود. نهاده الکتریسیته مصرفی در هر دو سامانه بیش‌ترین میزان انرژی مصرفی را به خود اختصاص داده بود. همچنین بهره‌وری و کارایی مصرف انرژی دو سامانه مذکور تقریباً باهم مساوی بود. میزان انرژی خالص سامانه آبیاری A و سامانه آبیاری B به‌ترتیب ۶۱۰۱/۹۴ و ۱۳۸۲۳/۷۷- مگاژول در هکتار بود. به‌عبارتی مزارع مجهز به سامانه B منفی بود. نکته قابل‌توجه در این مطالعه مربوط نهاده‌های مشخص و عملیات‌های رایج مورد ارزیابی قرار گرفت. فرآیند و فعالیت‌هایی مانند نقل و انتقال در طول فصل رشد و عوامل هم‌چون محیطی و غیره وجود دارند که به‌دلیل عدم وجود داده‌های صحیح و قابل‌اطمینان از سوی کشاورزان، مورد ارزیابی قرار نگرفت. در نتیجه مقادیر کارایی مصرف انرژی و بهره‌وری انرژی در این مطالعه تا حدودی فراتر از مقادیر مطالعات دیگر به‌دست آمد. وابستگی شدید در تولید به انرژی‌های تجدیدناپذیر، به‌خصوص در سامانه آبیاری B بیان‌گر ناپایداری آن در مزارع مورد مطالعه هست. ازاین‌رو پیشنهاد می‌شود مطالعاتی هم‌سو در جهت استفاده از سامانه‌های فتوولتایی[1] جهت استحصال و پمپاژ آب در سامانه‌های آبیاری انجام گیرد.

سپاس‌گذاری:

نویسندگان مراتب قدردانی خود را از کشاورزان همکاری‌کننده، شرکت برق شهرستان دهگلان و دانشگاه بوعلی‌سینا، به‌ویژه بابت حمایت مالی، ابراز می‌دارند.

منابع

اسلامی، ز.، جنت‌رستمی، س.، اشرف زاده، اف و پورمحمد، ی.

1- Photovoltaic system

۱۳۹۹. تأثیر رویکرد پیوندی آب، انرژی و غذا در مدیریت یکپارچه منابع آب شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرود. آب و خاک، ۳۴(۱): ۱۱-۲۵. doi: 10.22067/jsw. v34i1.81897

بی‌نام .۱۳۹۰. گزارش تحلیلی شرکت بهینه‌سازی مصرف سوخت، شرکت ملی نفت ایران.

طایی، ف.، خلیلیان, صادق و ده کیانی، م. ۱۴۰۲. تحلیل تاثیر تقاضای محصول‌های کشاورزی بر مصرف انرژی. اقتصاد کشاورزی. ۱۷(۱): ۱۶۳-۱۳۵. doi: 10.22034/iaes.2023.555173.1924

طهماسبی.، پ، و زارع ابیانه.، ح. ۱۴۰۴. مقایسه بهره‌وری انرژی در سامانه‌های آبیاری سطحی و بارانی در کشت گندم و یونجه (مطالعه موردی: پایاب سد مخزنی سورال، استان کردستان). فناوری‌های پیشرفته در بهره‌وری آب. doi: 10.22126/atwe.2025.11936.1160

طهماسبی، پ. ۱۴۰۳. اصول مدیریت منابع آب. انتشارات قلم محقق. ۱۲-۸.

طهماسبی، پ.، مقدم‌نیا، آ.، گل‌محمدی قانع، پ.، فتحی، آ.، کریمی، ب.، و قدرشناس، ه. ۱۴۰۴. ارزیابی کارایی انرژی مصرفی مزارع سیب‌زمینی و گندم تحت سامانه آبیاری بارانی (مطالعه موردی: پایاب سد مخزنی سورال، استان کردستان)، نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران. ۱۵(۳): ۱۹-۳۷. doi: 10.22125/iwe.2025.501965.1852

طهماسبی، پ، دالوند، ف، حسینی، س ا، کریمی، ب و قدرشناس، ه. ۱۴۰۳. بررسی مقایسه‌ای کارایی انرژی دو سامانه آبیاری بارانی در کشت گندم (مطالعه موردی: دشت‌های دهگلان، استان کردستان). آب و خاک ۳۸(۶). ۶۹۷-۶۸۳.

عباسی، ف، عباسی، ن و توکلی، ع. ۱۳۹۶. بهره‌وری آب در بخش کشاورزی؛ چالش‌ها و چشم اندازها. آب و توسعه پایدار. ۴(۱): ۱۴۱-۱۴۴.

غلامی، ز.، ابراهیمیان، ح.، و نوری، ح. ۱۳۹۴. بررسی بهره وری انرژی آب و بهره وری اقتصادی انرژی در سامانه های آبیاری بارانی و سطحی در شرایط بهره برداری از آب زیرزمینی (مطالعه موردی: دشت قزوین). مجله تحقیقات مهندسی کشاورز. ۱۶(۳): ۳۱-۴۴. https://sid.ir/paper/28231/fa

قاسمی مبتکر، ح. ۱۳۹۸. بررسی روند مصرف انرژی در دو سامانه آبیاری غرقابی و تحت‌فشار: مطالعه موردی یک مزرعه صد هکتاری در همدان. مهندسی بیوسیستم ایران. ۵۰(۴): ۸۰۹-۸۰۱. doi: 10.22059/ijbse.2019.281690.665189

قدمی فیروزآبادی، ع و اکبری، م. ۱۴۰۲. تاثیر آبیاری قطره‌ای نواری (تیپ) بر میزان عملکرد و بهره‌وری آب محصول گندم و شوری خاک در شرایط زارعین (مطالعه موردی: استان همدان). نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۱۷(۵): ۸۳۱-۸۴۲.

الماسی، م.، کیانی، س.، و لویمی، ن. ۱۳۸۷. مبانی مکانیزاسیون کشاورزی. ایران: انتشارات جنگل. ۲۴۸.

نراقی، ن.، مقدسی, ر. و محمدی نژاد، امیر. ۱۴۰۰. مطالعه ارتباط غیر خطی مصرف انرژی و تورم در بخش کشاورزی. اقتصاد و توسعه کشاورزی. ۳۵(۳): ۲۷۲-۲۵۹.

هدایتی، س.، بهمنی .، طهماسبی، پ.، دالوند، ف.، و حسینی، ا. ۱۴۰۴. بررسی تغییرات مکانی- زمانی ویژگی‌های کیفی آب مورد استفاده در بخش کشاورزی دشت ملایر .مجله علوم ومهندسی آبخیزداری ایران. ۱۹ (۶۸): ۷۸-۹۲.

هدایتی، س.، بهمنی، ا.، طهماسبی، پ.، دالوند، ف.، حسینی، س، ا. ۱۴۰۴. بررسی تغییرات مکانی- زمانی ویژگی‌های کیفی آب مورد استفاده در بخش کشاورزی دشت ملایر .مجله علوم ومهندسی آبخیزداری ایران. ۱۹ (۶۸): ۷۸-۹۲. URL: http://jwmsei.ir/article-۱-۱۱۷۴-fa.html

وزارت جهاد کشاورزی. ۱۴۰۱. آمارنامه کشاورزی، سال ۱۴۰۰ ، محصولات زراعی (جلد اول) انتشارات معاونت برنامه ریزی و اقتصادی، مرکز آمار، فناوری و اطلاعات و ارتباطات، تهران، ایران. صفحه ۴۶.

Allali, K., Dhehibi, B., Kassam, S. N. and Aw-Hassan, A. 2017. Energy consumption in onion and potato production within the province of El Hajeb (Morocco): towards energy use efficiency in commercialized vegetable production. Journal of Agricultural Science. 9(1): 118-127.

Bathaei, A. and Štreimikienė, D. 2023. Renewable energy and sustainable agriculture: Review of indicators. Sustainability. 15(19): 14307.

Djaman, K., Irmak, S., Koudahe, K. and Allen, S. 2021. Irrigation management in potato (Solanum tuberosum L.) production: A review. Sustainability. 13(3): 1504. doi:10.3390/su13031504

Eyvazov, A. and Aghayev, F. 2025. The Correlation Between Important Farm Indicators in Potato (Solanum tuberosum L.), Eggplant (Solanum melongena L.) Samples. Advanced Studies in Biology. 17(1): 1-10.

FAO. 2002. Irrigation Manual Module 11. Financial and Economic Appraisal of Irrigation Projects. Available online

FAOSTAT. 2021. Potatoes, production quantity (tons) for 267 countries. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

10.1016/j.renene.2003.11.007. https://doi.org/10.1016/S0960-1481(03)00135-

Pimentel, D., Pimentel, M. and Food, E. 1996. Society (Niwet, CO. Colorado Press.

Purwanto, A., Sušnik, J., Suryadi, F. X. and de Fraiture, C. 2021. Quantitative simulation of the water-energy-food (WEF) security nexus in a local planning context in indonesia. Sustainable Production and Consumption. 25: 198-216.

Sánchez-Sutil, F. and Cano-Ortega, A. 2021. Smart control and energy efficiency in irrigation systems using LoRaWAN. Sensors. 21(21): 7041.

Vahedi, A. and Zarifneshat, S. 2021. Evaluation energy flow and analysis of energy economy for irrigated wheat production in different geographical regions of Iran. Journal of Agricultural Machinery. 11(2): 505-523

Zhao, Y., Wang, Q., Jiang, S., Zhai, J., Wang, J., He, G., ... and Zhu, Y. 2020. Irrigation water and energy saving in well irrigation district from a water-energy nexus perspective. Journal of cleaner production,. 267: 122058. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122058

FAO. 2024. FAOSTAT Statistical Database. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Retrieved from http://www.fao.org/faostat/en/#data

Hamedani, S. R., Shabani, Z. and Rafiee, S. 2011. Energy inputs and crop yield relationship in potato production in Hamadan province of Iran. Energy. 36(5): 2367-2371.

Han, D., Yu, D. and Cao, Q. 2020. Assessment on the features of coupling interaction of the food-energy-water nexus in China. Journal of Cleaner Production, 249: 119379.

Kaab, A., Khanali, M., Shadamanfar, S. and Jalalvand, M. 2024. Assessment of energy audit and environmental impacts throughout the life cycle of barley production under different irrigation systems. Environmental and Sustainability Indicators. 22: 100357.

Kitani, O., Jungbluth, T., Peart, R. M. and Ramdani, A. 1999. CIGR handbook of agricultural engineering. Energy and biomass engineering. 5: 330.

Ozkan, Burhan, Akcaoz, Handan . and Fert, Cemal. (2004). Energy Input Output Analysis in Turkish Agriculture. Renewable Energy. 29. 39-51.

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 6, Vol. 19, Feb.-Mar. 2026, p. 1019-1031

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۶، جلد ۱۹، بهمن - اسفند ۱۴۰۴، ص. ۱۰۳۱-۱۰۱۹

Energy Efficiency Analysis in Two Sprinkler Irrigation Systems for Potato Production in the Dehgolan Plains, Kurdistan Province

P. Tahmasebi[1*], H. Zare Abyaneh[2], M. Akbari Parsa[3], K. Tahmasebi[4]
Recived: Aug.04, 2025 Accepted: Oct.11, 2025

Abstract:

Potato, is a strategic agricultural crop, holds a significant position in many parts of the world. On the other hand, agricultural production is highly influenced by the consumption of input resources. The aim of this study was to evaluate the energy consumption pattern of potato production under two sprinkler irrigation systems: the classic solid-set system with movable sprinklers (System A) and the Wheel move rain irrigation system (System B). Required data, including total input resources, machine operation hours, and human labor, were randomly collected from 40 selected farms in Dehgolan Plain, Kurdistan Province, during the 2021–2022 cropping season using structured questionnaires. At the end of the irrigation season, the amount of electricity consumed per hectare was obtained from the regional electricity company of Dehgolan. The total input energy in Systems A and B was calculated as 130,698.06 and 161,423.77 MJ/ha, respectively. The output energy in Systems A and B was estimated at 136,800 and 147,600 MJ/ha, respectively. Accordingly, the energy use efficiency index was calculated as 1.04 for System A and 0.91 for System B. The share of direct energy consumption was 83,551.15 MJ/ha in System A and 114,010.38 MJ/ha in System B. The share of renewable energy, which is one of the indicators of sustainability in agro-ecosystems, was 15,631.88 MJ/ha in System A and 17,054.56 MJ/ha in System B. Overall, based on the results obtained from the Dehgolan region, the classic sprinkler irrigation system with movable sprinklers (System A) was found to be to be more efficient in terms of energy consumption compared to the Wheel move rain irrigation system (System B).

Keywords: Electrical Energy, Energy input and output, irrigation water use efficiency, Poultry fertilizer, Wheel move

1- Ph.D student of Irrigation, Department of Water Sciences and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran
2- Professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamadan, Iran
3- Expert, Water Research Laboratory, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran
4- Master's student, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran
(*- Corresponding Author Email: p.tahmaseni@agr.basu.ac.ir)