

مقاله علمی-پژوهشی

بهینه‌سازی سطح زیرکشت محصولات کشاورزی با تاکید بر امنیت آب و غذا

سمیره رئیسی سرحدی^۱، ام‌البنین بذرافشان^{۲*}، هادی رضوانی اعتدالی^۳، اسماعیل مقبلی دامنه^۴، مرضیه رضایی^۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۲۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۲۴

چکیده

این مطالعه با هدف بهینه‌سازی سطح زیرکشت محصولات کشاورزی در شهرستان جیرفت، از طریق تلفیق چارچوب ردپای آب (WF) و ارزش غذایی (تولید کالری) انجام شد. با توجه به مواجهه با کم‌آبی شدید و ضرورت تأمین امنیت غذایی در مناطق خشک، این پژوهش یک الگوی کشت بهینه را از طریق دو تابع هدف کمینه‌سازی ردپای آب کل و بیشینه‌سازی تولید کل کالری (ردپای انرژی)، پژوهش در دو فاز اجرا شد. ابتدا ردپای آب سیب‌زمینی (محصول کلیدی منطقه) تحت ۱۸ تیمار مدیریتی مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت که ترکیبی از سطوح مختلف آبیاری (۱۰۰ درصد (WL1)، ۹۰ درصد (WL2)، ۸۰ درصد (WL3) نیاز آبی)، روش‌های آبیاری (قطره‌ای سطحی (IM1) و زیرسطحی (IM2)) و سطوح کوددهی نیتروژن (۱۰۰ درصد (F1)، ۶۰ درصد (F2)، ۴۰ درصد (F3) نیاز بهینه) بودند. براساس نتایج، از میان این تیمارها، تیمار آبیاری ۹۰ درصد با استفاده از روش قطره‌ای سطحی و ۶۰ درصد کود نیتروژن (WL2IM1F2) به عنوان پایدارترین روش از نظر آب برای سیب‌زمینی شناسایی شد که کمترین ردپای آب کل (۵۰/۱۹۷ مترمکعب بر تن) و بالاترین کارایی مصرف آب (۳۹/۷ کیلوگرم بر مترمکعب) را به دست داد. سپس، این تیمار بهینه سیب‌زمینی به همراه سایر محصولات اصلی (پیاز، هندوانه، گندم، ذرت، گوجه‌فرنگی) در یک مدل بهینه‌سازی برنامه‌ریزی خطی برای الگوی کشت کل شهرستان گنجانده شد. تحت سناریوی اول (کمینه‌سازی ردپای آب)، بهینه‌سازی الگوی کشت منجر به کاهش ۶/۳۴ درصدی مصرف کل آب و در عین حال افزایش ۷/۲۶ درصدی تولید کل شد که عمدتاً از طریق گسترش کشت محصولات با ردپای آب کم مانند پیاز و هندوانه محقق شد. سناریوی دوم (بیشینه‌سازی کالری) منجر به افزایش ۹/۱۱ درصدی تولید کل کالری با افزایش سطح اختصاص یافته به محصولات با بازده کالری بالا، به‌ویژه سیب‌زمینی) با استفاده از تیمار (WL2IM1F1) و ذرت شد. یافته‌ها نشان می‌دهد که یک رویکرد دوگانه ترکیبی که معیارهای ردپای آب و بهره‌وری کالری را ترکیب می‌کند، می‌تواند به طور مؤثری اهداف حفظ آب و امنیت غذایی را متعادل کند.

واژه‌های کلیدی: ردپای آب، ردپای انرژی، سیب‌زمینی، شاخص ارزش زمین، کارایی مصرف آب

مقدمه

علمی نیز تا مدت‌ها مورد توجه دانشمندان قرار گرفته و امروزه همه در آن اتفاق نظر دارند. آب در هر کشور و منطقه به‌عنوان یکی از سرمایه‌های ملی آن کشور و منطقه محسوب و جزء احتیاجات حیاتی بشر قلمداد می‌شود که قابل جایگزینی به‌وسیله هیچ‌کدام از منابع طبیعی و مصنوعی دیگر نیست (روح‌پرور، ۱۳۹۰). محدودیت منابع آب موجود از یک سو و اهمیت تعیین نیاز غذایی به ویژه در کشورهای خشک و نیمه خشک نظیر ایران از سوی دیگر، لزوم توجه به مبحث مصرف بهینه آب در کنار الگوی مناسب کشت محصولات کشاورزی را بیش از پیش ضروری ساخته است. با توجه به اینکه سهم عمده ای از مصرف آب در کشور به بخش کشاورزی تعلق داشته است از طرف دیگر پراکنش نامناسب مکانی و زمانی بارندگی و شرایط اقلیمی خشک و نیمه خشک حاکم که منجر به وابستگی تولید محصولات کشاورزی به زراعت آبی گردیده، اهمیت برنامه ریزی بهینه الگوی کشت و تخصیص آب آبیاری را بیش از پیش ضروری ساخته است

آب از دیرباز و از بدو پیدایش حیات، نقش اساسی در ادامه زندگی و طبیعتاً در موجودیت انسان ایفا کرده است و در طول تاریخ عامل مهمی در شکل دادن به روش زندگی بشر و توسعه فناوری، زبان و فرهنگ بوده است. نقش آب در پیدایش و رشد حیات در نظریه‌های

۱- دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، گروه مهندسی منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران

۲- استاد گروه مهندسی منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران

۳- استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی، قزوین، ایران

۴- استادیار بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی جنوب استان کرمان، سازمان تحقیقات، جیرفت، ایران

۵- دانشیار گروه مهندسی منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران

(* نویسنده مسئول: O.bazrafshan@hormozgan.ac.ir)

آب کشور و رسیدن به امنیت آبی باشد.

الگوی بهینه‌ی کشت برنامه‌ای است که با هدف مدیریت بهینه‌ی ترکیب مکانی محصول تدوین شده و با توجه به گستردگی پهنه‌ی مرزی کشور و تنوع اقلیمی مناطق گوناگون، رسیدن به الگوی کشت مناسبی که بتواند حداکثر بهره برداری را از عوامل و نهاده‌های تولید ایجاد نماید، ضرورتی اجتناب ناپذیر است (Ramezani Etedlai et al., 2019). با توج به تعریف فوق، تأمین اهداف مختلف با توجه به محدودیت‌ها و ظرفیت‌های تولید در الگوی کشت هر منطقه، مشخص می‌کند که هدف در نوع محصول زراعی معمولاً به یک موضوع خاص ختم نشده و تصمیم‌ها باید بین نتایج خروجی حاصل از تصمیم که در تضاد و تقابل هستند، تعادل ایجاد کند (Li et al., 2020). لذا برنامه‌ریزی در شرایطی که چندهدف دنبال می‌شود کار ساده‌ای نیست و نیازمند استفاده از رهیافت‌های ریاضی از جمله برنامه‌ریزی‌های چندهدفه است. در زمینه کاربرد روش‌های ریاضی در تعیین الگوی بهینه کشت و دیدگاه ردپای آب مطالعه‌های متعددی در سطح ایران و دنیا صورت پذیرفته است.

عثمان و همکاران، با بهره‌گیری از روش برنامه‌ریزی خطی اقدام به حداکثرسازی بازده خالص سالانه کشت محصولات زراعی در سه منطقه قدیمی مصر نمودند. براساس نتایج نشان، سطح زیر کشت محصولات غیراستراتژیک مانند پیاز، سیر، جو، کتان، شنبلیله، نخود و عدس کاهش و محصولات استراتژیک مانند گندم، ذرت، شیدر، فرآورده‌های قند و پنبه افزایش یافت (Osman et al., 2017).

مجتبوی و همکاران در بهینه‌سازی الگوی کشت در دشت قزوین با تاکید بر حسابداری ردپای آب اذعان نمودند، این دیدگاه قادر است به امنیت آبی در منطقه کمک شایانی کند و در برنامه‌ریزی الگوی کشت مفید واقع گردد (Mojtabavi et al., 2018).

رضانی‌اعتدالی و همکاران در بهینه‌سازی سطح زیرکشت غلات دیم و آبی در سطح کشور از دیدگاه ردپای آب و برنامه‌ریزی خطی استفاده نمودند. براساس نتایج مشخص شد، با بهینه‌سازی می‌توان سالانه ۲۲۱۰ میلیون مترمکعب آب شیرین صرفه‌جویی نمود (Ramezani Etedali et al., 2019).

علیقلی‌نیا و همکاران به بهینه‌سازی الگوی کشت بر مبنای شاخص ردپای آب در اقلیم‌های مختلف ایران با استفاده از پرداخت و بر این اساس الگوی کشت فعلی در بسیاری از مناطق اقلیمی کشور براساس شاخص ردپای آب تغییر قابل ملاحظه‌ای داشت (Aligholnia et al., 2021).

ژانگ و همکاران به بهینه‌سازی الگوی کشت با استفاده از شاخص کارایی مصرف آب و ردپای آب با برنامه‌ریزی خطی در غرب چین می‌پردازد. براساس نتایج به‌دست آمده، کاربرد ردپای آب به میزان قابل توجهی در تعیین کشت بهینه مؤثر است (Zhang et al., 2017).

(اسفندیاری و همکاران، ۱۴۰۳). بخش کشاورزی یکی از اجزاء مهم اقتصاد کشور محسوب می‌شود و نقش تعیین کننده‌ای در امنیت غذایی، و اقتصاد ملی دارد (میرزاشاهی و همکاران، ۱۳۹۹). سهم بخش کشاورزی از اشتغال کشور ۲۵ درصد است و همچنین با تولید ۸۵ درصد از غذای جامعه مسئولیت پرمخاطره‌ای به عهده دارد (وجدانی و همکاران، ۱۴۰۱). مدیریت آب در بخش کشاورزی به‌عنوان بزرگ‌ترین مصرف‌کننده‌ی منابع آب حوزه وسیعی را در برمی‌گیرد و شامل شیوه‌هایی نظیر حفظ رطوبت اراضی، برداشت بهینه‌ی آب، آبیاری تکمیلی، و تکنیک‌های مختلف توسعه منابع آب است. همه روش‌هایی که در مدیریت آب کشاورزی استفاده می‌شوند اغلب برای غلبه بر محدودیت‌های اصلی برداشت و یا نگهداری منابع آب در نظر گرفته می‌شوند (Nasseri Nejad et al., 2023). یکی از روش‌های استفاده بهینه از منابع آب و کاهش تلفات آن در دهه اخیر بحث جدیدی تحت عنوان آب مجازی و همچنین تجارت آب مجازی مورد توجه واقع شده است (Bazrafshan et al., 2022). این مفهوم اولین بار توسط آلن مطرح شد (Allan., 1998) و با توجه به این شاخص، می‌توان مشخص نمود که برای تولید یک محصول، چه مقدار آب مصرف شده است. مقدار آب مجازی در تولیدات غذایی مقدار قابل توجهی است و با دانستن مقدار آب مجازی رژیم غذایی یک فرد و یا در نگاهی وسیع‌تر یک جامعه می‌توان مصرف آب را مدیریت نمود.

حال برای آنکه مشخص شود آب مصرفی در چرخه تولید محصول از چه منابع آبی تأمین شده، نیاز است تا یک مفهوم کامل‌تر از آب مجازی مطرح شود. بنابراین مفهوم ردپای آب توسعه یافت که مفهومی جامع‌تر از آب مجازی بوده که به‌طور نزدیکی به آن مرتبط است (Hoekstra and Chapagain., 2007). ردپای آب به‌عنوان شاخصی برای تخصیص منابع آب تعریف شده است که بینش ارزشمندی درباره آثار محیط زیستی تولید یک محصول ارائه می‌دهد. ردپای آب آبی به مقدار آب سطحی و زیرزمینی اشاره دارد که برای تولید نوعی کالا استفاده می‌گردد. ردپای آب سبز مقدار آب مصرفی توسط گیاه است که به صورت رطوبت در خاک وجود دارد و به استفاده گیاه می‌رسد و ردپای آب خاکستری نیز مقدار آبی است که در اثر فراین تولید توسط آلاینده‌ها کیفیت خود را از دست داده و به نوعی مصرف شده است و ردپای آبی هم آبی که به طور مستقیم در کشاورزی در حال انتقال و استفاده است (Hoekstra and Chapagain., 2011). توجه به اینکه مفهوم ردپای آب در حال حاضر به‌عنوان یکی از مؤلفه‌های سنجش بهره‌وری آب در مباحث مختلف موردتوجه پژوهشگران در صنعت آب قرار گرفته است، استفاده از این مفهوم با توجه به شرایط خاص سیاسی و اقلیمی کشور، به‌منظور انتخاب بهترین ترکیب کشت، ضمن خودکفایی نسبی در تولید محصولات کشاورزی، می‌تواند ابزاری بسیاری سودمند در ذخیره

نظام‌مند مورد توجه قرار نگرفته است. این در حالی است که طراحی الگوی کشت متناسب با ویژگی‌های منحصر به فرد این منطقه نیمه‌خشک، شامل ملاحظات کم‌آبی و امنیت غذایی، از ضروریات غیرقابل انکار در راستای توسعه پایدار کشاورزی محسوب می‌شود.

این مطالعه با رویکردی نوین به بررسی بهینه‌سازی کشت سیب‌زمینی در جیرفت می‌پردازد که در آن دو شاخص کلیدی ردپای آب و ارزش غذایی به صورت تلفیقی مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. اهداف ویژه عبارتند از: بررسی تأثیر ۱۸ تیمار مختلف کشت سیب‌زمینی (ترکیب روش‌های آبیاری، سطوح کود و مقادیر آبیاری) بر عملکرد و شاخص‌های ردپای آب، محاسبه ردپای آب (آبی، سبز و خاکستری) برای محصولات اصلی منطقه جیرفت (سیب‌زمینی، گندم، ذرت، پیاز و هندوانه)، مقایسه سیب‌زمینی با سایر محصولات از نظر ردپای آب و ارزش غذایی و ارائه الگوی بهینه کشت با استفاده از برنامه‌ریزی چندهدفه، به‌منظور تعادل بین کاهش مصرف آب و افزایش تولید غذایی.

مواد و روش

معرفی منطقه مورد مطالعه

شهر جیرفت از نظر موقعیت جغرافیایی ۲۸ درجه و ۷ دقیقه عرض شمالی و ۵۷ درجه و ۷۶ دقیقه طول شرقی واقع شده است و ارتفاع آن از سطح دریا ۷۲۲ متر می‌باشد متوسط بارش منطقه ۲۵۷ میلی‌متر است که حداقل آن در تیرماه با ۵/۹ میلی‌متر و حداکثر آن در ماه دی با ۲۰/۵ میلی‌متر است. طبق گزارش ایستگاه هواشناسی سینوپتیک، متوسط سالانه درجه حرارت سانتی‌گراد و حداقل دما در دی ماه برابر با ۴/۵ و حداکثر آن درجه سانتی‌گراد ۴۷/۵ در مرداد ماه مشخص شده است. براساس روش طبقه بندی اقلیمی دومارتن این شهر دارای اقلیمی از نوع گرم و معتدل می‌باشد (Raisi Sarhadi et al., 2025).

شهرستان جیرفت سهم عمده‌ای در کشاورزی کشور دارد.

روش تحقیق

با توجه به مواجهه با کم‌آبی شدید و ضرورت تأمین امنیت غذایی در مناطق خشک، این پژوهش یک الگوی کشت بهینه را از طریق دو تابع هدف کمینه‌سازی ردپای آب کل و بیشینه‌سازی تولید کل کالری (ردپای انرژی). پژوهش در دو فاز اجرا شد. ابتدا ردپای آب سیب‌زمینی (محصول کلیدی منطقه) تحت ۱۸ تیمار مدیریتی مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت. در این تحقیق ابتدا به بررسی تأثیر سطوح آبیاری و درصد کود از ته روی عملکرد و کارایی مصرف آب سیب‌زمینی (رقم سانه) به صورت طرح اسپلیت پلات در قالب طرح بلوک-های کاملاً تصادفی با سه فاکتور سطح آبیاری در سه سطح: ۱۰۰ درصد (WL₁)، ۹۰ درصد (WL₂) و ۸۰ درصد (WL₃)، دو روش

بذرافشان و همکاران به اولویت‌بندی کشت گوجه در ایران پرداختند. براساس نتایج، مناطقی که دارای کشت خارج از فصل بودند، دارای بالاترین ارزش آب و زمین و در اولویت اول کشت گوجه در ایران قرار می‌گیرند (Bazrafshan et al., 2022).

بذرافشان و همکار به بررسی ارزش اقتصادی و ردپای آب بادام دیم و آبی در ایران پرداختند. نتایج نشان داد، این محصول در دسته‌ی محصولات با ردپای آب و ارزش اقتصادی آب میانه قرار دارد (Bazrafshan et al., 2023).

آند و همکاران مطالعه‌ی خود تحت عنوان از قطره تا دلتا، بهینه‌سازی ردپای آب برای امنیت غذایی، این دیدگاه را روشی عملی برای سنجش میزان آب مورد نیاز برای تولید کالاها و خدمات و ارتقای پایداری در تولید صنعتی و غذایی معرفی نمودند و اذعان داشتند استفاده از این ایده می‌تواند منجر به تخصیص داده‌های ارزشمندی شود که برای بررسی اثرات زیست محیطی، اجتماعی و اقتصادی و پیشبرد گفتگوها در مورد استفاده عادلانه و پایدار آب مورد استفاده قرار گیرد (Anand et al., 2024).

جیرفت یکی از قطب‌های مهم کشاورزی ایران محسوب می‌شود که در تولید محصولات استراتژیک مانند سیب‌زمینی و سایر صیفی‌جات خارج از فصل، مرکبات و خرما نقش کلیدی ایفا می‌کند. با این حال، برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی، استفاده از روش‌های سنتی آبیاری و خطر خشکسالی‌های مکرر، چالش‌های جدی برای پایداری کشاورزی در این منطقه ایجاد کرده‌اند (افشار و همکاران، ۱۳۹۹). این منطقه به‌عنوان یکی از قطب‌های اصلی کشاورزی جنوب کرمان، اهمیت ویژه‌ای در تولید سیب‌زمینی دارد و با دارا بودن شرایط اقلیمی گرم و امکان کشت خارج از فصل (طرح استمرار)، به یکی از تأمین‌کنندگان مهم سیب‌زمینی در فصل زمستان تبدیل شده است. در سال زراعی ۱۴۰۲-۱۴۰۳، سطح زیر کشت سیب‌زمینی در جنوب کرمان به ۶۱۲۱ هکتار رسید و تولیدی بالغ بر ۲۰۰ هزار تن داشت (آمارنامه جهاد کشاورزی، ۱۴۰۳). با این حال، بهینه‌سازی کشت سیب‌زمینی در جیرفت در مقایسه با سایر محصولات مانند پیاز، هندوانه، گوجه‌فرنگی، ذرت و گندم از جهت امنیت و ارزش غذایی و مصرف آب دارای اهمیت ویژه‌ای است.

علیرغم مطالعات متعدد در حوزه ردپای آب و الگوی بهینه کشت، خلأهای پژوهشی قابل توجهی در این زمینه مشاهده می‌شود. عمده تحقیقات پیشین به صورت تک‌بعدی و با تمرکز صرف بر شاخص‌هایی مانند مصرف آب یا سودآوری اقتصادی انجام شده‌اند، در حالی که تلفیق همزمان معیارهای ردپای آب و ارزش غذایی می‌تواند به تصمیم‌سازی‌های جامع‌تر و پایدارتری منجر گردد. همچنین، بررسی تأثیر ترکیبات مختلف تیمارهای کشت (شامل روش‌های آبیاری، سطوح کوددهی و مقادیر آبیاری) بر کارایی مصرف آب سیب‌زمینی در شرایط اقلیمی خاص جیرفت، تاکنون به صورت

دارد. ردپای آب سبز به مصرف منابع آب سبز (آب باران) اشاره دارد. ردپای آب خاکستری، حجم آب شیرین مورد نیاز جهت رقیق‌سازی کودهای شیمیایی را ارزیابی می‌کند که برای کاهش و بی‌خطر کردن آلودگی‌های ناشی از یک فرآیند، کالا یا جامعه ضروری است تا کیفیت آن به سطح استانداردهای مورد قبول دست یابد (Hoekstra et al., 2011). روابط ۱ تا ۳ به ترتیب ردپای سبز، ردپای آبی و ردپای خاکستری را نشان می‌دهد.

$$WF_{Blue} = \frac{(ET_c - P_e) * 10}{Y} \quad (1)$$

$$WF_{Green} = \frac{(P_e) * 10}{Y} \quad (2)$$

$$WFGrey = \frac{a * NAR}{C_{Max} - C_{Nat}} * \frac{1}{Y} \quad (3)$$

$$WFT = WF_{Blue} + WF_{Green} + WFGrey \quad (4)$$

که در این روابط WF_{Green}^2 ، WF_{Blue}^3 و WF_{Grey}^4 به ترتیب ردپای سبز، آبی و خاکستری است. P_e : مجموعه بارندگی مؤثر در طول دوره رشد گیاه به میلی‌متر که با استفاده از روش USDA محاسبه شد. ET_c : تبخیر و تعرق هر گیاه به میلی‌متر که با استفاده از روش فائو - پنمن - مونتیت محاسبه شد. Y : عملکرد هر محصول بر حسب تن در هکتار، a : درصد تلفات کودهای نیتروژن NAR : نرخ مصرف کود برای هر گیاه به کیلوگرم در هکتار، C_{Max} : غلظت بحرانی نیتروژن به کیلوگرم در مترمکعب، C_{Nat} : غلظت واقعی نیتروژن در منابع آب دریافت‌کننده به کیلوگرم در مترمکعب می‌باشد. همچنین به دلیل در دسترس نبودن غلظت واقعی نیتروژن در منطقه‌ی مورد مطالعه، طبق توصیه‌ی (Hoekstra and Chapagain., 2003). براساس توصیه (Hoekstra et al (2011) برای مناطقی که درصد تلفات کود نیتروژن در دسترس نیست، مقادیر a در شرایط فاریاب ۱۰ درصد و حداکثر غلظت نیتروژن در منابع آب دریافت‌کننده، صفر در نظر گرفته شد.

ارزش اقتصادی ردپای آب

ارزش اقتصادی آب از روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$WFE_{total} = \frac{NB}{WF_{total}} \quad (5)$$

در روابط فوق، WFE_{total} ارزش اقتصادی کل آب برحسب دلار در هر مترمکعب و WF_{total} حاصل جمع ردپای اقتصادی اجزای ردپای آب برحسب مترمکعب، NB سود خالص برحسب دلار است. بدلیل عدم دسترسی به اعداد قابل اعتماد به ریال در ایران، این مقادیر از وبسایت فائوستت و نتایج بر حسب دلار محاسبه گردید.

آبیاری قطره‌ای سطحی (IM_1) و زیرسطحی (IM_2) و کود نیترا نه (به دلیل استفاده بیشتر نسبت به سایر کودها در منطقه) در سه سطح: ۱۰۰ درصد (F_1)، ۶۰ درصد (F_2) و ۴۰ درصد (F_4) در سه تکرار و در سال زراعی ۱۴۰۰ و ۱۴۰۱ در شرایط آب و هوایی شهرستان جیرفت در قالب سه تکرار جداگانه در مزرعه تحقیقاتی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی جنوب استان کرمان واقع در شهرستان جیرفت طراحی و انجام شد. تعداد خطوط کشت در هر تیمار ۳ خط دو ردیفه به طول ۳ متر در نظر گرفته شد. سایر کودهای مصرفی در سطح هر پلات ثابت در نظر گرفته شد. مقدار کود مصرفی کامل در هر پلات به ابعاد ۳ در ۱/۸ مترمربع، دو کیلوگرم تعیین گردید. پس از آماده‌سازی بستر، بذر سیب‌زمینی رقم سانته که بیشترین تقاضا توسط کشاورزان منطقه جیرفت را دارد مورد استفاده قرار گرفت. بذر پس از آماده‌سازی به صورت ردیفی و در فاصله ۱۵ سانتی‌متری و در عمق ۱۵ سانتی‌متر کشت داده شود. برای رفع نیازهای تغذیه‌ای گیاه پس از آنالیز خاک، کودهای پایه از نوع کامل و حیوانی افزوده شد و سایر عناصر مورد نیاز طی فصل رشد از طریق سیستم آبیاری قطره‌ای در اختیار گیاه قرار گرفت. در این پژوهش اطلاعات مربوط به سطح زیر کشت، عملکرد در واحد سطح، میزان تولید، میزان کود، راندمان آبیاری، تاریخ کشت و تیپ خاک از سال‌نامه سازمان جهاد کشاورزی استخراج گردید. همچنین داده‌های اقلیمی از سازمان هواشناسی هر استان (IRIMO., 2022) در منطقه مورد نظر تهیه گردید که داده‌ها شامل سری زمانی بارش، درصد رطوبت نسبی، ساعات آفتابی، حداقل و حداکثر درجه حرارت هوا و سرعت باد طی دوره آماری مورد مطالعه می‌باشد. مقدار آب آبیاری در هر نوبت، معادل رطوبت مورد نیاز برای رساندن رطوبت خاک از حد بحرانی به ظرفیت مزرعه^۱ (FC) تعیین گردید. دور آبیاری در مراحل مختلف رشد متغیر بود. با اعمال راندمان ۹۰ درصد برای آبیاری سطحی و ۱۰۰ درصد برای آبیاری زیرسطحی، حجم آب مورد نیاز از حاصل ضرب نیاز آبیاری در سطح سایه‌انداز محاسبه شد. سپس این حجم بر دبی گسیلنده‌های تیمار شاهد (۱۰۰ درصد) تقسیم و زمان آبیاری به دست آمد. در تیمارهای کم‌آبیاری، حجم آب و در نتیجه زمان آبیاری، با ضرب در ضریب تنش آبی، کاهش داده شد.

در این تحقیق از چهارچوب ردپای آب Hoekstra و همکاران (۲۰۱۱) استفاده شده است (Hoekstra et al., 2011). ردپای آب مربوط به یک محصول، حجم آب شیرینی است که برای تولید آن محصول مورد استفاده قرار می‌گیرد و در کل زنجیره‌ی تولید آن محصول محاسبه می‌شود. ردپای آب شامل سه جزء (ردپای آب آبی، سبز و خاکستری) می‌باشد. ردپای آب آبی به مصرف منابع آب آبی (آب سطحی و زیرزمینی) در طول فرآیند تأمین یک محصول اشاره

2- Water Footprint Green

3- Water Footprint Blue

4- Water Footprint Grey

1- Farm Capacity

کارایی مصرف آب (WUE)

کارایی مصرف آب (WUE) یکی از شاخص‌های مطرح در خصوص سنجش میزان بهره‌وری آب کشاورزی است. این شاخص در واقع نسبت مقدار محصول تولید شده در ازای مقدار آب مصرفی (تبخیر- تعرق) گیاه است. در این تعریف می‌توان به‌جای تبخیر- تعرق گیاه مقدار آب مصرفی در مزرعه را (با لحاظ کردن راندمان کاربرد آب آبیاری) جانشین کرده و مقدار تولید محصول را به ازای واحد حجم آب مصرفی در آبیاری به‌دست آورد. هر چه این نسبت بیشتر باشد نشان‌دهنده مصرف صحیح‌تر آب است.

$$WUE = 100 \left(\frac{Y}{V_w} \right) \quad (6)$$

در رابطه فوق: Y مقدار محصول که به مصرف می‌رسد بر حسب کیلوگرم در هکتار؛ V_w آب مصرف شده توسط گیاه (تبخیر- تعرق واقعی گیاه) بر حسب مترمکعب در هکتار که با استفاده از نرم افزار کراپ وات قابل محاسبه است.

ارزش اقتصادی زمین

از حاصل ضرب سود خالص هر هکتار محصول به‌دست‌آمده در عملکرد آن به دست می‌آید.

$$ELP = NB * Y \quad (7)$$

که NB سود خالص برحسب دلار در هر تن و Y عملکرد محصول برحسب تن در هکتار است. واحد ارزش اقتصادی زمین دلار است.

ردپای انرژی

از تقسیم ردپای آب محصول (Water Footprint) به کالری تولید شده فرمول ردپای کالری (Calorie Footprint) محاسبه می‌شود.

$$\text{ردپای انرژی} = \frac{\text{ردپای آب محصول (لیتر)}}{\text{کالری تولیدشده محصول (کالری)}} \quad (8)$$

بهینه‌سازی هنر پیدا نمودن بهترین جواب داخل فضای قابل قبول (وضعیت‌های ممکن) موجود است و این کار را از طریق حداقل یا حداکثر سازی عملکرد سیستم انجام می‌دهد. در حقیقت یک مسئله بهینه‌سازی را می‌توان به‌عنوان یک مسئله تصمیم‌گیری مدنظر قرارداد که در آن به‌منظور رسیدن به اهداف موردنظر، بایستی مسئله را به‌صورت یک مدل ریاضی که متغیرهای واردشده در آن، همان متغیرهای تصمیم می‌باشند، فرمول‌بندی نمود. بهترین گزینه‌های ممکن در تصمیم‌گیری، از حل این مدل ریاضی قابل‌دسترسی می‌باشند. در مطالعه حاضر، مدل بهینه‌سازی یک‌بار باهدف کاهش ردپای آب رابطه‌ی (۴) و بار دیگر باهدف افزایش ردپای کالری رابطه‌ی (۸) فرمول‌بندی و اجرا خواهد شد. همچنین محدودیت‌های

موجود با لحاظ نمودن حداقل و حداکثر آب در دسترس منطقه و حداقل و حداکثر سطح کشت به تفکیک محصولات عمده زراعی در نظر گرفته خواهند شد.

$$\text{Min}Z_1 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (WF_{ij} \times X_{ij}) \quad (9)$$

$$i = 1, \dots, n, \quad j = 1, \dots, m$$

$$\text{Max}Z_2 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m ((Cal_i / WF_{ij}) \times X_{ij}) \quad (10)$$

$$i = 1, \dots, n, \quad j = 1, \dots, m$$

که در آن‌ها، WF_{ij} : مجموع ردپای آب محصول i در سال z ، Cal_i : کالری محصول i حاصل از مصرف محصول i در X_{ij} : سطح کشت محصول i در سال z برحسب هکتار است. در نهایت نتایج حاصل از این دو مدل بهینه‌سازی از منظر بهره‌وری آب و کالری دریافتی مورد مقایسه و تحلیل قرار می‌گیرد.

نتایج و بحث

شاخص‌های ردپای آب محصول سیب‌زمینی

جدول ۲، مقادیر ردپای آب سیب‌زمینی (WFGreen)، آب آبی (WFBblue)، آب خاکستری (WFGrey) و کل ردپای آب (WFT) در تیمارهای مختلف آبیاری و کوددهی سیب‌زمینی نشان می‌دهد. بر اساس نتایج، کمترین ردپای آب کل (WFT) مربوط به تیمار آبیاری ۹۰ درصد نیاز آبی با روش آبیاری قطره‌ای سطحی و ۶۰ درصد کود نیتروژنه (WL2IM1F2) با ۱۹۷/۵۰ مترمکعب بر تن است که نشان‌دهنده کارآمدترین مصرف آب در این شرایط است. که به دلیل کاهش تبخیر و توزیع یکنواخت‌تر آب، کارایی بالاتری دارد. این تیمار همچنین کمترین مقادیر آب آبی (۱۴۳/۹۷) و آب خاکستری (۴۶/۸۶) را دارد، که حاکی از بهینه‌ترین مدیریت منابع آب آبی و کاهش آلودگی ناشی از کودهاست.

در مقابل، بیشترین ردپای آب کل در تیمار آبیاری ۸۰ درصد نیاز آبی با روش آبیاری زیرسطحی و ۶۰ درصد کود نیتروژنه (WL3IM2F2) با ۳۷۶/۹۲ مترمکعب بر تن مشاهده شد که ناشی از آبیاری محدود همراه با روش آبیاری زیرسطحی و کوددهی متوسط است. این افزایش عمدتاً به دلیل سهم بالای آب خاکستری (۱۴۰/۶۷) و آب آبی (۲۲۳/۱۷) است، که احتمالاً نشان‌دهنده کارایی پایین مصرف آب و هدررفت بیشتر در این تیمار می‌باشد. این احتمالاً به دلیل عدم تناسب بین عمق نصب سیستم زیرسطحی و نیاز ریشه در شرایط کم‌آبی است که منجر به هدررفت آب و کاهش جذب توسط گیاه می‌شود.

که در شرایط آبیاری محدود ۸۰ درصد نیاز آبی WL3، وابستگی به آب سبز افزایش می‌یابد (مانند WL3IM2F2 با ۱۳/۰۸). همچنین، روش آبیاری قطره‌ای سطحی (IM1) در اکثر موارد نسبت به روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی (IM2)، ردپای آبی و خاکستری کمتری دارد، که نشان‌دهنده مزیت این روش در کاهش مصرف آب و آلاینده‌گی است.

در کل، نتایج این تحلیل تأیید می‌کند که ترکیب آبیاری ۹۰ درصد نیاز آبی (WL2) با روش آبیاری قطره‌ای سطحی (IM1) و کوددهی ۱۰۰ درصد یا ۶۰ درصد نیاز کودی (F1 یا F2) می‌تواند راهکاری مؤثر برای کاهش ردپای آب و افزایش پایداری محیطی در کشت سیب‌زمینی باشد. این یافته‌ها با توجه به شرایط کم‌آبی منطقه جیرفت و نیاز به بهینه‌سازی مصرف منابع آب و کود، از اهمیت عملی بالایی برخوردار است. مطالعات (Fernandez et al., 2020) نشان داده است که ترکیب آبیاری قطره‌ای با کوددهی متعادل می‌تواند ردپای آبی را تا ۳۰ درصد کاهش دهد، که با نتایج این تحقیق (ردپای آبی ۱۴۳ مترمکعب بر تن در تیمار بهینه) همخوانی دارد.

یافته‌های این پژوهش با نتایج مطالعات پیشین همسو است. به عنوان مثال، (Bohman et al., 2019) نیز گزارش کردند که استفاده از آبیاری قطره‌ای سطحی با تأمین ۸۵-۹۰ درصد نیاز آبی و کاهش ۵۰-۶۰ درصدی کود نیتروژنه منجر به حداقل ردپای آب کل در سیب‌زمینی می‌شود و دلیل آن را کاهش تبخیر و توزیع یکنواخت آب دانستند. همچنین، (Hussain et al., 2010) نشان دادند که آبیاری قطره‌ای سطحی در مقایسه با روش‌های زیرسطحی به‌ویژه تحت شرایط کم‌آبیاری به دلیل جلوگیری از هدررفت آب و بهبود دسترسی ریشه به آب، از کارایی بالاتری برخوردار است. علاوه بر این، (Ali et al., 2025) تأیید کردند که کاهش کود نیتروژنه تا ۶۰ درصد نیاز گیاه نه تنها بر عملکرد محصول تأثیر منفی نمی‌گذارد، بلکه از طریق کاهش نشت نیترات به آب‌های زیرزمینی، ردپای آبی خاکستری را نیز به‌طور معناداری کاهش می‌دهد.

مقایسه ردپای آبی سبز نشان می‌دهد که تیمارهای با آبیاری کامل (۱۰۰ درصد نیاز آبی) و آبیاری ۹۰ درصد نیاز آبی WL1 و WL2 معمولاً مقدار کمتری از این منبع را مصرف می‌کنند، در حالی

جدول ۲- مقادیر ردپای آب در تیمارهای مختلف سیب‌زمینی

WFT (m3/ton)	WFGrey (m3/ton)	WFBlue(m3/ton)	WFGreen(ton/m3)	TREATMENT
۲۸۲.۰۰	۷۷.۵۴	۱۹۶.۳۱	۸.۱۵	WL1IM1F1
۲۸۱.۸۹	۷۷.۵۳	۱۹۶.۲۲	۸.۱۴	WL1IM1F2
۳۰۹.۶۲	۸۹.۳۹	۲۱۱.۴۶	۸.۷۸	WL1IM1F3
۲۲۵.۳۶	۵۷.۶۷	۱۶۰.۲۶	۷.۴۳	WL1IM2F1
۲۴۲.۴۶	۶۴.۷۳	۱۶۹.۸۶	۷.۸۷	WL1IM2F2
۲۸۶.۳۷	۸۵.۴۶	۱۹۲.۰۲	۸.۹۰	WL1IM2F3
۲۰۰.۸۹	۴۸.۷۸	۱۴۵.۳۸	۶.۷۴	WL2IM1F1
۱۹۷.۵۰	۴۶.۸۶	۱۴۳.۹۷	۶.۶۷	WL2IM1F2
۲۴۷.۶۸	۶۷.۲۵	۱۷۲.۴۴	۷.۹۹	WL2IM1F3
۲۱۹.۹۶	۶۰.۱۹	۱۵۱.۹۱	۷.۸۶	WL2IM2F1
۳۱۱.۲۵	۱۰۰.۴۱	۲۰۰.۴۶	۱۰.۲۸	WL2IM2F2
۲۷۶.۴۰	۸۴.۱۴	۱۸۲.۸۱	۹.۴۶	WL2IM2F3
۲۵۴.۶۶	۷۴.۶۵	۱۷۱.۰۴	۸.۹۷	WL3IM1F1
۱۸۰.۴۱	۴۳.۳۵	۱۳۰.۲۳	۶.۸۳	WL3IM1F2
۲۵۰.۰۲	۷۲.۰۸	۱۶۹.۰۸	۸.۸۷	WL3IM1F3
۳۰۷.۱۶	۱۰۴.۷۲	۱۹۱.۲۳	۱۱.۲۱	WL3IM2F1
۳۷۶.۹۲	۱۴۰.۶۷	۲۳۳.۱۷	۱۳.۰۸	WL3IM2F2
۳۰۲.۱۲	۱۰۲.۳۲	۱۸۸.۷۴	۱۱.۰۶	WL3IM2F3

درصدی آب و ۴۰ درصدی کود است. این تیمار به‌وضوح برتری خود را در شرایط کم‌آبی نشان می‌دهد. در مقابل، پایین‌ترین مقدار WUE (۴/۲۴ کیلوگرم در مترمکعب) مربوط به تیمار WL3IM2F2 بود که تأثیر منفی آبیاری زیرسطحی در شرایط تنش آبی را آشکار می‌سازد. به‌طور کلی، آبیاری سطحی در تمام سطوح آبیاری منجر به بهبود

علاوه بر ردپای آب در تیمارهای مختلف، متغیرهای مرتبط با آن نیز برآورد گردید. جدول ۳ تغییرات WUE، ELP و EVWF را در تیمارهای مختلف کشت سیب‌زمینی نشان می‌دهد. بالاترین مقدار WUE (۷/۳۹ کیلوگرم در مترمکعب) در تیمار WL3IM1F2 مشاهده شد که نشان‌دهنده تأثیر مثبت آبیاری سطحی همراه با کاهش ۲۰

کاهش می‌یابد و کود اضافی به جای جذب، از طریق آبشویی هدر می‌رود. این موضوع کاهش ELP در تیمارهای با کود کامل (F1) را توضیح می‌دهد.

در تمام شاخص‌ها، آبیاری سطحی (IM1) عملکرد بهتری نسبت به آبیاری زیرسطحی (IM2) نشان داد. این برتری در شرایط کم‌آبی (WL3) بارزتر بود. همچنین، کاهش متوسط کود (F2) در بیشتر موارد نتایج بهتری نسبت به کوددهی کامل (F1) یا کاهش شدید کود (F3) داشت. این الگو حاکی از آن است که رویکردهای کشاورزی پایدار با مصرف بهینه نهاده‌ها می‌توانند همزمان به بهبود کارایی مصرف آب و افزایش درآمد کشاورزان منجر شوند. کاهش متعادل کود (F2) با جلوگیری از آبشویی نیتروژن و هماهنگی با ظرفیت جذب گیاه تحت تنش آبی، به بهبود همزمان شاخص‌های اقتصادی EVWF و ELP منجر می‌شود. این سینرژی بین مدیریت آب و کود، الگویی پایدار ارائه می‌دهد که هم بازدهی منابع و هم سودآوری را افزایش می‌دهد، به طوری که ترکیب IM1 با F2 (روش سطحی با کود ۶۰ درصد) در سطوح آبیاری WL2/WL3 به‌عنوان راهکار بهینه توصیه می‌شود. مطالعات محققین نشان می‌دهند این سیستم ضمن کاهش ۴۰ درصدی مصرف نهاده‌ها، مقاومت گیاه به تنش‌های آبی را نیز از طریق تنظیم متابولیت‌های کلیدی مانند ABA افزایش می‌دهد (El Mokh et al., 2014).

WUE شد، به‌ویژه زمانی که با کاهش متعادل کوددهی همراه بود. در بررسی شاخص ارزش اقتصادی آب (EVWF)، تیمار WL3IM1F2 با EVWF معادل ۱/۸۱ دلار در مترمکعب بالاترین ارزش اقتصادی را برای آب مصرفی نشان داد. این نتیجه حاکی از آن است که حتی در شرایط کم‌آبی، مدیریت بهینه آبیاری و کود می‌تواند سودآوری هر واحد آب را به حداکثر برساند. در مقابل، تیمار WL3IM2F2 با EVWF تنها ۰/۸۵ دلار در مترمکعب کمترین بازده اقتصادی را داشت. جالب آنکه در سطوح بالاتر آبیاری WL1 و WL2، ارزش اقتصادی آب کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده کاهش بازده نهایی آب در شرایط آبیاری کامل است. اما در بررسی شاخص ارزش زمین (ELP)، تیمار WL2IM1F1 با ELP برابر ۱۰۲۴۸/۵۶ دلار در هکتار بیشترین ارزش اقتصادی را برای زمین ایجاد کرد. این نتیجه نشان می‌دهد که کاهش ۱۰ درصدی آب آبیاری (WL2) همراه با آبیاری سطحی و کوددهی کامل می‌تواند بهینه‌ترین حالت برای حداکثرسازی درآمد باشد. در نقطه مقابل، تیمار WL3IM2F2 با ELP تنها ۵۰۴۸/۴۹ دلار در هکتار کمترین ارزش زمین را نشان داد که تأثیر مخرب ترکیب آبیاری زیرسطحی با تنش آبی شدید و کاهش کود را بر درآمدزایی مزرعه آشکار می‌سازد. کاهش ۴۰ درصد کود نیتروژن (F2) در شرایط کم‌آبی (WL3) از تلفات نیترات جلوگیری می‌کند. براساس (Shrestha et al., 2024)، در تنش آبی، جذب نیتروژن توسط گیاه

جدول ۳- تغییرات کارایی مصرف آب، شاخص ارزش اقتصادی آب و شاخص ارزش زمین در تیمارهای مختلف کاشت سیب زمینی

تیمار	کارایی مصرف آب (کیلوگرم در مترمکعب)	ارزش اقتصادی آب (دلار در مترمکعب)	شاخص ارزش زمین (دلار در مترمکعب)
WL1IM1F1	۴.۹۳	۱.۱۴۵۷	۸۲۰.۵۸
WL1IM1F2	۴.۹۳	۱.۱۴۷۴	۸۲۱۵.۲۳
WL1IM1F3	۴.۵۵	۱.۰۳۳۱	۷۵۷۰.۹۳
WL1IM2F1	۶.۰۱	۱.۴۳۲۸	۹۰۰۲.۸۷
WL1IM2F2	۵.۶۷	۱.۳۳۰۷	۸۴۸۹.۳۷
WL1IM2F3	۵.۲۱	۱.۱۹۸	۷۷۹۷.۷۷
WL2IM1F1	۶.۸۴	۱.۶۸۵۴	۱۰۲۴۸.۶
WL2IM1F2	۶.۷۵	۱.۶۵۵۶	۱۰۱۱۱.۱۳
WL2IM1F3	۵.۶۲	۱.۳۱۸۱	۸۴۲۳.۱۷
WL2IM2F1	۶.۶۲	۱.۵۸۳۲	۸۹۳۰.۴
WL2IM2F2	۴.۷۶	۱.۰۳۲۴	۶۴۲۱.۷۳
WL2IM2F3	۵.۲۶	۱.۱۷۷۶	۷۰۹۶.۸
WL3IM1 F1	۵.۶۳	۱.۲۸۰۲	۷۴۹۶.۹
WL3IM1F2	۷.۳۹	۱.۸۰۵۱	۹۸۴۸.۰۷
WL3IM1F3	۵.۶۲	۱.۲۷۶۳	۷۴۸۵.۸۷
WL3IM2F1	۵.۰۳	۱.۰۷۱۸	۶۰۲۷.۵۳
WL3IM2F2	۴.۲۴	۰.۸۵۰۲	۵۰۸۵.۵
WL3IM2F3	۵.۱۱	۱.۰۹۵۲	۶۱۲۴.۸

مشاهده گردید.

مطالعه (Zirebwa et al., 2020) نشان داد که آبیاری بهینه معادل WL2 در این پژوهش عملکرد سیب‌زمینی را نسبت به آبیاری محدود (WL3) تا ۳۵ درصد افزایش می‌دهد، که مشابه نتایج این تحقیق است (۳۲/۱۳ تن در هکتار در WL2IM1F1 در مقابل ۱۵/۹۴ تن در WL3IM2F2). پژوهش (Yang et al., 2024) نیز گزارش کرد که آبیاری سطحی (مشابه IM1 در این مطالعه) نسبت به آبیاری زیرسطحی (IM2)، کارایی مصرف آب را تا ۲۵ درصد بهبود می‌بخشد، که با نتایج این تحقیق (۶/۸۴ کیلوگرم بر مترمکعب در WL2IM1F1 در مقابل ۴/۷۶ در WL2IM2F2) همخوانی دارد. مطالعه (Gopalasundaram et al., 2012) نشان داد که کودهای نیتروژنه (مشابه F1 در این پژوهش) در شرایط آبیاری مطلوب، بیشترین تأثیر را بر عملکرد سیب‌زمینی دارند، در حالی که در شرایط کم‌آبی کودهای نیتراژنه، (مشابه F3) ممکن است مقاومت به خشکی را افزایش دهند. این موضوع با نتایج این تحقیق مطابقت دارد، زیرا در تیمارهای با آبیاری محدود (WL3)، کود F2 عملکرد بهتری نسبت به F1 نشان داد.

اثرات متقابل سطوح آبیاری و روش آبیاری و کود بر عملکرد و شاخص‌های ردپای آب

با توجه به جدول شماره ۴، در اثر متقابل سطوح آبیاری، روش آبیاری و کود بر عملکرد و ردپای آب و کارایی مصرف آب و شاخص ارزش زمین و ارزش اقتصادی آب اختلاف معنی‌داری دیده نمی‌شود. WL2IM1F1 (سطح آبیاری ۹۰ درصد - روش سطحی - کود ۱۰۰ درصد) دارای بیشترین عملکرد ۳۲/۱۳ تن در هکتار و شاخص ارزش زمین ۱۰۲۴۸/۶ دلار در هکتار را دارد، ولی WL3IM1F2 با عملکرد ۳۰/۸۷ تن در هکتار کمترین ردپای ۱۸۰/۴۱ مترمکعب در تن، بیشترین کارایی مصرف آب ۷/۳۹ کیلوگرم در مترمکعب، شاخص ارزش آب ۱/۸۱ دلار در هکتار است. بهترین تیمار WL2IM1F1 از لحاظ عملکرد و شاخص ارزش زمین است ولی مصرف آب بالاتری دارد، تیمار WL3IM1F2 برای کشاورزی پایدار و مصرف آب بهینه گزینه بهتری است. کمترین عملکرد ۱۵/۹۴ تن در هکتار، بیشترین ردپای آب ۳۷۶/۹۲ کیلوگرم در مترمکعب، کمترین کارایی مصرف آب ۴/۲۴ کیلوگرم در مترمکعب، شاخص ارزش زمین ۵۰۸۵/۵ دلار در هکتار و شاخص ارزش آب ۰/۸۵ دلار در هکتار در WL3IM2F2 (سطح آبیاری ۸۰ درصد - روش آبیاری زیرسطحی - کود ۶۰ درصد)

مقایسه میانگین اثر متقابل سطوح آبیاری و کود بر روی متغیرهای مورد بررسی در محصول سیب‌زمینی جدول ۴-

کارایی مصرف آب (کیلوگرم در مترمکعب)	شاخص ارزش اقتصادی آب (دلار در هکتار)	شاخص ارزش زمین (دلار در هکتار)	ردپای آب (مترمکعب در تن)	عملکرد (تن در هکتار)	اثر متقابل سطح آبیاری و کود و روش آبیاری
۴.۹۳a	۱.۱۵a	۸۲۰.۵۸a	۲۸۲.۰۰a	۲۵.۷۲a	WL1IM1F1
۴.۹۳a	۱.۱۵a	۸۲۱۵.۲۳a	۲۸۱.۹۰a	۲۵.۷۵a	WL1IM1F2
۴.۵۵a	۱.۰۳a	۷۵۷۰.۹۳a	۳۰۹.۶۲a	۲۳.۷۳a	WL1IM1F3
۶.۰۱a	۱.۴۳a	۹۰۰۲.۸۷a	۲۲۵.۳۶a	۲۸.۲۲a	WL1IM2 F1
۵.۶۷a	۱.۳۳a	۸۴۸۹.۳۷a	۲۴۲.۴۶a	۲۶.۶۱a	WL1IM2 F2
۵.۲۱a	۱.۲۰a	۷۷۹۷.۷۷a	۲۸۶.۳۷a	۲۴.۴۵a	WL1IM2 F3
۶.۸۴a	۱.۶۹a	۱۰۲۴۸.۶a	۲۰۰.۸۹a	۳۲.۱۳a	WL2IM1F1
۶.۷۵a	۱.۶۶a	۱۰۱۱۱.۱۳a	۱۹۷.۵۰a	۳۱.۷۰a	WL2IM1F2
۵.۶۲a	۱.۳۲a	۸۴۲۳.۱۷a	۲۴۷.۶۹a	۲۶.۴۰a	WL2IM1F3
۶.۶۲a	۱.۵۸a	۸۹۳۰.۴a	۲۱۹.۹۶a	۲۷.۹۹a	WL2IM2F1
۴.۷۶a	۱.۰۳a	۶۴۲۱.۷۳a	۳۱۱.۲۵a	۲۰.۱۳a	WL2IM2F2
۵.۲۶a	۱.۱۸a	۷۰۹۶.۸a	۲۷۶.۴۰a	۲۲.۲۵a	WL2IM2F3
۵.۶۳a	۱.۲۸a	۷۴۹۶.۹a	۲۵۴.۶۶a	۲۳.۵۰a	WL3IM1F1
۷.۳۹a	۱.۸۱a	۹۸۴۸.۰۷a	۱۸۰.۴۱a	۳۰.۸۷a	WL3IM1F2
۵.۶۲a	۱.۲۸a	۷۴۸۵.۸۷a	۲۵۰.۰۲a	۲۳.۴۷a	WL3IM1F3
۵.۰۳a	۱.۰۷a	۶۰۲۷.۵۳a	۳۰۷.۱۶a	۱۸.۹۰a	WL3IM2F1
۴.۲۴a	۰.۸۵a	۵۰۸۵.۵a	۳۷۶.۹۲a	۱۵.۹۴a	WL3IM2F2
۵.۱۱a	۱.۱۰a	۶۱۲۴.۸a	۳۰۲.۱۲a	۱۹.۲a	WL3IM2F3

حروف مشابه نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار بین متغیرهاست.

بهینه‌سازی سطح زیرکشت محصولات کشاورزی در شهرستان جیرفت

در مرحله بهینه‌سازی سطح زیرکشت در تمام دسته محصولات کشاورزی در دشت جیرفت، میزان متوسط همه متغیرها شامل ردپا، میزان تولید، میزان عملکرد و میزان کالری را به‌طور متوسط برآورد و با دو هدف حداقل شدن ردپای آب و حداکثر شدن کالری تولید شده (ردپای انرژی)، بهینه‌سازی سطح زیرکشت را با استفاده از بهینه‌سازی خطی صورت می‌گیرد. (جدول ۵)، متغیرهای فوق را برای سایر محصولات مورد مقایسه نشان می‌دهد.

جدول ۵- متغیرهای مورد استفاده سایر محصولات کشاورزی مورد استفاده در بهینه‌سازی

نام محصول	عملکرد (تن در هکتار)	نیاز آبی (مترمکعب در هکتار)	ردپای آب (لیتر در کیلوگرم)	کالری در هر کیلوگرم	ردپای انرژی (لیتر بر کالری)
پياز	۵۲.۹۶	۹۳۲۸.۸	۱۲۱.۷۷	۴۰۰۰	۰.۳۰
گوجه‌فرنگی	۳۲.۷۴	۶۴۲۶	۲۲۸.۸۷	۱۸۰۰	۱.۲۷
هندوانه	۲۹.۹۹	۳۳۷۷.۷۶	۲۰۳.۸۷	۳۵۰۰	۰.۵۸
گندم	۴.۱۹	۴۷۶۱.۶	۲۲۴۸.۸۷	۳۴۰۰۰	۰.۶۶
ذرت	۷.۶۳	۶۶۵۱.۷	۱۳۶۲.۴۳	۳۸۶۰۰	۰.۳۵

کاهش تولید گندم (۳۳/۷ درصد) ممکن است چالش‌های امنیت غذایی ایجاد کند. پژوهش‌های (Zwaert et al., 2010) تأکید می‌کنند که چنین تغییراتی باید همراه با توسعه ارقام مقاوم به خشکی و ایجاد زنجیره‌های ارزش برای محصولات جایگزینی مانند پیاز اجرا شوند تا پایداری بلندمدت سیستم‌های کشاورزی تضمین گردد. این نتایج همسو با یافته‌های (Wu et al., 2024) در زمینه مدیریت یکپارچه آب و کود است که نشان می‌دهد ترکیب روش‌های آبیاری کارآمد با تنظیم مصرف نهاده‌ها می‌تواند همزمان به اهداف زیست‌محیطی و اقتصادی دست یابد.

سناریوی دوم: بهینه‌سازی سطح کشت براساس حداکثر شدن کالری تولید شده (ردپای انرژی):

در سناریوی دوم (جدول ۷)، بهینه‌سازی الگوی سطح کشت براساس حداکثر شدن کالری تولید شده (ردپای انرژی)، از بین ۱۸ تیمار سیب‌زمینی با خصوصیات مختلف، برای تابع هدف، محصول IL2IM1F1 (سطح آبیاری ۹۰ درصد- روش سطحی - کود ۱۰۰ درصد) انتخاب و با ۵ محصول دیگر در فرایند بهینه‌سازی وارد شده است. در این سناریو، بهینه‌سازی الگوی کشت با هدف حداکثرسازی کالری تولیدی (بر مبنای ردپای انرژی) انجام شده است.

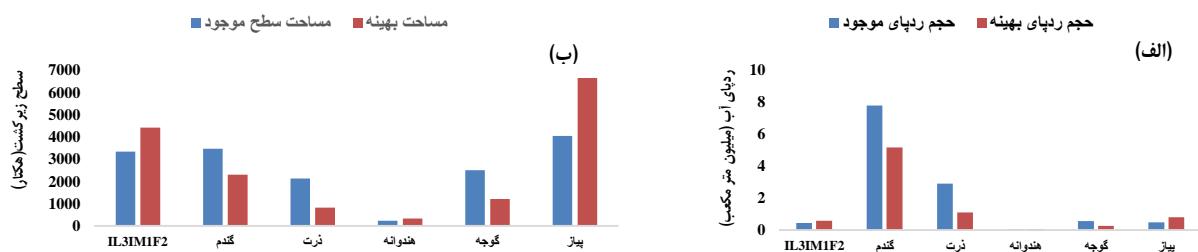
مطالعه (Jaafar et al., 2024)، نشان داد که افزایش کارایی مصرف آب مستقیماً بر سودآوری کشت سیب‌زمینی تأثیر می‌گذارد، که با نتایج این پژوهش بالاترین شاخص ارزش اقتصادی آب در WL2IM1F1 با ۱/۶۹ دلار بر هکتار همخوانی دارد. پژوهش (Mekonnen & Hoekstra., 2011)، در مورد ردپای آب گزارش کرد که سیستم‌های آبیاری کارآمد (مانند آبیاری قطره‌ای) می‌توانند ردپای آب را تا ۳۰ درصد کاهش دهند، که مشابه یافته‌های این تحقیق است (۲۰۰/۸۹ مترمکعب بر تن در WL2IM1F1 در مقابل ۳۷۶/۹۲ در WL3IM2F2).

سناریوی اول: بهینه‌سازی سطح کشت براساس حداقل شدن ردپای آب

در این مطالعه، بهینه‌سازی سطح زیرکشت محصولات اصلی جیرفت با هدف حداقل‌سازی ردپای آب انجام شد که در آن سیب‌زمینی با ۱۸ تیمار مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت. با توجه به محدودیت سطح زیرکشت و بر اساس تابع هدف تعیین شده، تیمار IL3IM1F2 (آبیاری ۸۰ درصد سطحی با کاهش ۶۰ درصدی کود) به عنوان بهینه‌ترین گزینه برای سیب‌زمینی انتخاب شد. نتایج نشان داد که در این سناریو، شاخص‌های سیب‌زمینی (تولید، سطح زیرکشت و ردپای آب) ۱/۳۳ برابر افزایش یافت، در حالی که برای گندم ۶۲ درصد کاهش نشان داد. تحلیل نتایج نشان می‌دهد که بهینه‌سازی الگوی کشت بر اساس حداقل‌سازی ردپای آب منجر به کاهش ۳۴/۶ درصدی مصرف آب (از ۱۲/۲۴ به ۸/۰۱ میلیون مترمکعب) و همزمان افزایش ۲۶/۷ درصدی تولید کل (از ۴۱۷ به ۵۲۸ هزار تن) شده است. این بهبود عمدتاً از طریق تغییر ترکیب کشت به نفع محصولات با کارایی آب بالاتر مانند پیاز (افزایش ۶۴/۲ درصدی سطح زیرکشت) و هندوانه (افزایش ۴۷/۷ درصدی) و کاهش کشت محصولات پرمصرف مانند ذرت (کاهش ۶۲.۱ درصدی) و حذف نسبی گوجه‌فرنگی محقق شده است (جدول ۶). نتایج یافته‌ها حاکی از آن است که رویکرد حداقل‌سازی ردپای آب می‌تواند راهکاری مؤثر برای مدیریت منابع آب در شرایط کم‌آبی باشد، اما نیازمند ملاحظات اقتصادی-اجتماعی است. اگرچه این سناریو به بهبود شاخص‌های پایداری منجر شده، اما

جدول ۶- وضع موجود و بهینه‌سازی سطح زیر کشت بر اساس سناریوی حداقل سازی ردپای آب

بهبینه سازی حداقل سازی ردپای آب			وضع موجود			نام گروه محصول
کل حجم ردپای (MCM)	سطح کشت (ha)	تولید (هزار تن)	کل حجم ردپای (MCM)	سطح کشت (ha)	تولید (هزار تن)	
۰.۵۸	۴۴۱۷	۱۰۴.۸۳	۰.۴۴	۳۳۳۱.۵۹	۷۹.۰۷	IL3IM1F2
۵.۱۷	۲۳۰۰	۹.۶۴	۷.۷۹	۳۴۶۳.۲۸	۱۴.۵۲	گندم
۱.۱۰	۸۰۸	۶.۱۶	۲.۹۰	۲۱۳۰.۴۴	۱۶.۲۵	ذرت
۰.۰۷	۳۳۱.۱	۹.۹۳	۰.۰۵	۲۲۴.۱۴	۶.۷۲	هندوانه
۰.۲۷	۱۲۰۰.۸۳	۳۹.۳۱	۰.۵۷	۲۵۰۴.۴۵	۸۱.۹۹	گوجه
۰.۸۱	۶۶۴۵.۳	۳۵۸.۵۹	۰.۴۹	۴۰۴۸.۳۳	۲۱۸.۴۵	پیاز
۸.۰۱	۱۵۷۰۲.۲۳	۵۲۸.۴۶	۱۲.۲۴	۱۵۷۰۲.۲۳	۴۱۷.۰۰	کل



شکل ۳- تغییرات ردپای آب (الف) و سطح زیر کشت (ب) در سناریو بهینه‌سازی اول

که کالری تولیدی گندم به ازای هر هکتار کمتر از ذرت و سیب‌زمینی است. با این حال، این مسئله تنش‌های احتمالی در تأمین امنیت غذایی را مطرح می‌کند، زیرا گندم یک کالای استراتژیک است. همچنین، هندوانه و گوجه‌فرنگی به دلیل بازده کالری بسیار پایین (به ترتیب ۰/۰۶ و ۰/۰۷ MCAL) کاهش یافته‌اند، اما پیاز علیرغم سهم کم در کالری کل، افزایش جزئی در سطح کشت داشته که احتمالاً به دلیل ضرورت بازار یا نقش آن در تناوب زراعی است. در کل، این بهینه‌سازی نشان می‌دهد که مدیریت سطح زیر کشت بر مبنای معیارهای کارایی انرژی می‌تواند منابع آب و خاک را به شکل مؤثرتری تخصیص دهد، اما باید ملاحظات اجتماعی و اقتصادی نیز در نظر گرفته شود تا الگوی کشت پایدارتری طراحی گردد. مطالعه حاضر بهینه‌سازی الگوی کشت را با هدف حداکثرسازی کالری تولیدی (ردپای انرژی) بررسی کرده است. نتایج نشان می‌دهد که تغییر تخصیص سطح زیر کشت به سمت محصولات پرکالری مانند سیب‌زمینی (IL2IM1F1) و ذرت، موجب افزایش ۱۱/۹ درصدی کل کالری تولیدی شده است، درحالی که سطح زیر کشت کل ثابت مانده است. این یافته با پژوهش‌های مشابهی مانند مطالعه (Ye et al., 2023) که بر بهینه‌سازی الگوی کشت با معیار بازده انرژی تأکید داشتند، همسو است. آنها نیز گزارش کردند که کاهش سطح کشت

نتایج نشان می‌دهد که با تغییر تخصیص سطح زیر کشت بین محصولات مختلف، می‌توان بهره‌وری سیستم زراعی را به‌طور چشمگیری افزایش داد، بدون آنکه نیاز به گسترش زمین‌های کشاورزی باشد. در سناریوی بهینه‌شده، کل سطح زیر کشت ثابت مانده (۱۵,۷۰۲ هکتار)، اما با کاهش سطح برخی محصولات کم‌بازده و افزایش محصولات پرکالری، تولید کالری کل ۱۱/۹ درصد رشد داشته است. این بهبود عمدتاً ناشی از افزایش سطح زیر کشت سیب‌زمینی (IL2IM1F1) و ذرت است که به ترتیب ۳۲/۶ درصد و ۷۴/۶ درصد گسترش یافته‌اند. این دو محصول به دلیل بازده کالری بالا (به ازای هر هکتار) در اولویت بهینه‌سازی قرار گرفتند. به‌عنوان مثال، ذرت با اختصاص ۳,۷۲۰ هکتار به جای ۲,۱۳۰ هکتار در وضع موجود، ۱۴/۳۶ MCAL کالری تولید کرده که ۷۴/۷ درصد افزایش نسبت به قبل دارد. این نشان می‌دهد که تغییر ترکیب کشت حتی با سطح ثابت زمین می‌تواند امنیت غذایی را از نظر انرژی بهبود بخشد.

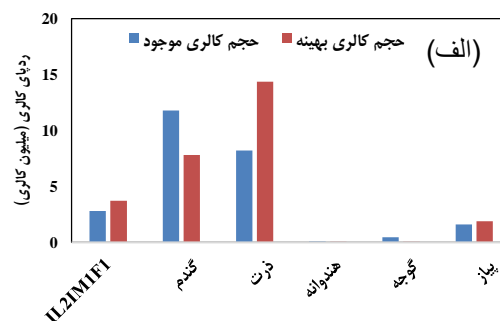
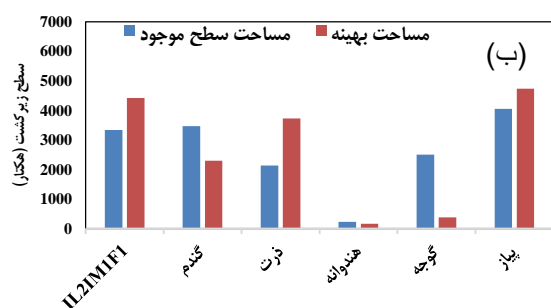
از سوی دیگر، محصولات کم‌بازده از نظر کالری (مانند گندم، هندوانه، و گوجه‌فرنگی) کاهش سطح کشت قابل‌توجهی داشته‌اند. برای نمونه، گندم با کاهش ۳۳/۶ درصدی سطح کشت، تنها ۱۴/۳۶ MCAL کالری تولید کرده است. این کاهش به این دلیل است

غذایی تأکید داشتند، تفاوت دارد. این تناقض نشان‌دهنده اهمیت تلفیق معیارهای چندگانه (مانند کالری، آب، و امنیت غذایی) در بهینه‌سازی الگوی کشت است. همچنین، ثبات سطح کشت پیاز علیرغم بازده کالری پایین، احتمالاً به دلیل نقش آن در تنوع زراعی یا تقاضای بازار است که در مطالعات مشابه کمتر مورد توجه قرار گرفته است. بنابراین، این پژوهش ضمن تأیید مزایای حداکثرسازی کالری، لزوم در نظر گرفتن ملاحظات اجتماعی-اقتصادی و زیست‌محیطی را در طراحی الگوهای کشت خاطر نشان می‌سازد.

محصولات کم‌بازده مانند سبزیجات و افزایش سهم غلات و سیب‌زمینی می‌تواند کارایی سیستم زراعی را بهبود بخشد. با این حال، مطالعه حاضر با معرفی تیمارهای خاص سیب‌زمینی (مانند IL2IM1F1) و محاسبه ردپای کالری بر اساس نسبت ردپای آب به کالری، گام فراتر نهاده و معیار دقیق‌تری برای سنجش بهره‌وری انرژی ارائه کرده است. از سوی دیگر، یافته‌های این تحقیق در مورد کاهش سطح کشت گندم به دلیل بازده کالری پایین‌تر، با نتایج برخی مطالعات مانند پژوهش (Singh et al., 2013) که بر حفظ سطح گندم برای امنیت

جدول ۷-وضع موجود و بهینه‌سازی بر اساس حداکثرسازی کالری تولید شده (ردپای انرژی)

نام گروه محصول	وضع موجود			بهینه‌سازی حداکثر سازی کالری		
	تولید (هزار تن)	سطح کشت (ha)	کل کالری (MCAL)	تولید (هزار تن)	سطح کشت (ha)	کل کالری (MCAL)
IL2IM1F1	۱۰۷۰۰۴	۳۳۳۱۰۵۹	۲۸۰	۱۴۱۰۹۲	۴۴۱۷	۳۰۷۱
گندم	۱۴۰۵۲	۳۴۶۳۰۲۸	۱۱۰۷۸	۹۶۴	۲۳۰۰	۷۸۲
ذرت	۱۶۰۲۵	۲۱۳۰۰۴۴	۸۰۲۲	۲۸۰۳۷	۳۷۲۰۰۳	۱۴۰۳۶
هندوانه	۶۰۷۲	۲۲۴۰۱۴	۰۰۰۸	۴۸۱	۱۶۰۰۴	۰۰۰۶
گوجه	۸۱۰۹۹	۲۵۰۴۰۴۵	۰۰۴۵	۱۲۰۳۳	۳۷۶۰۵۴	۰۰۰۷
پیاز	۲۱۸۰۴۵	۴۰۴۸۰۳۳	۱۶۲	۲۵۵۰۱۳	۴۷۲۷۰۹۹	۱۰۸۹
کل	۴۴۴۰۹۷	۱۵۷۰۲۰۲۳	۲۴۰۹۵	۴۵۲۰۱۹	۱۵۷۰۲۰۲۳	۳۷۰۹۱



شکل ۴- تغییرات میزان کالری (الف) و سطح زیر کشت (ب) در سناریو بهینه‌سازی دوم

نتیجه‌گیری

میان ۱۸ تیمار مدیریتی ترکیبی (سطوح آبیاری، روش‌های آبیاری و سطوح کوددهی) نشان داد، تیمار IL3IM1F2 (آبیاری در ۸۰ درصد نیاز آبی با روش قطره‌ای سطحی و ۹۰ درصد کود نیتروژنه) به عنوان پایدارترین گزینه از نظر مصرف آب شناسایی شد که با دستیابی به کمترین ردپای آب کل (۱۹۷/۵۰ مترمکعب بر تن) و بالاترین کارایی مصرف آب (۷/۳۹ کیلوگرم بر مترمکعب)، الگویی بهینه برای کشت سیب‌زمینی در شرایط کم‌آبی منطقه ارائه می‌دهد. اجرای سناریوی بهینه‌سازی اول (حداقل‌سازی ردپای آبی منجر

این مطالعه با هدف ارائه یک الگوی کشت بهینه برای شهرستان جیرفت، با تلفیق دو معیار کلیدی کمینه‌سازی ردپای آب و بیشینه‌سازی تولید کالری (ردپای انرژی) انجام شد. یافته‌های تحقیق نشان می‌دهد که رویکرد یک‌بعدی و تک‌معیاره در مدیریت کشاورزی نمی‌تواند پاسخگوی چالش‌های پیچیده مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند جیرفت باشد و ضرورت اتخاذ راهبردهای یکپارچه و چندمعیاره را آشکار می‌سازد. ارزیابی تیمارهای کشت سیب‌زمینی از

- تربیت مدرس تهران.
- میرزاشاهی، ک.، و غفاری نژاد، س. ۱۳۹۹. امنیت غذایی با مدیریت پایدار اراضی. مدیریت اراضی. ۸(۲): ۱۴۱-۱۵۴.
- وجدانی، ح. ۱۴۰۱. تحلیلی بر تولید سیب زمینی در ایران و جهان و نقش آن در امنیت غذایی. مجله ترویجی علوم کاربردی سیب-زمینی. ۵(۱): ۳۵-۴۴.
- Ali, A., Hussain, T. and Zahid, A. 2025. Smart irrigation technologies and prospects for enhancing water use efficiency for sustainable agriculture. *AgriEngineering*. 7(4): 106.
- Aligholnia, T., Ghorbani, K., Rezaie, H. and Ghorbani Nasrabad, G. 2021. Optimization of Crop Pattern Based on Water Footprint Index in Different Climates of Iran. *Iranian Journal of Soil and Water Research*. 52(1): 66-53.
- Allen, Richard G., Luis S. Pereira, Terry A. Howell. and Marvin E. Jensen. Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy. *Agricultural Water Management*. 98. 6. 2011: 899-920.
- Anand, S., Kaur, K., Kaur, S. and Kataria, P. 2024. From Drop to Delta: Optimizing Water Footprint for Food Security. *Journal of Scientific Research and Reports*. 30(4): 205-217.
- Bazrafshan, O., Yahyazadeh, M., Jamshidi, S. and Zamani, H. 2022. Spatial prioritization of tomato cultivation based on water footprint. Land productivity and economic indices. *Irrigation and Drainage*. 71(5): 1363-1378.
- Bazrafshan, O., Vafaei, K., Ramezani Etedali, H. et al. 2024. Economic analysis of water footprint for water management of rain-fed and irrigated almonds in Iran. *Irrigation Science*. 11(4): 1-25
- Blom-Zandstra, G. and Michielsen, J. M. 2020. Sustainable water use in potato production in Algeria: Introduction of a subsurface fertigation system in the desert (No. WPR-1017). Wageningen Plant Research.
- Bohman, B. J., Rosen, C. J. and Mulla, D. J. 2019. Evaluation of variable rate nitrogen and reduced irrigation management for potato production. *Agronomy Journal*. 111(4): 2005-2017.
- Dehghanpir, S., Bazrafshan, O., Ramezani Etedali, H., Holisaz, A. and Ababaei, B. 2023. Application of the water footprint concept in the assessment of water scarcity and water stress in the agricultural sector in Hormozgan Province. *Water and Soil Management and Modelling*. 3(1): 233-248.
- El Mokh, F., Nagaz, K., Masmoudi, M. and Mechlia, N. B. 2014. Effects of surface and subsurface drip
- به کاهش ۳۴/۶ درصد در مصرف کل آب و همزمان افزایش ۲۶/۷ درصد در تولید کل محصولات شد. این موفقیت عمدتاً از طریق تغییر ترکیب کشت و گسترش سطح زیر کشت محصولات با کارایی آب بالا مانند پیاز و هندوانه و کاهش کشت محصولات پرمصرفی مانند ذرت و گندم محقق گردید. در سناریوی بهینه‌سازی دوم (حداکثرسازی تولید کالری)، با تخصیص زمین به محصولات پرکالری مانند سیب‌زمینی با تیمار بهینه (WL2IM1F1) و ذرت، تولید کل کالری ۱۱/۹ درصد افزایش یافت. این یافته بر اهمیت در نظر گرفتن ارزش غذایی محصولات در کنار مصرف آب برای تأمین امنیت غذایی پایدار تأکید دارد.
- برای دستیابی به نتایج مطلوب، پیشنهاد می‌شود که سیاست‌گذاری‌های یکپارچه‌ای در زمینه تشویق کشاورزان به استفاده از روش‌های آبیاری کارآمد و کشت محصولات کم‌مصرف و پرکالری انجام پذیرد. همچنین، ایجاد زنجیره‌های ارزش برای محصولات جایگزین می‌تواند به جبران کاهش درآمد ناشی از تغییر الگوی کشت کمک کند. در نهایت، انجام پژوهش‌های بیشتر در زمینه تأثیر تغییرات اقلیمی بر نیاز آبی محصولات و ارزیابی معیارهای چندگانه در بهینه‌سازی الگوی کشت می‌تواند به تکمیل یافته‌های این مطالعه و ارائه راهکارهای جامع‌تر منجر شود. اجرای این راهکارها با مشارکت ذینفعان محلی و پشتیبانی نهادهای دولتی می‌تواند به پایداری منابع آب، تأمین امنیت غذایی و بهبود معیشت کشاورزان در مناطق کم‌آبی مانند جیرفت کمک شایانی نماید. از جمله محدودیت‌های این پژوهش می‌توان به مشکلاتی همچون وابستگی به اطلاعات ثابت مانند داده‌های آب و هوایی، چالش‌های عملیاتی مانند کمبود زیرساخت‌ها، هزینه‌های بالا و پذیرش از سوی کشاورزان اشاره کرد.

منابع

- اسفندیاری، و.، ظریفیان، ش.، عیسی نژاد، ا. و راحلی، ح. ۱۴۰۳. تأثیر بهینه‌سازی الگوی کشت محصولات کشاورزی بر مدیریت مصرف آب با رویکرد آب مجازی و ردپای آب. محیط زیست و مهندسی آب. ۱۰(۲): ۲۴۳-۲۶۱.
- افشار، ع.، حقیقت‌جو، پ.، کاراندیش، ف.، محمدرضاپور، ا. و کوهستانی، ش. ۱۳۹۹. تأثیر کم آبیاری بر عملکرد و کارایی مصرف آب چند محصول عمده در جیرفت. تحقیقات آب و خاک ایران. ۵۱(۸): ۲۱۳۷-۲۱۴۸.
- آمارنامه کشاورزی سال ۱۴۰۳. سازمان تحقیقات آموزش کشاورزی. ۲۲۵ ص.
- روح‌پرور، ا. ۱۳۹۰. برآورد مصرف آب در قم با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی. پایان نامه ارشد، داگروه مهندسی صنایع، دانشگاه

- scheduling of water network repair crews considering multiple objectives. *Journal of Civil Engineering and Management*. 23(1): pp28-36.
- Raisi Sarhadi, S., Bazrafshan, O., Ramezani Etedali, H., Moghbeli Dameneh, E. and Rezaei, M. 2025. The Effect of Nitrogen Fertilizer and Irrigation on Yield and Water Consumption of Potato. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*. 18(5): 809-820.
- Ramezani Etedali, H., Ahmadaali, K., Gorgin, F. and Ababaei, B. 2019. Optimization of the cropping pattern of main cereals and improving water productivity: application of the water footprint concept. *Irrigation and Drainage*. 68(4): 765-777.
- Shrestha, B., Stringam, B. L., Darapuneni, M. K., Lombard, K. A., Sanogo, S., Higgins, C. and Djaman, K. 2024. Effect of irrigation and nitrogen management on potato growth, yield, and water and nitrogen use efficiencies. *Agronomy*. 14(3): 560.
- Singh, P., Singh, G. and Sodhi, G. P. S. 2019. Applying DEA optimization approach for energy auditing in wheat cultivation under rice-wheat and cotton-wheat cropping systems in north-western India. *Energy*. 181: 18-28.
- Sullivan, c. 2002. Calculating a water poverty index. *World development*. 30(7): 1195-1210.
- Wu, P., Wang, Y., Shao, J., Yu, H., Zhao, Z., Li, L. and Wang, T. 2024. Enhancing productivity while reducing water footprint and groundwater depletion: Optimizing irrigation strategies in a wheat-soybean planting system. *Field Crops Research*. 309- 109331.
- Yang, X., Zhang, L. and Liu, X. 2024. Optimizing water-fertilizer integration with drip irrigation management to improve crop yield, water, and nitrogen use efficiency: a meta-analysis study. *Scientia Horticulturae*. 338: 113653.
- Ye, Z., Miao, P., Li, N., Wang, Y., Zhang, W. and Yin, S. 2023. Optimizing water efficiency and energy productivity in choosing a cropping pattern. *Water Supply*. 23(7): 2899-2906.
- Zhang, D., Li, D., Li, H., Wang, H., Liu, J., Ju, H. and Li, Y. 2022. Strategies to reduce crop water footprint in intensive wheat-maize rotations in North China Plain. *Agronomy*. 12(2): 357-380.
- Zwart, S. J., Bastiaanssen, W. G., de Fraiture, C. and Molden, D. J. 2010. A global benchmark map of water productivity for rainfed and irrigated wheat. *Agricultural Water Management*. 97(10): 1617-1627.
- irrigation regimes with saline water on yield and water use efficiency of potato in arid conditions of Tunisia. *Journal of Agriculture and Environment for International Development (JAEID)*. 108(2): 227-246.
- Fernandez, J. E., Alcon, F., Diaz-Espejo, A., Hernandez-Santana, V. and Cuevas, M. V. 2020. Water use indicators and economic analysis for on-farm irrigation decision: A case study of a super high density olive tree orchard. *Agricultural water management*. 237: 106074.
- Gopalasundaram, P., Bhaskaran, A. and Rakkiyappan, P. 2012. Integrated nutrient management in sugarcane. *Sugar Tech*. 14: 3-20.
- Hoekstra, A. Y. 2003. Virtual water: An introduction. *Virtual water trade*. Delpht. Netherland.
- Hoekstra, A. Y. 2011. The water footprint assessment manual: Setting the global standard. *Routledge*. London, Washington.
- Hoekstra, A. Y. and Hung, P. Q. 2005. Globalisation of water resources: international virtual water flows in relation to crop trade. *Global environmental change*. 15(1): 45-56.
- Hussain, K., Majeed, A., Nawaz, K., Afghan, S., Ali, K., Lin, F. and Raza, G. 2010. Comparative study of subsurface drip irrigation and flood irrigation systems for quality and yield of sugarcane. *African Journal of Agricultural Research*. 5(22): 3026-3034.
- IRIMO, 2022. Islamic Republic of Iran Meteorologic Organization. WWW.IRIMO.ir
- Jaafar, H., Karimi, P. and Borgomeo, E. 2024. Economic irrigation water productivity of wheat and potato: An earth observation perspective on policy implications in the Litani Basin, Lebanon. *Agricultural Water Management*. 306-109180.
- Li, M., Fu, Q., Singh, V.P., Liu, D., Li, T. and Zhou, Y., 2020. Managing agricultural water and land resources with tradeoff between economic, Environmental, and social considerations: A multi-objective non-linear optimization model under uncertainty. *Agricultural Systems*. 178: 102685.
- Mojtabavi, S. A., Shokoohi, A., Ramezani Etedali, H. and Singh, V. 2018. Using regional virtual water trade and water footprint accounting for optimizing crop patterns to mitigate water crises in dry regions. *Irrigation and drainage*. 67(2): 295-305.
- Osman, H., Ammar, M. and El-Said, M. 2017. Optimal

Optimization of Agricultural Cultivation Area with Emphasis on Water and Food Security

S. Raisi Sarhadi¹, O. Bazrafshan^{2*}, H. Ramezani Etidali³, E. Moghbeli Dameneh⁴, M. Rezaei⁵

Received: Jul.18, 2025

Accepted: Sep.15, 2025

Abstract

This study aimed to optimize the agricultural cultivation area in Jiroft, by integrating the Water Footprint (WF) framework and nutritional value (caloric output). Motivated by the region's severe water scarcity and the imperative to ensure food security in arid zones, this research developed an optimal cropping pattern through two objective functions: minimizing the total water footprint and maximizing total caloric production (energy footprint). The research was conducted in two phases. First, the water footprint of potatoes (the region's key crop) was assessed under 18 distinct management treatments. These treatments combined different levels of irrigation (100% (WL1), 90% (WL2), and 80% (WL3) of crop water requirement), irrigation methods (surface drip (IM1) and subsurface drip (IM2)), and nitrogen fertilization levels (100% (F1), 60% (F2), and 40% (F3) of the optimal requirement). Based on the results, among these treatments, the combination of 90% irrigation using the surface drip method with 60% nitrogen fertilizer (WL2IM1F2) was identified as the most water-sustainable practice for potato cultivation. This treatment achieved the lowest total water footprint (197.50 m³/ton) and the highest water productivity (7.39 kg/m³). Subsequently, this optimal potato treatment was integrated with other staple crops (onion, watermelon, wheat, corn, tomato) into a Linear Programming (LP) optimization model for the county's overall cropping pattern. Under the first scenario (minimizing water footprint), optimization of the cropping pattern led to a 34.6% reduction in total water consumption while simultaneously increasing total production by 26.7%. This was achieved primarily by expanding the cultivation of crops with a low water footprint, such as onions and watermelons. The second scenario (maximizing caloric output) resulted in an 11.9% increase in total calorie production by increasing the area allocated to crops with high caloric yield, particularly potatoes (using the WL2IM1F2 treatment) and maize. The findings demonstrate that a combined dual approach that integrates water footprint and caloric productivity criteria can effectively balance water conservation and food security objectives.

Keywords: Economic Land Productivity, Energy footprint, Potato, Water Footprint, Water Use Efficiency

1- Ph.D Student, Department of Natural Resources Engineering and Statistics, Faculty of Agricultural and Natural Resources Engineering, University of Hormozgan, Bandarabbas, Iran

2- Professor, Department of Natural Resources Engineering, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran

3- Professor, Department of Water Science and Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

4- Assistant Professor, Agricultural Engineering Research Department, South Kerman Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Research Organization, Jiroft, Iran

5- Associate Professor of Natural Resources Engineering, Hormozgan University, Bandar Abbas, Iran

(*- Corresponding Author Email: O.bazrafshan@hormozgan.ac.ir)