نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۳، جلد ۱۹، مرداد - شهریور ۱۴۰۴، ص. ۳۸۲-۳۷۳

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 3, Vol. 19, Agu.-Sep. 2025, p. 373-382

مقاله علمی-پژوهشی

بهینه‌سازی منابع آب و زمین در کشت محصولات عمده زراعی استان چهارمحال و بختیاری

رفعت زارع بیدکی*[۱]، سحر نوروزی قلعه‌تکی[۲]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۰۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۰۶

چکیده

برنامه‌ریزی و مدیریت صحیح الگوی کشت در مدیریت مصرف منابع آب در بخش کشاورزی ضروری است. هدف از انجام پژوهش حاضر، بهینه-سازی الگوی کشت محصولات عمده زراعی در استان چهارمحال و بختیاری با هدف بهینه‌سازی بهره‌وری آب و با در نظر گرفتن ردپای آب گندم، جو و سیب‌زمینی به‌عنوان محصولات زراعی عمده استان است. اطلاعات مربوط به سطح زیر کشت، آب مصرفی، نیاز آبی، سود ناخالص و خالص این محصولات در دوره زمانی ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۹ از گزارش‌های جهاد کشاورزی استان به‌دست آمد. سپس توابع هدف کمینه‌کردن ردپای آب، بیشینه‌کردن سود اقتصادی و بیشینه‌کردن بهره‌وری آب تهیه و در محیط Lingo حل شد. در این پژوهش دو سناریو حفظ درصد کشت فعلی و حفظ حداقل پنجاه درصد کشت فعلی مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج بهینه‌سازی نشان داد در هر دو سناریو کاهش سطح زیرکشت گندم، و افزایش سطح زیر کشت جو و سیب-زمینی منجر به کاهش ردپای بوم‌شناختی آب (در سناریو ۱ به میزان ۴ درصد و در سناریو ۲ به میزان ۶ درصد) و افزایش سود خالص (در سناریو ۱ به مقداد ۱۵ درصد و در سناریو ۲ به میزان ۲۴ درصد) خواهد شد. مقدار بهینه شاخص بهره‌وری حاصل از کشت گندم، جو و سیب‌زمینی در استان، به‌ترتیب برابر با ۰/۵۰۱، ۰/۵۵۳ و ۴/۲ بوده است. در حالی که متوسط میزان این شاخص در دوره مطالعه به‌ترتیب برابر با ۰/۴۰۳، ۰/۴۱۲ و ۳/۱ بوده است. نتایج بهینه‌سازی توام اقتصادی- محیط‌زیستی از بهینه‌سازی تنها با هدف افزایش سود، قابل اعتمادتر است، چرا که هدف را هم افزایش سود خالص و هم کاهش ردپای اکولوژی آب در نظر گرفته است.

واژه‌های کلیدی: الگوی کشت، شاخص بهره‌وری، ردپای بوم‌شناختی آب، نیاز آبی

مقدمه

توسعه اقتصادی- اجتماعی و تامین نیازهای جوامع با کمبود آب تهدید می‌شود. از طرف دیگر محدودیت منابع آب، افزایش تقاضا برای آب در بخش‌های مختلف و همچنین مسئله تغییر اقلیم، سبب فشار بر منابع محدود آب سطحی و زیرزمینی، کاهش کیفیت منابع آب موجود و به خطر انداختن حیات در تمامی زیست‌بوم‌ها شده است. بخش کشاورزی به عنوان صدرنشین جدول متقاضیان آب (Hoekstra & Mekonnen, 2012; Dai et al., 2021; Cruz & Tan, 2022) نیازمند توجه بیشتر و مدیریت پایدارتر بخش تقاضا است. اما متاسفانه رویکرد کلی برای حل مشکلات فعلی، مدیریت مقطعی عرضه است.

به منظور دست یافتن به این هدف، شناسایی و بررسی شاخص‌های اصلی مطرح شده در بحث مدیریت مصرف آب و تعیین این شاخص‌ها امری الزامی است. سپس می‌توان با اعمال راهکارهای نوین در مدیریت مصرف آب از این شاخص‌ها به منظور تایید یا عدم تایید روش‌های پیشنهادی استفاده کرد. بهره‌وری مصرف آب در بخش کشاورزی و ردپای بوم‌شناختی از جمله مهم‌ترین شاخص‌های شناخته شده در برنامه‌ریزی‌های کلان مربوط به تأمین، تخصیص و نیز مصرف اصولی منابع آب در قسمت‌های مختلف از جمله کشاورزی هستند. بهره‌وری فیزیکی مصرف آب نسبت مقدار محصول تولید شده به ازای واحد حجم آب مصرف شده است (فرحزا و همکاران، ۱۴۰۳). بهره‌وری آب زراعی را می‌توان تولید واحدهای بیشتری از محصولات در ازای مصرف کمتر آب تعریف کرد. بهره‌وری آب زراعی منعکس کننده بازده بیشتر یک سیستم کشاورزی خواهد بود (Dai et al., 2021). ردپای آب مقدار کل آب شیرین مورد نیاز برای تولید محصولات را در طول زنجیره تولید محاسبه می‌کند (Wen et al., 2022). ردپای بوم شناختی محصولات کشاورزی را می‌توان میزان

۱- دانشیار گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران
۲- دانش آموخته کارشناسی ارشد علوم و مهندسی آبخیزداری، گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران
(*- نویسنده مسئول: (Email: Zare.rafat@sku.ac.ir

اثری که تولید یک محصول در بخش کشاورزی بر منابع آبی می‌گذارد تعریف کرد (Chapagain et al., 2006؛ Mekonnen & Hoekstra, 2010). این شاخص معادل کل آب مجازی موجود در محصولات کشاورزی،کالاها و نیز خدمات مصرفی است (Zhang et al., 2021).

با توجه به لزوم حفظ امنیت غذایی، کاهش آب مصرفی در بخش کشاورزی نباید از تولید مواد غذایی بکاهد. بنابراین، حفظ منابع آب باید با بهبود عملکرد آب در بخش کشاورزی هم‌راستا باشد. مطالعات نشان داده است که انتخاب شیوه‌های کاشت، داشت و برداشت بر افزایش بهره‌وری آب و نیز بر کاهش ردپای بوم‌شناختی محصولات کشاورزی موثر است. به نظر می رسد گنجاندن زمین در برنامه ریزی استراتژیک مدیریت یکپارچه منابع آب اجتناب ناپذیر باشد (Saed et al., 2018). از آنجا که تغییر در الگوی کشت می‌تواند سبب بهبود شاخص‌های مدیریت مصرف آب شود، می‌توان از روش‌های بهینه-سازی برای رسیدن به این هدف استفاده کرد. بهینه‌سازی الگوی کشت، یکی از روش‌های برنامه‌ریزی است که با در نظر گرفتن مواردی همچون شرایط فنی، شرایط اقتصادی و نیز اهداف موجود، مقدار تولید در هر واحد را طی دوره زمانی معین تعیین و عمل هدف گذاری را انجام می‌دهد (Lahlou & Al-Ansari, 2023). بهینه-سازی الگوی کشت آبی یک راه موثر برای بهبود استانداردهای مدیریت منابع آب کشاورزی است (Luo et al., 2021; Zhang et al., 2021). بهینه‌سازی الگوی کشت با اهداف مختلف از جمله کمینه‌کردن مصرف آب، بیشینه‌کردن مقدار تولید، بیشینه‌کردن سود خالص از کشاورزی، کمینه‌کردن مصرف کودهای شیمیایی، کمینه-کردن فرسایش خاک و غیره انجام می‌گیرد.

میرزایی و همکاران (۱۳۹۶)، در شهرستان سیرجان به انجام تحقیقی پرداختند. هدف از انجام این پژوهش تعیین الگوهای کشت بهینه محصولات کشاورزی در بخش مرکزی شهرستان سیرجان با توجه به اهداف اقتصادی و زیست محیطی به صورت جداگانه و نیز همزمان بود. نتایج مشخص کرد که مزارع بزرگ‌تر از نظر سوددهی بهتر از مزارع کوچک‌تر عمل کرده، اما از نظر مصرف آب کارا نبوده-اند. ساعد و همکاران (۲۰۱۸) یک مدل هیدرو–اقتصادی مبتنی بر ردپای آب در حوزه رودخانه زرینه‌رود در ایران معرفی کردند. هدف آنها به حداقل رساندن مصرف آب آبی در این حوزه بود. نتایج تحقیق نشان داد الگوهای کشت بهینه، می تواند اهداف اقتصادی و کاهش نسبت مصرف آب آبی به آب سبز را محقق کند. آنها الگوهای بهینه-سازی با اهداف چندگانه را پیشنهاد کردند. جهانتیغ (۱۴۰۱)، در پژوهشی به بهینه‌سازی الگوی کشت محصولات کشاورزی در شهرستان گرگان، ایران پرداخت. در این تحقیق سه سناریو برای بیشینه‌سازی سود، بیشینه‌سازی تولید و بیشینه‌سازی هم زمان سود و تولید با تاکید بر مدیریت مصرف آب با استفاده از الگوریتم ژنتیک تعریف شد. نتایج نشان داد محصولات گندم و سویا بیشترین سطح و پنبه کمترین سطح را در هر سه سناریو خواهند داشت. علاوه براین بهینه‌سازی می‌تواند ۱۰ درصد از مصرف آب را کاهش دهد. علیقلی-نیا و همکاران (۱۴۰۰) بهینه‌سازی الگوی کشت محصولات مختلف زراعی در اقلیم‌های مختلف ایران را بر مبنای شاخص ردپای آب بررسی کرده است. محققان ردپای آب یازده محصول زراعی را در شش اقلیم مختلف محاسبه کردند و الگوی کشت بهینه آنها را با استفاده از روش بهینه‌سازی تاپسیس ارائه کردند. لیو و همکاران، با انتخاب منطقه هولان که سه محصول عمده برنج، ذرت و سویا در آن کشت می شد، یک مدل بهینه‌سازی ترکیب کشت را با اهداف کمینه کردن ردپای آب و بیشینه‌کردن سود خالص کشاورزی ساختند و با شبیه سازی مونت کارلو حل کردند. آنها با مقایسه سه سناریو به این نتیجه رسیدند که در مجموع افزایش سطح کشت محصولات، به ویژه برنج نقش خوبی در توسعه کشاورزی در منطقه دارد (Liu et al., 2019). ژانگ و همکاران، از یک رویکرد فازی چند هدفه برای بهینه سازی سطح زیر کشت در یک منطقه نیمه‌خشک در شمال غرب چین استفاده کردند. آنها توزیع مکانی ردپای آب محصول را بر اساس اطلاعات سنجش از دور تخمین زدند و ترکیب کاشت محصول را با در نظر گرفتن اهداف متضاد، توزیع مکانی ردپای آب و منابع آبی محدود تحت عدم قطعیت فازی برنامه‌ریزی کردند. نتایج تحقیق حاکی از این بود که ردپای کل آب، ردپای آب آبی و ردپای آب خاکستری بعد از بهینه‌سازی کاهش می‌یابد و بهره‌وری آب سبز افزایش می‌یابد (Zhang et al., 2021). یو و همکاران، در شمال چین با اهداف چندگانه کاهش آب مصرفی کشاورزی و کاهش بار آلودگی و افزایش سود خالص اقدام به بهینه‌سازی ترکیب کشت کردند و سه سناریو کاهش آب مصرفی را مقایسه کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که با کاهش ۱۵ درصد آب مصرفی می توانند ترکیب کشتی داشته باشند که میزان آلودگی کمتر و سطح زیرکشت کمتر و بهره‌وری آب بیشتر را به همراه داشته باشد (Yu et al., 2021). رمضانی اعتدالی و همکاران، غلات عمده گندم، جو و ذرت را از لحاظ ردپای آب آبی، خاکستری، سبز و سفید در ایران مورد بررسی قرار دادند و سپس با استفاده از بهینه‌سازی خطی اقدام به مقایسه مقدار کاهش ردپای آب کلی در کشت آبی و دیم کردند. آنها نتیجه گرفتند بهینه‌سازی سطح زیرکشت غلات مهم در ایران می‌تواند به ذخیره-کردن حجم نسبتا زیادی آب منجر شود (Ramezani Etedali et al., 2019). دای و همکاران، از یک مدل بهینه‌سازی فازی برای بهینه‌کردن ردپای آبی کشت محصولات استفاده کردند و پیش‌بینی کردند که نتیجه این بهینه‌سازی می تواند به کاهش ردپای آب آبی و خاکستری و افزایش سود اقتصادی در حوزه رودخانه Hai منجر شود (Dai et al., 2021). وو و همکاران در تحقیق خود در دشت Huang-Huai-Hai چین توانستند ثابت کنند که تغییر ترکیب کشت

از گندم–ذرت زمستانه به گندم–سویا زمستانه می‌تواند منجر به کاهش مصرف آب زیرزمینی و کاهش ردپای آب شود؛ ضمن اینکه عملکرد محصولات را افزایش می‌دهد (Wu et al., 2024) . با توجه به نتایج تحقیقات پیشین، بهینه‌سازی الگوی کشت سبب کاهش مصرف آب در بخش کشاورزی، همراه با افزایش تولید، افزایش سود اقتصادی و کاهش مضرّات زراعت از جمله آلودگی و فرسایش می‌شود. بنابراین فرض بر این است که در منطقه مورد مطالعه استان چهارمحال و بختیاری نیز بهینه‌سازی الگوی کشت با در نظر گرفتن ردپای آبی سبب کاهش مصرف آب در بخش کشاورزی و نیز حفظ منابع آب خواهد شد. ضمن اینکه تولید محصولات عمده زراعی کاهش پیدا نکند و سود هم افزایش یابد. لذا هدف این پژوهش یافتن ترکیب کشت بهینه با هدف کمینه‌کردن ردپای آب آبی و بیشینه‌کردن سود اقتصادی در تولید محصولات عمده زراعی استان چهارمحال و بختیاری –سیب زمینی، گندم و جو– است.

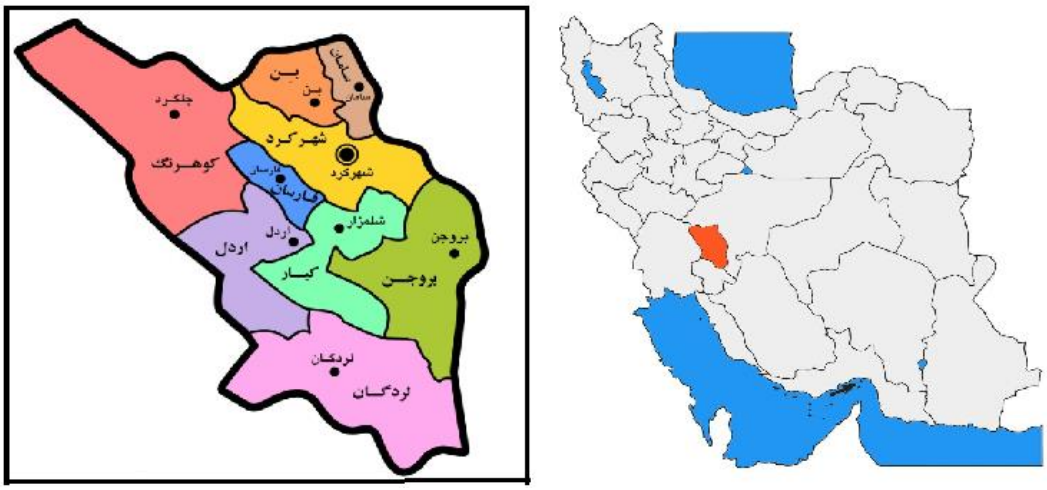
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

استان چهارمحال و بختیاری با مساحتی در حدود ۱۶۴۰۰ کیلو-مترمربع، در گستره فلات مرکزی ایران و در زاگرس واقع شده است. موقعیت جغرافیایی استان چهارمحال و بختیاری، حد فاصل ۳۱ درجه و ۹ دقیقه تا ۳۲ درجه و ۴۸ دقیقه عرض شمالی و ۴۹ درجه و ۳۰ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۲۶ دقیقه طول شرقی است (شکل ۱). بارندگی متوسط این استان حدود ۶۰۰ میلیمتر است و از ۲۰۰ میلیمتر تا حدود ۱۴۰۰ میلیمتر تغییر می‌کند. به دلیل بارندگی به شکل برف در ارتفاعات این استان دارای تعداد زیادی چشمه و منشا رودهای مهم کشور از جمله کارون و زاینده‌رود است. بیشتر وسعت استان را کوهستان‌ها تشکیل داده‌اند و استان چهارمحال و بختیاری دشت‌های وسیعی ندارد. شیوه معیشت مردم در گذشته مرتعداری بوده است و دامداران در گذشته از مراتع سرسبز استان به عنوان مراتع ییلاقی بهره‌مند می‌شدند. اما در سال‌های اخیر با تغییر شیوه زندگی گستره زمین‌های کشاورزی در دشت‌ها وسیع‌تر شده است. همین امر سبب شده است آبخوان‌های استان بر اثر برداشت بی‌رویه در حالت ناپایدار قرار گیرند. آبهای زیرزمینی برای مصارف شرب، صنعت و کشاورزی استخراج می‌شوند (تقی‌پور جاوی و بریمانی، ۱۴۰۲).

بهینه‌سازی مصرف آب با هدف کمینه‌کردن ردپای آبی و بیشینه‌کردن سود

اساس یک مسئله بهینه‌سازی، انتخاب بهترین تصمیم ممکن بر اساس معیارهای هدف است. این معیارها می‌توانند بیشینه‌کردن یا کمینه‌کردن یک تابع هدف باشند. به عبارت دیگر، بهینه‌سازی به معنای یافتن مجموعه‌ای از مقادیر برای متغیرهای تصمیم است که هدف مورد نظر را به بهترین نحو محقق سازد. با توجه به اینکه بخش کشاورزی بزرگترین مصرف‌کننده آب است، کاهش مصرف آب در این بخش باید به گونه‌ای باشد که تولید به طور چشمگیری کاهش نیابد، بلکه حتی افزایش یابد. بنابراین، هدف این پژوهش، بهینه‌سازی مصرف آب با تاکید بر کاهش ردپای آب و افزایش سود است. کاهش مصرف آب در بخش‌های مختلف، به‌ویژه کشاورزی، در کنار تولید محصولات و تامین امنیت غذایی، منجر به استفاده پایدار و حفظ کمیت و کیفیت منابع آب در استان چهارمحال و بختیاری خواهد شد. بهینه‌سازی الگوی کشت طی دو مرحله انجام شد. در نخستین مرحله، بهینه‌سازی الگوی کشت با هدف کمینه‌کردن ردپای آب محصولات زراعی گندم، جو و سیب زمینی صورت گرفت. تابع هدف در این بخش در رابطه (۱) مطرح شد.



شکل ۱- موقعیت استان چهارمحال و بختیاری

$$min\, z = w_1x_1 + w_2x_2 + w_3x_3 \quad (۱)$$

در دومین قسمت از بهینه‌سازی الگوی کشت، تابع هدف بیشینه کردن سود خالص حاصل از کشت محصولات زراعی در نظر گرفته شد. بدین منظور ابتدا ردپای آبی هر یک از محصولات محاسبه و سپس با در نظر گرفتن ارزش اقتصادی آب به هزینه تبدیل شد و از سود هر کشت کم شد. تابع هدف در این بخش در رابطه (۲) مطرح شد.

$$\max z = (c_1x_1 + c_2x_2 + c_3x_3) - (d_1x_1 + d_2x_2 + d_3x_3) \quad (۲)$$

قیدهای به کار رفته در این دو مدل بهینه‌سازی به ترتیب عبارتند از: ۱) مجموع ردپای آبی محصولات زراعی گندم، جو و سیب‌زمینی کمتر از میزان فعلی آن باشد. ۲) مجموع تولیدات محصولات زراعی گندم، جو و سیب زمینی بیشتر از میزان فعلی باشد. ۳) کل سطح زیر کشت فعلی حفظ شود. قیود به کار رفته در معادله بهینه‌سازی ۱ و ۲ به این شرح است.

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3 < b_1 \qquad x_1 > s * a_1$$
$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + a_{23}x_3 > b_2 \qquad x_2 > s * a_2$$
$$x_1 + x_2 + x_3 > b_3 \qquad x_3 > s * a_3$$

x_1, x_2, x_3: به ترتیب سطح زیر کشت محصول زراعی گندم، جو و سیب زمینی

w_1, w_2, w_3: به ترتیب ردپای آبی (میزان مصرف آب) محصول زراعی گندم، جو و سیب زمینی در یک هکتار

c_1, c_2, c_3: به ترتیب سود حاصل از کشت محصول زراعی گندم، جو و سیب زمینی در یک هکتار

d_1, d_2, d_3: به ترتیب هزینه آب مصرفی محصول زراعی گندم، جو و سیب زمینی در یک هکتار

a_{11}, a_{12}, a_{13}: به ترتیب ردپای آبی (میزان مصرف آب) محصول زراعی گندم، جو و سیب زمینی در یک هکتار

a_{21}, a_{22}, a_{23}: به ترتیب میزان تولید محصول زراعی گندم، جو و سیب زمینی در یک هکتار

b_1: میزان کل ردپای آبی (میزان مصرف آب) محصولات زراعی گندم، جو و سیب زمینی در حال حاضر

b_2: میزان کل تولید محصولات زراعی گندم، جو و سیب زمینی در حال حاضر

b_3: میزان کل سطح زیر کشت محصولات زراعی گندم، جو و سیب زمینی در حال حاضر

a_1: سطح زیر کشت محصول زراعی گندم در حال حاضر

a_2: سطح زیر کشت محصول زراعی جو در حال حاضر

a_3: سطح زیر کشت محصول زراعی سیب زمینی در حال حاضر

s: سناریو (نسبت کشت محصولات زراعی گندم، جو و سیب زمینی)

با توجه به اینکه مسائل اقتصادی و اجتماعی در تغییر کاربری اراضی وجود دارد، بخصوص که اشتغال در بخش کشاورزی سهم عمده اشتغال در استان را به خود اختصاص می‌دهد و نیز این محصولات بیشتر در استان مصرف می‌شوند، لازم است شرایطی پیش‌بینی شود که در آن نسبت تولید محصولات تغییر زیادی نداشته باشد. به همین خاطر حفظ متوسط نسبت کشت محصولات زراعی در سال‌های اخیر و نیز حفظ ۵۰ درصد سطح زیر کشت هر یک از محصولات به عنوان سناریوهای ۱ و ۲ به صورت جداگانه مورد بررسی قرار گرفت. برای سناریو اول متوسط نسبت کشت محصولات زراعی از آمار موجود در سال‌های مورد مطالعه به دست آمد. برای سناریو دوم متوسط سطح زیرکشت هر کدام از محصولات در ضریب یک دوم ضرب شد.

به منظور بهینه‌سازی بهره‌وری، تابع هدف کمینه‌کردن کل آب مصرف شده جهت کشت هر سه محصول زراعی در استان به کار رفت (رابطه ۳). سه قید در این مدل در نظر گرفته شد. ۱) مجموع ردپای آبی محصولات زراعی گندم، جو و سیب زمینی کمتر از میزان فعلی آن باشد. ۲) مجموع تولیدات محصولات زراعی گندم، جو و سیب زمینی بیشتر از میزان فعلی باشد. ۳) حداقل ۵۰ درصد تولید هر یک از محصولات حفظ شود.

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3 < b_1 \quad (۳)$$
$$x_1 + x_2 + x_3 > b_2$$

x_1, x_2, x_3: به ترتیب تولید محصول زراعی گندم، جو و سیب زمینی

c_1, c_2, c_3: به ترتیب میزان آب مصرفی جهت کشت یک تن محصول زراعی گندم، جو و سیب زمینی

a_{11}, a_{12}, a_{13}: به ترتیب میزان مصرف آب یک تن محصول زراعی گندم، جو و سیب زمینی

b_1: متوسط مجموع مصرف آب محصولات زراعی گندم، جو و سیب زمینی

b_2: متوسط مجموع تولید محصولات زراعی گندم، جو و سیب زمینی

a_1: تولید متوسط محصول زراعی گندم

a_2: تولید متوسط محصول زراعی جو

a_3: تولید متوسط محصول زراعی سیب زمینی

به منظور تعیین جواب بهینه میزان تولیدات محصولات کشاورزی گندم، جو و سیب زمینی از نرم افزار LINGO استفاده شد.

محاسبه میزان مصرف آب محصولات، ردپای آبی و بهره‌وری آب به منظور به کارگیری در معادلات بهینه‌سازی

برای برآورد شاخص‌های بهره‌وری آب، نیاز ویژه گیاه، SWD و

نیاز خالص آب (آب آبی)، CWR و متوسط عملکرد محصول CY بر حسب تن در هکتار (روابط ۴ ،۵، و۶) مورد نیاز است. به این منظور از نرم‌افزار پیشنهاد شده توسط سازمان خواروبار و کشاورزی جهانی استفاده شد. شاخص عملکرد به ازای واحد حجم آبیاری یا CPD را می‌توان نسبت مقدار محصول تولید شده Q، به حجم آب مصرف شده W دانست. بنابراین هرچه این نسبت بیشتر باشد حاکی از آن است که مصرف آب صحیح‌تر بوده است (ابراهیم‌نژاد و همکاران، ۱۴۰۰).

$$SWD = CWR/CY \quad (۴)$$

$$CWP = 1/SWD \quad (۵)$$

$$CPD = \frac{Q}{W} \quad (۶)$$

Q میزان محصول بر حسب کیلوگرم در هکتار، W حجم آب آبیاری بر حسب مترمکعب در هکتار، CY عملکرد محصول بر حسب تن در هکتار، SWD نیاز ویژه آب گیاه، برحسب مترمکعب در هکتار، و CWR نیاز خالص آب (آبیاری) بر حسب مترمکعب است. ردپای آبی محصولات گندم و جو و سیب‌زمینی برابر با میزان آب مصرفی برای کشت این محصولات در داخل استان در نظر گرفته شد.

برای تعیین سودآوری کشت محصولات زراعی، ابتدا درآمد ناخالص (ریال بر هکتار) با استفاده از داده‌های جهاد کشاورزی استان چهارمحال و بختیاری محاسبه گردید. این درآمد از حاصل‌ضرب متوسط قیمت فروش و متوسط عملکرد محصولات در طول دوره بررسی به دست آمد. سپس، کلیه هزینه‌های عملیات زراعی، از آماده‌سازی زمین تا برداشت محصول، جمع‌آوری و به عنوان هزینه کل در نظر گرفته شد. در نهایت، سود حاصل از کشت گندم، جو و سیب‌زمینی در هر هکتار، با کسر هزینه کل از درآمد ناخالص محاسبه شد.

برای تبدیل ردپای آبی محصولات کشاورزی به هزینه آب مصرفی در استان چهارمحال و بختیاری، ابتدا سهم استفاده از آب‌های زیرزمینی (۷۵٪) و سطحی (۲۵٪) تعیین شد (بر اساس آمار شرکت آب منطقه‌ای استان). هزینه آب زیرزمینی مصرفی با در نظر گرفتن هزینه‌های حفر چاه (با احتساب استهلاک ۲۰ ساله)، پمپ، لوله، کنتور برق و هزینه برق مصرفی ۲۸۲۵ حلقه چاه محاسبه شد. با توجه به قانون تثبیت آب بهاء زراعی، تعرفه آب زیرزمینی برای کشاورزان صفر در نظر گرفته شد. هزینه برق مصرفی چاه‌ها با استفاده از آمار شرکت توزیع نیروی برق و تعرفه وزارت نیرو محاسبه گردید. در نهایت، با تقسیم کل هزینه آب زیرزمینی بر حجم آب زیرزمینی مصرفی در بخش کشاورزی، قیمت هر متر مکعب آب زیرزمینی تعیین شد. تعرفه آب‌های سطحی نیز بر اساس اطلاعات آب منطقه‌ای استان محاسبه شد (قیمت‌گذاری با نظر کارشناسان آب منطقه‌ای انجام شده است.)

نتایج و بحث

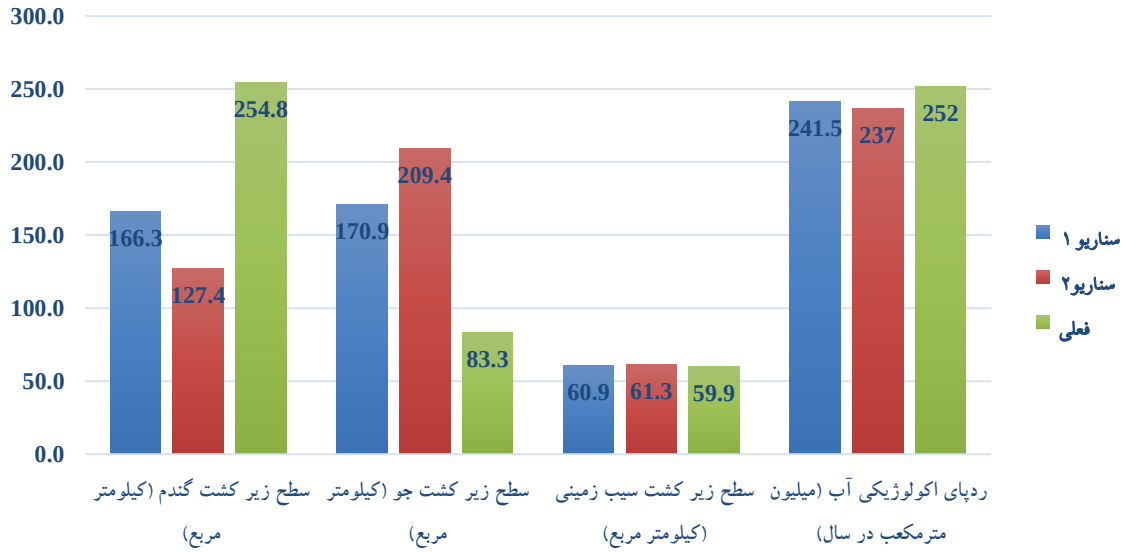
در نخستین مرحله بهینه‌سازی الگوی کشت، سطح زیر کشت بهینه محصولات گندم، جو و سیب زمینی با هدف کمینه‌کردن ردپای آب انجام شد. نتایج حاصل در شکل ۲ آورده شده است. بهینه‌سازی نشان داد که تغییر در سطح کشت محصولات عمده زراعی استان می‌تواند سبب تغییر در مقدار ردپای آب شود؛ اگرچه این کاهش چندان به چشم نمی‌آید. اگر سطح زیر کشت فعلی را در نظر بگیریم، مدل بهینه‌سازی ردپای اکولوژی رای به کاهش سطح زیرکشت گندم و افزایش سطح زیرکشت جو داده است و تغییری در مقدار سطح زیرکشت سیب‌زمینی به وجود نیامده است. در مورد سناریوهای مورد بررسی نیز تفاوت بین سطح زیرکشت گندم و جو دیده می‌شود. سناریو دوم (حفظ حداقل ۵۰ درصد سطح زیرکشت) نسبت به سناریوی اول (حفظ نسبت کشت فعلی) افزایش بیشتری در سطح کشت جو و کاهش بیشتری در سطح کشت گندم پیشنهاد داده است.

نتایج حاصل از انجام عمل بهینه‌سازی الگوی کشت با هدف بیشینه‌کردن سود حاصل از کشت محصولات زراعی در شکل ۳ ارائه شده است. شکل ۳ نشان می‌دهد که مقدار سود کلی با بهینه‌سازی افزایش خواهد یافت. برای افزایش سود، باید سطح زیرکشت سیب-زمینی و جو افزایش یابد و سطح زیرکشت گندم، کاهش یابد. مقایسه دو سناریوی به کار رفته نشان می‌دهد، افزایش در مقدار سود در سناریو دوم با افزایش بیشتر در سطح زیرکشت جو و سیب‌زمینی و کاهش بیشتر در سطح زیرکشت گندم، امکان‌پذیر است. با توجه به اینکه در بهینه‌سازی دوم، هزینه تبدیل شده ردپای آب در محاسبه میزان سود خالص در نظر گرفته شده است، می‌توان گفت نتایج قابل اعتمادتری ارائه کرده است.

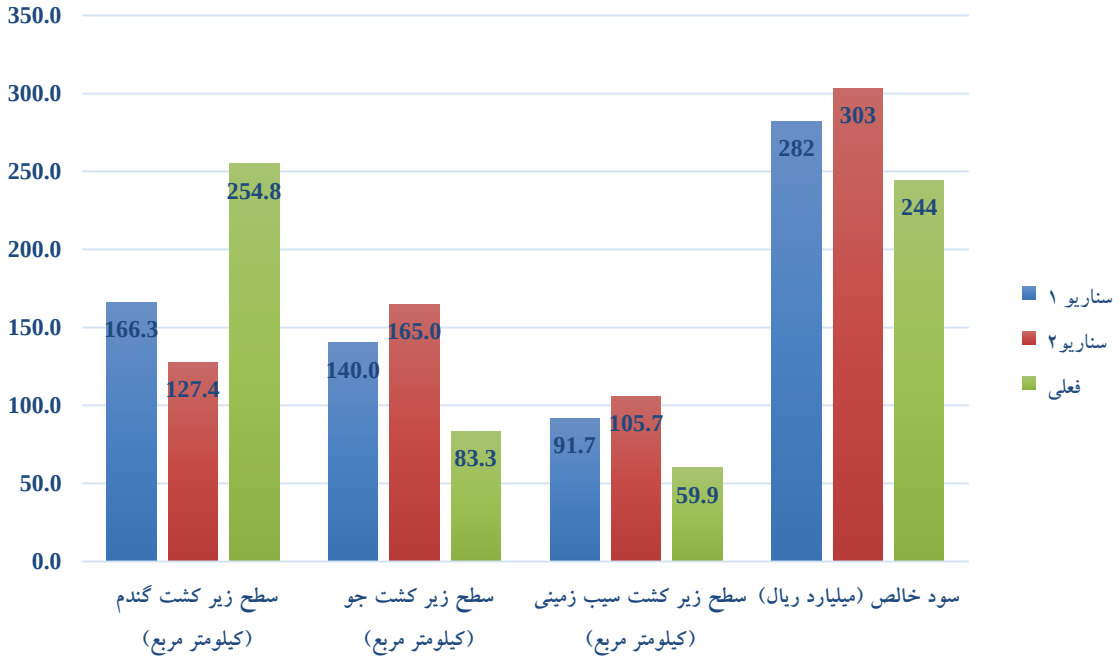
نتایج حاصل از بهینه‌سازی شاخص‌های بهره‌وری آب

یکی از راهکارهای بهینه‌سازی بهره‌وری آب، کاهش میزان آب مصرفی در بخش کشاورزی است. این امر از طریق برنامه‌ریزی و اجرای روش‌هایی حاصل می‌شود که مصرف آب را کاهش داده و در عین حال، میزان تولید محصولات را به گونه‌ای تعیین می‌کنند که هم بهره‌وری افزایش یابد و هم مصرف آب کاهش یابد. در واقع، هدف از بهینه‌سازی شاخص بهره‌وری آب، کمینه‌کردن میزان کل آب مصرفی برای تولید محصولات زراعی گندم، جو و سیب‌زمینی بر اساس اطلاعات موجود است. با در نظر گرفتن قیودی نظیر: ۱)کل آب مصرفی محصولات زراعی کمتر از میزان آب مصرفی فعلی باشد و ۲) میزان کل تولید محصولات زراعی گندم، جو و سیب زمینی افزایش یابد، و ۳) حداقل ۵۰ درصد میزان تولید هر یک از محصولات زراعی در استان حفظ شود؛ بهینه‌سازی نشان داد مخرج کسر مربوط به شاخص بهره‌وری CPD کاهش خواهد یافت. در نتیجه میزان شاخص

بهره‌وری نسبت به متوسط این شاخص در استان افزایش یافت. متوسط شاخص بهره‌وری سیب‌زمینی بیشتر از جو و گندم است. پاسخ مدل بهینه‌سازی (شکل ۴) نشان داد امکان افزایش شاخص بهره‌وری در هر سه محصول وجود دارد و باز هم محصول سیب‌زمینی افزایش بیشتری خواهد داشت.



شکل ۲- نتیجه کمینه‌کردن ردپای اکولوژیک آب و سطح بهینه کشت گندم، جو و سیب‌زمینی



شکل ۳- نتیجه بهینه‌سازی سطح زیرکشت گندم، جو و سیب‌زمینی و براورد سود خالص حاصل

بهینه‌سازی سطح زیر کشت محصولات زراعی اصلی در استان چهارمحال و بختیاری با استفاده از داده‌های سازمان جهاد کشاورزی انجام شد. ابتدا، ردپای بوم‌شناختی آب برای گندم، جو و سیب‌زمینی با محاسبه نیاز آبی خالص هر محصول تعیین گردید. سود خالص نیز با کسر هزینه‌های کاشت، داشت و برداشت از سود کلی محاسبه شد. سپس، ارزش بازاری ردپای بوم‌شناختی آب هر محصول برآورد شد. در

نهایت، با در نظر گرفتن محدودیت‌ها، معادلات بهینه‌سازی خطی با دو هدف حل شدند: ۱) کمینه‌سازی ردپای آب و بیشینه‌سازی سود خالص، ۲) بهینه‌سازی بهره‌وری آب از طریق کمینه‌سازی کل آب مصرفی. نتایج نشان دادند که روش بهینه‌سازی می‌تواند به دستیابی همزمان به اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی کمک کند. حل معادله بهینه‌سازی اول (کاهش ردپای اکولوژی آب) نشان داد که برای کاهش ردپای اکولوژی آب در بخش کشاورزی استان، لازم است سطح زیر کشت گندم کاهش یابد، حتی با وجود نقش حیاتی گندم و جو در تامین نیازهای عمومی و اهمیت گندم به عنوان غذای اصلی. این مقدار کاهش در سناریو اول در نظر گرفته شده، ۳۵ درصد و در سناریو دوم ۵۰ درصد پیشنهاد شده است. نتیجه بهینه‌سازی ردپای اکولوژیک آب، در مورد سطح زیرکشت محصول جو افزایش دوبرابری در سناریو اول و افزایش دو و نیم برابر در سناریو دوم است. نتایج نشان داد تغییر چندانی در سطح زیرکشت سیب‌زمینی در هر دو سناریو پیشنهاد نشده است. بهینه‌سازی با هدف توام بیشینه‌کردن سود خالص و کمینه‌کردن ردپای اکولوژی آب، نتایج متفاوتی نسبت به بهینه‌سازی فقط با هدف کاهش ردپای اکولوژیک آب داد. در این مرحله از بهینه‌سازی کاهش سطح زیر کشت گندم در هر دو سناریو در نظر گرفته شده مشابه، بهینه‌سازی اول بود. اما افزایش سطح زیرکشت جو و سیب‌زمینی هم پیشنهاد شده است. در سناریو اول ۶۸ درصد افزایش و در سناریو دوم افزایش دو برابری سطح زیر کشت جو پیشنهاد شده است. سطح زیر کشت سیب‌زمینی نیز باید برای رسیدن به هدف افزایش سود و کاهش ردپای اکولوژی آب افزایش یابد. مطابق نتایج در سناریو اول ۵۳ درصد و در سناریو دوم، ۷۷ درصد افزایش سطح زیرکشت سیب‌زمینی پیشنهاد شده است. بهینه‌سازی به منظور بیشینه‌کردن بهره‌وری آب نیز نتایج مشابهی ارائه کرد. نتیجه این بخش هم کاهش کشت محصول گندم و جو و افزایش سیب-زمینی است. نتایج این معادله بهینه‌سازی پیش‌بینی می‌کند که شاخص بهره‌وری آب در کشت سیب‌زمینی تا ۳۰ درصد می‌تواند افزایش یابد.

شکل ٤- مقایسه نتایج حاصل از بهینه‌سازی بهره‌وری نسبت به متوسط بهره‌وری محصولات

تحقیقات در ایران و سراسر جهان نشان داده‌اند که استفاده از روش‌های بهینه‌سازی در کشاورزی، ابزاری کارآمد برای دستیابی همزمان به اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی است. با این حال، نتایج این مدل‌ها به شدت به نوع تابع هدف و محدودیت‌های اعمال‌شده بستگی دارد. از این رو، تشخیص و اعمال صحیح محدودیت‌ها و تعیین دقیق ضرایب تابع هدف، نقشی حیاتی در دقت و کارایی پاسخ نهایی ایفا می‌کند. در تحقیقات انجام شده در ایران از جمله رمضانی اعتدالی و همکاران تاکید بر تغییر ترکیب کشت محصولات زراعی به منظور کاهش مصرف آب و کاهش اثرات محیط زیستی کشاورزی یا ردپای آب است (Ramezani Etedali et al., 2019). در تحقیق لیو و همکاران (Liu et al., 2021). و یو و همکاران (Yu et al., 2021). نیز به این موضوع اشاره شده است که بهینه‌سازی سطح زیر کشت، منافع متعدد از جمله کاهش ردپای آب در پی دارد. از طرفی در نظر گرفتن یک هدف برای بهینه‌سازی در مورد مسائل چندبعدی چون کشاورزی که اثرات اجتماعی، اقتصادی، محیط زیستی و حتی فرهنگی و سیاسی دارد، ممکن است مناسب نباشد. ساعد و همکاران

(Saed et al., 2018) نیز در این باره به کاربرد الگوریتم‌های بهینه-سازی چندگانه اشاره کرده‌اند. همچنان‌که دای و همکاران (Dai et al., 2021)، ژانگ و همکاران (Zhang et al., 2021) و وو و همکاران (Wu et al., 2024) به این نتیجه رسیدند که بهینه‌سازی می‌تواند هم سود اقتصادی را افزایش دهد و هم ردپای آبی و آلودگی را کاهش دهد. در تحقیق حاضر نتایج بهینه‌سازی توام اقتصادی-محیط زیستی قابل اعتمادتر است، چرا که هدف را هم افزایش سود خالص و هم کاهش ردپای اکولوژی آب در نظر گرفته است. از طرفی با توجه به هدف بهینه‌سازی بهره‌وری آب می‌توان گفت نتایج به دست آمده می‌تواند منجر به افزایش بهره‌وری آب کشاورزی در استان چهارمحال و بختیاری شود.

نتیجه‌گیری

بخش کشاورزی بیشترین سهم مصرف آب در جهان را به خود اختصاص داده است. کاهش مصرف آب در این بخش، راه حلی امیدوارکننده برای مقابله با کمبود آب است. با تمرکز بر عوامل موثر بر مصرف آب در مزارع، می‌توان بهره‌وری آب را افزایش داد؛ به این معنی که با مصرف کمتر آب، محصول بیشتری تولید شود و در نهایت ردپای آب در کشاورزی کاهش یابد. سطح زیر کشت، از جمله عوامل مهم و موثر بر مصرف آب، بهره‌وری آب و ردپای آب است. در حالی که بهینه‌سازی سطح زیر کشت با هدف حداکثر کردن سود اقتصادی، تنها به اهداف اقتصادی کمک می‌کند، دستیابی به اهداف زیست‌محیطی مانند کاهش ردپای آب، نیازمند بهینه‌سازی با اهداف ترکیبی است. این تحقیق با هدف آزمایش سناریوهای مختلف بهینه‌سازی، به بیشینه‌سازی سود و کمینه‌سازی ردپای آب در کشت محصولات عمده زراعی آبی در استان چهارمحال و بختیاری پرداخته است. نتایج نشان می‌دهند که با تغییر در ترکیب سطح زیر کشت محصولات، می‌توان ردپای آب در بخش کشاورزی را کاهش داده و بهره‌وری آب را بهبود بخشید. این تغییرات، ضمن تضمین افزایش تولید و سود اقتصادی، به حفظ منابع آبی نیز کمک می‌کنند.

کشور ایران و استان چهارمحال و بختیاری با سرعت نسبتا زیادی به سمت توسعه اراضی کشاورزی آبی رفته‌اند. افزایش جمعیت و افزایش تقاضا برای مواد غذایی و اعمال تحریم‌های بین‌المللی منجر به گسترش سطح زیرکشت انواع غلات، حبوبات، سبزیجات و دیگر مواد مورد نیاز صنایع غذایی و دامپروری شده است. اگرچه با شرایط اقلیمی و خاکی و محیط زیستی که بخش عمده‌ای از کشور ما دارد، کشاورزی محدود به اراضی مستعد، امری نشدنی است، اما می‌توان با تغییر در ترکیب کشت تا حد زیادی از خسارت بخش کشاورزی به منابع آب و خاک جلوگیری کرد، ضمن اینکه با کاهش تولید و عدم تامین تقاضا همراه نباشد. تعیین بهترین ترکیب کشت نیازمند آمایش سرزمین و شناخت پتانسیل‌ها و محدودیت‌های توسعه کشاورزی است. روش‌های مختلف بهینه‌سازی برای تعیین بهترین ترکیب کشت و وسعت اراضی زیرکشت مورد استفاده قرار می‌گیرند و اهداف مورد نظر برنامه‌ریز را با در نظر گرفتن محدودیت‌های موجود بهینه می‌کنند. پیشنهاد می‌شود با مدیریت مناسب تغییر کشت در استان چهارمحال و بختیاری از گندم به کشت‌های با مصرف آب کمتر برنامه‌ریزی شود. کشاورزان برای این تغییر آماده شوند و در صورت پیشنهاد محصولات زراعی جدید، بازار فروش آنها پیش‌بینی گردد. تغییر سبک کشاورزی از کشت آبی در مزرعه به کشاورزی در گلخانه‌ها و کاشت سبزی‌جات و صیفی‌جات با داشتن سود خالص بیشتر و بهره‌وری بیشتر پیشنهاد می‌شود. کشت گیاهان دارویی و صنعتی با توجه به مستعدبودن منطقه مورد مطالعه، پیشنهاد می‌شود.

منابع

ابراهیم‌نژاد، ح.، کرامت‌زاده، ع.، اشراقی، ف. و رضایی ا. ۱۴۰۰. بررسی عوامل موثر بر بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی آب در تولید پرتقال در شهرستان قائم‌شهر. پژوهش آب در کشاورزی. ۳(۳۵): ۲۵۹-۲۷۵.

تقی‌پور جاوی، ع. و بریمانی، ف. ۱۴۰۲. ارزیابی حکمرانی آب زیرزمینی در دشت‌های ممنوعه بحرانی استان چهارمحال و بختیاری با تاکید بر اصل اثربخشی OECD. تحقیقات منابع آب ایران. ۱۹(۳):۵۷-۷۸.

جهانتیغ، ح. ۱۴۰۱. بهینه‌سازی الگوی کشت محصولات کشاورزی در راستای مدیریت مصرف آب در شهرستان گرگان. مهندسی آبیاری و آب ایران. ۱۲(۴۷):۳۶۹-۳۸۵.

علیقلی‌نیا، ت.، قربانی، خ.، رضایی، ح. و قربانی نصرآباد، ق. ۱۴۰۰. بهنیه‌سازی الگوی کشت بر مبنای شاخص ردپای آب در اقلیم-های مختلف ایران. تحقیقات آب و خاک ایران. ۱(۵۲): ۵۳-۶۶.

فرحزا، م.ن.، نظری، ب. و نیکو، م. ۱۴۰۳. بررسی نظام‌مند گستره عوامل موثر بر بهره‌وری آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک به منظور کاهش مصرف آب: یک مطالعه فراترکیب. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۴(۱۸):۶۰۳-۶۱۷.

میرزایی ع. لیانی ق. آزرم ح. و جمشیدی س. ۱۳۹۶. تعیین الگوی کشت بهینه بخش مرکزی شهرستان سیرجان با توجه به پایداری منابع آب و محیط زیست. تحقیقات اقتصاد کشاورزی. ۹ (۴): ۲۸۳ -۳۰۴.

Chapagain, A. K., Hoekstra, A. Y. and Savenije, H. H. G. 2006. Water saving through international trade of agricultural products. Hydrology and Earth System Sciences Discussions. 10(3): 455-468.

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. doi:10.1002/ird.2362

Saed, B., Afshar, A., Jalali, M. R., Ghoreishi, M. and Aminpour Mohammadabadi, P. 2018. A water footprint-based hydro-economic model for minimizing the blue water to green water ratio in the Zarrinehrud river-basin in Iran. AgriEngineering. 1(1): 58-74.

Wen, F. Khanal, R., Fang, X. and Shan, A. 2023. Structural optimization of sectoral exports from the perspective of water footprint: A study from Henan Province, China. Water Supply. 23 (2): 764–778. https://doi.org/10.2166/ws.2022.423

Wu, P., Wang, Y., Shao, J., Yu, H., Zhao, Z., Li, L., & 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. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2024.109331

Yu, H., Liu, K., Bai, Y., Luo, Y., Wang, T., Zhong, J., and Liu, S. 2021. The agricultural planting structure adjustment based on water footprint and multi-objective optimization models in China. Journal of Cleaner Production. 297: 126646. doi:10.1016/j.jclepro.2021.126646

Zhang, F., Cai, Y., Tan, Q. and Wang, X. 2021. Spatial water footprint optimization of crop planting: A fuzzy multi-objective optimal approach based on MOD16 evapotranspiration products. Agricultural Water Management. 256: 107096. doi:10.1016/j.agwat.2021.107096

Cruz, D. and Tan, R. R. 2022. A supply chain optimization model considering cost and water footprint. Chemical Engineering Transactions. 97: 301-306. https://doi.org/10.3303/CET2297051

Dai, C., Qin, X. S. and Lu, W. T. 2021. A fuzzy fractional programming model for optimizing water footprint of crop planting and trading in the Hai River Basin, China. Journal of Cleaner Production. 123196. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123196

Hoekstra, A. Y. and Mekonnen, M. M. 2012. The water footprint of humanity. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. 109(9): 3232–3237. https://doi.org/10.1073/pnas.1109936109

Lahlou, F. and Al-Ansari T. 2024. Multi-period optimization of water planning for a sustainable agriculture: carbon footprint and water footprint assessment. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 1372012060. https://doi.org/10.1088/17551315/1372/1/012060

Liu, X., Guo, P., Li, F. and Zheng, W. 2019. Optimization of planning structure in irrigated district considering water footprint under uncertainty. Journal of Cleaner Production. 210, 1270–1280. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.339

Luo, B., Liu, X., Zhang, F. and Guo, P. 2021. Optimal management of cultivated land coupling remote sensing-based expected irrigation water forecasting. Journal of Cleaner Production. 308, 127370 https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127370.

Mekonnen M.M. and Hoekstra A.Y. 2010. Mitigating the water footprint of export cut flowers from the Lake Naivasha Basin, Kenya. Water Resources Management. 26(13): 3725-3742.

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 3, Vol. 19, Agu.-Sep. 2025, p. 373-382

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۳، جلد ۱۹، مرداد - شهریور ۱۴۰۴، ص. ۳۸۲-۳۷۳

Optimization of Water and Land Resources in the Cultivation of Major Crops in Chaharmahal and Bakhtiari Province

R. Zare Bidaki[*1], S. Norozi Ghaletaki[2]
Recived: Dec.24, 2025 Accepted: Apr.26, 2025

Abstract

Proper planning and management of the cultivation pattern is essential for the management of water resources in the agricultural sector. The purpose of the present study is to optimize the cultivation pattern of major crops in Chaharmahal-va-Bakhtiari Province with the aim of optimizing water productivity and considering the water footprint of wheat, barley and potatoes as the major crops of the province. Information on the cultivated area, water consumption, water requirement, gross and net profit of these products in the period 2011 to 2021 was obtained from the reports of the agricultural Jihad of the province. Then, the objective functions of minimizing the water footprint, maximizing economic profit and maximizing water productivity were written and solved in the Lingo environment. Two scenarios of maintaining the current crop percentage and maintaining at least fifty percent of the current crop were compared. The optimization results showed that in each of the two scenarios, reducing the area under wheat cultivation and increasing the area under barley and potato cultivation will lead to a reduction in the ecological footprint of water (4% for scenario 1 and 6% for scenario 2) and an increase in net profit (15% for scenario 1 and 24% for scenario 2). The optimal value of the productivity index from wheat, barley and potato cultivation in the province was 0.501, 0.553 and 4.2, respectively. While the average value of this index during the study period was 0.403, 0.412 and 3.1, respectively. The results of combined economic-environmental optimization are more reliable than optimization aimed solely at increasing profits, because the goal is both to increase net profits and reduce the water ecological footprint.

Keywords: Cultivation Pattern, Ecological Water Footprint, Productivity Index, Water Need.

1- Associate Professor, Department of Nature Engineering, Natural Resources and Earth Sciences Faculty, Shahrekord University, Shahrekord, Iran
2- Ms.C of Watershed Management Science and Engineering, Department of Nature Engineering, Natural Resources and Earth Sciences Faculty, Shahrekord University, Shahrekord, Iran
(*- Corresponding Author Email: Zare.rafat@sku.ac.ir)