نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۳، جلد ۱۷، مرداد – شهریور ۱۴۰۲، ص. ۴۷۷-۴۶۵

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No.3, Vol. 17, Aug.-sEP. 2023, p. 465-477

مقاله علمی-پژوهشی

ارزیابی مکانی عملکرد و شاخص بهره‌وری آب باران در گندم دیم با استفاده از مدل AquaCrop-GIS (مطالعه موردی: استان کردستان)

غزاله ضیائی[۱]، حسین بابازاده[۲*]، نیازعلی ابراهیمی پاک[۳]، کامران افتخاری[٤]، آرش تافته[٤]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۱۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۲۱

چکیده

گندم به‌عنوان یکی از مهم‌ترین محصولات زراعی در ایران و جهان سهم قابل‌توجهی از سطح زیر کشت و تولید را به خود اختصاص داده است. کمبود منابع آب در اقلیم خشک ایران استفاده بهینه از منابع آب موجود را ضروری می‌سازد. تحلیل مصرف بهینه آب در تولیدات کشاورزی با استفاده از شاخص بهره‌وری آب انجام می‌گیرد. در این مطالعه برآورد بهره‌وری آب باران درکشت گندم دیم در سطح استان کردستان با استفاده از مدل AquaCrop-GIS انجام شد. اطلاعات عملکرد از صندوق بیمه محصولات کشاورزی و در بازه شش‌ساله ۱۳۹۴-۱۳۹۳ الی ۱۳۹۹-۱۳۹۸ اخذ و مورداستفاده قرار گرفت. همچنین برای اطلاعات‌پایه موردنیاز از اطلاعات ایستگاه‌های هواشناسی سینوپتیک و همچنین بانک داده‌های جهانی خاک استفاده شد. نتایج مدل نشان‌دهنده شاخص توافق ۹۰ درصدی در فرآیند شبیه‌سازی است. همچنین با توجه به میانگین شاخص بهره‌وری آب محاسبه‌شده توسط مدل، نقشه پهنه‌بندی مناطق مستعد کشت گندم دیم ارائه گردید. شهرستان کامیاران با دارا بودن میانگین شاخص بهره‌وری آب معادل ۰/۶۸ کیلوگرم بر مترمکعب مستعدترین بخش استان برای کشت گندم دیم شناسایی گردید. با توجه به شرایط ویژه استان کردستان پیشنهاد می‌گردد توسعه سطح زیر کشت با توجه اولویت مناطق مستعدتر و با استناد به شاخص بهره‌وری آب باران در سطح استان صورت پذیرد.

واژه‌های کلیدی: ایران، پهنه‌بندی، شاخص بهره‌وری آب باران، مدل شبیه‌ساز گیاهی

مقدمه

گندم به‌عنوان یک محصول راهبردی و کلیدی بخش قابل‌توجهی از اراضی تحت کشت کشور را به خود اختصاص داده است. از سویی دیگر قرارگیری ایران در کمربند خشک و همچنین کمبود منابع آبی نیازمند استفاده بهینه از منابع موجود برای ادامه بقا و توسعه پایدار را ضروری می‌سازد. تولید محصولات کشاورزی به‌واسطه فنّاوری‌های بهبود تولید و همچنین افزایش راندمان در استفاده از منابع طبیعی باهدف بهبود تولیدات کشاورزی، به‌ویژه درزمینهٔ محصولات غذایی رشد قابل‌توجهی داشته است (FAO, 2022). گندم به‌عنوان یک محصول راهبُردی در ترکیب و الگوی کشت کشاورزی کشور همواره مطرح بوده و بخشی از سیاست‌گذاری کلان در بخش کشاورزی معطوف به این محصول است. ازاین‌رو، تحلیل وضعیت بهره‌وری و چالش‌های مرتبط با ارتقای بهره‌وری آب در این محصول، می‌تواند نقش مؤثری در مدیریت منابع آب‌وخاک کشور داشته باشد (طاهری و همکاران، ۱۳۹۹).

در مناطقی که منابع آب کمیاب‌تر از زمین است، بهبود شاخص فیزیکی بهره‌وری آب (کیلوگرم محصول تولیدشده به ازای واحد آب مصرفی) چارچوب مناسبی را برای تجزیه‌وتحلیل افزایش تولید محصولات و صرفه‌جویی آب در کشاورزی فاریاب ارائه می‌نماید (Van Dam et al., 2006). شناخت مقدار فعلی (وضع موجود) بهره‌وری آب گندم در مقایسه با مقدار آن در سایر نقاط جهان (با تأکید بر شناسایی عوامل کاهنده و نامطلوب آن)، با توجه به آنکه گندم محصولی اساسی و راهبردی در سیاست‌های تولید محصولات

۱ – دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، گروه علوم و مهندسی آب، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
۲– استاد، گروه علوم و مهندسی آب، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
۳– دانشیار، بخش آبیاری و فیزیک خاک، موسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران
۴– استادیار پژوهش، مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران
۵– استادیار پژوهش، مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران
(*– نویسنده مسئول: (Email: h_babazadeh@hotmail.com
DOR: 20.1001.1.20087942.1402.17.3.5.3

غذایی کشور شناخته‌شده است، از اهمیت خاصی برای سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی برای ارتقاء آن به‌منظور دستیابی به امنیت غذایی از منابع آب محدود کشور برخوردار است (حیدری، ۱۴۰۰).

روند تغییرات شاخص بهره‌وری آب، حاکی از رشد آن طی یک دهه اخیر بوده که این شاخص از۰.۸۷ کیلوگرم بر مترمکعب در سال ۱۳۸۴ به ۱/۳۲ کیلوگرم بر مترمکعب در سال ۱۳۹۴ رسیده (افزایش حدودی ۵۲ درصدی) و به‌طور متوسط در هرسال ۰/۰۴۱ کیلوگرم بر مترمکعب افزایش پیدا کرده است (عباسی و همکاران، ۱۳۹۶). علیرغم رشد مستمر ولی نسبتاً پایین سطح زیر کشت گندم (به‌خصوص گندم دیم) در کشور، رشد تولید در گندم آبی محسوس بوده که به‌طور عمده ناشی از بهبود عملکرد محصول بوده ولی رشد ناچیز در تولید گندم دیم در سالیان متوالی (با توجه به نرخ رشد بسیار ناچیز سطح زیر کشت آن) صرفاً به‌صورت تصادفی و به‌طور عمده ناشی از شرایط مطلوب بارش (وقوع ترسالی‌ها) در بعضی سال‌ها بوده است (حیدری، ۱۴۰۰).

بر اساس آمارنامه رسمی سازمان جهاد کشاورزی که مربوط به سال زراعی ۹۶-۱۳۹۵ ، سطح اراضی زراعی کشور بالغ بر ۱۱ میلیون هکتار است که از مجموع این اراضی در حدود ۵۰ درصد به کشت گندم اختصاص دارد و تولیدات آن معادل ۱۲/۴ میلیون تن معادل، ۱۵ درصد کل تولیدات زراعی، را تشکیل می‌دهد. از مجموع اراضی تحت کشت گندم ۶۲٪ کشت دیم و ۳۸٪ تحت کشت آبی قرار دارد. استان کردستان به‌عنوان دارنده بیشترین سطح زیر کشت گندم دیم با در اختیار داشتن ۵۳۰ هزار هکتار، معادل ۱۰٪، از مجموع اراضی تحت کشت گندم، تنها سهم ۵.۵ درصدی در تولید گندم کشور دارد. با توجه به کشت غالب دیم در این منطقه سهم تولید پایین این استان حاکی از عملکرد پایین گندم دیم در این استان است. از سویی دیگر با توجه به سهم ۱۴/۷ درصدی از مجموع اراضی دیم تحت کشت گندم دیم در این استان، کردستان پس از استان گلستان بزرگ‌ترین تولیدکننده گندم دیم در کشور است. ازاین‌رو با توجه به اهمیت محصول گندم دیم در معیشت کشاورزان استان و همچنین شرایط ویژه مرزی استان، توجه به بهره‌وری آب باران و همچنین بهبود عملکرد گندم دیم در این استان از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

به‌منظور ارزیابی روندهای گذشته و پیش‌بینی آینده در تولید محصولات زراعی، استفاده از ابزارهای شبیه‌سازی اجتناب‌ناپذیر است. ازجمله این ابزارها، مدل AquaCrop است که یک مدل شبیه‌ساز با دربرگیری گسترده قابل‌توجهی از محصولات بوده که در سال ۲۰۰۹ توسط سازمان خواروبار جهانی (FAO) معرفی شد. مطالعات گسترده‌ای در رابطه با عملکرد مدل AquaCrop در نقاط مختلف دنیا انجام شده است. ولنز و همکاران به واسنجی و صحت‌سنجی مدل AquaCrop برای گیاه کاساوا در مناطق کلمبیا، نیجریه و توگو پرداختند. به‌طورکلی شبیه‌سازی زیست‌توده واسنجی شده منجر به مجذور ضریب همبستگی (R^2) برابر ۰/۹۶ و میانگین مربعات خطا (RMSE) برابر ۱/۹۹ شد. درنهایت یک فایل محصول واحد برای گونه‌های مختلف کاساوا و مناطق کشاورزی-اکولوژیکی ایجاد شد که می‌توان با اطمینان برای مطالعه بیشتر کاساوا مربوط به امنیت غذایی، بهره‌وری آب، بهبود اعمال زراعی و غیره استفاده کرد (Wellens et al., 2022).

باروس و همکاران در مطالعه‌ای به بررسی کاربرد فضایی مدل AquaCrop با رویکرد رستری و در محیط R در محدوده مجارستان پرداختند. نتایج نشان از یک همبستگی قوی بین مقادیر NDVI و تخمین زیست‌توده مبتنی بر مدل دارد. همچنین نشان داد که این مدل میزان رطوبت خاک را به‌خوبی با ضریب همبستگی ۰/۸۲ شبیه‌سازی می‌کند. واضح است که داده‌های ورودی در دسترس و کیفیت داده‌ها هنوز مسائل مهمی در کاربرد فضایی مدل AquaCrop هستند (Barros et al., 2022).

همچنین در مطالعه‌ای جلیلی و همکاران عملکرد مدل AquaCrop را در ارزیابی عملکرد گندم در چهار سناریو کم‌آبی در حوضه آبریز رود کابل بررسی کردند و نتایج نشان داد که در این حوضه اصولاً کمبود آب وجود ندارد و کمبود آب به دلیل ناکارآمدی‌های موجود در سیستم آبیاری و عدم آگاهی کشاورزان در مورد استفاده کارآمد و بهینه از آب موجود برای آبیاری کشاورزان در مزارع خود و آبیاری بیش‌ازحد از آب مورد نیاز محصول است و مقدار آب آبیاری مبتنی بر عرضه و نه مبتنی بر تقاضا است (Jalil et al., 2020).

واعظ مدنی و همکاران (۱۳۹۸) در مطالعه‌ای با استفاده از AquaCrop و روش توماس فیرینگ به بررسی عملکرد گندم دیم پرداختند. در این مطالعه شبیه‌سازی عملکرد گندم دیم با استفاده از مدل AquaCrop در دشت تبریز و با استفاده از متغیرهای هواشناسی در دوره آماری ۳۵ ساله انجام شد و سپس با استفاده از سری زمانی تومس- فیرینگ پیش‌بینی ۵ ساله انجام شد. نتایج نشان‌دهنده عملکرد قابل‌قبول مدل در برآورد عملکرد گندم دیم بود.

پرواز و همکاران (۱۳۹۷) در طی مطالعه‌ای از مدل AquaCrop-GIS برای بهینه‌سازی الگوی کشت در دشت دهلران استفاده کردند. در این مطالعه با استفاده از مدل AquaCrop-GIS که استفاده از مدل نقطه‌ای AquaCrop را در سطح گسترده امکان‌پذیر می‌سازد، با استفاده از تغییرات مکانی مشخصات شیمیایی و فیزیکی خاک، مقدار آب در دسترس، کیفیت آب و سطح آب زیرزمینی توابع تولید در محدوده دشت استخراج و با استفاده از برنامه‌ریزی خطی و تابع هدف حداکثر درآمد خالص الگوی کشت بهینه‌سازی شد. نتایج نشان داد AquaCrop-GIS ابزار قدرتمندی برای تحلیل تغییرات مکانی پارامترهای مؤثر بر عملکرد محصول بوده و الگوی کشت در یک دشت تحت تأثیر تغییرات مکانی این پارامترها است.

تاکنون مطالعات متعددی به‌منظور تعیین و تحلیل شاخص بهره‌وری آب در محصولات زراعی انجام‌شده است. طاهری و همکاران (۱۳۹۹) در مطالعه‌ای به تحلیل مکانی شاخص بهره‌وری آب در قطب‌های تولید گندم کشور پرداختند. در این مطالعه با استفاده از اطلاعات ۲۴۱ مزرعه در نقاط مختلف در سال زراعی ۹۶-۱۳۹۵ بهره‌وری آب استخراج شد. مقادیر استخراج‌شده در دامنه ۰/۳-۲/۵۸ کیلوگرم بر مترمکعب قرار داشتند که میانگین آن برابر ۰/۷۹ کیلوگرم بر مترمکعب برآورد شد. همچنین برای درون‌یابی از روش‌های عکس فاصله وزن‌دار (IDW) و تابع پایه شعاعی (RBF) و کریجینگ معمولی استفاده شد. در بین روش‌های بکار گرفته‌شده، روش کریجینگ معمولی با مدل نیم تغییر نمای نمایی، شرایط مناسبی را برای تهیه نقشه پهنه‌بندی بهره‌وری آب گندم داشت. برآیند ارزیابی تحلیل مکانی شاخص بهره‌وری آب گندم نشان‌دهنده آن است که زمین‌آمار توانسته بود با دقت قابل قبولی (MBE=۰/۰۰۵) در تهیه نقشه پهنه‌بندی شاخص بهره‌وری آب گندم مورداستفاده قرار گیرد.

همچنین در مطالعه‌ای میرباقری و همکاران (۱۳۹۸) نسبت به اولویت‌بندی مناطق تولید گندم آبی و دیم در ایران بر مبنای شاخص مزیت تولیدی اقدام نمودند. در این مطالعه با استفاده از روش تاکسونومی و با بررسی نتایج ۳۰ ساله مشخص شد استان کرمانشاه حائز مناسب‌ترین اولویت در تولید گندم آبی و استان‌های کردستان، خراسان رضوی، آذربایجان غربی، کرمانشاه، همدان و زنجان حائز مناسب‌ترین اولویت در خصوص گندم دیم هستند.

بهرامی و همکاران (۱۳۹۷) در مطالعه‌ای به بررسی بهره‌وری فیزیکی مصرف آب کشاورزی در استان‌های منتخب و برای محصول گندم پرداختند. نتایج نشان داد بهره‌وری فیزیکی آب بین استان‌های منتخب طی دوره زمانی ۱۳۹۳-۱۳۸۴، برابر ۱/۹ کیلوگرم بر مترمکعب آب به دست آمد. این عدد بیانگر این است که به‌طور متوسط به ازای افزایش یک مترمکعب آب، حدود دو کیلوگرم در هکتار محصول گندم آبی در این دوره‌ها افزایش داشت.

سان و همکاران نیز در پژوهشی بهره‌وری آب گندم در حوضه هاتو چین را در دو مقیاس مزرعه و حوضه برآورد نمودند. نتایج نشان داد میزان متوسط شاخص بهره‌وری آب در طول دوره مطالعاتی در سطح مزرعه ۰/۸۵ کیلوگرم بر مترمکعب بوده و در سطح حوضه به مقدار ۰/۴۶ کیلوگرم بر مترمکعب کاهش پیدا کرده است (Sun et al., 2017). همچنین بیات و بابازاده در مطالعه‌ای میانگین عملکرد گندم مناطق مختلف را به روش محاسبه نیاز آبی ارائه نمودند. نتایج نشان می‌دهد میانگین شاخص بهره‌وری آب گندم در استان کردستان برابر ۰/۶۵ تن در هکتار است (Bayat and Babazadeh, 2014).

با توجه به شرایط ویژه استان کردستان به‌عنوان پهناورترین استان تولیدکننده گندم دیم، مطابق با آخرین آمارنامه رسمی کشاورزی سال زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۹، و همچنین شرایط ویژه مرزی این استان بررسی بهره‌وری آب باران باهدف ارزیابی عملکرد گندم دیم و شناخت عوامل مؤثر بر آن ضرورت بسیار دارد. لذا در این مطالعه شاخص بهره‌وری آب باران برای محصول گندم دیم در سطح استان کردستان موردبررسی قرار گرفت. در این مطالعه از مدل AquaCrop-GIS و همچنین روش‌های زمین‌آمار برای ارائه نقشه پهنه‌بندی شاخص بهره‌وری آب باران کمک گرفته شد.

مواد و روش‌ها

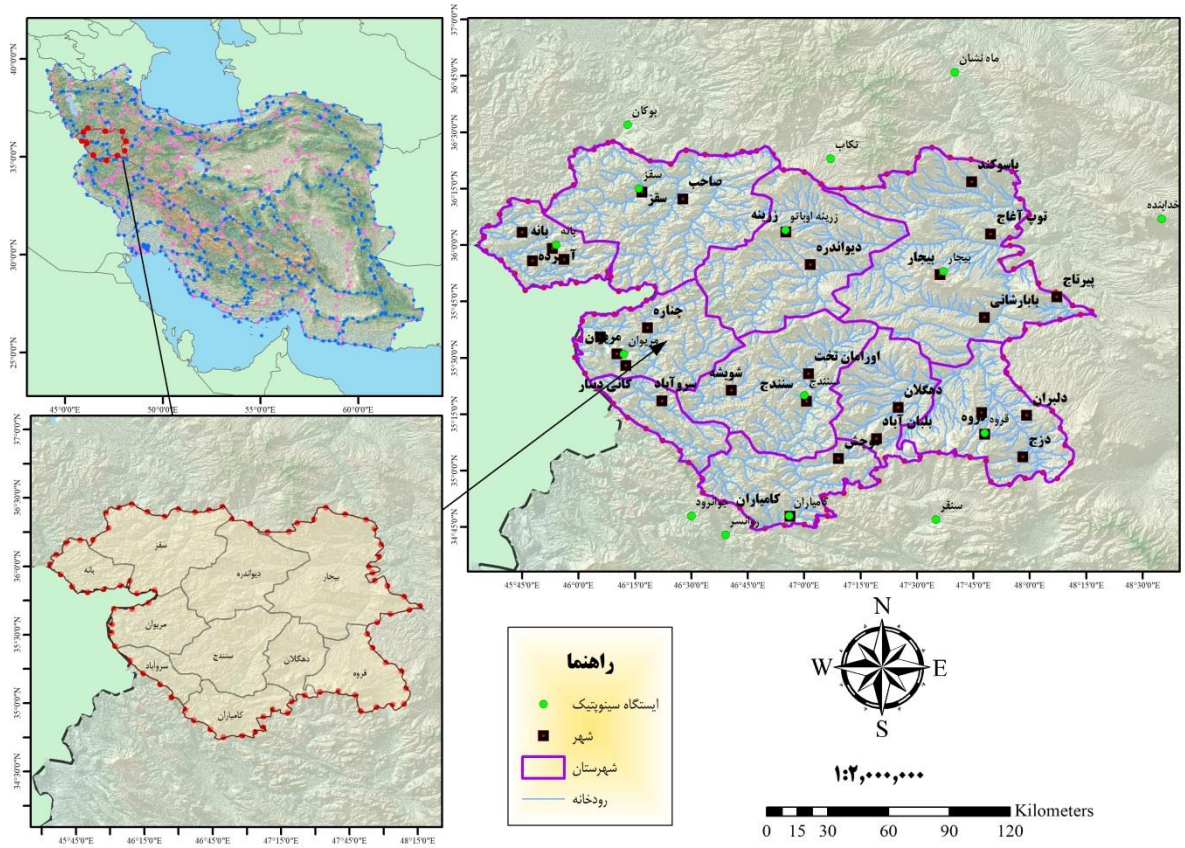
منطقه مورد مطالعه

این مطالعه در محدوده استان کردستان انجام‌شده است. استان کردستان واقع در مرزهای غربی ایران با کشور عراق واقع‌شده و با استان‌های آذربایجان غربی، زنجان، همدان و کرمانشاه همسایه است. این استان مساحتی بالغبر ۲۹ هزار کیلومترمربع دارد که شامل ۱۰ شهرستان، ۳۱ بخش و ۸۶ دهستان است. در شکل موقعیت محدوده مطالعاتی نشان داده‌شده است.

برای استفاده از مدل AquaCrop نیاز به ۴ دسته داده ورودی است که شامل داده‌های آب‌وهوا، داده‌های خاک، داده‌های محصول و داده‌های مدیریتی است. برای داده‌های آب‌وهوا از داده‌های روزانه ایستگاه‌های سینوپتیک واقع در محدوده طرح استفاده شد. همچنین برای افزایش دقت از داده‌های ایستگاه‌های سینوپنیک مجاور داخلی نیز استفاده شد. موقعیت ایستگاه‌های استفاده‌شده در شکل نشان داده‌شده است. درمجموع از ۸ ایستگاه در داخل محدوده و ۷ ایستگاه در خارج محدوده مطالعاتی استفاده‌شده است.

برای دریافت داده‌های خاکشناسی از بانک اطلاعاتی سازمان خواروبار جهانی (FAO) و نرم‌افزار HWSD ver. 1.21[1] استفاده شد. در این نرم‌افزار دسته‌بندی خاک در نقاط مختلف دنیا بر اساس رده‌های مختلف خاک ارائه‌شده و در هر رده اطلاعات خاک در سه عمق متفاوت ارائه‌شده است. اطلاعات اجزای خاک، لایه خاک، بافت خاک و چگالی از این بانک اطلاعاتی قابل استخراج است. با توجه به نیاز مدل AquaCrop به نقاط رطوبتی، این نقاط با توجه به مشخصات لایه‌های خاک از نرم‌افزار RetC و با استفاده از شبکه عصبی استخراج شد که اطلاعات آن در جدول ۱ ارائه‌شده است. محدوده مورد مطالعه شامل ۳ رده خاک قرار دارند که اطلاعات هر کدام در دو عمق ارائه شده است. در مجموع ۴ نوع بافت خاک در دو عمق ۳۰-۰ و ۱۰۰-۳۰ سانتیمتر استخراج و مورداستفاده قرار گرفت. نقشه رده‌های خاک در شکل ۱ نشان داده شده است.

1 Harmonized world soil database viewer-version 1.21



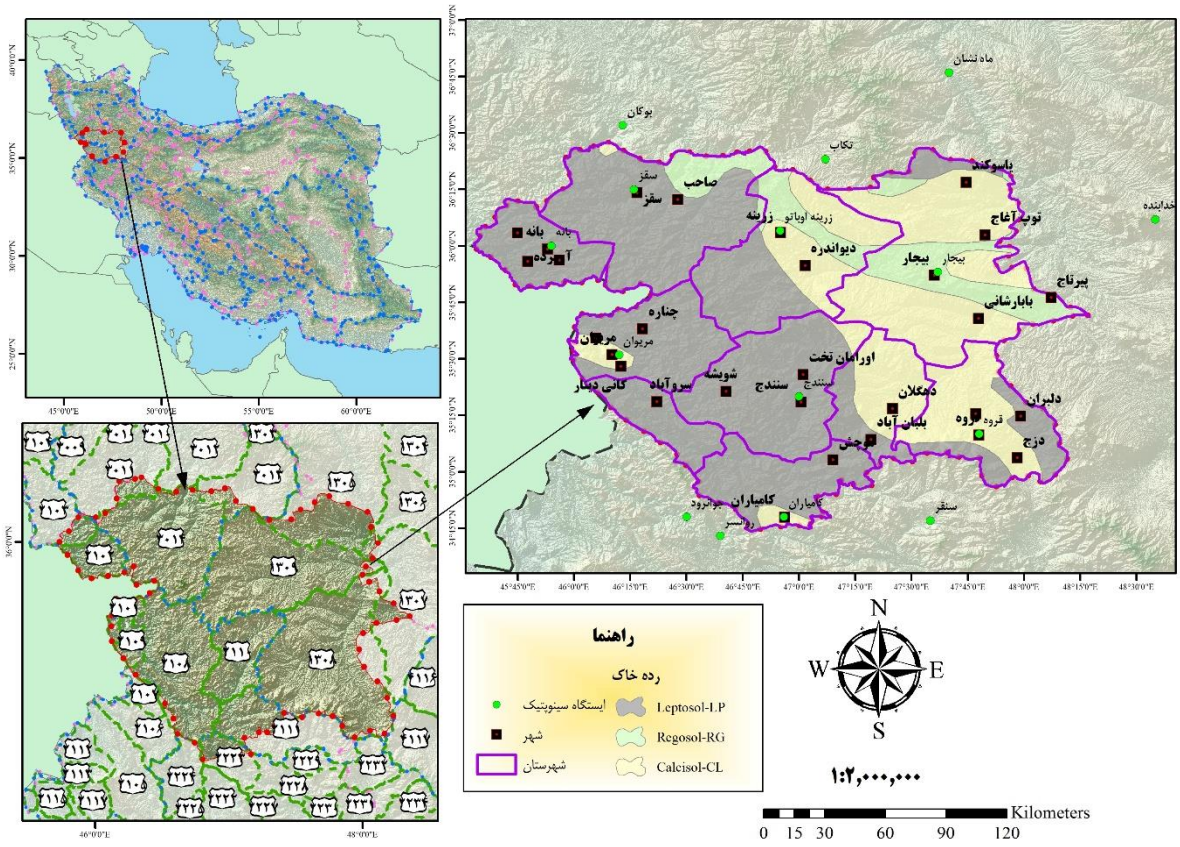
شکل ۱- موقعیت محدوده موردمطالعه

جدول ۱- اطلاعات خاکشناسی استان کردستان

ردیف	عمق خاک	اجزای خاک (٪)			بافت خاک	چگالی ظاهری	مقدار مواد آلی	رطوبت اشباع*	رطوبت مزرعه‌ای*	رطوبت پژمردگی*	K_s^*
	(cm)	رس	سیلت	شن		$(Kg/dm)^3$	(٪وزنی)	(٪)	(٪)	(٪)	(mm/hr)
۱	۰-۳۰	۴۳	۳۴	۲۳	Loam	۱/۳	۱/۴	۴۳	۲۷/۶	۱۴/۷	۷/۳
	۳۰-۱۰۰	۳۷	۳۶	۲۷	Clay loam	۱/۳۳	۰/۳۳	۴۳/۹	۳۰/۵	۱۷/۱	۶/۱
۲	۰-۳۰	۲۳	۳۳	۴۴	Clay	۱/۴	۰/۷۴	۴۷/۸	۳۹/۷	۲۶/۳	۱/۲۶
	۳۰-۱۰۰	۱۸	۳۱	۵۱	Clay	۱/۴۹	۰/۴۲	۵۰/۳	۴۳/۱	۳۰/۱	۰/۷۶
۳	۰-۳۰	۲۱	۴۰	۳۹	Caly	۱/۲۸	۰/۸۶	۴۷/۲	۳۷/۸	۲۳/۵	۱/۶۲
	۳۰-۱۰۰	۱۹	۴۱	۴۰	Silty clay	۱/۳۵	۰/۴۹	۴۷/۱	۳۸/۳	۲۳/۵	۱/۲۶

* اطلاعات محاسبه‌شده توسط مدل

داده‌های عملکرد میانگین مناطق هم‌عملکرد در سطح استان کردستان در سال‌های زراعی ۱۳۹۴-۱۳۹۳ الی ۱۳۹۹-۱۳۹۸ شامل ۶ سال که توسط کارشناسان صندوق بیمه محصولات کشاورزی ثبت گردیده است، اخذ و در مراحل واسنجی مدل مورداستفاده قرار گرفت. میانگین عملکرد ثبت‌شده به تفکیک شهرستان در جدول ۲ ارائه شده است.



شکل ۱- نمایی از لایه خاک ایران در بانک اطلاعات خاک سازمان خواروبار جهانی

جدول ۲- میانگین عملکردهای ثبت‌شده گندم دیم، در مناطق هم‌عملکرد استان کردستان، ثبت‌شده در بانک اطلاعاتی صندوق بیمه محصولات کشاورزی

ردیف	نام شهرستان	عملکرد در سال زراعی (کیلوگرم در هکتار)					
		۱۳۹۳-۱۳۹۴	۱۳۹۴-۱۳۹۵	۱۳۹۵-۱۳۹۶	۱۳۹۶-۱۳۹۷	۱۳۹۷-۱۳۹۸	۱۳۹۸-۱۳۹۹
۱	بانه	۵۰۰	۱۱۰۴	۳۸۹	۱۶۲۴	۹۱۸	۱۲۴۹
۲	بیجار	۴۸۱	۱۷۷۶	۳۳۵	۲۱۱۴	۱۵۸۴	۱۲۹۲
۳	کامیاران	۹۱۱	۲۱۵۳	۳۲۸	۳۶۸۵	۱۴۹۸	۱۷۵۰
۴	سقز	۶۹۹	۹۶۱	۴۱۵	۱۹۶۸	۱۰۹۰	۹۴۵
۵	سنندج	۴۲۰	۱۶۸۸	۳۱۱	۲۲۷۵	۶۷۵	۱۳۲۵
۶	دیواندره	۳۹۲	۱۵۱۳	۲۲۳	۱۷۰۱	۳۶۴	۸۷۲
۷	مریوان	۳۴۰	۱۰۰۱	۴۷۷	۱۵۰۸	۱۴۳۱	۱۵۵۲
۸	سروآباد	۴۱۷	۱۱۱۷	۵۳۱	۱۲۸۴	۱۶۲۵	۱۶۲۵
۹	دهگلان	۵۰۸	۱۳۰۸	۴۹۱	۱۹۱۴	۱۳۳۸	۱۴۹۱
۱۰	قروه	۳۵۰	۱۸۵۴	۴۸۰	۱۹۵۸	۱۷۳۶	۱۳۱۰

مدل AquaCrop-GIS

یکی از مدل‌های رایج برای برآورد عملکرد محصول و بهره‌وری آب، که توسط سازمان خواروبار جهانی (FAO) ارائه‌شده است، مدل AquaCrop است. این مدل در سال ۲۰۰۹ برای اولین بار ارائه شد و نسخه GIS-base آن در سال ۲۰۱۳ باهدف افزایش مقیاس کاربرد مدل AquaCrop توسط لوریته و همکاران ارائه شد (Lorite et al., 2013). این مدل بر پایه نسخه استاندارد (AquaCrop 4.0) مدل توسعه‌یافته و برای نمایش خروجی‌ها در سطح وسیع‌تر متکی به نرم‌افزار GIS است. با توجه به این نکته که هسته مرکزی این مدل نسخه استاندارد مدل AquaCrop است، مبنای محاسبات این مدل

وابسته به آب مصرف‌شده توسط گیاه است که نشریه شماره ۳۳ آبیاری و زهکشی فائو موردبحث و بررسی قرارگرفته است. مبنای محاسبات عملکرد در مدل AquaCrop از معادله زیر تبعیت می‌کند:

$$\frac{Y_x - Y_a}{Y_x} = K_Y\left(\frac{ET_x - ET_a}{ET_x}\right) \quad (۱)$$

در این معادله Yx حداکثر عملکرد، Ya عملکرد واقعی، ETx تبخیر و تعرق حداکثر، ETa تبخیر و تعرق واقعی و Ky ضریب تناسب بین کاهش عملکرد نسبی و کاهش نسبی تبخیر و تعرق است.

مدل AquaCrop با تفکیک اجزای تبخیر و تعرق گیاه (ET) به مقدار واقعی تعرق گیاه (Tr) و مقدار تبخیر از خاک (Ex) دو هدف اصلی را در طول محاسبات دنبال می‌کند. ابتدا با استفاده از پارامتر محاسبه‌شده تبخیر از خاک و مقادیر آب ورودی در قالب داده‌های ورودی به تکمیل و محاسبه اجزای بیلان آب خاک می‌پردازد. در بخش دیگر با استفاده از مقدار تعرق واقعی، عملکرد محصول (Yx) را با اتکا به پارامتری به نام شاخص برداشت (HI) محاسبه می‌کند. بدین ترتیب که با استفاده از پارامتر بهره‌وری آب (WP) میزان زیست‌توده تولیدی (B) محاسبه و با کمک شاخص برداشت، میزان عملکرد محصول محاسبه می‌شود. پارامتر شاخص برداشت در این مدل جایگزین شاخص سطح برگ (LAI) است که عموماً در سایر مدل‌ها مورداستفاده قرار می‌گیرد. همچنین برای محاسبه داده‌های تبخیر و تعرق پتانسیل از مدل ETоCalculator استفاده شد. این مدل نیز توسط سازمان خواروبار جهانی معرفی‌شده و قابلیت اتصال به مدل AquaCrop را دارد. کلیه داده‌های ورودی هر دو مدل ETоCalculator و AquaCrop در مقیاس روزانه است.

مناطق هم‌عملکرد با مبنای واحد دهستان و بر اساس تلفیق نقشه خاک و مناطق قابل پوشش هر ایستگاه هواشناسی تفکیک و در پایان ۱۹۱ منطقه در سطح استان تعریف شد. برای هر ایستگاه هواشناسی با توجه به محدوده تاریخ‌های کاشت یک فایل گیاهی در محیط AquaCrop تعریف و با توجه به نتایج ۶ ساله و با استفاده از طول دوره رشد و همچنین پارامتر شاخص برداشت (HI)[1] مدل واسنجی و صحت‌سنجی شد.

ارزیابی عملکرد مدل در مرحله واسنجی با استفاده از شاخص‌های آماری صورت گرفت. شاخص‌های آماری مورداستفاده در این مطالعه عبارت‌اند از: ریشه میانگین مربعات خطا نرمال شده (NRMSE)[2]، شاخص توافق (d)[3]، ضریب همبستگی (R)[4] و میانگین خطای انحراف (MBE)[5]. روابط ۱ تا ۴ نحوه محاسبه این شاخص‌ها نشان داده‌شده است.

$$NRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2}{N}}/\bar{O} \quad (۱)$$

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}[|P_i - \bar{O}| + |P_i - \bar{O}|]^2}\right] \quad (۲)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{N}[(O_i P_i) - (N\bar{O}\bar{P})]}{\sqrt{(\sum_{i=1}^{N} O_i^2 - N\bar{O}^2)(\sum_{i=1}^{N} P_i^2 - N\bar{P}^2)}} \quad (۳)$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=0}^{N}(P_i - O_i)}{N} \quad (۴)$$

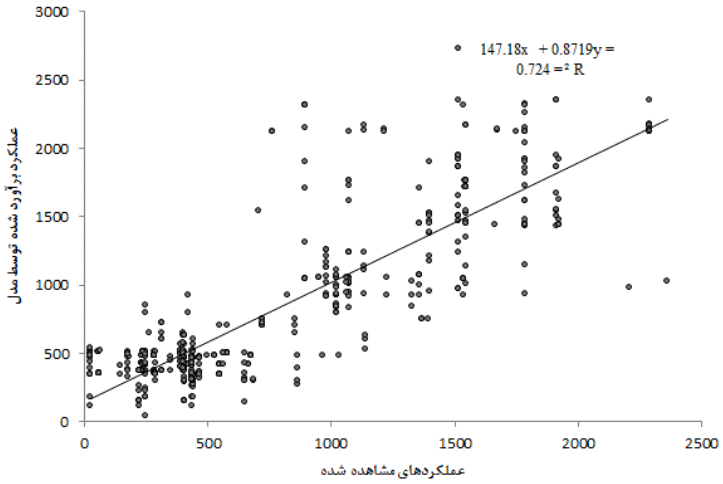
نتایج و بحث

شبیه‌سازی مدل با استفاده از فایل گیاهی پیش‌فرض مدل برای گیاه گندم و تطبیق اطلاعات دوره رشد و همچنین شاخص برداشت به‌صورت نقطه‌ای در مدل استاندارد AquaCrop 4.0 و برای مناطق هم‌عملکرد انجام شد. واسنجی ابتدا برای سه سال زراعی ۱۳۹۴-۱۳۹۳ تا ۱۳۹۶-۱۳۹۵ انجام و سپس با توجه به نتایج حاصل‌شده صحت‌سنجی برای سال‌های زراعی۱۳۹۷-۱۳۹۶، ۱۳۹۸-۱۳۹۷ و ۱۳۹۹-۱۳۹۸ انجام شد که منجر به تغییرات قابل‌توجه در فایل‌های واسنجی در این مرحله شد. واسنجی و صحت‌سنجی مدل با استفاده از تعریف فایلهای نقطه‌ای و با توجه به مناطق هم‌عملکرد در نظر گرفته‌شده و هم‌پوشانی با محدوده ایستگاه‌های هواشناسی انجام شد. این فرآیند منجر به تعریف ۹ فایل گیاهی مستقل شد. با توجه به استفاده از نسخه AquaCrop 4.0 به‌عنوان موتور شبیه‌ساز در نسخه GIS base مدل AquaCrop عملیات صحت‌سنجی و واسنجی محدوده مطالعاتی با استفاده از این ۹ فایل در محیط AquaCrop 4.0 انجام شد. نتایج شبیه‌سازی مدل در طی شش سال با استناد به شاخص‌های آماری در شکل ۲ ارائه‌شده است.

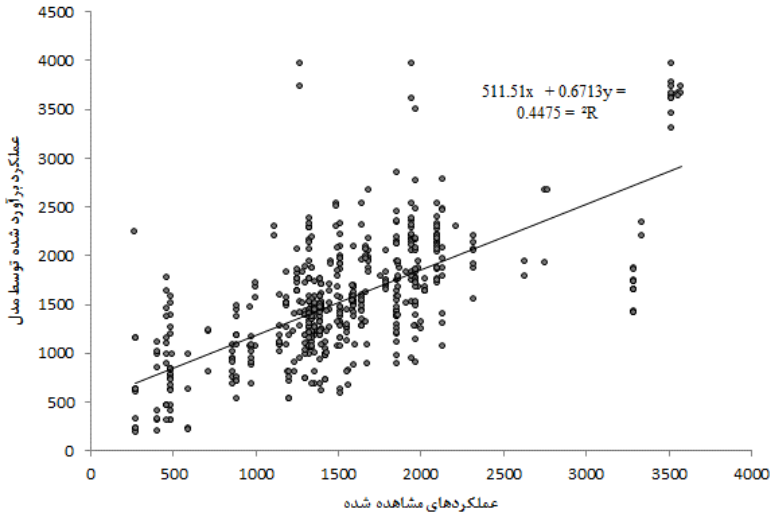
کارایی مدل با استفاده از شاخص‌های آماری مورد ارزیابی قرارگرفته است. نتایج در دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی در شکل و شکل ۲ ارائه شده است. نتایج در مرحله واسنجی نشان‌دهنده شاخص توافق ۸۸ درصد، شاخص میانگین خطای انحراف (MBE) دارای مقدار منفی ۴۹ و همچنین میانگین مربعات خطا نرمال شده (NRMSE) برابر ۰/۴ هست. در مرحله صحت‌سنجی نتایج نشان‌دهنده آن است نتایج در مرحله واسنجی نشان‌دهنده شاخص توافق ۸۹ درصد، شاخص میانگین خطای انحراف (MBE) دارای مقدار منفی ۸ و همچنین میانگین مربعات خطا نرمال شده (NRMSE) برابر ۰/۳۳ هست.همچنین عملکرد مدل در مقیاس ۶

1- Harvest Index
2- Normalized Root Mean Square Error
3- Index of Agreement
4- Correlation Coefficient
5- Mean Bias Error

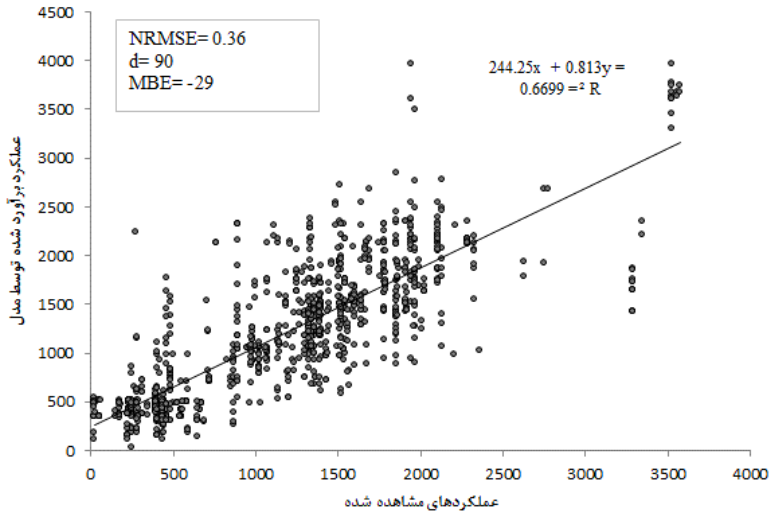
ساله نشان‌دهنده شاخص توافق ۹۰ درصد هست که نشان از عملکرد قابل‌قبول مدل دارد. همچنین میانگین مربعات خطا نرمال شده (NRMSE) برابر ۰/۳۶ هست. شاخص میانگین خطای انحراف (MBE) دارای مقدار منفی ۲۹ است که نشان از کم‌برآوردی مدل درمجموع مقادیر شبیه‌سازی‌شده دارد. همچنین ضریب همبستگی ۶۶٪ نشان از همبستگی قابل‌قبول بین مقادیر شبیه‌سازی‌شده و داده‌های جمع‌آوری‌شده دارد. شایان ذکر است در مرحله صحت‌سنجی شاخص توافق مدل بهبود یافته همچنین میزان خطا با استناد به دو شاخص میانگین خطای انحراف و میانگین مربعات خطا نرمال شده کاهش یافته است. از سوی دیگر ضریب همبستگی با افزایش تعداد داده‌ها از ۷۲ درصد در مرحله واسجی به ۶۶ درصد در مقیاس ۶ ساله کاهش یافته است. همچنین مدل تمامی دارای کم برآوردی است. در مطالعه‌ای نسبت به واسنجی مدل برای بررسی اثر تغییر اقلیم بر روی عملکرد گندم زمستانه اقدام شد. نتایج این تحقیق نشان داد باوجود شاخص توافق ۹۶ ٪ و RMSE برابر ۰/۴۲-۰/۳ تن در هکتار مدل AquaCrop عملکرد قابل قبولی در شبیه‌سازی فرآیند رشد گیاه داشته است (Alvar-Beltr´an et al., 2021).



شکل ٤- نتایج شبیه‌سازی ۳ ساله عملکرد گندم دیم توسط مدل AquaCrop-GIS در مرحله واسنجی (تن در هکتار)



شکل ۳- نتایج شبیه‌سازی ۳ ساله عملکرد گندم دیم توسط مدل AquaCrop-GIS در مرحله صحت‌سنجی (تن در هکتار)



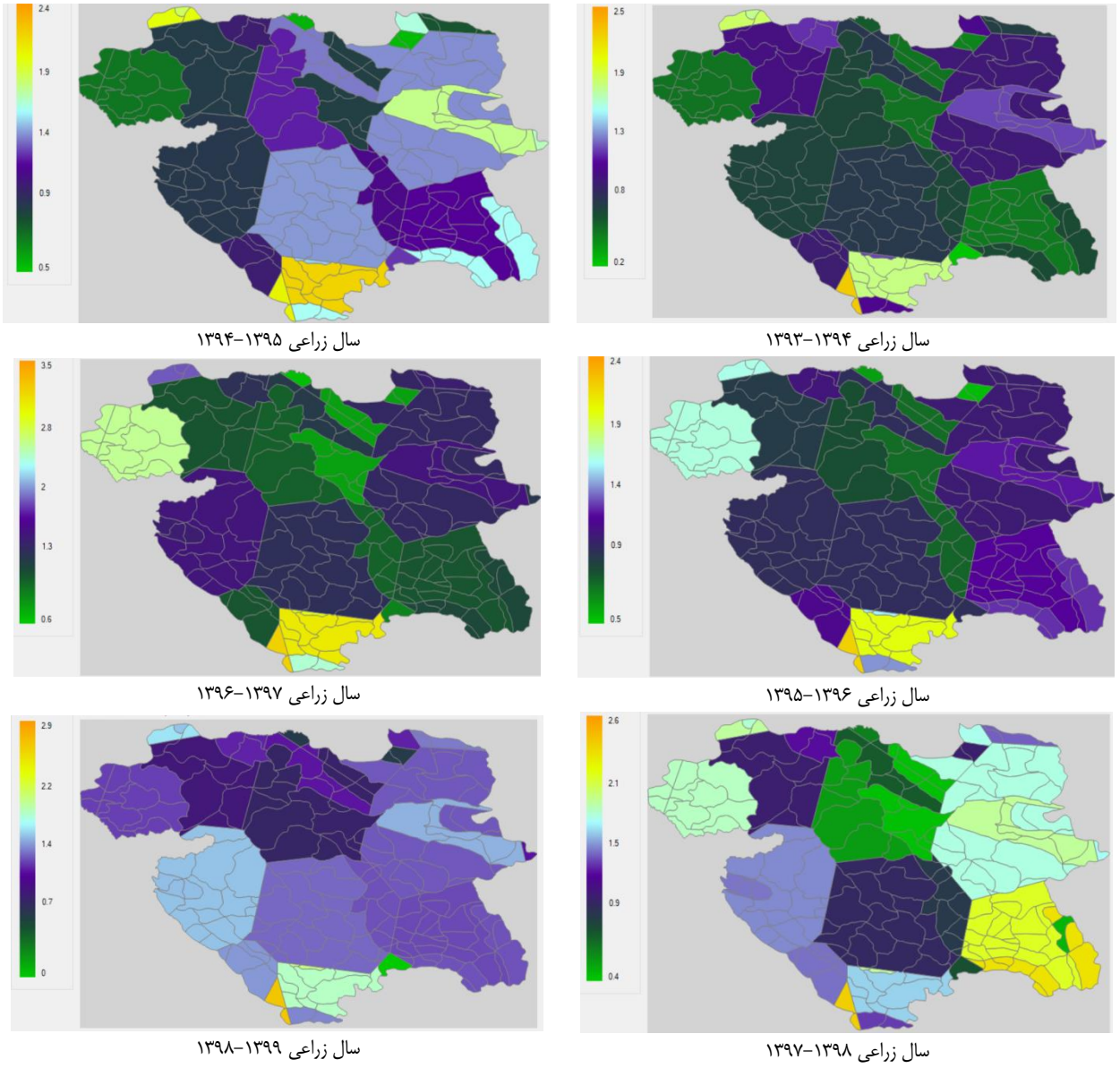
شکل ۲- نتایج شبیه‌سازی ٦ ساله عملکرد گندم دیم توسط مدل AquaCrop-GIS در مرحله صحت‌سنجی (تن در هکتار)

در شکل ۳ و شکل ۴ نتایج خروجی مدل AquaCrop-GIS در شبیه‌سازی عملکرد و همچنین شاخص بهره‌وری آب باران محاسبه‌شده ارائه‌شده است. همچنین مقادیر بهره‌وری آب باران استخراج‌شده از مدل به تفکیک شهرستان در جدول ۳ ارائه‌شده است. نتایج نشان‌دهنده آن است که مناطق جنوبی و همچنین شرقی استان در محدوده شهرستان‌های کامیاران و بیجار نسبت به سایر مناطق دارای شاخص بهره‌وری آب بالاتری هستند و کمترین مقادیر مربوط به مناطق مرکزی و شمالی استان در محدوده شهرستان سقز است.

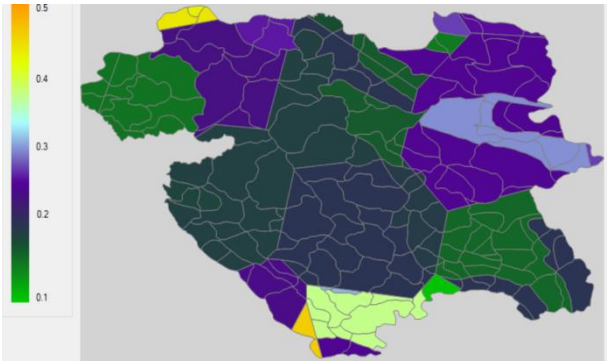
شاخص بهره‌وری در محدوده مطالعاتی در طول دوره شبیه‌سازی در بازه ۰/۶۸-۰/۰۶ (کیلوگرم بر مترمکعب) متغیر است. کمترین مقدار مربوط به شهرستان دهگلان در سال زراعی ۱۳۹۴-۱۳۹۳ و بیشترین مقدار در شهرستان کامیاران و در سال زراعی ۱۳۹۷-۱۳۹۶ رخداده است. برای پهنه‌بندی شاخص بهره‌وری آب از روش‌های میان‌یابی کریجینگ استفاده شد. با توجه به نتایج مطالعه طاهری و همکاران (۱۳۹۹) روش زمین‌آماری کریجینگ دقت قابل قبولی در تهیه نقشه پهنه‌بندی داشته است. ازاین‌رو با استفاده از روش کریجینگ معمولی در ابتدا نقشه پهنه‌بندی در سطح استان کردستان تهیه شد که با توجه به نتایج خروجی مدل دقت این روش برابر MBE=۰/۰۰۵ برآورد شد. با توجه به اهمیت تغییرات ارتفاعی و توپولوژی استان کردستان نقشه پهنه‌بندی با استفاده از روش کوکریجینگ و با استفاده از تغییرات ارتفاعی مجدداً نقشه پهنه‌بندی تهیه شد که در این روش میزان خطا کاهش یافت و به MBE=۰/۰۰۳ رسید. نقشه پهنه‌بندی مناطق با بهره‌وری آب مشابه و با استفاده از روش کوکریجینگ در شکل ارائه‌شده است.

جدول ۳- مقادیر بهره‌وری آب باران (کیلوگرم بر مترمکعب) استخراج‌شده از مدل AquaCrop-GIS به تفکیک شهرستان

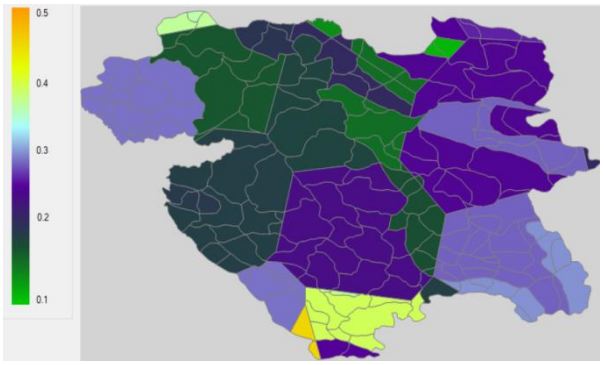
سال زراعی / شهرستان	۹۴-۹۳	۹۵-۹۴	۹۶-۹۵	۹۷-۹۶	۹۸-۹۷	۹۹-۹۸
بانه	۰/۱۲	۰/۱۶	۰/۳۱	۰/۴۶	۰/۳۴	۰/۱۸
بیجار	۰/۲۴	۰/۳۴	۰/۲۶	۰/۳۳	۰/۳۶	۰/۲۲
کامیاران	۰/۳۴	۰/۴۱	۰/۳۷	۰/۵۶	۰/۳۶	۰/۳۱
سقز	۰/۲۳	۰/۲۶	۰/۲۳	۰/۲۸	۰۱/۲۴	۰/۱۷
سنندج	۰/۱۹	۰/۳۲	۰/۲۶	۰/۳۶	۰/۲۶	۰/۲۱
دیواندره	۰/۱۷	۰/۲۸	۰/۲۱	۰/۲۴	۰/۱۶	۰/۱۶
مریوان	۰/۱۷	۰/۲۳	۰/۲۲	۰/۳۴	۰/۳۱	۰/۲۷
سروآباد	۰/۱۹	۰/۲۴	۰/۲۶	۰/۳۴	۰/۳۳	۰/۳۱
دهگلان	۰/۱۶	۰/۳۲	۰/۲۵	۰/۲۹	۰/۳۱	۰/۱۷
قروه	۰/۱۶	۰/۳۶	۰/۳۱	۰/۲۸	۰/۴۵	۰/۲۱



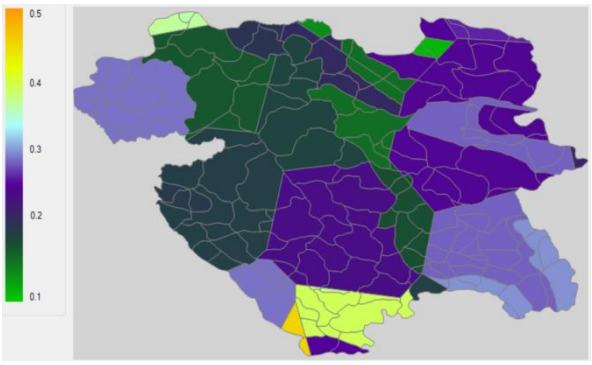
شکل ۳- عملکرد شبیه‌سازی‌شده توسط مدل AquaCrop-GIS در سال‌های زراعی ۹۴-۱۳۹۳ تا ۹۹-۱۳۹۸ (تن در هکتار)



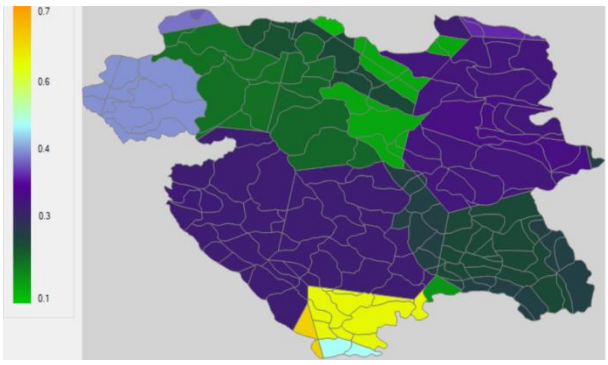
سال زراعی ۱۳۹۴-۱۳۹۳



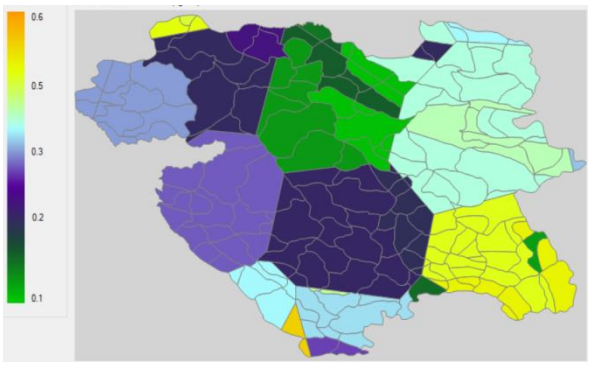
سال زراعی ۱۳۹۵-۱۳۹۴



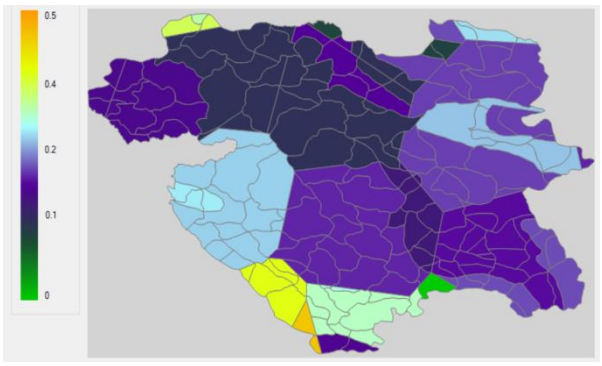
سال زراعی ۱۳۹۶-۱۳۹۵



سال زراعی ۱۳۹۷-۱۳۹۶

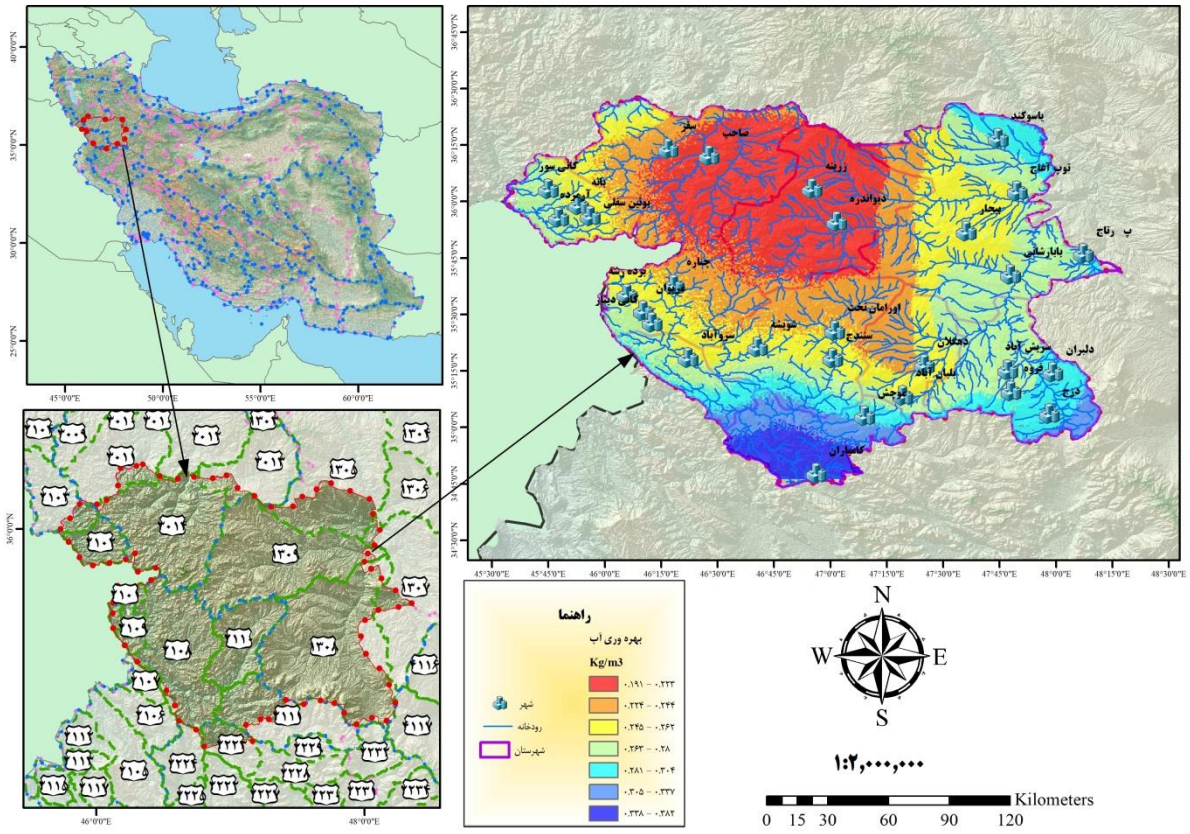


سال زراعی ۱۳۹۸-۱۳۹۷



سال زراعی ۱۳۹۹-۱۳۹۸

شکل ٤- شاخص بهره‌وری آب باران(کیلوگرم بر مترمکعب) شبیه‌سازی‌شده توسط مدل AquaCrop-GIS در سال‌های زراعی ٩٤-۱۳۹۳ تا ۹۹-۱۳۹۸



شکل ۸- نقشه پهنه‌بندی شاخص بهره‌وری آب در استان کردستان

نتیجه‌گیری

بر اساس مدل واسنجی شده AquaCrop-GIS با استفاده از اطلاعات عملکرد در محدوده استان کردستان و با توجه به شاخص بهره‌وری آب محاسبه‌شده توسط مدل محدوده شهرستان کامیاران بالاترین شاخص بهره‌وری آب را در سطح استان دارد. بخش‌هایی از شمال شهرستان سقز و بخش مرکزی شهرستان مریوان نیز دارای بهره‌وری آب قابل‌قبول هستند درحالی‌که بخش‌های عمده‌ای از مساحت استان شامل شهرستان‌های سقز، دیواندره و سنندج دارای بهره‌وری آب پایین می‌باشند. برای افزایش بهره‌وری آب در استان ضروری است توسعه سطح زیر کشت با توجه به نقشه پهنه‌بندی و با تمرکز بر مناطق مستعد انجام گیرد. در حال حاضر در بخش‌هایی از استان که دارای بهره‌وری بالاتری هستند سهم کمی از اراضی تحت کشت را به خود اختصاص داده‌اند درحالی‌که در مناطق کمتر مستعد این عدد بالاتر است. ازاین‌رو پیشنهاد می‌گردد که تمرکز توسعه در مناطق مستعد کشت گندم دیم و با اتکا به شاخص بهره‌وری آب انجام گیرد و در مناطق کمتر مستعد کشت‌های جایگزین باهدف استفاده بهینه از آب باران معرفی گردد. همچنین این امر در بهبود اقتصاد کشاورزی نیز منطقه مؤثر است.

منابع

بهرامی، م.، خلیلیان، ص.، مرتضوی، س.ا. و اسعدی، م.ع. ۱۳۹۷. بررسی بهره‌وری فیزیکی مصرف آب کشاورزی در استان‌های منتخب ایران مطالعه موردی: محصول گندم، نشریه آبیاری و زهکشی ایران، (۱۲)۶: ۱۵۱۸-۱۵۱۱.

پرواز، گ.، رستمی نیا، م. و علیزاده، ح.ع. ۱۳۹۷. بهینه‌سازی الگوی کشت با استفاده از نرم‌افزار AquaCrop-GIS (مطالعه موردی: دشت دهلران، استان ایلام)، تحقیقات آب‌وخاک ایران، ۴۹ (۴): ۸۶۵-۸۷۷.

حیدری ن. ۱۴۰۰. بهره‌وری آب گندم در ایران و مقایسه آن با مقادیر چند کشور، نشریه پژوهش آب در کشاورزی. ۳۵(۴): ۴۲۱-۴۳۶.

طاهری، م.، رضاوردی نژاد، و.، بهمنش، ج.، عباسی، ف. و باغانی، ج. ۱۳۹۹. تحلیل مکانی شاخص بهره‌وری آب در قطب‌های تولید گندم کشور، پژوهش آب در کشاورزی، (۲)۳۴: ۲۲۸-۲۱۷.

عباسی ف.، عباسی ن. و توکلی ع. ۱۳۹۶. بهره‌وری آب در بخش کشاورزی. نشریه آب و توسعه پایدار، ۱: ۱۴۴-۱۴۱.

میرباقری، س.ش.، رفیعی، ح.، اکبرپور، ا. ۱۳۹۸. الویت‌بندی مناطق

تولیدی گندم آبی و دیم در ایران بر مبنای شاخص‌های مزیت تولید، اقتصاد کشاورزی و توسعه، (۱۰۵) ۲۷ :۱۱۸-۹۱.

واعظ مدنی، م.ا.، فاخری فرد، ا. و مجنونی هریس، ا. ۱۳۹۸. استفاده تلفیقی از مدل AquaCrop و روش توماس – فیرینگ در بررسی عملکرد گندم دیم، دانش آب‌وخاک، (۳)۲۹: ۱۰۸-۹۵.

Alvar-Beltr´an, J., Heureux, A., Soldan, Manzanas, R., Khan, B. and Dalla Marta, A. 2021. Assessing the impact of climate change on wheat and sugarcane with the AquaCrop model along the Indus River Basin, Pakistan. Agricultural Water Management. 253: 1-15.

Barros, V.D.D., Waltner, I., Minoarimanana, R.A., Halupka, G., Sándor, R., Kaldybayeva, D. and Gelybó, G. 2022. Spatial Aquacrop an R Package for Raster-Based Implementation of the AquaCrop Model. Plants. 11: 2907. https://doi.org/10.3390/plants11212907

Bayat, M. A., and Babazadeh, H. 2014. Evaluation of water use productivity indicators in the main agricultural products of Iran. Journal of Water Sciences Research. 6(1): 17-29

FAO. The Future of Food and Agriculture- Trends and Challenges. 2017. Available online: https://www.fao.org/3/i6583e/i6583e.pdf (accessed on 10 July 2022).

Jalil A., Akhtar F. and Awan U.KH. 2020. Evaluation of the AquaCrop model for winter wheat under different irrigation optimization strategies at the downstream Kabul River Basin of Afghanistan. Agricultural Water Management. 240. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106321.

Lorite, I.J., Garcia-Vila, M., Santos, C., Ruiz-Ramos, M. and Fereres, E. 2013. Aquadata and AquaGIS: two computer utilities for temporal and spatial simulation of water-limited yield with AquaCrop. Computer and Electronics in agriculture. 96: 227-237.

Sun, S., Zhang, C., Li, X., Zhou, T., Wang, Y., Wu, P. and Cai, H. 2017. Sensitivity of crop water productivity to the variation of agricultural and climatic factors: A study of Hetao irrigation district, China Journal of Cleaner Production. 142: 2562-2569

Van Dam, J.C., Singh, R., Bessembinder, J.J.E., Leffelaar, P.A., Bastiaanssen, W.G.M., Jhorar, R. K., Kroes, J. G., and Droogers, P. 2006. International Journal of Water Resources Development. Water Resources Development. 22(1): 115–133.

Wellens, J., Raes, D., Fereres, E., Diels, J., Coppye, C., Adiele, J.G., Ezui, K.S.G., Becerra, L.A., Gomez Selvaraj, M., Dercon, G. and Heng, L.K. 2022. Calibration and validation of the FAO AquaCrop water productivity model for cassava (Manihot esculenta Crantz). Agricultural Water Management. 263(1):107491.DOI:10.1016/j.agwat.2022.107491

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No.3, Vol. 17, Aug.-sEP. 2023, p. 465-477

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۳، جلد ۱۷، مرداد - شهریور ۱۴۰۲، ص. ۴۷۷-۴۶۵

Spatial evaluation of rainwater productivity index in rainfed wheat using AquaCrop-GIS model (case study: Kurdistan province)

G. Ziaii[1], H. Babazadeh[2*], N. Ebrahimipak[3], K. Eftekhari[4], A. Tafteh[5]

Recived: Jan.01, 2022 Accepted: Feb.10, 2023

Abstract

Wheat, as one of the most important crops in Iran and all around the world, has taken a significant share of the area under cultivation and production. The lack of water resources in the dry climate of Iran makes it necessary to use the available water resources to the optimal level. The analysis of optimal water consumption in agricultural production is done by using the water efficiency index. In this study, rainwater productivity in rainfed wheat cultivation in Kurdistan province was estimated using the AquaCrop-GIS model. Performance information was collected from the Agricultural Products Insurance Fund in the six-year period from 2014-2015 to 2019-2020. Also, information from synoptic meteorological stations and the global soil data bank were used for the required basic information. The model results show a 90% agreement index in the simulation process. Also, according to the average water productivity index calculated by the model, a zoning map of the areas prone to rainfed wheat cultivation was presented. Kamyaran district, having an average water productivity index of 0.68 kg/m3, was identified as the most suitable part of the province for dry wheat cultivation. According to the special conditions of Kurdistan province, it is suggested that the development of the cultivated area should be done according to the priority of more susceptible areas and based on the rainwater productivity index in the province.

Key words: AquaCrop-GIS, Kurdistan, Rainfed cultivation, Water Productivity, Wheat

1 - Ph. D. Student in Irrigation and Drainage, Department of Water Science and Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
2 - Professor, Department of Water Science and Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University , Tehran, Iran
3 - Associate Professor, Department of Irrigation and Soil physics, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran
4 - Assistant Professor, Department of Soil Science, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran
5 - Assistant professor, Department of irrigation and soil physics, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran
(*- Corresponding Author Email: h_babazadeh@hotmail.com)