



سبش از دور

GIS ایران



سنجش از دور و GIS ایران
Iranian Remote Sensing & GIS

سال چهاردهم، شماره اول، بهار ۱۴۰۱
Vol.14, No. 1, Spring 2022

۴۳-۵۸

مقاله پژوهشی

ارزیابی تغییرات عملکرد و ردپای آب محصول ذرت با مدل گیاهی AquaCrop-GIS

رستا نظری^۱، هادی رضایی اعتدالی^{۲*}، پیمان دانش کار آراسته^۳

۱. دانشجوی دکتری مهندسی آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشگاه بین‌المللی

امام خمینی (ره)، قزوین

۲. دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین

۳. دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۵/۱۲

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۹/۲۷

چکیده

برآورد پتانسیل تولید هر گیاه تابعی از شرایط اقلیمی، پتانسیل‌های ژنتیکی گیاه و دیگر عوامل گوناگون محیطی و مدیریتی است. ارزیابی توانمندی مناطق، در به‌فعلیت‌رساندن پتانسیل‌های ژنتیکی گیاهان، از نکات مهم برنامه‌ریزی‌های کلان در کشاورزی به‌حساب می‌آید. با توجه به جایگاه استان قزوین در تولید محصول ذرت و اهمیت کشت این محصول در استان، برآورد هرچه دقیق‌تر میزان عملکرد این محصول استراتژیک بسیار ضرورت دارد. در همین زمینه، با مطالعه یک دوره داده‌برداری یازده‌ساله، عملکرد محصول ذرت با مدل گیاهی جدید AquaCrop-GIS برآورد شد. پهنه‌بندی شاخص‌های کلیدی محصول از طریق مدل در سطح استان شبیه‌سازی شد. با بررسی نتایج این پارامترهای کلیدی، مشخص شد ایستگاه‌های مطالعاتی قزوین و معلم‌کلایه با میزان تبخیر و تعرق مرجع کمتر دارای بهره‌وری آب بیشتری است. در ادامه با استفاده از عملکرد محاسباتی، اجزای ردپای آب و ردپای آب کل محصول در محدوده ایستگاه‌های مطالعاتی تخمین زده شد. با بررسی معادلات رگرسیونی میان اجزای ردپای آب و ردپای آب کل محصول با عملکرد محصول در هر ایستگاه، مشخص شد روابط ردپای آب آبی با عملکرد به‌نسبت دیگر اجزای ردپای آب درمورد تمامی ایستگاه‌ها، از میزان ضریب تعیین $R^2 = 0/43$ ، $R^2 = 0/51$ ، $R^2 = 0/43$ ، $R^2 = 0/77$ و $R^2 = 0/79$ به‌ترتیب درمورد ایستگاه‌های قزوین، آوج، معلم‌کلایه، تاکستان و بوبین‌زهره) و سطح معنی‌داری برخوردار است. به‌طور کلی ضریب تعیین این روابط در ایستگاه بوبین‌زهره با $R^2 = 0/88$ ، $R^2 = 0/79$ ، $R^2 = 0/56$ و $R^2 = 0/53$ به‌ترتیب برای ردپای آب سبز، آبی، خاکستری و ردپای آب نسبت به سایر ایستگاه‌ها، بیشتر برآورد شد؛ به این معنی که کاهش عملکرد در این ایستگاه تأثیر بسزایی بر افزایش ردپای آب کل محصول داشت.

کلیدواژه‌ها: پتانسیل تولید، بهره‌وری آب، ایستگاه‌های مطالعاتی، معادلات رگرسیونی، سطح معنی‌داری، AquaCrop-GIS.

* نویسنده مکاتبه‌کننده: قزوین، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، کدپستی: ۳۴۱۴۸۹۶۸۱۸. تلفن: ۰۹۱۲۳۵۳۴۲۵۴-۰۲۸۳۳۹۰۱۲۷۸

۱- مقدمه

در حال حاضر، بخش کشاورزی مهم‌ترین بخش مصرف‌کننده آب است. با توجه به بحران کمبود آب در بخش کشاورزی، مدیریت آبیاری براساس نیاز واقعی گیاه و افزایش بهره‌وری مصرف آب حائز اهمیت می‌باشد. افزایش محصول به تأمین نیاز آبی گیاه وابسته است؛ بنابراین، تخمین صحیح نیاز آبی گیاه هم به تولید محصول کمک می‌کند و هم در مدیریت منابع آب مؤثر است. برآورد پتانسیل تولید نقش مهمی در مدیریت تولید در بخش کشاورزی دارد. پتانسیل عملکرد هر محصول نشان‌دهنده بهترین نوع مدیریت در کنترل مؤثرترین عامل کاهنده عملکرد آن محصول در منطقه است؛ از این رو عملکرد واقعی به عملکرد گیاه در شرایط واقعی تولید و در حضور محدودیت‌های معمول محیطی مانند آب، مواد مغذی، آفات، بیماری‌ها، علف‌های هرز و مدیریت اطلاق می‌شود (Sadras, 2004).

برای بررسی میزان عملکرد گیاهان زراعی می‌توان از انواع مدل‌های گیاهی همچون 'DSSAT'، 'APSIM'، 'SUCROS'، 'WOFOST' و AquaCrop بهره برد. با کاربرد مدل‌های گیاهی، ضمن مدیریت و تغییر پارامترهایی همچون آبیاری، خاک، رقم محصول، فعالیت‌ها و تکنیک‌های مورد استفاده در کشت محصولات زراعی، می‌توان رشد و عملکرد محصولات کشاورزی را ارزیابی کرد. مدل AquaCrop از جمله مدل‌های شبیه‌ساز رشد گیاه است که سازمان خواربار جهانی معرفی کرده و به لحاظ داده‌های ورودی کمتر مورد نیاز، کاربرد گسترده‌ای دارد (Raes et al., 2009). از مزایای مدل AquaCrop می‌توان به انعطاف‌پذیری مدل در اجرای راهکارهای گوناگون مدیریتی در زمینه نوع خاک، روش آبیاری و نیز به امکان شبیه‌سازی تأثیرات تنش‌های محیطی از جمله تنش آبی، ماندابی، شوری، حاصلخیزی و گرما اشاره کرد. مدل AquaCrop در مناطق متفاوت و درمورد محصولات گوناگون استفاده شده است (Farahani et al., 2009; Geerts et al., 2009; Heng et al., 2009; Tavakoli et al., 2010; Andarzian et al., 2011;

Salemi et al., 2011; García-Vilaa and Fereres, Alizadeh et al., Ramezani Etedali et al., 2016; 2012; Babazadeh et al., 2012; al., 2010).

به‌منظور بررسی تغییرات مکانی همراه با تعداد شبیه‌سازی بسیار، می‌توان از مدل جدید AquaCrop-GIS استفاده کرد (Lorite et al., 2013). دو مدل جدید FAO با نام‌های AquaCrop-GIS و AquaCrop-Data، با ایجاد همبستگی میان اطلاعات مدل AquaCrop و ArcGIS، حجم بسیاری از اطلاعات را با سناریوهای متفاوت شبیه‌سازی می‌کنند (Lorite et al., 2013). پژوهشی با هدف شبیه‌سازی تأثیر تغییرات مکانی خصوصیات اقلیمی مناطق متفاوت استرالیا بر عملکرد گندم، با استفاده از دو مدل AquaCrop-GIS و AquaCrop-Data، انجام شد (Lorite et al., 2013). نتایج نشان داد که مدل AquaCrop-GIS برای استفاده از مدل AquaCrop در مقیاس حوضه آبریز مدل قدرتمندی است. در پژوهشی دیگر، اثر حاصلخیزی و اقلیم‌های متفاوت نواحی جنوبی آلبرتای کانادا بر عملکرد محصولات گوناگون با استفاده از مدل AquaCrop-GIS شبیه‌سازی شد (Langhorn, 2015). نتایج نشان داد که مدل مورد نظر می‌تواند تأثیرات تغییر اقلیم در عملکرد محصول را شبیه‌سازی کند. جیانگ^۵ و همکاران (۲۰۱۵) اثر تغییرات مکانی مشخصات کمی و کیفی آب مصرفی را بر عملکرد محصولات گوناگون در چین، با استفاده از مدل AquaCrop-GIS، شبیه‌سازی کردند. رائس^۶ و همکاران (۲۰۱۳) در پژوهشی نشان دادند پیش‌بینی عملکرد محصول در شرایط تغییرات مکانی کمی و کیفیت آب آبیاری، حاصلخیزی خاک، مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک، سطح آب زیرزمینی، کیفیت آب زیرزمینی و اقلیم با استفاده از

1. Decision Support System for Agrotechnology Transfer
2. Agriculture Production Systems sIMulator
3. Simple and Universal Crop Growth Simulator
4. World Food Studies
5. Jiang
6. Raes

و تعیین دقیق میزان آب مصرفی محصول، به افزایش عملکرد و کاهش میزان ردپای آب مصرفی و همین طور افزایش بهره‌وری آب در استان کمک می‌شود.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

استان قزوین در بخش شمال غرب ایران واقع شده است. این استان، با مساحتی حدود ۱۵۰۸۲۰ کیلومتر مربع، با استان‌های مازندران، گیلان، همدان، زنجان، مرکزی و البرز همسایه است. قزوین، تاکستان، بوبین زهرا، آبیک، البرز و آوج، از شهرستان‌های این استان هستند (شکل ۱). دشت قزوین، از نظر پیشینه تاریخی، محصولات کشاورزی و گونه‌های جانوری، اهمیت اقتصادی و تاریخی بسیار مهمی در میان دشت‌های ایران دارد. حوضه آبریز رود شور وسیع‌ترین حوضه آبریز استان است که تمامی دشت قزوین و بخش وسیعی از نواحی جنوبی کوهستانی استان را دربر می‌گیرد.

۲-۲- اقلیم منطقه و ایستگاه‌های هواشناسی مطالعاتی

با توجه به نقشه اقلیمی استان که به‌روش دمارتن تهیه شده و کاملاً از وضعیت توپوگرافی و ارتفاعات تبعیت می‌کند، بیشترین پهنه اقلیمی استان به محدوده نیمه‌خشک سرد تعلق دارد (شکل ۲).

در این نقشه، تنوع اقلیمی بارزی در ارتفاعات مناطق شمال شرق و سرشاخه‌های رودخانه شاهرود در منطقه الموت مشاهده می‌شود. اقلیم‌های خیلی مرطوب، مرطوب، نیمه‌مرطوب فراسرد و مدیترانه‌ای سرد و معتدل را می‌توان در این منطقه تشخیص داد. شهر معلم کلایه، مرکز این بخش، دارای اقلیم نیمه‌مرطوب سرد است. این شرایط اقلیمی، به سمت مناطق مرکزی الموت، متعادل‌تر می‌شود؛ به طوری که در رازمیان آب‌وهوای نیمه‌مرطوب معتدلی برقرار است. به‌علاوه تنوع اقلیمی را در مقیاس کوچک‌تری در ارتفاعات شمال غرب استان می‌توان ملاحظه کرد.

مدل AquaCrop به زمانی حدود ۱۰۰۰ ساعت کار نیاز دارد؛ درحالی‌که با کاربرد مدل‌های AquaCrop-GIS و AquaCrop-Data حدوداً ۹۹٪ صرفه‌جویی در وقت صورت می‌گیرد. (Parvaz et al. (2018 در پژوهشی الگوی کشت را با استفاده از مدل AquaCrop-GIS، در دشت دهلران استان ایلام بهینه‌سازی کردند. طبق نتایج این پژوهش، AquaCrop-GIS ابزار قدرتمندی به‌منظور تحلیل تغییرات مکانی پارامترهای مؤثر در عملکرد محصول است و الگوی کشت، در دشت، تحت تأثیر تغییرات مکانی این پارامترها یک می‌باشد.

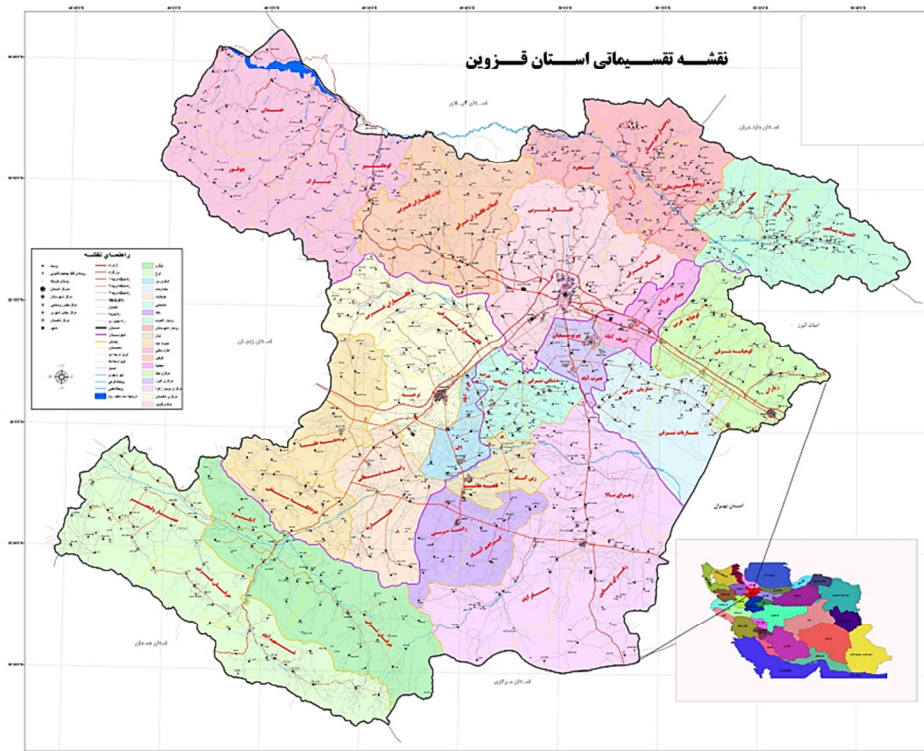
مفهوم ردپای آب را آرین هوکسترا^۱ در سال ۲۰۰۲، با معرفی UNESCO-IHE به‌منزله شاخص جایگزین استفاده از آب، مطرح کرد. این مفهوم با مفهوم آب مجازی مرتبط است. ردپای آب افراد، جامعه و یا کسب‌وکار به‌صورت حجم کل آب شیرین مصرفی برای تولید کالاها و نیز خدماتی تعریف می‌شود که فرد یا جامعه و یا کسب‌وکار استفاده کرده است. ردپای آب را می‌توان برای هر گروه از مصرف‌کنندگان (به‌عنوان مثال یک فرد، خانواده، روستا، شهر، استان، کشور و یا ملت) و یا برای تولیدکنندگان (به‌عنوان مثال یک سازمان دولتی، شرکت‌های خصوصی و یا بخش اقتصادی) محاسبه کرد. ردپای آب شاخصی چندبعدی برای استفاده از آب شیرین است که فقط به مصرف مستقیم آب از سوی مصرف‌کننده یا تولیدکننده محدود نمی‌شود بلکه، در این شاخص، استفاده غیرمستقیم از آب نیز مد نظر است.

استان قزوین، از نظر سطح و تولید ذرت، رتبه پنجم و در میزان عملکرد آن، رتبه اول را در کشور به خود اختصاص داده است (وزارت جهاد کشاورزی، ۱۳۸۸).

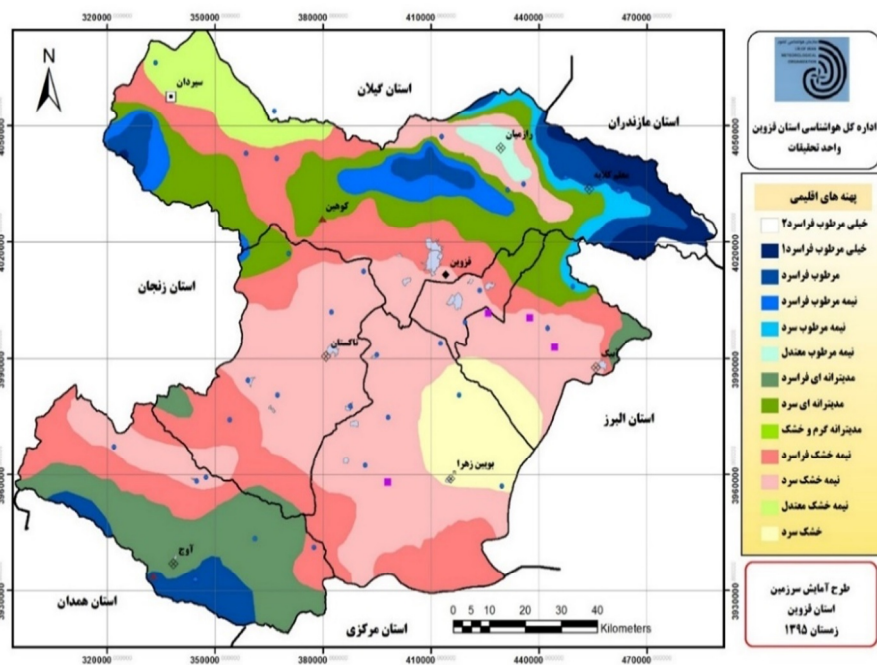
با توجه به جایگاه استان قزوین در تولید ذرت و اهمیت کشت آن در این استان، برآورد هرچه دقیق‌تر میزان عملکرد این محصول استراتژیک ضرورت بسیاری دارد؛ از این‌رو هدف پژوهش حاضر شبیه‌سازی عملکرد و ارزیابی میزان ردپای آب مصرفی محصول ذرت به‌عنوان یک محصول استراتژیک در منطقه مورد مطالعه است. بدین ترتیب، با شناخت مناطق مستعد و مناسب استان

1. Arjen Hoekstra

رستا نظری و همکاران



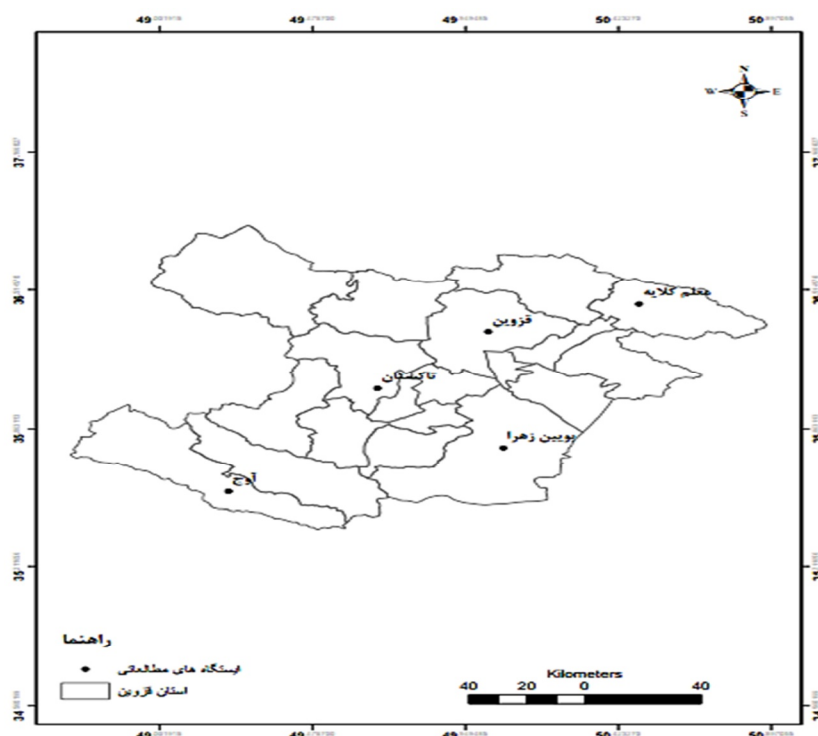
شکل ۱. موقعیت استان قزوین در کشور و نقشه تقسیمات استانی



شکل ۲. نقشه پهنه‌بندی اقلیمی استان قزوین (اداره کل هواشناسی استان قزوین، <http://qazvinmet.ir>)

خشک‌ترین منطقه استان منطقه بوبین زهرا و مناطق پیرامون آن در شرق و جنوب است که اقلیم خشک سرد دارند. در مناطق ارتفاعی آوج نیز اقلیم‌های مرطوب فراسرد و نیمه‌مرطوب فراسرد غالب است. موقعیت ایستگاه‌های سینوپتیک مطالعاتی و مشخصات آنها به ترتیب در شکل ۳ و جدول ۱ آمده است.

مناطق کم‌ارتفاع اطراف سد سفیدرود و بخش طارم سفلی دارای اقلیم نیمه‌خشک معتدل است. اقلیم نیمه‌خشک سرد بیشترین پهنه اقلیمی دشت مرکزی قزوین و شهرهای آبیک و تاکستان را دربر گرفته است. با رسیدن به مناطق مرتفع در بخش‌های شمالی این شهرها و همچنین منطقه کوهین و کاهش میانگین دما، آب‌وهوای نیمه‌خشک فراسرد مشاهده می‌شود.



شکل ۳. موقعیت ایستگاه‌های سینوپتیک استان قزوین

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های سینوپتیک مطالعاتی

ردیف	نام ایستگاه	طول جغرافیایی E دقیقه درجه	عرض جغرافیایی N دقیقه درجه	ارتفاع (متر)
۱	اداره سینوپتیک فرودگاهی قزوین	۵۰-۰۳	۳۶-۱۵	۱۲۷۹/۲
۲	اداره سینوپتیک آوج	۴۹-۱۳	۳۵-۳۴	۲۰۳۴/۹
۳	اداره سینوپتیک معلم کلایه	۵۰-۲۹	۳۶-۳۷	۱۶۲۹/۲
۴	اداره سینوپتیک تاکستان	۴۹-۴۲	۳۶-۰۳	۱۲۸۳/۴
۵	اداره سینوپتیک نیمه‌اتوماتیک بوبین زهرا	۵۰-۰۴	۳۵-۴۶	۱۲۲۵

۲-۳- معرفی مدل گیاهی

مدل AquaCrop-GIS با امکان اجرای شبیه‌سازی با تعداد بالا، به‌همراه نمایش پهنه‌بندی همه خروجی‌های مدل، از تمامی ویژگی‌ها و امکانات مدل AquaCrop بهره‌مند است؛ بنابراین، همانند مدل AquaCrop از داده‌های اقلیمی در چهار بخش تبخیر و تعرق گیاه مرجع، دمای حداقل و حداکثر، مقادیر بارش و میانگین سالیانه غلظت CO_2 استفاده می‌کند. برای محاسبه غلظت CO_2 موجود در اتمسفر، مقادیر محاسبه‌شده در مدل طی سال‌های ۱۹۰۲ تا ۲۰۹۹ از رصدخانه مائونا لائو^۱، واقع در هاوایی، به‌کار رفت. اطلاعات آماری اقلیمی در بازه زمانی شبیه‌سازی مدل، با توجه به زمان کاشت و زمان شبیه‌سازی محصولات مورد مطالعه از سال ۲۰۰۴ تا سال ۲۰۱۴ (طی یازده سال)، در نظر گرفته شد. به‌صورت کلی مدل AquaCrop-GIS در دریافت اطلاعات ورودی از پنج دسته فایل شامل فایل‌های اطلاعات گیاهی^۲، اولیه^۳، خاک^۴، سفره آب زیرزمینی^۵ و مدیریتی^۶ بهره می‌برد (Lorite et al., 2015). اطلاعات اقلیمی نیز به‌صورت فایل جداگانه، با عنوان داده‌های هواشناسی^۷، به مدل معرفی می‌شود. در انتها یک فایل مرکزی با نام فایل کنترل^۸، با تمامی اطلاعات ورودی مورد نیاز ایستگاه‌های هواشناسی، به اجرای مدل کمک می‌کند. اطلاعات گیاهی با توجه به مشخصات هر گیاه، طی یک فایل نوت‌پد، به مدل معرفی می‌شود. اطلاعات ورودی خاک نیز، با توجه به مشخصات لایه‌ها و ویژگی‌های خاک استان، مشخص و به مدل وارد می‌شود. در تحقیق حاضر، بافت خاک غالب کل منطقه مورد مطالعه به‌طور کلی بافت لوم فرض شد و سایر پارامترهای ورودی خاک مانند ضخامت، ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دائم درمورد محصول ذرت به ترتیب ۰/۲ متر، ۲۴ و ۱۲٪ در نظر گرفته شد (رمضانی اعتدالی و همکاران، ۱۳۹۵). روش آبیاری نیز برای کسب پتانسیل عملکرد، به‌صورت پیش‌فرض، روش آبیاری قطره‌ای در نظر گرفته شد؛ البته در ادامه، نتایج محاسبات با نتایج دو روش آبیاری

شیاری و بارانی نیز مقایسه شد. پارامترهای گیاهی واسنجی‌شده مدل در جدول ۲ آمده است (رمضانی اعتدالی و همکاران، ۱۳۹۵).

جدول ۲. پارامترهای گیاهی واسنجی‌شده مدل برای محصول ذرت

مقدار	نام پارامتر
۸	دمای پایه (درجه سانتی‌گراد)
۳۰	دمای ماکزیمم (درجه سانتی‌گراد)
۱/۰۵	ضریب گیاهی (مرحله میانی رشد)
۳۳/۷	بهره‌وری آب (گرم بر مترمربع)
۰/۸۵	ماکزیمم عمق مؤثر ریشه (متر)
۴۸	شاخص برداشت مرجع (درصد)

۲-۴- محاسبه ردپای آب کل ذرت

در این مطالعه، حجم ردپای آب سبز، آبی، خاکستری در تولید محصول ذرت با به‌کارگیری چارچوب هوکسترا و چاپاگین^۹ (۲۰۰۸) و هوکسترا و همکاران (۲۰۰۹)، با اعمال تغییراتی، برآورد می‌شود. تبخیر و تعرق واقعی محصول و نیاز آبیاری در شرایط غیراستاندارد (ET_c)، با احتساب ضریب گیاهی (K_c)، براساس فرضیات آلن^{۱۰} و همکاران (۱۹۹۸) برآورد می‌شود. ابتدا نیاز آبیاری و بارندگی مؤثر از مدل گیاهی مورد مطالعه برآورد شد. سپس نیاز خالص آبیاری (NIR) با استفاده از راندمان آبیاری (IE) در سطح منطقه به‌دست آمد. پس از آن، مجموع بارندگی مؤثر (P_{eff}) در طول دوره واقعی

1. Mauna Loa
2. Crops
3. Initials
4. Soils
5. Groundwater
6. Management
7. Weather Data
8. Control File
9. Chapagain
10. Allen

مصرف کود (کیلوگرم بر هکتار)، C_{max} غلظت بحرانی کود مصرفی (کیلوگرم بر مترمکعب)، C_{Nat} غلظت واقعی کود مصرفی در منابع آب دریافت کننده (کیلوگرم بر مترمکعب) و Y عملکرد محصول (تن بر هکتار) است. در نهایت، با برآورد اجزای رد پای آب می توان مقدار رد پای آب کل را بدین صورت به دست آورد:

$$TWF = \sum_{i=1}^n WF_{Green} + \sum_{i=1}^n WF_{Blue} + \sum_{i=1}^n WF_{Gray} \quad \text{رابطه (۹)}$$

که TWF رد پای آب کل (مترمکعب بر تن) و n تعداد ایستگاه های مطالعاتی کشت محصول است.

۳- بحث و نتیجه گیری

در فایل مرکزی مدل AquaCrop-GIS، ستونی از داده ها به وارد کردن زمان شبیه سازی و زمان کاشت هر گیاه اختصاص دارد. بدین منظور، تاریخ کشت و شبیه سازی برای برآورد پتانسیل عملکرد محصول با مدل بررسی شد. با شبیه سازی تاریخ کشت، پتانسیل عملکرد برای کشت محصول ذرت روز سیزدهم اردیبهشت ماه به دست آمد. نتایج عملکرد محصول ذرت شبیه سازی شده با مدل AquaCrop-GIS در شکل ۴ آمده است.

با توجه به نتایج عملکرد در شکل ۴، مشخص است که میزان عملکرد در مورد محصول ذرت، طی تمامی سال ها، روند معینی داشته است؛ به گونه ای که متوسط عملکرد ذرت در ایستگاه آوج همواره بیشترین و ایستگاه تاکستان کمترین مقادیر را داراست و این موضوع با بررسی داده های اندازه گیری شده استانی نیز هم خوانی دارد (شکل ۵). متوسط مقادیر عملکرد ذرت، طی سال ۲۰۰۴، برای تمامی ایستگاه ها ضعیف بوده است و در سال ۲۰۰۷، برای تمامی ایستگاه ها به میزان بالایی می رسد.

1. WF_{Green}
2. WF_{Blue}

رشد ذرت، به صورت اختلاف بین مجموع تبخیر و تعرق گیاه (ET_c) و مجموع نیاز خالص آبیاری، طبق روابط زیر برآورد شد:

$$ET_c = K_c \times ET_0 \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$NIR = ET_c - P_{eff} \Rightarrow P_{eff} = ET_c - NIR \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$GIR = \frac{NIR}{IE} \quad \text{رابطه (۳)}$$

در نهایت، حجم مصرف آب (CWU) آبی و سبز محصول ذرت، به ترتیب روابط زیر، به دست آمد:

$$CWU_{Blue} = \max \{0, ET_c - P_{eff}\} = NIR = 10 \times IE \times GIR \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$CWU_{Green} = \min \{ET_c, P_{eff}\} = 10 \times P_{eff} = 10 \times (ET_c - NIR) \quad \text{رابطه (۵)}$$

در این روابط، عدد ۱۰ فاکتور تبدیل واحد از میلی متر به مترمکعب بر هکتار است. در نهایت، رد پای آبی و سبز محصول ذرت به ترتیب به صورت زیر محاسبه می شود:

$$WF_{Green} = \frac{CWU_{Green}}{Y} \quad \text{رابطه (۶)}$$

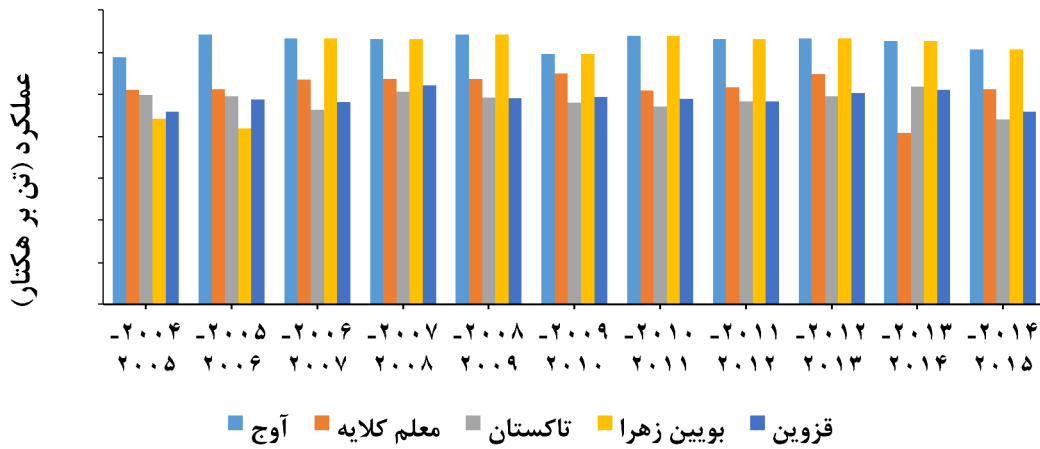
$$WF_{Blue} = \frac{CWU_{Blue}}{Y} \quad \text{رابطه (۷)}$$

رد پای آب سبز^۱ و آب آبی^۲، بر حسب مترمکعب بر تن، از تقسیم آب مصرفی سبز و آبی بر مقدار محصول تولیدی (تن بر هکتار) محاسبه می شود.

رد پای آب خاکستری هر محصول، به منزله حجم آب مورد نیاز برای رقیق کردن آلاینده ها به حدی که کیفیت آب مورد توافق استانداردهای کیفیت آب باقی مانده باشد، محاسبه می شود و رابطه برآورد آن به صورت زیر است:

$$WF_{Gray} = \frac{WU_{Gray}}{Y} = \frac{\left(\frac{\alpha \times AR}{C_{Max} - C_{Nat}} \right)}{Y} \quad \text{رابطه (۸)}$$

که در آن، α درصد تلفات کود مصرفی، AR میزان

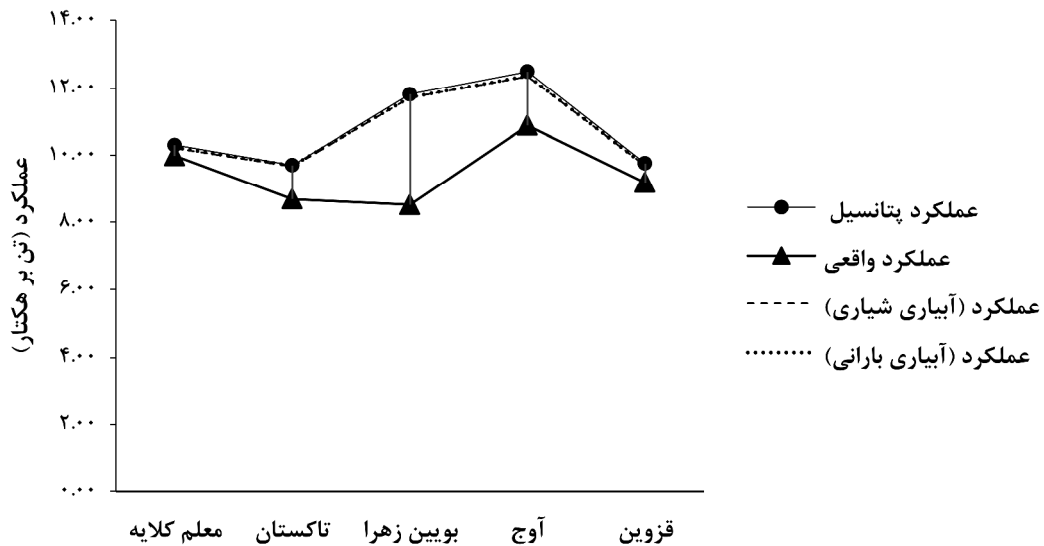


شکل ۴. عملکرد ذرت ایستگاه‌های مطالعاتی (تن بر هکتار)

۳-۱- نمودار عملکرد واقعی و پتانسیل

استفاده شد. با توجه به شکل ۵، شکاف عملکرد میان داده‌های عملکرد پتانسیل با داده‌های عملکرد واقعی اندازه‌گیری شده هر ایستگاه نیز نمایان شد که اختلاف این شکاف در مورد دو ایستگاه معلم کلایه و قزوین اندک و در مورد ایستگاه بویین زهرا زیاد است.

در شکل ۵، نمودار عملکرد واقعی و پتانسیل نشان داده شده است. از آن جاکه عملکرد به دست آمده با روش آبیاری قطره‌ای دارای بالاترین مقادیر عملکرد در قیاس با دو روش دیگر (آبیاری شیاری و بارانی) بود، از مقادیر این عملکرد در جایگاه عملکرد پتانسیل در تحقیق



شکل ۵. نمودار عملکرد واقعی و پتانسیل و شکاف عملکرد

۳-۲- پهنه‌بندی پارامترهای کلیدی محصول

پهنه‌بندی متوسط تبخیر و تعرق مرجع، عملکرد و شاخص برداشت^۱ محصول با مدل AquaCrop-GIS، در طول دوره مطالعاتی یازده ساله، به ترتیب در شکل‌های ۶ تا ۹ آمده است. در شکل ۶، متوسط مقادیر تبخیر و تعرق مرجع محصول در بازه ۸۹۲ تا ۲۰۰۲ در سطح استان پهنه‌بندی شده است. کمترین میزان تبخیر و تعرق مرجع مربوط به دو ایستگاه قزوین (۹۹۱ میلی‌متر) و معلم کلایه (۱۰۶۹ میلی‌متر) و بیشترین آن متعلق به ایستگاه‌های آوج (۱۸۲۰ میلی‌متر) و بوبین زهرا (۱۷۷۴ میلی‌متر) است (شکل ۶). شکل ۷ متوسط مقادیر عملکرد محصول در بازه ۹ تا ۱۳ تن بر هکتار را در سطح استان نشان می‌دهد. طبق این شکل ایستگاه‌های آوج، بوبین زهرا و معلم کلایه به ترتیب با ۱۲/۵، ۱۱/۸ و ۱۰/۳ تن بر هکتار بیشترین میزان عملکرد و دو ایستگاه قزوین و تاکستان، به ترتیب با ۹/۸ و ۹/۷ تن بر هکتار، کمترین میزان عملکرد محصول را داشتند. در شکل ۸ نیز، شاخص برداشت در سطح استان در بازه ۳۴ تا ۵۰٪ نمایش داده شده است.

شاخص برداشت همان نسبت محصول دانه به وزن ماده خشک محصول است. دستیابی به عملکرد بالا از طریق انتخاب رقمی با شاخص برداشت بالاتر هدف اصلی اصلاح نژاد است (Gutam, 2011). مقادیر شاخص برداشت در ایستگاه‌های آوج و بوبین زهرا، به ترتیب با ۴۴/۵ و ۴۳/۹٪، بیشترین و در ایستگاه‌های قزوین و معلم کلایه، با ۴۰ و ۳۷/۵٪، کمترین مقدار را داشت. شکل ۹ پهنه‌بندی بهره‌وری آب محصول را در سطح استان، از بازه ۱ تا ۱/۶ کیلوگرم بر مترمکعب، نشان می‌دهد. میزان بهره‌وری آب محصول در ایستگاه‌های قزوین و معلم کلایه، به ترتیب با ۱/۴۳ و ۱/۴۰ کیلوگرم بر مترمکعب، بیشترین مقدار و در ایستگاه‌های تاکستان و بوبین زهرا و آوج، به ترتیب با ۱/۱۱ و ۱/۱۲ و ۱/۱۶ کیلوگرم بر مترمکعب، کمترین مقدار را داشته است. این نتیجه با بررسی نتایج میزان تبخیر و تعرق مرجع به دست آمده در ایستگاه‌ها مطابقت دارد؛ به این صورت که میزان تبخیر و تعرق محاسباتی کمتر در برآورد میزان بهره‌وری آب محصول بیشتر تأثیر بسزایی دارد.



شکل ۶. پهنه‌بندی تبخیر و تعرق مرجع محصول (میلی‌متر)

1. Harvest Index (HI)



شکل ۷. پهنه‌بندی عملکرد محصول (تن بر هکتار)



شکل ۸. پهنه‌بندی شاخص برداشت محصول (درصد)

۳-۳- برآورد اجزای ردپای آب و ردپای آب کل

مقادیر اجزای ردپای آب و میزان عملکرد و کود مصرفی، به تفکیک هر ایستگاه، در جدول ۳ و نمودار اجزای ردپای آب برآورد شده هر ایستگاه در شکل ۱۰ آمده است. با توجه به نمودار، بیشترین میزان ردپای آب سبز، آبی و خاکستری به ترتیب متعلق به ایستگاه‌های آوج، بویین زهرا و تاکستان است. کمترین مقادیر ردپای آب سبز

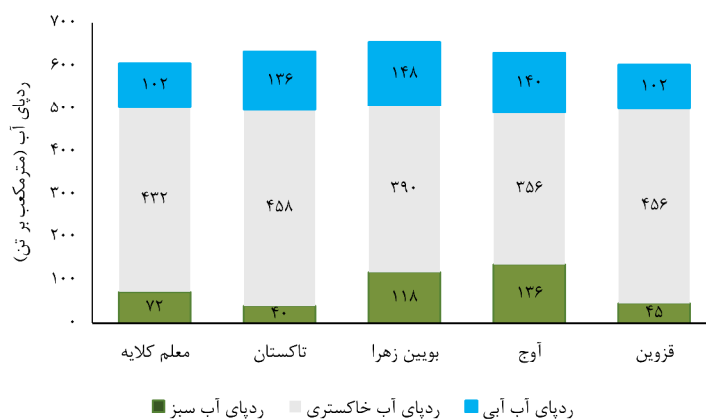
و خاکستری به ترتیب در ایستگاه تاکستان و آوج برای ردپای آب آبی، در دو ایستگاه قزوین و معلم کلايه مشاهده می‌شود. در مجموع، بیشترین میزان ردپای آب کل متعلق به ایستگاه بویین زهرا، با ۶۵۶ مترمکعب بر تن و کمترین میزان آن مربوط به دو ایستگاه قزوین و ایستگاه معلم کلايه، به ترتیب با ۶۰۳ و ۶۰۷ مترمکعب بر تن است.



شکل ۹. پهنه‌بندی بهره‌وری آب محصول (کیلوگرم بر مترمکعب)

جدول ۳. مقادیر اجزای ردپای آب، عملکرد و کود مصرفی به تفکیک ایستگاه‌های مطالعاتی

ایستگاه	عملکرد (کیلوگرم بر هکتار)	میزان مصرف کود نیتروژن (کیلوگرم بر هکتار)			ردپای آب (مترمکعب بر تن)	
		سبز	آبی	خاکستری	مجموع	
قزوین	۹۷۶۷	۴۵	۱۰۲	۴۵۶	۶۰۳	
اوج	۱۲۴۹۵	۱۳۶	۱۴۰	۳۵۶	۶۳۱	
معلم کلایه	۱۰۳۱۳	۷۲	۱۰۲	۴۳۲	۶۰۷	
تاکستان	۹۷۰۷	۴۰	۱۳۶	۴۵۸	۶۳۴	
بویین زهرا	۱۱۸۲۴	۱۱۸	۱۴۸	۳۹۰	۶۵۶	
متوسط	۱۰۸۲۱	۸۲	۱۲۶	۴۱۸	۶۲۶	
ضریب تغییرات (درصد)	۱۲	۵۲	۱۷	۱۱	۳	
مینیمم	۹۷۰۷	۴۰	۱۰۲	۳۵۶	۶۰۳	
ماکزیمم	۱۲۴۹۵	۱۳۶	۱۴۸	۴۵۸	۶۵۶	

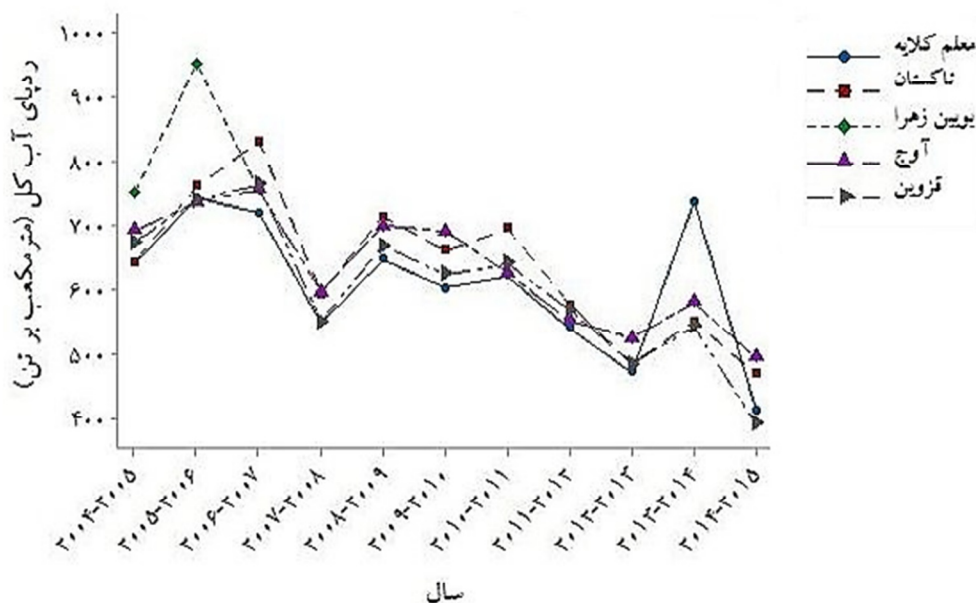


شکل ۱۰. نمودار اجزای ردپای آب (مترمکعب بر تن)

۳-۴- ارتباط میان اجزای ردپای آب و ردپای آب کل با عملکرد محصول

روابط میان اجزای ردپای آب و ردپای آب کل با عملکرد محصول، برای هر ایستگاه، با استفاده از معادلات رگرسیونی به همراه مقادیر ضریب تعیین و سطح معنی داری، با نرم افزار آماری مینی تب نسخه ۱۸، برآورد شد (جدول ۴). طبق نتایج، معادلات رگرسیونی میان ردپای آب آبی با عملکرد به نسبت دیگر اجزای ردپای آب برای تمامی ایستگاه‌ها، میزان ضریب تعیین و سطح معنی داری بیشتری (سطح ۰/۵) دارد. علامت ضریب عملکرد در معادلات منفی است که رابطه غیرمستقیم آن را با مقدار ردپای آب آبی بیان می‌کند. معادلات رابطه میان ردپای آب سبز با عملکرد در تمامی ایستگاه‌ها، به جز دو ایستگاه قزوین و تاکستان، میزان ضریب تعیین و سطح معنی داری بالایی دارد. علامت ضریب عملکرد، به غیر از دو ایستگاه آوج و معلم کلایه که منفی است، در سایر ایستگاه‌ها مثبت است؛ به این معنی که افزایش عملکرد با افزایش میزان ردپای آب سبز، که همان رطوبت ذخیره شده در خاک محسوب می‌شود، رابطه مستقیم دارد. معادلات روابط

در ادامه، نمودار سری زمانی ردپای آب کل برای تمامی ایستگاه‌ها در شکل ۱۱ آمده است. برطبق نتایج نمودار، روند ردپای آب کل در بازه زمانی سال‌های ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۵، برای تمامی ایستگاه‌ها تقریباً مشابه بوده است؛ حال آنکه، در سال‌های اولیه، روند نمود افزایشی و در سال‌های آخر مطالعه، این روند کاهش یافته است. بیشترین میزان ردپای آب کل، در سال زراعی ۲۰۰۶-۲۰۰۵، متعلق به ایستگاه بویین زهرا و در سال ۲۰۱۴-۲۰۱۳، مختص ایستگاه معلم کلایه بوده است. این نتیجه را می‌توان با ارزیابی نتایج عملکرد محاسباتی مدل در شکل ۴ بررسی کرد؛ بدین صورت که در سال‌های مذکور، مقادیر عملکرد این ایستگاه‌ها نقش مهمی در میزان ردپای آب کل محصول داشته و افزایش ردپای آب کل با کاهش میزان عملکرد محصول همراه بوده است. علاوه بر این افزایش میزان ردپای آب کل، با توجه به مقادیر متوسط اجزای ردپای آب، عملکرد و کود مصرفی (جدول ۳) و همین‌طور با توجه به مقادیر پهنه بندی تبخیر و تعرق (شکل ۳)، می‌تواند حاکی از بالابودن میزان کود مصرفی و نیز مقدار آب آبیاری مصرفی، به ازای میزان تبخیر و تعرق بیشتر باشد.



شکل ۱۱. سری زمانی ردپای آب کل (مترمکعب بر تن)

خاکستری ($R^2 = 0/56$) و در نهایت، کاهش میزان ردپای آب کل ($R^2 = 0/53$) منجر می‌شود. این نتیجه‌گیری با نتایج پژوهش نظری^۱ و همکاران (۲۰۲۰)، که اثر تغییرات اقلیم در اجزای ردپای آب محصولات گندم و جو را در استان قزوین مطالعه کرده‌اند، مطابقت دارد؛ بدین صورت که در مطالعه این پژوهشگران کاهش میزان عملکرد در ایستگاه بوبین زهرا، تحت تأثیر متغیرهای اقلیمی، به افزایش میزان ردپای آب کل محصول انجامید.

ردپای آب خاکستری و همین‌طور ردپای آب کل با عملکرد محصول در تمامی ایستگاه‌ها، به غیر از ایستگاه بوبین زهرا، میزان ضریب تعیین و سطح معنی‌داری پایینی دارد؛ به گونه‌ای که این روابط، به لحاظ آماری، بسیار ضعیف برآورد شده‌اند. در کل، در ایستگاه بوبین زهرا روابط میان اجزای ردپای آب و ردپای آب کل، در قیاس با سایر ایستگاه‌ها، ضریب تعیین و سطح معنی‌داری بسیار بالایی دارد و افزایش عملکرد محصول در این منطقه به افزایش ردپای آب سبز ($R^2 = 0/88$)، کاهش ردپای آب آبی ($R^2 = 0/79$)، کاهش ردپای آب

جدول ۴. معادلات رگرسیونی میان ردپای آب کل و عملکرد محصول ذرت

ایستگاه	معادله رگرسیونی	ضریب تعیین (R^2)	سطح معنی‌داری (P-value)
قزوین	$WF_{green} = -100/4 + 14/93 \text{ Yield}$	0/04	0/581
	$WF_{blue} = 269/7 - 17/15 \text{ Yield}$	0/43	0/029
	$WF_{gray} = 579 - 12/6 \text{ Yield}$	0/002	0/910
	$TWF = 748/3 - 14/84 \text{ Yield}$	0/003	0/881
آوج	$WF_{green} = 361/4 - 18/08 \text{ Yield}$	0/58	0/007
	$WF_{blue} = 454/7 - 25/21 \text{ Yield}$	0/51	0/014
	$WF_{gray} = -301 + 52/55 \text{ Yield}$	0/04	0/536
	$TWF = 515 + 9/26 \text{ Yield}$	0/002	0/911
معلم کلايه	$WF_{green} = 353/4 - 27/30 \text{ Yield}$	0/39	0/041
	$WF_{blue} = 208/1 - 10/26 \text{ Yield}$	0/43	0/029
	$WF_{gray} = 635/0 - 19/64 \text{ Yield}$	0/02	0/695
	$TWF = 1196 - 57/20 \text{ Yield}$	0/17	0/205
تاکستان	$WF_{green} = -81/2 + 12/48 \text{ Yield}$	0/05	0/503
	$WF_{blue} = 473/0 - 34/75 \text{ Yield}$	0/77	0/000
	$WF_{gray} = 342/7 + 11/89 \text{ Yield}$	0/002	0/905
	$TWF = 734/5 - 10/38 \text{ Yield}$	0/002	0/909
بوبین زهرا	$WF_{green} = -136/9 + 21/54 \text{ Yield}$	0/88	0/000
	$WF_{blue} = 292/2 - 12/22 \text{ Yield}$	0/79	0/000
	$WF_{gray} = 1203 - 68/79 \text{ Yield}$	0/56	0/008
	$TWF = 1359 - 59/47 \text{ Yield}$	0/53	0/011
متوسط استان (۱۱ سال)	$WF_{green} = -21/1 + 9/54 \text{ Yield}$	0/05	0/509
	$WF_{blue} = 305/2 - 16/61 \text{ Yield}$	0/40	0/038
	$WF_{gray} = 1093 - 62/34 \text{ Yield}$	0/05	0/501
	$TWF = 1377 - 69/41 \text{ Yield}$	0/08	0/397

* WF_{green} و WF_{blue} و WF_{gray} به ترتیب بیانگر ردپای آب سبز، آبی و خاکستری و نماد TWF و Yield به ترتیب بیانگر ردپای آب کل و عملکرد محصول است.

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. & Smith, M., 1998, **Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements**, FAO Drainage and Irrigation Paper, 56, Food and Agriculture Organization, Rome.
- Andarzian, B., Bannayan, M., Steduto, P., Mazraeh, H., Barati, M.E., Barati, M.A. & Rahnama, A., 2011, **Validation and Testing of the AquaCrop Model under Full and Deficit Irrigated Wheat Production in Iran**, *Agric. Water Manag.*, 100(1), PP. 1-8.
- Babazadeh, H., & Sarai Tabrizi, M. 2012. **Assessment Of Aqua Crop Model Under Soybean Deficit Irrigation Management Conditions**. *Journal of Water and Soil (Agricultural Sciences and Technology)*, 26(2), 329-339.
- Farahani, H.J., Izzi, G. & Oweis, T.Y., 2009, **Parameterization and Evaluation of the AquaCrop Model for Full and Deficit Irrigated Cotton**, *Agron. Agronomy Journal*, 101(3), PP. 469-476.
- García-Vilaa, M. & Fereres, E., 2012, **Combining the Simulation Crop Model AquaCrop with an Economic Model for the Optimization of Irrigation Management at Farm Level**, *European Journal of Agronomy*, 36, PP. 21- 31.
- Geerts, S., Raes, D., Garcia, M., Miranda, R., Cusicanqui, J.A., Taboada, C., Mendoza, J., Huanca, R., Mamani, A., Condori, O., Mamani, J., Morales, B., Osco, V., Steduto, P., 2009. **Simulating Yield Response to Water of Quinoa (*Chenopodium Quinoa Willd.*) with FAO-AquaCrop**, *Agronomy Journal*, 101, PP. 499-508.
- Gutam, S., 2011, **Dry Matter Partitioning, Grain Filling and Grain Yield in Wheat Genotypes**, *Communications in Biometry and Crop Science*, 6(2), pp. 48-63.
- Heng, L.K., Hsiao, T.C., Evett, S., Howell, T. & Steduto, P., 2009, **Validating the FAO AquaCrop Model for Irrigated and Water Deficient Field Maize**, *American Society of Agronomy*, 101, PP. 488-498.

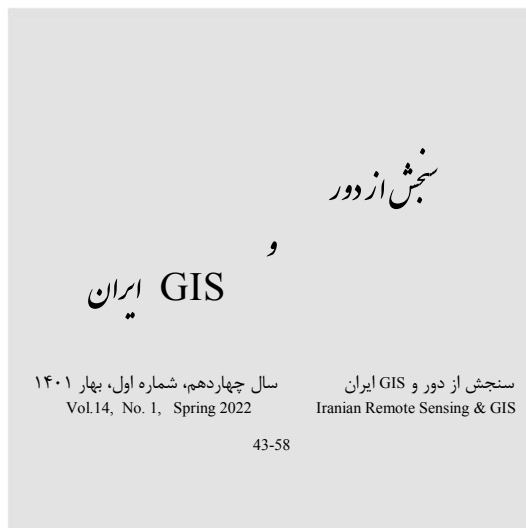
۴- نتیجه گیری

در پژوهش حاضر، با برآورد و شبیه سازی میزان عملکرد محصول استراتژیک ذرت در استان قزوین، روابط این پارامتر با اجزای ردپای آب ارزیابی شد تا با شناخت و تعیین مناطق مستعد استان از نظر کشت این محصول، به افزایش عملکرد هم‌زمان با کاهش ردپای آب مصرفی محصول کمک شود و در مجموع، میزان بهره‌وری آب در سطح استان افزایش یابد. به‌طور کلی، برطبق نتایج پژوهش و شبیه‌سازی‌های صورت‌گرفته با استفاده از مدل گیاهی در بازه زمانی یازده‌ساله (۲۰۰۴-۲۰۱۴)، مقادیر تبخیر و تعرق مرجع محصول در ایستگاه‌های شمالی استان (قزوین و معلم‌کلایه) کمتر از ایستگاه‌های مرکزی و جنوبی (تاکستان، بویین‌زهرا و آوج) بوده است؛ همین امر موجب افزایش میزان بهره‌وری آب محصول در این ایستگاه‌ها شد و در ایستگاه‌های آوج و بویین‌زهرا، به‌دلیل افزایش هم‌زمان میزان عملکرد و تبخیر و تعرق مرجع محصول، بهره‌وری آب محصول کاهش یافت. در ادامه، با بررسی معادلات رگرسیونی میان اجزای ردپای آب و ردپای آب کل با عملکرد محصول در تمامی ایستگاه‌ها مشخص شد که ردپای آب آبی، با سطح معنی‌داری بالا، رابطه‌ای غیرمستقیم با عملکرد دارد. رابطه ردپای آب سبز، به‌غیر از دو ایستگاه (آوج و معلم‌کلایه)، در مجموع مستقیم بود. به‌طور کلی تمامی روابط مورد نظر برای ایستگاه بویین‌زهرا سطح معنی‌داری بالاتری داشتند. از این دستاورد می‌توان جهت راهکاری به‌منظور مقابله با بحران کم‌آبی در این منطقه بهره برد و با مدیریت بهتر عملکرد و نیز میزان آب مصرفی، مقدار اجزای ردپای آب و در نهایت، میزان ردپای آب کل را کنترل کرد تا میزان بهره‌وری آب در این منطقه نیز در استان افزایش یابد.

۵- منابع

- Alizadeh, H., Nazari, B., Parsinezhad, M., Ramazani Etedali, H., Janbaz, H., 2010. **Evaluation of AquaCrop Model on Wheat Deficit Irrigation in Karaj Area**. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 4 (2), pp.273-283.

- Hoekstra, A.Y. & Chapagain, A.K., 2008, **Globalization of Water: Sharing the Planet's Freshwater Resources**, Blackwell Publishing, Oxford, UK.
- Hoekstra, A.Y. & Hung, P.Q., 2002, **Virtual water trade: A Quantification of Virtual Water Flows between Nations in Relation to International Crop Trade**, Value of Water Research, Report Series No. 11, UNESCO-IHE. Delft, the Netherlands.
- Hoekstra, A.Y., Chapagain, A.K., Aldaya, M.M. & Mekonnen, M.M., 2009, **Water Footprint Manual: State of the Art 2009**, Water Footprint Network, Enschede, the Netherlands.
- Hsiao, T.C., Heng, L.K., Steduto, P., Rojas-Lara, B., Raes, D. & Fereres, E., 2009, **AquaCrop-the FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water, III: Parameterization and Testing for Maize**, Agronomy Journal, 101, PP. 448-459.
- Jiang, Y., Xu, X., Huang, Q.Z., Huo, Z.L. & Huang, G.H., 2015, **Assessment of Irrigation Performance and Water Productivity in Irrigated Areas of the Middle Heihe River Basin Using a Distributed Agro-Hydrological Model**, Agr. Water Manage, 147, PP. 67-81.
- Langhorn, C., 2015, **Simulation of climate change impacts on selected crop yields in southern Alberta**, Doctoral dissertation, Lethbridge, Alta: University of Lethbridge, Dept. of Geography.
- Lorite, I.J., García-Vila, M., Santos, C., Ruiz-Ramos, M. & Fereres, E., 2013, **AquaData and AquaCrop-GIS: Two Computer Utilities for Temporal and Spatial Simulations of Water -Limited Yield with AquaCrop**, Computers and Electronics in Agriculture, 96: PP. 227-237.
- Nazari, R., Ramezani Etedali, H., Nazari, B. & Collins, B., 2020, **The Impact of Climate Variability on Water Footprint Components of Rainfed Wheat and Barley in the Qazvin Province of Iran**, Irrig. and Drain., 69: PP. 826-843. <https://doi.org/10.1002/ird.2487>.
- Parvaz, G., Rostaminy, M., Alizadeh, H., 2018. **Optimization of the Cropping Pattern Using AquaCrop-GIS (Case Study: Dehloran Plain, Ilam Province)**. IRANIAN JOURNAL of SOIL and WATER RESEARCH, 49(4), pp.865-877.
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C. & Fereres, E., 2009, **AquaCrop-the FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: Reference Manual Annexes**.
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C. & Fereres, E., 2013, **Refernce Manual: AquaCrop Plug-in Program Version (4.0)**, FAO, Land and Water Division, Rome, Italy.
- Ramezani Etedali, H., Liaghat, A., Parsinejad, M., Tavakkoli, A., 2016. **AquaCrop Model Calibration and Evaluation in Irrigation Management for Main Grains**. Iranian Journal of Irrigation and Drainage, 10 (3), pp.389-397.
- Sadras, V.O., 2004, **Yield and Water-Use Efficiency of Water-and Nitrogen-Stressed Wheat Crops Increase with Degree of co-Limitation**, European Journal of Agronomy, 21(4), PP. 455-464.
- Salemi, H.R., Soom, M.A.M., Lee, T.S., Mousavi, S.F., Ganji, A. & Yusoff, M.K., 2011, **Application of AquaCrop Model in Deficit Irrigation Management of Winter Wheat in Arid Region**, African J. Agric. Res., 610, PP. 2204-2215.
- Tavakoli, A.R., Oweis, T., Ashrafi, S., Asadi, H., Siadat, H. & Liaghat, A., 2010, **Improving Rainwater Productivity with Supplemental Irrigation in Upper Karkheh River Basin of Iran**, International Centre for Agricultural Research in the Dry Areas (ICARDA), Aleppo, Syria.



Evaluation of Maize yield and Water Footprint Variability by AquaCrop-GIS Model

Nazari R.¹, Ramezani Etedali H.^{2*}, Daneshkar Arasteh P.³

1. Ph.D. Candidate of Irrigation and Drainage Engineering, Dep. of Water Sciences and Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin
2. Associate Prof., Dep. of Water Sciences and Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin
3. Associate Prof., Dep. of Water Sciences and Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin,

Abstract

Estimation of the production potential of a crop is a function of climatic conditions, crop genetic potentials and various other environmental and managerial factors. Assessing the ability of regions to realize the genetic potential of crops is one of the important points of macro-planning in agriculture. Considering the position of Qazvin province in the production of Maize and the importance of cultivating this crop, estimating the yield of this strategic product as accurately as possible is very necessary. In this regard, by studying an 11-year statistical period, Maize yield was estimated with the new crop model AquaCrop-GIS. The zoning of key product indicators was simulated through the model in the province. By examining the results of these parameters, it finds that Qazvin and Moallem Kelayeh study stations with higher reference evapotranspiration rates have higher water productivity. Then, with the help of the computational yield, components of water footprints, and total water footprint of the crop was estimated within the study stations. By examining the regression equations in each station, it was found that the relationship between blue water footprint and crop yield compared to other water footprint components for all stations has a higher coefficient of determination ($R^2 = 0.43$, $R^2 = 0.51$, $R^2 = 0.43$, $R^2 = 0.77$ and $R^2 = 0.79$ for Qazvin, Avaj, Moallem Kelayeh, Takestan and Buin Zahra stations, respectively) and level of significance. In general, the coefficient of determination of these relationships in Buin Zahra station with $R^2 = 0.88$, $R^2 = 0.79$, $R^2 = 0.56$ and, $R^2 = 0.53$, respectively, for green, blue, gray, and total water footprints compared to other stations were rated higher. This reduction in yield at the station had a significant effect on increasing the total water footprint of the crop.

Keywords: Production potential, Water productivity, Study stations, Regression equations, Significance level, AquaCrop-GIS.

* Correspondence Address: Department of Water Sciences and Engineering, Faculty of Agriculture & Natural Resources Imam Khomeini Int. University, Qazvin. Tel: +98(28)33901278- 09123534254
Email: ramezani@eng.ikiu.ac.ir