

شبیه‌سازی عملکرد و تعیین تاریخ کاشت گندم دیم و آبی بر مبنای عوامل اقلیمی و محیطی در استان کرمانشاه با مدل آکواکراپ

فیروز مجرد^۱

بهمن فرهادی^۲

ژیلا الفتی^۳

چکیده

گندم یکی از مهم‌ترین محصولات استراتژیک کشاورزی است که در تأمین غذای ساکنین کشورمان اهمیت زیادی دارد. هدف از این تحقیق، ارزیابی کارایی مدل شبیه‌سازی گیاهی آکواکراپ در تعیین میزان عملکرد و تاریخ شروع کاشت گندم دیم و آبی در استان کرمانشاه است. به این منظور عملکرد گندم تحت شرایط کاشت دیم و آبی با استفاده از داده‌های اقلیمی روزانه (شامل بارش، دماهای حداقل و حداکثر، تبخیر و تعرق پتانسیل، سرعت باد و ساعات آفتابی) و همچنین سایر اطلاعات محیطی در پنج ایستگاه سینوپتیک استان در یک دوره ۲۲ ساله (۲۰۱۳-۱۹۹۲) توسط مدل آکواکراپ شبیه‌سازی شد. از بین تاریخ‌های ورودی به مدل، تاریخی که بیشترین عملکرد محصول را داشت، به عنوان بهترین تاریخ کاشت برای مناطق مورد نظر انتخاب گردید. نتایج تحقیق نشان داد، از نظر عملکرد، دشت روانسر برای کاشت گندم دیم و دشت سرپل‌ذهاب برای کاشت گندم آبی مستعدتر است. عملکرد گندم نسبت به تغییر تاریخ کاشت حساسیت زیادی نشان داد. تاریخ‌های کاشت گندم دیم در ایستگاه‌های منطقه بین ۱۸

۱- دانشیار گروه جغرافیا، دانشگاه رازی، کرمانشاه (نویسنده مسئول)

Email: f_mojarrad@yahoo.com

۲- استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه رازی، کرمانشاه

۳- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد اقلیم‌شناسی کاربردی، گروه جغرافیا، دانشگاه رازی، کرمانشاه

مهر تا ۲۹ آبان، و گندم آبی بین ۱۸ مهر تا ۱۹ آبان پیشنهاد گردید که با تاریخ‌های واقعی کاشت در منطقه مطابقت خوبی دارد. به‌طور کلی، مدل آکواکراپ عملکرد و طول دوره کاشت گندم دیم و آبی را در شرایط آب‌وهوایی استان کرمانشاه به‌خوبی شبیه‌سازی کرد و از اینرو می‌تواند به‌عنوان یک ابزار مهم برای بررسی پتانسیل عملکرد گندم در این استان و استان‌های با اقلیم مشابه مورد استفاده قرار گیرد.

واژگان کلیدی: عملکرد گندم، تاریخ کاشت، عناصر اقلیمی، استان کرمانشاه، مدل آکواکراپ

مقدمه

با وجود پیشرفت‌های حاصله در زمینه اصلاح نباتات، کنترل آفات، بیماری‌ها و علف‌های هرز و تغذیه گیاه با انواع کودها، هنوز اقلیم نقش تعیین‌کننده‌ای در تعیین نوع پوشش گیاهی، کمیت و کیفیت تولیدات کشاورزی ایفا می‌نماید. آگاهی از چگونگی تناسب و انطباق فعالیت‌های کشاورزی هر منطقه با شرایط آب‌وهوایی، لازمه هرگونه فعالیت کشاورزی است. اقلیم کشاورزی به‌عنوان مجموعه شرایط اقلیمی که امکان کاشت اقتصادی گونه‌های گیاهی را فراهم می‌کند (عبدالهی و همکاران، ۱۳۹۲: ۱)، نقش مهمی در برنامه‌ریزی کاشت محصول بازی می‌کند. گندم با تولید جهانی سالیانه ۶۰۷ میلیون تن، بعد از ذرت و برنج رتبه سوم تولید را به خود اختصاص داده است. با توجه به اینکه ایران رتبه هفتم جهان را از نظر حجم بالای مصرف گندم به خود اختصاص داده است، افزایش تولید گندم به کاهش قیمت غذا و کاهش فقر کمک شایان توجهی خواهد کرد (زاهد و همکاران، ۱۳۹۰: ۲۰۲).

استفاده کارآمد از مدل‌های شبیه‌سازی گیاهان زراعی با در نظر گرفتن عناصر آب‌و-هوایی، یک مکمل مؤثر برای تحقیقات آزمایشی است. به این منظور، از مدل‌های مختلف شبیه‌سازی گیاهی مانند کراپوات (CropWat)، کراپسیست (CropSyst) و وفوست (Wofost) استفاده شده است. بیشتر این مدل‌ها مستلزم مهارت زیاد کاربر در واسنجی است. همچنین این مدل‌ها نیاز به فراسنج‌های زیادی دارند که اندازه‌گیری اغلب آنها سخت

است. یکی از نرم‌افزارهای توسعه‌یافته به وسیله فائو، آکواکراپ (AquaCrop) است که به عنوان یک برنامه دقیق و ساده، می‌توان آن را به مثابه ابزاری برای ارزیابی تنش آبی و میزان محصول در مناطق مختلف به کار برد. این مدل نسبت به مدل‌های دیگر به ورودی‌های کمتری نیاز دارد.

در زمینه ارزیابی کارایی مدل آکواکراپ در شبیه‌سازی عملکرد محصولات کشاورزی، تحقیقاتی به انجام رسیده است. در مطالعه‌ای در جنوب ایتالیا سه مدل آکواکراپ، کراپ-سیست و وفوست برای شبیه‌سازی عملکرد گیاه آفتابگردان به کار گرفته شد. نتایج تحقیق نشان داد مدل آکواکراپ به عنوان مدلی که نسبت به دو مدل دیگر به داده‌های ورودی کمتری نیاز دارد، می‌تواند عملکرد محصول را تحت سناریوهای مختلف آبیاری به خوبی شبیه‌سازی نماید (Todorovic et al., 2009: 509). مدل آکواکراپ کارایی مناسب خود را در شبیه‌سازی عملکرد دانه گندم زمستانه و نیاز آبی گیاه در شمال چین (Anjum Iqbal et al., 2014: 61)، آبیاری محصول پنبه تحت محدودیت منابع آب و سناریوهای مختلف آب-وهوایی و کشاورزی در جنوب اسپانیا (Garcia-Vila et al., 2009: 477)، شبیه‌سازی زیست‌توده محصول جو و بازده دانه تحت محدودیت آبیاری در ایتالیایی (Araya et al., 2010: 1838) و برآورد پوشش سایبان، تبخیر و تعرق واقعی، موجودی کلی آب خاک و عملکرد دانه گندم زمستانه در مراکش (Toumi et al., 2016: 219) نشان داد. در داخل کشور نیز، در استان لرستان مدل آکواکراپ تخمین تاریخ مناسب کاشت را برای گندم دیم فقط منوط به عامل بارش و میزان آن نمود؛ از این رو مدل برای مناطق سرد و نیمه‌سرد کارآمد تشخیص داده نشد. اما در بقیه موارد، تخمین مناسبی را از عملکرد تحت شرایط دیم و آبیاری محدود ارائه کرد (توکلی و همکاران، ۱۳۹۲: ۴۱). در منطقه کرج، مقدار عملکرد دانه گندم، تبخیر و تعرق گیاهی و کارایی مصرف آب تحت شرایط مدیریت کم‌آبیاری با این مدل در اکثر موارد به خوبی شبیه‌سازی شد (علیزاده و همکاران، ۱۳۸۹: ۲۷۳). همچنین در منطقه اصفهان این نتیجه حاصل شد که با برنامه‌ریزی صحیح آبیاری به کمک مدل فوق همراه با بهبود مدیریت زراعی، می‌توان عملکرد گندم و کارایی مصرف آب را افزایش داد

(اکبری، ۱۳۹۰: ۱۹). به‌طور کلی استفاده از این مدل در مناطق مختلف کشور به نتایج مطلوبی منتهی شده است.

بر اساس آمار ارائه‌شده از سوی وزارت جهاد کشاورزی (۱۳۹۶: ۴۸) سطح برداشت‌شده گندم کشور در سال زراعی ۹۵-۹۴، ۵/۹۲۹ میلیون هکتار برآورده شده که استان کرمانشاه ۴۱۱ هزار هکتار معادل ۶/۹۳ درصد از این سطح را به خود اختصاص داده است. در همین سال زراعی، مقام چهارم بیشترین سطح برداشت‌شده گندم، بعد از استان‌های کردستان، خوزستان و آذربایجان شرقی، مربوط به استان کرمانشاه بوده است. با توجه به اهمیت کاشت محصول استراتژیک گندم در منطقه غرب کشور و نقش مهمی که در تأمین نیاز گندم کشور به عهده دارد، و وجود دشت‌های بزرگ در این منطقه مانند ماهیدشت که سطح آن‌ها عمدتاً به کشت گندم اختصاص دارد، هدف از این تحقیق ارزیابی کارایی مدل آکواکراپ در شبیه‌سازی عملکرد و تاریخ شروع کاشت گندم دیم و آبی در استان کرمانشاه با توجه عوامل اقلیمی و محیطی است. تا آنجا که اطلاع در دست است، تاکنون در مطالعات جغرافیایی از این مدل استفاده نشده است.

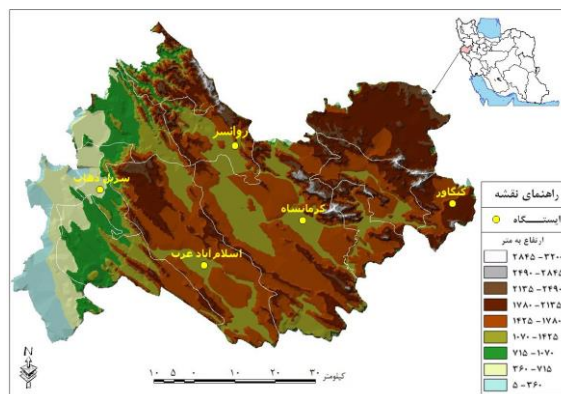
مبانی نظری

آکواکراپ یکی از کاراترین و جدیدترین مدل‌های گیاهی است که توسط سازمان خواروبار کشاورزی وابسته به سازمان ملل متحد (FAO) در سال ۲۰۰۷ با تمرکز بر بهره‌وری مصرف آب توسعه داده شده و به‌عنوان یک ابزار تحلیلی برای مطالعه تأثیر اقلیم، خاک، آب و مدیریت بهره‌وری سیستم کشت قابل توصیه است (روستایی و همکاران، ۱۳۹۱: ۳۶۳). مدل آکواکراپ، همانند بسیاری از مدل‌های شبیه‌سازی رشد گیاه، تأثیر عوامل آب، خاک، گیاه، اتمسفر و اثر متقابل آنها را به‌صورت ساده‌سازی‌شده لحاظ می‌کند. به‌علاوه این مدل برخی جنبه‌های مدیریتی را نیز در نظر می‌گیرد. از عیوب این مدل، عدم لحاظ تأثیر آفات، بیماری‌ها، علف‌های هرز و سایر عوامل خارجی است (اسماعیلی، ۱۳۹۲: ۲۹). مدل، قادر به شبیه‌سازی توسعه سایبان سبز محصول، تعرق محصول، زیست‌توده بالای سطح زمین و مقدار عملکرد محصول است (Vanuytrecht et al., 2014: 351).

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این تحقیق، استان کرمانشاه در غرب ایران با حدود دو میلیون نفر جمعیت است. این استان با مساحت تقریبی ۲۵۰۰۰ کیلومتر مربع، در میانه ضلع غربی کشور بین عرض‌های جغرافیایی ۳۳ درجه و ۴۰ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۱۸ دقیقه شمالی، و طول‌های جغرافیایی ۴۵ درجه و ۲۴ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۷ دقیقه شرقی قرار گرفته است. موقعیت جغرافیایی استان و ایستگاه‌های مورد مطالعه در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی استان کرمانشاه و ایستگاه‌های مورد مطالعه

داده‌ها

در این پژوهش بر اساس نیاز مدل آکواکراپ، از داده‌های اقلیمی روزانه پنج ایستگاه سینوپتیک استان کرمانشاه در یک دوره ۲۲ ساله (۱۹۹۲ تا ۲۰۱۳) استفاده شده است. این داده‌ها عبارتند از: بارندگی، دماهای حداقل و حداکثر، رطوبت نسبی حداقل و حداکثر، سرعت باد در ارتفاع ۲ متری و ساعات آفتابی. بازسازی داده‌های مفقود در حد بسیار محدود و فقط در حد چند ماه انجام گرفته است. به این منظور برای متغیرهایی با تغییرپذیری کمتر مانند دما یا رطوبت نسبی از روش تفاضل‌ها و برای متغیرهایی با تغییرپذیری بیشتر مانند بارش از

روش نسبت‌ها استفاده شد. برای اثبات همگنی داده‌ها از آزمون ران تست استفاده شد که نتایج حاکی از همگن بودن داده‌ها در سطح ۰/۹۵ بود.

مدل آکواکراپ

اساس مدل آکواکراپ بر پایه یک رابطه تجربی (رابطه ۱) قرار گرفته که در مقالات شماره‌های ۳۳ و ۶۶ آبیاری و زهکشی فائو ذکر شده است. از رابطه یادشده برای به‌دست آوردن واکنش محصول نسبت به آب استفاده می‌شود (Steduto et al., 2012: 6): احمدپور، ۱۳۹۲: ۲۵:

$$\left(1 - \frac{Y_a}{Y_x}\right) = Ky \left(1 - \frac{ET_a}{ET_x}\right) \quad \text{رابطه ۱}$$

که در آن Y_x و Y_a به ترتیب محصول واقعی و حداکثر، ET_x و ET_a به ترتیب تبخیر و تعرق واقعی و حداکثر، و Ky عامل پاسخ محصول، نشان‌دهنده اثر کاهش تبخیر و تعرق بر کاهش محصول است. مقادیر $\left(1 - \frac{Y_a}{Y_x}\right)$ و $\left(1 - \frac{ET_a}{ET_x}\right)$ نیز به ترتیب کاهش نسبی محصول و کاهش نسبی تبخیر و تعرق هستند. با پیشرفت‌های علمی و تجربی در روابط گیاه-آب از سال ۱۹۷۹، همراه با نیاز مبرم به بهره‌وری آب، فائو، نشریه ۳۳ خود را اصلاح و تکمیل نمود و به صورت مدل آکواکراپ ارائه داد. مدل آکواکراپ با مجزا کردن تبخیر و تعرق (ET)، به تعرق از سطح محصول (T_r) و تبخیر از سطح خاک (E) سبب می‌شود که بخش غیر مؤثر آب (تبخیر) در تولید محصول در نظر گرفته نشود. این موضوع به‌ویژه زمانی که هنوز پوشش گیاهی تکمیل نگردیده است، حائز اهمیت است. تعرق روزانه (T_{ri}) با استفاده از تبخیر و تعرق روزانه (ET_0) و بهره‌وری آب (WP) و غلظت CO_2 اتمسفر نرمال شده به وزن قسمت هوایی گیاه تبدیل می‌شود. رابطه ۲ بیان ریاضی این رابطه است (اسماعیلی، ۱۳۹۲: ۳۱):

$$B_i = wp \left[\frac{T_{ri}}{ET_{0,i}} \right] \quad \text{رابطه ۲}$$

که در آن B_i میزان بیومس تولیدشده بر حسب کیلوگرم و wp بهره‌وری آب است که مقدار آن در شرایط اقلیمی مشابه ثابت است و به آن کارایی مصرف آب نیز گفته می‌شود.

در مدل آکواکراپ، هوای اطراف گیاه، تحت عنوان مؤلفه اقلیم توصیف شده است و با پنج متغیر کلیدی شناخته می‌شود که عبارتند از: حداکثر و حداقل درجه‌حرارت روزانه هوا، مجموع بارش روزانه، تقاضای روزانه تبخیری اتمسفر که تحت عنوان تبخیر و تعرق پتانسیل بیان می‌شود و میانگین سالانه تمرکز CO_2 در جو، برابر مقدار CO_2 که از نتایج مشاهداتی استفاده می‌شود. سایر پارامترهای هواشناسی از ایستگاه محلی به دست می‌آید. سیستم گیاه در مدل با شش مؤلفه اصلی فنولوژی، کانوپی هوایی (سایبان)، عمق ریشه‌دهی، تولید بیومس و محصول قابل برداشت تعریف می‌شود. در این مدل، عکس‌العمل گیاه به تنش آبی، با پنج بازخورد کاهش نرخ توسعه کانوپی (به‌طور ضمنی در برابر رشد اولیه)، تسریع پیرشدن (در مقایسه با دوره رشد کامل)، بسته‌شدن روزنه‌ها، تأثیر بر کارایی مصرف آب، و تأثیر بر شاخص محصول نشان داده می‌شود. همچنین بسته به در دسترس بودن داده یا انتخاب کاربر، روش شبیه‌سازی رشد گیاه و توسعه آن می‌تواند به‌صورت تقویمی، یا به‌صورت درجه-روز حرارتی توصیف شود. بیان کردن توسعه کانوپی (C_C) از طریق نرخ رشد پوشش سایه‌انداز گیاهی و نه با شاخص سطح برگ (LAI: Leaf Area Index)، یکی از ویژگی‌های ممتاز مدل آکواکراپ است. در مدل آکواکراپ علاوه بر بخش‌های اقلیمی و گیاهی، بخش‌های مدیریتی و خاک‌شناسی به‌عنوان بخش‌های تأثیرگذار بر رشد، توسعه و عملکرد گیاهان وجود دارد. در بخش مدیریتی، روش و برنامه‌ریزی آبیاری و وضعیت پوشش سطح مزرعه به مدل معرفی می‌شود. در بخش خاک‌شناسی، وضعیت افق‌های خاک در ناحیه ریشه و ویژگی‌های فیزیکی مربوط به آب خاک قابل تعریف است. در نهایت پس از معرفی شرایط مختلف محیطی و مدیریتی مزرعه به مدل، مدل برای شبیه‌سازی آماده می‌شود.

با توجه به توضیحات فوق، فایل‌های مورد نیاز این مدل برای شبیه‌سازی مقدار محصول عبارتند از: فایل هواشناسی، فایل گیاه، فایل خاک و فایل مدیریت، که برای ایستگاه‌های مورد مطالعه در این تحقیق به شرح زیر آماده شدند:

الف - فایل هواشناسی: فایل هواشناسی با استفاده از داده‌های روزانه هواشناسی هر ایستگاه تهیه و به مدل وارد شد. برای تهیه این فایل در هر ایستگاه فایل‌های زیر ایجاد گردید:

۱- فایل دمایی، شامل اطلاعات دمای حداقل و حداکثر روزانه برحسب درجه سلسیوس،

۲- فایل بارندگی، شامل بارندگی‌های روزانه برحسب میلی‌متر،

۳- فایل تبخیر و تعرق پتانسیل، شامل تبخیر و تعرق روزانه بر حسب میلی‌متر. گرچه روش‌های مختلفی برای محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل پیشنهاد شده است (جهانبخش و همکاران، ۱۳۹۱: ۲۵؛ ولیزاده کامران و لنگ‌باف، ۱۳۹۷: ۱؛ ولیزاده کامران، ۱۳۹۳: ۳۱۷)، در این تحقیق مقادیر تبخیر و تعرق روزانه با استفاده از روش پنمن-مانیت فائو (Allen et al., 1998: 5) با بهره‌گیری از داده‌های روزانه هواشناسی شامل دماهای حداقل و حداکثر، رطوبت نسبی حداقل و حداکثر، سرعت باد در ارتفاع ۲ متری و ساعات آفتابی محاسبه شد. داده‌های باد اخذ شده از سازمان هواشناسی کشور مربوط به ارتفاع ۱۰ متری بود که برای محاسبه تبخیر و تعرق روزانه بایستی به ارتفاع ۲ متری تبدیل می‌شد. به این منظور از رابطه ارائه شده توسط گیپه (Gipe, 2004: 41) استفاده شد.

۴- فایل CO_2 که شامل اطلاعات میزان غلظت CO_2 جو است. از آنجا که مقدار دی‌اکسید کربن اتمسفر در میزان رشد و نمو محصولات بسیار تأثیرگذار است، ارائه مقدار آن به برنامه در نتایج مدل‌ها بسیار مفید خواهد بود. متأسفانه در اغلب ایستگاه‌های هواشناسی مقدار دی‌اکسید کربن اتمسفر اندازه‌گیری نمی‌شود. بنابراین به‌ناچار از مقدار پیش‌فرض برنامه که بیانگر مقدار میانگین دی‌اکسید کربن موجود در لایه سطح زمین در سال‌های مختلف است، استفاده شد.

ب- فایل گیاهی: این فایل حاوی داده‌های مربوط به گیاه و روابط آن با وضعیت آب در خاک است و شامل اطلاعات ثابت پارامترهای گیاهی است. در این تحقیق برای شبیه-

سازی عملکرد گندم، از فایل گیاهی کالیبره‌شده محصول بر اساس شرایط آب‌وهوایی و محیطی منطقه استفاده شده است.

ج- فایل خاک: فایلی که حاوی ویژگی‌های خاک ایستگاه‌های منطقه است و از طریق آزمایشات و یا اطلاعات قبلی محل ایستگاه‌ها به‌دست آمده است.

د- فایل مدیریت: این فایل مربوط به مدیریت آبیاری در شرایط دیم و آبی است.

یافته‌ها و بحث

پس از فراهم کردن و معرفی فایل‌های فوق به مدل، در مرحله آخر، شبیه‌سازی عملکرد محصول در دوره مشاهداتی به انجام رسید. بدین ترتیب، مدل بر اساس هر تاریخ معرفی شده به فایل دوره کاشت و نیز سایر اطلاعات فایل‌های فوق، عملکرد پتانسیل و طول دوره کاشت گندم را برای ۲۲ سال (۲۰۱۳-۱۹۹۲) در هر ایستگاه به صورت سال‌به‌سال شبیه‌سازی نمود. تاریخ‌های کاشت ورودی به مدل، با توجه به اقلیم هر ایستگاه، منابع علمی موجود و همچنین نظر کارشناسان کشاورزی و کشاورزان منطقه تعیین و بر اساس آن، شش تاریخ به فاصله ده روز برای اجرای مدل، انتخاب و به مدل معرفی شد. همزمان با انتخاب فایل گیاهی، تاریخ کاشت در هر ایستگاه به صورت سال‌به‌سال به مدل وارد و مقدار عملکرد گیاه برای هر سال محاسبه شد. در نهایت، میانگین عملکرد ۲۲ ساله برای هر ایستگاه محاسبه و بیشترین میانگین عملکرد از بین تاریخ‌های ورودی به مدل، به‌عنوان بهترین تاریخ شروع کاشت در هر ایستگاه انتخاب شد.

مدل آکواکراپ به صورت رایگان از سایت سازمان خواروبار کشاورزی سازمان ملل متحد (FAO) از آدرس اینترنتی زیر قابل دریافت است:

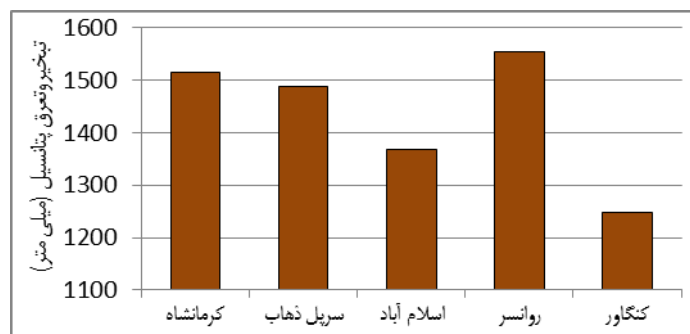
<http://www.fao.org/nr/water/aquacrop.html>

در بخش مدل‌سازی رگرسیونی، نقش متغیرهای اقلیمی در مقدار عملکرد ارزیابی شد. بدین ترتیب که مقادیر عملکرد گندم دیم و آبی برآوردشده توسط مدل آکواکراپ در تاریخ بهینه کاشت در هر ایستگاه به‌عنوان متغیر وابسته، و مقادیر متغیرهای آب‌وهوایی در طول

دورهٔ رشد شامل بارش، دما، رطوبت و تبخیر و تعرق به‌عنوان متغیرهای مستقل در نظر گرفته شدند تا ارتباط هر کدام با مقدار عملکرد محصول مورد ارزیابی قرار گیرد.

مقادیر تبخیر و تعرق پتانسیل به‌روشن پنمن-مانتیت فائو و بارش دورهٔ رشد گندم

دورهٔ شش‌ماههٔ نوامبر (آبان) تا آوریل (فروردین) در ایستگاه‌های مورد مطالعه با حدود ۶۰ تا ۸۰ میلی‌متر بارش ماهانه، دورهٔ پرباران منطقه به حساب می‌آید. ماه ژوئن و سه‌ماه تابستان تقریباً بارشی دریافت نمی‌کنند. از نظر میانگین دمای ماهانه، تفاوت بارزی بین ایستگاه‌های مورد مطالعه وجود دارد. سرپل‌ذهاب در ناحیهٔ پست و گرمسیری غرب منطقه، حداکثر دمای ماهانه را در ماه ژوئیه به‌میزان $32/4$ درجهٔ سلسیوس دارد و به‌طرف مناطق کوهستانی شرق منطقه، یعنی ایستگاه کنگاور، دماها کاهش پیدا می‌کند. از این‌رو مقادیر تبخیر و تعرق پتانسیل سالانهٔ ایستگاه‌های منطقه به‌روشن پنمن-مانتیت، به‌عنوان تابعی از مقادیر رطوبت، باد، تابش و دما، وضعیت‌های متفاوتی را شاهد است (شکل ۲). ایستگاه‌های روانسر با حدود ۱۵۶۰ میلی‌متر و کنگاور با حدود ۱۲۵۰ میلی‌متر به‌ترتیب بیشترین و کمترین مقادیر تبخیر و تعرق پتانسیل را در منطقه دارا هستند که به‌طور قطع، رشد محصول گندم را که توسعهٔ قابل توجهی در سطح منطقه دارد (حدود ۳۹۰ هزار هکتار)، تحت تأثیر قرار می‌دهد.



شکل ۲- میانگین تبخیر و تعرق پتانسیل سالانه به‌روشن پنمن-مانتیت در ایستگاه‌های منطقه

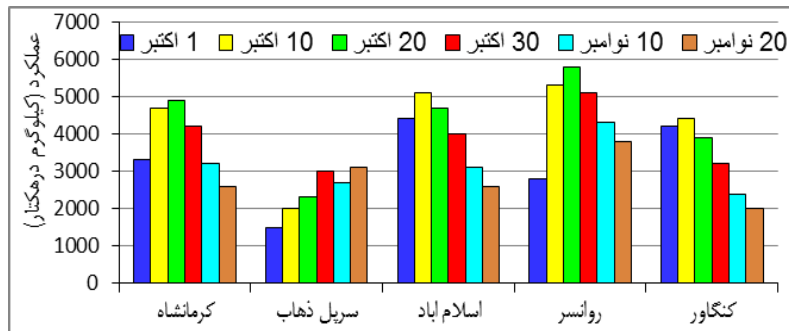
به دلیل اهمیت بارش دوره رشد در عملکرد گندم دیم و آبی، میانگین مقادیر آن برای ایستگاه‌های منطقه بر پایه آمار روزانه استخراج گردید (جدول ۱). همانطور که از جدول معلوم است، بیشترین میزان بارش دوره رشد گندم در ایستگاه روانسر و کمترین آن در ایستگاه سرپل‌ذهاب رخ می‌دهد.

جدول ۱- بارش دوره رشد گندم دیم و آبی (میلی‌متر) در ایستگاه‌های منطقه

ایستگاه	گندم دیم		گندم آبی	
	دوره رشد	بارش دوره رشد	دوره رشد	بارش دوره رشد
کرمانشاه	۲۰ اکتبر تا ۱۷ ژوئن	۳۸۹	۳۰ اکتبر تا ۲۰ ژوئن	۳۷۱/۷
سرپل‌ذهاب	۲۰ نوامبر تا ۲۲ می	۳۳۶	۱۰ نوامبر تا ۱۶ می	۳۵۴/۹
اسلام‌آباد	۱۰ اکتبر تا ۱۸ ژوئن	۴۴۵/۲۵	۳۰ اکتبر تا ۱۱ ژوئیه	۴۱۹/۷
روانسر	۲۰ اکتبر تا ۱۶ ژوئن	۵۰۰/۶	۱۰ اکتبر تا ۱۳ ژوئن	۵۰۷/۱
کنگاور	۱۰ اکتبر تا ۱۶ ژوئن	۳۸۳/۵	۱۰ اکتبر تا ۱۶ ژوئن	۳۸۳/۵

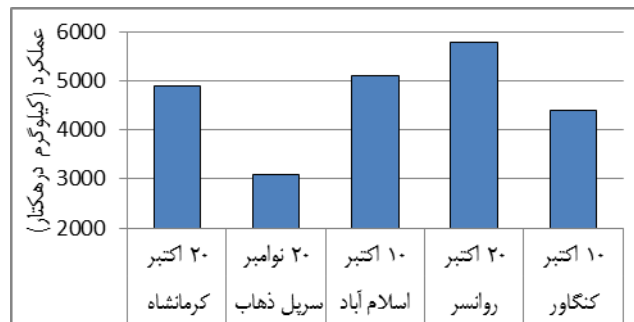
برآورد عملکرد گندم دیم با مدل آکواکراپ

نتایج حاصل از شبیه‌سازی عملکرد پتانسیل گندم دیم با مدل آکواکراپ در پنج ایستگاه مورد مطالعه برای شش تاریخ ورودی در شکل ۳ نشان داده شده است. بر اساس شکل، عملکرد شبیه‌سازی شده گندم دیم در ایستگاه‌ها حساسیت زیادی نسبت به تغییر تاریخ کاشت نشان می‌دهد. بدین ترتیب که در هر ایستگاه، کاشت زودتر یا دیرتر از تاریخ مبنا باعث کاهش عملکرد می‌شود. بیشترین مقدار عملکرد در اغلب ایستگاه‌ها با ماه اکتبر مقارن است. نتایج اجرای مدل نشان داد که ایستگاه‌های روانسر و کرمانشاه بیشترین عملکرد را در تاریخ ۲۰ اکتبر (۲۸مهر) و ایستگاه اسلام‌آباد غرب در تاریخ ۱۰ اکتبر (۱۸مهر) دارند. اما حداقل عملکرد محصول در ایستگاه‌های کرمانشاه و اسلام‌آباد، در تاریخ ۲۰ نوامبر (۲۹ آبان) و در ایستگاه روانسر در تاریخ ۱ اکتبر (۹مهر) بوده است. ایستگاه کنگاور بیشترین عملکرد را در تاریخ ۱۰ اکتبر (۱۸مهر) و کمترین آن را در تاریخ ۲۰ نوامبر (۲۹ آبان) داشته است.



شکل ۳- مقادیر عملکرد شبیه‌سازی شده گندم دیم با مدل آکواکراپ برای ۶ تاریخ ورودی

بر مبنای بیشترین عملکرد محصول در بین شش تاریخ ورودی، بهترین تاریخ‌های کاشت گندم دیم در هر ایستگاه انتخاب و بر اساس آن شکل ۴ رسم شد.



شکل ۴- عملکرد بهینه گندم دیم در تاریخ‌های مختلف با مدل آکواکراپ در ایستگاه‌های منطقه

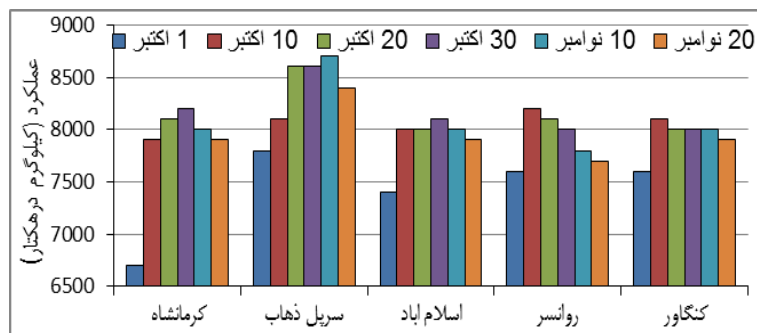
با توجه به شکل، بهترین مقادیر شبیه‌سازی شده عملکرد گندم دیم در پنج ایستگاه مورد مطالعه، از حداقل ۳۱۰۰ کیلوگرم در ایستگاه سرپل‌ذهاب تا حداکثر ۵۸۰۰ کیلوگرم در هکتار در ایستگاه روانسر متغیر است. عملکرد بیشتر محصول در ایستگاه‌های روانسر، اسلام‌آباد و کرمانشاه که در مناطق معتدل استان واقع شده‌اند، به سبب فراهم بودن شرایط حرارتی، رطوبتی و بارندگی لازم برای رشد و نمو محصول بوده است. در این مناطق، فصل رشد گیاه طولانی‌تر بوده و ریزش‌های مناسب جوی باعث افزایش عملکرد شده است. اما عملکرد متوسط در ایستگاه کنگاور می‌تواند به دلیل پایین‌تر بودن میزان بارش و دمای این ایستگاه

باشد؛ چرا که کمترین بارش‌ها و دماهای ماهانه در این ایستگاه رخ داده است و با توجه به شرایط ایده‌آل برای رشد گندم، هوای سرد و مرطوب در طول دوره رشد، و هوای گرم و خشک در طول دوره تشکیل و نمو دانه است (رادمهر، ۱۳۷۶: ۱)، در مناطقی مانند کنگاور که زمستان‌های سرد تا خیلی سرد دارند، کاشت گندم با مشکلاتی از قبیل سرمازدگی زمستانه مواجه است؛ در حالیکه در زمان کاشت محصول، آب‌وهوای خنک اثر بهتری بر بهبود عملکرد دارد. ایستگاه سرپل ذهاب کمترین میانگین عملکرد را در بین ایستگاه‌ها داراست. علت عملکرد کمتر در این ایستگاه، بالابودن بیش از حد میانگین دماهای ماهانه به علت قرارگیری در منطقه گرمسیر استان و نیز بارندگی سالانه کمتر این ایستگاه است. دماهای بسیار بالا به بوته گندم خسارت وارد می‌کند و میزان محصول را کاهش می‌دهد (اسکندری و همکاران، ۱۳۸۷: ۲۵). همچنین میزان تبخیر و تعرق را نیز بالاتر می‌برد.

برآورد عملکرد گندم آبی با مدل آکواکراپ

نتایج شبیه‌سازی عملکرد پتانسیل گندم آبی در پنج ایستگاه مورد مطالعه برای شش تاریخ ورودی در شکل ۵ نشان داده شده است. همانند گندم دیم، کاشت زودتر از تاریخ مینا در ایستگاه‌ها باعث کاهش عملکرد می‌شود. در ایستگاه‌های کرمانشاه و اسلام‌آباد غرب بیشترین عملکرد در تاریخ ۳۰ اکتبر (۸ آبان) و ایستگاه روانسر در تاریخ ۱۰ اکتبر (۱۸ مهر) مشاهده می‌شود. در مقابل، کمترین عملکرد در هر سه ایستگاه فوق، در تاریخ ۱ اکتبر (۹ مهر) بوده است. ایستگاه‌های کنگاور و سرپل ذهاب به ترتیب بیشترین عملکرد را در تاریخ-های ۱۰ اکتبر (۱۸ مهر) و ۱۰ نوامبر (۱۹ آبان) و کمترین آن را در تاریخ ۱ اکتبر (۹ مهر) داشته‌اند. همانطور که نتایج نشان می‌دهد، کاشت زود هنگام در هر پنج ایستگاه موجب کاهش عملکرد محصول می‌شود. بر مبنای بالاترین عملکرد هر ایستگاه در بین شش تاریخ ورودی (شکل ۵)، بهترین تاریخ‌های کاشت گندم آبی در ایستگاه‌ها انتخاب و بر اساس آن شکل ۶ رسم شد. همانطور که از شکل برمی‌آید، عملکرد پتانسیل گندم آبی از حداقل ۸۱۰۰ کیلوگرم در ایستگاه‌های کنگاور و اسلام‌آباد غرب تا حداکثر ۸۷۰۰ کیلوگرم در هکتار در ایستگاه سرپل ذهاب متغیر است. اختلاف عملکرد گندم دیم در سطح استان خیلی بیشتر از گندم آبی است که منعکس‌کننده نقش مؤثر بارندگی در گندم دیم است؛ بر خلاف آن،

اختلاف مکانی عملکرد گندم آبی در سطح منطقه کم است. چرا که عملکرد گندم آبی تا حد زیادی متأثر از روش‌های مدیریتی از جمله آبیاری است.



شکل ۵- مقادیر عملکرد شبیه‌سازی شده گندم آبی با مدل آکواکراپ برای شش تاریخ ورودی



شکل ۶- عملکرد بهینه گندم آبی در تاریخ‌های مختلف با مدل آکواکراپ در ایستگاه‌های منطقه

مقایسه تاریخ‌های بهینه کاشت گندم دیم و آبی که به ترتیب در شکل‌های ۴ و ۶ نشان داده شده است، با تاریخ‌های کاشت مناسب گندم دیم و آبی که برای مناطق مختلف آب-وهوایی پیشنهاد شده است (جدول ۲)، حکایت از تطابق خوب بین تاریخ‌های بهینه پیشنهادی با تاریخ‌های واقعی کاشت در منطقه دارد.

جدول ۲- تاریخ‌های کاشت مناسب گندم دیم و آبی در مناطق مختلف آب‌وهوایی (امین و همکاران، ۱۳۸۳)

گندم دیم	گندم آبی
- در مناطق سردسیر از اول مهر لغایت ۲۰ مهر	- در مناطق سرد، کشت ارقام زمستانه از اوایل مهر تا اول آبان و برای ارقام زمستانه-بهاره از دهم مهر تا نیمه آبان
- در مناطق معتدل از اواخر مهر لغایت ۲۰ آبان	- در مناطق معتدل، اوایل آبان تا اواخر آذر
- در مناطق گرمسیر از اواخر آبان ماه الی ۱۵ آذر با توجه به زمان اولین بارندگی	- در مناطق گرم، نیمه آبان تا نیمه آذر

رابطه بین عملکرد برآوردشده گندم دیم و آبی با متغیرهای آب‌وهوایی

نتایج مدل‌سازی رگرسیونی چندمتغیره برای مطالعه روابط متغیرهای اقلیمی با مقدار عملکرد گندم دیم و آبی در جدول ۵ ذکر شده است. در این جدول فقط مشخصات آماری آن دسته از پارامترهای اقلیمی که رابطه معنی‌دار با عملکرد داشتند، ذکر شده است. ضرایب بتا (Beta) در جدول نشان‌دهنده سهم نسبی هر متغیر مستقل در متغیر وابسته یا مقدار عملکرد محصول است. مقدار ضریب تعیین در جدول، فقط مختص پارامتر یادشده نیست و مربوط به تمام پارامترهای اقلیمی مدل است.

در یک جمع‌بندی، برای گندم دیم در تمام ایستگاه‌ها از بین متغیرهای مستقل (بارش، دما، رطوبت و تبخیر و تعرق)، فقط بارش رابطه معناداری با مقدار عملکرد محصول در ایستگاه‌ها دارد. به عنوان مثال، در ایستگاه کرمانشاه مقدار ضریب استانداردشده بتای بارش $0/976$ با سطح معناداری صفر است که نشان‌دهنده نقش بارز و معنی‌دار بارش در افزایش عملکرد پتانسیل گندم دیم است. در چهار ایستگاه دیگر نیز کمابیش وضعیت به همین صورت است. اما برای سایر پارامترهای اقلیمی، ضرایب بتا ضعیف و سطح معناداری آنها بالاتر از $0/05$ است و از این رو روابط آنها با مقدار عملکرد معنی‌دار نیست، البته به استثنای ایستگاه سرپل‌ذهاب که مقادیر تبخیر و تعرق با ضریب بتای $0/425$ ، به دلیل از دسترس

خارج کردن مقدار رطوبت قابل استفاده برای گیاه، نقش کاهشی در مقدار عملکرد محصول داشته است. در مورد گندم آبی نیز، همانطور که از جدول ۵ مشخص است، بین متغیرهای مستقل (بارش، دما، رطوبت و تبخیر و تعرق) و مقدار عملکرد برآورد شده گندم آبی رابطه معناداری وجود ندارد؛ به استثناء ایستگاه سرپل‌ذهاب که پارامتر دما، و ایستگاه روانسر که پارامتر رطوبت با مقدار عملکرد گندم رابطه معنادار نشان می‌دهد. دلیل معنادار نبودن رابطه پارامترهای اقلیمی به خصوص بارش با میزان عملکرد محصول، وابسته بودن گندم آبی به آبیاری و سایر اقدامات مدیریتی زراعی بیش از بارندگی است.

جدول ۵- مشخصات مدل‌های رگرسیونی خطی چندمتغیره برای تبیین رابطه عملکرد گندم دیم و آبی برآورده شده با مدل آکواکراپ از یک سو و متغیرهای آب‌وهوایی از سوی دیگر در ایستگاه‌ها

ایستگاه	متغیر	ضرایب استاندارد نشده (B)	ضرایب استاندارد شده (Beta)	T	سطح معناداری Sig.	ضریب تعیین (R ²)
گندیم دیم						
کرمانشاه	بارش	۲۲/۲	۰/۹۷۶	۴/۵۶	۰/۰۰۰	۰/۷۵۳
اسلام‌آباد	بارش	۵/۴۶۱	۰/۶۶۵	۱/۵۶	۰/۰۴۰	۰/۳۱۵
روانسر	بارش	۱۱/۳	۰/۸۴۴	۴/۶۶	۰/۰۰۰	۰/۶۱۸
سرپل‌ذهاب	بارش	۲۲/۶	۰/۷۹۱	۵/۳۴	۰/۰۰۰	۰/۷۶۶
سرپل‌ذهاب	تبخیر و تعرق	-۱۷/۲	-۰/۴۲۵	-۳/۰۲	۰/۰۰۹	۰/۷۶۶
کنگاور	بارش	۲۰/۴	۰/۹۱۸	۶/۹۷	۰/۰۰۰	۰/۸۱۶
گندیم آبی						
روانسر	رطوبت	-۱۲۵/۶	-۰/۷۸۱	-۲/۶۹	۰/۰۱۷	۰/۴۲۱
سرپل‌ذهاب	دما	۲۵۱/۱	۰/۶۷۸	۳/۰۴	۰/۰۰۸	۰/۵۲۲

نتیجه‌گیری

آگاهی از چگونگی تناسب و انطباق فعالیت‌های کشاورزی هر منطقه با شرایط آب‌و-هوایی، لازمه هرگونه فعالیت کشاورزی است. اگر بتوان با توجه به نیازمندی‌های حرارتی و رطوبتی محصول، مناطق مساعد کاشت را شناسایی نمود، عملاً می‌توان به عملکرد بیشتری در واحد سطح دست یافت. این امر می‌تواند چشم‌انداز مناسبی پیش روی برنامه‌ریزان برای

استفاده بهینه از قابلیت‌های مناسب عرصه‌های جغرافیایی در تنظیم فعالیت‌های کشاورزی قرار دهد. مطالعه حاضر با هدف ارزیابی کارایی مدل آکواکراپ در شبیه‌سازی مقدار عملکرد و تاریخ شروع کاشت گندم دیم و آبی در استان کرمانشاه با توجه عوامل اقلیمی و محیطی به انجام رسیده است. مقادیر شبیه‌سازی شده عملکرد محصول توسط این مدل، پتانسیل مناطق مختلف استان را از نظر توسعه کشت گندم و تنظیم استرژژی‌های مناسب مدیریت زراعی نشان می‌دهد.

بر اساس نتایج تحقیق، بیشترین میانگین عملکرد شبیه‌سازی شده گندم دیم با مدل آکواکراپ، در ایستگاه روانسر واقع در قسمت‌های مرکزی منطقه به دلیل بارندگی مناسب، و کمترین آن در ایستگاه سرپل ذهاب واقع در قسمت پست و گرمسیری غرب استان به دلیل گرما و تبخیر و تعرق بالا مشاهده می‌شود. همچنین بیشترین میانگین عملکرد گندم آبی مربوط به ایستگاه سرپل ذهاب و کمترین آن مربوط به ایستگاه‌های کنگاور و اسلام‌آباد غرب است. ضمن آنکه اختلاف مکانی عملکرد گندم دیم در سطح استان خیلی بیشتر از گندم آبی است که می‌تواند منعکس‌کننده نقش اختلافات بارندگی در رشد گندم دیم باشد. تاریخ بهینه کاشت گندم دیم و آبی در ایستگاه‌های مختلف از ۱۸ مهر تا ۲۹ آبان متغیر است (شکل‌های ۴ و ۶). این تاریخ‌ها با الگوی شرایط آب‌وهوایی مناطق یادشده انطباق خوبی را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج مدل‌های رگرسیونی (جدول ۵) مقدار بارش دوره رشد و پراکنش آن مهم‌ترین پارامتر تأثیرگذار بر روی مقدار عملکرد گندم دیم است. اما برای گندم آبی، روابط معنی‌داری بین مقادیر عملکرد گندم آبی و سایر پارامترهای اقلیمی از جمله بارش به اثبات نرسید؛ زیرا مقدار عملکرد محصول آبی در شرایط واقعی، علاوه بر عوامل محیطی، تحت تأثیر روش‌های مدیریتی از جمله روش‌های نوین آبیاری، مقابله با بیماری‌ها، آفات و علف‌های هرز، کمبود رطوبت، اثر تنش‌های محیطی مانند گرما و شوری آب و همچنین بافت، ساختمان و شوری خاک است.

به‌طور کلی می‌توان گفت که با توجه به محدودیت‌های کلی در اجرای مدل آکواکراپ، این مدل توانسته است عملکرد و طول دوره کاشت و از آنجا تاریخ کاشت گندم دیم و آبی را در استان به‌طور مناسب شبیه‌سازی نماید. پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده مقدار عملکرد

گندم با سایر مدل‌های کشاورزی برآورد و با نتایج تحقیق حاضر مقایسه شود. استفاده از روش‌های سنجش از دور برای افزایش کارایی این مدل، همانند کاری که ترومیتا و همکاران (Trombetta et al., 2016: 304) در جنوب ایتالیا انجام دادند و از شاخص سطح برگ (LAI) سنجنده مادیس برای کالیبره کردن مدل آکواکراپ برای برآورد توسعه پوشش سایبان گندم زمستانه استفاده کردند، بسیار مثمر ثمر خواهد بود. همچنین اعمال دقت بیشتر در کالیبراسیون فایل گیاهی مدل مذکور برای رسیدن به برآوردهای مناسب‌تر از دیگر اقدامات مورد توصیه است.

منابع

- احمدپور، عبدالرضا، (۱۳۹۲)، پیش‌بینی عملکرد محصول ذرت دانه‌ای تحت مدیریت‌های مختلف آبیاری با استفاده از مدل‌های **Aquacrop** و **Wofost** در منطقه کرمانشاه، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی کرمانشاه.
- اسکندری، ایرج، عبدالعلی غفاری، مقصود حسن پورحسینی، مظفر روستایی و ولی فیضی اصل، (۱۳۸۷)، **گندم دیم (کاشت، داشت و برداشت)**، چاپ اول، کرج، نشر آموزش کشاورزی.
- اسماعیلی، مریم، (۱۳۹۲)، پیش‌بینی اثرات کم‌آبیاری روی عملکرد محصول سویا در منطقه کرمانشاه با استفاده از مدل **AquaCrop** تحت سناریوهای تغییر اقلیم، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی کرمانشاه.
- اکبری، مهدی، (۱۳۹۰)، بیلان آب خاک و عملکرد محصول گندم با استفاده از مدل شبیه‌سازی **AquaCrop** (مطالعه موردی در شبکه آبیاری آبشار اصفهان)، **مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی**، جلد ۱۲، شماره ۴، صص ۳۴-۱۹.
- امین، حسین، محمدرضا جمالی، زهرا خوگر و منوچهر دستفال، (۱۳۸۳)، **اصول کاشت، داشت و برداشت گندم آبی**، چاپ اول، کرج، نشر آموزش کشاورزی.
- توکلی، علیرضا، عبدالمجید لیاقت و امین علیزاده، (۱۳۹۲)، بررسی موازنه آب خاک، تاریخ کاشت و عملکرد گندم با استفاده از مدل **AquaCrop** در شرایط دیم و آبیاری محدود، **تحقیقات مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی**، دوره ۱۴، شماره ۴، صص ۵۶-۴۱.
- جهانبخش، سعید، مجید رضایی بنفشه، مرضیه اسمعیل‌پور و معصومه تدینی، (۱۳۹۱)، ارزیابی مدل‌های برآورد تبخیر-تعرق پتانسیل و توزیع مکانی سالانه آن در حوضه جنوبی رود ارس، **جغرافیا و برنامه‌ریزی**، سال ۱۶، شماره ۴۰، صص ۴۶-۲۵.
- رادمهر، محمد، (۱۳۷۶)، **تأثیر تنش گرما بر فیزیولوژی رشد و نمو گندم**، مشهد، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد.
- روستایی، مریم، تیمور سهرابی، علیرضا مساح بوانی و محمد صادق احدی، (۱۳۹۱)، بررسی عملکرد و بهره‌وری آب گیاه ذرت در سطوح مختلف ریسک تحت تأثیر تغییر اقلیم در دوره ۲۰۳۹-۲۰۱۰، **نشریه آب و خاک**، جلد ۲۶، شماره ۲، صص ۳۷۱-۳۶۱.

- زاهد، محبوبه، سراله گالشی، ناصر لطیفی، افشین سلطانی و مهدی کلاته، (۱۳۹۰)، اثر تراکم بر عملکرد و اجزای عملکرد در ارقام جدید و قدیم گندم، *مجله الکترونیک تولید گیاهان زراعی*، دوره ۴، شماره ۱، صص ۲۱۵-۲۰۱.
- عبدالهی، علی‌اصغر، جهانبخش امامی و سید مسعود حسینی ثابت، (۱۳۹۲)، پهنه‌بندی اقلیمی - زراعی گندم در استان همدان با استفاده از سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی و تصاویر ماهواره‌ای، گزارش نهایی طرح تحقیقاتی، تهران، وزارت جهاد کشاورزی، مؤسسه پژوهش‌های برنامه‌ریزی، اقتصاد کشاورزی و توسعه روستایی.
- علیزاده، حمزه‌علی، بیژن نظری، مسعود پارس‌نژاد، هادی رضانی اعتدالی و حمیدرضا جانباز، (۱۳۸۹)، ارزیابی مدل AquaCrop در مدیریت کم‌آبایی گندم در منطقه کرج، *نشریه آبیاری و زهکشی ایران*، جلد ۴، شماره ۲، صص ۲۸۳-۲۷۳.
- وزارت جهاد کشاورزی، (۱۳۹۶)، *آمارنامه کشاورزی سال زراعی ۹۵-۱۳۹۴*، جلد اول، محصولات زراعی.
- ولیزاده کامران، خلیل، (۱۳۹۳)، برآورد تبخیر-تعرق پتانسیل در آذربایجان شرقی به روش استفنز با استفاده از GIS، *جغرافیا و برنامه‌ریزی*، سال ۱۸، شماره ۴۹، صص ۳۳۴-۳۱۷.
- ولیزاده کامران، خلیل و مریم لنگ‌باف، (۱۳۹۷)، برآورد تبخیر-تعرق واقعی ذرت با استفاده از پردازش تصاویر ماهواره‌ای و مدل بیبال در منطقه خوزستان، *جغرافیا و برنامه‌ریزی*، سال ۲۲، شماره ۶۵، صص ۱-۱۳.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., Smith, M., (1998), *Crop Evapotranspiration- Guidelines for Computing Crop Water Requirements*, FAO Irrigation and Drainage Paper, No. 56, Rome, Italy.
- Araya, A., Solomon, H., Kiros Meles, H., Afewerk, K., Taddese, D., (2010), Test of AquaCrop Model in Simulating Biomass and Yield of Water Deficient and Irrigated Barley (*Hordeum Vulgare*), *Agricultural Water Management*, Vol. 97, Issue 11, pp. 1838-1846.
- Anjum Iqbal, M., Shen, Y., Stricevic, R., Pei, H., Sun, H., Amiri, E., Penas, A. Del Rio, S., (2014), Evaluation of the FAO AquaCrop Model for Winter Wheat on the North China Plain Under Deficit Irrigation from Field Experiment to Regional Yield Simulation, *Agricultural Water Management*, Vol. 135, pp. 61-72.

- Garcia-Vila, M., Fereres., E., Mateos, L., Orgaz, F., Steduto, P., (2009), Deficit Irrigation Optimization of Cotton with Aquacrop, *Agronomy Journal*, Vol. 101, No. 3, pp. 477-487.
- Gipe, P., (2004), *Wind Power: Renewable Energy for Home, Farm, and Business*, Chelsea Green Publishing, 496 p.
- Steduto, P., Hsiao, T. C., Fereres, E., Raes, D., (2012), *Crop Yield Response to Water*, FAO Irrigation and Drainage Paper, No. 66, Rome, Italy.
- Todorovic, M., Albrizio, R., Zivotic, L., Abi Saab, M., Stockle, C., Steduto, P., (2009), Assessment of AquaCrop, CropSyst, and WOFOST Models in the Simulation of Sunflower Growth under Different Water Regimes, *Agronomy Journal*, Vol. 101, No. 3, pp. 509-521.
- Toumi, J. Er-Raki, S., Ezzahar, J., Khabba, S., Jarlan, L., Chehbouni. A., (2016), Performance Assessment of Aquacrop Model for Estimating Evapotranspiration, Soil Water Content and Grain Yield of Winter Wheat in Tensift Al Haouz (Morocco): Application to Irrigation Management, *Agricultural Water Management*, Vol. 163, pp. 219-235.
- Trombetta, A., Iacobellis, V., Tarantino, E., Gentile, F., (2016), Calibration of the AquaCrop Model for Winter Wheat using MODIS LAI Images, *Agricultural Water Management*, Vol. 164, Part 2, pp. 304-316.
- Vanuytrecht, E., Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C., Fereres, E., Heng, L. K., Garcia Vila, M., Moreno, P. M., (2014), AquaCrop: FAO's Crop Water Productivity and Yield Response Model, *Environmental Modeling & Software*, Vol. 62, pp. 351-360.