

Dryland Wheat Yield Prediction for Land Suitability Evaluation in a Semi-Arid Region: A Comparison of the FAO-AEZ Method and the AquaCrop Model

ABSTRACT

Quantitative land suitability assessment for dryland crops in semi-arid regions requires methods with acceptable accuracy in yield prediction. In this study, the capability of two approaches, AEZ and the AquaCrop model, was compared for predicting dryland wheat yield (cv. Azar 2) in the Halab region (Zanjan province). Climatic data from two growing seasons (2022–2023 and 2023–2024), soil properties of 11 profiles, and actual wheat yield were measured. Attainable yield using the AEZ method was estimated through calculation of potential yield, application of water stress, and the edaphic index. The AquaCrop model was also calibrated and executed. Accuracy evaluation was performed using MAE, RMSE, nRMSE, r^2 , and R^2 indices. The results showed that the AquaCrop model (MAE=0.155, RMSE=0.189 t/ha, nRMSE=10.57%, $r^2=0.777$, and $R^2=0.657$) had higher accuracy compared to the AEZ method (MAE=0.178, RMSE=0.235 t/ha, nRMSE=13.17%, $r^2=0.728$, and $R^2=0.544$). The superiority of AquaCrop is due to its dynamic daily simulation of water stress with separation of evaporation from transpiration. Land suitability classification showed that although estimates differed between the two models, all land units fell into class S2, and the predicted yield of all units was above the critical yield (412 kg/ha), indicating the economic justification of cultivation in the region. Based on the findings, the AquaCrop model is more suitable for field-scale yield prediction and detailed land suitability assessment under dryland conditions, while the AEZ method has greater applicability for regional macro-planning. The development of hybrid models that integrate dynamic water stress simulation with nutrient uptake sub-models is recommended to increase prediction accuracy in future studies.

Keywords: Quantitative land evaluation, Wheat yield simulation, Potential yield, Parametric method, Water-limited yield.

پیش‌بینی عملکرد گندم برای ارزیابی تناسب اراضی در یک منطقه نیمه‌خشک: مقایسه روش فائو-AEZ و مدل AquaCrop

چکیده

ارزیابی کمی تناسب اراضی برای محصولات دیم در مناطق نیمه‌خشک نیازمند روش‌هایی با دقت قابل قبول در پیش‌بینی عملکرد است. در این پژوهش، توانایی دو رویکرد AEZ و مدل AquaCrop در پیش‌بینی عملکرد گندم دیم (رقم آذر ۲) در منطقه حلب (استان زنجان) مقایسه شد. داده‌های اقلیمی دو فصل زراعی (۲۰۲۲–۲۰۲۳ و ۲۰۲۳–۲۰۲۴)، ویژگی‌های خاک ۱۱ پروفیل و عملکرد واقعی گندم اندازه‌گیری گردید. عملکرد قابل‌دستیابی با روش AEZ از طریق محاسبه عملکرد پتانسیل، اعمال تنش آبی و شاخص اداپتیکی برآورد شد. مدل AquaCrop نیز کالیبره و اجرا گردید. ارزیابی دقت با شاخص‌های MAE، RMSE، nRMSE، r^2 و R^2 انجام شد. نتایج نشان داد مدل AquaCrop (MAE=۰/۱۵۵، RMSE=۰/۱۸۹، nRMSE=۱۰/۵۷٪، $r^2=۰/۷۷۷$ و $R^2=۰/۶۵۷$) دقت بالاتری برخوردار است. برتری AquaCrop ناشی از شبیه‌سازی پویای روزانه تنش آبی تفکیک تبخیر از تعرق است. طبقه‌بندی تناسب اراضی نشان داد که تمامی واحدهای اراضی با وجود تفاوت در برآوردهای دو مدل، در کلاس S2 قرار می‌گیرند و عملکرد پیش‌بینی‌شده تمام واحدها بالاتر از عملکرد بحرانی (۴۱۲ کیلوگرم در هکتار) است که بیانگر توجیه اقتصادی کشت در منطقه می‌باشد. بر اساس یافته‌ها، مدل AquaCrop برای پیش‌بینی عملکرد در سطح مزرعه و ارزیابی دقیق تناسب اراضی در شرایط دیم مناسب‌تر است، در حالی که روش AEZ برای برنامه‌ریزی کلان منطقه‌ای کاربرد بیشتری دارد. توسعه مدل‌های ترکیبی که شبیه‌سازی پویای تنش آبی را با زیرمدل‌های جذب عناصر غذایی تلفیق کنند، برای افزایش دقت پیش‌بینی در مطالعات آتی توصیه می‌شود.

واژگان کلیدی: ارزیابی کمی اراضی، شبیه‌سازی عملکرد گندم، عملکرد پتانسیل، روش پارامتریک، عملکرد آب محدود

امنیت غذایی به عنوان یکی از چالش‌های اساسی قرن بیست‌ویکم تحت تأثیر رشد جمعیت، تغییر اقلیم و محدودیت منابع طبیعی قرار دارد (FAO, 2025a). گندم به عنوان مهم‌ترین محصول غذایی جهان، حدود ۲۰ درصد از کالری و پروتئین مصرفی انسان را تأمین می‌کند (Shiferaw et al., 2013). در ایران نیز گندم نقشی راهبردی در تأمین امنیت غذایی ایفا می‌کند؛ به گونه‌ای که این محصول بیش از ۷۰ درصد از اراضی دیم کشور را به خود اختصاص داده است (Mohammadzadeh et al., 2025). با این حال، عملکرد گندم دیم روند مطلوبی نداشته و میانگین عملکرد آن حدود ۱/۲۵ تن در هکتار است؛ به طوری که شکاف عملکرد در این نظام‌های زراعی حدود ۶۵ درصد برآورد شده است (Mohammadzadeh et al., 2025). مطابق آخرین گزارش فائو، مجموع تولید غلات ایران در سال ۲۰۲۵ حدود ۲۰ میلیون تن برآورد شده که تولید گندم با ۱۲/۵ میلیون تن، حدود ۱۲ درصد کمتر از میانگین پنج‌ساله بوده است (FAO GIEWS, 2025). این ارقام نشان‌دهنده وجود شکاف قابل توجه عملکرد و ضرورت اتخاذ راهکارهای مدیریتی و پژوهشی برای افزایش بهره‌وری و امنیت غذایی در کشور است.

ارزیابی تناسب اراضی چارچوبی نظام‌مند برای تطبیق ویژگی‌های اقلیمی و خاکی با نیازهای اکولوژیک محصولات فراهم می‌کند (FAO, 1976; Rossiter, 1996). ارزیابی تناسب اراضی چارچوبی نظام‌مند برای تطبیق ویژگی‌های اقلیمی و خاکی با نیازهای اکولوژیک محصولات فراهم می‌کند (van Diepen et al., 1991; Bouma and van Lanen, 1987)، رویکردهای کمی، تناسب اراضی را از طریق برآورد عملکرد محصول بیان می‌کنند و عملکرد پیش‌بینی شده را به عنوان شاخص اصلی ارزیابی در نظر می‌گیرند.

در این میان، رویکرد پهنه‌بندی اگر اکولوژیکی^۱ که توسط فائو توسعه یافت است، گامی مهم در جهت کمی‌سازی ارزیابی تناسب اراضی محسوب می‌شود (Fischer et al., 2002; Fischer et al., 2012). این روش مدل‌های ساده‌شده رشد محصول را با ارزیابی محدودیت‌های خاک ترکیب می‌کند تا عملکرد پتانسیل و قابل‌دستیابی را برآورد کند و در مطالعات منطقه‌ای و جهانی کاربرد گسترده‌ای داشته است (Teixeira et al., 2013). با این حال ساده‌سازی‌های آن در محاسبه تنش آبی ممکن است در مناطق نیمه‌خشک با تغییرپذیری بالای بارندگی محدودیت ایجاد کند (Kassie et al., 2014; van Iersum et al., 2013).

در مقابل، مدل‌های شبیه‌سازی محصول مبتنی بر فرایند رشد و توسعه گیاه را بر اساس فرایندهای فیزیولوژیک و برهم‌کنش‌های خاک-آب-گیاه-اقلیم به صورت مکانیستیک شبیه‌سازی می‌کنند (Jones et al., 2003; Boote et al., 2013). مدل AquaCrop که توسط فائو توسعه یافته است با تمرکز ویژه بر بهره‌وری آب و پاسخ محصول به تنش آبی، تعادلی میان دقت شبیه‌سازی و نیاز داده‌ای برقرار می‌کند (Steduto et al., 2009; Raes et al., 2009; Hsiao et al., 2009). این مدل برای گندم در شرایط مختلف آب‌وهوایی اعتبارسنجی شده است و دقت بالایی در پیش‌بینی عملکرد نشان داده است (Andarzian et al., 2011; Mkhabela and Bullock, 2012; Abrha et al., 2012).

با وجود پیشرفت‌های روش‌شناختی، مقایسه نظام‌مند رویکرد AEZ و مدل‌های فرایندمحور در ارزیابی کمی تناسب اراضی گندم دیم، به‌ویژه در شرایط نیمه‌خشک، محدود بوده است. تفاوت در ساختار مدل‌ها، سطح پیچیدگی، نحوه لحاظ‌کردن تنش آبی و نیاز داده‌ای می‌تواند منجر به برآوردهای متفاوتی از عملکرد شود که پیامدهای مهمی برای برنامه‌ریزی کشاورزی دارد.

بر این اساس، هدف این پژوهش مقایسه توانایی رویکرد AEZ و مدل AquaCrop در ارزیابی کمی تناسب اراضی گندم دیم از طریق پیش‌بینی عملکرد در یک منطقه نیمه‌خشک است. در این مطالعه، عملکرد برآوردشده توسط هر رویکرد با داده‌های عملکرد مشاهده‌شده مقایسه شده و نقاط قوت و محدودیت‌های هر روش از نظر دقت پیش‌بینی و کاربردپذیری در برنامه‌ریزی کشاورزی مورد تحلیل قرار می‌گیرد.

^۱ Agro-Ecological Zones

پیشینه نظری: رویکردها و چارچوب‌های ارزیابی تناسب اراضی

چارچوب ارزیابی اراضی فائو (FAO, 1976) بنیان نظری اغلب مطالعات تناسب اراضی را تشکیل می‌دهد. این چارچوب بر اصل تطابق بین نیازهای اکولوژیک محصول و ویژگی‌های محیطی استوار است و ارزیابی را در قالب یک سیستم طبقه‌بندی سلسله‌مراتبی (Order, Class, Subclass, Unit) ارائه می‌کند. در این نظام، این چارچوب بین «خصوصیات اراضی» که پارامترهای قابل اندازه‌گیری هستند و «کیفیت‌های اراضی» که ویژگی‌های پیچیده و ترکیبی محسوب می‌شوند، تمایز قائل می‌شود (Rossiter, 1996). با وجود انسجام مفهومی، این چارچوب ذاتاً کیفی است و خروجی آن به طبقات تناسب محدود می‌شود؛ بنابراین، توانایی محدودی در برآورد کمی عملکرد محصول دارد (van Diepen et al., 1991). این محدودیت زمینه توسعه رویکردهای کمی‌تر را فراهم ساخت.

رویکرد AEZ را می‌توان توسعه‌ای کمی از چارچوب FAO دانست که تلاش می‌کند تناسب اراضی را بر اساس برآورد عملکرد پتانسیل و عملکرد قابل‌دستیابی کمی‌سازی کند (Fischer et al., 2002, 2012). در AEZ، عملکرد پتانسیل بر پایه تابش و دما محاسبه شده و سپس ضرایب کاهنده برای اعمال محدودیت‌های آب و خاک به کار می‌رود. این ساختار، مدلی میان‌سطحی ایجاد می‌کند که از یک سو از سادگی روش‌های کیفی فاصله می‌گیرد و از سوی دیگر وارد پیچیدگی کامل مدل‌های فرایندمحور نمی‌شود (van Ittersum et al., 2013). مزیت AEZ در قابلیت کاربرد آن در مقیاس‌های بزرگ و نیاز داده‌ای نسبتاً محدود است (Fischer et al., 2012). با این حال، ساده‌سازی تنش آبی از طریق ضرایب کاهش، ممکن است در اقلیم‌های نیمه‌خشک با تغییرپذیری زمانی بارش، بخشی از دینامیک واقعی رشد محصول را بازنمایی نکند.

در چارچوب ارزیابی کمی تناسب اراضی، تفاوت اصلی میان رویکردهای مبتنی بر ضرایب کاهش و مدل‌های فرایندمحور در نحوه بازنمایی تنش‌های محیطی است. در حالی که رویکرد AEZ محدودیت‌های آب و خاک را از طریق ضرایب کاهنده نسبتاً ایستا اعمال می‌کند، مدل‌های فرایندمحور اثر تنش را به صورت پویا و وابسته به زمان در طول چرخه رشد شبیه‌سازی می‌کنند (Jones et al., 2003; Boote et al., 2013). در این چارچوب، رابطه بین تعرق گیاه، تولید زیست‌توده و عملکرد بهایی به صورت ساختاری مدل می‌شود، به گونه‌ای که شدت و زمان وقوع تنش می‌تواند بر مراحل مختلف فنولوژیک اثر متفاوتی بگذارد (Steduto et al., 2009). این بازنمایی پویا امکان تحلیل تعاملات غیرخطی بین اقلیم، خاک و گیاه را فراهم می‌کند، اما در مقابل نیازمند داده‌های دقیق‌تر و کالیبراسیون مناسب است (Bouman et al., 1996). از این منظر، تمایز اصلی میان این دو رویکرد نه در هدف برآورد عملکرد، بلکه در سطح پیچیدگی و نحوه مدل‌سازی پاسخ محصول به محدودیت‌های محیطی قرار دارد.

پیشینه تجربی: مطالعات پیشین و روش‌شناسی‌ها

رویکرد AEZ در مقیاس‌های جهانی و منطقه‌ای به طور گسترده برای برآورد عملکرد پتانسیل و عملکرد قابل‌دستیابی محصولات استفاده شده است. آخرین نسخه این سیستم (GAEZ v5) که در سال ۲۰۲۵ منتشر شده، با بهره‌گیری از پایگاه‌داده خاک به‌روز شده، داده‌های اقلیمی AgERA5 و مدل‌های CMIP6، قابلیت‌های قابل توجهی در ارزیابی تناسب اراضی و عملکرد بالقوه تحت سناریوهای تغییر اقلیم یافته است (FAO/IIASA, 2025). مطالعات متعدد در مناطق مختلف جهان نشان داده‌اند که روش AEZ می‌تواند تغییرپذیری مکانی عملکرد گندم را با دقت قابل قبولی پیش‌بینی کند (Teixeira et al., 2013; Xiong et al., 2014). با این حال، پژوهش‌ها در مناطق

نیمه‌خشک نشان داده‌اند که این روش تمایل به بیش‌برآوردی عملکرد در سال‌های خشک دارد که عمدتاً ناشی از ساده‌سازی‌های مدل در محاسبه تنش آبی و عدم لحاظ زمان وقوع خشکی در مراحل حساس فنولوژیک است (Kassie et al., 2014; van Ittersum et al., 2013).

مدل AquaCrop در مطالعات متعددی برای شبیه‌سازی عملکرد محصولات تحت شرایط مختلف اقلیمی و مدیریتی ارزیابی شده است. نتایج اعتبارسنجی‌های بین‌المللی نشان می‌دهد که این مدل دقت خوبی در شبیه‌سازی زیست‌توده و عملکرد دانه گندم دارد (Steduto et al., 2009; Raes et al., 2009). در ایران نیز مطالعات متعددی دقت مدل AquaCrop را برای گندم در شرایط آبی و دیم تأیید کرده‌اند (Andarzian et al., 2011; Tavakoli et al., 2010). همچنین، مطالعات اخیر نشان داده‌اند که استفاده از رویکردهای گام‌به‌گام پارامترسازی با داده‌های سنجش از دور می‌تواند عدم قطعیت پارامترهای حساس مدل را کاهش داده و دقت پیش‌بینی عملکرد را بهبود بخشد (Oulaid et al., 2024). در سال‌های اخیر، کاربرد AquaCrop برای ارزیابی تناسب اراضی نیز افزایش یافته است و پژوهشگران نشان داده‌اند که این رویکرد می‌تواند تغییرپذیری مکانی عملکرد را بهتر از روش‌های سنتی نمایش دهد (Lorite et al., 2013).

با وجود کاربرد گسترده و مستقل هر دو رویکرد AEZ و AquaCrop در برآورد عملکرد محصولات، مطالعاتی که این دو مدل را در شرایط یکسان اقلیمی و خاک‌ی و در یک چارچوب مقایسه‌ای مشترک ارزیابی کرده باشند، بسیار محدود است؛ بنابراین، مقایسه نظام‌مند AEZ و AquaCrop برای ارزیابی تناسب اراضی گندم دیم در مناطق نیمه‌خشک هنوز به‌طور کامل بررسی نشده است و پرداختن به این خلأ پژوهشی، انگیزه اصلی مطالعه حاضر را تشکیل می‌دهد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در بخش حلب واقع در غرب استان زنجان و بین طول‌های جغرافیایی ۴۷ درجه ۵۸ دقیقه تا ۴۸ درجه ۴ دقیقه شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۳۶ درجه ۱۰ دقیقه تا ۳۶ درجه ۱۵ دقیقه شمالی واقع شده. این منطقه با مساحتی حدود ۴۵۵۷ هکتار، بخشی از حوزه آبخیز رودخانه قزل‌اوزن محسوب می‌شود.

بر اساس داده‌های بازتحلیل ERA5-Land (۲۰۲۰-۱۹۹۰)، میانگین بارندگی سالانه ۳۱۸ میلی‌متر است که حدود ۸۰ درصد آن در آبان تا اردیبهشت و همزمان با فصل رشد گندم رخ می‌دهد. میانگین دمای سالانه ۱۱/۳ درجه سانتی‌گراد است (مداقل ۴/۵ و حداکثر ۱۸/۴) و تبخیر و تعرق پتانسیل ۱۶۱۶ میلی‌متر در سال است (Sabater, 2019). با توجه به شاخص خشکی دومارتن^۲ ($I=P/(T+10)=15$) و نسبت بارش به تبخیر و تعرق مرجع ($P/ETO=0.20$)، اقلیم منطقه نیمه‌خشک سرد طبقه‌بندی می‌شود که با طبقه BSk در سیستم کوپن-گایگر مطابقت دارد (Peel et al., 2007).

از نظر ژئومورفولوژیک، منطقه در میان دو رشته ارتفاعات با روند شمال‌غربی-جنوب‌شرقی واقع شده است. سنگ‌شناسی ارتفاعات پیرامونی شامل توف سبز و آهک ماسه‌ای (اوسن)، کنگلومرا و ماسه‌سنگ‌های سازند قرمز زیرین (الیگوسن)، و آهک و مارن سازند قم

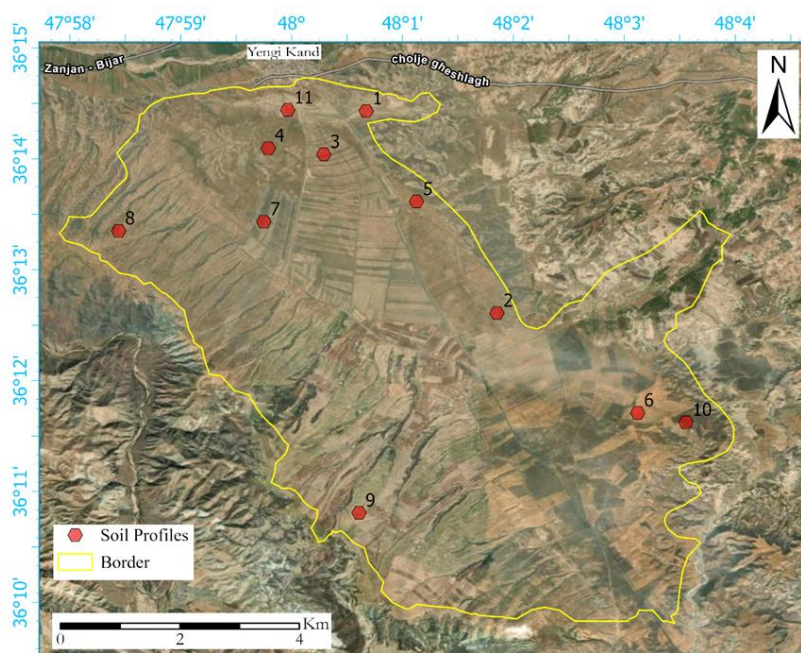
² De Martonne aridity index

³ cold semi-arid

(الیگو-میوسن) است. در بخش‌های شرقی و جنوب‌شرقی، مارن‌های رنگی، مارن ماسه‌ای، ماسه‌سنگ و لایه‌های گچی سازند قرمز فوقانی (میوسن) و همچنین نهشته‌های پلیوسن مشاهده می‌شود (شهیدی و بهارفیروزی، ۱۳۸۰).

فرایندهای فرسایشی منجر به تشکیل مخروط‌افکنه‌های قدیمی و تراس‌های آبرفتی شده‌اند که در آن‌ها افق‌های تجمعی آهک و گچ به‌ویژه در بخش‌های میانی و تحتانی پروفیل خاک توسعه یافته‌اند. خاک‌های منطقه عمدتاً در رده‌های Entisols و Inceptisols با رژیم رطوبتی زیریک و رژیم حرارتی مزیک طبقه‌بندی می‌شوند. خاک‌های Entisols فاقد افق‌های تشخیصی به‌جز افق سطحی اکریک^۴ بوده و در زیرگروه Typic Xerorthents قرار می‌گیرند. خاک‌های Inceptisols دارای افق کمبیک^۵ یا کلسیک^۶ بوده و در زیرگروه‌های Fluventic Xerochrepts، Fluventic Calcixerollic Xerochrepts و Calcixerollic Xerochrepts طبقه‌بندی شده‌اند (دماوندی و خاوران، ۱۳۷۱).

پوشش گیاهی طبیعی غالب منطقه بر اساس مشاهدات میدانی شامل گونه‌های *Artemisia sieberi*، *Stipa barbata*، *Bromus*، *Agropyron intermedium tomentellus* و *Hordeum bulbosum* است که نشان‌دهنده اکوسیستم مرتعی نیمه‌استپی است (Hamzeh et al., 2020). کاربری اصلی اراضی شامل کشت دیم گندم (*Triticum aestivum* L.) رقم آذر ۲ با سیستم آیش است.



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه در استان زنجان و پراکنش مکانی پروفیل‌های خاک و مزارع اندازه‌گیری عملکرد

جمع‌آوری داده‌ها

داده‌های خاک

^۴ Ochric
^۵ Cambic
^۶ Calcic

داده‌های خاک از بانک اطلاعاتی مؤسسه تحقیقات خاک و آب (SWRI) استخراج شد. این مجموعه شامل ۱۱ پروفیل خاک بود که پیش‌تر توصیف، نمونه‌برداری و تجزیه آزمایشگاهی شده بودند. در هر پروفیل که نماینده یک واحد اراضی است، افق‌های خاک به‌صورت مورفولوژیکی توصیف و نمونه‌های خاک برای آنالیزهای فیزیکی و شیمیایی برداشت شده بود. هر واحد اراضی، محدوده‌ای از اراضی است که نسبت به اراضی اطراف خود، بر اساس ویژگی‌های از پیش تعیین‌شده‌ای (مانند خاک و توپوگرافی) متفاوت بوده و از درون ساختاری همگن برخوردار است.

پارامترهای اندازه‌گیری‌شده شامل توزیع اندازه ذرات (شن، سیلت و رس) به روش هیدرومتری، واکنش خاک (pH) در گل اشباع، هدایت الکتریکی عصاره اشباع، کربن آلی به روش واکلی-بلک، کربنات کلسیم معادل به روش کلسیمتری و مقدار گچ به روش استون بود.

داده‌های هواشناسی

داده‌های روزانه اقلیمی از ایستگاه هواشناسی سینوپتیک خودکار حلب واقع در منطقه مورد مطالعه دریافت شد. این داده‌ها شامل حداقل و حداکثر دمای هوا ($^{\circ}\text{C}$)، بارش (mm)، رطوبت نسبی (%، سرعت باد (m.s^{-1}) و ساعات آفتابی بود. داده‌های مورد استفاده کل دوره رشد گندم (اکتبر تا ژوئن) را برای سال‌های زراعی ۲۰۲۲-۲۰۲۳ و ۲۰۲۳-۲۰۲۴ پوشش می‌داد.

اندازه‌گیری عملکرد و صفات زراعی

اندازه‌گیری عملکرد دانه گندم با کواترات ۱*۱ متر (Hume & Shirriff, 1995) در ۱۱ نقطه نمونه‌برداری واقع در مجاورت محل پروفیل‌های خاک انجام شد. به دلیل آیش برخی مزارع در سال اول مطالعه، نمونه‌برداری در دو فصل زراعی متفاوت صورت گرفت: برای پروفیل‌های واحد ۱، ۷، ۱۰ و ۱۱، اندازه‌گیری عملکرد در سال زراعی ۲۰۲۳-۲۰۲۴ انجام شد، در حالی که برای هفت پروفیل دیگر (واحد ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۸ و ۹) نمونه‌برداری عملکرد در سال زراعی ۲۰۲۲-۲۰۲۳ صورت پذیرفت. در هر نقطه، سه پلات تکرار (۱ متر مربع) در زمان رسیدگی فیزیولوژیکی برداشت شد و عملکرد دانه پس از خرم‌ن‌کوبی، بوجاری و تعدیل رطوبت به ۱۲ درصد محاسبه گردید.

مراحل فنولوژیکی شامل سبز شدن، پنجه‌زنی، ساقه‌رفتن، سنبله‌دهی، گلدهی و رسیدگی فیزیولوژیکی به‌صورت هفتگی ثبت شدند. علاوه بر این، صفات بیومتریکی شامل وزن هزار دانه (TGW)، زیست‌توده هوایی، و شاخص برداشت برای پشتیبانی از واسنجی و اعتبارسنجی مدل اندازه‌گیری شدند.

اجرای روش AEZ

این مدل یک رویکرد اکوفیزیولوژیک مرحله‌به‌مرحله است که برای هر واحد اراضی، ابتدا عملکرد بالقوه، سپس عملکرد آب‌محدود و در نهایت عملکرد قابل‌دستیابی را محاسبه می‌کند.

برآورد عملکرد بالقوه (Y_p)

در گام نخست، طول دوره رشد گندم دیم بر اساس تعادل بارش و تبخیر-تعرق پتانسیل تعیین و تقویم کشت متناسب با شرایط منطقه انتخاب شد. سپس عملکرد بالقوه دانه از ترکیب روابط تولید خالص زیست توده و تنفس، با اعمال شاخص برداشت مرجع، به صورت زیر محاسبه می گردد (Kassam, 1977; Fischer et al., 2012).

$$Y_p = (0.36 \text{ bgm} \times L) \times H_i / (1/N + 0.25 \text{ ct}) \quad \text{رابطه ۱)}$$

که در آن bgm حداکثر نرخ تولید ناخالص زیست توده در پوشش کامل گیاه ($\text{kg ha}^{-1} \text{ day}^{-1}$)، L نسبت رشد، H_i شاخص برداشت، N طول دوره رشد (روز) و c_t ضریب تنفس نگهداری وابسته به دما (day^{-1})

مقدار bgm بر اساس حداکثر نرخ خالص تبادل CO_2 برگ (p_m)، کسری از روز ابری (F) و نرخ های تولید ماده خشک در روزهای ابری و آفتابی (b_o و b_c) برای این منطقه از رابطه استاندارد AEZ محاسبه می شود (Fischer et al., 2012; De Wit, 1965):

$$\text{bgm} = F(0.8 + 0.01P_m)b_o + (1 - F)(0.5 + 0.025P_m)b_c \quad \text{رابطه ۲)}$$

در دمای 10°C درجه سانتیگراد، فاکتور c_{30} برای گیاهان زراعی لگومینه برابر با 0.283 و برای گیاهان زراعی غیر لگومینه برابر با 0.108 است. وابستگی دمایی c_t برای هر دو گروه گیاه زراعی با یک تابع درجه دوم مدل شده است:

$$c_t = c_{30} (0.0044 + 0.0019 T + 0.0010 T^2) \quad \text{رابطه ۳)}$$

کلیه پارامترهای ورودی (F, b_o, b_c, P_m, T, N) از داده های هواشناسی روزانه و جداول استاندارد AEZ استخراج گردیدند (FAO/IIASA, 2021). این فرایند نشان دهنده حداکثر ظرفیت تولید در غیاب محدودیت های آبی و خاکی است.

برآورد عملکرد آب محدود

در این مرحله، اثر محدودیت رطوبتی بر عملکرد بالقوه با استفاده از رابطه هوئرنبوس-کاسام (Doorenbos & Kassam, 1979) اعمال می گردد. عملکرد آب محدود (Y_w) از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$Y_w = Y_p \times [1 - K_y \times (1 - E_t a / E_t c)] \quad \text{رابطه ۴)}$$

که در آن K_y ضریب واکنش محصول به تنش آبی، $E_t a$ تبخیر-تعرق واقعی در کل فصل رشد و $E_t c$ تبخیر-تعرق پتانسیل محصول در شرایط بدون تنش.

تبخیر-تعرق مرجع ($E_t o$) به روش فائو-پنمن-مانتیت (Allen et al., 1998) برآورد گردید و $E_t c$ از حاصل ضرب $E_t o$ در ضریب گیاهی (K_c) به دست آمد. بیلان آب خاک به صورت ده روزه با در نظر گرفتن بارش مؤثر (روش USDA-SCS) و ظرفیت نگهداری آب خاک شبیه سازی شد.

عملکرد قابل دستیابی

در گام نهایی، اثر محدودیت های ادافیکی (خاک و توپوگرافی) بر عملکرد آب محدود اعمال می گردد. برای این منظور، شاخص ادافیکی (I_{ed}) بر اساس هفت عامل محدودکننده توپوگرافی، سیل گیری، وضعیت زهکشی، ترکیب بافت - قطعات درشت - عمق، و ۳ رتبه بندی حاصلخیزی (کربنات کلسیم، سولفات کلسیم و شوری-قلیائیت) محاسبه شد. هر یک از این عوامل بر اساس جداول نیازمندی گندم (Sys et al., 1993) در مقیاس ۰ تا ۱۰۰ نمره دهی شده و سپس شاخص ادافیکی با استفاده از روش ریشه دوم (Khiddir, 1986) به صورت زیر محاسبه گردید:

$$I_{ed} = R_{min} \times \sqrt{\frac{A}{100} \times \frac{B}{100} \times \frac{C}{100} \times \dots} \quad \text{رابطه ۵}$$

در این رابطه R_{min} کمترین امتیاز در میان ویژگی‌های ادافیکی (شدیدترین محدودیت)، C, B, A, ... امتیاز اختصاص داده شده به هر یک از خصوصیات ادافیکی است.

در این روش، اثر شدیدترین محدودیت به طور مستقیم و اثر سایر محدودیت‌ها به صورت غیرمستقیم در شاخص نهایی منعکس می‌شود. در نهایت، عملکرد قابل دستیابی (Y_{att}) برای هر واحد اراضی از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$Y_{att} = Y_w \times I_{ed} \quad \text{رابطه ۶}$$

توجه می‌شود که عوامل اقلیمی و تنش آبی پیش‌تر در مراحل قبلی (Y_w و Y_p) اعمال شده بودند و این مرحله فقط محدودیت‌های ادافیکی را وارد می‌کند. مقادیر I_{ed} بین ۰ تا ۱ متغیر است که ۱ نشان‌دهنده عدم محدودیت ادافیکی و مقادیر کمتر از ۱ بیانگر درجات مختلف محدودیت خاک و توپوگرافی است.

روش آکواکراپ

مدل آکواکراپ (نسخه ۷) یک مدل فرایندمحور و مبتنی بر موتور رشد آب‌محور است که توسط FAO برای شبیه‌سازی رشد گیاهان علفی در شرایط تنش آبی توسعه یافته است (Steduto et al., 2009; Raes et al., 2009). این مدل با حفظ توازن میان سادگی، دقت و استحکام، تنها به تعداد محدودی پارامتر ورودی نیاز دارد و به‌ویژه برای شرایطی که داده‌های مزرعه‌ای محدود است، مناسب است. هسته اصلی آکواکراپ بر پایه یک معادله ساده تراز آب خاک و یک تابع رشد پوشش تاج‌پوشش^۷ (CC) بنا شده و چهار جزء کلیدی آن شامل: (۱) ET_0 ، (۲) توسعه تاج‌پوشش، (۳) تبخیر از خاک (E_s)، و (۴) تعرق گیاه (T_r) می‌باشد. مراحل اصلی شبیه‌سازی و معادلات حاکم به شرح زیر است:

داده‌های ورودی و پارامترسازی مدل

ورودی‌های مدل در چهار گروه اصلی سازمان‌دهی شدند: (الف) داده‌های اقلیمی شامل دمای حداقل و حداکثر روزانه، بارندگی، ET_0 محاسبه شده به روش فائو-پنمن-مانتیت (Allen et al., 1998) و میانگین غلظت CO_2 اتمسفری سالانه؛ (ب) پارامترهای فنولوژیک گندم دیم رقم آذر ۲، شامل طول مراحل رشد بر حسب درجه-روز رشد (جدول ۱)، پارامترهای توسعه پوشش تاج‌پوشش (پوشش اولیه CC_0 ، ضریب رشد CGC ، ضریب زوال CDC ، حداکثر پوشش CC_x ، ضریب تعرق گیاه (K_{CTr})، بهره‌وری آب نرمال شده (WP^*) و شاخص برداشت مرجع (HI_0) که بر اساس مقادیر پیش‌فرض فائو برای گندم زمستانه و تطبیق با شرایط محلی تنظیم گردید؛ (ج) داده‌های خاک شامل ظرفیت زراعی، نقطه پژمردگی دائم، هدایت هیدرولیکی اشباع و عمق پروفیل به‌صورت افقی‌های خاک به مدل معرفی شدند؛ (د) داده‌های مدیریت زراعی شامل تاریخ کشت، تراکم بوته، مدیریت آیش و عدم کاربرد آبیاری (شرایط دیم).

جدول ۱. مراحل فنولوژیکی گندم دیم (رقم آذر ۲)

پارامترهای گیاهی	درجه روز رشد (GDD)	روز
زمان کاشت تا ظهور (سبز شدن)	۱۸۰	۱۶

⁷ Canopy Cover

۱۷۵	۹۰۰	زمان کاشت تا رسیدن به حداکثر عمق ریشه
۲۲۹	۱۴۵۰	زمان کاشت تا رسیدن به حداکثر پوشش گیاهی
۱۹۸	۱۱۹۰	زمان کاشت تا گل‌دهی
۱۳	۲۰۰	دوره گل‌دهی
۲۳۰	۱۷۰۵	زمان کاشت تا شروع پیری (خزان) گیاه
۲۵۵	۲۲۵۰	زمان کاشت تا رسیدگی کامل گیاه

واسنجی مدل

پارامترهای گیاهی مورد نیاز مدل AquaCrop برای رقم گندم آذر ۲ بر اساس مطالعه (Tavakoli et al., 2010) تعیین گردید. ایشان این پارامترها را برای شرایط نیمه‌خشک کالیبره و اعتبارسنجی کرده بودند. در پژوهش حاضر، از مقادیر کالیبره‌شده آن مطالعه به عنوان پارامترهای اولیه استفاده شد. پارامترهای غیرمحافظة کارانه (مانند پوشش اولیه گیاه، تاریخ‌های فنولوژیک و ویژگی‌های هیدرولیکی خاک) از مشاهدات میدانی واحدهای اراضی منطقه حلب استخراج گردیدند. پارامترهای محافظة کارانه شامل WP^* ، HI_0 ، CGC ، CDC و ضرایب تنش آبی نیز مطابق با مقادیر توصیه‌شده توسط (Tavakoli et al., 2010) و با اعتبارسنجی اولیه در منطقه حلب مورد تأیید قرار گرفتند.

جدول ۲. پارامترهای کالیبراسیون مدل آکواکراپ برای شبیه‌سازی عملکرد گندم دیم (به نقل از Tavakoli et al., 2010)

پارامترهای گیاهی	واحد	مقدار	روش
دمای پایه (T_{base})	درجه سانتی‌گراد	۰	پیش‌فرض
دمای قطع رشد ($T_{cut\ off}$)	درجه سانتی‌گراد	۲۶	پیش‌فرض
پوشش اولیه گیاه (CC_0)	درصد	۴/۸	اندازه‌گیری
پوشش حداکثر گیاهی (CC_x)	درصد	۰/۸۲	کالیبراسیون
ضریب رشد گیاه (CGC)	درصد در روز	۰/۲۹	کالیبراسیون
ضریب کاهش پوشش گیاهی (CDC)	درصد در روز	۰/۴۱	کالیبراسیون
ضریب تبخیر - تعرق گیاهی زمانی که پوشش کامل است	-	۰/۸۳	کالیبراسیون
کاهش ضریب پوشش پس از رسیدن به پوشش بیشینه	-	۰	کالیبراسیون
بهره‌وری نسبی آب (WP^*)	گرم بر مترمربع	۴/۵	کالیبراسیون
آستانه بالای تخلیه رطوبت خاک برای رشد گیاه (P_{upper})	-	۰/۱۲	کالیبراسیون
آستانه پایین تخلیه رطوبت خاک برای رشد گیاه (P_{lower})	-	۰/۷۷	کالیبراسیون
ضریب شکل‌دهی منحنی تنش آبی برای رشد گیاه	-	۴/۱	کالیبراسیون
آستانه بالای تخلیه رطوبت خاک برای بسته شدن روزنه‌ها	-	۰/۱۹	کالیبراسیون
ضریب شکل‌دهی منحنی تنش آبی برای بسته شدن روزنه‌ها	-	۰/۷	کالیبراسیون
آستانه بالای تخلیه رطوبت خاک برای پیر شدن گیاه (ریزش برگ)	-	۰/۴۱	کالیبراسیون
ضریب شکل‌دهی منحنی تنش آبی برای پیر شدن گیاه	-	۵	کالیبراسیون
شاخص برداشت مرجع	درصد	۴۸	کالیبراسیون

فرایند واسنجی به‌ترتیب گام‌به‌گام برای چهار جزء کلیدی مدل انجام شد (Hsiao et al., 2009): (۱) CC با تنظیم CGC و CDC ; (۲) زیست‌توده هوایی (B) با تنظیم WP^* ; (۳) عملکرد دانه (Y) با تنظیم HI_0 و ضرایب تنش مؤثر بر شاخص برداشت؛ و (۴) رطوبت خاک با تنظیم آستانه‌های تنش آبی. در هر گام، مقادیر شبیه‌سازی‌شده با اندازه‌گیری‌های میدانی متناظر مقایسه و پارامترها تا حصول بهترین تطابق ممکن تعدیل گردیدند.

شبیه‌سازی توسعه تاج‌پوشی و تعرق

در مدل AquaCrop، توسعه پوشش CC به عنوان موتور اصلی جذب نور و تعرق، در دو فاز اصلی شبیه‌سازی فاز اول شامل رشد نمایی از CC_0 تا CC_x است:

$$CC = CC_0 \times e^{(CGC \times t)} \quad \text{رابطه ۷}$$

و در فاز کاهشی نزدیک به حداکثر پوشش:

$$CC = CC_x \times [1 - \exp(K_{cc} \times t)] \quad \text{رابطه ۸}$$

که t زمان (روز) و K_{cc} ضریب توسعه پوشش است. تنش آبی از طریق کاهش ضریب تنش (K_s) موجب کندی گسترش CC و تسریع پیری زودرس تاج‌پوشش می‌گردد.

T_r بر اساس پوشش تاج‌پوشش، ET_0 و ضریب تعرق گیاه (K_{cTr}) محاسبه می‌شود:

$$T_r = K_s \times K_{cTr} \times CC \times ET_0 \quad \text{رابطه ۹}$$

که K_s ضریب تنش آبی (تابعی از رطوبت قابل دسترس خاک و شوری)، K_{cTr} ضریب تعرق گیاه (متناسب با CC). E_s نیز به‌طور جداگانه و متناسب با CC محاسبه می‌گردد.

تولید زیست‌توده و عملکرد

اساس رویکرد آکواراپ در برآورد زیست‌توده، رابطه خطی بین B و مجموع تعرق گیاه (ΣT_r) نرمال شده با ET_0 است که از طریق WP به یکدیگر مرتبط می‌شوند (Steduto et al., 2007):

$$B = WP^* \times \Sigma(T_r / ET_0) \quad \text{رابطه ۱۰}$$

عملکرد دانه (Y) از حاصل ضرب زیست‌توده کل در شاخص برداشت به‌دست می‌آید:

$$Y = HI \times B \quad \text{رابطه ۱۱}$$

شاخص برداشت خود تابعی از تنش‌های آبی (به‌ویژه در مرحله گرده‌افشانی) و دمایی است و با استفاده از روابط داخلی مدل به‌صورت روزانه تعدیل می‌شود.

تعیین کلاس‌های تناسب کمی اراضی

برای تبدیل برآوردهای کمی عملکرد حاصل از مدل‌های AEZ و AquaCrop به کلاس‌های تناسب اراضی، از روش ساینز (Sys et al., 1993) استفاده شد. این روش، مرزهای کلاس‌های تناسب را بر اساس دو پارامتر کلیدی عملکرد پتانسیل و عملکرد بحرانی (Y_c) تعیین می‌کند (Sys et al., 1991; Sys et al., 1993). عملکرد پتانسیل نشان‌دهنده حداکثر تولید قابل‌دستیابی در شرایط بهینه است و عملکرد بحرانی، حداقل عملکرد اقتصادی قابل‌قبول را مشخص می‌کند که در صورت کاهش عملکرد به کمتر از آن، تولید توجیه اقتصادی خود را از دست می‌دهد. برای تعیین عملکرد بحرانی، ابتدا کل هزینه‌های تولید در هکتار (شامل بذر، کود، سم، سوخت، نیروی

کار، اجاره زمین و سایر هزینه‌های عملیاتی) برآورد شده و سپس با تقسیم آن بر قیمت فروش محصول به ازای هر کیلوگرم، نقطه سربه‌سر تولید محاسبه می‌شود (Rossiter, 1995).

حدود کلاس‌های تناسب با استفاده از روابط زیر محاسبه شدند (Sys et al., 1991):

الف) مرز S1/S2: $0.75 \times Y_p$

ب) مرز S2/S3: $Y_c + (0.40 \times Y_c)$

ج) مرز S3/N: $Y_c - (0.10 \times Y_c)$

شایان ذکر است که مرز بین کلاس‌های S3 و N اساساً یک آستانه اقتصادی است، نه فیزیکی، زیرا در این نقطه تصمیم‌گیری بر اساس مقایسه هزینه‌ها و درآمدهای حاصل از تولید صورت می‌گیرد و نه صرفاً ویژگی‌های اراضی یا رشد محصول (Rossiter, 1995; FAO, 1993).

پس از تعیین حدود کلاس‌های تناسب بر اساس آستانه‌های عملکرد، برای هر یک از ۱۱ پروفیل خاک، عملکرد پیش‌بینی‌شده توسط دو مدل AEZ و AquaCrop با حدود تعیین‌شده مقایسه گردید و کلاس تناسب کمی هر واحد مشخص شد. به این ترتیب، برای هر واحد اراضی دو کلاس تناسب مجزا بر اساس خروجی هر یک از مدل‌ها به‌دست می‌آید. این رویکرد، مطابق با چارچوب ارزیابی کمی اراضی فائو است که در آن کلاس‌های تناسب بر اساس آستانه‌های عملکرد تعیین می‌شوند (Sys et al., 1991; FAO, 1976; Khiddir, 1986; Rossiter, 1995).

اعتبارسنجی مدل و ارزیابی عملکرد

به‌منظور ارزیابی دقت و قابلیت پیش‌بینی مدل‌های AEZ و AquaCrop، مقادیر شبیه‌سازی‌شده عملکرد دانه توسط هر مدل با داده‌های مشاهده‌ای مزرعه‌ای مقایسه گردید تا مشخص گردد کدام مدل، تطابق بیشتری با واقعیت دارد و از دقت بالاتری در تفکیک اراضی مناسب از نامناسب برخوردار است. برای ارزیابی عملکرد مدل‌ها، از شاخص‌های آماری میانگین قدر مطلق خطا (MAE) (رابطه ۱۲)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) (رابطه ۱۳)، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال‌شده (nRMSE) (رابطه ۱۴)، مجذور ضریب همبستگی (R^2) (رابطه ۱۵) و ضریب تعیین (R^2) (رابطه ۱۶) استفاده شد. در این مطالعه، ضریب تعیین (R^2) بر اساس رابطه $R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST}$ محاسبه شد، در حالی که R^2 از مجذور ضریب همبستگی پیرسون بین مقادیر مشاهده‌شده و پیش‌بینی‌شده به‌دست آمد. مقادیر کمتر MAE، RMSE و nRMSE نشان‌دهنده دقت بیشتر مدل در پیش‌بینی عملکرد محصول هستند، در حالی که مقادیر R^2 و r^2 بیانگر همبستگی قوی‌تر، تطابق بهتر و توانایی بیشتر مدل در تبیین تغییرات داده‌های مشاهده‌شده هستند. علاوه بر این، به‌منظور ارزیابی بصری عملکرد مدل‌ها، نمودارهای پراکنش بین مقادیر مشاهده‌شده و پیش‌بینی‌شده همراه با خط برابری (۱:۱) ترسیم شد تا میزان انحراف پیش‌بینی‌ها از حالت ایده‌آل به‌صورت گرافیکی بررسی شود.

(رابطه ۱۲)

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |O_i - P_i|$$

رابطه ۱۳)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}$$

رابطه ۱۴)

$$nRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}}{\bar{O}} \times 100$$

رابطه ۱۶)

$$r^2 = \frac{(\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P}))^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}$$

رابطه ۱۷)

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}$$

که در آن O_i عملکرد مشاهده شده، P_i عملکرد پیش‌بینی شده، $\bar{O}$ میانگین عملکردهای مشاهده شده، $\bar{P}$ میانگین عملکردهای پیش‌بینی شده و n تعداد مشاهدات است.

یافته‌های پژوهش

ویژگی‌های اقلیمی و خاکی منطقه مورد مطالعه

داده‌های هواشناسی دو فصل رشد ۲۰۲۲-۲۰۲۳ (سال اول) و ۲۰۲۳-۲۰۲۴ (سال دوم) به صورت مجموع یا میانگین ماهانه در جدول ۳ ارائه شده است. آمار توصیفی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک ۱۱ پروفیل منطقه نیز در جدول ۴ آمده است.

جدول ۳. تغییرات ماهانه بارندگی (P)، تبخیر-تعرق مرجع (ETo)، دمای کمینه و بیشینه و درجه-روز رشد (GDD) در دو فصل رشد.

ماه	P (mm)		ETo (mm)		Tmin (°C)		Tmax (°C)		GDD	
	۲۰۲۳-۲۰۲۲	۲۰۲۴-۲۰۲۳	۲۰۲۲-۲۰۲۳	۲۰۲۴-۲۰۲۳	۲۰۲۲-۲۰۲۳	۲۰۲۴-۲۰۲۳	۲۰۲۲-۲۰۲۳	۲۰۲۴-۲۰۲۳	۲۰۲۲-۲۰۲۳	۲۰۲۴-۲۰۲۳
Oct	۱۱/۶	۲/۳	۹۹/۹	۸۸/۴	۵/۵	۶/۳	۲۶/۱	۲۳	۱۰/۲	۹/۲
Nov	۲۳/۴	۳۴/۱	۴۵/۸	۵۰/۵	-۰/۶	۲/۹	۱۵/۶	۱۶/۸	۱/۲	۴/۵
Dec	۹/۸	۱۶/۶	۲۴/۸	۳۱/۲	-۳	-۱/۵	۷/۶	۱۲/۳	۰/۲	۰/۹
Jan	۳۹/۲	۲۹/۵	۲۲/۳	۳۶/۳	-۶/۶	-۲	۱/۷	۱	۰	۰/۳
Feb	۴۴/۲	۴۷/۶	۳۷/۶	۴۱/۹	-۷/۲	-۲/۶	۵/۸	۹/۹	۰/۹	۰/۷
Mar	۱۰۱/۷	۷۳/۱	۷۷/۳	۸۱/۷	۳/۲	-۰/۱	۱۶/۳	۱۵/۹	۳/۸	۲/۸
Apr	۷۶	۲۸/۸	۱۱۸	۱۲۹/۵	۳/۹	۴/۹	۲۰/۹	۲۴/۱	۷	۹
May	۴۶/۸	۴۷/۵	۱۴۴/۶	۱۵۲/۵	۷/۱	۸/۸	۲۵/۳	۲۶/۷	۱۰/۷	۱۱/۸
Jun	۷/۵	۳۰/۵	۱۸۹/۵	۲۰۵/۹	۱۰/۹	۱۴/۹	۳۳/۸	۳۵/۹	۱۴/۸	۱۶/۹
Jul	۷/۲	۱	۲۳۰/۴	۲۳۶/۲	۱۷/۳	۱۹	۳۷/۲	۳۹/۸	۱۸/۲	۱۹

آمار توصیفی ویژگی‌های خاک بر اساس مقادیر میانگین وزنی مستقیم پروفیل‌های خاک تا عمق ۱۰۰ سانتی‌متر محاسبه شد. بدین منظور، برای هر پروفیل، مقادیر ویژگی در هر افق در ضخامت مؤثر آن افق (تا عمق ۱۰۰ سانتی‌متر) ضرب و حاصل جمع این مقادیر بر مجموع ضخامت مؤثر افق‌ها (۱۰۰ سانتی‌متر) تقسیم گردید تا یک مقدار معرف برای آن پروفیل به دست آید.

جدول ۴. آمار توصیفی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک منطقه مورد مطالعه

پارامتر	واحد	میانگین	انحراف معیار	حداقل	میان	حداکثر	ضریب تغییرات (%)
رس (Clay)	%	۳۲/۸	۹/۷	۸/۲	۶/۳	۸۵/۴	۶۵۶/۲
سیلت (Silt)	%	۴۱/۹	۱۲/۱	۸/۲	۴۲/۸۲۵	۵۸/۴	۲۹/۰
شن (Sand)	%	۲۶/۹	۱۷/۹	۷/۱	۲۳/۸	۵۶/۸	۶۶/۴
واکنش خاک (pH)	=	۷/۹۱	۰/۱۵۲	۷/۷۳	۷/۹۱	۸/۱۹	۱/۹۲
هدایت الکتریکی (EC)	dS/m	۲/۹۴	۷/۱۲۷	۰/۲۹	۰/۷۴	۲۳/۲۰	۲۴۲/۲۹
نسبت جذب سدیم (SAR)	-	۲/۷۱	۸/۵۷	۰	۰	۲۷/۱	۳۱۶/۲۲
کربنات کلسیم (CCB)	%	۲۲/۲۷	۴/۵۲	۱۵/۰۷	۲۱/۹۲	۳۱	۲۰/۳۰
تج (GYP)	%	۰/۴۵	۱/۰۹۲	۰	۰	۳/۴۴	۲۴۱/۵۳
کربن آلی (SOC)	%	۰/۳۷	۰/۱۳۲	۰/۱۵	۰/۴۱۹	۰/۵۶	۳۵/۰۴
ظرفیت زراعی (FC)	%	۰/۳۳	۰/۰۴۸	۰/۳	۰/۳	۰/۴	۱۴/۶۴
نقطه پژمرده گی (PWP)	%	۰/۱۸	۰/۰۴۲	۰/۱	۰/۲	۰/۲	۲۳/۴
درصد اشباع (SP)	%	۴۲/۳	۷/۳۸	۲۹/۳	۴۱/۷	۵۳/۴	۱۷/۴

نتایج پیش‌بینی عملکرد گندم دیم با روش‌های AEZ و AquaCrop

عملکرد پتانسیل گندم دیم بر اساس مدل تشعشعی-حرارتی AEZ برای دو فصل زراعی ۲۰۲۲-۲۰۲۳ و ۲۰۲۳-۲۰۲۴ به ترتیب ۴/۹۴۷ و ۴/۸۰۸ تن در هکتار محاسبه شد پس از محاسبه ET_0 و اعمال ضریب واکنش گیاه ($K_y=1.05$) مطابق رابطه دوئرنوس-کسام، Y_w محاسبه شد. مقادیر Y_w به ترتیب ۲/۷۵۵ و ۲/۱۸۶ تن در هکتار به دست آمد. همچنین، عملکرد پتانسیل شبیه‌سازی شده توسط مدل AquaCrop به ترتیب ۵/۰۲ و ۴/۹۹ تن در هکتار برای هر دو سال زراعی به دست آمد. پارامترهای اقلیمی و آبی محاسبه شده برای این دو فصل در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول ۵. مقادیر ET_0 و ET_a در چرخه رشد محصول برای دو فصل زراعی.

پارامتر	واحد	۲۰۲۳-۲۰۲۲	۲۰۲۴-۲۰۲۳
تبخیر-تعرق مرجع (ET_0)	میلی‌متر	۶۰۵	۶۰۹
بارش (P)	میلی‌متر	۳۶۰	۳۰۸
تبخیر-تعرق واقعی (ET_a)	میلی‌متر	۳۳۴	۲۷۷

عملکرد پیش‌بینی شده گندم دیم با روش‌های AEZ و AquaCrop برای ۱۱ پروفیل خاک در جدول ۶ ارائه شده است. در روش AEZ، عملکرد قابل دستیابی از حاصل‌ضرب Y_w در شاخص ادا فیکه محاسبه گردید.

جدول ۶. عملکرد واقعی و پیش‌بینی شده گندم دیم با استفاده از روش‌های AEZ و AquaCrop در ۱۱ پروفیل خاک

واحد اراضی	شاخص ادا فیکه	عملکرد پیش‌بینی شده AEZ (t/ha)	عملکرد پیش‌بینی شده AquaCrop (t/ha)	عملکرد واقعی (t/ha)
۶	۸۰/۰	۲/۱۸۵	۲/۰۷۸	۲/۱۷۶
۹	۸۴/۱	۲/۲۹۶	۲/۰۶۰	۲/۰۳۶
۵	۸۴/۱	۲/۲۹۶	۱/۶۷۴	۲/۰۵۳
۳	۶۴/۹	۱/۷۷۳	۱/۶۷۰	۱/۹۲۸
۱۰	۶۷/۳	۱/۴۷۲	۱/۹۰۶	۱/۸۹۴

۱/۸۴۱	۱/۷۱۰	۱/۸۶۰	۸۵/۱	۷
۱/۸۸۳	۱/۹۹۱	۲/۳۷۲	۸۶/۸	۲
۱/۸۴۶	۱/۶۵۸	۱/۷۷۳	۶۴/۹	۸
۱/۶۳۸	۱/۸۲۱	۱/۶۱۲	۵۹/۰	۴
۱/۰۳۶	۰/۷۷۱	۰/۸۸۲	۴۰/۳	۱
۱/۳۱۲	۱/۳۶۸	۱/۴۱۶	۶۴/۷	۱۱

به منظور تعیین کلاس‌های تناسب کمی اراضی برای گندم دیم رقم آذر ۲ در منطقه حلب، ابتدا عملکرد پتانسیل برای هر یک از مدل‌های AEZ و AquaCrop و عملکرد بحرانی بر اساس نتایج تحلیل اقتصادی تعیین شد. سپس با استفاده از معیار پیشنهادی Sys، حدود مرزی کلاس‌های تناسب کمی (S1، S2، S3 و N) محاسبه گردید که نتایج آن در جدول ۷ ارائه شده است.

جدول ۷. حدود عملکرد کلاس‌های تناسب کمی اراضی بر اساس مدل‌های AEZ و AquaCrop

مرز S3/N	مرز S2/S3	مرز S1/S2	Yc (t/ha)	Yp (t/ha)	مدل
۰/۳۷۱	۰/۵۷۷	۳/۷۶۵	۰/۴۱۲	۵/۰۲	AquaCrop (2022–2023)
۰/۳۷۱	۰/۵۷۷	۳/۷۴۳	۰/۴۱۲	۴/۹۹	AquaCrop (2023–2024)
۰/۳۷۱	۰/۵۷۷	۳/۶۰۶	۰/۴۱۲	۴/۸۰۸	AEZ (2022–2023)
۰/۳۷۱	۰/۵۷۷	۳/۷۱	۰/۴۱۲	۴/۹۴۷	AEZ (2023–2024)

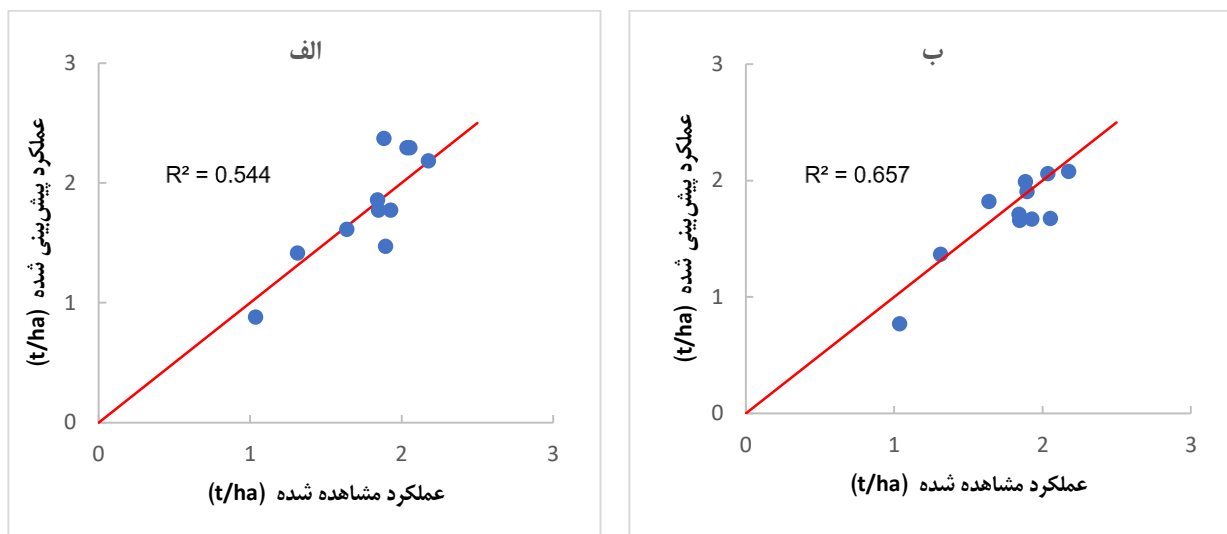
با اعمال این حدود بر عملکردهای پیش‌بینی‌شده هر واحد اراضی نتایج نشان داد که عملکرد پیش‌بینی‌شده تمامی ۱۱ واحد اراضی بین مرزهای S1/S2 و S2/S3 قرار داشته و در نتیجه، همه واحدهای اراضی در کلاس تناسب متوسط (S2) طبقه‌بندی شدند.

دقت پیش‌بینی عملکرد AEZ و AquaCrop

شاخص‌های آماری شامل MAE، RMSE، nRMSE، r^2 و R^2 برای دو روش AEZ و AquaCrop در جدول ۸ ارائه شده است. نمودارهای پراکنش مقادیر مشاهده‌شده در برابر پیش‌بینی‌شده برای هر دو روش در شکل ۲ نشان داده شده است.

جدول ۸. شاخص‌های آماری مقایسه عملکرد پیش‌بینی‌شده دو روش با مقادیر واقعی

روش	MAE (t/ha)	RMSE (t/ha)	nRMSE	r^2	R^2
AEZ	۰/۱۷۸	۰/۲۳۵	۱۳/۱۷	۰/۷۲۸	۰/۵۴۴
AquaCrop	۰/۱۵۵	۰/۱۸۹	۱۰/۵۷	۰/۷۷۷	۰/۶۵۷



شکل ۲. نمودارهای پراکنش عملکرد مشاهده‌ای در مقابل عملکرد پیش‌بینی‌شده: (الف) AEZ و (ب) AquaCrop

بحث

نتایج نشان داد که هر دو رویکرد AEZ-فانو و مدل AquaCrop توانایی پیش‌بینی عملکرد گندم دیم را در منطقه مورد مطالعه دارند، اما مدل AquaCrop با مقادیر RMSE برابر ۰/۱۸۹ تن در هکتار و nRMSE برابر ۱۰/۵۷٪ نسبت به روش AEZ با مقادیر ۰/۲۳۵ و ۱۳٪/۱۷ از دقت بالاتری برخوردار است و بر اساس معیارهای متداول ارزیابی مدل، هر دو روش در طبقه «خوب» قرار می‌گیرند. همچنین، مجذور ضریب همبستگی بین مقادیر مشاهده‌شده و پیش‌بینی‌شده در هر دو مدل نسبتاً بالا بود (AquaCrop: $r^2 = 0.777$; AEZ: $r^2 = 0.728$) که نشان‌دهنده توانایی مناسب هر دو مدل در بازتولید روند تغییرات عملکرد است. با این حال، مقادیر ضریب تعیین نشان داد که مدل AquaCrop تنها حدود ۶۶ درصد و مدل AEZ حدود ۵۴ درصد از تغییرات عملکرد را تبیین می‌کنند؛ بنابراین، به ترتیب حدود ۳۴ درصد و ۴۶ درصد از تغییرات عملکرد ناشی از عواملی است که در این مدل‌ها لحاظ نشده‌اند یا به خطاهای مدل بازمی‌گردد. تفاوت قابل توجه بین r^2 و R^2 در مدل AEZ ($r^2 = 0.728$ در مقابل $R^2 = 0.468$) نشان‌دهنده وجود خطای سیستماتیک (سوگیری) در پیش‌بینی‌های این مدل است؛ به این معنا که اگرچه مدل روند تغییرات عملکرد را به خوبی دنبال می‌کند، اما در مقادیر مطلق، خطای قابل توجهی دارد، در حالی که برای مدل AquaCrop، این اختلاف $r^2 = 0.777$ در مقابل $R^2 = 0.657$ بسیار کمتر بوده و بیانگر عملکرد پایدارتر آن در برآورد مقادیر مطلق عملکرد است (Willmott, 1982; Legates & McCabe, 1999).

برتری مدل AquaCrop عمدتاً به ساختار آب‌محور آن بازمی‌گردد که تنش آبی را به صورت پویا و روزانه و با تفکیک تبخیر از خاک و تعرق گیاه شبیه‌سازی می‌کند (Kaissi et al. 2024). در این مدل، پاسخ گیاه به تنش آبی از طریق سه ضریب تنش مجزا (برای گسترش پوشش گیاهی، بسته شدن روزنه‌ها و پیری زودرس) بازنمایی می‌شود که امکان شبیه‌سازی اثر زمان، شدت و تداوم تنش را در مراحل مختلف فنولوژیک فراهم می‌کند (Oulaid et al. 2024). در مقابل، روش AEZ از یک ضریب کاهش نسبتاً ایستا (۴ مرحله‌ای) و نسبت تجمعی ET_a/ET_c استفاده می‌کند (Fischer et al., 2021) که نمی‌تواند اثر زمان وقوع خشکی در مراحل حساس (مانند گرده‌افشانی یا پر شدن دانه) را به طور دقیق منعکس سازد. در مناطق نیمه‌خشک که الگوی بارندگی نامنظم و توزیع زمانی رطوبت از سالی به سال دیگر متفاوت است، رویکرد پویای AquaCrop واقعیت مزرعه را بهتر بازنمایی می‌کند. مطالعات بین‌المللی (Oulaid et al., 2024; Alvar-Beltrán et al., 2023) نیز این برتری را تأیید کرده‌اند.

با وجود عملکرد بهتر، مدل AquaCrop محدودیت مهمی در لحاظ نکردن مستقیم ویژگی‌های شیمیایی خاک مانند گچ، کربنات کلسیم، SAR و pH دارد و تأثیر این پارامترها تنها زمانی ظاهر می‌شود که از طریق تغییر در خصوصیات هیدرولیکی بر روابط آب-خاک اثر بگذارند (Raes et al., 2009; Vanuytrecht et al., 2014)؛ این کاستی می‌تواند بخش قابل توجهی از تغییرات تبیین نشده توسط این مدل را توجیه کند. به موازات آن، روش AEZ نیز با ساده‌سازی‌های ساختاری عمیق‌تری همچون استفاده از پارامترهای ثابت (عمق ریشه و شاخص سطح برگ) و چشم‌پوشی از اثرات متقابل محدودیت‌ها، اساساً برای شبیه‌سازی مدیریت‌های دقیق و نقطه‌ای مانند تراکم بوته در مزرعه طراحی نشده و کاربرد اصلی آن به مطالعات پهنه‌بندی کلان محدود می‌شود (Paff & Asseng, 2018; Fischer et al., 2012). به این ترتیب، هر دو رویکرد علیرغم کاربردپذیری در سطوح مختلف، به‌تنهایی قادر به پوشش کامل عوامل مؤثر بر عملکرد نیستند و انتخاب میان آنها باید بر اساس مقیاس مطالعه و هدف پژوهش صورت گیرد.

مقایسه یافته‌های این پژوهش با مطالعات پیشین در ایران و جهان، الگوی کلی برتری نسبی مدل AquaCrop و نیز نقش تعیین‌کننده شرایط محلی را تأیید می‌کند. در مطالعات داخلی، Tavakoli et al. (2010) در حوضه کرخه با استفاده از داده‌های مزرعه‌ای دو ساله و کالیبراسیون مستقیم، به دقت بالایی ($RMSE = 0.16$ تن در هکتار و $nRMSE = 5\%$) دست یافتند که نشان می‌دهد کالیبراسیون محلی با داده‌های باکیفیت می‌تواند خطای مدل را تا حدود نصف کاهش دهد. در مطالعه Khoshsirat et al. (2022) در دشت دهلران (در شرایط آبیاری کامل) دقت مدل بسیار بالا ($R^2 = 0.97$, $nRMSE = 4\%$) گزارش شد که حاکی از عملکرد عالی مدل‌های فرآیندی در نبود تنش آبی است. Bagheri Khaneghani et al. (2025) نیز در شش اقلیم مختلف ایران، دقت قابل قبول AquaCrop را تأیید و بر نقش تاریخ کشت زود هنگام (اواخر مهر) در بهبود عملکرد تأکید کردند. در سطح بین‌المللی، Alvar-Beltrán et al. (2023) در نپال نشان دادند که مدل AquaCrop برای تصمیمات مدیریتی در سطح مزرعه مناسب‌تر است، در حالی که نسخه پایتون روش AEZ (PyAEZ) کاربرد بیشتری در برنامه‌ریزی توسعه کشاورزی در مقیاس وسیع دارد. همچنین، Oulaid et al. (2024) در مراکش با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای برای پارامترسازی مدل، توانستند دقت AquaCrop را تا $R^2 \approx 91\%$ و $RMSE = 0.15$ تن در هکتار افزایش دهند.

در خصوص روش AEZ، مقدار $nRMSE$ محاسبه‌شده در مطالعه حاضر اگرچه در محدوده «خوب» ($10\text{--}20\%$) قرار می‌گیرد، اما مقداری بالاتر از خطای مدل AquaCrop است. این یافته با نتایج پژوهش مقایسه‌ای در نپال (Alvar-Beltrán et al., 2023) همخوانی دارد و نشان می‌دهد که دقت پایین‌تر نسبی AEZ در پیش‌بینی نقطه‌ای عملکرد، ذاتاً به ساختار کلان‌نگر این روش بازمی‌گردد. مقادیر خطای به‌دست‌آمده برای مدل AquaCrop در این پژوهش با نتایج اعتبارسنجی‌های پیشین برای گندم در ایران و جهان قابل قیاس است. Andarzian et al. (2011) در ایران برای گندم آبی مقادیر $RMSE = 0.27$ تن در هکتار، $nRMSE \approx 5\%$ و $R^2 \approx 95\%$ گزارش کردند. Mkhabela and Bullock (2012) در کانادا برای گندم دیم به $RMSE = 0.62$ تن در هکتار و $nRMSE \approx 15\%$ دست یافتند که در محدوده قابل قبول تا خوب ارزیابی می‌شود.

در ارزیابی‌های مبتنی بر شاخص اراضی (روش AEZ)، ثروتی و همکاران (۱۳۹۳) در منطقه خواجه (شمال شرق تبریز) ضریب همبستگی 0.791 را بین پتانسیل تولید برآوردشده با مدل فائو و عملکرد مشاهده‌شده گندم آبی گزارش کردند که اندکی بیشتر از یافته مطالعه حاضر است. در مقابل، Bagherzadeh et al. (2016) در دشت جویین به ضریب تعیین 0.943 دست یافتند که به طور قابل توجهی بالاتر است. این تفاوت را می‌توان به عواملی مانند تفاوت در نوع محصول (آبی در مقابل دیم) و نوع محدودیت‌های ادافیکی در نتیجه و کنترل بیشتر متغیرهای مدیریتی و تنش آبی نسبت داد. همچنین، ایوبی و همکاران (۱۳۸۱) در منطقه برآان شمالی (اصفهان) با استفاده از روش فائو به همبستگی قابل قبولی ($R^2 = 0.76$) بین شاخص اراضی و عملکرد گندم آبی دست یافتند. این مقادیر نشان

می‌دهند که روش AEZ در شرایط مختلف اقلیمی و خاکی ایران از دقت نسبتاً پایداری برخوردار است، هرچند همچنان حدود ۲۰ تا ۳۰ درصد از تغییرات عملکرد توسط آن تبیین نمی‌شود.

با این حال، پژوهش‌های جدیدتر نشان داده‌اند که روش‌های پیشرفته ارزیابی تناسب اراضی می‌توانند دقت بالاتری داشته باشند. به عنوان مثال، [Nabiollahi et al. \(2025\)](#) در غرب ایران نشان دادند که مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره TOPSIS با ضریب همبستگی ۰/۷۳ نسبت به مدل استاندارد فائو با ضریب همبستگی ۰/۶۷، همبستگی بالاتری با عملکرد واقعی گندم دارد. این یافته تأیید می‌کند که به‌کارگیری تکنیک‌های مدرن MCDM می‌تواند دقت ارزیابی تناسب اراضی را در مقایسه با رویکردهای سنتی فائو بهبود بخشد. در همین راستا، [Sarmadian et al. \(2022\)](#) در منطقه کرج-قزوین برای محصول ذرت آبی، هر دو روش پارامتریک (ریشه دوم) و روش امتیازدهی منطقی ترجیحی (LSP) را با داده‌های عملکرد واقعی مقایسه کردند. آن‌ها دریافتند که هر دو روش قادر به تبیین ۸۷ درصد از تغییرات عملکرد هستند ($R^2 \approx 0.87$)، اما روش LSP با مقدار RMSE برابر ۰/۶۳ در مقایسه با روش پارامتریک با RMSE برابر ۰/۷۷، از دقت و خطای کمتری برخوردار است. این یافته‌ها تأکید می‌کند که به‌کارگیری تکنیک‌های نوین (MCDM و LSP) می‌تواند دقت ارزیابی تناسب اراضی را در مقایسه با رویکردهای سنتی فائو بهبود بخشد.

نتایج کلاس‌بندی تناسب نشان داد که با وجود تفاوت اندک در عملکرد پتانسیل برآوردشده توسط مدل‌های AEZ و AquaCrop و بین دو فصل زراعی، تمامی واحدهای اراضی در کلاس S2 قرار گرفتند. این امر نشان می‌دهد که اختلاف بین برآوردهای دو مدل تأثیر محسوسی بر طبقه‌بندی نهایی تناسب کمی نداشته و محدودیت‌های موجود در اراضی منطقه، به‌ویژه بارش و خصوصیات اداپتیکی در کشت دیم، مانع دستیابی به عملکرد متناظر با کلاس S1 شده است. این یافته با نتایج پژوهش‌های پیشین همخوانی دارد؛ به‌طوری که [Sarmadian et al. \(2014\)](#) نیز گزارش کردند که مهم‌ترین عوامل محدودکننده برای کشت گندم دیم، شرایط اقلیمی و توپوگرافی هستند و بیش از ۸۴ درصد از اراضی مورد مطالعه آن‌ها در کلاس S2 قرار گرفته‌اند. در عین حال، قرار گرفتن عملکرد پیش‌بینی‌شده همه واحدهای اراضی بالاتر از عملکرد بحرانی، بیانگر آن است که کشت گندم دیم در تمامی واحدهای مورد مطالعه از نظر اقتصادی قابل توجیه بوده و اراضی منطقه از تناسب کمی متوسط برای این محصول برخوردار هستند. این موضوع با تعریف کلاس MS (تناسب متوسط) در سیستم GAEZ v5 فائو نیز مطابقت دارد که بر اساس آن، تولید در چنین اراضی با وجود محدودیت‌های قابل‌توجه، در صورت وجود قیمت‌های مناسب محصول، همچنان توجیه اقتصادی دارد ([FAO, n.d.; Fischer et al., 2021](#)).

نتیجه‌گیری

این پژوهش با مقایسه‌ی دو رویکرد کمی ارزیابی تناسب اراضی در منطقه‌ی نیمه‌خشک حلب نشان داد که هر دو روش AEZ و AquaCrop از قابلیت مناسبی برای پیش‌بینی گندم دیم برخوردارند، اما مدل AquaCrop با خطای کمتر ($RMSE=0/189$) در مقابل ۰/۲۳۵ تن در هکتار) و توانایی بالاتر در تبیین تغییرات عملکرد ($R^2=0/657$ در مقابل ۰/۵۴۴)، به‌ویژه در کاهش خطای سیستماتیک، از دقت بیشتری برخوردار است. با این حال، بخشی از تغییرات عملکرد توسط هیچ‌یک از دو مدل تبیین نشد که بیانگر نقش عوامل مدیریتی، محیطی و عدم قطعیت‌های موجود در فرآیند مدل‌سازی است. بنابراین، انتخاب باید بر اساس هدف مطالعه باشد؛ به طوری که AquaCrop برای پیش‌بینی در سطح مزرعه و ارائه‌ی توصیه‌های مدیریتی، و AEZ برای پهنه‌بندی منطقه‌ای و تحلیل سناریوهای اقلیمی کاربرد بیشتری دارد.

از منظر طبقه‌بندی تناسب، تمامی واحدهای اراضی با وجود اختلاف اندک در برآورد دو مدل، در کلاس S2 قرار گرفتند که نشان‌دهنده‌ی غلبه‌ی محدودیت‌های اقلیمی و اداپیکه‌ی بر تولید دیم در منطقه است. با این حال، قرار گرفتن عملکرد پیش‌بینی‌شده‌ی همه‌ی واحدها بالاتر از عملکرد بحرانی (۰,۴۱۲ تن در هکتار)، توجیه اقتصادی کشت گندم دیم را در کل منطقه تأیید می‌کند. مهم‌ترین محدودیت‌های شناسایی‌شده، عدم لحاظ مستقیم ویژگی‌های شیمیایی خاک در مدل AquaCrop و ساده‌سازی روش AEZ در شبیه‌سازی توسعه کانوپی به‌صورت پارامترهای ثابت و همچنین استفاده از ضرایب کاهش تجمعی (ky) است. بر این اساس، توسعه‌ی مدل‌های هیبریدی که شبیه‌سازی پویای تنش آبی را با زیرمدل‌های تغذیه‌ای و ویژگی‌های شیمیایی خاک تلفیق کنند، به عنوان ضرورتی پژوهشی برای افزایش دقت پیش‌بینی در شرایط نیمه‌خشک توصیه می‌شود. همچنین، بهره‌گیری از داده‌های سنجش از دور برای پارامترسازی پویای مدل‌ها در بازه‌های زمانی بلندمدت، می‌تواند عدم قطعیت برآوردها را کاهش داده و مبنای تصمیم‌گیری دقیق‌تری برای کشاورزان و برنامه‌ریزان فراهم آورد. در مجموع، این مطالعه چارچوبی عملی برای انتخاب رویکرد مناسب بر اساس هدف و مقیاس پژوهش ارائه می‌دهد و بر لزوم نگاه ترکیبی به مدل‌سازی و ارزیابی اراضی در مناطق دیم تأکید می‌کند.

منابع

شهیدی، ع.، و بهار فیروزی، خ. (۱۳۸۰). نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ جلب [نقشه]. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور. بازیابی شده از <http://www.gsi.ir/>

دماوندی، ع.، و خاوران، م. (۱۳۷۱). مطالعات خاکشناسی نیمه‌تفصیلی دقیق منطقه ینگی کند جامع السرا استان زنجان (نشریه شماره ۸۵۶). موسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی.

References

- Abrha, B., Delbecque, N., Raes, D., Tsegay, A., Todorovic, M., Heng, L., ... & Deckers, S. (2012). Sowing strategies for barley (*hordeum vulgare* L.) based on modelled yield response to water with aquacrop–corrigendum. *Experimental Agriculture*, 48(3), 472. <https://doi.org/10.1017/S0014479711001303>
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. *Fao, rome*, 300(9), D05109.
- Alvar-Beltran, J., Soldan, R., Vanuytrect, E., Heureux, A., Shrestha, N., Manzanar, R., ... & Franceschini, G. (2023). An FAO model comparison: Python Agroecological Zoning (PyAEZ) and AquaCrop to assess climate change impacts on crop yields in Nepal. *Environmental Development*, 47, 100882. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2023.100882>
- Andarzian, J., 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. *Agricultural Water Management*, 100(1), 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.08.023>
- Ayoubi, S., Givi, J. A. V. A. D., Jalalian, A., & Amini, A. M. (2002). Quantitative land suitability evaluation for wheat, barley, maize and rice cultivation in Northern Baraan (Isfahan). *Journal of Water and Soil Science*, 6(3), 105-119.
- Bagheri Khaneghahi, M., Hezarijari, A., Kamali, M. I., & Zamani, F. (2025). Evaluating the accuracy of AquaCrop7.1 crop model and investigating the effect of changing the planting date on the performance of rainfed wheat in different climates of Iran. *Journal of Water and Soil*, 29(3), 1-18.

- Bagherzadeh, A., Gholizadeh, A. Modeling land suitability evaluation for wheat production by parametric and TOPSIS approaches using GIS, northeast of Iran. *Model. Earth Syst. Environ.* 2, 126 (2016). <https://doi.org/10.1007/s40808-016-0177-8>
- Boote, K. J., Jones, J. W., White, J. W., Asseng, S., & Lizaso, J. I. (2013). Putting mechanisms into crop production models. *Plant, cell & environment*, 36(9), 1658-1672. <https://doi.org/10.1111/pce.12119>
- Bouman, B. A. M., Van Keulen, H., Van Laar, H. H., & Rabbinge, R. (1996). The 'School of de Wit' crop growth simulation models: a pedigree and historical overview. *Agricultural systems*, 52(2-3), 171-198. [https://doi.org/10.1016/0308-521X\(96\)00011-X](https://doi.org/10.1016/0308-521X(96)00011-X)
- Doorenbos, J., & Kassam, A. H. (1979). Yield response to water. Irrigation and Drainage Paper No. 33. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).
- FAO (1976). *A framework for land evaluation*. Soils Bulletin 32. FAO, Rome.
- FAO (1978). *Report on the agro-ecological zones project. Vol. 1. Methodology and results for Africa*. World Soil Resources Report 48. FAO, Rome.
- FAO (n.d.). Suitability and Attainable Yield - GAEZ v5 - Suitability Class. FAO Catalog. Available at: <https://data.apps.fao.org> (Accessed: July 2026).
- FAO GIEWS. (2025). *FAO GIEWS Country Brief on Iran (Islamic Republic of)*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/giews/countrybrief/country.jsp?code=IRN>
- FAO. (1976). A framework for land evaluation (Soils Bulletin 32). Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- FAO. (1996). Agro-ecological zoning: Guidelines (FAO Soils Bulletin 73). Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- FAO. (2025a). *The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture 2025 (SOLAW 2025) – The potential to produce more and better*. Rome. <https://doi.org/10.4060/cd7488en>
- FAO. (2025b). Better land, soil and water management key to feeding 10 billion people, FAO warns. *FAO News Release*. <https://www.fao.org/newsroom/detail/better-land-soil-and-water-management-key-to-feeding-10-billion-people-fao-warns>
- Fischer, G., Nachtergaele, F. O., Prieler, S., Teixeira, E., Tóth, G., Van Velthuisen, H., Verelst, L., & Wiberg, D. (2012). Global agro-ecological zones (GAEZ v3.0): Model documentation. *Food and Agriculture Organization of the United Nations*.
- Fischer, G., Nachtergaele, F. O., van Velthuisen, H., Chiozza, F., Francheschini, G., Henry, M., ... & Tramberend, S. (2021). Global agro-ecological zones (gaez v4)-model documentation.
- Fischer, G., Van Velthuisen, H. T., Shah, M. M., & Nachtergaele, F. O. (2002). Global agro-ecological assessment for agriculture in the 21st century: methodology and results.
- Hamzeh, B., Ashoori, P., Jalili, A., Habibi, R., & Mousavi, S. A. (2020). Comparison of soil seed bank and vegetation in semi-steppe rangelands of Zanjan province, Case study: Anguran protected area, Ghara-Boogh station. *Iran nature*, 5(5), 69-80.
- Hsiao, T. C., Heng, L., 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(3), 448-459. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0218s>
- Hume, L., & Shirriff, S. (1995). The effect of quadrat shape and placement on the accuracy of yield and density estimates for crops seeded in narrow rows. *Canadian Journal of Plant Science*, 75(4), 889-892.

Jones, J. W., Hoogenboom, G., Porter, C. H., Boote, K. J., Batchelor, W. D., Hunt, L. A., ... & Ritchie, J. T. (2003). The DSSAT cropping system model. *European journal of agronomy*, 18(3-4), 235-265. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00107-7](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00107-7)

Kaissi, O., Er-raki, S., Bouras, E., Belaqqiz, S., & Chehbouni, A. (2024). Assessment and comparison of crop growth models for estimating wheat production in a semi-arid region of Morocco. *European Geosciences Union General Assembly 2024 (EGU24)*, 13284. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu24-13284>

Kassam, A. H. (1977). *Net biomass production and yield of crops with provisional results for tropical Africa*. Soil Resources, Management and Conservation Service, Land and Water Development Division, FAO.

Kassie, B. T., Van Ittersum, M. K., Hengsdijk, H., Asseng, S., Wolf, J., & Rötter, R. P. (2014). Climate-induced yield variability and yield gaps of maize (*Zea mays* L.) in the Central Rift Valley of Ethiopia. *Field Crops Research*, 160, 41-53. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2014.02.010>

Khiddir, S. M. (1986). *A statistical approach in the use of parametric systems applied to the FAO framework for land evaluation* (Doctoral dissertation, Ghent University).

Khoshsirat, A. M., Najarchi, M., Jafarinia, R., & Mokhtari, S. (2022). Sensitivity analysis and determination of the optimal level of water use efficiency for winter wheat and barley under different irrigation scenarios using the AquaCrop Model in arid and semiarid climatic conditions (Case Study: Dehloran Plain, Iran). *Water*, 14(21), 3455.

Legates, D. R., & McCabe Jr, G. J. (1999). Evaluating the use of "goodness- of- fit" measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water resources research*, 35(1), 233-241.

Lorite, I. J., García-Vila, M., Santos, C., Ruiz-Ramos, M., & Fereres, E. (2013). AquaData and AquaGIS: two computer utilities for temporal and spatial simulations of water-limited yield with AquaCrop. *Computers and Electronics in Agriculture*, 96, 227-237. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2013.05.010>

Mkhabela, M. S., & Bullock, P. R. (2012). Performance of the FAO AquaCrop model for wheat grain yield and soil moisture simulation in Western Canada. *Agricultural Water Management*, 110, 16-24. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.03.009>

Mohammadzadeh, A., Azimzadeh, Y., Lotfi, R., Zadhasan, E., Alizadeh, K., & Khoshro, H. H. (2025). Analyzing the rainfed wheat yield gap in Northwest Iran. *Farming System*, 3(1), 100126. <https://doi.org/10.1016/j.farsys.2024.100126>

Oulaid, B., Milne, A. E., Waine, T., El Alami, R., Rafiqi, M., & Corstanje, R. (2024). Stepwise model parametrisation using satellite imagery and hemispherical photography: Tuning AquaCrop sensitive parameters for improved winter wheat yield predictions in semi-arid regions. *Field Crops Research*, 309, 109327. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2024.109327>

Paff, K., & Asseng, S. (2018). A review of tef physiology for developing a tef crop model. *European Journal of Agronomy*, 94, 54-66. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2018.01.008>

Peel, M. C., Finlayson, B. L., & McMahon, T. A. (2007). Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11(5), 1633-1644.

Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C., & Fereres, E. (2009). AquaCrop—the FAO crop model to simulate yield response to water: II. Main algorithms and software description. *Agronomy Journal*, 101(3), 438-447.

Rossiter, D. G. (1996). A theoretical framework for land evaluation. *Geoderma*, 72(3-4), 165-190. [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(96\)00031-6](https://doi.org/10.1016/0016-7061(96)00031-6)

- Sabater, M. (2019). ERA5-land monthly averaged data from 1981 to present, Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). *Earth Syst. Sci. Data*, 55, 5679.
- Sarmadian, F., Keshavarzi, A., Rooien, A., Zahedi, G., Javadikia, H., & Iqbal, M. (2014). Support vector machines based modeling of land suitability analysis for rainfed agriculture. *J. Geosci. Geomat*, 2, 165-171.
- Servati, M., Jafarzadeh, A. A., Ghorban, M. A., Shahbazi, F., & Davatgar, N. (2014). Comparison of the FAO and Albero models in prediction of irrigated wheat production potentials in the Khajeh region. *Journal of Water and Soil Science*, 24, 1-14. (in persian).
- Shiferaw, B., Smale, M., Braun, H. J., Duveiller, E., Reynolds, M., & Muricho, G. (2013). Crops that feed the world 10. Past successes and future challenges to the role played by wheat in global food security. *Food security*, 5(3), 291-317. <https://doi.org/10.1007/s12571-013-0263-y>
- Steduto, P., Hsiao, T. C., Raes, D., & Fereres, E. (2009). AquaCrop—The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. *Agronomy journal*, 101(3), 426-437.
- Sys, C., Van Ranst, E., & Debaveye, J. (1991). Land evaluation. Part I: Principles in land evaluation and crop production calculations. *Agricultural Publications No. 7*. GADC, Ghent.
- Sys, C., Van Ranst, E., Debaveye, J., & Beernaert, F. (1993). Land evaluation. Part III: Crop requirements. *Agricultural Publications No. 7*. GADC, Ghent.
- Tavakoli, A. R., Oweis, T., Ashrafi, S., et al. (2010). *Improving rainwater productivity with supplemental irrigation in upper Karkheh river basin of Iran*. ICARDA, Aleppo, Syria.
- Teixeira, E. I., Fischer, G., Van Velthuizen, H., Walter, C., & Ewert, F. (2013). Global hot-spots of heat stress on agricultural crops due to climate change. *Agricultural and forest Meteorology*, 170, 206-215. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.09.002>
- van Diepen, C.A., van Keulen, H., Wolf, J., Berkhout, J.A.A. (1991). Land Evaluation: From Intuition to Quantification. In: Stewart, B.A. (eds) *Advances in Soil Science*. Advances in Soil Science, vol 15. Springer, New York, NY. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-3030-4_4
- Van Ittersum, M. K., Cassman, K. G., Grassini, P., Wolf, J., Tittonell, P., & Hochman, Z. (2013). Yield gap analysis with local to global relevance—a review. *Field crops research*, 143, 4-17. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.09.009>
- Willmott, C. J. (1982). Some comments on the evaluation of model performance. *Bulletin of the American meteorological society*, 63(11), 1309-1313.
- Xiong, W., Holman, I. P., You, L., Yang, J., & Wu, W. (2014). Impacts of observed growing-season warming trends since 1980 on crop yields in China. *Regional environmental change*, 14(1), 7-16. <https://doi.org/10.1007/s10113-013-0418-6>

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Ensuring global food security remains a critical challenge, particularly for wheat (*Triticum aestivum* L.), which supplies ~20% of human caloric intake. In Iran, dryland wheat occupies over 70% of the country's arable drylands; however, a persistent yield gap of approximately 65% (average yield ~1.25 t/ha) threatens national food security. Quantitative land suitability assessment provides a systematic framework to match environmental characteristics with crop ecological requirements. While the FAO's Agro-Ecological Zoning (AEZ) approach simplifies crop growth through reductionist models and soil limitation indices, the process-based AquaCrop model simulates dynamic soil-plant-climate interactions mechanistically. Despite their individual applications, a systematic, head-to-head comparison of these two FAO-endorsed approaches for dryland wheat suitability assessment in semi-arid regions remains unexplored. Therefore, the primary goal of this study was to compare the predictive accuracy and applicability of the AEZ and AquaCrop models for estimating dryland wheat yield (cv. Azar 2) to conduct a quantitative land suitability evaluation in the semi-arid Halab region of Zanzan province, Iran. The target audience includes agricultural land-use planners, soil scientists, and crop modelers. We adopted a postpositivist quantitative approach to test the hypothesis that AquaCrop, with its dynamic daily water-balance, exhibits lower systematic error and higher precision for point-specific yield predictions compared to the static, regionally-oriented AEZ method.

Method

This quantitative study employed an observational/computational modeling design. The methodology involved three integrated phases: (1) field sampling for soil and yield data, (2) implementation of the FAO-AEZ parametric model, and (3) calibrated simulation using the AquaCrop v7 model. Eleven representative soil profiles (each corresponding to a distinct land unit) were selected across the 4,557-hectare study area. For each profile, standard laboratory analyses determined physical (texture, FC, PWP) and chemical properties (pH, ECE, SAR, CaCO_3 , gypsum, OC). Concurrently, actual grain yield was measured at adjacent farm plots using 1 m² quadrats with three replications during the 2022–2023 and 2023–2024 growing seasons. Daily climatic data ($T_{\min}$, $T_{\max}$, precipitation, humidity, wind speed, sunshine hours) were obtained from the Halab automatic synoptic station, with reference evapotranspiration (ET₀) calculated using the FAO-Penman-Monteith equation. Outcome measures included predicted attainable yield (t/ha) for each model and the final quantitative land suitability class (S1–N). For AEZ, potential yield (Y_p) was computed via the radiation-thermal model, water-limited yield (Y_w) via the Doorenbos-Kassam relationship ($K_y=1.05$), and the edaphic index (I_{ed}) via the square-root method based on seven limiting factors. For AquaCrop, conservative parameters (WP*, HI_0 , CGC, CDC) were sourced from Tavakoli et al. (2010) and locally calibrated, while non-conservative parameters were field-observed.

Sampling Procedures

The 11 soil profiles were selected using a systematic stratified sampling strategy based on pre-existing soil map units to ensure they represented the topographical and soil variability of the entire

region. For each profile, morphological descriptions and disturbed samples were collected from all genetic horizons. Yield sampling was executed adjacent to each profile; however, due to fallow practices, sampling occurred across the two separate seasons—seven profiles in 2022–2023 and four profiles in 2023–2024. Data collection settings included agricultural dryland fields and their corresponding laboratory analysis.

Sample Size, Power, and Precision

The intended sample size ($n=11$ land units) was determined by the available representative soil profiles from the national soil database (SWRI) that fell within the study domain, rather than a formal a priori power analysis—a standard approach in land suitability modeling where the focus is on representative pedo-geomorphological units rather than statistical generalization to a population. The achieved sample size matched the intended size ($n=11$), with a total of 33 yield measurement plots (3 replicates $\times$ 11 profiles). Precision of the model estimates was rigorously evaluated using post-hoc standard error metrics, including Mean Absolute Error (MAE), Root Mean Square Error (RMSE), normalized RMSE (nRMSE), the squared Pearson correlation coefficient (r^2), and the coefficient of determination (R^2).

Results

AquaCrop-simulated potential yields were 4.99–5.02 t/ha, closely matching the AEZ-estimated Y_p (4.81–4.95 t/ha). However, the validated attainable yields showed significant differences. AquaCrop demonstrated superior accuracy with MAE=0.155 t/ha, RMSE=0.189 t/ha, nRMSE=10.57%, $r^2=0.777$, and $R^2=0.657$. Conversely, the AEZ method yielded MAE=0.178 t/ha, RMSE=0.235 t/ha, nRMSE=13.17%, $r^2=0.728$, and $R^2=0.544$. Crucially, the discrepancy between r^2 and R^2 was notably larger for AEZ ($\Delta=0.184$) compared to AquaCrop ($\Delta=0.120$), indicating a substantial systematic bias (over/underestimation) inherent to the AEZ structure. The quantitative land suitability classification, based on the Sys method with a critical yield of 0.412 t/ha, revealed that all 11 land units fell into the moderately suitable class (S2) regardless of the model used. Notably, all predicted yields exceeded the economic critical threshold, confirming the financial viability of dryland wheat production across the entire study region.

Conclusions

The results confirm the hypothesis that AquaCrop provides a more precise, point-specific prediction of dryland wheat yield, primarily due to its dynamic daily simulation of water stress, compartmentalized evaporation/transpiration, and three distinct stress coefficients (canopy expansion, stomatal closure, and early senescence). Conversely, AEZ's reliance on a static four-stage reduction coefficient and the aggregated ET_a/ET_o ratio masks the critical impact of drought timing during sensitive phenophases (e.g., pollination). The theoretical and practical significance lies in establishing a clear decision-framework: AquaCrop is warranted for on-farm managerial recommendations and detailed local suitability mapping, whereas AEZ remains highly valuable for large-scale regional agro-ecological zoning and climate-change scenario analyses. If these findings are applied, planners can optimize resource allocation. However, unresolved problems persist, as both models left 22–34% of yield variance unexplained—largely attributed to AquaCrop's direct omission of specific soil chemical constraints and AEZ's oversimplified static parameters. We recommend future research focus on developing hybrid models that integrate AquaCrop's dynamic

water module with nutrient-uptake sub-models and soil chemical constraints, alongside leveraging remote-sensing data for dynamic parameterization, to reduce prediction uncertainty and provide a more robust scientific basis for agricultural decision-making in semi-arid environments.

پیراستای نشده