

مقاله پژوهشی

شبیه‌سازی برنامه آبیاری در کشت کلزا برای بهبود الگوی رشد و افزایش شاخص‌های بهره‌وری

محمدامین زارعی^{*۱}

چکیده

تفاوت در شرایط اقلیمی، بارندگی، تعرق توسط گیاه و تبخیر از سطح خاک موجب تغییر در عملکرد و حجم آب مورد نیاز گیاهان می‌شود. کلزا به‌عنوان یکی از محصولات دارای ارزش اقتصادی زیاد، از اولویت‌های اصلی قرارگرفتن در الگوی کشت دشت‌های کشور با شرایط آب‌وهوایی مختلف به شمار می‌رود. این پژوهش برای جمع‌آوری اطلاعات مزرعه‌ای و توسعه الگوی رشد محصول کلزا در چهار محدوده آب‌وهوایی ایران در مزارع واقع در محدوده‌های بیرجند، بوشهر، شهرکرد و گرگان به‌ترتیب با شرایط اقلیمی خشک، نیمه‌خشک، نیمه‌مرطوب و مرطوب انجام شده است. شبیه‌سازی برای واسنجی سطح پوشش سایه‌انداز گیاه با هدف دستیابی به عملکرد نهایی محصول با نرم‌افزار AquaCrop در فصل زراعی ۱۳۹۷-۹۸ انجام شد. نتایج نشان داد بیشترین میزان تعرق گیاه در مزارع بوشهر، بیرجند، شهرکرد و گرگان به‌ترتیب با مجموع ۹۰۰، ۷۹۰، ۷۱۷ و ۴۰۷ میلی‌متر به دست آمد. بیشترین عملکرد در شهرکرد با بیشتر از ۱۸۰۰ کیلوگرم در هکتار و بیشترین بهره‌وری آب آبیاری در گرگان با ۰/۲۶ کیلوگرم در متر مکعب تخمین زده شد. همچنین، نتایج نشان داد کاشت محصول کلزا در ابتدای بازه زمانی کاشت محصولات پاییزه در هر منطقه موجب افزایش بین ۵ تا ۱۸ درصد استفاده از آب باران برای رشد رویشی و در نتیجه، کاهش مصرف آب آبیاری در انتهای فصل و افزایش بهره‌وری می‌شود. از بین مناطق مطالعه‌شده، بهترین محدوده برای کشت کلزا، شهرکرد با دوره رشد طولانی، عملکرد قابل قبول و شرایط اقلیمی سازگار و پراکنش مناسب بارندگی برای کشت دیم است.

واژه‌های کلیدی: کشت کلزا، بهره‌وری آب، نرم‌افزار AquaCrop، مدیریت پایدار

ارجاع: زارعی م. ا. ۱۴۰۰. شبیه‌سازی برنامه آبیاری در کشت کلزا برای بهبود الگوی رشد و افزایش شاخص‌های بهره‌وری. مجله پژوهش آب ایران. ۴۱: ۶۳-۵۵

۱- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد بوشهر، بوشهر، ایران.

* نویسنده مسئول: mohammadaminzare@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۲۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۸/۳۰

مقدمه

دانه‌های روغنی پس از غلات، دومین ذخایر غذایی جهان را تشکیل می‌دهد و نیاز روزافزون جمعیت دنیا به مواد غذایی از جمله روغن‌های گیاهی سبب شده است کشت دانه‌های روغنی برای پاسخ به این نیاز افزایش یابد (رسولی و همکاران، ۱۳۹۵). این محصولات علاوه بر داشتن ذخایر غنی اسیدهای چرب، حاوی پروتئین نیز است. بیشتر از ۹۰ درصد روغن مصرفی در ایران به صورت واردات تأمین می‌شود و فقط کمتر از ۱۰ درصد آن، تولید داخل است؛ از این رو، تولید دانه‌های روغنی در سال‌های اخیر در اولویت قرار گرفته است (تافته و همکاران، ۱۳۹۷).

کلزا از جمله دانه‌های روغنی است که با داشتن اسیدهای چرب غیراشباع و پروتئین، سهم زیادی در بازار روغن دارد. کلزا گیاهی یک‌ساله با نام علمی *Brassica napus* است که کشت آن در سال ۱۹۷۰ توسعه یافته است و به دو صورت بهاره و پاییزه کشت می‌شود. کنجاله کلزا با داشتن ۴۶ درصد پروتئین، ۳/۵ درصد چربی و ۱/۲ درصد فسفر جذب‌شدنی، ارزش غذایی زیادی دارد (مرادیان‌فر، ۱۹۹۹). این گیاه به علت سازگاری با اقلیم‌های مختلف در بسیاری از نقاط کشور کشت می‌شود (زمردیان و همکاران، ۲۰۱۰) و رژیم آبیاری آن براساس نوع منطقه مورد کشت متفاوت است (موسوی‌زاده و همکاران، ۲۰۱۶). علاوه بر این، این گیاه قابلیت رویش در بیشتر خاک‌ها را دارد؛ ولی خاک رسی لومی به‌علت زهکش سطحی کامل و داخلی نسبتاً مطلوب، بهترین نوع خاک محسوب می‌شود. کلزا در مناطق اقلیمی مختلف نسبت به شرایط محیط، واکنش‌های متفاوتی بروز می‌دهد؛ اما عموماً با مناطق سرد، سازگاری بیشتری دارد (محمدزاده و احمدی، ۲۰۰۸؛ توکلی و همکاران، ۲۰۱۴). از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر رشد گیاه به دما، تراکم کشت و میزان آب مصرفی می‌توان اشاره کرد. برای بررسی اثر این عوامل بر رشد گیاه، مطالعات گسترده مزرعه‌ای انجام شده است (مرادی اقدم و همکاران، ۱۳۹۷؛ تافته و همکاران، ۱۳۹۷؛ عسگری و همکاران، ۱۳۹۸؛ ابراهیمی پاک و همکاران، ۱۳۹۸؛ کابوسی و همکاران، ۱۳۹۸). یکی دیگر از متغیرهای کنترل‌پذیر برای افزایش عملکرد محصول، مدیریت زمان کاشت محصول با توجه به شرایط اقلیمی هر منطقه است. زمان کاشت مناسب، باعث رشد کافی بوته‌های کلزا می‌شود، آسیب‌پذیری بوته‌ها را در برابر سرما

کاهش می‌دهد و باعث افزایش معنی‌دار عملکرد دانه می‌شود (پاسبان اسلام، ۲۰۱۱). ربیعی و همکاران (۲۰۰۳) با بررسی اثر تاریخ‌های کاشت ۱۰ مهر، ۲۵ مهر، ۱۵ آبان و ۳۰ آبان نشان دادند در بین تاریخ‌های کاشت، ۲۵ مهرماه از نظر تمامی صفات مورد مطالعه، از جمله عملکرد بیولوژیکی و دانه، برتری زیادی داشت و تأخیر در کاشت سبب کاهش عملکرد دانه کلزا شد.

به‌علت محدودیت‌های موجود در ارزیابی مزرعه‌ای رشد گیاه، استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی رشد، ابزار مناسبی برای بررسی رفتار گیاه در شرایط متفاوت مدیریتی است. براساس اهداف متفاوت در گذر زمان، مدل‌های متفاوتی از جمله AquaCrop پدید آمده است که اساس کار آنها تقریباً یکسان است و ابتدا برخی از متغیرهای ورودی مدل مد نظر با استفاده از اطلاعات مزرعه‌ای در یک‌سال واسنجی و سپس با اطلاعات مستقل دیگر ارزیابی می‌شود (هنر و همکاران، ۱۳۹۰). هرچه در یک مدل از روابط تحلیلی بیشتری برای فیزیولوژی گیاه استفاده شود، فرایند مدل‌سازی پیچیده‌تر، اما نیاز مدل به واسنجی، کمتر می‌شود (کومار و همکاران، ۲۰۱۵). در مطالعات مختلف، کارایی مدل شبیه‌سازی رشد AquaCrop در شبیه‌سازی و تخمین عملکرد کلزا، ارزیابی و نتایج آن مثبت دانسته شده است (ارونده و همکاران، ۲۰۱۱؛ موسوی‌زاده و همکاران، ۲۰۱۶؛ زلکه و همکاران، ۲۰۱۱).

ایران، تنوع آب‌وهوایی گوناگونی دارد که بررسی تأثیر آن بر رشد و عملکرد گیاهان کلیدی مانند کلزا به بهبود بهره‌وری مصرف آب و افزایش عملکرد کمک می‌کند؛ بنابراین، با توجه با تأثیر شرایط اقلیمی بر مصرف آب، تولید و بهره‌وری آب آبیاری، در پژوهش حاضر، مدل رشد گیاهی کلزا بر پایه اطلاعات میدانی چهار مزرعه در مناطق خشک، نیمه‌خشک، نیمه‌مرطوب و مرطوب کشور توسعه یافت. تهیه برنامه‌های آبیاری مبتنی بر نیاز آبی در مناطق مختلف ایران و ارزیابی تأثیر تغییر زمان کشت بر افزایش یا کاهش محصول از دیگر اهداف این پژوهش بود. بدین‌منظور، مدل‌سازی رشد گیاه و بیلان رطوبت خاک با استفاده از نرم‌افزار AquaCrop تهیه و در شرایط مختلف محدودیت آب ارزیابی و تحلیل شد. با تدوین مدل شبیه‌سازی رشد در بوشهر، بیرجند، شهرکرد و گرگان، تأثیر تغییر تاریخ کاشت بر متغیرهای ارزیابی مدیریت زراعی مانند آب مصرفی، عملکرد و بیلان آب بررسی شد.

مواد و روش‌ها

محدوده مورد مطالعه

برای ارزیابی و شبیه‌سازی محصول کلزا، چهار محدوده در شرایط مختلف آب‌وهوایی ایران انتخاب و نمونه‌برداری میدانی در آنها انجام شد. برای تعیین محدوده اقلیمی و انتخاب مناطق از شاخص خشکی AI_U استفاده شده است. این شاخص، نشان‌دهنده تغییرات هم‌زمان بارندگی و تبخیر و تعرق است که به صورت معادله (۱) تعریف می‌شود:

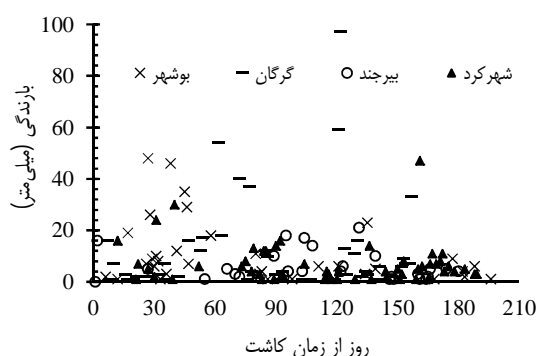
$$AI_U = \frac{P}{ET_p} \quad (1)$$

در این معادله، P بارندگی (میلی‌متر) و ET_p تبخیر و تعرق پتانسیل (میلی‌متر) است. مشخصات مناطق مورد مطالعه، که براساس شاخص اقلیمی مذکور در نقاط مختلف کشور انتخاب شده است، در جدول ۱ آمده است. همچنین، توزیع بارندگی روزانه در فصل رشد کلزا در هر یک از مناطق مورد مطالعه در شکل ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱- مشخصه‌های جغرافیایی و اقلیمی محدوده‌های مورد مطالعه

محدوده	ارتفاع از سطح دریا (متر)	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	شاخص AI_U	شرایط اقلیمی
بیرجند	۱۴۹۱	۵۹/۳	۳۲/۸۶	۰/۱۷	خشک
بوشهر	۱۹	۵۰/۸۳	۲۸/۹۸	۰/۳۱۲	نیمه‌خشک
گرگان	۱۵۵	۵۴/۴۶	۳۶/۸۵	۱/۰۹	مرطوب
شهرکرد	۲۰۷۸	۵۰/۸۵	۳۲/۲۸	۰/۵۲۱	نیمه‌مرطوب

و اداری کرد. بهره‌وری آب (کیلوگرم بر متر مکعب) به صورت نسبت عملکرد نهایی محصول (کیلوگرم در هکتار) و آب آبیاری (متر مکعب در هکتار) بیان می‌شود. مدل AquaCrop با حفظ قابلیت‌های رابطه دورنوس و کاسام (۱۹۷۹)، توازن منطقی بین سادگی، دقت، توانمندی و سهولت استفاده برقرار می‌کند. AquaCrop بر مبنای فرایندهای پیچیده محاسباتی شکل گرفته است؛ اما متغیرهای ورودی مدل، تعداد محدودی از داده‌های قابل اندازه‌گیری و در دسترس در سطح مزرعه است که در ترکیب با ضرایب ثابت و از پیش تعیین‌شده، شبیه‌سازی رشد را انجام می‌دهد (رائس و همکاران، ۲۰۰۹). از مهم‌ترین اطلاعات اقلیمی، که به‌عنوان داده ورودی استفاده می‌شود، به حداکثر و حداقل دمای روزانه منطقه، تبخیر و تعرق پتانسیل گیاه مرجع، میانگین غلظت CO_2 و بارندگی می‌توان اشاره کرد. AquaCrop از داده‌های حداکثر و حداقل دمای روزانه برای محاسبه درجه روز رشد برای تعدیل عملکرد بیولوژیک بر اثر خسارت‌های ناشی از سرما استفاده می‌کند (رائس و همکاران، ۲۰۰۹). علاوه بر این، هدایت هیدرولیکی اشباع (K_{sat})، رطوبت حجمی در ظرفیت زراعی (θ_{FC}) و رطوبت حجمی در نقطه پژمردگی (θ_{PWP}) تعیین‌کننده بافت خاک بستر گیاه و رشد ریشه است. خصوصیات خاک هر یک از مزارع انتخابی در جدول ۲ خلاصه شده است.



شکل ۱- توزیع بارندگی روزانه در چهار محدوده مطالعاتی

توسعه مدل شبیه‌سازی

اطلاعات لازم برای واسنجی مدل AquaCrop شامل متغیرهای کشت، مشخصات گیاهی، زمان‌بندی رشد و بافت خاک به مدل، وارد و برای رسیدن به عملکرد واقعی محصول واسنجی می‌شود. از مؤلفه‌های اصلی مدل‌سازی، برآورد روزانه رطوبت خاک است که بر نیاز آبی، میزان رشد ریشه و پوشش سایه‌انداز گیاه و در نتیجه، عملکرد نهایی تأثیرگذار است. درک روابط آب، خاک و گیاه پس از ارائه رابطه دورنوس و کاسام (۱۹۷۹) گسترش فراوانی یافته است. لزوم توجه به افزایش بهره‌وری آب به‌عنوان ابزار کنترل کم‌آبی، سازمان خواروبار و کشاورزی ملل متحد (FAO) را به توسعه مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی واکنش محصولات زراعی به مقدار آب مصرفی

جدول ۲- مشخصه‌های خاک و آب آبیاری در مزارع انتخابی چهار محدوده مورد مطالعه

محدوده	بافت خاک	ظرفیت زراعی	نقطه پژمردگی	وزن مخصوص ظاهری	شوری آب (ds/m)
بیرجند	لومی سیلتی	۲۴/۴	۱۰/۱	۱/۴۳	۳/۴
بوشهر	لومی سیلتی	۲۴/۲	۹/۶	۱/۴۲	۳/۷
گرگان	لومی سیلتی	۲۳/۸	۱۰/۳	۱/۴۶	۳/۲
شهرکرد	لومی سیلتی	۲۴/۱	۹/۸	۱/۴۵	۳/۳

شرایط مطلوب و بدون محدودیت واسنجی شده است، در شرایط وجود تنش آبی از طریق تأثیر ضریب پاسخ به تنش تعدیل می‌شود. سایر اطلاعات لازم برای اجرای شبیه‌سازی عبارت است از: چهار تاریخ اصلی رشد گیاه شامل جوانه‌زنی، پوشش کامل، آغاز پیری تاج و برداشت که برای محدوده‌های با شرایط اقلیمی متفاوت براساس مشاهدات میدانی اندازه‌گیری شده است.

بخش دیگر داده‌ها مربوط به ضرایب رشد تاج پوشش و ضریب پیری آن است که در جدول ۳ خلاصه شده است. درصد پوشش اولیه و حداکثر پوشش با اندازه‌گیری مزرعه‌ای و سایر ضریب‌ها از واسنجی بین سطح پوشش گیاهی به دست می‌آید. برخی متغیرهای گیاهی برای بیشتر گیاهان زراعی به‌عنوان پیش‌فرض وجود دارد که با گذشت زمان یا تغییر مختصات جغرافیایی تغییر نمی‌کنند. این متغیرها با استفاده از داده‌های رشد گیاه، که در

جدول ۳- ضرایب گیاهی مورد استفاده در مدل شبیه‌سازی

محدوده	پوشش اولیه درصد	درصد حداکثر پوشش درصد	ضریب رشد پوشش	ضریب کاهش پوشش	بهره‌وری آب نرمال شده گرم بر مترمربع
بوشهر	۳	۸۶	۰/۰۷۴	-	۱۵/۷
گرگان	۱	۸۳	۰/۰۸۴	۰/۰۶	۱۶/۳
بیرجند	۲	۸۶	۰/۱	۰/۰۴۵	۱۷/۱
شهرکرد	۴	۹۰	۰/۱۱	۰/۰۳	۱۶/۴

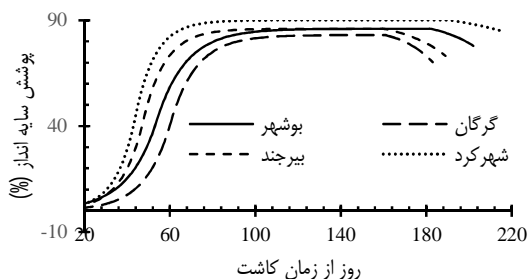
نتایج و بحث

شبیه‌سازی رشد کلزا و محاسبه عملکرد، نیازمند واسنجی سطح پوشش سایه‌انداز گیاه است. شکل ۲، منحنی سطح پوشش سایه‌انداز کلزا را در چهار منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد. در شهرکرد، دوره رشد و حداکثر پوشش سایه‌انداز، بیشتر از سایر محدوده‌هاست. در مقابل، گرگان سطح سایه‌انداز و طول دوره رشد کمتری دارد. سرمای هوا در بیرجند در فصل زمستان موجب کوتاه‌تر شدن دوره رشد میانی گیاه می‌شود و تشکیل خورجین و پرشدن دانه پیش از فروردین آغاز و در دوره کوتاه‌تری نسبت به بوشهر، برداشت انجام می‌شود.

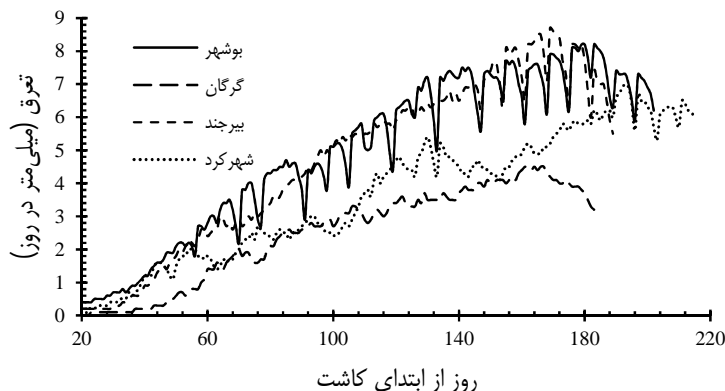
مهم‌ترین مزیت استفاده از AquaCrop و شبیه‌سازی گیاهی، تعیین روزانه تعرق گیاه و در نتیجه، واکنش محصول به تنش‌های محیطی است؛ از این‌رو، تغییرات تعرق گیاه در چهار محدوده مطالعاتی در شکل ۳ با یکدیگر مقایسه شد. در مناطق مرطوب مانند گرگان، تغییرات تعرق کلزا در طول فصل رشد بدون تغییر ناگهانی و برپایه الگوی پیش‌بینی‌پذیر انجام شد. در مناطقی مانند

بیرجند و شهرکرد، که دمای هوا در فاصله زمانی کوتاه دچار تغییرات اثرگذار بر رشد گیاه و قابلیت جذب آب از خاک می‌شود، تعرق گیاه نیز به تبعیت از آن در مقیاس روزانه و هفتگی، نوسان داشت. علاوه بر این، در محدوده بیرجند، تفاوت دمای محسوس بین فصل گرما و سرما موجب اختلاف زیاد در سطح تعرق گیاه شد؛ بنابراین، نتایج نشان داد روش‌های محاسبه نیاز آبی، که در گذشته براساس روش دورنبوس و کاسام (۱۹۷۹) و لحاظ کردن چهار مرحله برای رشد گیاه بوده است، آب مورد نیاز گیاه را با دقت مطلوب محاسبه نمی‌کند. در محدوده بوشهر به‌علت تعرق زیاد پس از هر بار آبیاری یا دریافت بارندگی در حد فاصل پنج تا هفت روز، شدت تعرق کاهش زیادی داشته است و به تأمین آب مجدد نیاز دارد؛ بنابراین، کشت دیم در این منطقه با برنامه و مدیریت متفاوتی باید ارزیابی شود.

شاخص اصلی دیگر در بیان آب مزرعه، تبخیر از سطح مزرعه است که در رابطه دورنبوس و کاسام (۱۹۷۹) به‌صورت ترکیب با تعرق گزارش شده است. تفکیک و



شکل ۲- سطح پوشش سایه‌انداز در مناطق مختلف



شکل ۳- مقایسه تغییرات تعرق در مزارع نمونه چهار محدوده اقلیمی کشور

تاریخ کاشت موجود که مدل‌سازی براساس آن انجام شده است؛ ۲- کاهش ۱۰ روزه تاریخ کاشت نسبت به وضعیت فعلی و ۳- افزایش ۱۰ روزه تاریخ کاشت در نظر گرفته شد. تاریخ کاشت مزارع مد نظر براساس میانگین تاریخ کاشت منطقه تعیین شده است؛ بنابراین، سناریوهای در نظر گرفته شده، گزینه‌های اجرایی و امکان‌پذیری محسوب می‌شود.

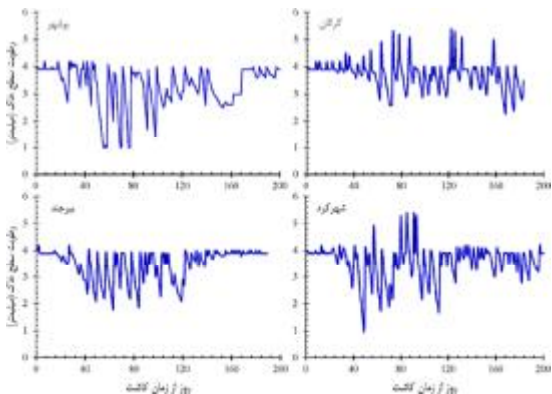
اولین متغیر ارزیابی‌شده در این زمینه، تأثیر تغییر تاریخ کشت بر حجم آب مصرفی گیاه است که در شکل ۵ ترسیم شده است. تغییر حجم آب مصرفی به علت تفاوت در حجم آب دریافتی از بارندگی در شرایطی است که هدف، رسیدن به بیشترین عملکرد گیاه باشد. نتایج نشان می‌دهد که حجم آب لازم برای تولید کلزا در بوشهر، بیشترین و در گرگان، کمترین مقدار است که علت اصلی آن، تفاوت در بارندگی مؤثر مورد استفاده گیاه است. همچنین، در همه مزارع مطالعاتی، کاهش ده روزه تاریخ کاشت موجب کاهش آب مصرفی شده و بر افزایش آن اثر متقابل داشته است. به تأخیر انداختن کشت گیاه، تاریخ برداشت را نیز افزایش می‌دهد و بیشترین نیاز آبی گیاه در

ارزیابی این متغیر در کنترل هدررفت آب و برآورد مقدار و فواصل آبیاری اهمیت دارد. نتایج نشان داد در ابتدای فصل رشد تا کامل شدن تاج پوشش، سهم تبخیر در بیلان رطوبتی مزرعه بیشتر می‌شود و بتدریج با گسترش تاج پوشش کاهش می‌یابد. براساس دمای هوا و رطوبت نسبی، مقادیر تبخیر در بوشهر و بیرجند نسبت به دو محدوده دیگر بیشتر شد.

همچنین، در محاسبات بیلان آب در محیط ریشه، لایه سطحی خاک به صورت مجزا در نظر گرفته می‌شود؛ زیرا تبخیر و دمای هوا بر این لایه تأثیرگذار است. در مزارع بوشهر و بیرجند، رطوبت سطحی از مقدار اولیه ۴ میلی‌متر فراتر نرفته و به علت تبخیر و تعرق زیاد در کل دوره رشد به صورت متناوب تا مرز نقطه پژمردگی سقوط داشته است (شکل ۴). بدیهی است در محدوده فصل زمستان به علت پوشش کمتر سطح زمین و بارش زیاد، رطوبت سطحی خاک، تغییرات تناوبی و با توجه به منطقه اقلیمی، شدت‌های متفاوت دارد. ارتفاع بارش در محدوده‌های شهرکرد و بوشهر در فصل رشد کلزا تقریباً یکسان و حدود ۳۷۵ میلی‌متر ثبت شده است؛ اما تفاوت اقلیمی و پراکنش زمانی آن موجب الگوهای متفاوت رطوبت لایه سطحی خاک شده است.

تاریخ کاشت کلزا برای هر محدوده در یک بازه زمانی در حدود ۴۰ روز قرار دارد. بهترین تاریخ کاشت، عاملی در مدیریت زراعی است که بر رشد و عملکرد گیاه اثر می‌گذارد. بدین‌منظور، با استفاده از الگوی رشد تهیه‌شده برای چهار منطقه مورد مطالعه، سه تاریخ کاشت شامل ۱-

تصمیم‌گیری درباره شرایط کشت دیم در هر محدوده، قابل ارزیابی است.

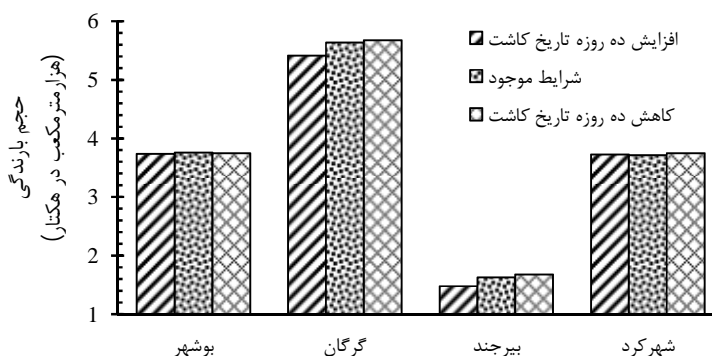


شکل ۴- رطوبت لایه سطحی خاک در طول فصل رشد

مراحل بلوغ و رشد زایشی گیاه است؛ بنابراین، این موضوع باعث انتقال بیشترین سطح سایه‌انداز محصول از فصل بارندگی به دوره زمانی گرم و خشک شده و گیاه برای تولید دانه، آب بیشتری مصرف کرده است. در محدوده بیرجند به علت تفاوت بیشتر فصل سرد و گرم سال، اختلاف آب مصرفی نیز افزایش یافت. شکل ۶، اختلاف در میزان بارندگی دریافتی را در محدوده بیرجند نشان می‌دهد. شرایط مشابه برای مزرعه گرگان نیز مشاهده می‌شود؛ زیرا براساس شکل ۱ در انتهای فصل رشد از شدت بارش‌های این محدوده در مقایسه با فصل پاییز و زمستان کاسته شده است؛ بنابراین، حجم آب دریافتی از بارندگی نیز در دوره افزایش تاریخ کاشت کاهش داشته است (شکل ۶). همچنین، شکل ۶ تفاوت زیاد حجم آب دریافتی از بارندگی در مناطق مرطوب مانند گرگان را با مناطق بسیار خشک مانند بیرجند نشان می‌دهد که برای



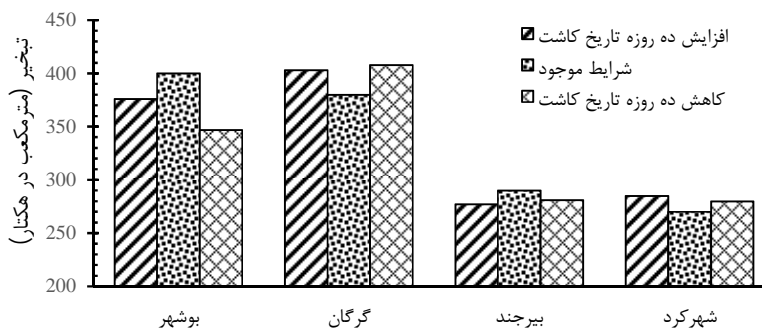
شکل ۵- مقایسه حجم آب مصرفی نسبت به تغییر در تاریخ کاشت



شکل ۶- مقایسه حجم بارندگی نسبت به تغییر در تاریخ کاشت

۷). تلفات تبخیر در محدوده شهرکرد به علت طولانی بودن فصل سرما و در محدوده بیرجند به علت کمبود بارندگی، مقادیر کمتری داشت.

تفاوت مجموع تبخیر از خاک در فصل رشد به شرایط جوی و آب آبیاری تخصیص یافته بستگی دارد و روند معنی‌داری را درباره تغییر در فصل کشت نشان نداد (شکل

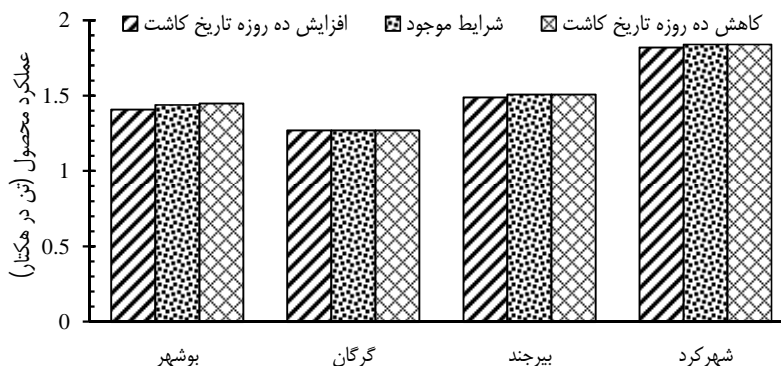


شکل ۷- مقایسه تبخیر از سطح مزرعه نسبت به تغییر در تاریخ کاشت

باید شش هفته پیش از شروع اولین یخبندان منطقه کشت شود. انتخاب دوره کاشت زودتر از آن، موجب افزایش جذب آب و مواد غذایی در طول فصل پاییز و در نتیجه، رشد زیاد بوته‌ها می‌شود. این موضوع، قدرت بقای گیاه را در زمستان کاهش می‌دهد. همچنین، کاشت با تأخیر نیز باعث کوچک ماندن گیاه و ذخیره ناکافی مواد غذایی و افزایش خطر سرمازدگی می‌شود.

بهره‌وری آب به‌عنوان شاخص دخالت‌دهنده عملکرد و آب مصرفی، ارزیابی قابل قبولی از تأثیر تغییر تاریخ کشت را نشان می‌دهد. براساس این شاخص، کاهش ده روزه تاریخ کاشت بر اثر کاهش حجم آب مصرفی و استفاده مطلوب از آب باران برای تکمیل دوره رشد رویشی، موجب افزایش تولید به‌ازای واحد آب مصرفی شد. همچنین، افزایش تاریخ کاشت به‌جز در محدوده بوشهر، بهره‌وری آب را کاهش داد. در مجموع، بهره‌وری آب در بوشهر و بیرجند به‌علت کاربرد نامؤثر آب باران در دوره رشد، کمترین مقادیر را داشت.

عملکرد محصول و بهره‌وری آب، دو معیار دیگر ارزیابی تأثیر تغییر تاریخ کشت بر تولید نهایی گیاه است که به‌ترتیب در شکل‌های ۸ و ۹ نشان داده شده است. در شرایط کشت آبی نمی‌توان انتظار داشت عملکرد محصول، تغییرات زیادی در اثر تغییر تاریخ کاشت داشته باشد؛ زیرا فقط اثر دمای هوا در این زمینه قابل بررسی است. تفاوت دما در اثر به تأخیر انداختن تاریخ کاشت موجب کاهش اندک عملکرد محصول در ۳ منطقه بوشهر، بیرجند و شهرکرد به‌ترتیب به میزان ۳۲، ۲۳ و ۱۸ کیلوگرم در هکتار شد. فقط کشت زود هنگام در بوشهر موجب افزایش ۱۲ کیلویی در عملکرد در سطح یک هکتار شد. نتایج سایر پژوهش‌ها نشان داد تأخیر در کاشت کلزا در نتیجه کاهش دوره رشد رویشی، موجب تولید بوته‌هایی با زیست‌توده کمتر می‌شود و به‌علت افزایش درجه حرارت در مرحله زایشی، اجزای عملکرد و عملکرد دانه را کاهش داد (فرجی و همکاران، ۲۰۰۹). مصطفوی‌راد و همکاران (۱۳۹۱) گزارش کردند در شرایط اقلیمی اراک، بذر کلزا



شکل ۸- مقایسه عملکرد محصول نسبت به تغییر در تاریخ کاشت



شکل ۹- مقایسه شاخص بهره‌وری آب نسبت به تغییر در تاریخ کاشت

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، الگوی رشد محصول کلزا در شرایط مختلف اقلیمی ایران با استفاده از نرم‌افزار AquaCrop به‌عنوان هدف اصلی پژوهش پیش‌رو تدوین و ارزیابی شد. نتایج نشان داد تاریخ کاشت، یکی از متغیرهای مدیریتی تأثیرگذار در افزایش بهره‌وری مصرف آب و کاربرد مؤثر بارندگی است؛ بنابراین، نتایج مدل‌سازی، کاهش متوسط حدود ۱۰ درصد در آب مورد نیاز گیاه و افزایش یک درصد در بهره‌وری آب را در اثر کاهش ده روزه تاریخ کاشت نسبت به آزمایش‌های انجام‌شده تخمین زد. همچنین، کاشت این محصول در تناوب با محصولاتی مانند برنج و غلات انجام می‌شود که عموماً ارزش اقتصادی بیشتری دارند و پس از برداشت، آماده‌سازی زمین برای انتخاب تاریخ کاشت محدودیت ایجاد می‌کند؛ بنابراین، توجه به تناوب زراعی و امکان تغییر و مدیریت زمان کاشت و برداشت محصول اول نیز باید مطالعه شود. استفاده مؤثر از آب باران، به‌ویژه در مناطقی مانند بیرجند و بوشهر- که محدودیت آب، عامل اصلی کاهش عملکرد محسوب می‌شود- با تکیه بر برنامه‌ریزی براساس اطلاعات روزانه می‌تواند مد نظر قرار گیرد. تفاوت در میزان تعرق گیاه در مقیاس روزانه، هفتگی و ماهانه گیاه نشان می‌دهد فواصل آبیاری در محدوده بوشهر باید با فواصل آبیاری کمتر از هفت روز در انتهای فصل رشد انجام شود تا مرحله تکمیل خورجین و پرشدن دانه همراه با افزایش عملکرد انجام شود. علاوه بر این، کشت دیم برای محدوده گلستان، کشت دیم با آبیاری تکمیلی در اواخر فصل رشد برای شرایط آب‌وهوایی نزدیک به شهرکرد و آبیاری بارانی برای مناطق خشک پیشنهاد می‌شود.

منابع

- ابراهیمی پاک ن. ع. اگدرنژاد ا. تافته آ. و احمدی م. ۱۳۹۸. ارزیابی مدل‌های AquaCrop، Wofost و CropSyst در شبیه‌سازی عملکرد کلزا در منطقه قزوین. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۳(۱۳): ۷۱۵-۷۲۶.
- تافته آ. اگدرنژاد ا. و ابراهیمی پاک ن. ع. ۱۳۹۷. بررسی توابع تولید محصول برای برآورد عملکرد گیاه کلزا در بازه‌های زمانی مختلف. نشریه حفاظت منابع آب و خاک. ۷(۳): ۱۰۳-۱۱۴.
- رسولی س. ج. نصیری محلاتی م. ناصری یزدی م. ت. و قربانی ر. ۱۳۹۵. تعیین مدل پیش‌بینی محصول کلزا (*Brassica napus L.*) بر پایه هواشناسی کشاورزی و پارامترهای اقلیمی محدوده مشهد. نشریه آب و خاک. ۳۰(۴): ۱۳۲۲-۱۳۳۳.
- عسگری ا. درزی ع. نادری م. و صابری علی س. ف. ۱۳۹۸. بررسی تأثیر زهکشی سطحی و زیرزمینی بر سطح برگ کلزا و ارائه معادلات ریاضی حاکم. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۶(۱۳): ۱۷۳۳-۱۷۴۲.
- کابوسی ک. نودهی ا. و شامیاتی م. ۱۳۹۸. برهم‌کنش شوری آب آبیاری، ورمی کومپوست و رقم بر رشد، عملکرد و اجزای عملکرد کلزا. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۲(۱۳): ۴۸۶-۴۹۹.
- مرادی اقدام ا. سیف‌زاده س. شیرانی راد ا. ولدآبادی س. ع. و ذاکرین ح. ر. ۱۳۹۷. اثر قطع آبیاری بر خصوصیات فیزیولوژیکی و عملکرد دانه ارقام کلزا تحت تاریخ‌های مختلف کاشت. فصلنامه فیزیولوژی گیاهان زراعی. ۱۰(۳۸): ۵۹-۷۶.

- to simulate yield response to water II. Main algorithms and software description. *Agronomy Journal*. 101: 438-447.
19. Tavakoli A. R. Liaghat A. and Alizadeh A. 2014. Soil Water Balance, Sowing Date and Wheat Yield Using AquaCrop Mode under Rainfed and Limited Irrigation. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 14(4): 41-56.
 20. Zeleke K. Luckett D. and Cowley R. 2011. Calibration and Testing of the FAO AquaCrop Model for Canola. *Agron.J.* 103: 1610-1618.
 21. Zomorodian A. Kavooosi Z. and Momenzadeh L. 2010. Determination of EMC isotherms and appropriate Mathematical models for canola. *Food and Bioproducts Processing*. 89(4): 407-413.
 ۷. مصطفوی راد م. شریعتی ف. و مصطفوی راد س. ۱۳۹۱. بررسی تأثیر تاریخ کاشت بر عملکرد کمی و کیفی چهار رقم کلزای سازگار با مناطق سرد در اراک. *مجله الکترونیک تولید گیاهان زراعی*. ۵(۲): ۱۵۹-۱۶۷.
 ۸. هنر ت. ثابت سروستانی ع. کامگار حقیقی ع. ا. و شمس ش. ۱۳۹۰. واسنجی مدل گیاهی CropSyst جهت تخمین عملکرد و شبیه‌سازی رشد گیاه کلزا. *نشریه آب و خاک*. ۱(۲۰): ۹۷-۱۱۱.
 9. Arvande H. Abbasi F. and Eslami H. 2011. Validation and testing of AquaCrop under farmers management, 1st National Conference on Agrometeorology and Agricultural Water Management.
 10. Doorenbos J. and Kassam A.H. 1979. Yield Response to Water. FAO Irrigation and Drainage paper No. 33, FAO, Rome, Italy, 193 p.
 11. Faraji A. N. Lattifi A. Solatni A. and Shirani Rad A. H. 2009. Seed yield and water use efficiency of canola as affected by high temperature stress and supplemental irrigation. *Agric Water Manag.* 96: 132-140.
 12. Kumar P. Sarangi A. Singh D. K. Parihar S.S. and Sahoo R.N. 2015. Simulation of salt dynamics in the root zone and yield of wheat crop under irrigated saline regimes using SWAP model. *Agricultural Water Management*. 148: 72-83.
 13. Mohammadzadeh J. and Ahmadi M. R. 2008. Optimization of olive oil extraction to enhance efficiency and quality. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 9(2): 113-126.
 14. Moradianfar H. 1999. Rapeseed a plant valuable and beneficial. *Farm*. 29: 32-33.
 15. Mousavizadeh S. F. Honar T. and Ahmadi S. H. 2016. Assessment of the AquaCrop model for simulating canola under different irrigation management in a semiarid area, *International Journal of Plant Production*. 10(4): 1735-6814.
 16. Pasban Eslam B. 2011. Study of possibility of delayed planting of oilseed rape (*Brassica napus* L.) in east Azerbaijan in Iran. *Journal of Seed Plant Prod.* 27(3): 269-284.
 17. Rabiee M. Karimi M. and Safa F. 2003. Effect of planting date on grain yield and agronomic traits in canola cultivars as second crop after rice in Kvchsfhan. *Iranian Journal of Agricultural Science*. 25: 177-186.
 18. Raes D. Steduto P. Hsiao T. C. and Fereres E. 2009. AquaCrop— the FAO crop model

