

مقاله علمی-پژوهشی

## اثر مدیریت کم آبیاری مبتنی بر زمان قطع جریان بر عملکرد و بهره‌وری آب ذرت

خشایار پیغان<sup>۱</sup>، عبدالمجید لیاقت<sup>۲\*</sup>، خالد احمدآلی<sup>۳</sup>، مسعود پارسی‌نژاد<sup>۴</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۰۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۱۳

### چکیده

با توجه به محدودیت منابع آبی در ایران و بسیاری از نقاط جهان، اهمیت فزاینده افزایش بهره‌وری آب در کشاورزی بر کسی پوشیده نیست. این پژوهش با هدف بررسی اثر کم آبیاری مبتنی بر زمان قطع جریان ورودی به جویچه بر عملکرد و بهره‌وری آب ذرت در مزرعه پژوهشی دانشگاه تهران در کرج با بافت خاک لومی رسی انجام شد. آزمایش در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با پنج تیمار زمان قطع جریان بر اساس رسیدن جبهه رطوبتی به عمق مشخص خاک در فواصل مختلف از ابتدای جویچه و در سه تکرار اجرا گردید. حسگرهای رطوبتی TDR در فواصل ۱۰۰ (L2)، ۹۰ (L3)، ۶۰ (L4) و ۰ (L5) متری از ابتدای جویچه قرار گرفتند. در تیمار شاهد (L1)، قطع جریان پس از تأمین عمق آب مورد نیاز گیاه در انتهای جویچه انجام شد. چهار عمق ۱۸، ۲۰، ۲۲ و ۲۴ سانتی‌متر برای حسگرها تعیین و در طول فصل کشت، پیش از هر آبیاری با توجه به عمق آب آبیاری، عمق حسگر انتخاب شد. عمق آب آبیاری در تیمارهای L1، L2، L3، L4 و L5 به ترتیب معادل ۱۰۰، ۸۲/۹، ۷۵/۴، ۶۹/۸ و ۶۴/۱ درصد نیاز آبی شد. بالاترین مقادیر عملکرد زیست‌توده تر و خشک و دانه، شاخص برداشت، وزن هزار دانه و ارتفاع گیاه به ترتیب با ۶۷/۲۶۵ و ۲۷/۱۹۶ تن در هکتار، ۵۰/۷۷ درصد، ۳۶۷/۸۹ گرم و ۲۵۸/۲ سانتی‌متر در تیمار L1 و کم‌ترین مقادیر نیز با ۳۴/۲۷۲، ۱۷/۱۵۰ و ۷/۵۱۱ تن در هکتار، ۴۳/۴۰ درصد، ۲۵۲/۶۷ گرم و ۱۷۷/۹ سانتی‌متر در تیمار L5 ثبت شد. کم آبیاری سبب کاهش معنی‌دار هر شش صفت گردید. بهره‌وری آب آبیاری مبتنی بر عملکرد زیست‌توده تر، خشک و دانه تفاوت معنی‌داری در تیمارهای مختلف نشان نداد اما در هر سه مورد، کم‌ترین مقادیر مربوط به تیمار L5 بود. روش پیشنهادی این تحقیق با تمرکز بر مدیریت کم آبیاری بر اساس حصول اطمینان از رسیدن آب به ناحیه ریشه می‌تواند به بهبود مدیریت و خودکارسازی آبیاری سطحی کمک نماید.

### واژه‌های کلیدی: آبیاری جویچه‌ای، آبیاری سطحی، آبیاری هوشمند، TDR

### مقدمه

تمدن‌های بشری همواره برای رشد و توسعه خود به آب وابسته بوده‌اند. با این حال، در دهه‌های اخیر دسترسی مطمئن به آب با چالش‌های جدی روبه‌رو شده است. تغییرات اقلیمی با دگرگونی الگوهای آب‌وهوایی جهان، قابلیت پیش‌بینی منابع آب را کاهش داده

است. از سوی دیگر، افزایش جمعیت جهان، تغییر سبک زندگی و توسعه اقتصادی، فشار تقاضای بی‌سابقه‌ای بر منابع آب وارد کرده‌اند. افزون بر این، ضعف در شیوه‌های مدیریت منابع آب به تشدید بحران آب انجامیده است (Biswas et al., 2025; Mfarrej, 2025). نزدیک به سه میلیارد نفر در سراسر جهان به منابع آب کافی دسترسی ندارند و سالانه بیش از ۳/۳ میلیون مرگ و میر ناشی از مصرف آب ناسالم رخ می‌دهد (Ehtisham et al., 2025). در این بین، بخش کشاورزی سالانه حدود ۷۰ درصد از کل برداشت آب جهان را برای آبیاری تنها ۲۵ درصد از زمین‌های زراعی استفاده می‌کند (Lakhiar et al., 2024). مطابق پیش‌بینی‌ها، جمعیت جهان در سال ۲۰۵۰ به ۹/۲ میلیارد نفر خواهد رسید که برای تأمین غذای مورد نیاز این جمعیت، تولیدات کشاورزی باید حدود ۶۰ تا ۷۰ درصد افزایش یابد (Pawlak & Kołodziejczak, 2020).

با وجود افزایش دسترسی و پذیرش فناوری‌های پیشرفته آبیاری، مانند سامانه‌های قطره‌ای و بارانی، گسترش این روش‌ها در بسیاری از

- ۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران
- ۲- استاد، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران
- ۳- دانشیار، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران
- ۴- استاد، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

(\*نویسنده مسئول: Email: aliaghat@ut.ac.ir)

DOI: [10.22034/ijid.2026.569556.2657](https://doi.org/10.22034/ijid.2026.569556.2657)

میان متناوب با سطح آبیاری ۷۰ درصد، نسبت به تیمار شاهد ۶۵ درصد آب کمتری مصرف کرد در حالی که تنها ۲۰ درصد کاهش عملکرد داشت و با ۲/۰۶ کیلوگرم بر مترمکعب، بالاترین راندمان مصرف آب را ثبت کرد (Narayanan & Seid, 2015).

در پژوهشی دیگر، مهری و همکاران اثر کم آبیاری موجهی و یک در میان بر عملکرد و بهره‌وری آب ذرت دانه‌ای رقم سینگل کراس ۷۰۴ را بررسی نمودند. طرح آماری این پژوهش دارای ۱۵ تیمار حاصل از ترکیب دو عامل بود؛ پنج روش آبیاری جویچه‌ای مرسوم (C)، آبیاری موجهی با نسبت‌های قطع و وصل جریان یک به یک (S1) و دو به یک (S2) تا زمان تکمیل پیشروی و آبیاری یک در میان ثابت (FF) و متناوب (AF) و سه سطح آبیاری ۱۰۰ (I100)، ۸۰ (I80) و ۶۰ (I60) درصد نیاز آبی. بر اساس نتایج، بالاترین عملکرد محصول در تیمار آبیاری S2I100 با مقادیر ۶۲۰۲ و ۸۰۶۴ کیلوگرم در هکتار اندازه‌گیری شد. بیش‌ترین راندمان کاربرد آب و کم‌ترین تلفات رواناب و نفوذ عمقی نیز مربوط به تیمار آبیاری AFI60 به‌ترتیب با مقادیر ۷۵/۷، ۲۲/۴ و ۱/۹ درصد بود. بالاترین بهره‌وری آب برای وزن دانه و وزن کل بلال‌ها در تیمار آبیاری S1I60 به‌ترتیب برابر ۰/۷۵ و ۰/۹۵ کیلوگرم بر مترمکعب محاسبه شد (مهری و همکاران، ۱۴۰۱).

وطن‌خواه و همکاران (۱۳۹۸) در اعمال کم آبیاری بر ذرت علوفه‌ای، میزان آبیاری در انتهای جویچه را معیار قرار دادند؛ بدین نحو که چهار تیمار آبیاری شامل ۱۰۰، ۷۵، ۵۰ و ۲۵ درصد آبیاری در انتهای جویچه بود. کم آبیاری سبب افزایش راندمان کاربرد آب آبیاری، افزایش غیریکنواختی پروفیل رطوبتی و نیز افزایش پراکندگی محصول در طول جویچه شد. بخش عمده تلفات به‌دلیل کوتاه بودن طول جویچه‌ها و شیب زیاد به‌صورت رواناب بود.

تواضع و همکاران (۱۴۰۱) به‌منظور ارزیابی عملکرد، بهره‌وری آب و تحمل به خشکی ارقام سورگوم علوفه‌ای تحت روش‌ها و رژیم‌های مختلف آبیاری از چهار روش آبیاری (جویچه‌ای مرسوم، یک در میان ثابت، یک در میان متناوب و قطره‌ای نواری تیپ) و سه سطح تنش خشکی استفاده نمودند. در این پژوهش، آبیاری کامل، تنش متوسط و تنش شدید، به‌ترتیب معادل تأمین ۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد کمبود رطوبت خاک در نظر گرفته شد. حقیقتی و همکاران نیز تحقیقی با هدف (۱۳۹۴) بررسی اثر مدیریت‌های مختلف کم آبیاری بر بهره‌وری آب و عملکرد سیب‌زمینی انجام دادند. تیمارهای این آزمایش شامل دو روش آبیاری جویچه‌ای و قطره‌ای نواری، دو رقم سیب‌زمینی و چهار سطح آبیاری به میزان تأمین ۱۰۰، ۸۰ و ۶۵ درصد کمبود رطوبت خاک و آبیاری بخشی ناحیه ریشه بود. اثر مدیریت‌های کم آبیاری بر عملکرد غده، درصد ماده خشک، وزن مخصوص غده‌ها، تعداد غده در بوته، بهره‌وری آب و درصد اندازه غده‌های تولیدی در

مناطق با محدودیت‌هایی روبه‌رو است. یکی از مهم‌ترین موانع، هزینه اولیه بالای اجرای این سامانه‌هاست. در نتیجه، آبیاری سطحی همچنان روش غالب مصرف آب کشاورزی در سطح جهان به‌شمار می‌رود (Kim et al., 2025). آبیاری جویچه‌ای یکی از روش‌های متداول آبیاری سطحی است. این روش قابلیت استفاده در دامنه وسیعی از انواع خاک، شیب زمین و گیاهان را دارد. اجرای ساده، هزینه نسبتاً پایین و سازگاری مناسب با کشاورزی مکانیزه، موجب کاربرد گسترده آن در اراضی با مقیاس‌های بزرگ و کوچک شده است (Yadeta et al., 2022).

آبیاری جویچه‌ای در اغلب موارد با تلفات بالا همراه بوده و راندمان پایینی دارد در حالی که در بیش‌تر روش‌های آبیاری امکان دستیابی به راندمان کاربرد بالای ۹۰ درصد وجود دارد. راندمان پایین آبیاری جویچه‌ای در بسیاری از موارد نه به علت ماهیت این روش، بلکه ناشی از ضعف در طراحی، اجرای نادرست، مدیریت ناکارآمد، اتکالی بیش از اندازه به تجربه کشاورز، بیش آبیاری و عدم ارزیابی است (پهلوانی و همکاران، ۱۴۰۱؛ Akbari and Farahani., 2025). یکی از راه‌های بهبود راندمان آبیاری جویچه‌ای، کاهش تلفات نفوذ عمقی و رواناب سطحی از طریق قطع به موقع جریان ورودی است. پژوهش‌های پرشماری اثر معنی‌دار زمان قطع جریان بر اتلاف آب و راندمان آبیاری را تایید نموده‌اند (سرگلزایی و همکاران، ۱۴۰۰؛ Hamdi Ahmadabad et al., 2021). از سویی دیگر، نظر به آن که آب مهم‌ترین عامل محدودکننده کشاورزی در ایران است، اعمال تنش آبی بر روی برخی از محصولات زراعی امری اجتناب‌ناپذیر است (نادری و همکاران، ۱۳۹۶). کم آبیاری راهبردی مدیریتی است که به‌طور عمده، آبیاری کم‌تر از تیخیر-تغرق کامل محصول اعمال می‌کند تا میزان تولید به ازای واحد آب مصرفی را بیشینه نماید. دلایل علمی و تحقیقات متعددی نشان‌دهنده امکان بالقوه افزایش بهره‌وری آب از طریق اعمال کم آبیاری برای محصولات مختلف هستند (Fereses and Soriano, 2007; Capra et al., 2008; Geerts and Raes, 2009).

برای اعمال کم آبیاری در آبیاری جویچه‌ای روش‌های مدیریتی مختلف از نظر نحوه، زمان و سطح وجود دارد (Stikić et al., 2003; Temesgen et al., 2018; Chai et al., 2016; Bayisa et al., 2024; Ashine et al., 2021). نارایانان و سید با هدف شناسایی روش و سطح مناسب اعمال کم آبیاری برای دستیابی به عملکرد بهینه محصول، کیفیت و کارایی مصرف آب ذرت پژوهشی انجام دادند. آن‌ها دوازده تیمار به‌صورت ترکیبی از سه روش آبیاری جویچه‌ای مرسوم، یک در میان ثابت و متناوب و چهار سطح آبیاری شامل ۱۰۰، ۸۵، ۷۰ و ۵۰ درصد نیاز آبی را مورد آزمایش قرار دادند. بالاترین عملکرد دانه با ۸/۴ تن در هکتار در تیمار شاهد (آبیاری جویچه‌ای مرسوم با سطح آبیاری ۱۰۰ درصد) به دست آمد. تیمار آبیاری یک در

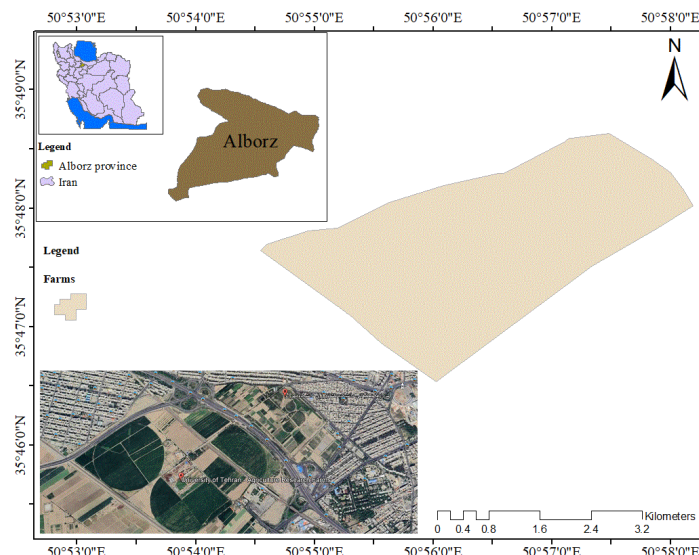
زمان آبیاری کامل نمی‌توان مطمئن بود که کم‌آبیاری به‌نحو موردنظر اعمال شود. این پژوهش تلاش دارد تا با کاهش زمان قطع جریان ورودی به جویچه بر اساس پیشروی سطحی و عمقی آب، عمق آب آبیاری را کاهش داده و نوعی از کم‌آبیاری را بر ذرت اعمال نماید. ذرت (*Zea mays L.*) به دلیل سازگاری بالا با شرایط مختلف و کاربردهای متعدد در تغذیه انسان، دام، طیور، سوخت زیستی و ...، مهم‌ترین غله جهان به شمار می‌رود. در سال ۲۰۲۳، ذرت با بیش از ۱/۲ میلیارد تن تولید در سراسر جهان، از نظر وزن، رتبه اول تولید در میان غلات را به خود اختصاص داده است (FAO, 2024). در ایران نیز در سال زراعی ۱۴۰۲-۱۴۰۱، مجموع سطح زیر کشت آبی ذرت دانه‌ای و علوفه‌ای به ۴۲۲ هزار هکتار و تولید آن به بیش از ۱۴/۴ میلیون تن رسید (وزارت جهاد کشاورزی، ۱۴۰۳).

### مواد و روش‌ها

این پژوهش در مزرعه پژوهشی دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران واقع در کرج انجام شد. این مزرعه با ارتفاع ۱۲۹۲/۹ متر از سطح دریا، در عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۴۸ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۰ درجه و ۵۷ دقیقه شرقی، قرار گرفته است. کرج دارای آب و هوای مدیترانه‌ای و متوسط سالیانه بارندگی آن ۲۶۵ میلی‌متر است. موقعیت مزرعه در شکل شماره ۱ نشان داده شده است.

سطح یک درصد معنی‌دار بود. قربانیان و همکاران با تاکید بر لزوم استفاده از روش‌های کم‌آبیاری به دلیل کمبود آب در مناطق مختلف جهان، مطالعه‌ای با هدف بهبود راندمان آبیاری نواری در شرایط کم‌آبیاری با تعیین زمان بهینه قطع جریان صورت دادند که با توجه به نزدیکی روش نواری با جویچه‌ای، در اینجا به بررسی آن پرداخته شده است. بدین منظور، ۱۰۲۴ شبیه‌سازی (ترکیب‌های مختلف داده‌های ورودی شامل پارامترهای فیزیکی و مدیریتی) با استفاده از WinSRFR انجام شد تا یک معادله رگرسیونی مناسب بین زمان قطع جریان و زمان پیشروی استخراج شود. سپس معادله به‌دست‌آمده با هشت سری آزمایش میدانی در دو منطقه مجزا از ایران اعتبارسنجی شد. رابطه بین زمان قطع جریان و زمان پیشروی در ۷۰ درصد طول نوار به‌عنوان یک معادله مناسب در تمام سطوح آبیاری معرفی شد. معادله توسعه‌یافته، راندمان کاربرد بالای ۶۰ درصد و یکنواختی بیش از ۸۰ درصد را در نوارهایی با دبی ورودی متوسط تا زیاد تضمین می‌کند (Ghorbanian et al., 2025).

در پژوهش‌های بررسی‌شده، روش‌های مختلف مدیریتی برای اعمال کم‌آبیاری شامل کم‌آبیاری تنظیم‌شده (مبتنی بر درصدی از نیاز آبی گیاه، کمبود رطوبتی خاک و نیاز آبی در انتهای جویچه) و آبیاری بخشی ناحیه ریشه (آبیاری یک در میان ثابت و متناوب) به کار گرفته شده است. با وجود سادگی در اجرا، این نوع از مدیریت با ایراداتی همراه است. با توجه به ماهیت آبیاری جویچه‌ای، به‌ویژه در جویچه‌هایی با طول زیاد، تنها با در نظر گرفتن درصدی از عمق یا



شکل ۱- موقعیت مزرعه پژوهشی دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

ابتداء، وسط و انتهای مزرعه در عمق‌های ۲۰-، ۴۰-۲۰ و ۶۰-۴۰ سانتی‌متری نمونه‌برداری خاک صورت گرفت. مطابق جدول شماره ۱،

عمق خاک زراعی مزرعه به‌دلیل وجود یک لایه سنگریزه در ۶۰ سانتی‌متری محدود است. به‌منظور ارزیابی ویژگی‌های خاک مزرعه، از

بافت خاک مزرعه لومی رسی است. میانگین جرم مخصوص ظاهری  $(\rho_b)$  برابر ۱/۳۱ گرم بر سانتی متر مکعب و میانگین رطوبت در ظرفیت زراعی (FC) و نقطه پژمردگی دائم (PWP) نیز به ترتیب برابر ۲۹/۴۰ و ۱۳/۷۷ درصد حجمی است.

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی خاک مزرعه

نقطه پژمردگی دائم	ظرفیت زراعی (درصد حجمی)	جرم مخصوص ظاهری (گرم بر سانتی متر مکعب)	درصد ذرات تشکیل دهنده خاک			بافت خاک	عمق (متر)	مکان
			سیلت (درصد)	شن (درصد)	رس (درصد)			
۱۴/۱	۲۹/۲	۱/۳۲	۲۶/۲	۴۲/۵	۳۱/۳	لومی رسی	۰/۰ - ۰/۲	ابتدا
۱۴/۸	۳۰/۳	۱/۳۳	۲۶/۲	۴۲/۵	۳۱/۳	لومی رسی	۰/۲ - ۰/۴	
۱۴/۳	۳۰/۱	۱/۲۹	۱۸/۷	۵۰/۰	۳۱/۳	لومی رسی سیلتی	۰/۴ - ۰/۶	
۱۳/۶	۲۸/۷	۱/۳۱	۲۵/۹	۴۳/۴	۳۰/۷	لومی رسی	۰/۰ - ۰/۲	وسط
۱۴/۴	۲۹/۸	۱/۳۲	۲۷/۶	۴۲/۹	۲۹/۵	لومی رسی	۰/۲ - ۰/۴	
۱۳/۴	۲۹/۴	۱/۳۲	۲۵/۷	۴۳/۲	۳۱/۱	لومی رسی	۰/۴ - ۰/۶	
۱۳/۲	۲۹/۶	۱/۳۱	۲۶/۲	۴۵/۰	۲۸/۸	لومی رسی	۰/۰ - ۰/۲	انتهای
۱۲/۴	۲۸/۴	۱/۳۰	۲۶/۲	۴۵/۰	۲۸/۸	لومی رسی	۰/۲ - ۰/۴	
۱۳/۷	۲۹/۱	۱/۳۱	۲۸/۷	۴۲/۵	۲۸/۸	لومی رسی	۰/۴ - ۰/۶	

در نظر گرفته شد. عمق حسگر در تمام تیمارها نسبت به هم یکسان بود.

برای واسنجی حسگرهای رطوبتی TDR، یک کرت به ابعاد ۲×۲ متر اشباع شده و سپس به مدت ۱۰ روز، هم‌زمان با قرائت رطوبت توسط دستگاه، نمونه وزنی رطوبت خاک برداشته شد. با استفاده از نرم افزار SPSS بهترین معادله برای واسنجی دستگاه تعیین شد. برای ارزیابی این معادله از آماره‌های  $R^2$ ، RMSE و NRMSE استفاده شد:

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(S_i - \bar{S})]^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \times \sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2} \quad (1)$$

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

$$NRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{N}} \times \frac{100}{\bar{O}} \quad (3)$$

که در این روابط  $O_i$  مقادیر اندازه‌گیری شده،  $\bar{O}$  متوسط مقادیر اندازه‌گیری شده،  $S_i$  مقادیر برآورد شده،  $\bar{S}$  متوسط مقادیر برآورد شده و  $N$  تعداد نمونه‌ها هستند (Hassanli et al., 2016).

در تاریخ ۱ تیر ماه ۱۴۰۳، ایجاد جویچه‌ها و کاشت بذر ذرت رقم سینگل کراس ۷۰۴ (SC 704) در زمینی به ابعاد ۲۴۷۵ مترمربع، به صورت مکانیزه با استفاده از فاروئر و کارنده متصل به تراکتور با عرض جوی و پشته (فاصله ردیف) ۷۵ سانتی‌متر، فاصله کشت ۱۵ سانتی‌متر در هر ردیف، طول ۱۰۰ متر و تراکم ۸۸۸۵ بوته در هکتار صورت گرفت. زمین مزرعه مطابق روش مرسوم با شخم و دیسک

این مطالعه در قالب طرح آماری بلوک‌های کامل تصادفی با پنج تیمار و سه تکرار انجام شد. عامل این طرح، کم‌آبیاری مبتنی بر زمان قطع جریان ورودی به جویچه با طول ۱۰۰ متر بود. قطع جریان بر اساس رسیدن جبهه رطوبتی به عمق موردنظر خاک در فاصله مشخصی از ابتدای جویچه صورت گرفت. به منظور تعیین زمان رسیدن جبهه رطوبتی به عمق موردنظر از حسگرهای رطوبتی TDR استفاده شد. با توجه به نمودارهای رایج پیشروی و نفوذ برای خاک‌های مشابه، حسگرها در فواصل ۱۰۰ (L2)، ۹۰ (L3)، ۶۰ (L4) و ۰ (L5) متری از ابتدای جویچه قرار گرفتند. در تیمار شاهد (L1) نیز، قطع جریان پس از تأمین عمق آب مورد نیاز گیاه در انتهای جویچه انجام شد. تیمارهای بررسی شده زمان قطع جریان بر اساس فاصله از ابتدای جویچه یا نوار آبیاری در تحقیق گریس و همکاران ۷۰ تا ۱۰۰ درصد طول و در تحقیق اسلام و همکاران نیز ۵۵ تا ۷۵ درصد طول در نظر گرفته شده است (Geries et al., 2021; Aslam et al., 2023). در تحقیقات مشابه، معیار زمان قطع جریان، پیشروی جریان آب در سطح جویچه یا نوار بوده است در حالی که تحقیق حاضر، رسیدن جبهه رطوبتی به عمق موردنظر خاک در فاصله موردنظر از ابتدای جویچه را معیار قرار خواهد داد. بنابراین، حسگرها باید در نسبت کم‌تری از طول جویچه قرار بگیرند. عمق قرارگیری حسگرها با توجه به عمق آب آبیاری متفاوت بود. بدین منظور، چهار عمق ۱۸، ۲۰، ۲۲ و ۲۴ سانتی‌متر برای حسگرها تعیین شد و در طول فصل کشت، پیش از هر آبیاری با توجه به عمق آب آبیاری مورد نیاز، عمق حسگر از بین این چهار سطح انتخاب شد. بدین معنی که هر چه عمق آب آبیاری بیش‌تری مورد نیاز بود، عمق بیش‌تری برای حسگر

برداشت شد. زمانی که دانه ذرت در اواخر مرحله شیری و اوایل مرحله خمیری بود، ذرت به صورت علوفه‌ای برداشت شد (۹۴ روز پس از کشت). در این مرحله، ماده خشک گیاه حدود ۳۵ درصد است و حدود ۶۵ درصد رطوبت دارد که تاثیر خوبی بر کیفیت ذرت سیلوئی خواهد داشت. پس از آن، زمانی که رطوبت دانه به میزان قابل قبول (۲۰-۲۳ درصد) کاهش یافت، برداشت ذرت به صورت دانه‌ای انجام گرفت (۱۱۳ روز پس از کشت). صفات گیاهی در تیمارها و تکرارهای مختلف، در ابتدا، وسط و انتهای هر پشته اندازه‌گیری و ثبت شدند. صفات اندازه‌گیری شده شامل عملکرد زیست‌توده تر، عملکرد زیست‌توده خشک، عملکرد دانه، وزن هزار دانه و ارتفاع گیاه بودند. شاخص برداشت (HI) به صورت نسبت عملکرد دانه به زیست‌توده خشک محاسبه شد. بهره‌وری آب آبیاری مبتنی بر عملکرد زیست‌توده تر ( $WP_{FB}$ )، عملکرد زیست‌توده خشک ( $WP_{DB}$ ) و عملکرد دانه ( $WP_Y$ ) بر حسب کیلوگرم بر مترمکعب و بر اساس روابط ۵ تا ۷ محاسبه شد (شمسی پایکیاده و همکاران، ۱۴۰۱):

$$WP_{FB} = \frac{FB}{I} \quad (۵)$$

$$WP_{DB} = \frac{DB}{I} \quad (۶)$$

$$WP_Y = \frac{Y}{I} \quad (۷)$$

در روابط بالا،  $FB$  عملکرد زیست‌توده تر (کیلوگرم در هکتار)،  $DB$  عملکرد زیست‌توده خشک (کیلوگرم در هکتار)،  $Y$  عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار) و  $I$  آب مصرفی در طول فصل کشت (مترمکعب در هکتار) می‌باشند.

محاسبات آماری شامل تجزیه واریانس و مقایسه میانگین‌های صفات گیاهی با آزمون دانکن در سطح احتمال یک و پنج درصد در نرم‌افزار SAS 9.4 انجام شد. نمودارها نیز به کمک Python رسم شدند.

## نتایج و بحث

در طول فصل کشت، ۱۶ بار آبیاری انجام شد (جدول شماره ۲). در چهار آبیاری ابتدایی تمام تیمارها به‌طور یکسان و به اندازه تأمین کامل نیاز آبی، آبیاری شدند. مراحل ابتدایی رشد به دلیل توسعه نیافتگی سیستم ریشه، بسیار نسبت به تنش خشکی حساس هستند و اعمال کم آبیاری در این مرحله می‌تواند استقرار و تراکم بوته را به‌طور جدی تحت‌تأثیر قرار دهد (Evans, 1975). بنابراین، از آبیاری پنجم با تکمیل استقرار اولیه گیاه (مرحله پنج تا هفت برگه‌ای)، اعمال تیمار آغاز شد. بین آبیاری‌های شماره ۱۵ و ۱۶، دو واقعه بارش رخ داد که طبق روش USDA، مجموع بارش مؤثر این دو واقعه برابر ۲۵/۹ میلی‌متر بود (Patwardhan et al., 1990). این میزان از نیاز آبی تیمار شاهد در رویداد ۱۶ کاسته شد و آبیاری تکمیلی برای این

زدن برای فصل کشت آماده شد. هر تیمار دارای پنج پشته و شش جویچه بود که اندازه‌گیری‌ها در سه پشته مرکزی انجام شد و یک پشته از هر سمت برای حذف اثرات جانبی از دور اندازه‌گیری‌ها خارج شد. بین تیمارها فاصله ۱/۵ متری رعایت شد. در طول فصل کشت، علف‌های هرز به صورت دستی وجین شدند. برنامه‌ریزی برای کوددهی، بر اساس آزمایشات خاک انجام شد. بدین نحو که در چهار مرحله قبل از کاشت، شش تا هشت برگه‌ای، قبل از ساقه‌دهی و قبل از ظهور تاسل در مجموع ۴۰۰ کیلوگرم بر هکتار اوره، ۲۰۰ کیلوگرم بر هکتار سوپر فسفات تریپل، ۲۰۰ کیلوگرم بر هکتار سولفات پتاسیم و ۲۵ کیلوگرم در هکتار سولفات روی به صورت کودآبیاری استفاده شد. آب آبیاری از چاه موجود در مزرعه تأمین شد که طبق اندازه‌گیری‌ها با هدایت الکتریکی ۰/۷۹ دسی‌منس بر متر و اسیدیته ۷/۷۴، از کیفیت خوبی برای آبیاری برخوردار بود (Ayers & Westcot, 1985). آب از چاه مزرعه به وسیله پمپاژ در لوله اصلی تا بالای مزرعه و سپس از طریق لوله نیمه‌اصلی تا ابتدای مزرعه آمده و از آن‌جا نیز به کمک لوله فرعی در عرض مزرعه کشیده شد. در ابتدای هر جویچه یک شیر بر روی لوله فرعی نصب شد تا آبیاری به‌نحو موردنظر مدیریت شود. با در نظر گرفتن بیشینه دبی غیر فرسایشی برای شرایط مزرعه از جمله بافت خاک و شیب و همچنین دبی قابل تأمین، دبی ورودی به جویچه برابر ۰/۳ لیتر بر ثانیه تعیین شد. با تنظیم شیر ابتدای هر جویچه و استفاده از فلوم‌های WSC تیپ ۱، دبی بر روی میزان موردنظر تثبیت شد.

دور آبیاری هفت روز در نظر گرفته شد. آبیاری اول در روز کشت، با هدف کمک به جوانه‌زنی، تا خیس شدن کامل پشته‌ها ادامه یافت. عمق آب آبیاری در هر دور با استفاده از داده‌های هواشناسی ایستگاه مزرعه پژوهشی دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران و از طریق رابطه شماره ۴ تعیین شد. بدین ترتیب که داده‌های هواشناسی مورد نیاز در نرم‌افزار CROPWAT وارد شده و تبخیر-تعرق گیاه مرجع با استفاده از روش فائو پنمن مانیتیت محاسبه شد. داده‌های هواشناسی شامل دمای هوای بیشینه و کمینه، متوسط رطوبت نسبی، متوسط سرعت باد، ساعات آفتابی و بارش بودند. ضرایب گیاهی ابتدایی، میانی و پایانی ذرت در نشریه فائو ۵۶ به ترتیب برابر ۰/۳، ۱/۲ و ۰/۶ هستند که پس از اصلاح بر اساس متغیرهای اقلیمی (رطوبت نسبی و سرعت باد) به ۰/۲۹، ۱/۲۸ و ۰/۶۷ تغییر یافتند (Allen et al., 1998).

$$d_g = \frac{\sum_{i=1}^7 (ET_o \times K_c)}{E} \quad (۴)$$

در رابطه بالا،  $d_g$  عمق آب آبیاری (میلی‌متر)،  $ET_o$  تبخیر-تعرق گیاه مرجع (میلی‌متر در روز)،  $K_c$  ضریب گیاهی ذرت (-) و  $E$  راندمان آبیاری سطحی (اعشار) است. در پایان فصل کشت، ذرت به دو صورت علوفه‌ای و دانه‌ای

به تیمار شاهد شده و در واقع نوعی از کم آبیاری اعمال گردد. تفاوت در فاصله قرارگیری حسگرها نیز سبب تفاوت در سطح کم آبیاری در تیمارهای مختلف شده است؛ بدین ترتیب که در تیمارهای L3، L4 و L5 به ترتیب ۸۲/۹، ۷۵/۴، ۶۹/۸ و ۶۴/۱ درصد از نیاز آبی برآورده شده است. هر چه حسگر در فاصله کمتری از ابتدای جویچه باشد، پیشروی سطحی آب تا محل آن سریع تر رخ داده، زمان رسیدن جبهه رطوبتی به عمق قرارگیری آن کوتاه تر شده و بنابراین زمان آبیاری در آن تیمار کاهش می یابد که این روند در نهایت منجر به کم آبیاری شدیدتری می گردد.

تیمار به اندازه تأمین ۲/۹ میلی متر نیاز آبی صورت گرفت. بدیهی است که سایر تیمارها نیاز به آبیاری در این دور نداشتند. نیاز آبی ذرت تا روز ۱۰۶ پس از کشت برابر ۵۴۶/۵ میلی متر (معادل ۵۴۶۵ مترمکعب در هکتار) برآورد شد. عمق آب آبیاری در تیمار شاهد نیز برابر ۶۹۵/۶ میلی متر (معادل ۶۹۵۶ مترمکعب در هکتار) بود که نشان می دهد راندمان آبیاری جویچه ای برابر ۷۸/۶ درصد بوده است. تفاوت در زمان قطع جریان ورودی به جویچه های هم اندازه، با توجه به ثابت بودن دبی، منجر به تفاوت در عمق آب آبیاری می گردد. محل قرارگیری حسگرها (فاصله و عمق) به نحوی انتخاب شد که زمان مورد نیاز برای رسیدن جبهه رطوبتی به این نقاط، منجر به قطع زودتر جریان نسبت

جدول ۲- جدول آبیاری فصل کشت

شماره آبیاری	روز پس از کشت	عمق قرارگیری حسگر (سانتی متر)	نیاز آبی (میلی متر)	عمق آب آبیاری (میلی متر)				
				L5	L4	L3	L2	L1
۱	۱	-	۲۰/۰	۲۰/۰	۲۰/۰	۲۰/۰	۲۰/۰	۲۰/۰
۲	۸	-	۱۴/۲	۲۲/۱	۲۲/۱	۲۲/۱	۲۲/۱	۲۲/۱
۳	۱۵	-	۱۵/۱	۲۲/۸	۲۲/۸	۲۲/۸	۲۲/۸	۲۲/۸
۴	۲۲	-	۱۵/۸	۲۳/۵	۲۳/۵	۲۳/۵	۲۳/۵	۲۳/۵
۵	۲۹	۱۸	۱۹/۷	۲۷/۸	۳۰/۰	۲۳/۳	۱۹/۹	۱۶/۲
۶	۳۶	۱۸	۲۹/۱	۳۹/۱	۲۹/۰	۲۳/۵	۱۹/۴	۱۶/۸
۷	۴۳	۲۰	۳۸/۲	۴۸/۷	۳۵/۰	۲۹/۶	۲۶/۰	۲۳/۳
۸	۵۰	۲۲	۴۷/۶	۵۷/۸	۴۳/۴	۳۹/۵	۳۵/۵	۳۲/۸
۹	۵۷	۲۴	۵۴/۰	۶۶/۰	۵۴/۴	۴۹/۲	۴۶/۲	۴۲/۱
۱۰	۶۴	۲۴	۵۲/۶	۶۴/۳	۵۳/۱	۴۹/۵	۴۵/۴	۴۱/۱
۱۱	۷۱	۲۴	۵۶/۸	۶۹/۱	۵۲/۳	۴۸/۴	۴۵/۶	۴۰/۹
۱۲	۷۸	۲۴	۴۹/۹	۶۱/۲	۵۳/۷	۴۷/۷	۴۴/۸	۴۱/۷
۱۳	۸۵	۲۴	۴۸/۲	۵۹/۳	۵۲/۰	۴۸/۱	۴۵/۱	۴۰/۴
۱۴	۹۲	۲۲	۴۲/۲	۵۲/۶	۴۳/۰	۳۹/۲	۳۴/۸	۳۰/۸
۱۵	۹۹	۲۲	۴۰/۳	۵۰/۴	۴۲/۵	۳۸/۳	۳۴/۲	۳۱/۶
۱۶	۱۰۶	-	۲/۹	۱۰/۸	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰
		مجموع	۵۴۶/۵	۶۹۵/۶	۵۷۶/۹	۵۲۴/۶	۴۸۵/۵	۴۴۶/۱
		سطح آبیاری (%)	۱۰۰/۰	۸۲/۹	۷۵/۴	۶۹/۸	۶۴/۱	

آغاز می شد و ابتدا هر پنج دقیقه و سپس هر سه دقیقه یک بار تکرار می شد. با توجه به RMSE معادله واسنجی دستگاه که برابر ۱/۱۷ درصد بود، ملاک قطع جریان، افزایش رطوبت نسبت به رطوبت قرائت شده ی پیش از آبیاری، به میزان بیش از یک درصد در نظر گرفته شد.

نتایج تجزیه واریانس صفات گیاهی ذرت در جدول شماره ۴ ارائه شده است. بر این اساس، اثر تیمار کم آبیاری بر هر شش صفت مورد بررسی معنی دار بوده است.

بر اساس ارزیابی آماری با نرم افزار SPSS، از بین انواع معادله ها، معادله خطی  $(y=ax+b)$  با ضرایب a و b به ترتیب برابر ۰/۱۵۹ و ۱۶/۷۳۹ بهترین معادله برای تبدیل مقادیر اندازه گیری شده با TDR به مقادیر واقعی رطوبت حجمی خاک انتخاب شد (جدول شماره ۳). قبل از شروع آبیاری، رطوبت در محل حسگر (فاصله و عمق مشخصی که قرار بود در حین آبیاری ملاک قطع جریان در آن تیمار باشد) با دستگاه قرائت می شد. این قرائت سه بار تکرار می شد تا میانگین این سه قرائت، به عنوان رطوبت پیش از آبیاری آن نقطه ثبت شود. با شروع آبیاری، پس از پیشروی آب به فاصله حسگر، قرائت ها

جدول ۳- شاخص‌های آماری بین مقادیر اندازه‌گیری شده و برآوردشده با معادله واسنجی TDR

شاخص آماری	R <sup>2</sup>	RMSE	NRMSE
واحد	-	%	%
مقدار	۰/۹۱	۱/۱۷	۴/۸۱

جدول ۴- نتایج تجزیه واریانس صفات گیاهی

منابع تغییر	درجه آزادی	عملکرد زیست‌توده	عملکرد زیست‌توده خشک	عملکرد دانه	وزن هزار دانه	ارتفاع	شاخص برداشت
تکرار (بلوک)	۲	ns ۱/۹۱۴	ns ۰/۶۶۹	ns ۰/۰۷۹	ns ۳۷۷/۲۰۰	ns ۸۰/۶۴۱	ns ۲/۲۰۷
تیمار	۴	** ۴۵۲/۴۷۱	** ۴۰/۸۶۲	** ۱۶/۷۷۰	** ۶۰۳۷/۳۷۷	** ۲۷۷۲/۲۶۲	** ۲۴/۲۸۴
خطای آزمایش	۸	۲۰/۵۲۶	۳/۴۹۷	۰/۹۱۱	۷۰۴/۶۰۵	۳۹۹/۷۱۲	۰/۸۳۷
ضریب تغییرات (درصد)		۹/۴۷	۸/۶۷	۹/۴۰	۹/۰۸	۹/۴۶	۱/۹۷

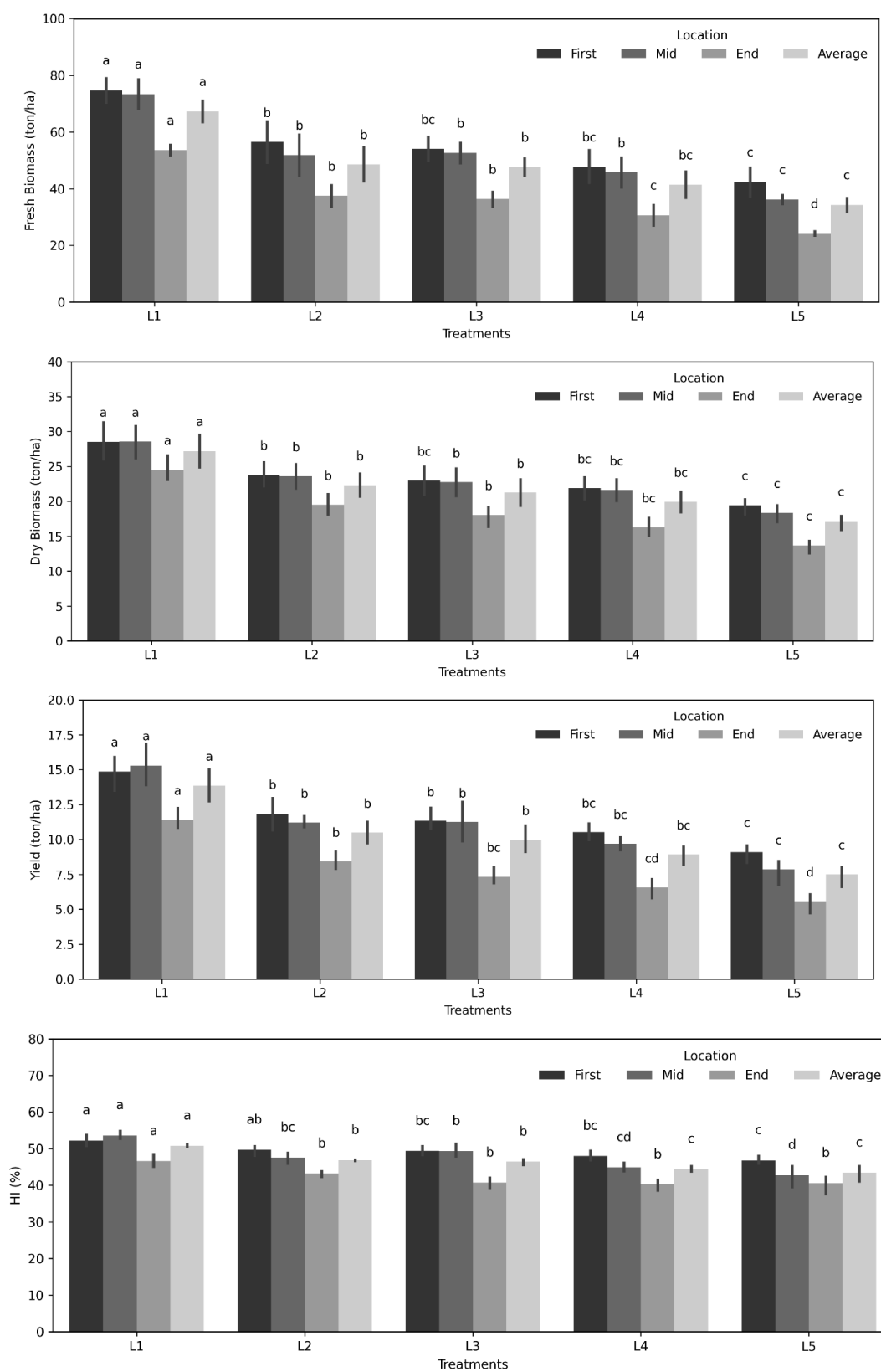
سازگاری فیزیولوژیکی گیاه برای صرفه‌جویی در مصرف آب باشد. پهلوانی و همکاران در کشت ذرت سینگل کراس ۷۰۴ در کرج تحت آبیاری جویچه‌ای، عملکرد زیست‌توده تر و خشک را به ترتیب ۵۲/۴ و ۳۳/۳ تن در هکتار اعلام نمودند (پهلوانی و همکاران، ۱۴۰۱).

عملکرد دانه نیز به شدت تحت تأثیر کم آبیاری قرار گرفت. عملکرد دانه از ۱۳/۸۵۸ تن در هکتار در تیمار L1 با ۴۵/۸۰ درصد کاهش به ۷/۵۱۱ تن در هکتار در تیمار L5 رسید. کاهش میانگین عملکرد دانه از ابتدا به انتهای جویچه نیز ۳۲/۷۸ درصد محاسبه شد. وطن‌خواه و همکاران نیز افزایش پراکنندگی محصول ذرت سینگل کراس ۷۰۴ در طول جویچه در اثر کم آبیاری را گزارش نمودند (وطن‌خواه و همکاران، ۱۳۹۸). امداد و همکاران در پژوهشی که با هدف ارزیابی تأثیر مدیریت آبیاری جویچه‌ای یک در میان متناوب در مراحل مختلف رشد بر عملکرد و کارایی مصرف آب ذرت در کرج انجام شد، عملکرد دانه را در بازه ۹/۲۷۶ تن در هکتار برای آبیاری جویچه‌ای به روش مرسوم (تیمار شاهد) تا ۶/۲۸۹ تن در هکتار برای تیمار آبیاری جویچه‌ای یک در میان متناوب برای کل دوره اندازه‌گیری کردند. بر این اساس آن‌ها توصیه کردند که برای دستیابی به کارایی مصرف آب بالا، آبیاری کامل در مرحله گلدهی صورت گیرد (امداد و همکاران، ۱۳۹۶).

شاخص برداشت نیز تحت تأثیر کم آبیاری از ۵۰/۷۷ درصد در تیمار L1 به ۴۳/۴۰ درصد در تیمار L5 کاهش یافت. حساسیت بیش‌تر عملکرد دانه به کمبود آب در مقایسه با زیست‌توده خشک، نشان‌دهنده اهمیت تأمین آب کافی در مراحل گل‌دهی و پرشدن دانه است، زیرا در این مراحل کمبود آب می‌تواند باعث اختلال در لقاح، کاهش تعداد دانه‌های بارور و محدود شدن پرشدگی دانه شود (Rudnick et al., 2019; Yang et al., 2022).

مقایسه میانگین‌های عملکرد زیست‌توده تر، عملکرد زیست‌توده خشک، عملکرد دانه و شاخص برداشت به تفکیک برای ابتدا، وسط و انتهای جویچه و نیز به‌طور میانگین برای کل جویچه در شکل شماره ۲ نشان داده شده است. در بررسی عملکرد زیست‌توده تر، بیش‌ترین مقدار میانگین با ۶۷/۲۶۵ تن در هکتار در تیمار L1 و کم‌ترین مقدار با ۳۴/۲۷۲ تن در هکتار در تیمار L5 ثبت شد. به عبارتی کاهش عمق آب آبیاری از ۱۰۰ به ۶۴ درصد نیاز آبی (۳۶ درصد) سبب افت ۴۹/۰۵ درصدی زیست‌توده تر گردید. همچنین، مقایسه مقادیر در طول جویچه نشان داد که در تیمار L1 مقدار زیست‌توده تر از ۷۴/۷۲۶ تن در هکتار در ابتدای جویچه به ۵۳/۶۴۹ تن هکتار در انتهای جویچه کاهش یافت که معادل ۲۸/۲۱ درصد افت عملکرد در طول جویچه است. تنها علت کاهش عملکرد از ابتدا به انتهای جویچه کم آبیاری نیست و بخشی از آن ناشی از ذات آبیاری جویچه‌ای و ناهمگنی نفوذ است. در سایر تیمارها نیز الگوی مشابهی مشاهده شد ولی میزان کاهش در تیمارهای کم آبیاری شدیدتر بود، به طوری که در تیمار L5 افت از ابتدا به انتهای جویچه به ۴۲/۷۵ درصد رسید.

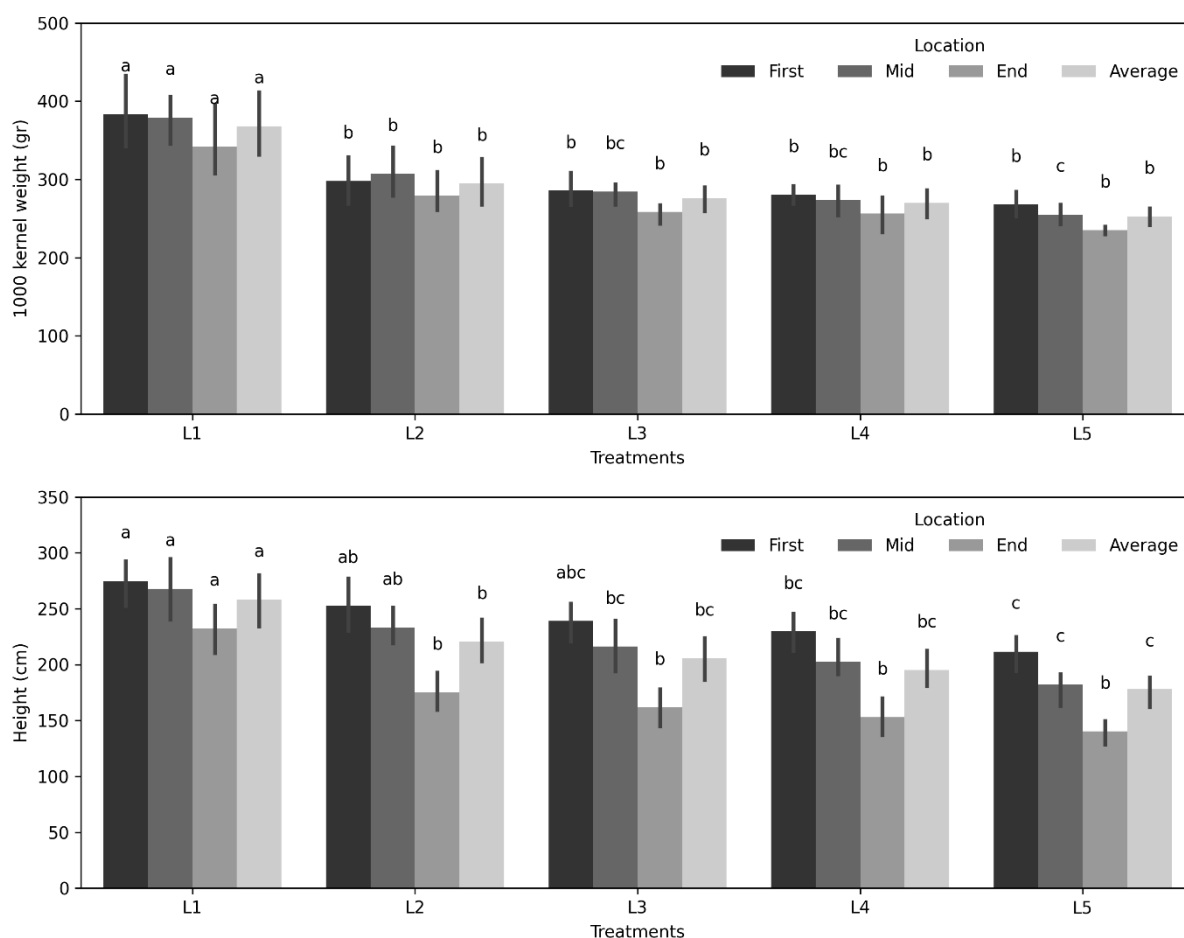
عملکرد زیست‌توده خشک نیز الگوی مشابهی با زیست‌توده تر داشت. بیش‌ترین مقدار آن در تیمار L1 برابر ۲۷/۱۹۶ تن در هکتار و کم‌ترین مقدار در تیمار L5 برابر ۱۷/۱۵۰ تن در هکتار (۳۶/۹۴ درصد) به دست آمد. میانگین درصد کاهش عملکرد زیست‌توده خشک از ابتدا به انتهای جویچه در تیمارهای مختلف ۲۱/۷۷ درصد بود. کاهش زیست‌توده و تولید ماده خشک در اثر تنش آبی امری قابل انتظار است؛ زیرا کمبود آب منجر به کاهش سطح فتوسنتزی، کاهش رشد برگ و محدود شدن تقسیم سلولی و رشد ساقه می‌شود که در نهایت تولید زیست‌توده را کاهش می‌دهد (Setu et al., 2023; Rudnick et al., 2019). همچنین، نسبت بین زیست‌توده خشک و تر در تیمارهای کم آبیاری تا حدودی تغییر نموده که می‌تواند ناشی از



شکل ۲- مقایسه میانگین‌های عملکرد زیست‌توده تر، عملکرد زیست‌توده خشک، عملکرد دانه و شاخص برداشت

ارتفاع گیاه نیز به‌طور معنی‌داری با افزایش شدت کم‌آبیاری کاهش یافت. در تیمار L1، میانگین ارتفاع گیاه ۲۵۸/۲ سانتی‌متر بود در حالی که در تیمار L5 به ۱۷۷/۹ سانتی‌متر کاهش یافت. بررسی تغییرات در طول جویچه نشان داد که حتی در تیمار L1 ارتفاع گیاه از حدود ۲۷۴/۵ سانتی‌متر در ابتدای جویچه به حدود ۲۳۲/۲ سانتی‌متر در انتهای آن کاهش یافته است. در تیمارهای کم‌آبی، این کاهش شدیدتر بود. کاهش ارتفاع ناشی از کاهش تقسیم سلولی و کاهش فشار تورژسانس در بافت‌های مریستمی در شرایط کم‌آبی است (Egea et al., 2022; Maachi et al., 2025).

مقایسه میانگین‌های صفات وزن هزار دانه و ارتفاع گیاه در شکل شماره ۳ ارائه شده است. وزن هزار دانه تحت تأثیر کم‌آبیاری، روند نزولی مشخصی نشان داد. بیش‌ترین مقدار آن در تیمار L1 با ۳۶۷/۸۹ گرم ثبت شد و در نتیجه‌ی کاهشی پیوسته با افزایش تنش آبی، به کم‌ترین مقدار خود در تیمار L5 با ۲۵۲/۶۷ گرم رسید (۳۱/۳۲ درصد کاهش). کاهش وزن هزار دانه معمولاً ناشی از کوتاه‌تر شدن دوره پرشدن دانه و کاهش انتقال مواد فتوسنتزی از برگ به دانه در شرایط کم‌آبی است. در تحقیقات مشابه، نشان داده شده که حتی کاهش موقت در تأمین آب در زمان پرشدن دانه، می‌تواند باعث افت قابل‌ملاحظه وزن دانه شود (Zhao et al., 2023).



شکل ۳- مقایسه میانگین‌های وزن هزار دانه و ارتفاع گیاه

عملکرد به حجم آب مصرفی تغییر محسوسی نمی‌کند. در تیمارهای کم‌آبیاری میزان آب مصرفی کاهش یافته اما افت عملکرد به همان نسبت یا حتی بیش‌تر بوده است، بنابراین نسبت کلی بهره‌وری تقریباً ثابت مانده است.

نتایج تجزیه واریانس بهره‌وری آب آبیاری در جدول شماره ۵ و مقایسه میانگین‌های مربوطه در شکل شماره ۴ نشان داده شده است. بر اساس نتایج تجزیه واریانس، هرچند از نظر عددی تفاوت‌هایی بین تیمارها وجود داشت اما این تفاوت‌ها معنی‌دار نبود. کاهش آب آبیاری و کاهش عملکرد معمولاً هم‌زمان رخ می‌دهد؛ در نتیجه نسبت

جدول ۵- نتایج تجزیه واریانس بهره‌وری آب آبیاری

منابع تغییر	درجه آزادی	بهره‌وری آب زیست‌توده تر	بهره‌وری آب زیست‌توده خشک	بهره‌وری آب دانه
تکرار (بلوک)	۲	ns/۰۶۵	ns/۰۳۰	ns/۰۰۷
تیمار	۴	ns۱/۶۶۹	ns۰/۰۴۱	ns۰/۰۳۸
خطای آزمایش	۸	۰/۶۸۸	۰/۱۰۸	۰/۰۲۹
ضریب تغییرات (درصد)		۹/۵۵	۸/۲۹	۹/۲۳

تعداد گیاهان چهار کربنه بسیار اندک است، به نحوی که از حدود ۳۰۰۰۰ گونه گیاهان گلدار، نزدیک به ۱۰۰۰ گونه چهار کربنه هستند. از گیاهان چهار کربنه می‌توان به ذرت، سورگوم، نیشکر و ارزن اشاره نمود (علیزاده، ۱۴۰۱). بنابراین ذرت به‌طور ذاتی دارای کارایی مصرف آب بالایی بوده و حتی تحت آبیاری کامل نیز بهره‌وری آب آبیاری مناسبی دارد.

### نتیجه‌گیری

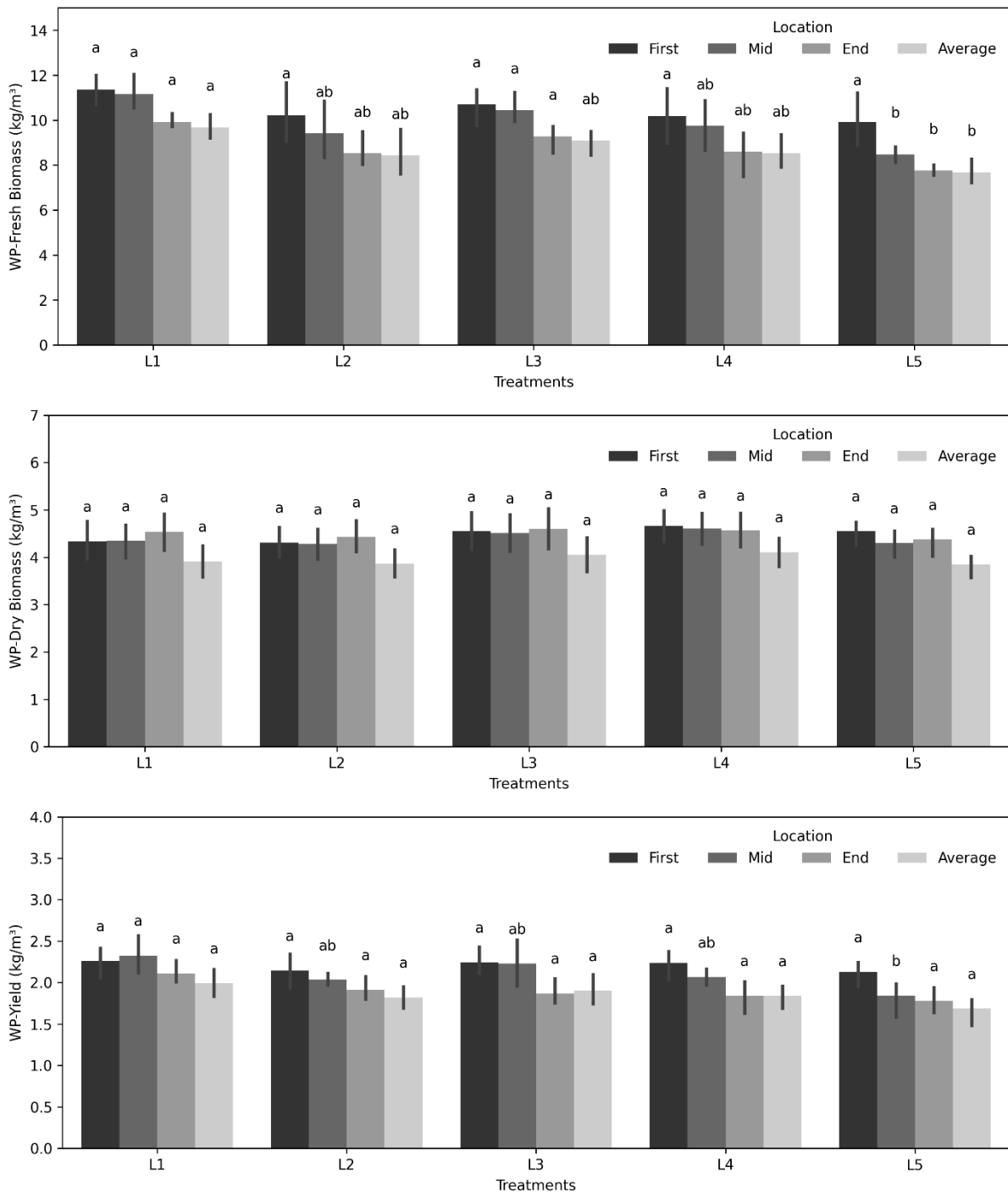
بر اساس نتایج، با کاهش سطح آبیاری، تمام صفات رشدی و عملکردی ذرت به‌طور معنی‌داری کاهش یافتند، در حالی که شاخص‌های بهره‌وری آب آبیاری تغییر معنی‌داری نشان ندادند. این یافته‌ها تأیید می‌کند که افزایش بهره‌وری آب آبیاری صرفاً از طریق کاهش حجم آبیاری و توزیع دقیق کم‌آبیاری قابل دستیابی نیست، بلکه نیازمند زمان‌بندی مناسب است. از آنجایی که تحمل به خشکی به‌طور قابل توجهی بر اساس ژنوتیپ و مرحله فنولوژیکی متفاوت است، پیش‌نیاز اعمال کم‌آبیاری، دانش دقیق از پاسخ محصول به تنش خشکی برای هر یک از مراحل رشد است. برای دستیابی به عملکرد بالا در شرایط محدودیت منابع آبی، توصیه می‌شود آبیاری در مراحل حساس رشد گیاه (به‌ویژه گل‌دهی و پرشدن دانه) به‌صورت کامل انجام شود و کم‌آبیاری در مراحل که حساسیت کم‌تری دارند، اعمال شود.

در آبیاری جویچه‌ای به روش مرسوم، با توجه به تفاوت در فرصت زمان نفوذ در طول جویچه، میزان نفوذ یکنواخت نبوده و از ابتدا به انتهای جویچه میزان نفوذ کاهش می‌یابد. شیب کاهش نفوذ در طول جویچه نیز یکنواخت نیست. با توجه به نمودارهای پیشروی و پسروی مرسوم که تفاوت بین آن‌ها فرصت زمان نفوذ را نشان می‌دهد، شیب کاهش نفوذ در انتهای جویچه شدت می‌یابد. همین امر سبب شده تا میان صفات عملکردی ذرت در ابتدا و وسط جویچه تفاوت چندانی مشاهده نشود اما این صفات در انتهای جویچه کاهش معنی‌داری داشته باشند.

مقایسه میانگین‌های بهره‌وری آب آبیاری مبتنی بر عملکرد زیست‌توده تر، عملکرد زیست‌توده خشک و عملکرد دانه در شکل شماره ۴ نمایش داده شده است. بهره‌وری آب آبیاری مبتنی بر عملکرد زیست‌توده تر در بازه ۹/۶۷۱ (L1) تا ۷/۶۸۴ (L5) کیلوگرم بر مترمکعب، بهره‌وری آب آبیاری مبتنی بر عملکرد زیست‌توده خشک در بازه ۴/۱۰۷ (L4) تا ۳/۸۴۵ (L5) کیلوگرم بر مترمکعب و بهره‌وری آب آبیاری مبتنی بر عملکرد دانه نیز در بازه ۱/۹۹۲ (L1) تا ۱/۶۸۴ (L5) کیلوگرم بر مترمکعب محاسبه شد. اگرچه بین تیمارهای مختلف تفاوت معنی‌داری یافت نشد اما در هر سه بهره‌وری محاسبه‌شده، تیمار L5 کم‌ترین مقدار را ثبت کرده است که نشان می‌دهد برخلاف انتظار، اعمال کم‌آبیاری نه تنها بهره‌وری آب آبیاری را افزایش نداده بلکه منجر به کاهش آن گردیده است.

این یافته با نتایج برخی از پژوهش‌های دیگر هم‌خوانی دارد. در پژوهش احمدوند و همکاران، آبیاری جویچه‌ای ذرت علوفه‌ای تحت چهار مدیریت آبیاری با تأمین ۱۰۰، ۸۰ و ۶۰ درصد نیاز آبی گیاه و آبیاری جویچه‌ای یک در میان انجام شد. بهره‌وری آب مبتنی بر زیست‌توده تر در تیمار آبیاری کامل با ۹/۲۳۹ کیلوگرم بر مترمکعب بالاترین مقدار و در تیمار آبیاری ۶۰ درصد با ۶/۷۱۸ کیلوگرم بر مترمکعب کم‌ترین مقدار را ثبت نمود. بهره‌وری آب مبتنی بر زیست‌توده خشک نیز در تیمار آبیاری ۶۰ درصد، مقدار کمینه را نشان داد (احمدوند و همکاران، ۱۴۰۰). دهقانی و همکاران در کشت ذرت سینگل کراس ۷۰۴، سه سطح آبیاری ۱۰۰، ۸۰ و ۶۰ درصد نیاز آبی را تحت سه روش آبیاری جویچه‌ای مرسوم و آبیاری جویچه‌ای یک در میان ثابت و متناوب اعمال کردند. آن‌ها اعلام نمودند که بهره‌وری آب آبیاری مبتنی بر عملکرد زیست‌توده خشک با کاهش سطح آبیاری تحت هر سه روش، کاهش یافته است (دهقانی و همکاران، ۱۳۹۸).

گیاهان بر اساس اولین محصول تثبیت دی‌اکسیدکربن در فرآیند فتوسنتز به سه نوع C3 (سه کربنه)، C4 (چهار کربنه) و CAM (چهار کربنه) تقسیم می‌شوند. این سه گروه گیاهان از نظر کارایی مصرف آب بسیار متفاوت هستند؛ بدین ترتیب که یک گیاه از نوع C3، C4 و CAM به ازای هر گرم تثبیت دی‌اکسیدکربن به‌ترتیب حدود ۵۰۰-۴۰۰، ۳۰۰-۲۵۰ و ۱۰۰-۵۰ گرم آب از دست می‌دهد. با این وجود،



شکل ۴- مقایسه میانگین‌های بهره‌وری آب آبیاری مبتنی بر عملکرد زیست توده تر، عملکرد زیست توده خشک و عملکرد دانه

جویچه دارای تغییرات مکانی و زمانی هستند که می‌توانند پیشروی، پسروی، پروفیل نفوذ و در نتیجه رسیدن رطوبت موردنظر به گیاه را تحت تأثیر قرار دهند. این مسئله در آبیاری کامل نیز وجود دارد اما در کم آبیاری به دلیل تحمیل تنش آبی به گیاه، حساسیت امر بیش‌تر

برای اعمال کم آبیاری روش‌های مدیریتی مختلفی وجود دارد که ساده‌ترین و رایج‌ترین روش، کم آبیاری تنظیم‌شده با در نظر گرفتن درصدی از نیاز آبی کامل به صورت عمق یا زمان آبیاری است. با این وجود، عواملی همچون ضریب زبری، شیب، نفوذ و ... در طول یک

بهره‌وری آب ذرت دانه‌ای در شرایط آبیاری و دیم، مجله آبیاری و زهکشی ایران، ۱۶ (۱): ۲۳۱-۲۴۱.

علیزاده، ا.، ۱۴۰۱. رابطه آب و خاک و گیاه. انتشارات دانشگاه امام رضا، چاپ سیزدهم.

مهری، ا.، سلطانی محمدی، ا.، ابراهیمیان، ح. و برومندنسب، س. ۱۴۰۱. بررسی اثر کم‌آبیاری موجی و یک در میان بر عملکرد و بهره‌وری آب ذرت دانه‌ای. مجله آبیاری و زهکشی ایران، ۱۶ (۶): ۱۱۲۴-۱۱۳۵.

نادری، م.، شایان‌نژاد، م.، حقیقتی، ب.، کریمی، س. و حیدری، س. ۱۳۹۶. بهینه‌سازی اقتصادی مشخصه‌های طراحی آبیاری جویچه‌ای در شرایط کم‌آبیاری برای ذرت علوفه‌ای در شهرکرد. نشریه علوم آب و خاک (علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی). ۲۱ (۳): ۱۸۱-۱۹۲.

وزارت جهاد کشاورزی. ۱۴۰۳. آمارنامه کشاورزی محصولات زراعی ۱۴۰۲-۱۴۰۱. وزارت جهاد کشاورزی، معاونت برنامه‌ریزی اقتصادی مرکز آمار، فناوری اطلاعات و ارتباطات.

وطن‌خواه، ا.، ابراهیمیان، ح. و معارفی، ط. ۱۳۹۸. بررسی شاخص‌های عملکرد آبیاری و تولید ذرت علوفه‌ای براساس کم‌آبیاری در انتهای جویچه. نشریه مدیریت آب در کشاورزی، ۶ (۲): ۱۴۷-۱۵۶.

Akbari, M. and Farahani, S. 2025. Enhancement of border irrigation systems: Leveraging simulation-optimization techniques. *Agricultural Water Management*. 321: 109891.

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. and Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. Fao, Rome. 300(9): D05109.

Ashine, E. T., Bedane, M. T., Kedir Chota, M. and Admassu, R. 2024. Effect of Deficit Irrigation on Maize (*Zea Mays L.*) Crop Under Conventional, Fixed, and Alternate Furrow Irrigation for Effective Irrigation Water Management. *Air, Soil and Water Research*. 17: 11786221241254289.

Aslam, M. A., Cheema, M. J. M., Saleem, S., Basit, A., Hussain, S. and Waqas, M. S. 2023. Application of Sensor-Based Precision Irrigation Methods for Improving Water Use Efficiency of Maize Crop. *Environmental Sciences Proceedings*. 23(1): 38.

Ayers, R. S. and Westcot, D. W. 1985. Water quality for agriculture (Vol. 29, p. 174). Rome: Food and agriculture organization of the United Nations.

Bayisa, G. D., Hordofa, T., Tezera, K., Tesfaye, A., Ashame, G. and Wondimu, T. 2021. Maize yield and water use efficiency under different irrigation levels

بوده و ممکن است منجر به کاهش جدی عملکرد شود. با استفاده از روش ارائه‌شده در این پژوهش، تمام عوامل یادشده در مدیریت کم‌آبیاری لحاظ شده و در واقع به جای مدیریت کم‌آبیاری از مبدأ (ابتدای جویچه)، این مدیریت در مقصد (ناحیه ریشه گیاه) صورت می‌گیرد. این روش مدیریت کم‌آبیاری با در نظر گرفتن مراحل مختلف رشد محصول و زمان‌بندی مناسب جهت اعمال کم‌آبیاری، می‌تواند ابزاری مفید در راستای خودکارسازی و افزایش راندمان آبیاری سطحی باشد.

## منابع

احمدوند، م.، شریفی‌پور، م. و نصرالهی، ع. ۱۴۰۰. اثر کم‌آبیاری تنظیم‌شده و آبیاری جویچه‌ای یک در میان بر بهره‌وری آب ذرت علوفه‌ای در شرایط اقلیمی خرم‌آباد. فصلنامه علوم و مهندسی آبیاری، ۴۴ (۳): ۱۲۹-۱۴۳.

امداد، م.، نوابی، ف. و دهقانی، م. ۱۳۹۶. تاثیر توام مدیریت آبیاری جویچه‌ای یک در میان متناوب در مراحل مختلف رشد بر عملکرد و کارایی مصرف آب ذرت در بافت‌های مختلف خاک. مجله پژوهش آب ایران، ۱۱ (۲۵): ۷۱-۷۸.

پهلوانی، ع.، ابراهیمیان، ح. و عباسی، ف. ۱۴۰۱. تاثیر محل کارگذاری مالچ پلاستیکی در آبیاری جویچه‌ای بر بهره‌وری آب ذرت علوفه‌ای. مجله پژوهش آب در کشاورزی، ۳۶ (۱): ۹۳-۱۰۴.

تواضع، م.، حبیبی، د. گل زردی، ف. ایلکایی، م. و پاک‌نژاد، ف. ۱۴۰۱. ارزیابی عملکرد، بهره‌وری آب و تحمل به خشکی ارقام سورگوم علوفه‌ای [*Sorghum bicolor (L.) Moench*] تحت روش‌ها و رژیم‌های مختلف آبیاری، فصلنامه تحقیقات غلات، ۱۲ (۲): ۱۱۵-۱۳۳.

حقیقتی، ب.، برومندنسب، س. و ناصری، ع. ۱۳۹۴. تاثیر مدیریت‌های مختلف کم‌آبیاری در روش آبیاری جویچه‌ای و قطره‌ای نواری بر عملکرد سیب‌زمینی و بهره‌وری آب. مجله پژوهش آب در کشاورزی، ۲۹ (۲): ۱۸۱-۱۹۳.

دهقانی، م.، نوری امام‌زاده‌ای، م.، شاهنظری، ع. و قیصری، م. ۱۳۹۸. تاثیر مدیریت‌های مختلف آبیاری جویچه‌ای بر صرفه‌جویی و کارایی مصرف آب ذرت علوفه‌ای در اصفهان. مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۰ (۸): ۱۸۹۹-۱۹۱۰.

سرگلزایی، ع.، چاری، م.، دلبری، م. و افراسیاب، پ. ۱۴۰۰. تعیین زمان قطع و طول بهینه آبیاری نواری با انتهای بسته. مجله محیط زیست و مهندسی آب، ۷ (۳): ۵۳۳-۵۴۰.

شمسی پاکباده، س.، محمدیان روشن، ن. صادقی، س. م. امیری، ا. و عاشوری، م. ۱۴۰۱. اثر نیتروژن و تراکم کشت بر تولید و

- Hassanli, M., Ebrahimian, H., Mohammadi, E., Rahimi, A. and Shokouhi, A. 2016. Simulating maize yields when irrigating with saline water, using the AquaCrop, SALTMED, and SWAP models. *Agricultural water management*. 176: 91-99.
- Kim, D. H., Her, Y., Cheng, L. and Jang, T. 2025. Improving wheat yield and water use efficiency through soil water-guided furrow irrigation and hydraulic simulation. *Agricultural Water Management*. 318: 109746.
- Lakhiar, I. A., Yan, H., Zhang, C., Wang, G., He, B., Hao, B. and Rakibuzzaman, M. 2024. A review of precision irrigation water-saving technology under changing climate for enhancing water use efficiency, crop yield, and environmental footprints. *Agriculture*. 14(7): 1141.
- Maachi, D., Toppino, L., Ezquer, I., Cebeci, E., Filiz, B. H., Rotino, G. L. and Aberkani, K. 2025. Effect of water supply regimes on physiological parameters and productivity in eggplant grown under mediterranean climate conditions. *Plant Biosystems-An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology*. 1-24.
- Mfarrej, M. F. B. 2025. Exploring the nexus between climate change, water scarcity, and security dynamics in the Middle East and North Africa. *Next Research*. 100168.
- Narayanan, K. and Seid, M. M. 2015. Effect of deficit irrigation on maize under conventional, fixed and alternate furrow irrigation systems at Melkassa, Ethiopia. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*. 4: 119-126.
- Patwardhan, A. S., Nieber, J. L. and Johns, E. L. 1990. Effective rainfall estimation methods. *Journal of irrigation and Drainage Engineering*. 116(2): 182-193.
- Pawlak, K. and Kołodziejczak, M. 2020. The role of agriculture in ensuring food security in developing countries: Considerations in the context of the problem of sustainable food production. *Sustainability*. 12(13): 5488.
- Rudnick, D. R., Irmak, S., West, C., Chávez, J. L., Kisekka, I., Marek, T. H. and Schlegel, A. 2019. Deficit irrigation management of maize in the high plains aquifer region: a review. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*. 55(1): 38-55.
- Setu, T., Legese, T., Teklie, G. and Gebeyhu, B. 2023. Effect of furrow irrigation systems and irrigation levels on maize agronomy and water use efficiency in Arba Minch, Southern, Ethiopia. *Heliyon*. 9(7).
- Stikić, R., Popović, S., Srdić, M., Savić, D., Jovanović, Z., Prokić, L. and Zdravković, J. 2003. Partial root drying (PRD): a new technique for growing plants that saves water and improves the quality of fruit and furrow irrigation methods in semiarid, tropical region. *Air, Soil and Water Research*. 14: 11786221211058177.
- Biswas, A., Sarkar, S., Das, S., Dutta, S., Choudhury, M. R., Giri, A. and Paul, D. 2025. Water scarcity: A global hindrance to sustainable development and agricultural production—A critical review of the impacts and adaptation strategies. *Cambridge Prisms: Water*. 3, e4.
- Capra, A., Consoli, S. and Scicolone, B. 2008. Deficit irrigation: Theory and practice. *Agricultural irrigation research progress*. 4: 53-58.
- Chai, Q., Gan, Y., Zhao, C., Xu, H. L., Waskom, R. M., Niu, Y. and Siddique, K. H. 2016. Regulated deficit irrigation for crop production under drought stress. A review. *Agronomy for sustainable development*. 36(1): 3.
- Egea, I., Estrada, Y., Flores, F. B. and Bolarín, M. C. 2022. Improving production and fruit quality of tomato under abiotic stress: Genes for the future of tomato breeding for a sustainable agriculture. *Environmental and Experimental Botany*. 204: 105086.
- Ehtisham, M., Saeed-Ul-Hassan, M. and Poater, A. 2025. A comprehensive review of approaches, systems, and materials used in adsorption-based atmospheric water harvesting. *Science of the Total Environment*. 958: 177885.
- Evans, L. T. 1975. Crops and world food supply, crop evolution, and the origins of crop physiology. *Crop Physiology*. Cambridge University Press. Cambridge. 1-22.
- FAO. 2024. Agricultural Production Statistics 2010–2023. FAOSTAT Analytical Briefs. No. 96.
- Fereres, E. and Soriano, M. A. 2007. Deficit irrigation for reducing agricultural water use. *Journal of experimental botany*. 58(2): 147-159.
- Geerts, S. and Raes, D. 2009. Deficit irrigation as an on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas. *Agricultural water management*. 96(9): 1275-1284.
- Geries, L. S. M., El-Shahawy, T. A. and Moursi, E. A. 2021. Cut-off irrigation as an effective tool to increase water-use efficiency, enhance productivity, quality and storability of some onion cultivars. *Agricultural Water Management*. 244: 106589.
- Ghorbanian, M., Ojaghlo, H. and Ebrahimian, H. 2025. An approach to estimate optimal cut-off time under deficit irrigation. *Irrigation Science*. 43(4): 855-869.
- Hamdi Ahmadabad, Y., Liaghat, A., Sohrabi, T., Rasoulzadeh, A. and Ebrahimian, H. 2021. Improving performance of furrow irrigation systems using simulation modelling in the Moghan plain of Iran. *Irrigation and Drainage*. 70(1): 131-149.

- Estate condition, in Central Ethiopia. *Journal of Engineering and Applied Science*. 69(1): 21.
- Yang, B., Fu, P., Lu, J., Ma, F., Sun, X. and Fang, Y. 2022. Regulated deficit irrigation: an effective way to solve the shortage of agricultural water for horticulture. *Stress Biology*. 2(1): 28.
- Zhao, R., Wang, Y., Yu, X., Liu, W., Ma, D., Li, H. and Li, S. 2023. Dynamics of maize grain weight and quality during field dehydration and delayed harvesting. *Agriculture*. 13(7): 1357.
- Bulgarian Journal of Plant Physiology. 29(3-4, Special issue).
- Temesgen, T., Ayana, M. and Bedadi, B. 2018. Evaluating the effects of deficit irrigation on yield and water productivity of furrow irrigated onion (*Allium cepa* L.) in Ambo, Western Ethiopia. *Irrigation & Drainage Systems Engineering*. 7(1): 1-6.
- Yadeta, B., Ayana, M., Yitayew, M. and Hordofa, T. 2022. Performance evaluation of furrow irrigation water management practice under Wonji Shoa Sugar

## Effect of Deficit Irrigation Management Based on Cut-Off Time on Yield and Water Productivity of Maize

Kh. Peyghan<sup>1</sup>, A. Liaghat<sup>2\*</sup>, Kh. Ahmadaali<sup>3</sup>, Masoud Parsinejad<sup>4</sup>

Received: Dec.29, 2025

Accepted: May.03, 2026

### Abstract

Given the limited water resources in Iran and many parts of the world, the increasing importance of increasing water productivity in agriculture is no secret. This study aimed to investigate the effect of deficit irrigation based on the cut-off time of the inflow into the furrow on the yield and water productivity of maize in the research field of the University of Tehran in Karaj with clay loam soil texture. The experiment was conducted in a randomized complete block design with five treatments of the cut-off time based on the arrival of the wetting front to a specific soil depth at different distances from the furrow inlet and in three replications. TDR moisture sensors were placed at distances of 100 (L2), 90 (L3), 60 (L4) and 0 (L5) meters from the furrow inlet. In the control treatment (L1), the cut-off was after providing the required water depth of the plant at the end of the furrow. Four depths of 18, 20, 22 and 24 cm were determined for the sensors and during the growing season, before each irrigation, the sensor depth was selected according to the required irrigation water depth. The irrigation water depth in treatments L1, L2, L3, L4 and L5 was 100, 82.9, 75.4, 69.8 and 64.1 % of the water requirement, respectively. The highest values of fresh and dry biomass and grain yield, harvest index, 1000 kernel weight and plant height were recorded as 67.265, 27.196 and 13.858 tons/ha, 50.77 %, 367.89 g and 258.2 cm in L1 treatment, respectively, and the lowest values were recorded as 34.272, 17.150 and 7.511 tons/ha, 43.40 %, 252.67 g and 177.9 cm in L5 treatment. Deficit irrigation caused a significant decrease in all six traits. Irrigation water productivity based on fresh and dry biomass and grain yield did not show significant differences in different treatments, but in all three cases, the lowest values were related to L5 treatment. The proposed method of this study, focusing on deficit irrigation management based on ensuring water reaches the root zone, can help improve the management and automation of surface irrigation.

**Keywords:** Furrow Irrigation, Smart Irrigation, Surface Irrigation, TDR

1- Ph.D. Candidate, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

2- Professor, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

3- Associate Professor, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

4- Professor, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

(\*- Corresponding Author Email: aliaghat@ut.ac.ir)