نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۴، جلد ۲۰، مهر - آبان ۱۴۰۵، ص. ۵۸۵-۵۶۷

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No.4, Vol. 20, Oct.-Nov. 2026, p. 567-585

مقاله علمی-پژوهشی

بررسی تأثیر برهمکنش بیوچار، نیتروژن و کم‌آبیاری بر عملکرد و بهره‌وری مصرف آب آبیاری و بهره‌وری مصرف نیتروژن در گیاه ذرت

علی سرحدی[۱]، حلیمه پیری*[۲]، فرزاد حسن‌پور[۳]، مهدی کیخا[۴]، علی متولی[۵]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۰۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۲۳

چکیده

ذرت (*Zea mays L.*) به‌عنوان یکی از محصولات راهبردی در مناطق خشک و نیمه‌خشک، به‌شدت تحت تأثیر محدودیت منابع آبی قرار دارد و به‌کارگیری راهبردهای مدیریتی پایدار برای حفظ عملکرد آن ضروری است. این پژوهش با هدف بررسی اثرات تلفیقی بیوچار، نیتروژن و سطوح مختلف کم‌آبیاری بر عملکرد، صفات مورفولوژیک و بهره‌وری مصرف آب و نیتروژن ذرت در شرایط دشت سیستان انجام شد. آزمایش به‌صورت کرت‌های خرد شده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار انجام شد. تیمارها شامل سطوح آبیاری (۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی خاک)، کود نیتروژن (۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار) و بیوچار (۰، ۱/۲۵ و ۲/۵ درصد وزنی خاک) بود. در پایان تحقیق پارامترهای قطر ساقه، ارتفاع گیاه، عملکرد تر و خشک علوفه، وزن تر و خشک بلال، بهره‌وری مصرف آب و بهره‌وری مصرف نیتروژن اندازه‌گیری شد. نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثرات اصلی و متقابل آبیاری، نیتروژن و بیوچار بر صفات مورد بررسی در سطح احتمال یک و پنج درصد معنی‌دار بودند. بیشترین عملکرد علوفه، صفات رشدی و بهره‌وری مصرف آب و نیتروژن در تیمار آبیاری کامل همراه با مصرف ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن و ۱/۲۵ درصد بیوچار به‌دست آمد که از این نظر با تیمار مصرف ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار کود نیتروژن تفاوت معنی‌داری نداشت. در حالی‌که کم‌آبیاری شدید همراه با نیتروژن پایین و بدون مصرف بیوچار، کمترین مقادیر را نشان داد. با این حال، نتایج نشان داد که کاربرد بیوچار در سطح بهینه همراه با مدیریت مناسب نیتروژن می‌تواند اثرات منفی کم‌آبیاری را تا حد زیادی تعدیل کرده و بهره‌وری مصرف منابع را افزایش دهد و به‌عنوان یک راهکار مؤثر و پایدار برای بهبود عملکرد و افزایش بهره‌وری مصرف آب و نیتروژن در کشت ذرت، به‌ویژه در مناطق با محدودیت منابع آبی مانند منطقه سیستان، مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: ارتفاع، عملکرد علوفه، قطر ساقه، وزن بلال

مقدمه

افزایش جمعیت جهان و نیاز روزافزون به تولید محصولات کشاورزی، به‌ویژه در شرایط تغییرات اقلیمی و چالش‌های پایداری، اهمیت به‌کارگیری راهکارهای نوین و مدیریت بهینه منابع طبیعی را بیش از پیش ضروری ساخته است (FAO, 2022). در دهه‌های اخیر، با توجه به محدودیت منابع آبی، تخریب خاک و اثرات نامطلوب شیوه‌های کشاورزی سنتی، ضرورت توسعه روش‌های کشاورزی پایدار و مدیریت بهینه منابع خاک و آب بیش از پیش احساس می‌شود (IPCC, 2021). کشاورزی پایدار، با هدف حفظ و بهبود منابع طبیعی، کاهش اثرات زیست‌محیطی، و تضمین امنیت غذایی برای نسل‌های آینده، نیازمند رویکردهای نوآورانه و مدیریت جامع منابع است. کشاورزی، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین فعالیت‌های اقتصادی و غذایی در سطح جهان و به‌ویژه در کشورهایی مانند ایران، نیازمند مدیریت اصولی و استراتژیک منابع طبیعی است تا بتواند در شرایط فشارهای زیست‌محیطی و محدودیت‌های آبی، پایداری و امنیت غذایی را تضمین کند (Ghalibaf et al., 2023).

ذرت به‌عنوان یکی از سه محصول استراتژیک جهانی، نقش حیاتی در امنیت غذایی به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه ایفا می‌کند .پیش‌بینی‌های سازمان‌های بین‌المللی حاکی از آن است که تا سال ۲۰۵۰، تقاضا برای این محصول در این کشورها به دو برابر سطح فعلی خواهد رسید (FAO, 2022). این در حالی است که نرخ

۱- دانشجوی دکترا، گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران
۲- دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران
۳ - دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران
۴ - استادیار، گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران
۵-دانشیار، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران
(*- نویسنده مسئول: H_piri2880@uoz.ac.ir)
DOI: 10.22034/idj.2026.568867.2654

رشد فعلی تولید پاسخگوی این نیاز فزاینده نخواهد بود، لذا بهینه‌سازی عملکرد و شتاب‌بخشی به روند تولید به ضرورتی اجتناب‌ناپذیر تبدیل شده است.

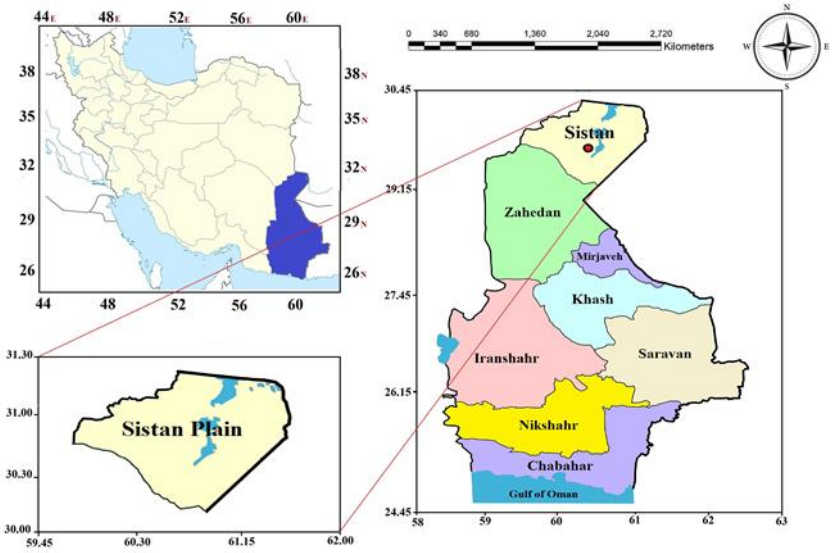
در چارچوب ملی، ذرت جایگاه ممتازی در کشاورزی ایران دارد و به‌عنوان محوری اساسی در صنایع غذایی و تأمین خوراک دام، به‌ویژه در بخش طیور که سهم عمده‌ای از صنعت دامپروری کشور را تشکیل می‌دهد، عمل می‌کند. در منطقه سیستان، به‌دلیل جغرافیا و اقلیم خشک و بیابانی، کشت گیاهانی مانند ذرت با چالش‌های فراوانی مواجه است. کمبود منابع آبی، به‌ویژه کاهش شدید آب‌های زیرزمینی و بهره‌برداری ناآگاهانه، باعث بحران آب در این منطقه شده است (Piri and Sarani, 2020). علاوه بر این، خاک‌های سیستان با مشکلات شوری، خشکی و فرسایش روبرو هستند که به شدت بر عملکرد محصولات زراعی، به‌ویژه ذرت، اثر منفی می‌گذارند. شوری خاک ناشی از تبخیر زیاد و برداشت بی‌رویه از آب‌های شور، مقاومت گیاهان را کاهش می‌دهد و رشد طبیعی آن‌ها را محدود می‌سازد؛ در نتیجه، میزان محصول و کیفیت خاک به شدت کاهش می‌یابد (Saadat et al., 2024). همچنین، فرسایش خاک ناشی از بادهای غالب و تغییرات اقلیمی در منطقه سیستان موجب کاهش عمق خاک و توان نگهداری آب و مواد غذایی شده است که اهمیت مدیریت جامع خاک را دوچندان می‌کند (Farzaneh and Karimi, 2021). این عوامل، بهره‌برداری ناپایدار و ناآگاهانه از منابع طبیعی و مدیریت غلط را موجب شده و بحران‌های زیست محیطی و کاهش تولید را تشدید کرده است. به‌علاوه، تغییرات اقلیمی، خشکی و انعکاس دوره‌های بی‌بارشی، استرس‌های بیشتری بر کشاورزی منطقه وارد کرده است و توسعه راهکارهای نوین و سازگار با شرایط اقلیمی و کم‌آب، ضروری می‌نماید. یکی از راه‌کارهای مؤثر در مدیریت منابع آب، بهره‌گیری از روش‌های کاهش مصرف آب مانند کم‌آبیاری است، روشی که با کاهش مصرف آب، می‌تواند همزمان سطح تولید را حفظ و بهره‌وری آب را افزایش دهد (Piri et al., 2022). برنامه‌ریزی دقیق کم‌آبیاری، با استفاده از حسگرهای رطوبت خاک و داده‌های هواشناسی، می‌تواند به بهینه‌سازی مصرف آب و افزایش عملکرد محصول کمک کند (ابراهیمی و پور درویشی، ۱۳۹۶). با این حال، کم‌آبیاری ممکن است چالش‌هایی مانند تجمع نمک در سطح خاک ایجاد کند که نیازمند مدیریت دقیق‌تر آبیاری و کوددهی است. تحقیقات نشان داده است که ضمن اعمال کم آبیاری با مصرف صحیح کودهای شیمیایی، می‌توان مقاومت گیاهان به خشکی و نیز بازده تولید محصولات کشاورزی را افزایش داد. از بین سه عنصر پرمصرف در تولید گیاهان زراعی و باغی، نیتروژن به بیشترین میزان مورد نیاز است. نیتروژن موجب تحریک رشد، افزایش در تعداد و اندازه برگ‌ها، تسریع در بلوغ محصولات و نیز تحریک توسعه میوه و بذرها می‌شود. نیتروژن همچنین از اجزای تشکیل‌دهنده آمینواسیدها است و در ساختمان کلروفیل و سیتوکروم‌ها نیز نقش دارد (Baranauskienne et al., 2003). نیاز گیاهان به این عنصر متفاوت است. گیاهانی که دارای رشد رویشی زیادی هستند مقدار زیادی نیتروژن را در بافت خود جمع می‌کنند (Nesic et al., 2008). مقادیر بالای کود نیتروژن می‌تواند موجب تجمع نیترات در گیاه و خاک شود (Hannaway and Shuler, 1993). اگر چه نیتروژن یک عنصر کلیدی است و نقش مهمی در افزایش عملکرد گیاهان دارد، مدیریت نیتروژن تحت تأثیر مقدار آب کاربردی از مباحث مهم در راستای افزایش بهره‌وری مصرف نیتروژن و کاهش مخاطرات زیست محیطی است (پیری و میر، ۱۴۰۳). میر و همکاران (۱۴۰۰) در بررسی تأثیر نیتروژن بر گیاه کارلا در شرایط تنش آبی بیان داشتند در شرایط تنش آبی شدید، استفاده کامل از کود نیتروژن باعث کاهش عملکرد گیاه شد. در شرایطی که آب کافی در دسترس نباشد، مدیریت غیراصولی می‌تواند منجر به از دست رفتن منابع مهم شامل آب و نیتروژن و در نتیجه کاهش کارآیی مصرف این منابع شود. بنابراین با توجه به این‌که کمبود آب، جذب عناصر غذایی به‌ویژه نیتروژن را تحت تأثیر قرار می‌دهد، لذا مصرف متعادل نیتروژن در کنار فراهمی رطوبت در خاک ضروری به نظر می‌رسد (Chandrasekar et al., 2005).

در کنار کم‌آبیاری، اصلاح و بهبود خصوصیات خاک، از طریق افزودن مواد بهبوددهنده مانند بیوچار، اهمیت ویژه‌ای دارد. بیوچار، حاصل از فرآیند حرارتی تجزیه زیست‌توده در محیط بی‌اکسیژن، خواص فیزیکی و شیمیایی خاک را بهبود می‌بخشد، ظرفیت نگهداری آب را افزایش می‌دهد و در نتیجه، اثربخشی آبیاری را بیشتر می‌نماید (Lehmann and Joseph, 2015). بیوچار با بهبود ساختار خاک، افزایش تخلخل و نفوذپذیری، باعث بهبود تهویه خاک و افزایش دسترسی گیاه به آب می‌شود. علاوه بر این، بیوچار می‌تواند مواد مغذی را جذب و نگهداری کند و به تدریج آنها را در اختیار گیاه قرار دهد و باعث افزایش جذب عناصر غذایی و کاهش هدررفت آنها شود. بیوچار همچنین می‌تواند pH خاک را تعدیل کرده و از اثرات منفی شوری بر گیاه بکاهد (اصولی و همکاران، ۱۴۰۱؛ توراج‌زاده و همکاران، ۱۴۰۳). مطالعات نشان داده‌اند که افزودن بیوچار به خاک‌های شور و خشک، می‌تواند میزان آب قابل دسترسی برای گیاهان را افزایش دهد، اثرات منفی شوری و کم‌آبی را کاهش داده و عملکرد ذرت را در شرایط دشوار، تا حد قابل توجهی بهبود بخشد (Van Zwieten et al., 2010). استفاده از بیوچار در شرایط تنش شوری و مقدار آب آبیاری باعث افزایش عملکرد و پروتئین دانه کینوا شد (توراج‌زاده و همکاران، ۱۴۰۲). با این وجود، در خاک‌های سنگین، مصرف بیش از حد بیوچار ممکن است مشکلاتی مانند افزایش شوری خاک ایجاد کند، لذا تعیین میزان بهینه آن در منطقه و شرایط خاص اهمیت دارد (میر و همکاران، ۱۴۰۰).

با توجه به مطالب گفته شده، بهره‌برداری صحیح و کارآمد از منابع طبیعی، به‌خصوص در منطقه سیستان که با چالش‌های متعدد خاک، آب و اقلیم مواجه است، می‌تواند پایداری کشاورزی و امنیت غذایی را در این منطقه تضمین کند. لذا مطالعه و بررسی روش‌های مدیریتی کشت گیاه ذرت به منظور ارتقای کارایی بهره‌وری آب و نهاده‌های کشاورزی، از جمله کود اوره و همچنین استفاده از اصلاح کننده‌ها در راستای افزایش عملکرد و بهره‌وری مصرف آب و نیتروژن، می‌تواند چشم‌انداز روشنی برای دستیابی به اهداف توسعه پایدار ترسیم کند. هدف این مطالعه، ارزیابی تأثیرات تلفیقی استفاده از بیوچار و نیتروژن بر رشد، عملکرد، بهره‌وری مصرف آب و نیتروژن ذرت در شرایط کم‌آبی در منطقه سیستان است.

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر در سال ۱۴۰۳ در ایستگاه تحقیقات کشاورزی زهک انجام گردید. شهرستان زهک در منطقه سیستان در استان سیستان و بلوچستان در ۶۱ درجه و ۶۷ دقیقه طول شرقی و ۳۰ درجه و ۸۹ دقیقه عرض شمالی و ارتفاع ۴۸۰ متر از سطح دریا قرار دارد. منطقه مطالعاتی دارای اقلیم فرا خشک بوده و میزان بارندگی آن در سال کمتر از ۶۰ میلی‌متر می‌باشد (عسکری‌دهنو و همکاران، ۱۴۰۳). شکل (۱) موقعیت منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل ۱: موقعیت منطقه مورد مطالعه

تیمارها و اجرای مراحل زراعی

برای تعیین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک پیش از مراحل آماده‌سازی زمین نمونه‌های خاک از اعماق ۰ تا ۳۰ سانتی‌متری خاک برداشت شد و برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک تعیین شد. همچنین از آب مورد استفاده نیز جهت تعیین کیفیت آن نمونه‌برداری شد. نتایج تجزیه آب و خاک مورد استفاده در جداول ۱ و ۲ آورده شده است.

در این تحقیق برای تهیه بیوچار از کاه و کلش گندم استفاده گردید؛ ابتدا کاه و کلش بسته بندی شده و سپس در دمای ۴۵۰ تا ۵۰۰ درجه و در شرایط بدون اکسیژن حرارت داده شدند.

جدول۱- برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه تحقیقاتی

عمق نمونه برداری	درصد سیلت	درصد شن	درصد رس	بافت خاک	pH	EC (dsm^{-})	پتاسیم قابل جذب (ppm)	کربن آلی (ppm)	فسفر قابل جذب (ppm)
۳۰-۰	۴۱	۴۴	۱۵	شن لوم	۸/۳	۴/۵	۳۵۰	۰/۸۵	۲۴/۶
۶۰-۳۰	۴۰	۴۴	۱۶	شن لوم	۸/۳	۴/۶	۳۵۴	۰/۷۹	۲۳/۵

جدول۲- مقادیر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آب آبیاری

TDS (mgl^{-1})	pH	EC (dSm^{-1})	Co_3^{-2}	HCo_3^-	Cl	So_4^{-2}	Anions	Ca^2+Mg^2	Na^+	Cations	SSP (mgl^{-1})	SAR
			meqlit^{-1}									
۲۱۶۰	۷/۸	۰/۳۶	۰	۴/۱	۱۸/۸	۱۲/۶	۳۵/۵	۱۰/۵	۲۵/۸	۳۶/۳	۷۱	۱۱/۳

تحقیق حاضر در قالب طرح کرت‌های خرد شده به صورت بلوک کامل تصادفی در سه تکرار اجرا گردید. تیمارها شامل ۳ سطح مقدار آب آبیاری (I1، I2، I3 به ترتیب معادل ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی خاک)، سه سطح کود اوره (N1، N2 و N3 به ترتیب معادل ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار) و سه سطح بیوچار کاه و کلش گندم (B1، B2 و B3 به ترتیب معادل صفر، ۱/۲۵ و ۲/۵ درصد وزنی خاک) بود. ابتدا زمین مورد نظر شخم، دیسک زده و کرت‌بندی شد. بدین منظور کرت‌های اصلی با ابعاد هر کرت ۱ متر در ۲/۵ متر و با فاصله ۱ متر بین کرت‌ها ایجاد گردید. در داخل هر کرت، ردیف‌های کشت با فاصله ۰/۵ متر ایجاد و بذرهای ذرت دانه‌ای زودرس تابستانه سمیرا رقم هیبرید F1، در عمق ۵ سانتی متری با فاصله ۱۵ سانتی متر روی ردیف‌ها کشت شدند.

کود دهی بر اساس مراحل رشد گیاه در سه مرحله به صورت سرک، یک‌سوم همزمان با کاشت، یک سوم مرحله پنجه زنی و یک سوم زمان پر کردن دانه به مقدار تیمارهای گفته شده، به گیاه داده شد. کود پتاسیم از نوع سولفات پتاسیم به مقدار ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار و کود فسفر از نوع سوپرفسفات تریپل به مقدار ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار، همزمان با کاشت به خاک اضافه شد.

تعیین مقدار آب آبیاری

اندازه گیری رطوبت خاک در محدوده مورد نظر برای تعیین نیاز آبی گیاه، با استفاده از دستگاه TDR انجام گرفت. سپس مقدار عمق آب آبیاری با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شد (Liue et al., ۲۰۰۶).

$$d = \sum_{i=1}^{n}(\theta_{fci} - \theta_i)\Delta Z_i \qquad (۱)$$

در معادله فوق d عمق آبیاری (متر)، θ_{fci} و θ_i به ترتیب رطوبت حجمی خاک ($m^3.m^{-3}$) در حالت ظرفیت زراعی و قبل از آبیاری در لایه iام است. همچنین Δz ضخامت لایه برحسب متر و n شماره لایه خاک می‌باشد.

با به‌دست آوردن عمق آب آبیاری در هر نوبت (دور آبیاری ۱۰ روزه) با استفاده از رابطه (۱)، حجم آب مورد نیاز برای هر کرت از ضرب کردن عمق به‌دست آمده در مساحت کرت محاسبه شد و با استفاده از کنتورهای نصب شده بر روی هر یک از لوله‌های آبرسان اندازه‌گیری و در اختیار گیاه قرار گرفت. حجم آب سایر تیمارها بر اساس این حجم تعیین و اعمال گردید. جدول ۳ حجم آب مورد استفاده در هر تیمار را نشان می‌دهد.

جدول۳- کل حجم آب داده شده برای هر تیمار آبیاری

	تیمار I1	تیمار I2	تیمار I3
حجم آب مصرفی (مترمکعب در هکتار)	۴۶۲۸	۶۶۹۳	۸۳۶۷

نمونه‌برداری گیاهی

در پایان فصل رشد، پارامترهای ارتفاع گیاه، قطر ساقه، عملکرد ترو خشک علوفه و عملکرد تر و خشک بلال اندازه‌گیری شد. به منظور اندازه‌گیری ارتفاع بوته، ۱۰ بوته به طور تصادفی از هر کرت انتخاب و با استفاده از متر ارتفاع گیاه ثبت گردید. قطر ساقه با استفاده از کولیس اندازه‌گیری شد. سپس، به‌منظور تعیین عملکرد تر و خشک علوفه، گیاهان کشت شده در دو ردیف مرکزی کرت‌ها برداشت شد. عملکرد تر علوفه با اندازه‌گیری وزن علوفه‌های برداشت شده با استفاده از ترازو تعیین شد. برای تعیین وزن علوفه خشک، علوفه‌های تازه در دستگاه آون قرار گرفتند. سپس وزن علوفه خشک به‌دست آمد. برای تعیین وزن تر و خشک بلال، بلال‌ها از بوته‌های برداشت شده جدا و وزن تر آن‌ها با استفاده از ترازو اندازه‌گیری شد. برای تعیین وزن خشک بلال، بلال‌های تازه در هوای آزاد قرار گرفتند و وزن خشک آن‌ها محاسبه شد.

شاخص بهره‌وری آب (WP)

عبارت است از: نسبت محصول تولید شده به مقدار آب آبیاری داده شده. از رابطه (۲) به دست آمد (Payero, 2009).

$$\mathrm{IWUE} = \frac{\mathrm{Yield}}{\mathrm{IR}} \qquad (۲)$$

در این رابطه، IWUE: کارایی مصرف آب آبیاری (کیلوگرم بر مترمکعب)، Y: مقدار محصول برداشت شده (کیلوگرم)، IR: مقدار آب آبیاری (مترمکعب).

بهره‌وری مصرف نیتروژن (NUE)

بهره‌وری مصرف نیتروژن از رابطه زیر محاسبه شد (El-Eyuoon and Mamdouh, 2017; Fan *et al*., 2004):

$$\mathrm{NUE} = \frac{\mathrm{Yield}}{\text{amount of nitrogen applied}} \qquad (۳)$$

در این رابطه NUE: بهره‌وری مصرف نیتروژن (کیلوگرم بر

کیلوگرم)، amount of nitrogen applied: مقدار نیتروژن استفاده شده (کیلوگرم) و Yield: عملکرد (کیلوگرم)

برای تحلیل واریانس نتایج حاصل از تیمارهای مختلف، از نرم‌افزار SPSS 27 و نرم افزار R استفاده شد. همچنین، مقایسه میانگین تیمارها با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن مورد برررسی قرار گرفت.

شکل ۲ نمونه‌ای از طرح و کارهای انجام شده را نشان می‌دهد.



شکل ۲- نمونه‌ای از کارهای انجام شده

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس پارامترهای اندازه‌گیری شده در جدول ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد اثر کم‌آبیاری، نیتروژن و بیوچار بر پارامترهای اندازه‌گیری شده در سطح احتمال یک و پنج درصد معنی‌دار بوده است. جدول‌های ۵ و ۶ مقایسه میانگین اثرات ساده و متقابل آب آبیاری، بیوچار و نیتروژن را بر پارامترهای مورد مطالعه نشان می‌دهند.

ارتفاع بوته

نتایج تجزیه واریانس (جدول ۴) نشان داد که تمامی متغیرهای اصلی مورد مطالعه شامل سطح آبیاری، میزان کود نیتروژن و غلظت بیوچار تأثیرات آماری معنی‌داری بر ارتفاع ذرت داشتند، که این امر حکایت از حساسیت بالای رشد طولی این گیاه به محدودیت‌ها و بهینه‌سازی‌های محیطی دارد. مطابق جدول ۵ با کاهش عمق آب آبیاری ارتفاع گیاه کاهش یافت. بیشترین مقدار ارتفاع در تیمار ۱۰۰ درصد آب آبیاری (۱۲۳/۴ سانتی‌متر) مشاهده شد. که از این نظر با تیمار ۷۵ درصد آب آبیاری (۱۲۰/۸ سانتی‌متر) تفاوت معنی‌دار نداشت. کمترین مقدار آن در تیمار ۵۰ درصد آب آبیاری (۱۱۶/۷ سانتی‌متر) بود. کاهش ارتفاع ناشی از تنش خشکی می‌تواند به‌دلیل کاهش پتانسیل آب بافت‌های مریستمی در طول روز و نقصان پتانسیل فشاری باشد که در نتیجه مانع بزرگ شدن سلول‌ها شده و ارتفاع کاهش می‌یابد. علاوه بر کاهش پتانسیل آب، تنش خشکی با محدود کردن هدایت روزنه‌ای و کاهش فعالیت هورمون‌های رشد مانند جیبرلین و اکسین، سبب کاهش طویل‌شدن میان‌گره‌ها و در نهایت کاهش ارتفاع گیاه می‌شود.

جدول ٤- نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات و درجه آزادی) پارامترهای کمی اندازه گیری شده

منابع تغییرات	درجه آزادی	وزن علوفه تر	وزن علوفه خشک	وزن خشک بلال	وزن تر بلال	قطر ساقه	ارتفاع گیاه	بهره وری مصرف آب	بهره وری مصرف نیتروژن
آبیاری (I)	۲	۶۹۲۹۵۲۷۴٫۶**	۵۳۴۲۶۴۰٫۳**	۹۰۰۳۵۰۵٫۴۰۷**	۱۱۱۷۱۳۴۰۹٫۶**	۹۴۶۱٫۴۱ **	۲۹۸٫۲*	۰/۳۳۲**	۴۷۱۷٫۶**
نیتروژن (N)	۲	۱۵۵۹۴۳۷۲۹۹**	۵۸۰۵۵۰۹۸۹**	۱۳۷۴۱۵۱۱٫۱۴۰**	۱۵۳۶۴۲۹۲۳٫۳**	۶۹۹٫۷۴۱ **	۱۷۶۸٫۲**	۰/۴۳۲ **	۲۷۲۱٫۳**
بیوچار (B)	۲	۱۲۴۱۲۵۳۰۰۳**	۳۲۷۷۸۰۶۷۳٫۶**	۳۱۸۵۴۴۹٫۷۰۲**	۱۱۷۰۴۱۶۲۳٫۷**	۱۳۵٫۸۲۱۰**	۴۶۱۴٫۵ **	۰/۰۴۴ **	۱۶۸٫۲**
آبیاری* نیتروژن (I×N)	۴	۲۰۹۱۶۸۷۵۱٫۴**	۶۳۵۰۸۱۸۶٫۳**	۴۲۳۹۴۲۶٫۰۱۱ **	۳۹۸۷۹۵۰۶٫۸*	۱۵۱٫۸۳ **	۶۰۳٫۶**	۰/۱۸۶ **	۴۱۷٫۲**
آبیاری * بیوچار (I×B)	۴	۲۰۰۲۷۲۱۱۸٫۳**	۲۴۸۴۳۲۶۰٫۷*	۳۲۸۲۷۴۷٫۰۹۵ **	۳۶۷۳۷۴۳۴٫۱ *	۷٫۹۳ **	۱۱۸٫۷ *	۰/۰۸۱ **	۱۹۵٫۶**
نیتروژن * بیوچار (N×B)	۴	۱۰۱۶۹۵۸۰۶**	۹۳۷۰۹۷۰۶٫۴ **	۶۸۴۵۱۲۰٫۷۲۸**	۹۶۹۶۸۲۱۲٫۸**	۴٫۵۳ **	۱۳۲٫۳ *	۰/۱۵۷**	۲۹۹٫۷**
I*B*N	۸	۲۱۳۳۵۷۷۸۱٫۴**	۱۴۳۰۹۲۷۵۰٫۸**	۳۰۰۱۹۸۴٫۹۹۱ **	۵۱۷۳۷۳۳٫۱**	۱۳٫۵۰۲ **	۱۲۶٫۴*	۰/۰۸۱**	۱۳۷٫۶**
خطا		۱۴۰۰۱۰۶۴٫۰۲	۸۷۷۶۸۵۴٫۲	۱۸۹۳۰٫۲۱۶	۱۲۴۸۱۳۸۳٫۶	۰/۰۸	۴۲٫۴	۰/۰۱۳	۱٫۷۴
ضریب تغییرات		۸٫۱	۱۱٫۰۲	۲٫۳	۱۵٫۷۷	۵/۴	۵٫۳۸	۲٫۱۲	۲٫۲۸

جدول ۵- مقایسه میانگین پارامترهای کمی انداز گیری شده

تیمارهای آزمایش		وزن علوفه تر (کیلوگرم در هکتار)	وزن علوفه خشک (کیلوگرم در هکتار)	وزن تربلال	وزن خشک بلال	قطر (سانتی‌متر)	ارتفاع (سانتی‌متر)
مقدار آب آبیاری	۵۰ درصد	۳۶۷۵۲٫۲ b	۲۰۰۳۲٫۶ b	۱۸۳۹۷٫۴ b	۴۶۱۰٫۹ c	۱٫۶ b	۱۱۶٫۷ b
	۷۵ درصد	۴۵۳۳۲٫۸ a	۲۷۴۹۷٫۱ a	۲۸۹۸۰٫۵ a	۷۲۸۴٫۹ a	۲٫۱ ab	۱۲۰٫۸ a
	۱۰۰ درصد	۴۵۷۱۱٫۶ a	۲۸۲۳۵٫۷ a	۲۹۸۱۸٫۷ a	۸۰۵۶٫۵ a	۲٫۶ a	۱۲۳٫۴ a
مقدار نیتروژن	۱۰۰ کیلوگرم	۳۳۸۲۳٫۸b	۲۰۳۳۶٫۷ c	۲۰۰۲۹٫۵ c	۵۳۱۹٫۲ c	۱٫۸۷ b	۱۱۱٫۲ b
	۱۵۰ کیلوگرم	۴۶۱۸۷٫۸a	۲۷۳۱۱٫۱ ab	۲۲۳۶٫۱ ab	۵۸۹۵٫۶ ab	۲٫۳۴ a	۱۲۴٫۵ a
	۲۰۰ کیلوگرم	۴۷۷۸۵٫۱a	۲۹۱۱۷٫۶ a	۲۴۸۰۰٫۱ a	۶۷۳۷٫۷ a	۲٫۵۹ a	۱۲۵٫۴ a
مقدار بیوچار	صفر درصد	۳۷۱۷۳٫۴ c	۲۲۷۷۵٫۶ c	۲۰۴۲۹٫۶ c	۵۰۱۴٫۵c	۱٫۲۳c	۸۵٫۶ c
	۱/۲۵ درصد	۵۰۲۱۰٫۲ a	۲۹۴۷۹٫۲ a	۲۴۵۷۷٫۸ a	۶۳۷۹٫۴ a	۲٫۸۹ a	۱۳۳٫۳ a
	۲/۵ درصد	۴۰۴۱۳٫۱ b	۲۴۵۳۰٫۵ b	۲۲۵۷۷٫۸ b	۵۴۷۵۸٫۵ b	۲٫۲۳b	۱۱۰٫۵۲ b

گزارش‌ها نشان داده‌اند که محدودیت آب به‌طور مستقیم بر تقسیم و طویل‌شدن سلول‌ها در ناحیه مریستمی اثر منفی دارد (Taiz et al., 2015). سطوح مختلف بیوچار نیز بر ارتفاع گیاه اثر معنی‌دار داشت. افزودن ۱/۲۵ درصد وزنی بیوچار به خاک باعث افزایش ۵۵/۷۲ درصدی ارتفاع گیاه نسبت به تیمار عدم مصرف بیوچار شد. این خود تأکید بر نقش بیوچار به عنوان یک اصلاح‌کننده فیزیکی و شیمیایی خاک دارد (Delavarnia et al., 2021). به طوری که افزودن بیوچار در سطح ۱,۲۵ درصد توانست تا حد زیادی اثر مهارکننده تنش آبی بر رشد طولی را جبران کند و گیاه را به پتانسیل ژنتیکی خود نزدیک سازد، که این موضوع از نظر کشاورزی پایدار در مناطق خشک بسیار حائز اهمیت است (Wang et al., 2023). این اثر مثبت را می‌توان به افزایش ظرفیت نگهداشت آب، بهبود ظرفیت تبادل کاتیونی و تعدیل نوسانات رطوبتی خاک در حضور بیوچار نسبت داد، به‌طوری که محیط ریشه از تنش‌های ناگهانی رطوبتی مصون مانده و رشد طولی گیاه بهبود می‌یابد (Lehmann and Joseph, 2015; Agegnehu et al., 2017). همچنین بیوچار به‌دلیل منفافذ زیاد و سطح ویژه بالا، زیستگاه مناسبی برای میکروارگانیسم‌های خاکزی است و از خشکی و شکار شدن آن‌ها توسط موجوات بزرگ‌تر جلوگیری کرده و منابع سرشاری از مواد معدنی و کربنی را برای میکروارگانیسم‌ها فراهم می‌کند. با توجه به این‌که میکروارگانیسم‌ها از خدمات اکوسیستمی مهم در طبیعت هستند، می‌توانند با تأثیر برساختار بیولوژیکی خاک، چرخه‌ی عناصر غذایی، بهبود دانه‌بندی خاک و معدنی شدن کربن آلی بر رشد گیاه موثر است و باعث افزایش رشد و ارتفاع گیاه می‌گردد. تقویت جمعیت میکروارگانیسم‌های ریزوسفری در حضور بیوچار می‌تواند از طریق افزایش معدنی‌شدن عناصر غذایی و بهبود جذب نیتروژن و فسفر، کارایی مصرف آب و مواد غذایی را افزایش داده و رشد رویشی گیاه را به‌ویژه در شرایط تنش آبی بهبود بخشد (Taiz et al., 2015; Abbas et al., 2018). با افزایش مقدار بیوچار تا سطح ۲/۵ درصد وزنی، ارتفاع گیاه کاهش یافت. بیشترین ارتفاع گیاه در سطح ۱/۲۵

درصد وزنی بیوچار (۱۳۳/۳ سانتی‌متر) و کمترین آن در تیمار شاهد (عدم مصرف بیوچار) (۸۵/۶ سانتی‌متر) به‌دست آمد. سطوح بالای بیوچار باعث شوری خاک می‌شود. لذا فشار اسمزی محلول خاک زیاد می‌شود. درنتیجه مقدار انرژی که گیاه باید برای جذب آب مصرف کند، افزایش می‌یابد که این عمل باعث افزایش تنفس و کاهش ارتفاع گیاه می‌شود. در سطوح بالای مصرف بیوچار، به‌ویژه در خاک‌های مناطق خشک، آزادسازی یون‌های قلیایی و افزایش هدایت الکتریکی خاک می‌تواند موجب اختلال در تعادل یونی، کاهش جذب آب و بروز تنش شوری شود که این عوامل در نهایت رشد طولی گیاه را محدود می‌کنند (Mukherjee et al., 2014; Biederman and Harpole, 2013).

جدول۶- مقایسه میانگین اثرات متقابل مقدار آب آبیاری، نیتروژن و بیوچار بر پارامترهای کمی ذرت

مقدار آب آبیاری	مقدار نیتروژن	مقدار بیوچار	وزن علوفه تر (کیلوگرم در هکتار)	وزن خشک علوفه (کیلوگرم در هکتار)	وزن تربلال (کیلوگرم در هکتار)	وزن خشک بلال (کیلوگرم در هکتار)	قطر (سانتی‌متر)	ارتفاع (سانتی‌متر)
۵۰ درصد	۱۰۰	صفر درصد	۳۰۵۱۴/۲۱f	۲۰۴۸۱/۶۵e	۸۴۳۲/۲۱e	۳۴۷۸/۲۵d	۱/۴۶d	۹۸/۷۸g
		۱/۲۵ درصد	۳۵۶۲۸/۴۹de	۲۴۷۵۸/۴۹d	۱۰۹۸۸/۲۵e	۴۰۰۶/۲۵d	۱/۷۳c	۱۲۲/۴۵f
		۲/۵ درصد	۳۰۹۴۱/۸۳f	۲۰۵۹۱/۸۳e	۸۹۱۶/۵۸ef	۳۳۲۶/۵۴d	۱/۵۹d	۱۱۰/۵۴g
	۱۵۰	صفر درصد	۳۴۶۹۵//۱۱e	۲۳۱۵۴/۱۷d	۱۰۲۳۴/۱۴e	۳۹۸۶/۴۸d	۱/۶۹cd	۱۲۱/۸۵f
		۱/۲۵ درصد	۳۹۷۵۳/۵۸cd	۲۶۳۷۶/۷۴c	۱۴۸۳۱/۶۲cd	۵۷۸۲/۶۷cd	۱/۹۲c	۱۴۹/۶۳b
		۲/۵ درصد	۳۳۴۶۲/۶۹e	۲۲۳۰۸/۲۵ed	۹۸۷۲/۵۴e	۴۲۵۷/۳۱d	۱/۸۳c	۱۳۲/۵۸d
	۲۰۰	صفر درصد	۳۲۸۹۷/۵۵e	۲۱۸۶۴/۵۵e	۹۳۷۶/۸۵e	۴۱۷۸/۸۶d	۱/۶۱cd	۱۰۸/۴۹g
		۱/۲۵ درصد	۳۸۷۵۶/۹۲d	۲۵۸۳۷/۴۱cd	۱۲۴۸۹/۶۳d	۵۲۴۳/۹۷cd	۱/۸۳c	۱۳۲/۵۱d
		۲/۵ درصد	۳۰۶۸۱/۷۲f	۲۰۴۵۹/۸۵e	۸۵۶۹/۴۷f	۳۲۹۱/۱۶d	۱/۷۱c	۱۱۹/۳۷f
۷۵ درصد	۱۰۰	صفر درصد	۳۷۵۹۸/۵۹d	۲۵۰۶۵/۱۸cd	۱۳۵۳۶/۲۷cd	۵۶۴۱/۰۵cd	۱/۶۹cd	۱۱۸/۴۱f
		۱/۲۵ درصد	۴۱۱۸۵/۳۲c	۲۷۴۵۹/۳۴c	۱۶۵۴۸/۹۱c	۶۷۱۵/۳۱c	۱/۹۵c	۱۲۷/۳۳e
		۲/۵ درصد	۳۶۸۲۷/۱۸d	۲۴۵۳۱/۹۶d	۱۱۸۲۰/۴۹d	۴۱۲۷/۵۲d	۱/۶۸cd	۱۱۹/۱۷f
	۱۵۰	صفر درصد	۴۱۵۲۷/۲۱c	۲۷۶۸۱/۶۳c	۱۸۲۰۴/۸۸c	۷۹۵۴/۴۶bc	۲/۱۱b	۱۲۴/۳۹f
		۱/۲۵ درصد	۴۷۸۵۳/۲۸ab	۳۱۹۱۸/۵۴ab	۲۴۵۱۴/۳۲b	۸۸۶۲/۱۴b	۱/۹۸c	۱۴۶/۲۲b
		۲/۵ درصد	۴۰۱۳۵/۱۸c	۲۶۷۵۶/۷۴c	۱۷۲۹۴/۲۲c	۶۹۷۶/۴۶c	۱/۸۹c	۱۳۴/۹۲d
	۲۰۰	صفر درصد	۴۳۶۲۸/۵۷bc	۲۹۰۸۵/۳۸bc	۲۰۵۷۴/۱۸bc	۷۰۵۶/۲۳bc	۱/۸۱c	۱۳۸/۲۵c
		۱/۲۵ درصد	۴۸۵۹۲/۶۳a	۳۲۳۹۵/۴۵a	۲۷۳۹۲/۵۱a	۹۵۴۲/۷۴ ab	۲/۸۵a	۱۴۶/۳۲b
		۲/۵ درصد	۴۷۲۵۶/۹۱ab	۳۱۵۲۶/۸۵ab	۲۶۳۱۸/۶۷ab	۹۱۳۵/۱۷ab	۲/۲۴b	۱۴۰/۸۷c
۱۰۰ درصد	۱۰۰	صفر درصد	۳۷۵۸۳/۵۹d	۲۵۰۵۵/۲۷cd	۱۴۵۴۹/۸۲cd	۵۲۶۷/۲۱cd	۱/۸۱c	۱۲۵/۴۹f
		۱/۲۵ درصد	۴۳۹۸۲/۷۵bc	۲۹۵۳۴/۱۸bc	۲۰۸۴۶/۲۵bc	۷۰۸۹/۲۸bc	۲/۲۹b	۱۳۶/۴۲d
		۲/۵ درصد	۳۸۴۲۸/۹۶d	۲۵۶۱۸/۵۷cd	۱۵۲۷۹/۳۶cd	۶۲۱۴/۲۵c	۱/۸۷c	۱۲۹/۵۲e
	۱۵۰	صفر درصد	۴۳۹۸۵/۶۶bc	۲۹۳۲۴/۶۴bc	۲۰۸۴۹/۲۵bc	۷۱۶۸/۶۲bc	۲/۳۸b	۱۳۲/۷۴d
		۱/۲۵ درصد	۴۹۸۹۳/۴۸a	۳۳۲۶۷/۲۷a	۲۹۱۶۵/۳۷a	۱۰۸۳۲/۵۳a	۲/۳۱b	۱۵۱/۲۴ab
		۲/۵ درصد	۴۳۲۴۷/۷۹bc	۲۸۸۳۱/۲۵bc	۲۰۹۶۷/۱۸bc	۷۱۵۰/۶۶bc	۲/۲۶b	۱۴۲/۳۲c
	۲۰۰	صفر درصد	۴۵۹۱۸/۸۳b	۳۰۸۵۴/۶۳b	۲۳۸۶۲/۵۳b	۸۷۴۳/۱۵b	۲/۲۴b	۱۴۶/۸۶b
		۱/۲۵ درصد	۵۱۲۷۶/۳۲a	۳۴۱۸۴/۸۵a	۳۰۱۴۵/۷۸a	۱۱۴۶/۳۱a	۲/۹۶a	۱۵۷/۸۷a
		۲/۵ درصد	۴۶۹۴۴/۵۸b	۳۱۲۹۶/۵۷ab	۲۵۷۸۲/۲۴ab	۹۵۸۳/۸۷ab	۲/۸۴a	۱۵۱/۲۱ab

میر و همکاران (۱۴۰۰) در تحقیق خود به نتایج مشابه دست یافتند. ایشان در بررسی تأثیر بیوچار بر ارتفاع گیاه کارلا بیان داشتند افزودن بیوچار تا ۲/۵ درصد وزنی باعث افزایش ارتفاع گیاه کارلا شد و افزودن بیشتر بیوچار به خاک تا ۵ درصد وزنی، ارتفاع گیاه را کاهش داد. سطوح مختلف کود نیتروژن تأثیرات مثبت و معنی‌دار بر اندازه ارتفاع داشت. بیشترین مقدار ارتفاع در تیمار N3 و کمترین آن در تیمار N1 مشاهده شد (جدول ۵). بیشترین ارتفاع گیاه (۱۲۵/۴ سانتی‌متر) از تیمار ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن و کمترین آن (۱۱۱/۲ سانتی‌متر) از تیمار ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن به‌دست آمد. نیتروژن در تشکیل بسیاری از ترکیب های آلی گیاهی نقش

داشته و تأثیر نیتروژن بر رشد گیاه به دلیل اثرات مثبت نیتروژن بر فعالیت فتوسنتزی و فرایندهای متابولیکی ترکیب های آلی در گیاه و تقویت رشد رویشی گیاه می باشد (EL- Gendy et al., 2015). اثرات متقابل آب آبیاری، بیوچار و نیتروژن (جدول ۶) نشان داد با کاهش مقدار آب آبیاری، بیوچار و نیتروژن ارتفاع گیاه کاهش یافت. در تمامی سطوح آبیاری و کود نیتروژن استفاده ۱/۲۵ درصد وزنی بیوچار باعث افزایش ارتفاع گیاه شد. در سطوح ۱۰۰ و ۷۵ درصد آب آبیاری، استفاده ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار کود نیتروژن و بیوچار تا ۱/۲۵ درصد وزنی باعث افزایش ارتفاع گیاه شد. در سطح آبیاری ۵۰ درصد، مصرف کود نیتروژن تا ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار ارتفاع گیاه را افزایش داد اما مصرف بیشتر کود نیتروژن، کاهش ارتفاع را در پی داشت. در شرایط تنش خشکی شدید، افزایش غلظت ترکیبات نیتروژنی در اطراف ریشه منجر به افزایش فشار اسمزی و تلاش بیشتر گیاه برای حفظ آب سلول‌ها و کاهش تعرق می گردد و ارتفاع گیاه در این شراط کاهش می‌یابد (Pierret et al., 2005). بنابراین، در شرایط تنش خشکی شدید، افزایش مصرف نیتروژن نه‌تنها منجر به افزایش رشد نمی‌شود، بلکه با کاهش کارایی مصرف نیتروژن و افزایش تجمع نیترات در ناحیه ریشه، رشد گیاه را محدود می‌کند. از این رو، تنظیم سطح نیتروژن متناسب با شرایط رطوبتی خاک، یک راهبرد مدیریتی مؤثر برای کاهش اثرات تنش خشکی محسوب می‌شود (Fageria et al., 2011). همچنین مشاهده شد در تیمارهایی که کم‌آبی شدید بود (تیمار I1)، باید مقدار نیتروژن را کمتر در نظر گرفت. زیرا افزایش مصرف نیتروژن در این تیمارها موجب کاهش ارتفاع می شود.

قطر ساقه

نتایج تجزیه واریانس (جدول ۴) نشان داد که اثرات آب آبیاری، نیتروژن و بیوچار و همچنین اثرات متقابل آن‌ها بر قطر ساقه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود که این موضوع بیانگر وابستگی شدید رشد قطری ساقه ذرت به شرایط رطوبتی خاک، تغذیه نیتروژنی و اصلاح خصوصیات خاک توسط بیوچار است و نشان می‌دهد پاسخ گیاه به هر یک از این عوامل مستقل از سایر عوامل نبوده و تحت تأثیر اثرات متقابل آن‌ها قرار دارد (Marschner, 2012). کاهش عمق آب آبیاری باعث کاهش قطر ساقه شد (جدول ۵). این امر به کاهش پتانسیل آب خاک و در نتیجه کاهش فشار تورژسانس سلولی، محدود شدن تقسیم و طویل شدن سلول‌ها و کاهش انتقال مواد فتوسنتزی به اندام‌های رویشی نسبت داده می‌شود (Hsiao, 1973). با کاهش مقدار آب آبیاری به ۷۵ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی خاک، قطر ساقه به‌ترتیب ۱۹/۲۳ و ۳۸/۴۶ درصد نسبت به تیمار آبیاری کامل (۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی) کاهش یافت.کاهش مقدار آب آبیاری به ۷۵ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی خاک، کاهش شدیدتر قطر ساقه به‌ویژه در سطح ۵۰ درصد نشان‌دهنده‌ی تشدید تنش خشکی است، به‌طوری که کاهش جذب عناصر غذایی، بسته شدن روزنه‌ها و افت فتوسنتز در شرایط تنش شدید منجر به کاهش محسوس رشد رویشی و قطر ساقه شده است (Farooq et al., 2009). زو و همکاران گزارش کردند که کم‌آبیاری در مراحل حساس رشد ذرت سبب کاهش ضخامت ساقه، افت استحکام گیاه و تسریع رسیدگی دانه می‌شود (Zou et al., 2019). ژانگ و همکاران نیز تأیید کردند که کمبود آب موجب کاهش فعالیت مریستم‌های جانبی و محدود شدن انتقال قندها و ترکیبات ساختاری (سلولز و لیگنین) به ساقه است. این عوامل نهایتاً به کاهش پایداری مکانیکی ساقه و کاهش عملکرد علوفه منجر می‌شوند (Zhang et al.,2022). استفاده از کود نیتروژن باعث افزایش قطر ساقه شد (جدول ۵). افزایش قطر ساقه در اثر مصرف نیتروژن بیانگر نقش اساسی این عنصر در افزایش سنتز کلروفیل، پروتئین‌ها و آنزیم‌ها و در نتیجه افزایش فتوسنتز و رشد رویشی گیاه است، به‌طوری که نیتروژن با بهبود رشد بافت‌های آوندی و افزایش استحکام ساقه موجب افزایش قطر ساقه می‌شود (Marschner, 2012). بیشترین قطر ساقه (۲/۵۹ سانتی‌متر) با مصرف ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار کود نیتروژن به‌دست آمد که از این نظر با تیمار ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار (۲/۳۴ سانتی‌متر) تفاوت معنی-داری نداشت. عدم تفاوت معنی‌دار بین مصرف ۱۵۰ و ۲۰۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار نشان می‌دهد که گیاه به حد بهینه نیاز نیتروژنی برای رشد ساقه رسیده و افزایش بیشتر نیتروژن نتوانسته است، منجر به افزایش معنی‌دار قطر ساقه شود که این امر می‌تواند ناشی از کاهش کارایی مصرف نیتروژن یا محدودیت سایر عوامل رشد باشد (Binder et al., 2000). تحقیقات نشان داد که افزایش نیتروژن تا سطح بهینه، باعث افزایش ضخامت ساقه، بهبود هدایت آب و مواد غذایی و پایداری بیشتر گیاه می‌شود. در مقابل، سطوح پایین نیتروژن (۱۰۰ کیلوگرم در هکتار) منجر به محدودیت در سنتز پروتئین‌ها، کاهش رشد سلولی و در نتیجه کاهش قطر ساقه شد (Sun et al. 2020). استفاده ۱/۲۵ درصدوزنی بیوچار باعث افزایش ساقه ذرت نسبت به تیمار شاهد شد. استفاده بیشتر از بیوچار (تیمار ۲/۵ درصد وزنی خاک) قطر ساقه را کاهش داد اما نسبت به تیمار شاهد افزایش داشت (جدول ۵). افزایش قطر ساقه در تیمار ۱/۲۵ درصد وزنی بیوچار نسبت به شاهد به دلیل بهبود خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک از جمله افزایش نگهداشت رطوبت، بهبود تهویه خاک، افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی و افزایش فراهمی عناصر غذایی برای گیاه است که در نهایت رشد رویشی و قطر ساقه را افزایش داده است (Lehmann et al., 2011; Nyambura et al. 2024). کاهش قطر ساقه در سطح بالاتر بیوچار (۲/۵ درصد وزنی خاک) نسبت به ۱/۲۵ درصد می‌تواند ناشی از برهم خوردن تعادل عناصر غذایی، افزایش نسبت C/N و تثبیت موقت نیتروژن در خاک باشد، هرچند اثر کلی بیوچار همچنان نسبت به عدم مصرف آن مثبت باقی مانده است (Glaser et al.,

(2002. اثرات متقابل آب آبیاری، بیوچار و نیتروژن (جدول ۶) نشان داد بیشترین قطر ساقه (۲/۹۶ سانتی‌متر) از تیمار آبیاری۱۰۰ درصد، ۱/۲۵ درصد وزنی بیوچار و ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن و کمترین آن (۱/۴۶ سانتی‌متر) از تیمار ۵۰ درصد آبیاری، عدم مصرف بیوچار و ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن به‌دست آمد. که این نشان‌دهنده‌ی اثر هم‌افزایی تأمین مناسب آب، نیتروژن کافی و بهبود شرایط خاک توسط بیوچار است، به‌طوری که فراهمی هم‌زمان آب و عناصر غذایی موجب افزایش کارایی مصرف نیتروژن، بهبود رشد سلولی و افزایش قطر ساقه شده است (Agegnehu et al., 2016). از طرف دیگر محدودیت‌های شدید آبی و تغذیه‌ای منجر به کاهش جذب آب و عناصر غذایی، افت فتوسنتز و در نهایت کاهش شدید رشد رویشی و قطر ساقه شده است (Farooq et al., 2009). در مجموع، کاهش قطر ساقه در تیمارهای کم‌آبیاری و نیتروژن پایین را می‌توان ناشی از هم‌افزایی چند عامل دانست: بسته شدن روزنه‌ها و افت فتوسنتز در اثر تنش خشکی، کاهش سنتز پروتئین و توقف تقسیم سلولی در اثر کمبود نیتروژن، و ضعف ساختار خاک در نبود بیوچار. در مقابل، تلفیق آبیاری مناسب، تأمین بهینه نیتروژن و کاربرد بیوچار به‌عنوان اصلاح‌کننده خاک، توانسته است محیط فیزیولوژیک و اکولوژیک مناسبی برای توسعه ساقه و حفظ پایداری گیاه در برابر شرایط تنش ایجاد کند (Zhang et al., 2022).

عملکرد علوفه تر و خشک

نتایج تجزیه واریانس اثرات ساده آب آبیاری، بیوچار و نیتروژن بر عملکرد علوفه تر و خشک نشان داد، وزن علوفه تر و خشک در هر سه تیمار در سطح یک درصد معنی دار است. معناداری بالای عوامل و تعاملات نشان می‌دهد که عملکرد علوفه تر و خشک به شدت تحت تأثیر سطوح آبیاری، نیتروژن، و بیوچار است. اثرات متقابل دوگانه و متقابل سه‌گانه نیز در سطح یک درصد معنی‌دار بود. این نتایج نشان می‌دهد که نه تنها هر عامل به تنهایی، بلکه ترکیب آن‌ها نیز تأثیر قابل‌توجهی بر وزن تر و خشک علوفه دارد (جدول ۴). معنی‌داری اثرات متقابل نشان‌دهنده وجود رابطه هم‌افزا بین آبیاری، نیتروژن و بیوچار است، به‌طوری که پاسخ گیاه به هر عامل به‌شدت وابسته به سطح سایر عوامل بوده و مدیریت تک‌عاملی نمی‌تواند حداکثر عملکرد علوفه را تضمین کند (Zamora-Re et al., 2020). بیشترین میانگین وزن علوفه تر (۴۵۳۳۲/۸ کیلوگرم در هکتار) و علوفه خشک (۲۸۲۳۵/۷ کیلوگرم در هکتار) در تیمار آبیاری ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی خاک به‌دست آمد که با تیمار ۷۵ درصد ظرفیت زراعی خاک تفاوت معنی داری نداشت. عدم اختلاف معنی‌دار بین این دو سطح آبیاری نشان می‌دهد که ذرت علوفه‌ای قادر است در شرایط تنش ملایم آبی، با حفظ سطح قابل‌قبولی از فتوسنتز و رشد رویشی، عملکردی مشابه آبیاری کامل تولید کند که این موضوع از نظر مدیریت بهینه منابع آب اهمیت زیادی دارد (Fereres and Soriano, 2007). کمترین مقدار عملکرد علوفه تر و خشک (۳۶۷۵۲/۲ و ۲۰۰۳۲/۶ کیلوگرم در هکتار) مربوط به تیمار آبیاری ۵۰ درصد بود. تنش خشکی شدید در این سطح آبیاری باعث کاهش هدایت روزنه‌ای، افت نرخ فتوسنتز و تسریع پیری برگ‌ها شده و در نهایت منجر به کاهش تجمع ماده خشک در گیاه می‌شود (Nakayama and Kuroha, 2023). این نشان می‌دهد که کاهش شدید آبیاری باعث افت عملکرد می‌شود، اما آبیاری ۷۵ درصد توانسته عملکردی مشابه آبیاری کامل ایجاد کند. آبیاری کافی باعث افزایش فتوسنتز، توسعه سلولی و در نهایت افزایش زیست‌توده می‌شود. کاهش آبیاری موجب تنش خشکی و کاهش تورم سلولی و کاهش وزن علوفه می‌گردد (Nakayama and Kuroha, 2023). اضافه کردن نیتروژن به خاک باعث افزایش عملکرد تر و خشک علوفه شد. بیشترین عملکرد علوفه تر و خشک در تیمار ۲۰۰ کیلوگرم نیتروژن (۴۷۷۸۵/۱ و ۲۹۱۱۷/۶ کیلوگرم در هکتار) به‌دست آمد و با تیمار ۱۵۰ کیلوگرم (۴۶۱۸۷۸/۸ و ۲۷۳۱۱/۱ کیلوگرم در هکتار) تفاوت معنی‌داری نداشت. این نتیجه نشان می‌دهد که سطح ۱۵۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار می‌تواند بخش عمده نیاز غذایی ذرت علوفه‌ای را تأمین کند و افزایش بیشتر نیتروژن الزاماً منجر به افزایش معنی‌دار عملکرد نمی‌شود (Khan et al., 2020). کمترین مقدار عملکرد علوفه تر و خشک در تیمار ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار (۳۳۸۲۳/۸ و۲۰۳۳۶/۷ کیلوگرم در هکتار) مشاهده شد (جدول ۵). این نشان‌دهنده نقش حیاتی نیتروژن در افزایش عملکرد است. نیتروژن به عنوان یک عامل کلیدی در سنتز کلروفیل، پروتئین‌ها و اسیدهای نوکلئیک، نقش مستقیمی در افزایش فتوسنتز و توسعه برگ‌ها دارد. افزایش سطح برگ و طول دوره فعالیت فتوسنتزی در نتیجه تأمین نیتروژن کافی، منجر به افزایش جذب نور و تجمع بیشتر ماده خشک در اندام‌های هوایی گیاه می‌شود (Yan et al., 2021). نیتروژن کافی باعث افزایش مقاومت گیاه در برابر تنش‌های محیطی می‌شود. در شرایط کم‌آبی یا خاک‌های شور، گیاهان با تغذیه مناسب نیتروژن عملکرد بالاتری نشان می‌دهند. سطوح بالای نیتروژن با تحریک رشد رویشی و افزایش محتوای رطوبت در بافت‌های گیاهی، منجر به افزایش معنی‌دار وزن علوفه تر می‌شود. در مقابل، سطوح پایین نیتروژن به‌دلیل محدودیت در سنتز مواد آلی و کاهش سطح برگ، سبب کاهش چشمگیر وزن علوفه سبز می‌گردد (Khan and et.al, 2020). مطابق جدول ۴ کاربرد بیوچار اثر معنی‌داری بر عملکرد علوفه تر و خشک ذرت داشت. بیشترین مقدار عملکرد علوفه تر و خشک (۵۰۲۱۰/۲ و ۲۹۴۷۹/۲ کیلوگرم در هکتار) در تیمار ۱/۲۵ درصد وزنی خاک بیوچار مشاهده شد، در حالی که تیمار بدون بیوچار کمترین مقدار (۳۷۱۷۳/۴ و ۲۲۷۷۵/۶ کیلوگرم در هکتار) را داشت. این سطح بیوچار به‌عنوان مقدار بهینه، با بهبود

ساختار فیزیکی خاک و افزایش ظرفیت نگهداری آب، شرایط مناسب‌تری برای رشد ریشه و جذب عناصر غذایی فراهم کرده است (Lehmann and Joseph, 2015). بیوچار سطح تبادل کاتیونی خاک را بالا برده و عناصر غذایی مانند نیتروژن و پتاسیم را در دسترس گیاه قرار داد (Chen et al., 2024). مصرف بیشتر بیوچار (تیمار ۲/۵ درصد وزنی خاک) باعث کاهش عملکرد نسبت به تیمار ۱/۲۵ درصد شد. مصرف بیش از حد بیوچار می‌تواند باعث افزایش شوری خاک یا تغییر نامطلوب در pH شود. همچنین ممکن است به دلیل اشباع منافذ خاک، تهویه کاهش یابد و رشد ریشه محدود شود (Xiao et al., 2022). اثرات متقابل آب آبیاری، بیوچار و نیتروژن (جدول ۶) نشان داد بیشترین مقدار عملکرد علوفه تر و خشک (۵۱۲۷۶/۳۲ و ۳۴۱۸۴/۸۵ کیلوگرم در هکتار) از تیمار آبیاری کامل و با مصرف ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن و ۱/۲۵ درصد وزنی بیوچار به دست آمد که از این نظر با تیمارهای ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار کود نیتروژن و ۷۵ درصد آبیاری تفاوت معنی داری نداشت. کمترین مقدار مربوط به تیمار کم‌آبیاری شدید همراه با ۱۰۰ کیلوگرم نیتروژن و بدون بیوچاربود. این روند نشان می‌دهد که افزایش نیتروژن و کاربرد بیوچار به‌ویژه در سطح ۱,۲۵ درصد توانسته اثرات منفی کم‌آبیاری را تا حد زیادی جبران کند و عملکرد را به سطح آبیاری کامل نزدیک سازد. علت این افزایش را می‌توان در نقش نیتروژن به‌عنوان عنصر کلیدی در سنتز کلروفیل و پروتئین‌های گیاهی (Zamora-Re et al., 2020; Yan et al., 2021)، اثر آبیاری کامل در افزایش سطح برگ و نرخ فتوسنتز و توانایی بیوچار در بهبود ظرفیت نگهداری آب، کاهش شوری و افزایش فعالیت میکروبی خاک دانست (Lehmann and Joseph, 2015). در مقابل، مصرف بیش از حد بیوچار می‌تواند با افزایش شوری یا تغییر نامطلوب pH خاک، رشد ریشه را محدود کرده و عملکرد متوسطی ایجاد کند.

وزن تر و خشک بلال

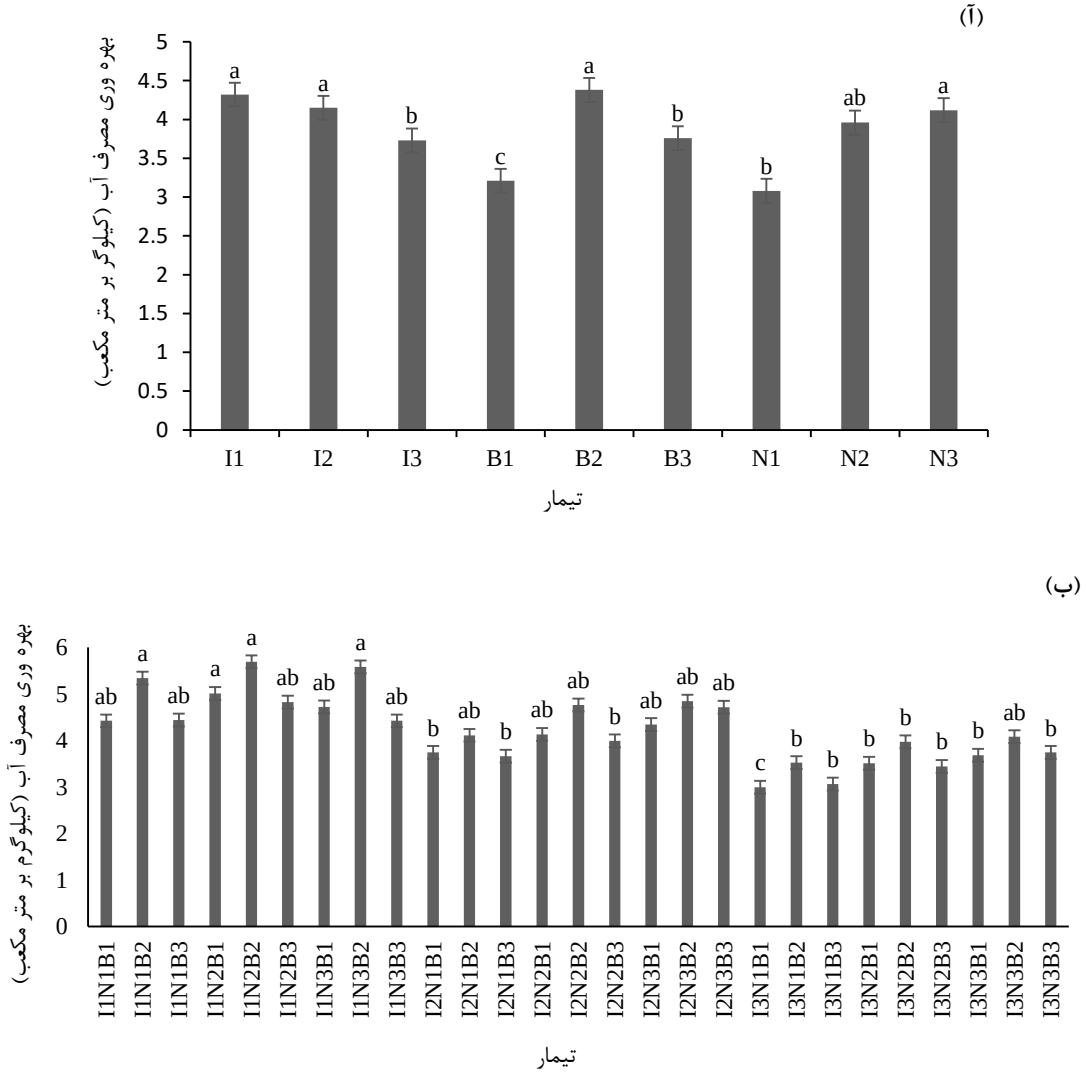
نتایج تجزیه واریانس (جدول ۴) نشان داد که اثر سطوح آبیاری، نیتروژن و بیوچار بر وزن تر و خشک بلال در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. بر اساس مقایسه میانگین‌ها (جدول ۵)، بیشترین وزن تر و خشک بلال در تیمار آبیاری کامل (۱۰۰ درصد نیاز آبی) به‌ترتیب با مقدار ۲۹۸۱۸/۷ و ۸۰۵۶/۶ کیلوگرم در هکتاربه دست آمد، در حالی‌که کمترین مقدار وزن تر و خشک بلال مربوط به تیمار کم‌آبیاری شدید (۵۰ درصد نیاز آبی) به‌ترتیب با ۱۸۳۹۷/۴ و ۴۶۱۰/۹ کیلوگرم در هکتار بود. این نتایج نشان می‌دهد که کاهش سطح آبیاری منجر به افت قابل توجه عملکرد بلال می‌شود، هرچند تیمار ۷۵ درصد نیاز آبی نیز عملکردی نزدیک به آبیاری کامل داشت که بیانگر امکان صرفه‌جویی در مصرف آب بدون کاهش محسوس عملکرد است. این موضوع نشان می‌دهد که کم‌آبیاری ملایم با حفظ رطوبت کافی در ناحیه ریشه، افزایش کارایی مصرف آب و کاهش تلفات تبخیری می‌تواند بدون ایجاد تنش شدید، فرآیندهای فیزیولوژیک مؤثر بر پرشدن دانه را حفظ کرده و عملکرد بلال را در سطح مطلوب نگه دارد (Fereres and Soriano, 2007; Kang et al., 2017). یافته‌های مشابه توسط سایر محققین نیز گزارش شده است که نشان دادند کم آبیاری می‌تواند بهره‌وری آب را افزایش دهد بدون آنکه عملکرد ذرت به طور معنی‌داری کاهش یابد (Faloye et al., 2020). اثر نیتروژن نیز بر وزن تر و خشک بلال معنی‌دار بود؛ به‌طوری‌که بیشترین مقدار وزن تر و خشک بلال (۲۴۸۰۰/۱ و ۶۷۳۷/۷ کیلوگرم در هکتار) در تیمار ۲۰۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار حاصل شد و کمترین مقدار (۲۰۰۲۹/۵ و ۵۳۱۹/۲ کیلوگرم در هکتار) در تیمار ۱۰۰ کیلوگرم نیتروژن مشاهده گردید (جدول ۵). افزایش نیتروژن سبب بهبود رشد رویشی و انتقال مواد فتوسنتزی به اندام‌های زایشی شد و در نهایت عملکرد بلال افزایش یافت تأمین نیتروژن کافی با افزایش سطح برگ فعال، تأخیر در پیری زودرس برگ‌ها و تداوم فتوسنتز در دوره پرشدن دانه، انتقال مواد فتوسنتزی به بلال را افزایش داده و در نتیجه موجب افزایش وزن خشک بلال می‌شود (Ciampitti and Vyn, 2012; Sinclair and Rufty, 2012). گیث و همکاران نشان داده‌اند که تقسیم مصرف نیتروژن در چند مرحله می‌تواند کارایی مصرف نیتروژن و عملکرد را افزایش دهد، زیرا گیاه در مراحل بحرانی رشد به نیتروژن دسترسی بهتری دارد. نیتروژن کافی برای سنتز پروتئین‌های ذخیره‌ای در دانه و همچنین حفظ سلامت و فعالیت فتوسنتزی پوشش برگ در طول مرحله پر شدن دانه ضروری است (Gheith et al., 2022). کمبود نیتروژن منجر به زردی زودرس برگ‌ها، کوتاه شدن دوره پر شدن دانه و در نهایت کاهش وزن خشک بلال می‌شود (Davies et al., 2020). بیوچار نیز اثر مثبت و معنی‌داری بر وزن تر و خشک بلال داشت. بیشترین مقدار در تیمار ۱/۵ درصد وزنی بیوچار مشاهده شد (۲۴۵۷۷/۸ و ۶۳۷۹/۴ کیلوگرم در هکتار) و کمترین مقدار در تیمار بدون بیوچار (۲۰۴۲۹,۶ و ۵۰۱۴/۵ کیلوگرم در هکتار) ثبت گردید (جدول ۵). این نتایج نشان می‌دهد که افزودن بیوچار با بهبود خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک، افزایش ظرفیت نگهداری آب و عناصر غذایی، توانسته است عملکرد بلال را بهبود دهد. کاربرد بیوچار از طریق افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی خاک، بهبود نگهداشت رطوبت و کاهش آبشویی نیتروژن، فراهمی تدریجی عناصر غذایی را افزایش داده و شرایط مطلوب‌تری برای رشد زایشی و افزایش وزن بلال فراهم می‌کند (Lehmann et al., 2011 Agegnehu et al., 2017). تحقیقات مشابه گزارش کردند که کاربرد بیوچار همراه با کود شیمیایی تحت شرایط کم‌آبیاری عملکرد و بهره‌وری آب ذرت را افزایش می‌دهد (Faloye et al. 2020). نتایج تجزیه واریانس (جدول ۴) نشان داد

که اثر متقابل آبیاری، نیتروژن و بیوچار بر وزن تر بلال در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. بیشترین وزن تر و خشک بلال (۳۰۱۴۵/۷۸ و ۱۱۴۶/۳۱ کیلوگرم در هکتار) در تیمار آبیاری کامل همراه با مصرف ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار کود نیتروژن و ۱/۲۵ درصد وزنی بیوچار به دست آمد، در حالی‌که کمترین مقدار وزن تر و خشک بلال (۸۴۳۲/۲۱ و ۳۴۷۸/۲۵ کیلوگرم در هکتار) مربوط به تیمار کم‌آبیاری شدید (۵۰ درصد ظرفیت زراعی خاک) همراه با مصرف ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار کود نیتروژن و بدون مصرف بیوچار بود. از این نظر تفاوت معنی‌داری بین تیمار آبیاری کامل با مصرف ۲۰۰ و ۱۵۰کیلوگرم در هکتار نیتروژن و ۱/۲۵ درصد بیوچار با تیمار آبیاری ۷۵ درصد مشاهده نشد (جدول ۶). این نتایج نشان می‌دهد که مدیریت تلفیقی منابع (آب، نیتروژن و بیوچار) می‌تواند اثرات منفی کم‌آبیاری را جبران کرده و عملکرد بلال را بهبود بخشد. دلیل این امر آن است که آبیاری کامل شرایط بدون استرس خشکی را فراهم می‌کند، نیتروژن کافی رشد رویشی و تشکیل دانه را تقویت می‌کند، و بیوچار با افزایش ظرفیت نگهداری آب و عناصر غذایی خاک، دسترسی ریشه به نیتروژن و رطوبت را بهبود می‌بخشد. این سه عامل در کنار هم یک اثر هم‌افزایی ایجاد کرده‌اند که منجر به افزایش معنی‌دار عملکرد بلال شده است. یافته‌های مشابه توسط سایر محققین نیز گزارش شده است که نشان دادند کاربرد بیوچار همراه با مدیریت آبیاری و نیتروژن، اثرات مثبت هم‌افزایی بر عملکرد و بهره‌وری آب ذرت دارد (Centeno et al.,2020). هم‌افزایی مشاهده‌شده بین آبیاری، نیتروژن و بیوچار ناشی از بهبود هم‌زمان وضعیت رطوبتی و تغذیه‌ای خاک است، به‌طوری‌که بیوچار با افزایش نگهداشت آب و نیتروژن، حساسیت گیاه به تنش خشکی را کاهش داده و امکان حفظ عملکرد بلال در سطوح پایین‌تر آبیاری را فراهم می‌سازد (Laird et al., 2010). به‌طور کلی، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که مدیریت تلفیقی آب، نیتروژن و بیوچار می‌تواند به‌عنوان راهکاری مؤثر برای افزایش بهره‌وری نهاده‌ها و دستیابی به تولید پایدار ذرت در شرایط محدودیت منابع آب مورد استفاده قرار گیرد (Zhang et al., 2019).

بهرو وری مصرف آب

نتایج تجزیه واریانس (جدول ۴) نشان داد که بهره‌وری مصرف آب به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر غلظت بیوچار و سطح آبیاری قرار گرفته است، اما نکته برجسته آماری، کاهش معنی‌دار بهره‌وری آب با افزایش سطح آبیاری از ۷۵ به ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی خاک است (شکل ۳ (آ)). در حالی که تیمار آبیاری کامل بالاترین عملکرد محصول را به همراه داشت، با کاهش بهره‌وری مصرف آب به ۳/۷۳ کیلو گرم بر متر مکعب مواجه شد، زیرا افزایش در میزان آب مصرفی از ۶۶۹۳ به ۸۳۶۷ متر مکعب بر هکتار نتوانست افزایش متناسبی در عملکرد ایجاد کند و منجر به اتلاف آب از طریق زهکشی عمیق یا تبخیر از سطح خاک شد (سعیدی نیا و همکاران، ۲۰۲۴). کاهش بهره‌وری مصرف آب در سطح آبیاری کامل نشان می‌دهد که افزایش مصرف آب فراتر از نیاز فیزیولوژیک گیاه، الزاماً به افزایش متناسب عملکرد منجر نمی‌شود و بخش قابل‌توجهی از آب مصرفی به‌صورت تلفات غیرمولد از سیستم خاک–گیاه خارج می‌شود (Fereres and Soriano, 2007; Kang et al., 2017). در نقطه مقابل، تیمار کم‌آبیاری ۵۰ درصدی به دلیل کاهش شدید تبخیر–تعرق و پتانسیل آب‌کشی، توانست با میانگین ۴/۳۲ کیلو گرم بر متر مکعب بالاترین بهره‌وری آب را از نظر کمی به دست آورد، که این یافته با مطالعاتی که اثر محافظتی تنش آبی بر افزایش کارایی مصرف آب را گزارش کرده‌اند، مطابقت دارد (مریدسادات و همکاران، ۱۴۰۱). افزایش بهره‌وری مصرف آب در شرایط کم‌آبیاری شدید بیانگر آن است که کاهش عرضه آب می‌تواند با محدود کردن تبخیر غیرمولد و افزایش سهم آب مصرفی اختصاص‌یافته به تولید ماده خشک، کارایی مصرف آب را به‌طور معنی‌داری افزایش دهد، هرچند این امر معمولاً با کاهش عملکرد مطلق همراه است (Blum, 2009; Zhang et al., 2019). در زمینه کاربرد بیوچار، نتایج نشان داد که کاربرد ۱/۲۵ درصدی بیوچار منجر به دستیابی به بالاترین بهره‌وری آب (۴,۳۸ کیلو گرم بر متر مکعب) شد. این اثر مثبت بیوچار ریشه در توانایی آن در افزایش ظرفیت نگهداری آب مؤثر خاک و بهبود ساختار ماکروپورها دارد که نفوذپذیری و تهویه را بهبود می‌بخشد، در نتیجه میزان هدررفت آب به صورت آب غیرقابل استفاده برای گیاه کاهش می‌یابد (Zhang et al., 2024). بهبود بهره‌وری مصرف آب در اثر کاربرد بیوچار همچنین می‌تواند ناشی از افزایش دسترسی ریشه به رطوبت پایدار در دوره‌های تنش آبی و کاهش نوسانات پتانسیل آب خاک باشد که منجر به حفظ فعالیت فتوسنتزی و کاهش بسته‌شدن روزنه‌ها می‌شود (Lehmann et al., 2011; Agegnehu et al., 2017). همچنین، عملکرد بهتر بیوچار در سطح ۱/۲۵ درصد در مقایسه با ۲/۵ درصد، نشان‌دهنده دستیابی به نقطه اشباع بهینه برای بهبود خواص فیزیکی خاک در این نوع خاک است؛ زیرا دوزهای بالاتر ممکن است به دلیل افزایش پتانسیل اسمزی یا اشغال بیش از حد منافذ، اثر تعدیل‌کننده خود را از دست دهند (Yang et al., 2022). این نتیجه نشان می‌دهد که اثر بیوچار بر بهره‌وری مصرف آب تابع دوز مصرفی است و کاربرد مقادیر بهینه آن می‌تواند بیشترین بهبود را در توازن آب–هوا در خاک ایجاد کند، در حالی که مقادیر بیش‌ازحد ممکن است با محدود کردن حرکت آب و ریشه، کارایی مصرف آب را کاهش دهند (Laird et al., 2010). مصرف نیتروژن موجب افزایش بهروری مصرف آب شد. بیشترین بهره‌وری مصرف آب (۴/۱۲ کیلوگرم بر متر مکعب) با کاربرد ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن به‌دست آمد که با تیمار ۱۵۰ کیلوگرم

در هکتار (۳/۹۶ کیلوگرم بـر مترمکعـب) تفـاوت معنـی‌داری نداشـت (شکل ۳ (آ)). افزایش بهره‌وری مصرف آب در اثـر مصـرف نیتـروژن نشان‌دهنده نقش کلیدی این عنصـر در افـزایش سـطح بـرگ فعـال، بهبود هدایت روزنه‌ای و افزایش کارایی فتوسنتزی اسـت کـه موجـب افـزایش تولیـد مـاده خشـک بـه ازای واحـد آب مصـرفی مـی‌شـود (Sinclair and Rufty, 2012; Ciampitti and Vyn, 2012). اثرات متقابل آب آبیاری، بیوچار و نیتروژن (شـکل ۳ (ب)) نشـان داد تیمار I1N2B3 بیشترین مقدار بهره‌وری مصرف آب (۵/۶۹ کیلـوگرم بر مترمکعـب) را داشـت کـه از ایـن نظـر بـا تیمارهـای I1N1B2 و I1N3B2 نداشـت. کمتـرین مقـدار بهـره‌وری مصـرف آب (۲/۹۹ کیلوگرم بر مترمکعـب) از تیمـار I3N1B1 بـه‌دسـت آمـد. بیشـترین بهره‌وری مصرف آب در تیمار I1N2B3 نشان‌دهنـده اثـر هـم‌افزایـی مدیریت تلفیقی آب، نیتروژن و بیوچـار اسـت؛ بـه‌طـوری‌کـه ترکیـب کم‌آبیاری ملایم با تغذیه نیتروژنی مناسب و بهبـود خـواص فیزیکـی خاک توسط بیوچار، توانسته است نسـبت تولیـد زیسـت‌تـوده بـه آب مصـرفی را در سـطح بهینـه حفـظ کنـد (Centeno et al., 2020; Zhang et al., 2021). در مجموع، نتایج این پژوهش نشان می‌دهـد که بیشینه‌سازی بهره‌وری مصرف آب لزوماً با بیشینه‌سـازی عملکـرد همراه نیست و مدیریت تلفیقی نهاده‌ها می‌تواند راهبردی مـؤثر بـرای تولید پایدار محصول در شرایط محـدودیت منـابع آب باشـد (Blum, 2009; Fereres and Soriano, 2007).

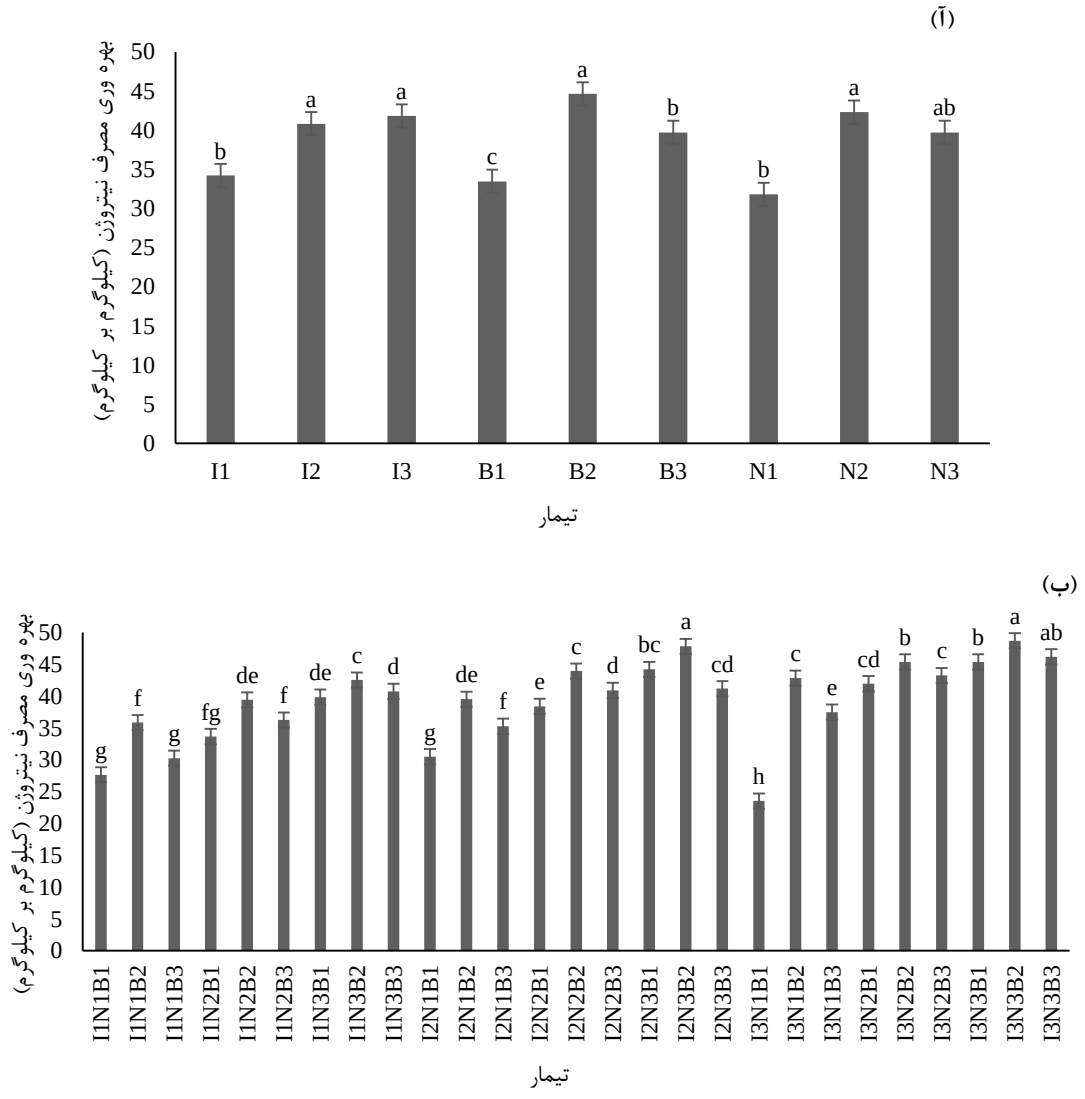


شکل ۳- مقایسه میانگین اثرات ساده و متقابل مقدار آب آبیاری، نیتروژن و بیوچار بر بهره‌وری مصرف آب ذرت

بهره وری مصرف نیتروژن

بهره‌وری مصرف نیتروژن (NUE) که معیار نهایی کارایی تبدیل نیتروژن جذب شده به زیست‌توده محصول است، به طور معناداری تحت تأثیر تمام عوامل مورد آزمایش قرار گرفت، که این امر اهمیت یکپارچه‌سازی مدیریت تغذیه با شرایط فیزیکی خاک و آبیاری را تأیید می‌کند (جدول ۴). مقایسه میانگین اثرات ساده تیمارها (شکل ۴ (آ)) نشان داد که در تیمارهای آبیاری، بیشترین بهره‌وری مصرف نیتروژن (۴۱/۸ کیلوگرم بر کیلوگرم) در تیمار آبیاری کامل به دست آمد که با تیمار ۷۵ درصد آبیاری (۴۰/۸ کیلوگرم بر کیلوگرم) تفاوت معنی‌دار نداشت. کاهش مقدار آب آبیاری به ۵۰ درصد بهره‌وری مصرف نیتروژن را کاهش داد. کاهش بهره‌وری مصرف نیتروژن در شرایط کم‌آبیاری شدید را می‌توان به محدودیت جذب نیتروژن در اثر کاهش جریان توده‌ای و اختلال در فعالیت ریشه نسبت داد، به‌طوری‌که تنش آبی شدید ظرفیت گیاه برای انتقال و استفاده مؤثر از نیتروژن جذب‌شده را کاهش می‌دهد (Sinclair and Rufty, 2012; Farooq et al., 2009). مصرف بیوچار به اندازه ۱/۲۵ درصد وزنی باعث افزایش بهره‌وری مصرف نیتروژن نسبت به تیمار شاهد داشت. مصرف بیشتر بیوچار (تیمار ۲/۵ درصد وزنی) باعث کاهش بهره‌وری مصرف نیتروژن شد اما نسبت به تیمار شاهد افزایش داشت (شکل ۴ (آ)). این افزایش چشمگیر در بهره‌وری مصرف نیتروژن ناشی از کاربرد بیوچار، بازتاب‌دهنده نقش بیوچار به عنوان یک بافر شیمیایی و فیزیکی در خاک است. بیوچار با افزایش ساختار خاک، تخلخل و ظرفیت نگهداری کاتیون، به طور مؤثری تثبیت نیتروژن آمونیومی را تسهیل کرده و نرخ آبشویی یون‌های نیترات را کاهش می‌دهد، که یک مزیت حیاتی در سیستم‌های آبیاری متناوب محسوب می‌شود (Sun et al., 2023). این پدیده، دسترسی نیتروژن به ریشه را در طول دوره حساس رشد گیاه تضمین کرده و از اتلاف منابع جلوگیری می‌نماید. افزایش بهره‌وری مصرف نیتروژن در اثر کاربرد بیوچار همچنین می‌تواند ناشی از بهبود هم‌زمان فعالیت میکروارگانیسم‌های تثبیت‌کننده نیتروژن و کاهش سرعت معدنی‌شدن سریع نیتروژن باشد که موجب آزادسازی تدریجی و همزمانی بهتر عرضه نیتروژن با نیاز گیاه می‌شود (Lehmann et al., 2011; Agegnehu et al., 2017). کاهش نسبی بهره‌وری مصرف نیتروژن در دوز ۲/۵ درصد بیوچار نشان می‌دهد که اثر این اصلاح‌کننده تابع مقدار مصرف است و کاربرد بیش‌ازحد آن ممکن است با افزایش جذب سطحی نیتروژن یا تغییر نامطلوب تعادل هوا–آب در خاک، کارایی جذب و استفاده نیتروژن توسط گیاه را محدود کند (Laird et al., 2010; Yang et al., 2022). بررسی اثر دوزهای مختلف کود نیتروژن بر شاخص بهره‌وری مصرف نیتروژن به صورت قاطع اصل بازده را در واکنش‌های بیوشیمیایی گیاه ذرت تأیید کرد. به طور خاص، تیمار کاربرد حداکثر نیتروژن ۲۰۰ کیلوگرم بر هکتار منجر به ثبت میانگین به مقدار ۳۹/۷ کیلوگرم بر کیلوگرم شد که به طور معناداری پایین‌تر از سطح بهره‌وری مصرف نیتروژن ثبت‌شده در دوز ۱۵۰ کیلوگرم بر هکتار معادل ۴۲/۳ کیلوگرم بر کیلوگرم قرار گرفت (شکل ۴ (آ)). این ناهماهنگی بین افزایش نهاده و کاهش بازده کارایی، نشان‌دهنده وقوع پدیده‌ای تحت عنوان اشباع ظرفیت جذب در گیاه است. پس از رسیدن به نقطه اشباع تغذیه‌ای، نیتروژن اضافی عمدتاً از طریق فرآیندهای شستشوی سریع به اعماق خاک منتقل شده یا از طریق تصعید گازی از دسترس خارج می‌گردد، که مستقیماً راندمان تبدیل بیوماس را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد (Irmak et al., 2023). در چنین شرایطی، بخشی از نیتروژن جذب‌شده به‌جای اختصاص به سنتز پروتئین‌های دانه، صرف رشد رویشی غیرکارآمد یا در بافت‌های غیرفعال ذخیره می‌شود که این امر باعث کاهش کارایی نهایی تبدیل نیتروژن به عملکرد اقتصادی می‌گردد (Ciampitti and Vyn, 2012). از دیدگاه کشاورزی سیستمی، این یافته دلالت بر این دارد که استراتژی‌های مدیریت تغذیه باید بر بهینه‌سازی سطح نهاده متمرکز باشند تا صرفاً بر افزایش سطح کود، چرا که هزینه‌های اقتصادی و بار زیست‌محیطی ناشی از نیتروژن استفاده نشده به طور فزاینده‌ای از مزایای احتمالی افزایش عملکرد پیشی می‌گیرد. (Paccioretti et al., 2025). از این رو، بیشینه‌سازی بهره‌وری مصرف نیتروژن مستلزم هم‌زمان‌سازی دقیق عرضه نیتروژن با تقاضای فیزیولوژیک گیاه و شرایط رطوبتی خاک است، نه صرفاً افزایش مقدار کود مصرفی، که این رویکرد یکی از ارکان اصلی کشاورزی پایدار محسوب می‌شود (Zhang et al., 2019).

اثرات متقابل آب آبیاری، بیوچار و نیتروژن نشان داد بالاترین بهره‌وری مصرف نیتروژن (۴۷/۸۲ کیلوگرم بر کیلوگرم) در تیمار I2N3B2 به‌دست آمد که با تیمار I3N3B2 و I3N3B3 تفاوت معنی‌داری نداشت. کمترین مقدار بهره‌وری مصرف نیتروژن در تیمار I3N1B1 (۲۳/۵۲ کیلوگرم بر کیلوگرم) مشاهده شد (شکل ۴ (قسمت ب)). بیشترین بهره‌وری مصرف نیتروژن در تیمار I2N3B2 بیانگر اثر هم‌افزایی مدیریت بهینه آبیاری، تأمین نیتروژن در سطح نزدیک به نقطه بهینه و بهبود محیط ریشه توسط بیوچار است، به‌طوری‌که این ترکیب با کاهش تلفات نیتروژن و افزایش توان جذب و مصرف آن توسط گیاه، بیشترین کارایی تبدیل نیتروژن به زیست‌توده را فراهم کرده است (Centeno et al., 2020; Ciampitti and Vyn, 2012). به‌طور کلی، نتایج این پژوهش تأکید می‌کند که بهبود بهره‌وری مصرف نیتروژن در ذرت نیازمند مدیریت تلفیقی آب، اصلاح‌کننده‌های خاک و سطح بهینه کود نیتروژن است و هرگونه عدم تعادل بین این عوامل می‌تواند کارایی نهایی سیستم تولید را به‌طور معنی‌داری کاهش دهد (Sinclair and Rufty, 2012; Zhang et al., 2021).



شکل ٤- مقایسه میانگین اثرات ساده و متقابل مقدار آب آبیاری، نیتروژن و بیوچار بر بهره‌وری مصرف نیتروژن در گیاه ذرت

نتیجه‌گیری

به‌طور کلی، نتایج این پژوهش نشان داد که پاسخ ذرت به تنش کم‌آبی به‌شدت وابسته به نحوه مدیریت هم‌زمان منابع آب و نیتروژن و اصلاح خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک است. یافته‌ها بیانگر آن است که صرف افزایش مصرف آب یا کود نیتروژن، بدون در نظر گرفتن کارایی مصرف نهاده‌ها، الزاماً به بهبود پایدار عملکرد منجر نمی‌شود و در برخی شرایط می‌تواند موجب کاهش بهره‌وری مصرف آب و نیتروژن گردد. در مقابل، به‌کارگیری راهبرد مدیریت تلفیقی شامل آبیاری بهینه، مصرف نیتروژن در سطح نزدیک به نقطه بهینه و کاربرد بیوچار در دوز مناسب، با ایجاد شرایط مطلوب‌تر در ناحیه ریشه، کاهش تلفات آب و نیتروژن و افزایش هم‌زمان کارایی جذب و مصرف این عناصر، توانست عملکرد و صفات رشدی ذرت را حتی تحت شرایط محدودیت آب به‌طور معنی‌داری بهبود بخشد. همچنین نتایج نشان داد که علاوه بر نقش اصلاح‌کنندگی بیوچار در خاک که در تحقیقات گذشته به اثبات رسیده است، بیوچار می‌تواند به‌عنوان یک ابزار مدیریتی مؤثر در افزایش بهره‌وری مصرف آب و نیتروژن عمل کرده و توانسته است اثرات منفی کم‌آبیاری را تا حد زیادی تعدیل کند؛ به‌گونه‌ای که در ترکیب با مدیریت مناسب آبیاری و نیتروژن، امکان حفظ عملکرد در سطوح پایین‌تر مصرف آب فراهم شد. از این رو، راهبردهای مبتنی بر مدیریت تلفیقی نهاده‌ها می‌توانند جایگزین مناسبی برای رویکردهای متکی بر مصرف حداکثری آب و کود باشند. در نهایت، نتایج این تحقیق تأکید می‌کند که استفاده

هدفمند از بیوچار در سطح بهینه، همراه با تنظیم دقیق آبیاری و کود نیتروژن، نه‌تنها موجب افزایش عملکرد و بهبود صفات مورفولوژیک ذرت می‌شود، بلکه با افزایش بهره‌وری مصرف منابع و کاهش اتلاف نهاده‌ها، می‌تواند به‌عنوان یک رویکرد عملی، اقتصادی و سازگار با محیط‌زیست برای توسعه کشاورزی پایدار در مناطق خشک و نیمه‌خشک مورد توجه قرار گیرد.

سپاسگزاری

این پژوهش با حمایت مالی دانشگاه زابل انجام شده است. کد پژوهانه IR-UOZ-GR-1837

منابع

ابراهیمی، ح.، و حسن پوردرویشی، ح. ۱۳۹۶. رابطه بین عملکرد ذرت با مصرف آب (نیاز آبی محاسباتی و کمبود رطوبت خاک).

اصولی، م.، کریمی، پ.، و شیرانی، ح .۱۴۰۱ .اثر بیوچار حاصل از منابع مختلف بر عملکرد و کارایی مصرف آب گندم .پژوهش آب در کشاورزی، ۳۵(۴):۳۷۱-۳۵۷.

پیری، ح.، و میر، ا. ۱۴۰۳. بررسی اثرات بیوچار بر کارایی مصرف آب آبیاری و کارایی مصرف نیتروژن در گیاه کارلا تحت شرایط تنش آبی. مدیریت آب و آبیاری، ۱۴(۲):۳۵۷-۳۳۷.

توراج‌زاده، ا.، پیری، ح.، ناصرین، ا.، و چاری، م.م. ۱۴۰۲. بررسی تأثیر بیوچار و شوری آب آبیاری بر شاخص‌های عملکردو درصد پروتئین کینوا در شرایط کم‌آبیاری. آبیاری و زهکش ایران، ۱۷(۴):۶۱۰-۵۹۷.

توراج‌زاده، ا.، پیری، ح.، ناصرین، ا.، و چاری، م.م. ۱۴۰۳. بررسی تأثیر بیوچار بر ویژگیهای فیزیکی و شیمیایی خاک تحت کشت کینوا در شرایط تنش آبی و شوری. آب و خاک. ۳۸(۱): ۸۵-۶۹.

سعیدی‌نیا، م.، موسوی، ر.، و رحیمی‌مقدم، م .۱۴۰۳ .بررسی اثرات کمپوست و بیوچار بر ذرت علوفه‌ای تحت شرایط کم‌آبیاری و آبیاری قطره‌ای در منطقه خرم‌آباد .علوم و مهندسی آبیاری، ۴۷(3)، ۸۵-۶۹.

عسکری‌دهنو، ص.، حسن‌پور، ف.، پیری، ح.، و خمر، ع. ۱۴۰۳. تأثیر محلول‌پاشی عصاره جلبک دریایی بر عملکرد، بهره‌وری مصرف آب و کیفیت فلفل دلمه‌ای در شرایط شوری آب آبیاری. آبیاری و زهکشی ایران، ۱۸(۶):۱۰۰۵-۹۹۳.

مریدسادات، م.، سلطانی‌محمدی، م.، برومندنسب، م.، وان‌اوئل، م.، و پیتر، م .۱۴۰۱ . بررسی اثر بیوچار کنوکارپوس بر عملکرد و بهره‌وری مصرف آب سورگوم علوفه‌ای در شرایط محدودیت کمی و کیفی آب .تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۳(۹): ۲۱۲۳-۲۱۴۰.

میر، ا.، پیری، ح.، و ناصرین، ا. ۱۴۰۰. اثرات سطوح مختلف بیوچار گندم و تنش آبی بر ویژگی های کمی و کیفی کارلا (خربزه تلخ) در شرایط گلدانی. نشریه پژوهش آب در کشاورزی. ۳۵(۲): ۱۶۹-۱۸۵.

Abbas, T., Rizwan, M., Ali, S., et al. 2018. Effect of biochar on alleviation of drought stress in plants: a critical review. Environmental Science and Pollution Research, 25, 32033–32045. https://doi.org/10.1007/s11356-018-3034-4

Agegnehu, G., Bass, A. M., Nelson, P. N., and Bird, M. I. 2016. Benefits of biochar, compost and biochar–compost for soil quality, maize yield and greenhouse gas emissions in a tropical agricultural soil. Science of the Total Environment, 543, 295–306.

Agegnehu, G., Bass, A.M., Nelson, P.N., and Bird, M.I., 2017. Benefits of biochar, compost and biochar–compost for soil quality, maize yield and greenhouse gas emissions in a tropical agricultural soil. Science of the Total Environment, 543, 295–306. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.11.054

Baranauskienne, R., Venskutonis, P.R., Viskelis, P. and Dambrausiene, E. 2003. Influence of nitrogen fertilizer on the yield and composition of thyme (Thymus vulgaris). Journal of Agricultural and Food Chemistry, 51(26): 7751-7758.

Biederman, L. A., & Harpole, W. S. 2013. Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling: a meta-analysis. GCB Bioenergy, 5(2), 202–214. https://doi.org/10.1111/gcbb.12037

Binder, D. L., Sander, D. H., and Walters, D. T.2000. Corn growth as affected by nitrogen deficiency stress and cultivar. Agronomy Journal, 92, 1222–1228.

Blum, A., 2009. Effective use of water (EUW) and not water-use efficiency (WUE) is the target of crop yield improvement under drought stress. Field Crops Research, 112(2–3), 119–123. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2009.03.009

Farzaneh, M., and Karimi, P. 2021. Soil erosion and desertification in Sistan region, Iran: causes, impacts, and management strategies. Journal of Arid Environments, 187, 104414. https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104414

Fereres, E., and Soriano, M.A. 2007. Deficit irrigation for reducing agricultural water use. Journal of Experimental Botany, 58(2), 147–159. https://doi.org/10.1093/jxb/erl165

Ghalibaf, M.B., Gholami, M., and Ahmadi, S.A. 2023. Climate change, food system, and food security in Iran. Journal of Agricultural Science and Technology, 25(1), 1–17.

Glaser, B., Lehmann, J., and Zech, W. 2002. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal – A review. Biology and Fertility of Soils, 35, 219–230.

Hannaway, D., and Shuler, P. 1993. Nitrogen fertilization in alfalfa production. Journal of Production Agriculture, 6, 80–85.

Hsiao, T.C. 1973. Plant responses to water stress. Annual Review of Plant Physiology, 24, 519–570.

IPCC. 2021. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.

Irmak, S., Djaman, K., Rudnick, D.R., and Sharma, V. 2023. Nitrogen–water interactions and their impacts on crop nitrogen use efficiency. Agricultural Water Management, 277, 108109. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.108109

Kang, S., Hao, X., Du, T., Tong, L., Su, X., Lu, H., Li, X., Huo, Z., Li, S., and Ding, R. 2017. Improving agricultural water productivity to ensure food security in China under changing environment: from research to practice. Agricultural Water Management, 179, 5–17. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.05.007

Khan, A., Fahad, S., Khan, A., Saud, S., Hassan, S., Shah, A., and Khan, F. 2020. Nitrogen application improves growth and productivity of maize under water stress conditions. Agronomy Journal, 112(2), 1–12. https://doi.org/10.1002/agj2.20045

Laird, D.A., Fleming, P., Davis, D.D., Horton, R., Wang, B., and Karlen, D.L. 2010. Impact of biochar amendments on the quality of a typical Midwestern

Centeno, A., Basso, B., Ponce, J., and Martínez, L., 2020. Biochar and nitrogen management under different irrigation regimes: Effects on maize yield and nitrogen use efficiency. Agricultural Water Management, 241, 106359. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106359

Chandrasekar, B. R., Ambrose, G.and Jayabalan, N. 2005. Influence of biofertilizers and nitrogen source level on the growth and yield of Echinochloa frumentacea (Roxb) Link. J. Agri. Techno. 1: 223-234.

Chen, X., Liu, L., Yang, Q., Xu, H., Shen, G., and Chen, Q. 2024. Optimizing Biochar Application Rates to Improve Soil Properties and Crop Growth in Saline–Alkali Soil. Sustainability 16, 2523. https://doi.org/10.3390/su16062523

Ciampitti, I.A., and Vyn, T.J., 2012. Physiological perspectives of changes over time in maize yield dependency on nitrogen uptake and associated nitrogen efficiencies: A review. Field Crops Research, 133, 48–67.https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.03.008

Delavarnia, F., Zaefarian, F., Hasanpour, R., and Pirdashti, H. 2021. Evaluating the Effect of Organic Amendment and Growth-Promoting Bacteria in the Phytoremediation Process of Maize (Zea mays L.) under Cadmium Heavy Metal Stress. Journal of Agricultural Science and Sustainable Production, 31(4), 147-162.

El-Eyuoon, A., and Mamdouh, E. 2017. Biochar effects on nitrogen and phosphorus use efficiencies of zucchini plants grown in a calcareous sandy soil. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 17 (4), 912-921.

Fageria, N. K., Baligar, V. C., and Jones, C. A. 2011. Growth and mineral nutrition of field crops (3rd ed.). CRC Press.

Fan, X., Lin, F., and Kumar, D. 2004. Fertilization with a new type of coated urea: evaluation for nitrogen efficiency and yield in winter wheat. Journal of Plant Nutrition, 25, 853–865.

FAO. 2022. The State of Food and Agriculture 2022: Leveraging automation in agriculture for transforming agri-food systems. FAO, Rome.

Farooq, M., Wahid, A., Kobayashi, N., Fujita, D., and Basra, S.M.A. 2009. Plant drought stress: effects, mechanisms and management. Agronomy for Sustainable Development, 29, 185–212.

semiarid climate. Agricultural Water Management, 84, 101–112.

Piri, H., and Sarani, R. 2020. Investigation of economic productivity of crop products in Sistan and Baluchestan Province by water footprint approach. Iranian Journal of Soil and Water Research, 51(5), 1093–1104.

Piri, H., Naserin, A., and Albalasmeh, A. 2022. Interactive effects of deficit irrigation and vermicompost on yield, quality, and irrigation water use efficiency of greenhouse cucumber. Journal of Arid Land, 14(11), 1274–1292. https://doi.org/10.1007/s40333-022-0035-7

Saadat, S., Esmaeelnejad, L., Rezaei, H., and Mirkhani, R. 2024. Monitoring soil salinity of the Sistan plain using field data and remote sensing. Iranian Journal of Soil and Water Research, 55(8), 1297–1309.

Sinclair, T.R., and Rufty, T.W. 2012. Nitrogen and water resources commonly limit crop yield increases, not necessarily plant genetics. Global Food Security, 1(2), 94–98. https://doi.org/10.1016/j.gfs.2012.07.001

Sun, H., Zhang, H., Yu, Q., Wang, Y., and Li, J. 2023. Biochar application reduces nitrogen leaching and improves nitrogen use efficiency under intermittent irrigation. Soil & Tillage Research, 230, 105724. https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105724

Taiz, J.E., Rillig, M.C., and Graber, E.R. 2015. Biochar effects on the abundance, activity and diversity of the soil biota. In: Lehmann, J., and Joseph, S. (eds.), Biochar for Environmental Management, pp. 327–389. Routledge.

Thies, L., Zeiger, E., Møller, I.M., and Murphy, A. 2015. Plant physiology and development (6th ed.). Sinauer Associates.

Van Zwieten, L., Kimber, S., Morris, S., et al. 2010. Effects of biochar on agronomic performance and soil fertility. Plant and Soil, 327, 235–246. https://doi.org/10.1007/s11104-009-0050-x

Wang, L., Leghari, S.J., Wu, J., Wang, N., Pang, M., and Jin, L. 2023. Interactive effects of biochar and chemical fertilizer on water and nitrogen dynamics, soil properties and maize yield under different irrigation methods. Frontiers in Plant Science, 14, 1230023.

Xiao, X., Chen, B., Zhu, L., and Tang, Z. 2022. Biochar amendment impacts soil properties and crop yield: a meta-analysis. Science of the Total Environment, agricultural soil. Geoderma, 158(3–4), 443–449. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.05.013

Lehmann, J., and Joseph, S. 2015. Biochar for environmental management: science, technology and implementation (2nd ed.). Routledge.

Lehmann, J., Rillig, M.C., Thies, J., Masiello, C.A., Hockaday, W.C., and Crowley, D. 2011. Biochar effects on soil biota – A review. Soil Biology and Biochemistry, 43(9), 1812–1836. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.04.022

Liu, F., Savic, S., Jensen, C.R., Shahnazari, A., Jacobsen, S.E., and Andersen, M.N. 2006. Water relations and yield of lysimeter-grown strawberries under limited irrigation. Scientia Horticulturae, 111, 128–132.

Liu, Z., Gao, J., Gao, F., Liu, P., Zhao, B., and Zhang, J. 2019. Photosynthetic characteristics and chloroplast ultrastructure of summer maize response to different nitrogen supplies under drought stress. Photosynthetica, 57(1), 109–121. https://doi.org/10.32615/ps.2019.015

Marschner, P. 2012. Mineral Nutrition of Higher Plants (3rd ed.). Academic Press, London.

Mukherjee, A., Zimmerman, A.R., and Harris, W. 2014. Surface chemistry variations among a series of laboratory-produced biochars. Geoderma, 163, 247–255. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.04.021

Nakayama, H., and Kuroha, T. 2023. Regulation of plant growth and development under drought stress. Plant Physiology and Biochemistry, 197, 107644. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2023.107644

Nesic, Z., Tomic, Z., Krnjaja, V., and Tomasevic, D. 2008. Nitrates in plants and soil after fertilization of grass-legume mixtures. Biotechnology in Animal Husbandry, 24, 95–104.

Nyambura, G.W. 2024. Effects of conservation agriculture on soil physico-chemical properties and soil microbial biomass under a rain-fed maize production system in Laikipia East, Kenya. PhD dissertation, JKUAT-CoANRE.

Paccioretti, P., Puntel, L., Córdoba, M., Mieno, T., Ferguson, R., Luck, J., and Balboa, G. 2025. Site-specific drivers of sensor-based nitrogen management in on-farm corn and wheat experiments. Frontiers in Agronomy, 7, 1651522.

Payero, J.O., Melvin, S.R., Irmak, S., and Tarkalson, D. 2009. Yield response of corn to deficit irrigation in a

Plain, China. Agricultural Water Management, 295, 108786.

Zhang, P., Luo, N., Wang, P., and Huang, S.B. 2022. Grain yield and grain moisture associations with leaf, stem and root characteristics in maize. Journal of Integrative Agriculture, 21(7), 1941–1951.

Zhang, S., Chen, X., Jia, S., Liang, A., and Zhang, X. 2021. Integrated water, nitrogen and biochar management improves crop water productivity under deficit irrigation. Agricultural Water Management, 250, 106856. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106856

Zhang, X., Davidson, E.A., Mauzerall, D.L., Searchinger, T.D., Dumas, P., and Shen, Y. 2019. Managing nitrogen for sustainable development. Nature, 528, 51–59. https://doi.org/10.1038/nature15743

Zou, Y., Saddique, Q., Ali, A., Xu, J., Khan, M.I., Qing, M., and Siddique, K.H. 2021. Deficit irrigation improves maize yield and water use efficiency in a semi-arid environment. Agricultural Water Management, 243, 106483.

807, 150968. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150968

Yan, Y., Sun, M., Zhang, X., Liu, X., and Zhao, J. 2021. Nitrogen regulates leaf photosynthesis and biomass accumulation in maize under water deficit. Field Crops Research, 270, 108211. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108211

Yang, F., Zhang, Q., Li, L., and Wang, R. 2022. Biochar application rate regulates soil physical properties and crop water use efficiency in arid soils. Soil & Tillage Research, 216, 105244. https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105244

Zamora-Re, M.I., Trujillo-Negrellos, E., and Garcia-Tejero, I.F. 2020. Combined effects of nitrogen and irrigation on maize productivity and water use efficiency. Agricultural Water Management, 241, 106367. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106367

Zhang, P., Liu, J., Wang, M., Zhang, H., Yang, N., Ma, J., and Cai, H. 2024. Effects of irrigation and fertilization with biochar on the growth, yield, and water/nitrogen use of maize on the Guanzhong

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No.4, Vol. 20, Oct.-Nov. 2026, p. 567-585

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۴، جلد ۲۰، مهر - آبان ۱۴۰۵، ص. ۵۸۵-۵۶۷

Investigation of the Interactive Effects of Biochar, Nitrogen, and Deficit Irrigation on Yield, Water Productivity, and Nitrogen Use Efficiency of Maize

A. Sarhadi[1], H. Piri[*2], F. Hassanpour[3], M. Keykha[4], A. Motevali[5]
Recived: Dec.27, 2025 Accepted: Jun.13, 2026

Abstract

Maize (Zea mays L.), as one of the strategic crops in arid and semi-arid regions, is highly affected by water resource limitations; therefore, the adoption of sustainable management strategies is essential to maintain its productivity. This study aimed to evaluate the combined effects of biochar, nitrogen, and different levels of deficit irrigation on yield, morphological traits, and water and nitrogen use efficiencies of maize under the conditions of the Sistan Plain. The experiment was conducted as a split-plot arrangement based on a randomized complete block design with three replications. Treatments included irrigation levels (50, 75, and 100% of soil field capacity), nitrogen fertilizer rates (100, 150, and 200 kg ha^{-1}), and biochar application rates (0, 1.25, and 2.5% w/w of soil). At the end of the experiment, stem diameter, plant height, fresh and dry forage yield, fresh and dry ear weight, irrigation water use efficiency, and nitrogen use efficiency were measured. Analysis of variance indicated that the main and interactive effects of irrigation, nitrogen, and biochar on the studied traits were significant at the 1% and 5% probability levels. The highest forage yield, growth traits, and water and nitrogen use efficiencies were obtained under full irrigation combined with 200 kg ha^{-1} nitrogen and 1.25% biochar application, which did not differ significantly from the treatment receiving 150 kg ha^{-1} nitrogen. In contrast, severe deficit irrigation combined with low nitrogen input and no biochar application resulted in the lowest values. Overall, the results demonstrated that biochar application at an optimal rate, along with proper nitrogen management, can substantially mitigate the negative effects of deficit irrigation, enhance resource use efficiency, and serve as an effective and sustainable approach to improving maize yield and increasing water and nitrogen use efficiencies, particularly in water-limited regions such as the Sistan area.

Keywords: Ear Weight, Forage Yield, Plant Height, Stem Diameter

1- Phd student, Department of Water Engineering, Faculty of Water and Soil, University of Zabol, Zabol, Iran.
2 Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Water and Soil, University of Zabol, Zabol, Iran
3 - Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Water and Soil, University of Zabol, Zabol, Iran
4 - Assistant Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Water and Soil, University of Zabol, Zabol, Iran
5 - Associate Professor, Department of Biosystems Mechanical Engineering, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Sari, Iran
(*- Corresponding Author Email: H_piri2880@uoz.ac.ir)