نشریه پژوهش های کاربردی زراعی
دوره۳۷- شماره ۳- پیاپند ۱۴۴ پائیز ۱۴۰۳

بررسی تأثیر تنش کمبود آب و مدیریت تلفیقی کود بر کیفیت علوفه و پروتئین خام در کشت مخلوط ذرت و آفتابگردان

Investigating the Effect of Water Deficit Stress and Integrated Fertilizer Management on Forage Quality and Crude Protein in Maize-Sunflower Intercropping

شیوا زارعی چالشتری[۱،۳] ، مجتبی علوی فاضل[۲*] ، مانی مجدم [۱]، طیب ساکی نژاد [۱]، سید کیوان مرعشی[۱]

۱. گروه زراعت، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران
۲. گروه زراعت، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران (نگارنده مسئول)
۳. گروه زراعت، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۵/۲۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۷/۱۴ - شناسانهٔ برنمود رقمی: 10.22092/aj.2026.373918.1730

چکیده

زارعی چالشتری، ش.، علوی فاضل، م.، مجدم، م.، ساکی نژاد، ط.، مرعشی، س.ک.، . بررسی تأثیر تنش کمبود آب و مدیریت تلفیقی کود بر کیفیت علوفه و پروتئین خام در کشت مخلوط ذرت و آفتابگردان
نشریه پژوهش های کاربردی زراعی دوره ۳۷ - شماره ۳- پیاپند ۱۴۴ پائیز ۱۴۰۳ صفحه: ۱۱۵-۹۴

این پژوهش با هدف بررسی تأثیر تنش کمبود آب و مدیریت تلفیقی کود بر کیفیت علوفه و پروتئین خام در کشت مخلوط ذرت و آفتابگردان، طی دو سال زراعی در شهرستان ماهشهر (استان خوزستان) به‌صورت کرت‌های دوبار خردشده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد. فاکتورها شامل سه سطح آبیاری (تخلیه ۵۰، ۶۵ و ۸۰ درصد رطوبت قابل استفاده)، سه تیمار کودی (شیمیایی، آلی-زیستی و تلفیقی) و پنج الگوی کشت مخلوط (کشت خالص ذرت، کشت خالص آفتابگردان و نسبت‌های ۵۰:۵۰، ۷۵:۲۵ و ۲۵:۷۵) بودند. نتایج نشان داد که افزایش شدت تنش کمبود آب، اگرچه باعث افزایش معنی‌دار پروتئین دانه ذرت (تا ۱۳ درصد) و پروتئین بیوماس آفتابگردان (تا ۲/۵۵ درصد) شد، اما با افزایش فیبر شوینده اسیدی (ADF) و فیبر شوینده خنثی (NDF) و کاهش کل مواد جامد محلول (TSS)، شاخص‌های قابلیت هضم علوفه را کاهش داد. در بین تیمارهای کودی، کاربرد تلفیقی بیشترین تأثیر را بر بهبود کیفیت علوفه در تمام سطوح تنش داشت و الگوی کشت ۷۵ درصد ذرت + ۲۵ درصد آفتابگردان به‌عنوان بهترین ترکیب اختلاط از نظر کاهش فیبرهای نامحلول و افزایش مواد مغذی شناخته شد. به‌طورکلی، نتایج این پژوهش نشان داد که مدیریت تلفیقی کود همراه با الگوی کشت مخلوط مناسب، ضمن تعدیل اثرات مخرب تنش کمبود آب، می‌تواند کیفیت تغذیه‌ای علوفه را بهبود بخشد و به‌عنوان راهبرد عملی برای تولید علوفه باکیفیت در مناطق با محدودیت منابع آبی قابل توصیه است.

واژه های کلیدی: تنش کمبود آب، کشت مخلوط، مدیریت تلفیقی کود، کیفیت علوفه، پروتئین خام.

آدرس پست الکترونیکی نگارنده مسئول: mojtaba.alavifazel@iau.ac.ir

مقدمه

ذرت و آفتابگردان از جمله گیاهان مهم زراعی هستند که در تغذیه انسان و دام نقش اساسی دارند. ذرت به دلیل عملکرد بالا و ارزش انرژی مناسب، به عنوان یک منبع علوفه مهم در بسیاری از کشورها محسوب می‌شود. با این حال، محدودیت اصلی علوفه ذرت برای خوراک دام، غلظت پایین پروتئین خام آن است (Ali *et al.*, 2023). از این رو، کشت مخلوط ذرت با گیاهانی نظیر آفتابگردان که از میزان پروتئین بالاتری برخوردار هستند، می‌تواند این محدودیت را برطرف سازد.آفتابگردان نیز به عنوان یکی از مهم‌ترین دانه‌های روغنی جهان، علاوه بر تولید روغن با کیفیت بالا، به عنوان یک گیاه علوفه‌ای با ارزش غذایی مناسب مطرح است.امروزه امنیت غذایی با دو چالش اساسی یعنی کمبود منابع آبی و تخریب محیط‌زیست ناشی از مصرف بی‌رویه نهاده‌های شیمیایی مواجه است. انتقال از نظام‌های تولید متعارف به سمت کشاورزی پایدار، یک ضرورت انکارناپذیر محسوب می‌شود.کشاورزی پایدار به مدیریت صحیح منابع کشاورزی اطلاق می‌شود که ضمن تأمین نیازهای غذایی، کیفیت محیط زیست و ظرفیت منابع آب و خاک را نیز حفظ می‌کند (Rao, 2026). یکی از راهکارهای کلیدی در این راستا، افزایش تنوع زیستی در محیط‌های کشاورزی از طریق کشت مخلوط است. کشت مخلوط به عنوان کشت همزمان دو یا چند گونه گیاهی در یک قطعه زمین، نقش مهمی در توسعه سیستم‌های تولید پایدار ایفا می‌کند (Joshi *et al.*, 2026). مطالعات نشان داده‌اند که سیستم‌های کشت مخلوط در مقایسه با تک‌کشتی، استفاده بالاتری از منابع داشته و می‌توانند بهره‌وری مصرف آب و زمین را افزایش دهند (Liu*et al.*, 2025). همچنین، ترکیب کشت مخلوط با مدیریت تلفیقی تغذیه ضمن کاهش وابستگی به کودهای شیمیایی،کیفیت علوفه را بطور چشمگیری بهبود میبخشد (Rao*et al.*, 2026).

کیفیت علوفه بعنوان یکی ازمهمترین معیارهای ارزیابی ارزش غذایی برای دام، تحت تأثیرعوامل متعددی ازجمله تنش‌های محیطی، مدیریت تغذیه و الگوی کشت قرارمی‌گیرد. تنش کمبودآب بعنوان یکی از مهمترین عوامل محدودکننده تولیدگیاهان زراعی، تأثیر قابل توجهی برکیفیت علوفه دارد. درشرایط تنش کمبود آب،گیاهان باکاهش فتوسنتز، اختلال در متابولیسم نیتروژن وتغییر در ترکیب شیمیایی بافت‌های خود مواجه می‌شوند که می‌تواند منجر به افزایش درصد فیبر،کاهش پروتئین خام و کاهش قابلیت هضم علوفه گردد (Rad *et al.*, 2021; Zi *et al.*, 2022). همچنین، تنش کمبودآب باعث افزایش درصد فیبر شوینده خنثی (NDF) وفیبرشوینده اسیدی (ADF) درعلوفه می‌شودکه این امر باکاهش قابلیت هضم ومصرف ماده خشک توسط دام همراه است (Lashkari *et al.*, 2022).

مدیریت صحیح تغذیه گیاهی نقش کلیدی در بهبود کیفیت علوفه و کاهش اثرات منفی تنش کمبود آب ایفا می‌کند. استفاده تلفیقی از کودهای شیمیایی، آلی و زیستی می‌تواند ضمن کاهش اثرات منفی تنش، باعث افزایش کارایی مصرف عناصر غذایی و بهبود کیفیت محصول شود. در این راستا، تحقیقات متعددی

در زمینه اثرات مدیریت تلفیقی کود بر کیفیت علوفه انجام شده است. در مطالعه‌ای مشخص شد که در شرایط تنش خشکی ملایم و شدید، تیمار تلفیقی ۵۰ درصد نیتروژن + ۵۰ درصد کمپوست بقایای نیشکر، بیشترین عملکرد علوفه خشک بدست آمده است. همچنین محتوای کلروفیل، آب نسبی برگ و پایداری غشای سلول در این تیمار نسبت به تیمارهای کاملاً شیمیایی یا آلی برتر بود(Pourjamshid *et al.*, 2026). در پژوهش دیگری به منظور بررسی تأثیر کاربرد تلفیقی کودهای زیستی با کودهای شیمیایی نیتروژنه و ریزمغذی آهن بر روی ذرت علوفه‌ای رقم MV500، مشخص شد که کاربرد تلفیقی کود زیستی سوپرنیتروپلاس همراه با ۳۰۰ کیلوگرم در هکتار اوره و کود آهن، بیشترین درصد پروتئین خام و خاکستر علوفه را به همراه داشت و در مقابل کمترین میزان الیاف نامحلول در شوینده خنثی (NDF) و اسیدی (ADF) در همین تیمار مشاهده شد (Mohammadi *et al.*, 2020). همچنین در مطالعه‌ای بر روی گیاه مرتعی فسکیوی بلند (Tall fescue) که یکی از گونه‌های مهم علوفه‌ای در مناطق معتدل محسوب می‌شود، تأثیر مدیریت تلفیقی تغذیه با استفاده از محرک‌های زیستی در دو بافت خاک مختلف (سبک و سنگین) و تحت شرایط تنش خشکی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که کاربرد محرک‌های زیستی در سیستم تغذیه تلفیقی، از طریق تحریک رشد ریشه و افزایش دسترسی گیاه به عناصر غذایی، توانست تحمل به خشکی را افزایش داده و روند بازیابی گیاه پس از رفع تنش را بهبود بخشد. همچنین این پژوهش تأکید کرد که کارایی این راهکارها به شدت به نوع بافت خاک و میزان کود مصرفی وابسته است؛ به گونه‌ای که در خاک‌های سنگین، استفاده از محرک‌های زیستی همراه با سطوح بالاتر کود، تأثیر بیشتری بر افزایش جمعیت میکروبی خاک و در نتیجه بهبود شرایط تغذیه‌ای گیاه داشت(Igwenagu *et al.*, 2025).

بررسی‌ها نشان داده است که کشت مخلوط ذرت با گیاهان خانواده لگومینوز یا سایر گیاهان پروتئینی، می‌تواند محدودیت پروتئین پایین علوفه ذرت را برطرف سازد. در مطالعه‌ای بر روی کشت مخلوط ذرت با لگوم‌های مختلف (ماشک گل خوشه‌ای، شبدر، اسپرس و خلر) همراه با کاربرد کود زیستی نیتروکسین، بیشترین میزان پروتئین خام در کشت خالص ماشک وکمترین میزان آن در کشت خالص ذرت بدون تلقیح مشاهده شد. همچنین بیشترین مقادیر ماده خشک قابل هضم (DDM)، ارزش نسبی تغذیه‌ای (RFV) وانرژی ویژه شیردهی (NEL) درتیمارکشت مخلوط ذرت تلقیح شده با نیتروکسین + ماشک بدست آمد(Javanmard *et al.*, 2018). نتایج مطالعه‌ای دیگر نشان دادکشت مخلوط ذرت با آفتابگردان باعث افزایش معنی‌دار پروتئین خام سیلاژ شد؛ بطوری‌که پروتئین خام سیلاژ ذرت خالص (۸۱ گرم در کیلوگرم ماده خشک) درکشت مخلوط ذرت-آفتابگردان به ۱۳۷ گرم درکیلوگرم ماده خشک افزایش یافت. این مطالعه نشان داد کشت مخلوط ذرت با آفتابگردان، ضمن افزایش پروتئین خام، قابلیت هضم نیتروژن را بهبود می‌بخشد و می‌تواند نیاز به مکمل‌های پروتئینی خریداری شده را کاهش دهد(Anil *et*

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک (۳۰-۰ سانتی متر)

Table 1. physical and chemical properties of the experimental soil (0-30 cm layer)

pH	هدایت الکتریکی EC (ds/m)	کربن آلی OC (%)	نیتروژن کل Total N (%)	فسفر P (mg/kg)	پتاسیم K (mg/kg)	بافت خاک Soil texture
7.75	0.82	1.03	0.1	10	280	Clay loam

.(*al.*, 2000

با توجه به مطالب فوق و با در نظرگرفتن نقش ذرت وآفتابگردان درتأمین خوراک دام وکمبود پروتئین درعلوفه ذرت، این پژوهش با هدف ارزیابی تأثیرسطوح مختلف تنش کمبودآب ومدیریت تلفیقی کود برشاخص‌های کیفی علوفه درکشت مخلوط این دوگیاه انجام شد.

مواد و روش‌ها

به منظور بررسی تأثیر تنش کم آبی و مدیریت تلفیقی کود بر کیفیت و پروتئین خام علوفه در کشت مخلوط ذرت و آفتابگردان، آزمایشی طی دو سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۲و ۱۴۰۲-۱۴۰۳ در یک مزرعه شخصی واقع در شهرستان ماهشهر، استان خوزستان به اجرا درآمد.

موقعیت جغرافیایی و اقلیمی منطقه

این منطقه در طول جغرافیایی ۴۹ درجه و ۱۲ دقیقه شرقی، عرض جغرافیایی ۳۰ درجه و ۳۳ دقیقه شمالی و ارتفاع ۳ متر از سطح دریا واقع شده است. متوسط بارندگی سالیانه منطقه ۱۸۹ میلی‌متر و دمای متوسط سالیانه ۲۶ درجه سانتی‌گراد است. بر اساس ضرایب دمارتن و آمبرژه، اقلیم منطقه گرم و مرطوب می‌باشد.

قبل از شروع آزمایش، جهت تعیین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه، از عمق ۰-۳۰ سانتی‌متر خاک نمونه‌برداری انجام شد. نتایج تجزیه خاک در جدول ۱ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که نتایج این جدول صرفاً به منظور مشخص کردن خصوصیات خاک قبل از آزمایش بوده و مصرف کودها بر اساس تیمارهای کودی مورد آزمایش (شیمیایی، آلی-زیستی و تلفیقی) و مطابق با توصیه‌های آزمایشگاه خاک انجام شده است.

آزمایش به صورت کرت‌های دوبار خرد شده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار به اجرا درآمد. در این طرح، کرت‌های اصلی به رژیم‌های مختلف آبیاری اختصاص یافتند که شامل سه سطح آبیاری پس از تخلیه ۵۰، ۶۵ و ۸۰ درصد رطوبت قابل استفاده (به ترتیب I1، I2 و I3) بودند. کرت‌های فرعی شامل سه نوع مدیریت تغذیه شامل: تماما مصرف کود شیمیایی (F1) شامل ۳۵۰ کیلوگرم اوره، ۱۵۰ کیلوگرم سوپرفسفات تریپل و ۲۰۰ کیلوگرم سولفات پتاسیم در هکتار، تیمار F2 کاربرد کود آلی - زیستی شامل کمپوست بعنوان کود آلی به‌همراه کودهای زیستی سوپرنیتروپلاس، پتابارور-۲ و هیومیکسین (اسید هیومیک) و تیمار F3 به عنوان مدیریت تلفیقی کود شیمیایی وآلی - زیستی شامل تمام موارد در تیمار F2 به‌همراه ۲۰۰ کیلوگرم اوره در هکتار به‌صورت سرک بود. کرت‌های فرعی فرعی نیز به پنج نسبت اختلاط کشت مخلوط ذرت وآفتابگردان به روش جایگزینی اختصاص یافتند که شامل کشت خالص ذرت (P1)، کشت خالص آفتابگردان (P2)، نسبت‌های مساوی ۵۰:۵۰ (P3، ۷۵ درصد ذرت همراه با ۲۵ درصدآفتابگردان

(P4) و ۲۵درصد ذرت همراه با ۷۵ درصد آفتابگردان (P5) بودند.درتیمارهای کودآلی (F2) وتلفیقی (F3)،کمپوست به میزان ۳۰تن درهکتار بر اساس توصیه‌های آزمون خاک وهمزمان باآماده‌سازی زمین، قبل ازکاشت به خاک اضافه وبادیسک مخلوط گردید. کودزیستی سوپرنیتروپلاس(حاوی باکتری‌های تثبیت‌کننده نیتروژن و محرک رشد) و کود زیستی پتابارور-۲ (حاوی باکتری‌های حل‌کننده پتاسیم) به‌صورت بذرمال هنگام کاشت مصرف شد. همچنین هیومیکسین (اسید هیومیک) به عنوان محرک زیستی، ۴۰ تا ۵۰ روز بعد از کاشت، به‌صورت محلول‌پاشی برگی استفاده گردید. ضمنا در تیمار تلفیقی(F3) علاوه بر موارد فوق، ۲۰۰ کیلوگرم اوره در هکتار به‌صورت سرک نیز به گیاهان داده شد.

عملیات خاک‌ورزی در تیرماه هر سال با شخم عمیق به وسیله گاوآهن برگردان‌دار و دو بار دیسک عمود بر هم آغاز گردید. پس از مصرف کودهای پایه بر اساس نتایج آزمون خاک، یک دیسک سبک جهت مخلوط شدن کود با خاک انجام شد و سپس عملیات فاروبندی انجام گرفت. هر کرت آزمایشی به طول پنج متر و شامل شش ردیف کاشت با فاصله ۷۵ سانتی‌متر بود. الگوی کاشت به این صورت بود که در تیمارهای P1 و P2 تمامی شش ردیف به ترتیب به کشت ذرت و آفتابگردان اختصاص یافت. در تیمار P3 سه ردیف ذرت و سه ردیف آفتابگردان به صورت یک در میان کشت شدند. تیمار P4 شامل یک ردیف ذرت و سه ردیف آفتابگردان بود که دو ردیف حاشیه‌ای در طرفین در نظر گرفته شد. در تیمار P5 نیز سه ردیف ذرت و یک ردیف آفتابگردان کشت گردید. تراکم بوته‌ها به ترتیب ۹ بوته در متر مربع برای ذرت و ۱۳ بوته در متر مربع برای آفتابگردان تعیین شد که با فواصل ۱۵ و ۱۰سانتی‌متر روی ردیف به دست آمد. کاشت به صورت کپه‌ای با چهار بذر در هر کپه در اوایل مرداد ماه انجام شد و پس از استقرار گیاهچه‌ها در مرحله دو تا سه برگی، تنک‌سازی صورت گرفت تا یک بوته در هر کپه باقی بماند. فاصله بین کرت‌های اصلی، فرعی و فرعی فرعی به ترتیب ۴، ۲ و ۱ خط نکاشت در نظر گرفته شد. بذرهای مورد استفاده شامل هیبرید ۷۰۴ ذرت و رقم اصلاح شده قاسم آفتابگردان بودند. مدیریت مزرعه شامل کنترل شیمیایی و دستی علف‌های هرز و مبارزه به موقع با آفات و بیماری‌ها بر اساس اصول کشاورزی پایدار انجام شد.

برای تعیین زمان آبیاری و اعمال سطوح تنش، منحنی پتانسیل رطوبتی خاک با دستگاه صفحه فشاری در مکش‌های ۰/۱ تا ۱۵ بار ترسیم شد. نمونه‌های خاک پس از اشباع، در مکش‌های مشخص تعادل یافتند و رطوبت وزنی آنها به روش وزنی اندازه‌گیری شد. بر این اساس، ظرفیت زراعی در مکش ۰/۳۳- بار معادل ۲۴/۱۷ درصد و نقطه پژمردگی دائم در مکش ۱۵- بار معادل ۱۵/۸۲ درصد رطوبت وزنی تعیین گردید. سپس آب قابل استفاده از تفاضل ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دائم محاسبه شد و سه سطح آبیاری بر اساس تخلیه ۵۰، ۶۵ و ۸۰ درصد آب قابل استفاده (به‌ترتیب I1، I2 و I3) تعیین گردید. اندازه‌گیری رطوبت خاک جهت انجام آبیاری با روش وزنی و نمونه‌برداری از عمق ۳۰ سانتی‌متری انجام شد.

سپس نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در آون با دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند تا وزن خشک ثابت به دست آید. رطوبت وزنی به کمک رابطه زیر محاسبه گردید:

$$\theta_g = \frac{W_w - W_d}{W_d} \times 100$$

که در آن: $W_w W_w$: وزن خاک مرطوب، W_d: وزن خاک خشک شده در آون و $\theta_g \theta_g$: رطوبت وزنی خاک (درصد).

تا مرحله شش‌برگی (مرحله استقرار گیاهچه‌ها)، آبیاری‌ها در همه تیمارها بر اساس تخلیه ۵۰ درصد رطوبت قابل استفاده خاک انجام شد و از این مرحله به بعد، تیمارهای آبیاری (I1، I2 و I3) دقیقاً اعمال گردید. برای اندازه‌گیری نیتروژن و پروتئین، نمونه‌برداری از هردوگیاه در مراحل فیزیولوژیکی مناسب انجام شد. در ذرت، نمونه‌برداری در مرحله شیری-خمیری (۹۵ تا ۱۰۰ روز پس از کاشت) و در آفتابگردان، در مرحله رسیدگی کامل انجام گردید. در هر دو گیاه، کل اندام هوایی (شامل ساقه، برگ و بلال/طبق) از نیمه بالایی هر کرت به طول ۱/۵ متر برداشت شد. نمونه‌ها ابتدا خرد شد و سپس در آون با دمای ۷۲ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت قرار داده شد تا خشک شوند. پس از حشک شدن نمونه آسیاب شدند. درصد نیتروژن کل نمونه‌ها (نیتروژن بیوماس کل) با استفاده از دستگاه کجلدال به روش استاندارد AOAC اندازه‌گیری شد (Horwitz, 2000). پروتئین دانه ذرت از ضرب درصد نیتروژن دانه در ۵/۶۵ و پروتئین بیوماس آفتابگردان از ضرب درصد نیتروژن کل بیوماس در ۶/۲۵ محاسبه گردید. ضریب ۵/۶۵ برای ذرت بر اساس محتوای نیتروژن بالاتر پروتئین زئین (حدود ۱۷/۷ درصد) و ضریب ۶/۲۵ برای آفتابگردان بر اساس میانگین محتوای نیتروژن پروتئین‌های گیاهی (حدود ۱۶ درصد) تعیین شده است (Horwitz, 2000; Walton, 1990). برای تعیین درصد فیبر، نمونه‌ها با استفاده از روش فیبر آکید و فیبر نوترال شستشو داده شدند (Horwitz, 2000) و درصد خاکستر نمونه‌ها نیز از طریق سوزاندن در کوره با دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد تعیین گردید(Horwitz, 2000).مقادیر ADF (فیبر شوینده اسیدی) و NDF (فیبر شوینده خنثی) به ترتیب با استفاده از روش شستشوی اسیدی و خنثی اندازه‌گیری شدند(Van Soest, 1994). میزان قند دانه و قند بیوماس با استفاده از روش فنل- سولفوریک اسید (Dubois et al., 1956) و با کمک دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۴۹۰ نانومتر اندازه‌گیری شد و درصد ماده آلی از تفاضل ۱۰۰ و درصد خاکستر محاسبه شد. در نهایت، کل مواد جامد محلول (TSS) با استفاده از دستگاه رفراکتومتر اندازه‌گیری شد (Horwitz, 2000). پس ازجمع‌آوری داده‌ها، نرمال بودن وهمگنی واریانس‌ها باآزمون بارتلت تأیید شدوتجزیه مرکب داده‌ها انجام شد.تجزیه واریانس با نرم‌افزار SAS نسخه ۹/۴ انجام شد. مقایسه میانگین تیمارها نیز با آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطوح احتمال ۵ درصد انجام شد.

نتایج و بحث

پروتئین دانه ذرت

نتایج تجزیه واریانس نشان دادپروتئین دانه ذرت تحت تأثیر اثرات سال (Y) در سطح پنج درصد، رژیم آبیاری (I)، مدیریت تلفیقی کود (F) و کشت مخلوط (P) در سطح یک درصد

جدول ۲- تجزیه واریانس مرکب اثر کشت مخلوط ذرت- آفتابگردان تحت تنش کمبود آب و مدیریت تلفیقی کود بر صفات کیفی علوفه سال های پژوهش (۱۴۰۳-۱۴۰۱)

Table 2. Combined analysis of variance (mean squares) for the effect of maize-sunflower intercropping under water deficit stress and integrated fertilizer management on forage quality traits during the research years (2022–2024)

منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی df	پروتئین دانه ذرت Maize grain protein	پروتئین بیوماس آفتابگردان Sunflower biomass protein	نیتروژن بیوماس کل Total biomass nitrogen	فیبر Fiber	خاکستر Ash	فیبر شوینده اسیدی ADF	فیبر شوینده خنثی NDF	قند دانه Grain sugar	قند بیوماس Biomass sugar	ماده آلی Organic matter	کل مواد جامد محلول TSS
سال(Y)	1	3.02*	0.18**	0.957**	14.9**	7.96 ns	0.49 ns	1.71 ns	0.0028 ns	0.0061 ns	324.44**	654.2 ns
تکرار × سال(Rep × Y)	4	0.22	0.003	0.002	0.17	1.92	8.36	14.95	0.0014	0.0014	10.1	251.29
رژیم آبیاری(I)	2	372.62**	3.192**	0.903**	731.31**	192.89**	136.5*	202.78**	0.2649**	0.2825**	121.26*	63496.72**
I × Y	2	0.88*	0.006 ns	0.005 ns	1.56 ns	0.49 ns	3.03 ns	2.99 ns	0.0005 ns	0.0049 ns	3.24 ns	110.36 ns
خطای اصلی(Error a)	8	0.17	0.02	0.002	4.96	0.73	8.92	12.84	0.0015	0.0013	54.55	341.25
مدیریت تلفیقی کود(F)	2	37.03**	0.221 ns	0.375**	192.86**	20.21**	50.95**	119.92**	0.0243*	0.0493*	19.91*	5804.93*
I × F	4	2.84*	0.246**	0.013 ns	13.35**	0.79**	7.13*	16.22 ns	0.0006 ns	0.0005 ns	1.07 ns	148.2 ns
F × Y	2	0.11 ns	0.033*	0.007 ns	0.52 ns	0.12 ns	0.09 ns	1.01 ns	0.001 ns	0.0002 ns	0.39 ns	228.28 ns
I×F×Y	4	0.41 ns	0.012 ns	0.004 ns	0.52 ns	0.04 ns	0.83 ns	0.05 ns	0.0004 ns	0.0003 ns	0.93 ns	94.65 ns
خطای فرعی(Error b)	24	0.55	0.013	0.004	1.35	0.22	3.55	5.08	0.0005	0.0004	0.81	115.58
کشت مخلوط(P)	4	24.97**	4.69**	0.889**	1273.6**	44.57**	2348.29**	511.07**	0.1427**	0.089**	768.95**	34235.7**
I×P	8	3.35**	0.303**	0.031 ns	34.11**	2.45**	39.91**	40.33**	0.0312**	0.0018*	3.41*	7461.1**
F×P	8	0.57**	0.05 ns	0.003 ns	1.61 ns	0.17**	2.88*	3.71 ns	0.0006**	0.0008*	2.94 ns	152.98**
I×F×P	16	0.25 ns	0.093**	0.004 ns	5.02**	0.35**	2.23**	1.81 ns	0.0003 ns	0.0002 ns	1.08 ns	59.95*
P×Y	4	1.14*	0.015 ns	0.011 ns	1.33 ns	0.58 ns	0.57 ns	1.1 ns	0.0003 ns	0.0007 ns	0.83 ns	67.01 ns
I×P×Y	8	0.19 ns	0.008 ns	0.009 ns	0.92 ns	0.31 ns	0.61 ns	1.07 ns	0.0002 ns	0.0005 ns	0.77 ns	38.65 ns
F×P×Y	8	0.07 ns	0.026**	0.003 ns	1.08 ns	0.04 ns	0.79 ns	1.3 ns	0.0001 ns	0.0001 ns	0.21 ns	22.53 ns
I×F×P×Y	16	0.23 ns	0.013 ns	0.002 ns	0.89 ns	0.05 ns	0.31 ns	1.0 ns	0.0001 ns	0.0001 ns	0.72 ns	26.61 ns
خطای کل(Error)	144	0.42	0.009	0.006	1.39	0.94	2.32	4.27	0.0007	0.0004	0.86	169.84
CV (%)	-	6.5	5.4	7.4	0.75	7.8	4.5	7.7	15.4	6.0	3.2	15.3

ns، * و ** به ترتیب بیانگر تفاوت غیر معنی دار و معنی دار در سطح پنج و یک درصد می باشد.

ns, *, **: Non-significant and significant at 5% and 1% levels, respectively.

.کشت مخلوط :P ؛ مدیریت تلفیقی کود :F ؛ رژیم آبیاری :I ؛ سال :Y ؛ (Total Soluble Solids) کل مواد جامد محلول :TSS ؛ (Neutral Detergent Fiber) فیبر شوینده خنثی :NDF ؛ (Acid Detergent Fiber) فیبر شوینده اسیدی :ADF

جدول ۳- مقایسه میانگین اثر متقابل رژیم آبیاری و مدیریت تلفیقی کود بر پروتئین دانه ذرت سال های پژوهش (۱۴۰۳-۱۴۰۱)

Table 3. Mean comparison of irrigation × integrated fertilizer management interaction for maize grain protein during the research years (2022–2024)

سطوح آبیاری Irrigation levels	سطوح کودی Fertilizer levels	پروتئین دانه ذرت Maize grain protein (%)
I1	F1	7.9 d
I1	F2	7.2 d
I1	F3	8.0 d
I2	F1	10.2 b
I2	F2	9.2 c
I2	F3	10.4 b
I3	F1	12.7 a
I3	F2	11.0 b
I3	F3	13.0 a

در هر ستون، میانگین های دارای حرف مشابه اختلاف معنی داری ندارند (دانکن، ٪۵).

Within each column, means with the same letter are not significantly different (Duncan, 5%).

I: رژیم آبیاری ؛F: مدیریت تلفیقی کود.

جدول ۴- مقایسه میانگین اثر متقابل مدیریت تلفیقی کود و الگوی کشت بر پروتئین دانه ذرت، قند دانه و قند بیوماس سال های پژوهش (۱۴۰۳-۱۴۰۱)

Table 4. Mean comparison of integrated fertilizer management × intercropping pattern interaction for maize grain protein, grain sugar, and biomass sugar during the research years (2022–2024)

سطوح کودی Fertilizer levels	کشت مخلوط Intercropping	پروتئین دانه ذرت (درصد) Maize grain protein (%)	قند دانه (درصد) Grain sugar (%)	قند بیوماس (درصد) Biomass sugar (%)
F1	P1	11.00 a	0.192 d	0.347 c-g
F1	P2	-	0.117 ij	0.271 pqr
F1	P3	10.38 bc	0.188 de	0.358 c-f
F1	P4	10.28 c	0.239 b	0.433 ab
F1	P5	9.38 de	0.124 hi	0.284 opq
F2	P1	9.12 ef	0.176 f	0.337 f-j
F2	P2	-	0.104 k	0.253 stu
F2	P3	9.12 ef	0.181 ef	0.341 e-h
F2	P4	9.30 def	0.217 c	0.382 cde
F2	P5	8.43 g	0.116 j	0.256 rst
F3	P1	10.65 ab	0.215 c	0.374 c-f
F3	P2	-	0.127 h	0.276 pqr
F3	P3	10.46 bc	0.222 c	0.392 bcd
F3	P4	10.65 ab	0.255 a	0.450 a
F3	P5	9.36 de	0.138 g	0.303 l-p

در هر ستون، میانگین های دارای حرف مشابه اختلاف معنی داری ندارند (دانکن، ٪۵).

Within each column, means with the same letter are not significantly different (Duncan, 5%).

F: مدیریت تلفیقی کود ؛ P: کشت مخلوط.

و اثرات متقابل I×F در سطح پنج درصد، I×P و F×P در سطح یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). براساس نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل I×F (جدول ۳). بالاترین درصد پروتئین دانه ذرت در تیمارهای I3F1 (7/12 درصد)و I3F3 (13 درصد) بدست آمدکه با افزایش شدت تنش کمبودآب، درصد پروتئین دانه بطور معنی‌داری افزایش یافت.کمترین میزان پروتئین دانه در تیمارهای I1F1 (9/7 درصد)، I1F2 (2/7 درصد) و I1F3 (8 درصد) مشاهده شد که اختلاف معنی‌داری با یکدیگر نداشتند (جدول ۳)، همچنین بر اساس نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل F×P (جدول ۴)، بیشترین درصد پروتئین دانه ذرت در تیمار F1P1 (11 درصد) و F3P1 (65/10 درصد)و F3P4 (65/10 درصد)حاصل گردید که از نظر

آماری در گروه برتر قرار گرفتند. تیمار F3P3 (46/10درصد) و F1P3 (38/10 درصد) در گروه بعدی قرار داشته و اختلاف معنی‌داری با یکدیگر نداشتند. کمترین میزان پروتئین دانه ذرت در تیمار F2P5 (43/8 درصد) مشاهده شد که بطور معنی‌داری پایین‌تر ازسایر تیمارها بود (جدول ۴). دلیل افزایش پروتئین درشرایط تنش کمبود آب،کاهش عملکرد دانه و بیوماس و درنتیجه تجمع نسبی نیتروژن در بافت‌های گیاهی است(Lashkari et al., 2022). همچنین کاربردکودهای شیمیایی وتلفیقی باتأمین بهتر نیتروژن، سنتز پروتئین را افزایش داده است. این نتایج با یافته‌های پژوهش‌های پیشین هم‌راستاست (Eskandari, 2012; Geren et al., 2008). Schittenhelm (2010) در مطالعه‌ای بر روی کشت مخلوط ذرت وآفتابگردان نشان داد که در شرایط تنش کمبود آب، آفتابگردان سهم بیشتری از ماده خشک کل را به خود اختصاص می‌دهد که می‌تواند به افزایش پروتئین کل علوفه منجر شود.

پروتئین بیوماس آفتابگردان

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که پروتئین بیوماس آفتابگردان تحت تأثیر اثرات سال (Y)، رژیم آبیاری (I) کشت مخلوط (P) و اثرات متقابل I×F، I×P، I×F×P و F×P×Y در سطح یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). بر اساس نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل I×F×P، بیشترین میزان پروتئین بیوماس آفتابگردان در تیمارهای (۵۵ I3F1P3/۲ درصد) و (۴۵ I3F3P3/۲ درصد) مشاهده شد (جدول ۵). همچنین در شرایط تنش شدید (I3)، تیمارهای (۱۱ I3F1P5/۲ درصد) و (۷۹ I3F1P2/۱درصد) نیز دارای مقادیر بالایی از پروتئین بیوماس بودند. در این تحقیق، تنش کمبود آب منجر به افزایش معنی‌دار پروتئین بیوماس آفتابگردان گردید و این افزایش در سطح سوم تنش رطوبتی (I3) شدیدتر بود. در شرایط تنش شدید، الگوی کشت مخلوط ۵۰ درصد ذرت + ۵۰درصد آفتابگردان (P3) به همراه تیمارهای کودی F1 و F3، بالاترین میزان پروتئین بیوماس را به خود اختصاص دادند. همچنین در سطوح مختلف تنش و الگوی کشت، تأثیر استفاده از کود شیمیایی (F1) و کاربرد تلفیقی کود شیمیایی و آلی-زیستی (F3) بر میزان پروتئین بیوماس به‌طور معنی‌داری بالاتر از کاربرد آلی-زیستی (F2) بود. افزایش پروتئین بیوماس در شرایط تنش کمبود آب به دلیل کاهش تولید ماده خشک و تجمع نسبی نیتروژن در بافت‌های گیاهی است. همچنین، کاربرد کودهای شیمیایی و تلفیقی با تأمین بهتر نیتروژن، باعث افزایش سنتز پروتئین در گیاه شده است. این نتایج با یافته‌های مطالعه دانشگاه ردینگ که نشان داد کشت مخلوط ذرت با آفتابگردان باعث افزایش معنی‌دار پروتئین خام سیلاژ از ۸۱ به ۱۳۷ گرم در کیلوگرم ماده خشک می‌شود، هم‌راستا است (Anil *et al.*, 2000). همچنین در پژوهش دیگری نشان داده شده است که کشت مخلوط ذرت با گیاهان پروتئینی می‌تواند محدودیت پروتئین پایین علوفه ذرت را برطرف سازد (Javanmard *et al.*, 2018). درمجموع، این پژوهش نشان می‌دهدکه مدیریت تلفیقی کود و انتخاب الگوی کشت مخلوط مناسب، به‌ویژه (۵۰ P3٪ ذرت + ۵۰٪ آفتابگردان) در شرایط تنش شدید، می‌تواند به افزایش معنی‌دار پروتئین بیوماس آفتابگردان

جدول ۵- مقایسه میانگین اثر متقابل سه گانه تنش کمبود آب، مدیریت تلفیقی کود و کشت مخلوط بر صفات کیفی علوفه سال‌های پژوهش (۱۴۰۳-۱۴۰۱)

Table 5. Mean comparison of the three-way interaction of water deficit stress, integrated fertilizer management, and intercropping on forage quality traits during the research years (2022–2024)

سطوح آبیاری Irrigation levels	سطوح کودی Fertilizer levels	کشت مخلوط Intercropping	پروتئین بیوماس آفتابگردان Sunflower biomass protein (%)	درصد فیبر Fiber (%)	درصد خاکستر Ash (%)	فیبر شوینده اسیدی ADF (%)	کل مواد جامد محلول TSS(g/kg)
I1	F1	P1	—	21.49 nop	4.60 st	27.34 k-p	131.34 de
I1	F1	P2	1.12 pq	32.49 fg	7.92 e-j	39.42 ef	62.46 jkl
I1	F1	P3	2.02 b	23.82 jklm	5.75 qr	30.79 hi	124.18 e
I1	F1	P4	1.33 nop	21.89 lmno	4.90 s	28.65 i-m	181.02 a
I1	F1	P5	1.51 klmn	26.20 ij	6.72 nop	38.58 ef	67.41 ijk
I1	F2	P1	—	20.56 op	3.85 u	27.15 l-p	122.32 e
I1	F2	P2	1.11 q	31.45 g	7.39 i-n	40.05 def	53.26 klm
I1	F2	P3	1.96 cdef	22.88 klmn	4.70 st	30.76 hi	118.87 e
I1	F2	P4	1.22 opq	21.26 op	4.12 tu	29.53 ig	164.70 b
I1	F2	P5	1.40 mnop	24.99 jk	6.30 opq	39.13 ef	64.34 ijkl
I1	F3	P1	—	20.14 p	3.71 u	27.46 k-p	141.83 cd
I1	F3	P2	1.45 klmn	30.00 h	6.11 pq	38.61 ef	70.54 ij
I1	F3	P3	1.81 efgh	22.30 lmno	4.32 stu	29.94 hi	147.31 c
I1	F3	P4	1.59 i-m	21.26 op	4.12 tu	29.27 ijk	183.26 a
I1	F3	P5	1.65 h-l	24.49 jkl	5.13 rs	38.06 f	75.65 ij
I2	F1	P1	—	24.52 jkl	6.81 mno	26.63 mnop	82.47 ghi
I2	F1	P2	1.55 j-n	34.04 de	8.39 c-g	40.56 cde	68.71 ijk
I2	F1	P3	1.77 f-j	27.55 i	7.78 f-k	30.00 hi	79.82 hij
I2	F1	P4	1.71 g-k	27.26 i	6.84 mno	29.31 ijk	94.27 fgh
I2	F1	P5	1.88 d-h	31.57 g	8.13 d-h	39.61 ef	73.19 ij
I2	F2	P1	—	21.65 m-p	6.58 nopq	28.16 i-n	71.87 ij
I2	F2	P2	1.53 klmn	34.10 de	8.22 c-h	42.56 b	64.10 ijkl
I2	F2	P3	2.02 bcde	25.06 j	7.43 h-n	31.63 h	76.32 ij
I2	F2	P4	1.69 hijk	23.46 klm	6.65 nop	29.86 hi	79.41 hij
I2	F2	P5	1.98 b-f	30.51 gh	7.80 f-k	41.04 bcde	67.46 ijk
I2	F3	P1	—	21.30 op	5.80 q	25.70 op	96.88 fg
I2	F3	P2	1.56 jklm	33.32 ef	8.02 e-j	40.00 def	73.02 ij
I2	F3	P3	2.06 bcd	23.80 jklm	7.15 klmn	29.09 ijkl	98.65 fg
I2	F3	P4	1.71 g-k	22.92 klmn	5.98 q	28.86 ijkl	101.26 f
I2	F3	P5	1.85 d-h	27.62 i	7.51 h-m	39.65 ef	78.26 hij
I3	F1	P1	—	27.29 i	7.70 g-l	26.22 nop	68.19 ijk
I3	F1	P2	1.79 fghi	41.19 a	9.27 a	45.99 a	40.76 mn
I3	F1	P3	2.55 a	29.05 hi	8.95 abc	35.41 g	72.00 ij
I3	F1	P4	1.97 cdef	26.66 i	7.86 e-k	28.65 i-m	75.25 ij
I3	F1	P5	2.11 bc	37.62 b	9.13 ab	42.43 bc	42.05 mn
I3	F2	P1	—	22.79 k-o	7.27 j-n	27.66 j-o	64.70 ijkl
I3	F2	P2	1.43 lmno	35.78 c	8.90 abcd	45.86 a	35.49 n
I3	F2	P3	2.20 b	27.73 i	8.48 b-f	34.68 g	70.41 ijk
I3	F2	P4	1.57 i-m	25.10 j	7.54 h-m	30.06 hi	75.08 ij
I3	F2	P5	1.92 c-g	34.58 cde	8.77 abcd	41.90 bcd	38.42 mn
I3	F3	P1	—	23.14 klm	7.02 lmn	25.61 p	77.17 hij
I3	F3	P2	1.54 j-n	35.44 cd	8.55 bcde	42.42 bc	43.09 mn
I3	F3	P3	2.45 a	26.26 ij	7.73 g-l	34.50 g	80.50 ghij
I3	F3	P4	1.69 hijk	24.33 jkl	7.26 j-n	29.02 ijkl	90.28 fghi
I3	F3	P5	1.99 b-f	33.78 ef	8.15 d-h	39.65 ef	48.31 lmn

در هر ستون، میانگین های دارای حرف مشابه اختلاف معنی داری ندارند (دانکن، ٪۵)

Within each column, means with the same letter are not significantly different (Duncan, 5%).

.کشت مخلوط :P ؛ مدیریت تلفیقی کود :F ؛ رژیم آبیاری :I ؛ سال :Y ؛ (Total Soluble Solids) کل مواد جامد محلول :TSS ؛ (Acid Detergent Fiber) فیبر شوینده اسیدی :ADF

کمک کند.

نیتروژن بیوماس کل

نتایج تجزیه واریانس نشان دادکه نیتروژن بیوماس تحت تأثیر اثرات سال (Y)، رژیم آبیاری (I)،مدیریت تلفیقی کود (F) وکشت مخلوط (P) درسطح یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). براساس نتایج مقایسه میانگین اثر رژیم آبیاری، تنش کمبودآب نیتروژن بیوماس را به‌طور معنی‌داری افزایش داد و این افزایش در سطح سوم تنش (I3) با میانگین ۱/۱۳ درصد

جدول ۶- مقایسه میانگین اثرات اصلی رژیم آبیاری، مدیریت تلفیقی کود و کشت مخلوط بر نیتروژن بیوماس کل سال های پژوهش (۱۴۰۳-۱۴۰۱)

Table 6. Mean comparison of main effects of irrigation regime, integrated fertilizer management, and intercropping on total biomass nitrogen during the research years (2022–2024)

تیمار Treatment	سطح Level	نیتروژن بیوماس کل Total biomass nitrogen (%)
رژیم آبیاری (I) Irrigation regime	I1	0.93 c
	I2	1.06 b
	I3	1.13 a
مدیریت تلفیقی کود (F) Integrated fertilizer management	F1	1.04 b
	F2	0.98 c
	F3	1.11 a
کشت مخلوط (P) Intercropping	P1	0.90 d
	P2	1.20 a
	P3	1.02 c
	P4	0.94 d
	P5	1.14 b

در هر ستون، میانگین های دارای حرف مشابه اختلاف معنی داری ندارند (دانکن، ٪۵).

Within each column, means with the same letter are not significantly different (Duncan, 5%).

I: رژیم آبیاری ؛ F: مدیریت تلفیقی کود ؛ P: کشت مخلوط.

نسبت به سطح اول (I1) با میانگین ۰/۹۳درصد، حدود ۲۱/۵ درصدبود (جدول ۶). مدیریت تلفیقی کود (F3) با میانگین ۱/۱۱ درصد بیشترین وتیمار آلی-زیستی (F2) با میانگین ۰/۹۸ درصدکمترین نیتروژن بیوماس را داشتند (جدول ۶). در بین الگوهای کشت مخلوط، کشت خالص آفتابگردان (P2) با میانگین ۱/۲ درصد بیشترین و الگوی ۷۵) P4 ذرت + ۲۵ آفتابگردان) با میانگین ۰/۹۴ درصد کمترین نیتروژن بیوماس را دارا بودند. دلیل این تفاوت را می‌توان به توانایی بالای آفتابگردان در جذب نیتروژن از عمق خاک و غلظت نیتروژن بالاتر بافت‌های آن نسبت به ذرت نسبت داد (Schittenhelm, 2010; Anil et al., 2000). در کشت خالص آفتابگردان، عدم رقابت بین‌گونه‌ای و دسترسی کامل به منابع نیتروژن، منجر به افزایش غلظت نیتروژن بیوماس می‌شود. در مقابل، در الگوی P4 که ذرت گونه غالب است، سهم بالای ذرت با غلظت نیتروژن پایین‌تر و رقابت شدیدتر برای جذب نیتروژن، باعث کاهش میانگین نیتروژن بیوماس کل در این الگو می‌گردد. افزایش نیتروژن بیوماس در شرایط تنش ناشی از کاهش رشد گیاه و تجمع نسبی نیتروژن در بافت‌هاست (Rad et al., 2021; Zi et al., 2022). در شرایط تنش کمبود آب، کاهش تولید ماده خشک بیشتر از کاهش جذب نیتروژن است و این امر منجر به افزایش غلظت نیتروژن در واحد وزن خشک می‌شود (Lashkari et al., 2022). کاربرد تلفیقی کود با تأمین تدریجی نیتروژن، جذب این عنصر را افزایش داده است(Mrkovacki and Milic, 2001; Sturz and Christie, 2003). Schittenhelm (2010) نشان داد که جذب نیتروژن در کشت مخلوط ذرت و آفتابگردان با افزایش تنش کمبود آب کاهش می‌یابد، اما این کاهش در آفتابگردان نسبت به ذرت کمتربود. نتایج یک بررسی نشان دادکه کشت مخلوط ذرت با لگوم‌ها وآفتابگردان باعث افزایش نیتروژن بیوماس از طریق تثبیت نیتروژن توسط لگوم‌ها می‌شود (Anil *et al.*,2000). پژوهش‌های دیگر نیز نشان داده‌اند که کاربرد تلفیقی کود زیستی با کود شیمیایی نیتروژن، باعث افزایش درصد نیتروژن بیوماس درذرت علوفه‌ای می‌شودکه با نتایج این پژوهش هم‌راستا است (Mohammadi *et al.*, 2020).

درصد فیبر

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثرات سال (Y)، رژیم آبیاری (I)، مدیریت تلفیقی کود (F)، کشت مخلوط (P) و اثرات متقابل I×F، I×P و I×F×P از حیث درصد فیبر در سطح یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). بر اساس نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل I×F×P (جدول ۵)، بیشترین درصد فیبر در تیمار ۱۹) ۴۱/I3F1P2 درصد) و کمترین آن در تیمار ۱۴) ۲۰/I1F3P1 درصد) حاصل گردید. تنش کمبود آب منجر به افزایش معنی‌دار درصد فیبر گردید و این افزایش در آبیاری بر اساس ۸۰ درصد تخلیه رطوبت قابل استفاده (I3) محسوس‌تر بود. در هر سه سطح رژیم رطوبتی، کاربرد تلفیقی کود شیمیایی و آلی-زیستی (F3) منجر به کاهش معنی‌دار درصد فیبر گردید و میزان فیبر در کشت خالص آفتابگردان (P2) بالاتر از کشت خالص ذرت (P1) بود. استفاده از نظام کشت مخلوط ۷۵ درصد ذرت + ۲۵ درصد آفتابگردان (P4) منجر به کاهش معنی‌دار درصد فیبر گردید. افزایش درصد فیبر در شرایط تنش کمبود آب به دلیل تسریع در فرآیند لیگنین‌سازی دیواره سلولی و افزایش ضخامت دیواره سلولی به عنوان مکانیسم مقاومت به تنش است (Rad *et al.*, 2021; Zi *et al.*, 2022). در شرایط تنش، گیاهان با تولید بیشتر لیگنین و سلولز، ساختار دیواره سلولی را مستحکم‌تر کرده و از خود در برابر تنش محافظت می‌کنند که این امر منجر به افزایش درصد فیبر می‌شود. کاربرد تلفیقی کود (F3) با بهبود تغذیه گیاه و افزایش رشد رویشی، باعث کاهش نسبی فیبر در ماده خشک شده است. همچنین، الگوی کشت P4 با ترکیب مناسب ذرت و آفتابگردان و بهبود کارایی استفاده از منابع، به کاهش درصد فیبر کمک کرده است. این نتایج با یافته‌های Schittenhelm 2010)) که نشان داد در کشت مخلوط ذرت و آفتابگردان، آفتابگردان دارای غلظت بالاتری از فیبر خام در مقایسه با ذرت است، هم‌راستا است. همچنین Rad *et al.* 2021) گزارش کردند که تنش کمبود آب باعث افزایش فیبر در علوفه ذرت می‌شود. Lashkari *et al.* 2022) نیز نشان دادند که افزایش فیبر در شرایط تنش به دلیل تسریع در لیگنین‌سازی دیواره سلولی است.

درصد خاکستر

نتایج تجزیه واریانس نشان داد اثرات سال (Y)، رژیم آبیاری (I)، مدیریت تلفیقی کود (F) و کشت واثرات متقابل I×F، I×P، F×P و I×F×P از حیث درصد خاکستردر سطح یک درصد معنی‌دار بودند (جدول ۲). بر اساس نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل I×F×P (جدول ۵)، درصد خاکستر در سطح سوم تنش رطوبتی (I3، آبیاری پس از تخلیه ۸۰ درصد رطوبت قابل استفاده) با کاربرد F1 (کود شیمیایی) و F2 (کود آلی-زیستی) در الگوهای کشت P2 (کشت خالص آفتابگردان)، ۵۰) P3٪ ذرت + ۵۰٪ آفتابگردان) و ۲۵) P5٪ ذرت + ۷۵٪ آفتابگردان) دارای بیشترین میزان خاکستر بود. به‌طوری‌که در تیمار I3F1P2 درصد خاکستر به ۹/۲۷ درصد رسید. کمترین درصد خاکستر در تیمارهای ۷۱) ۳/I1F3P1 درصد) و I1F2P1 ۸۵)/۳ درصد) مشاهده شد. کاربرد تلفیقی کود (F3) و الگوی کشت P4 باعث کاهش معنی‌دار درصد خاکستر گردید. افزایش درصد خاکستر

در شرایط تنش کمبود آب به دلیل کاهش ماده آلی و تجمع نسبی مواد معدنی در بافت‌های گیاهی است (Rad *et al.*, 2021).زمانی که گیاه تحت تنش کمبود آب قرار می‌گیرد، تولید ماده خشک کاهش می‌یابد، اما جذب عناصر معدنی با همان سرعت قبلی ادامه می‌یابد یا حتی به دلیل کاهش رطوبت خاک و افزایش غلظت املاح در محلول خاک، جذب برخی عناصر افزایش می‌یابد (Lashkari *et al.*, 2022).این امر منجر به افزایش نسبی غلظت مواد معدنی در ماده خشک تولیدی و در نتیجه افزایش درصد خاکستر می‌شود(Schittenhelm, 2010).کاربرد تلفیقی کود (F3)(مدیریت تلفیقی کود شیمیایی وآلی – زیستی) با بهبود رشد گیاه و افزایش ماده آلی، باعث کاهش نسبی خاکستر شده است(Mohammadi *et al.*, 2020).کودهای آلی با افزایش ماده آلی خاک و بهبود جذب عناصر غذایی، باعث تولید ماده خشک بیشتر شده و در نتیجه درصد خاکستر را کاهش می‌دهند. همچنین، الگوی کشت P4) 75٪ ذرت + ۲۵٪ آفتابگردان) با ترکیب مناسب ذرت و آفتابگردان و بهبود کارایی استفاده از منابع، به کاهش درصد خاکستر کمک کرده است(Schittenhelm, 2010; Rad *et al.*, 2021). این نتایج با یافته‌های Schittenhelm (2010) که نشان دادآفتابگردان دارای غلظت بالاتری ازخاکستر خام درمقایسه با ذرت است، هم‌راستا است. همچنین Rad *et al.* (2021) گزارش کردندکه تنش کمبود آب باعث افزایش خاکستر درعلوفه ذرت می‌شود.

فیبر شوینده اسیدی (ADF)

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که ADF تحت تأثیر اثرات اصلی مدیریت تلفیقی کود (F) و کشت مخلوط (P) در سطح یک درصد و رژیم آبیاری (I) در سطح پنج درصد معنی‌دار بود. همچنین اثرات متقابل I×F در سطح پنج درصد، F×P در سطح پنج درصد و I×F×P در سطح یک درصد بر این صفت معنی‌دار بودند (جدول ۲). بر اساس نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل I×F×P (جدول ۵)، بیشترین ADF در تیمارهای ۹۹) I3F1P2/۴۵ درصد) و I3F2P2 ۸۶)/۴۵ درصد) وکمترین آن در تیمار I3F3P1 ۶۱)/۲۵ درصد) مشاهده شد (جدول ۵). تنش کمبود آب منجر به افزایش معنی‌دار ADF گردید و این افزایش در آبیاری بر اساس ۸۰ درصد تخلیه رطوبت قابل استفاده (I3) محسوس‌تر بود. در هر سه سطح رژیم رطوبتی، کاربرد تلفیقی کود شیمیایی و آلی–زیستی (F3) منجر به کاهش معنی‌دار ADF گردید. میزان ADF در کشت خالص آفتابگردان (P2) بالاتر از کشت خالص ذرت (P1) بود و استفاده از نظام کشت مخلوط ۷۵ درصد ذرت + ۲۵ درصد آفتابگردان (P4) منجر به کاهش معنی‌دار ADF شد. ADF نشان‌دهنده بخش غیرقابل‌هضم خوراک دام، شامل لیگنین و سلولز است و افزایش آن در شرایط تنش کمبود آب به دلیل افزایش لیگنین‌سازی دیواره سلولی و کاهش قابلیت هضم علوفه می‌باشد (Rad *et al.*, 2021; Zi *et al.*, 2022). درشرایط تنش،گیاهان باتولید بیشتر لیگنین، دیواره سلولی را مستحکم کرده و از خود در برابرکمبودآب محافظت می‌کنند، اما این امر باعث افزایش ADF وکاهش کیفیت علوفه می‌شود. کاربرد تلفیقی کود (F3) با بهبود تغذیه گیاه وافزایش رشد رویشی، باعث کاهش

جدول ۷- مقایسه میانگین اثر متقابل رژیم آبیاری و الگوی کشت برNDF ، قند دانه، قند بیوماس و ماده آلی سال های پژوهش (۱۴۰۳-۱۴۰۱)

Table 7. Mean comparison of irrigation regime × intercropping pattern interaction on NDF, grain sugar, biomass sugar, and organic matter during the research years (2022–2024)

سطوح آبیاری Irrigation levels	کشت مخلوط Intercropping	فیبر شوینده خنثی NDF (%)	قند دانه Grain sugar (%)	قند بیوماس Biomass sugar (%)	ماده آلی Organic matter (%)
I1	P1	20.09 i	0.269 b	0.402 b	96.03 b
I1	P2	25.87 e	0.127 g	0.322 h-l	87.84 f
I1	P3	21.64 h	0.265 b	0.412 ab	96.24 b
I1	P4	20.53 i	0.360 a	0.447 a	97.68 a
I1	P5	23.01 g	0.141 f	0.360 c-f	95.59 bc
I2	P1	23.19 g	0.171 d	0.326 h-l	95.51 bc
I2	P2	30.77 c	0.140 f	0.249 rstu	87.05 f
I2	P3	25.58 e	0.173 d	0.339 fghi	95.47 bc
I2	P4	24.33 f	0.187 c	0.353 d-h	95.54 bc
I2	P5	27.80 d	0.149 ef	0.273 qrs	94.10 d
I3	P1	27.06 d	0.143 ef	0.294 l-p	94.76 cd
I3	P2	35.56 a	0.081 h	0.242 stu	85.76 g
I3	P3	34.06 b	0.152 e	0.310 klmn	94.13 d
I3	P4	27.01 d	0.164 d	0.312 jklm	94.61 cd
I3	P5	34.79 ab	0.087 h	0.252 rst	92.51 e

در هر ستون، میانگین های دارای حرف مشابه اختلاف معنی داری ندارند (دانکن، ٪۵).

Within each column, means with the same letter are not significantly different (Duncan, 5%).

NDF: فیبر شوینده خنثی (Neutral Detergent Fiber) ؛ I: رژیم آبیاری ؛P: کشت مخلوط.

نسبی ADF شده است. همچنین، الگوی کشت P4 با ترکیب مناسب ذرت(با ADF پایین‌تر) وآفتابگردان، به کاهش ADF کمک کرده است. این نتایج با یافته‌های Rad *et al.* (2021) که گزارش کردندتنش کمبودآب باعث افزایش ADF درعلوفه ذرت می‌شود، هم‌راستا است. Lashkari *et al.* (2022) نیزنشان دادندکه افزایش ADF درشرایط تنش بدلیل افزایش لیگنین‌سازی دیواره سلولی است.

فیبر شوینده خنثی (NDF)

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثرات اصلی رژیم آبیاری (I)، مدیریت تلفیقی کود (F) و کشت مخلوط (P) از حیث NDF در سطح یک درصد معنی‌دار بود. اثر متقابل I×P نیز در سطح یک درصد بر این صفت معنی‌دار بود (جدول ۲). بر اساس نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل I×P (جدول ۷)، بیشترین NDF در تیمارهای ۵۶) I3P2/ ۳۵ درصد) و ۷۹) I3P5/ ۳۴ درصد) و کمترین آن در تیمار ۵۳) I1P4/ ۲۰ درصد) حاصل گردید. افزایش NDF در شرایط تنش کمبود آب به دلیل افزایش لیگنین، سلولز و همی‌سلولز به عنوان مکانیسم مقاومت به تنش است (Rad *et al.*, 2021; *Zi et al.*, 2022). در شرایط تنش، گیاه با تولید بیشتر ترکیبات ساختاری دیواره سلولی، استحکام بافت‌های خود را افزایش می‌دهد که این امر منجر به افزایش NDF و کاهش قابلیت هضم علوفه می‌شود. الگوی کشت P4 باعث کاهش NDF شد که نشان‌دهنده نقش مثبت مدیریت کشت مخلوط مناسب در بهبود کیفیت علوفه است. این نتایج با یافته‌های Esmaili (2025) که گزارش داد تنش کمبود آب باعث افزایش NDF در علوفه لگوم‌ها می‌شود، هم‌راستا است. مطالعه Anil *et al.* (2000) نشان داد که کشت مخلوط ذرت با آفتابگردان، گرچه ADF و NDF را در مقایسه با کشت خالص ذرت افزایش می‌دهد، اما این افزایش با افزایش قابل توجه مقدار پروتئین

خام سیلاژ (از ۸۱ به ۱۳۷ گرم در کیلوگرم ماده خشک) و بهبود قابلیت هضم نیتروژن همراه است. این بهبود از نظر کمی (مقدار پروتئین در واحد وزن خشک) و کیفی (قابلیت هضم نیتروژن) قابل توجه بوده و می‌تواند نیاز به مکمل‌های پروتئینی خریداری‌شده را در جیره دام کاهش دهد. همچنین، تأثیر منفی رقابت بر NDF در کشت خالص ذرت و آفتابگردان(P1 و P2)نسبت به الگوی کشت P4، با نتایج تحقیقات Ginwal *et al.* (2019) مطابقت دارد که نشان دادند کشت مخلوط ذرت با لگوم‌ها باعث کاهش معنی‌دار فیبرهای غیرقابل هضم می‌شود.

قند دانه

نتایج تجزیه واریانس نشان دادقند اثرات رژیم آبیاری (I) وکشت مخلوط (P) در سطح یک درصد و مدیریت تلفیقی کود (F) از حیث قند دانه در سطح پنج درصد معنی‌دار بود.همچنین اثرات متقابل I×P و F×P در سطح یک درصد بر این صفت معنی‌دار بودند (جدول ۲). براساس نتایج مقایسه میانگین اثرمتقابل I×P (جدول ۷)، بیشترین قند دانه در تیمار ۳۶) I1P4/۰ درصد) وکمترین آن در تیمارهای ۰۸۱) I3P2/۰ درصد) و ۰۸۷) I3P5/۰ درصد) حاصل گردید. همچنین براساس نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل F×P (جدول ۴)، بیشترین قند دانه در تیمارهای ۲۵۵) F3P4/۰ درصد) و ۲۳۹) F1P4/۰ درصد) وکمترین آن در تیمارهای ۱۱۶) F2P5/۰ درصد) و۱۰۴) F2P2/۰ درصد) بدست آمد. قابل ذکر استکه چون اثر متقابل I×F معنی‌دار نبود،کاهش قند درشرایط تنش درتمام سطوح کودی به یک اندازه رخ داده است واثر متقابل I×P نشان می‌دهد الگوی کشت P4 در تمام سطوح آبیاری باعث افزایش قند دانه شده است. کاهش قند دانه در شرایط تنش کمبود آب به دلیل کاهش فتوسنتز و اختلال در متابولیسم کربوهیدرات‌هاست (*Zi et al.*, 2022). در شرایط تنش، بسته شدن روزنه‌ها و کاهش جذب دی‌اکسیدکربن، منجر به کاهش تولید قندهای محلول می‌شود. همچنین، تنش کمبود آب باعث افزایش فعالیت آنزیم‌های هیدرولیتیک شده و تجزیه قندها را تسریع می‌کند. افزایش قند دانه در الگوی کشت ۷۵) P4 درصد ذرت + ۲۵ درصد آفتابگردان) به دلیل ترکیب مناسب ذرت (که به طور طبیعی قند بالاتری دارد) و آفتابگردان و بهبود کارایی استفاده از منابع نور و مواد غذایی در این الگوی کشت است. در این الگو، سهم بالای ذرت (۷۵٪) باعث افزایش غلظت قند دانه در مخلوط می‌شود، در حالی که حضور ۲۵٪ آفتابگردان با ایجاد ساختار عمودی متفاوت تاج پوشش، جذب بهتر نور در لایه‌های مختلف را فراهم می‌کند. همچنین، تفاوت در عمق و الگوی گسترش ریشه‌های دو گونه، رقابت برای عناصر غذایی (به‌ویژه پتاسیم که در سنتز قند نقش دارد) را کاهش داده و جذب متعادل عناصر را بهبود می‌بخشد. این عوامل در مجموع منجر به افزایش محتوای قند دانه در الگوی P4 می‌گردد. این نتایج با یافته‌های Schittenhelm (2010) که نشان داد در شرایط تنش کمبود آب، ترکیب شیمیایی بیوماس کشت مخلوط ذرت و آفتابگردان تغییر می‌کند و میزان قندهای قابل حل در آفتابگردان کمتر از ذرت است، هم‌راستاست. لازم به ذکر است که در مطالعه Schittenhelm (2010) اگرچه

نسبت‌های اختلاط در دو مطالعه یکسان نبوده است، اما روند کلی کاهش قندهای قابل حل در آفتابگردان نسبت به ذرت در هر دو مطالعه مشاهده شده است. همچنین (Zi *et al.* 2022) گزارش کردندکه تنشکمبودآب باعث کاهش قندهای محلول درعلوفه ذرت می‌شود.

قند بیوماس

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که قند بیوماس تحت تأثیر اثرات اصلی رژیم آبیاری(I) ، وکشت مخلوط (P) در سطح یک درصد و مدیریت تلفیقی کود (F) در سطح پنج درصد معنی‌دار بود. همچنین اثرات متقابل I×P و F×P در سطح پنج درصد بر این صفت معنی‌دار بودند (جدول ۲). بر اساس نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل I×P (جدول ۷)، بیشترین قند بیوماس در تیمار I1P4 با میانگین ۰/۴۴۷ درصد و I1P3 با میانگین ۰/۴۱۲ درصد مشاهده شد و کمترین میزان در تیمارهای I3P2 با میانگین ۰/۲۴۲ درصد و I3P5 با میانگین ۰/۲۵۲ درصد حاصل گردید. دلیل این تفاوت را می‌توان به اثر متقابل آبیاری و الگوی کشت نسبت داد. در سطح آبیاری I1 (تنش کم)، الگوهای ۵۰) P3٪ ذرت + ۵۰٪ آفتابگردان) و ۷۵) P4٪ ذرت + ۲۵٪ آفتابگردان) با ترکیب مناسب دو گونه و بهبود جذب نور و مواد غذایی، بیشترین قند بیوماس را تولید کردند. در مقابل، در سطح آبیاری I3 (تنش شدید)، الگوهای P2 (کشت خالص آفتابگردان) و ۲۵) P5٪ ذرت + ۷۵٪ آفتابگردان) به دلیل سهم بالای آفتابگردان و حساسیت آن به کمبود آب، کمترین قند بیوماس را نشان دادند. این نتایج نشان می‌دهد که در شرایط تنش شدید، افزایش سهم ذرت (مثل الگوی P4) می‌تواند به حفظ قند بیوماس کمک کند. همچنین بر اساس نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل F×P (جدول ۴)، بیشترین قند بیوماس در تیمارهای F3P4 با میانگین ۰/۴۵۰ درصد و F1P4 با میانگین ۰/۴۳۳ درصد و کمترین آن در تیمارهای F2P2 با میانگین ۰/۲۵۳درصد و F2P5 با میانگین ۰/۲۵۶ درصد به‌دست آمد. از آنجایی که اثر متقابل I×F معنی‌دار نبود، کاهش قند بیوماس در شرایط تنش در تمام سطوح کودی به یک اندازه رخ داده است. کاهش قند بیوماس در شرایط تنش کمبود آب به دلیل کاهش فتوسنتز، کاهش سطح برگ و اختلال در متابولیسم کربوهیدرات‌هاست (Zi *et al.*, 2022). در شرایط تنش، بسته شدن روزنه‌ها و کاهش جذب دی‌اکسیدکربن، منجر به کاهش تولید قندهای محلول می‌شود. همچنین، تنش کمبود آب باعث افزایش فعالیت آنزیم‌های هیدرولیتیک شده و تجزیه قندها را تسریع می‌کند. افزایش قند بیوماس در الگوی کشت ۷۵) P4 درصد ذرت + ۲۵ درصد آفتابگردان) و ۵۰) P3درصد ذرت + ۵۰ درصد آفتابگردان) به دلیل ترکیب مناسب ذرت (که به طور طبیعی قند بالاتری دارد) و آفتابگردان و بهبود کارایی استفاده از منابع نور و مواد غذایی در این الگوهای کشت است. کشت مخلوط با ایجاد ساختار عمودی مناسب تاج پوشش، باعث جذب بهتر نور و افزایش فتوسنتز می‌شود. کاربرد تلفیقی کود شیمیایی و آلی-زیستی (F3) و کود شیمیایی (F1) نیز با تأمین بهتر عناصر غذایی به ویژه نیتروژن و پتاسیم، باعث افزایش تولید و تجمع قندهای محلول در گیاه شده

است. این نتایج با یافته‌های Zi *et al.* (2022) که گزارش کردند تنش خشکی طولانی‌مدت (از مرحله ظهور گل تاجی تا مرحله خمیری) باعث کاهش معنی‌دار قندهای محلول کل (WSC) در علوفه ذرت (شامل ساقه و برگ) می‌شود، هم‌راستا است. لازم به ذکر است که در مطالعه Zi *et al.* (2022) قندهای محلول کل در بیوماس علوفه اندازه‌گیری شده است، در حالی که در پژوهش حاضر قند دانه و قند بیوماس به طور جداگانه مورد بررسی قرار گرفت. با این حال، روند کلی کاهش قندهای محلول در شرایط تنش کمبود آب در هر دو مطالعه مشابه است.

ماده آلی

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که ماده آلی تحت تأثیر اثرات اصلی سال (Y) در سطح یک درصد، رژیم آبیاری (I) و مدیریت تلفیقی کود (F) در سطح پنج درصد و کشت مخلوط (P) در سطح پنج درصد بر این صفت معنی‌دار بود. همچنین اثر متقابل I×P در سطح پنج درصد بر این صفت معنی‌دار بود (جدول ۲). مقایسه میانگین اثر متقابل I×P (جدول ۷) نشان داد که بالاترین ماده آلی در تیمار I1P4 (66/97 درصد) و کمترین آن در تیمار I3P2 (76/85 درصد) حاصل گردید. دلیل این تفاوت را می‌توان به اثر متقابل آبیاری و الگوی کشت نسبت داد. در سطح آبیاری I1 (تنش کم)، الگوی P4 (۷۵٪ ذرت + ۲۵٪ آفتابگردان) با ترکیب مناسب دو گونه، بهبود جذب نور و کاهش رقابت برای منابع، بیشترین ماده آلی را تولید کرد. در مقابل، در سطح آبیاری I3 (تنش شدید)، الگوی P2 (کشت خالص آفتابگردان) به دلیل حساسیت بالای آفتابگردان به کمبود آب، کاهش شدید فتوسنتز و سطح برگ، کمترین ماده آلی را نشان داد. این نتایج نشان می‌دهد که در شرایط تنش شدید، افزایش سهم ذرت (مثل الگوی P4) می‌تواند به حفظ ماده آلی کمک کند. تنش کمبود آب منجر به کاهش معنی‌دار ماده آلی گردید و در هر سه سطح رژیم رطوبتی، میزان ماده آلی در کشت خالص آفتابگردان (P2) بالاتر از کشت خالص ذرت (P1) بود، اما الگوی کشت P4 (۷۵ درصد ذرت + ۲۵ درصد آفتابگردان) نسبت به نظام تک‌کشتی ذرت منجر به افزایش معنی‌دار ماده آلی گردید. کاهش ماده آلی درشرایط تنش کمبودآب بدلیل کاهش فتوسنتزو تولیدکربوهیدرات‌هاست (Lashkari *et al.*, 2022). درشرایط تنش،گیاه باکاهش سطح برگ، بسته شدن روزنه‌ها وکاهش فعالیت فتوسنتزی، تولیدموادآلی راکاهش می‌دهد. افزایش ماده آلی درالگوی P4 بدلیل بهبودکارایی استفاده از منابع محیطی وترکیب مناسب ذرت وآفتابگردان دراین الگوی کشت می‌باشد. کشت مخلوط با ایجاد تنوع در ساختار تاج پوشش و بهبود جذب نور، باعث افزایش فتوسنتز و تولید ماده آلی می‌شود. در این پژوهش، کاربرد تلفیقی کود شیمیایی و آلی–زیستی (F3) با تأمین متعادل عناصر غذایی به‌ویژه نیتروژن و پتاسیم، باعث افزایش رشد رویشی و تولید ماده خشک بیشتر گردید و در نتیجه ماده آلی علوفه را بهبود بخشید. این نتیجه با یافته‌های Mohammadi *et al.* (2020) که گزارش کردند کاربرد تلفیقی کود زیستی و شیمیایی باعث افزایش ماده آلی و کیفیت علوفه ذرت می‌شود، هم‌راستا است. همچنین، در بین

الگوهای کشت مخلوط، الگوی ۷۵) P4٪ ذرت + ۲۵٪ آفتابگردان) با ترکیب مناسب دو گونه و بهبود کارایی استفاده از منابع، بیشترین ماده آلی را تولید کرد. این نتیجه با یافته‌های Hamed *et al.* (2022) که نشان دادند کشت مخلوط با مدیریت تلفیقی کود می‌تواند ماده آلی علوفه را افزایش دهد، مطابقت دارد. پژوهش‌های دیگر نیز نشان داده‌اند که کشت مخلوط ذرت با لگوم‌ها و کاربرد کود زیستی باعث افزایش ماده آلی قابل هضم و بهبود کیفیت کلی علوفه می‌شود (Javanmard *et al.*, 2018). ازآنجایی که اثرمتقابل F×P معنی‌دار نبود، نمیتوان نتیجه گرفت که ترکیب کودتلفیقی با الگوی P4 تأثیر هم‌افزایی برافزایش ماده آلی داشته است.

کل مواد جامد محلول (TSS)

نتایج تجزیه واریانس نشان داد TSS تحت تأثیر اثرات اصلی رژیم آبیاری (I) درسطح یک درصد، مدیریت تلفیقی کود (F) درسطح پنج درصد وکشت مخلوط (P) درسطح یک درصد معنی‌دار بود. همچنین اثرات متقابل I×P و F×P در سطح یک درصد و I×F×P درسطح پنج درصد براین صفت معنی‌دار بودند (جدول ۲).لازم به ذکر است که عمده مواد جامد محلول (TSS) در علوفه ذرت و آفتابگردان را قندهای محلول (ساکارز، گلوکز و فروکتوز) تشکیل می‌دهند که محصول اصلی فتوسنتز هستند. این ترکیبات به عنوان منبع انرژی سریع‌الوصول برای دام‌های نشخوارکننده عمل می‌کنند و در فرآیند تخمیر سیلاژ به عنوان سوبسترای اصلی باکتری‌های اسید لاکتیک نقش دارند. بنابراین، TSS یکی از شاخص‌های مهم کیفیت علوفه محسوب می‌شود و کاهش آن در شرایط تنش کمبود آب، نشان‌دهنده کاهش کیفیت تغذیه‌ای علوفه است. بر اساس نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل I×F×P (جدول ۵)، بالاترین TSS در تیمار ۲۶) I1F3P4/۱۸۳ گرم بر کیلوگرم) و ۰۲) I1F1P4/۱۸۱ گرم بر کیلوگرم) مشاهده شد.کمترین TSS درتیمارهای I3F2P2 ۴۹)/۳۵گرم بر کیلوگرم)،۰۵) I3F1P5/۴۲گرم بر کیلوگرم) و ۳۸) I3F2P5/۴۲گرم بر کیلوگرم) حاصل گردید. تنش کمبودآب منجر بهکاهش معنی‌دار TSS گردید و این کاهش درآبیاری براساس ۸۰ درصد تخلیه رطوبت قابل استفاده محسوس‌تر بود. در هر سه سطح رژیم رطوبتی، میزان TSS در نظام کشت مخلوط ۷۵ درصد ذرت + ۲۵ درصد آفتابگردان (P4) بالاترین میزان بود و کاربرد تلفیقی کودشیمیایی وآلی- زیستی (F3) منجربه افزایش معنی‌دار TSS دراین شرایط گردید.کاهش TSS درشرایط تنش کمبود آب به دلیل کاهش فتوسنتز، اختلال درمتابولیسم کربوهیدرات‌هاوکاهش تجمع موادمحلول دربافت‌های گیاهی است (Lashkari *et al.*, 2022). درشرایط تنش، کاهش فعالیت آنزیم‌های سنتزکننده قند و افزایش فعالیت آنزیم‌های هیدرولیتیک، منجر به کاهش TSS می‌شود. افزایش TSS درالگوی کشت P4 وکاربردتلفیقی کود (F3) بدلیل بهبودفتوسنتز، افزایش تولید کربوهیدرات‌های محلول و بهبود جذب عناصر غذایی است. تلفیق کودهای شیمیایی و آلی با تأمین متعادل عناصر غذایی، باعث افزایش فعالیت آنزیم‌های فتوسنتزی و در نتیجه افزایش TSS شده است. این نتایج با یافته‌های Lashkari *et al.* (2022) که

گزارش کردند تنش کمبود آب باعث کاهش TSS درعلوفه می‌شود، هم‌راستاست. همچنین Hamed *et al.* (2022) نشان دادند کشت مخلوط با مدیریت تلفیقی کود می‌تواند TSS علوفه را افزایش دهد. پژوهشهای دیگر نیز نشان داده‌اند کاربرد تلفیقی کود زیستی و شیمیایی باعث افزایش TSS درعلوفه ذرت می‌شود که با نتایج این پژوهش در مورد تأثیر مثبت کود تلفیقی بر TSS هم‌راستا ست (Mohammadi *et al.*, 2020). اثر مثبت الگوی کشت P4 بر افزایش TSS نیز با نتایج تحقیقات Geren *et al.* (2008) درمورد بهبود کیفیت علوفه درکشت مخلوط مطابقت دارد.

نتیجه‌گیری کلی

نتایج این پژوهش نشان داد که تنش کمبود آب اگرچه باعث افزایش غلظت پروتئین در دانه ذرت و بیوماس آفتابگردان می‌شود، اما این افزایش به‌دلیل کاهش عملکرد بیوماس بوده و با کاهش کیفیت هضمی علوفه (افزایش فیبر شوینده اسیدی (ADF) و فیبر شوینده خنثی (NDF) و کاهش کل مواد جامد محلول (TSS) همراه است. از سوی دیگر، کاربرد تلفیقی کودهای شیمیایی و آلی-زیستی (تیمار F3: شامل تمام موارد تیمار آلی-زیستی به همراه ۲۰۰ کیلوگرم اوره در هکتار به صورت سرک) در مقایسه با مصرف صرفاً شیمیایی (تیمار F1) یا آلی-زیستی (تیمار F2)، توانست ضمن تأمین بهتر عناصر غذایی، اثرات منفی تنش را بر کیفیت علوفه تعدیل کرده و شاخص‌های کیفی را بهبود بخشد. در بین الگوهای مختلف کشت مخلوط، نسبت ۷۵ درصد ذرت + ۲۵ درصد آفتابگردان (الگوی P4) به‌عنوان بهترین ترکیب اختلاط از نظر کاهش فیبرهای نامحلول (فیبر شوینده اسیدی (ADF) و فیبر شوینده خنثی (NDF) و افزایش مواد مغذی محلول شامل قند دانه، قند بیوماس و کل مواد جامد محلول (TSS) شناخته شد. به‌طورکلی، استفاده هم‌زمان از مدیریت تلفیقی کود (تیمار F3) و الگوی کشت ۷۵ درصد ذرت + ۲۵ درصد آفتابگردان (الگوی P4)، ضمن کاهش وابستگی به کودهای شیمیایی، می‌تواند کیفیت تغذیه‌ای علوفه را در شرایط محدودیت آب بهبود بخشد. بنابراین، این رویکرد به‌عنوان راهبردی عملی و پایدار برای تولید علوفه باکیفیت در مناطق خشک و نیمه‌خشک قابل توصیه است. با این حال، به دلیل کاهش عملکرد بیوماس در شرایط تنش شدید، توصیه می‌شود در مناطقی با محدودیت آبی، از تنش ملایم (۶۵ درصد تخلیه رطوبت) همراه با تیمارهای مذکور استفاده شود تا ضمن حفظ کیفیت، عملکرد قابل‌قبولی نیز حاصل گردد.

تشکر و قدردانی

بدینوسیله مراتب سپاس و قدردانی خودرا از حمایتهای بی دریغ خانواده گرامیم ودانشگاه آزاد اهواز درانجام این پژوهش ابراز میدارم.

References

Ali, Z., Ali, A., Khan, B.A., Nadeem, M.A., Asif, M., Ashraf, A., Safdar, M.E., Inyat, I., Nijabat, A., and Hussain, R. 2023. Evaluation of sunflower-maize silage for yield and quality traits. *Pakistan Journal of Agricultural Research*, *36(3)*, 263-269.

Anil, L., Park, J., and Phipps, R.H. 2000. The potential of forage–maize intercrops in ruminant nutrition. *Animal Feed Science and Technology*, *86(3-4),* 157-164.

Dubois, M., Gilles, K.A., Hamilton, J.K., Rebers, P.A., and Smith, F. 1956. Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Analytical Chemistry*, *28(3),* 350-356.

Eskandari, H. 2012. Yield and quality of forage production in intercropping of maize with cowpea and mungbean as double cropped. *Journal of Basic and Applied Scientific Research*, *2(1),* 93-97.

Esmaili Khanbehbin, H., Dadashi, M.R., Feyzbakhsh, M.T., Sheikh, F., and Nakhzari Moghaddam, A. 2025. Effects of drought stress on the quantitative and qualitative forage yield of low tannin varieties of faba bean (*Vicia faba* L.). *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, *35(2),* 121-138.

Geren, H., Avcioglu, R., Soya, H., and Kir, B. 2008. Intercropping of corn with cowpea and bean: Biomass yield and silage quality. *African Journal of Biotechnology*, *7(22),* 4100-4104.

Ginwal, D.S., Kumar, R., Ram, H., Meena, R.K., and Kumar, U. 2019. Quality characteristics and nutrient yields of maize and legume forages under changing intercropping row ratios. *The Indian Journal of Animal Sciences*, *89(3),* 281-286.

Hamed, A., Zamir, M., Tanveer, A., and Yaseen, M. 2022. Intercropping of maize with soybean under integrated nutrient management showcases the role of organic fertilizers in silage production and quality. *Pakistan Journal of Biochemistry and Biotechnology*, *3(1),* 119-135.

Horwitz, W. (Ed.). 2000. *Official Methods of Analysis of AOAC International*.

17th ed. AOAC International.

Igwenagu, C., Power, S.A., Carrillo, Y., and Macdonald, C.A. 2025. Integrated nutrient management with biostimulant decreases drought effect on pasture species depending on soil type. *Sustainable Agriculture and Environment*, *1(1),* 1-15.

Javanmard, A., Amani Chiani, M., and Rasouli, F. 2018. Quantitative and qualitative improvement of forage in maize-legume intercropping with Nitroxin biofertilizer application in the second cropping season. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, *28(1),* 1-17. (In Persian with English Summary)

Joshi, R., Patel, D., Dabhi, D., Joshi, T., Chaudhary, J., and Kapadiya, S. 2026. Crop diversification for sustainable agriculture: A review of productivity, soil health, resource use efficiency and economic sustainability. *International Journal of Advanced Chemistry Research*, *8(7),* 1-4.

Lashkari, M., Menexes, G., Kalfas, I., Gatzolis, I., and Dordas, C. 2022. Water stress effects on the morphological, physiological characteristics of maize (*Zea mays* L.), and on environmental cost. *Agronomy*, *12(10),* 2386.

Liu, H., Gao, X., Li, C., Cai, Y., Song, X., and Zhao, X. 2025. Intercropping increases plant water availability and water use efficiency: A synthesis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *379*, 109360.

Mohammadi, H., Heidari, G., and Sohrabi, Y. 2020. The effects of biological and chemical nitrogen fertilizers and iron micronutrient on forage quality and yield of maize (*Zea mays* L.). *Plant Productions*, *43(2),* 185-198. (In Persian with English Summary)

Mrkovacki, N., and Milic, V. 2001. Use of *Azotobacter chroococcum* as potentially useful in agricultural application. *Annals of Microbiology*, *51,* 145-158.

Pourjamshid, S.A., Moshtati, A., Siadat, S.A., Moradi Telavat, M.R., and Khodaei Joghan, A. 2026. Effect of drought stress, integrated application

of chemical and organic fertilizers, and planting method on forage yield of silage maize Single Cross 704. *Iranian Journal of Crop Sciences*, *25(2),* 170-189. (In Persian with English Summary)

Rad, R., Sharifabad, H., Torabi, M., Azizinejad, R., Salemi, H., and Soltanabadi, M. 2021. Impact of drought stress on biochemical responses, energy, and water productivity on maize forage (*Zea mays* L.). *SN Applied Sciences*, *3(11)*, 1-14.

Rao V. M. M. 2026. Sustainable Agriculture and Food Security: A Path to a Resilient Future. *International Journal of Scientific Research in Science and Technology*, *13(11),* 19-28.

Schittenhelm, S. 2010. Effect of drought stress on yield and quality of maize/sunflower and maize/sorghum intercrops for biogas production. *Journal of Agronomy and Crop Science*, *196(4)*, 253-261.

Sturz, A.V., and Christie, B.R. 2003. Beneficial microbial allelopathies in the root zone: The management of soil quality and plant disease with rhizobacteria. *Soil and Tillage Research*, *72(2)*, 197-123.

Van Soest, P.J. 1994. *Nutritional Ecology of the Ruminant*. 2nd ed. Cornell University Press.

Walton, P. 1990. *Management of forage crop production*. M. Shanechi, Trans. Astan Quds Razavi Publications. (In Persian)

Zi, X., Wang, W., Zhou, S., Zhou, F., Rao, D., Shen, P., Fang, S., and Wu, B. 2022. Prolonged drought regulates the silage quality of maize (*Zea mays* L.): Alterations in fermentation microecology. *Frontiers in Plant Science*, *13*, 1075407.

Investigating the Effect of Water Deficit Stress and Integrated Fertilizer Management on Forage Quality and Crude Protein in Maize-Sunflower Intercropping

Shiva Zarei chaleshtori [1,3], Mojtaba Alavi fazel [2*], Mani Mojaddam [1], Tayeb Saki nejad [1], Seyed Keyvan Marashi [1]

1. Department of Agronomy, Ahv. C., Islamic Azad University, Ahvaz, Iran
2. Department of Agronomy, SR.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran (Corresponding author)
3. Department of Agronomy, SR.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran

Received: August 2026 Accepted: October 2026- DOI: 10.22092/aj.2026.373918.1730

Extended Abstract

Zarei chaleshtori, SH., Alavi fazel, M., Mojaddam , M., Saki nejad, T., Marashi, S., Investigating the Effect of Water Deficit Stress and Integrated Fertilizer Management on Forage Quality and Crude Protein in Maize-Sunflower Intercropping
Applied Research in Field Crops Vol 37, No.3, 2024, 15-18: 94-115 (in Persian)

Introduction:

Today, food security faces two fundamental challenges: water scarcity and environmental degradation caused by the excessive use of chemical inputs. The transition from conventional production systems toward sustainable agriculture is an undeniable necessity. Sustainable agriculture aims to meet food needs while preserving environmental quality and the capacity of water and soil resources. One of the key strategies in this regard is increasing biodiversity through intercropping, defined as the simultaneous cultivation of two or more plant species in a single field. Studies have shown that intercropping systems, compared to monoculture, have higher resource utilization and can increase water and land productivity. Furthermore, combining intercropping with integrated nutrient management can significantly improve forage quality while reducing dependence on chemical fertilizers. Maize and sunflower are important crops that play an essential role in human and animal nutrition. However, the main limitation of maize forage is its

Email address of the corresponding author: mojtaba.alavifazel@iau.ac.ir

low crude protein concentration. Therefore, intercropping maize with sunflower, which has higher protein content, can overcome this limitation. This experiment was conducted to evaluate the effects of different levels of water deficit stress and integrated nutrient management on forage quality indicators in maize-sunflower intercropping.

Materials and Methods:

A two-year experiment was conducted as split-split plots in a randomized complete block design with three replications in Mahshahr County, Khuzestan Province, Iran. Main plots consisted of three irrigation regimes: irrigation after depletion of 50% (I1), 65% (I2), and 80% (I3) of available soil water. Sub-plots included three fertilizer treatments: chemical fertilizer (F1) including 350 kg/ha urea, 150 kg/ha triple superphosphate, and 200 kg/ha potassium sulfate; organic-biological fertilizer (F2) including compost (30 t/ha) along with biological fertilizers; and integrated fertilizer (F3) including all components of F2 plus 200 kg/ha urea. Sub-sub-plots comprised five intercropping patterns: maize monoculture (P1), sunflower monoculture (P2), 50% maize + 50% sunflower (P3), 75% maize + 25% sunflower (P4), and 25% maize + 75% sunflower (P5). Sampling for nitrogen and protein was performed at dough-dent stage for maize and full maturity for sunflower. Total nitrogen was measured using the Kjeldahl method. Maize grain protein was calculated as N × 6.25, and sunflower biomass protein as N × 6.25. Fiber Acid Detergent Fiber (ADF), Neutral Detergent Fiber (NDF), ash, sugar, organic matter, and TSS were determined using standard protocols. Data were analyzed using SAS 9.4, and means were compared by Duncan's test at $p \leq 0.05$.

Results and Discussion:

Increasing drought intensity increased protein concentration in maize grain (up to 13%) and sunflower biomass (up to 2.55%), but simultaneously reduced digestibility by increasing ADF and NDF and decreasing TSS. Integrated fertilizer (F3) showed superior effects on improving forage quality compared to the other two methods across all stress levels. The 75% maize + 25% sunflower pattern

(P4) was identified as the best mixture for reducing insoluble fibers and increasing nutrient content. Significant three-way interactions highlighted the interdependence of water, nutrition, and cropping arrangement in determining forage quality. The protein increase under drought is largely a concentration effect due to reduced dry matter, while the rise in fiber reflects accelerated lignification as a stress response. Increased ash content results from mineral accumulation as organic matter declines. Reduced sugar and TSS are linked to impaired photosynthesis and carbohydrate metabolism under stress. These findings align with previous research on maize-sunflower intercropping and integrated fertilization.

Conclusion:

Although drought stress raised protein concentration in maize grain and sunflower biomass, this was associated with reduced forage digestibility. Integrated fertilizer application (F3) effectively mitigated stress impacts and improved quality indicators. The 75% maize + 25% sunflower intercropping pattern (P4) proved optimal for reducing insoluble fibers and increasing soluble nutrients. Combined use of integrated fertilization and P4 reduces chemical dependency and enhances forage nutritional quality under water-limited conditions, offering a sustainable strategy for arid and semi-arid regions. However, under severe stress, moderate irrigation (65% depletion) is recommended alongside these treatments to maintain both quality and acceptable yield.

Keywords: Water deficit stress, Intercropping, Integrated fertilizer management, Forage quality, Crude protein.

References:

Rao V. M. M. 2026. Sustainable Agriculture and Food Security: A Path to a Resilient Future. *International Journal of Scientific Research in Science and Technology*, 13(11), 19-28.

Anil, L., Park, J., and Phipps, R.H. 2000. The potential of forage–maize

intercrops in ruminant nutrition. *Animal Feed Science and Technology*, 86(3-4), 157-164.

Liu, H., Gao, X., Li, C., Cai, Y., Song, X., and Zhao, X. 2025. Intercropping increases plant water availability and water use efficiency: A synthesis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 379, 109360.