19th Iranian Soil Science Congress
2-4 December, 2025

نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران
۱۱ تا ۱۳ آذرماه ۱۴۰۴

مدیریت جامع‌نگر و هوشمند خاک و آب
Holistic and Smart Soil and Water Management
دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران
College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran

۰۴۲۵۰-۳۲۰۳۱

بهبود تاب‌آوری و افزایش عملکرد گندم دیم با مدیریت تلفیقی تغذیه‌ای: اثرات هم‌افزای کودهای زیستی، اسید هیومیک و محلول‌پاشی در شرایط نیمه‌خشک

محمد سعید تدین[1*]، سید مجید موسوی[2]، جعفر شهابی‌فر[3]، سهراب صادقی[4]

۱- نویسنده مسئول*، عضو هیئت علمی بخش تحقیقات خاک و آب مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس، سازمان تحقیقات و آموزش کشاورزی (**AREEO**)، شیراز، ایران پست الکترونیکی **m.tadayon@areeo.ac.ir**

۲- عضو هیئت علمی مؤسسه تحقیقات خاک و آب (**SWRI**)، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی (**AREEO**)، کرج، ایران.

۳- بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی قزوین، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی (**AREEO**)، قزوین، ایران

۴- عضو هیئت علمی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس، سازمان تحقیقات و آموزش کشاورزی (**AREEO**)، شیراز، ایران

چکیده

این پژوهش کارایی مدیریت تغذیه‌ای تلفیقی (INM) را برای بهبود تاب‌آوری به خشکی و افزایش بهره‌وری گندم دیم (*Triticum aestivum* L. var. Sadra) در شرایط نیمه‌خشک قزوین، ایران بررسی کرد. در آزمایش مزرعه‌ای دوساله (۱۴۰۲–۱۴۰۳)، چهار تیمار شامل کوددهی مرسوم بر اساس آزمون خاک (ON)، بذرمالی با زیست‌کودهای (*Pseudomonas fluorescens*، *Bacillus subtilis* و قارچ‌های میکوریز آربوسکولار) همراه با کاربرد اسید هیومیک در خاک (BH)، محلول‌پاشی عناصر (اسید فولیک، عصاره جلبک دریایی، سیلیکات پتاسیم و اسیدهای آمینه) (F) و ترکیب محلول‌پاشی و اصلاح خاکی (F+BH) ارزیابی شد. تیمار F+BH بالاترین عملکرد را داشت و عملکرد دانه را ۴۲/۱ درصد (۵۴۹۱ کیلوگرم در هکتار) و زی‌توده را ۳۳/۶ درصد نسبت به ON افزایش داد که ناشی از جذب بهتر عناصر (۳۱/۶ درصد افزایش تراکم خوشه و ۲۵/۷ درصد افزایش وزن دانه) و بهبود فتوسنتز (۴۶/۷ درصد) و هدایت روزنه‌ای (۶۰ درصد) بود. پرولین نیز ۷۲/۷ درصد بیشتر شد که نشان‌دهنده تنظیم اسمزی بهتر بود. تحلیل مؤلفه‌های اصلی نشان داد ۹۷/۷ درصد تغییرات عملکرد تحت تأثیر عامل رشد یکپارچه بود و بور و شاخص برداشت مؤثر بودند. تحلیل اقتصادی کارآمدی BH (نسبت سود به هزینه ۱/۸۳) را تأیید کرد و F+BH حداکثر بهره‌وری را فراهم ساخت. ترکیب اصلاحات خاکی با تغذیه برگی عملکرد را از طریق ارتقای سلامت خاک، توسعه ریشه و تحمل خشکی به‌صورت هم‌افزا افزایش داد.

واژگان کلیدی: اسید هیومیک، تاب‌آوری به خشکی، مدیریت تغذیه‌ای تلفیقی، گندم دیم، زیست‌کود.

مقدمه

کشاورزی دیم بیش از ۸۰ درصد تولید جهانی گندم را تأمین می‌کند، اما تغییرات اقلیمی و خشکسالی‌های متغیر تهدید جدی برای این بخش محسوب می‌شود (Leng and Hall, 2019). در مناطق خشک ایران با میانگین بارندگی سالانه تنها ۲۲۸ میلی‌متر (Sabzevar et al., 2021)، سامانه‌های گندم دیم به‌شدت در برابر بارش‌های نامنظم، تبخیر و تعرق بالا و تخریب خاک آسیب‌پذیرند (Motazedian et al. 2019). در چنین شرایطی، راهبردهای نوین زراعی برای حفظ بهره‌وری و مدیریت منابع محدود حیاتی است (El Kenawy et al., 2024). گندم (*Triticum aestivum* L.) حدود ۲۰ درصد نیاز کالری روزانه جهان را تأمین می‌کند و با سطح زیرکشت ۲۱۸ میلیون هکتار، سالانه بیش از ۷۷۱ میلیون تن تولید دارد (Ibrahim et al., 2024). پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۵۰ تولید گندم باید ۶۰ درصد افزایش یابد (Ulukan, 2024)، اما خشکسالی که بیش از ۵۰ درصد مناطق گندم‌کاری را درگیر می‌کند، مهم‌ترین مانع بهره‌وری است (Singh et al., 2024). خشکی با کاهش هدایت روزنه‌ای، فتوسنتز و ایجاد گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) فیزیولوژی گیاه را مختل می‌کند (Qiao et al., 2024). راهبردهای مدیریت تغذیه‌ای به‌ویژه با استفاده از کودهای تلفیقی و اصلاحات خاکی مانند سیلیکون، اسید هیومیک، زیست‌کودها و عصاره جلبک دریایی، توانسته‌اند جذب آب و مواد غذایی، فعالیت‌های آنزیمی و مقاومت به تنش را بهبود دهند (Zulfiqar et al., 2023; Cheraghi et al., 2024). این مطالعه با هدف بررسی تأثیر مدیریت تلفیقی عناصر غذایی بر گندم دیم در استان قزوین، تمرکز خود را بر پویایی خاک-گیاه، پاسخ‌های فیزیولوژیکی و اقتصادی‌بودن این رویکرد برای کشاورزان خرد معطوف کرده است.

مواد و روش‌ها

این مطالعه مزرعه‌ای طی دو سال (۱۴۰۲–۱۴۰۳) روی گندم دیم (*Triticum aestivum* L. var. Sadra) در شهرستان اوج، استان قزوین، ایران و تحت بارندگی طبیعی انجام شد. در مرحله پر شدن دانه (اسفند تا اردیبهشت) افزایش دما و کاهش بارش تنش خشکی انتهایی را تشدید می‌کند. برای بررسی ویژگی‌های خاک، نمونه‌برداری مرکب از دو عمق (۰–۳۰ و ۳۰–۶۰ سانتی‌متر) انجام و آزمون خاک براساس روش موسسه تحقیقات خاک و آب انجام شد. طراحی آزمایش به‌صورت بلوک‌های کامل تصادفی با چهار تکرار و در کرت‌هایی به ابعاد ۴×۶ متر با فاصله حفاظتی ۱ متر بین کرت‌ها اجرا شد. بذر گندم (Sadra) به‌عنوان رقم زودرس و مقاوم به گرما، با تراکم ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار کاشته شد. تیمارها شامل: (۱) تغذیه بهینه بر اساس آزمون خاک (ON)، ۲) بذرمال با زیست‌کودهای (*Pseudomonas fluorescens*، *Bacillus subtilis* و قارچ‌های میکوریز آربوسکولار) همراه با اسید هیومی(BH) ، ۳) محلول‌پاشی برگی شامل اسید فولیک، عصاره جلبک دریایی، سیلیکات پتاسیم و آمینواسیدها (F) و (۴) ترکیب خاکی-برگی (F+BH) بود. کوددهی پایه در سال اول باDAP ، سولفات روی و بوراکس انجام و در سال دوم با سوپرفسفات ساده، اوره و کودهای کلاته جایگزین شد. عملیات محلول‌پاشی در مراحل پنجه‌زنی، طویل شدن ساقه و پر شدن دانه انجام شد. ویژگی‌های مورد اندازه‌گیری شامل شاخص‌های فیزیولوژیک) کلروفیل a وb ، فتوسنتز، هدایت روزنه‌ای، پتانسیل آب برگ و محتوای نسبی آب برگ(، صفات رشدی (ارتفاع، سطح برگ، وزن خشک ریشه و اندام هوایی) و اجزای عملکرد (تعداد خوشه، تعداد دانه در خوشه، وزن هزار دانه، عملکرد دانه و شاخص برداشت) بود. کلروفیل با اسپکتروفوتومتر، عناصر غذایی برگ با روش پایپر، نیتروژن با روش کجلدال و عناصر کم‌مصرف با جذب اتمی اندازه‌گیری شد. آنالیز آماری با آزمون ANOVA و آزمون دانکن در سطح ۵ درصد با نرم‌افزار SAS انجام شد. روابط چندمتغیره با تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) و تجزیه اقتصادی با بودجه‌بندی جزئی برای ارزیابی سود-هزینه تیمارها انجام گرفت.

نتایج و بحث

نتایج این مطالعه دوساله نشان داد که کاربرد مدیریت تغذیه‌ای تلفیقی (INM) شامل ترکیب محلول‌پاشی به‌همراه زیست‌کود و اسید هیومیک (F+BH) توانست وضعیت تغذیه‌ای، شاخص‌های فیزیولوژیکی و اجزای عملکرد گندم دیم را در شرایط اقلیم نیمه‌خشک به‌طور معناداری بهبود دهد. در سال دوم اجرای این تیمار، غلظت نیتروژن، فسفر و پتاسیم در پرچم و دانه به‌ترتیب بین ۱۲ تا ۱۷ درصد افزایش یافت و عناصر ریزمغذی مانند آهن، مس و بور نیز افزایش محسوسی را نشان دادند، درحالی‌که

تغییرات عناصر دیگری مانند کلسیم و منیزیم معنی‌دار نبود (جدول ۱). تیمار F+BH توانست نیتروژن، فسفر، پتاسیم، روی، مس و بور پرچم را به‌ترتیب تا ۳۱/۵۸، ۲۵، ۲۰/۴۵، ۲۶/۶۷، ۴۲/۸۶ و ۳۰ درصد نسبت به شاهد افزایش دهد که نشان‌دهنده هم‌افزایی محلول‌پاشی و تغذیه زیستی در افزایش جذب و انتقال عناصر بود. این اثرات به‌ویژه در سال دوم، هم‌زمان با بهبود تدریجی خاک و افزایش ماده آلی و فسفر قابل جذب (تا ۱۰۳ درصد)، شدت گرفتند.

جدول ۱- اثرات ساده و متقابل سال و مدیریت تغذیه‌ای تلفیقی بر غلظت عناصر معدنی پرچم گندم دیم (*Triticum aestivum* L. var. Sadra) طی دو سال

تیمار	نیتروژن (%)	فسفر (%)	پتاسیم (%)	آهن (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	روی (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	منگنز (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	مس (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	بور (میلی‌گرم بر کیلوگرم)
سال‌ها								
۱۴۰۲	۲,۰۸b	۰,۳۴b	۲,۲۸b	۲۲۵b	۳۱a	۸۷a	۱۵,۵b	۲۰,۵b
۱۴۰۳	۲,۳۵a	۰,۳۸a	۲,۵۸a	۲۴۵a	۳۶a	۹۵a	۱۸a	۲۴,۵a
F آزمون	*	*	*	*	ns	ns	*	*
مدیریت تغذیه‌ای تلفیقی								
(ON) شاهد	۱,۹۰b	۰,۳۲b	۲,۲۰b	۲۲۰a	۳۰b	۸۵a	۱۴b	۲۰b
BH	۲,۲۰ab	۰,۳۵ab	۲,۴۰ab	۲۳۵a	۳۳ab	۹۰a	۱۶ab	۲۲ab
F	۲,۲۵ab	۰,۳۶ab	۲,۴۵ab	۲۴۰a	۳۴ab	۹۲a	۱۷ab	۲۲ab
F+BH	۲,۵۰a	۰,۴۰a	۲,۶۵a	۲۵۵a	۳۸a	۹۸a	۲۰a	۲۶a
F آزمون	**	**	**	ns	**	ns	*	**
اثر متقابل								
سال اول × شاهد	۱,۸۵d	۰,۳۰d	۲,۱۰d	۲۱۰b	۲۸d	۸۲b	۱۳c	۱۹d
سال دوم × شاهد	۱,۹۵cd	۰,۳۴cd	۲,۳۰bcd	۲۳۰ab	۳۲cd	۸۸ab	۱۵bc	۲۱bc
BH × سال اول	۲,۱۰bcd	۰,۳۳bcd	۲,۳۰cd	۲۲۵ab	۳۱bcd	۸۷ab	۱۵bc	۲۰cd
BH × سال دوم	۲,۳۰abc	۰,۳۷abc	۲,۵۰abc	۲۴۵ab	۳۵abc	۹۳ab	۱۷ab	۲۴b
F × سال اول	۲,۰۵cd	۰,۳۴cd	۲,۲۰d	۲۳۰ab	۳۲bcd	۸۸ab	۱۶ab	۲۰d
F × سال دوم	۲,۴۵ab	۰,۳۸ab	۲,۷۰ab	۲۵۰a	۳۶ab	۹۶a	۱۸ab	۲۴ab
F+BH × سال اول	۲,۳۰abc	۰,۳۷abc	۲,۵۰abc	۲۴۰ab	۳۴abc	۹۲ab	۱۸ab	۲۳bc
F+BH × سال دوم	۲,۷۰a	۰,۴۳a	۲,۸۰a	۲۷۰a	۴۲a	۱۰۴a	۲۲a	۲۹a
F آزمون	**	**	**	*	**	*	**	**

شاخص‌های کلروفیل

افزایش نشان دادند. تیمار F+BH نسبت به شاهد، فتوسنتز را ۴۶ درصد، کلروفیل a را ۴۳ درصد و هدایت روزنه‌ای را ۶۰ درصد افزایش داد. این افزایش همراه با بهبود پتانسیل آب برگ و تجمع بیشتر پرولین (۷۲ درصد) بود که نشان‌دهنده ارتقای ظرفیت سازگاری اسمزی و تحمل تنش خشکی است. در سطح رشد و عملکرد، در سال دوم وزن خشک ریشه، بخش هوایی و تعداد دانه در خوشه به‌ترتیب ۲۲/۲، ۱۷/۷ و ۱۵/۶ درصد افزایش یافتند. تیمار ترکیبی ارتفاع بوته را ۲۵ درصد، شاخص سطح برگ را ۴۲/۹ درصد و وزن خشک ریشه را ۶۰ درصد نسبت به شاهد بالا برد. همچنین تعداد خوشه، وزن هزار دانه و درصد پروتئین دانه به‌ترتیب ۳۱/۶، ۲۵/۷ و ۱۷/۶ درصد بیشتر شد. این تغییرات عمدتاً به‌دلیل خاصیت کلات‌کنندگی اسید هیومیک، بهبود جذب عناصر توسط میکروارگانیسم‌های مفید و بهره‌برداری مستقیم از ریزمغذی‌ها از طریق محلول‌پاشی بود (Adil et al., 2024).

جدول ۲- اثرات ساده و متقابل سال و مدیریت تغذیه‌ای تلفیقی بر عملکرد و اجزای عملکرد گندم دیم (*Triticum aestivum* L. var. Sadra) طی دو سال

تیمار	وزن خشک ریشه (گرم در بوته)	وزن خشک بخش هوایی (گرم در بوته)	تعداد خوشه	تعداد دانه در خوشه	وزن هزار دانه (گرم)	درصد پروتئین دانه	عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار)
سال‌ها							
۱۴۰۲	۱,۸b	۱۲,۴b	۴۲۰b	۳۲b	۳۸,۰b	۱۱,۰a	۴۳۷۶b
۱۴۰۳	۲,۲a	۱۴,۶a	۴۶۵a	۳۷a	۴۱,۵a	۱۱,۲b	۵۰۴۳a
F آزمون	**	**	**	**	**	*	**

مدیریت تغذیه‌ای تلفیقی							
شاهد (ON)	۱٫۵c	۱۰٫۰c	۳۸۰c	۲۸c	۳۵٫۰c	۱۰٫۲c	۳۸۶۳c
BH	۱٫۹b	۱۳٫۵b	۴۴۰b	۳۴b	۳۹٫۵b	۱۱٫۰b	۴۶۴۰b
F	۲٫۰ab	۱۴٫۰ab	۴۵۰ab	۳۶ab	۴۰٫۵ab	۱۱٫۳ab	۴۸۴۴ab
F+BH	۲٫۴a	۱۶٫۵a	۵۰۰a	۴۰a	۴۴٫۰a	۱۲٫۰a	۵۴۹۱a
آزمون F	**	**	**	**	**	**	**
اثر متقابل							
ON × سال اول	۱٫۳e	۹٫۰e	۳۵۰e	۲۵e	۳۳٫۰e	۱۰٫۵d	۳۵۴۷e
ON × سال دوم	۱٫۷d	۱۱٫۰d	۴۱۰d	۳۱d	۳۷٫۰d	۹٫۹e	۴۱۷۹d
BH × سال اول	۱٫۷d	۱۲٫۰cd	۴۲۰cd	۳۲cd	۳۷٫۵cd	۱۰٫۸cd	۴۳۱۷d
BH × سال دوم	۲٫۱bc	۱۵٫۰bc	۴۶۰bc	۳۶bc	۴۱٫۵bc	۱۱٫۲bc	۴۹۶۳bc
F × سال اول	۱٫۸cd	۱۳٫۰bc	۴۳۰bc	۳۴bc	۳۹٫۰bc	۱۱٫۰cd	۴۵۱۴cd
F × سال دوم	۲٫۲ab	۱۵٫۰ab	۴۷۰ab	۳۸ab	۴۲٫۰ab	۱۱٫۶ab	۵۱۷۳ab
F+BH × سال اول	۲٫۲ab	۱۵٫۵ab	۴۸۰ab	۳۸ab	۴۲٫۵ab	۱۱٫۸ab	۵۱۲۷bc
F+BH × سال دوم	۲٫۶a	۱۷٫۵a	۵۲۰a	۴۲a	۴۵٫۵a	۱۲٫۲a	۵۸۵۵a
آزمون F	**	**	**	**	**	**	**

یافته‌های تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) نیز نشان داد که بیش از ۹۷ درصد تغییرات به‌وسیله یک مؤلفه اصلی PC1 توجیه شد که بیانگر ارتباط قوی میان تغذیه، رشد و عملکرد است. شاخص برداشت و نقش بور در توسعه زایشی PC3 نیز تأکید دارد که مدیریت تغذیه‌ای دقیق می‌تواند بهره‌وری سیستم‌های دیم را افزایش دهد (Christian et al., 2023; Salem et al., 2024).

جدول ۳- تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) و ضرایب متغیرها در سه مؤلفه اصلی برای ویژگی‌های تعیین‌شده گندم دیم (*Triticum aestivum* L. var. Sadra)

متغیر	مؤلفه اصلی ۱ (PC1)	مؤلفه اصلی ۲ (PC2)	مؤلفه اصلی ۳ (PC3)
غلظت عناصر غذایی برگ			
نیتروژن برگ(%)	-۰٫۱۶۴	-۰٫۰۷۷	۰٫۱۲۳
فسفر برگ(%)	-۰٫۱۶۳	۰٫۰۹۵	۰٫۱۰۹
پتاسیم برگ(%)	-۰٫۱۶۴	-۰٫۰۰۵	۰٫۰۸۳
کلسیم برگ(%)	-۰٫۱۶۲	۰٫۱۷۱	-۰٫۰۷۹
منیزیم برگ(%)	-۰٫۱۶۳	۰٫۰۹۵	۰٫۱۰۹
آهن برگ (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	-۰٫۱۶۴	۰٫۰۰۴	-۰٫۰۱۵
روی برگ (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	-۰٫۱۶۳	۰٫۰۹۵	۰٫۱۰۹
منگنز برگ (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	-۰٫۱۶۴	۰٫۰۶۶	-۰٫۰۰۷
مس برگ (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	-۰٫۱۶۳	۰٫۱۳۸	۰٫۰۰۴
بور برگ (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	-۰٫۱۵۸	۰٫۲۱۹	۰٫۶۰۱
نیتروژن دانه	-۰٫۱۶۴	۰٫۰۰۴	-۰٫۰۱۵
فسفر دانه(%)	-۰٫۱۶۴	۰٫۰۱۹	-۰٫۱۹۰
پتاسیم دانه	-۰٫۱۶۴	۰٫۰۰۴	-۰٫۰۱۵
کلسیم دانه (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	-۰٫۱۶۴	۰٫۰۱۰	-۰٫۰۸۹
منیزیم دانه (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	-۰٫۱۶۴	۰٫۰۱۰	-۰٫۰۸۹
آهن دانه (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	-۰٫۱۶۴	۰٫۰۱۹	-۰٫۱۹۰
روی دانه (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	-۰٫۱۶۳	۰٫۰۹۵	۰٫۱۰۹
منگنز دانه (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	-۰٫۱۶۳	۰٫۱۲۱	-۰٫۱۱۶
مس دانه (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	-۰٫۱۶۴	-۰٫۰۸۶	۰٫۰۶۲
بور دانه (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	-۰٫۱۶۰	۰٫۲۲۱	۰٫۲۷۹
کلروفیلa	-۰٫۱۶۴	۰٫۰۰۴	-۰٫۰۱۵
کلروفیلb	-۰٫۱۶۴	۰٫۰۱۹	-۰٫۱۹۰
نرخ فتوسنتز	-۰٫۱۶۴	۰٫۰۰۴	-۰٫۰۱۵

هدایت روزنه‌ای	-۰,۱۶۴	۰,۰۱۰	-۰,۰۸۹
محتوای نسبی آب برگ	-۰,۱۶۴	-۰,۰۵۳	-۰,۰۹۲
پتانسیل آب برگ(Ψleaf)	-۰,۱۶۳	-۰,۰۶۰	-۰,۳۱۷
پرولین	-۰,۱۶۳	۰,۰۹۵	۰,۱۰۹
ارتفاع بوته	-۰,۱۶۳	-۰,۱۵۲	-۰,۰۹۶
شاخص سطح برگ	-۰,۱۶۳	-۰,۱۱۸	-۰,۱۸۰
وزن خشک ریشه	-۰,۱۶۴	-۰,۰۰۵	۰,۰۸۳
وزن خشک بخش هوایی	-۰,۱۶۳	-۰,۱۳۴	۰,۱۰۳
تعداد خوشه	-۰,۱۶۴	-۰,۰۷۷	۰,۱۲۳
تعداد دانه در خوشه	-۰,۱۶۳	-۰,۱۱۸	-۰,۱۸۰
وزن دانه	-۰,۱۶۴	-۰,۰۹۱	۰,۰۲۱
درصد پروتئین دانه	-۰,۱۶۴	-۰,۰۳۳	-۰,۱۱۹
عملکرد دانه	-۰,۱۶۴	-۰,۰۶۳	-۰,۰۰۶
بیوماس	-۰,۱۶۳	۰,۱۳۲	-۰,۰۹۷
شاخص برداشت	-۰,۱۱۴	**-۰,۸۱۵**	۰,۲۸۸
مقدار ویژه	۳۷,۱۳۶	۰,۷۶۹	۰,۰۹۵
درصد واریانس تبیین‌شده(%)	۹۷,۷	۲,۰	۰,۲
درصد واریانس تجمعی(%)	۹۷,۷	۹۹,۸	۱۰۰
معیار انتخاب(SC)	۰,۰۸۲۰	۰,۵۷۰	۱,۶۲۲

ضرایب پررنگ در ماتریس بارگذاری‌ها نشان‌دهنده ویژگی‌های غالب در مؤلفه‌های اصلی هستند که بر اساس معیار انتخاب (۰/۵ √ / مقدار ویژه = SC) تعیین شده‌اند. ویژگی‌های مرتبط با این ضرایب پررنگ، رابطه معنی‌داری با مؤلفه‌های اصلی مربوطه دارند.

از منظر اقتصادی، تیمار F+BH بیشترین عملکرد دانه را داشت، اما تیمار BH با نسبت سود به هزینه مطلوب‌تر (۱/۸۳) گزینه‌ای بهینه برای مزارع کم‌درآمد و اقلیم‌های متغیر محسوب می‌شود. درنهایت، نتایج این تحقیق اهمیت کاربرد هم‌زمان زیست‌کود، اسید هیومیک و محلول‌پاشی را در افزایش بهره‌وری پایدار و تاب‌آوری گندم دیم در شرایط کم‌آب و خاک‌های آهکی نشان داد.

نتیجه‌گیری

یافته‌های این پژوهش دوساله به‌روشنی نشان داد که مدیریت تغذیه‌ای تلفیقی (INM) با استفاده هم‌زمان از زیست‌کود، اسید هیومیک و محلول‌پاشی (F+BH) می‌تواند بهره‌وری گندم دیم را در اقلیم‌های نیمه‌خشک به‌طور معنی‌داری بهبود بخشد. این شیوه با ارتقای دسترسی عناصر غذایی، بهبود شاخص‌های فیزیولوژیکی و تقویت سازوکارهای سازگاری اسمزی، سبب افزایش عملکرد، کیفیت دانه و بازده اقتصادی شد و اثرات آن در سال دوم به‌واسطه بهبود خاک و انباشت مواد آلی، تشدید گردید. بنابراین، کاربرد هدفمند این رویکرد می‌تواند راهکاری علمی و عملی برای افزایش پایداری تولید گندم در مناطق خشک و مواجهه با چالش‌های تغییر اقلیم باشد.

فهرست منابع

1. Adil, M., Lv, F., Cao, L., Lu, H., Lu, S., Gul, I., Bashir, S., Wang, Z., Li, T., Feng, W. (2024). Long-term effects of agronomic practices on winter wheat yield and NUE in dryland regions of USA and China: a long-term meta-analysis. *Scientific Reports*, 14(1), 24777.
2. Cheraghi, M., Motesharezadeh, B., Mousavi, S.M., Basirat, M., Alikhani, H., Zarebanadkouki, M. (2024). Application of silicon improves rhizosheath formation, morpho-physiological and biochemical responses of wheat under drought stress. *Plant and Soil*, 495(1–2).
3. Christian, J.I., Martin, E.R., Basara, J.B., Furtado, J.C., Otkin, J.A., Lowman, L.E., Hunt, E.D., Mishra, V., Xiao, X. (2023). Global projections of flash drought show increased risk in a warming climate. *Communications Earth & Environment*, 4(1), 165.
4. El Kenawy, A.M. (2024). Hydroclimatic extremes in arid and semi-arid regions: status, challenges, and future outlook. In *Hydroclimatic Extremes in the Middle East and North Africa*. Elsevier, pp. 1–22.

5. Ibrahim, A.A., Abd-Ellatif, S., Abdel Razik, E.S.S., Salem, K.F. (2024). Biodiversity of cereal crops and utilization in food and nutritional security. In *Sustainable Utilization and Conservation of Plant Genetic Diversity*. Springer, Singapore, pp. 31–61.
6. Leng, G., Hall, J. (2019). Crop yield sensitivity of global major agricultural countries to droughts and the projected changes in the future. *Science of the Total Environment*, 654, 811–821.
7. Motazedian, A., Kazemeini, S.A., Bahrani, M.J. (2019). Sweet corn growth and grain yield as influenced by irrigation and wheat residue management. *Agricultural Water Management*, 224, 105748.
8. Qiao, M., Hong, C., Jiao, Y., Hou, S., Gao, H. (2024). Impacts of drought on photosynthesis in major food crops and the related mechanisms of plant responses to drought. *Plants*, 13(13), 1808.
9. Sabzevar, M.S., Rezaei, A., Khaleghi, B. (2021). Incremental adaptation strategies for agricultural water management under water scarcity condition in Northeast Iran. *Regional Sustainability*, 2(3), 224–238.
10. Salem, M.A., Ismail, M.A., Radwan, K.H., Abd-Elhalim, H.M. (2024). Unlocking the potential of plant growth-promoting rhizobacteria to enhance drought tolerance in Egyptian wheat (*Triticum aestivum*). *Sustainability*, 16(11), 4605.
11. Singh, H., Kingra, P.K., Pal, R.K., Singh, S. (2024). Impact of abiotic stresses on wheat yield and strategies for mitigation: a comprehensive review. *Agricultural Research Journal*, 61(2).
12. Zulfiqar, U., Ahmad, M., Valipour, M., Ishfaq, M., Maqsood, M.F., Iqbal, R., Ali, M.F., Roy, R., El Sabagh, A. (2023). Evaluating optimum limited irrigation and integrated nutrient management strategies for wheat growth, yield and quality. *Hydrology*, 10(3), 56.

Enhancing Resilience and Yield of Rainfed Wheat through Integrated Nutrient Management: Synergistic Effects of Biofertilizers, Humic Acid, and Foliar Application under Semi-Arid Conditions

Mohammad Saeed Tadayon[1], Seyed Majid Mousavi[2], Jafar Shahabi-Far[3], Sohrab Sadeghi[4]*

1- *Corresponding author*, Faculty Member, Soil and Water Research Department, Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Shiraz, Iran. Email: m.tadayon@areeo.ac.ir

2- Faculty Member, Soil and Water Research Institute (SWRI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran.

3- Soil and Water Research Department, Qazvin Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Qazvin, Iran.

4- Faculty Member, Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Shiraz, Iran.

Abstract

This study evaluated the effectiveness of integrated nutrient management (INM) strategies for improving drought resilience and enhancing productivity of rainfed wheat (*Triticum aestivum* L. var. Sadra) under semi-arid conditions in Qazvin, Iran. In a two-year field experiment (2023–2024), four treatments were tested: (1) conventional fertilization based on soil testing (ON); (2) seed priming with biofertilizers (*Pseudomonas fluorescens*, *Bacillus subtilis*, and arbuscular mycorrhizal fungi) combined with soil application of humic acid (BH); (3) foliar application of nutrients including fulvic acid, seaweed extract, potassium silicate, and amino acids (F); and (4) a combined foliar and soil amendment approach (F+BH). Results showed that the F+BH treatment significantly outperformed other treatments, increasing grain yield by 42.1% (5,491 kg ha^{-1}) and biomass by 33.6% (15,082 kg ha^{-1}) compared to ON. This improvement was attributed to enhanced nutrient uptake (31.6% increase in spike density and 25.7% increase in kernel weight) and higher physiological efficiency (46.7% increase in photosynthesis rate and 60% improvement in stomatal conductance). Proline accumulation also rose by 72.7%, indicating improved osmotic adjustment under drought. Principal component analysis revealed that 97.7% of yield variation was driven by an integrated growth factor (PC1), with boron and harvest index identified as secondary factors. Economic analysis confirmed the profitability of BH (benefit-cost ratio: 1.83), while F+BH provided maximum productivity for the system. Overall, the findings demonstrate that combining soil amendments (humic acid and PGPR/AMF biofertilizers) with foliar nutrition can synergistically enhance rainfed wheat performance by improving soil health, root development, and drought tolerance—offering a scalable strategy for sustainably boosting yields in water-limited agroecosystems.

Keywords: Humic acid, drought resilience, integrated nutrient management, rainfed wheat, biofertilizer