



19<sup>th</sup> Iranian Soil Science Congress  
2-4 December, 2025



نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران  
۱۱ تا ۱۳ آذرماه ۱۴۰۴



۰۴۲۵۰-۳۲۰۳۱

مدیریت جامع نگر و هوشمند خاک و آب

Holistic and Smart Soil and Water Management

دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran



## ارتقای تاب آوری و بهره‌وری گندم تحت تنش خشکی از طریق مدیریت یکپارچه تغذیه‌ای و کم-آبیاری

محمد سعید تدین<sup>۱\*</sup>، سید مجید موسوی<sup>۲</sup>، سهراب صادقی<sup>۳</sup>

- ۱- نویسنده مسئول<sup>\*</sup>، 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](mailto: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- عضو هیئت علمی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس، سازمان تحقیقات و آموزش کشاورزی (AREEO)، شیراز، ایران

### چکیده

کمبود آب و تنش خشکی از مهم‌ترین چالش‌های تولید گندم (*Triticum aestivum* L.) در مناطق خشک و نیمه‌خشک هستند. این پژوهش سه‌ساله (۱۴۰۱ تا ۱۴۰۳) در استان فارس با هدف بررسی مدیریت تلفیقی تغذیه‌ای (INM) تحت کم‌آبیاری (DI) انجام شد. آزمایش به‌صورت فاکتوریل اسپلیت‌پلات در قالب بلوک‌های کامل تصادفی با چهار تکرار بود. پلات‌های اصلی شامل آبیاری کامل (FI) و DI در مراحل غیر بحرانی (پنجه‌زنی، ساقه‌دهی و پس از گرده‌افشانی) و کرت‌های فرعی چهار تیمار INM: تغذیه بهینه (ON)، زیست‌کود با اسید هیومیک (BH)، محلول‌پاشی اسیدفولویک، سیلیکات پتاسیم و اسیدهای آمینه (F) و ترکیب F+BH بودند. کم‌آبیاری جذب عناصر، فتوسنتز و کیفیت دانه را کاهش داد، اما INM، به‌ویژه F+BH این اثرات را با بهبود انتقال عناصر، تنظیم اسمزی و کاهش تنش اکسیداتیو جبران کرد. تیمار F+BH موجب افزایش ۶/۸ درصدی کلروفیل، ۷/۷ درصدی فتوسنتز و ۱۳/۸ درصدی هدایت روزنه‌ای و کاهش ۲۶/۲ درصدی پرولین شد. در تیمار DI+F+BH، کارایی مصرف آب ۵۳/۳ درصد بالاتر از FI+ON بود. نتایج تحلیل PCA نقش کلیدی کلسیم، بور و روی را در مقاومت به خشکی نشان داد. تیمار DI+F+BH با حفظ عملکرد، بهبود صفات فیزیولوژیکی و افزایش پروتئین دانه، رویکردی مؤثر برای مدیریت آب در مناطق خشک معرفی شد.

واژگان کلیدی: کارایی مصرف آب، کاهش اثرات تنش خشکی، کم‌آبیاری، مقاومت فیزیولوژیکی، مدیریت تلفیقی تغذیه‌ای.

## مقدمه

خشکی به‌عنوان یکی از تنش‌های غیرزیستی اصلی، تولید محصولات کشاورزی را در سراسر جهان تهدید می‌کند و با کاهش رشد گیاه و جذب عناصر غذایی، بهره‌وری را کاهش می‌دهد (Wang et al., 2024). در ایران با میانگین بارندگی سالانه ۲۲۸ میلی‌متر که بسیار کمتر از میانگین جهانی است (Sabzevar et al., 2021)، کم‌آبی محدودیتی جدی برای تولید گندم محسوب می‌شود (El Kenawy et al., 2024). گندم که حدود ۲۱ درصد کالری جهان را تأمین می‌کند، برای تأمین نیاز غذایی جمعیت رو به رشد باید تا سال ۲۰۵۰ حدود ۶۰ درصد افزایش تولید داشته باشد (Ullah et al., 2024). با این حال، بخش زیادی از اراضی زیر کشت گندم در مراحل حساس رشد در معرض خشکی قرار دارند (Singh et al., 2024). این تنش فتوسنتز و انتقال عناصر را مختل می‌کند و با تنش‌های ثانویه مانند شوری و گرما شدت می‌یابد (Qiao et al., 2024). استفاده هم‌زمان از مدیریت تلفیقی تغذیه‌ای (INM) و کم‌آبیاری (DI) می‌تواند با بهبود جذب عناصر، هدایت روزنه‌ای و کارایی مصرف آب، تاب‌آوری گندم را افزایش دهد (Akol et al., 2024). این پژوهش اثرات INM و DI را بر عملکرد و بازده اقتصادی گندم در مناطق نیمه‌خشک بررسی می‌کند.

## مواد و روش‌ها

این پژوهش طی دو سال زراعی متوالی (۱۴۰۱-۱۴۰۲ و ۱۴۰۲-۱۴۰۳) در روستای مهرنجان، شهرستان کازرون، استان فارس، ایران، در مزرعه‌ای به مساحت یک هکتار اجرا شد. پیش از کشت، نمونه‌برداری خاک از عمق‌های ۰-۳۰ و ۳۰-۶۰ سانتی‌متر انجام و به‌همراه نمونه آب آبیاری در آزمایشگاه مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی فارس تجزیه شد. نتایج نشان داد خاک دارای بافت لوم رسی، شوری بالا، ماده آلی کم و کمبود عناصر نیتروژن، فسفر و روی است. منبع آب، چاه بوده و شاخص SAR نشان‌دهنده خطر جزئی قلیایی شدن خاک بود. در این آزمایش، گندم رقم چمران-۲ که زودرس و مقاوم به گرماست، با تراکم بذر ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار در ردیف‌هایی با فاصله ۱۳ سانتی‌متر در مهرماه کشت شد. طرح آزمایشی به‌صورت کرت‌های خردشده در قالب بلوک کامل تصادفی با چهار تکرار اجرا گردید. عامل اصلی، تنش خشکی در دو سطح بود: آبیاری کامل (FI) به‌عنوان شاهد با تأمین کل نیاز آبی (۵۳۶۴/۴۹ مترمکعب در هکتار) در طول فصل رشد و کم‌آبیاری (DI) با تأمین حدود ۶۵ درصد نیاز آبی (۳۵۴۱/۴۸ مترمکعب در هکتار) که در مراحل غیر بحرانی مانند پنجه‌زنی، طولیل شدن ساقه اولیه و پس از گرده‌افشانی و پر شدن دانه اعمال شد. عامل فرعی، مدیریت تلفیقی تغذیه‌ای (INM) در چهار سطح شامل: (۱) تغذیه بهینه بر اساس آزمون خاک (شاهد)، (۲) زیست‌کود و اسید هیومیک، (۳) محلول‌پاشی اسید فولویک، سیلیکات پتاسیم و اسیدهای آمینه و (۴) ترکیب محلول‌پاشی و زیست‌کود به‌همراه اسید هیومیک بود. رطوبت خاک با حسگر TDR پایش شد و مدیریت آبیاری با پیش‌بینی بارش و محاسبه نیاز آبی بر اساس ظرفیت زراعی انجام شد. صفات فیزیولوژیک، رشد، عملکرد، اجزای عملکرد و کارایی مصرف آب اندازه‌گیری شد. تجزیه و تحلیل آماری با آزمون واریانس مرکب، آزمون دانکن و تجزیه مؤلفه‌های اصلی (PCA) انجام و تحلیل اقتصادی با روش بودجه‌بندی جزئی صورت گرفت.

## نتایج و بحث

در این مطالعه، تحلیل واریانس ترکیبی بر داده‌های دوساله انجام شد تا اثرات اصلی سال، تیمارها و برهم‌کنش آن‌ها مشخص شود. نتایج نشان داد کم‌آبیاری (DI) غلظت عناصر غذایی در برگ پرچم و دانه گندم رقم چمران-۲ را نسبت به آبیاری کامل (FI) کاهش داد، به‌طوری‌که در FI غلظت نیتروژن، پتاسیم، روی، مس و بور به‌ترتیب ۱۲ تا ۱۷ درصد بیشتر بود. تیمارهای تغذیه‌ای شامل زیست‌کود و محلول‌پاشی (BH و F) جذب عناصر را به‌ویژه در ترکیب FI+F+BH بهبود دادند و بیشترین غلظت عناصر پرمصرف و ریزمغذی‌ها مشاهده شد (جدول ۱). تحت کم‌آبیاری نیز DI+F+BH اثرات منفی تنش آبی را کاهش داد. کودهای زیستی مانند Azotobacter و قارچ‌های میکوریزا به توسعه ریشه و جذب عناصر کمک می‌کنند (Bejaoui et al., 2024). اسید هیومیک ساختار خاک و نگهداری آب را بهبود می‌دهد (El Bouchtaoui et al., 2024) و اسید فولویک بهره‌وری

فتوسنتز را ارتقاء می‌دهد (Zhu et al., 2024). سیلیکات پتاسیم دیواره سلولی را تقویت کرده و کارایی مصرف آب را بالا می‌برد (Abdelaziz et al., 2023).

جدول ۵. اثرات اصلی و متقابل آبیاری و مدیریت تلفیقی تغذیه‌ای بر غلظت عناصر معدنی برگ پرچم گندم (*Triticum aestivum* var. chamrane-2)، میانگین دو سال.

تیمار	نیتروژن	فسفر	پتاسیم	کلسیم	منیزیم	آهن	روی	منگنز	مس	بور
مدیریت آبیاری	(میلی گرم بر کیلوگرم)									
(FI) آبیاری کامل	۱,۷۱a	۰,۳۵a	۱,۹۸a	۰,۶۱a	۰,۳۱a	۱۲۸a	۴۳a	۶۹a	۱۷a	۲۰a
(DI) آبیاری محدود	۱,۵۰b	۰,۳۱b	۱,۷۳b	۰,۵۴a	۰,۲۷a	۱۱۴a	۳۸b	۶۲a	۱۴b	۱۷b
F آزمون	*	**	**	ns	ns	ns	*	ns	*	*
مدیریت تغذیه‌ای تلفیقی										
(ON) تغذیه بهینه	۱,۴۵b	۰,۳۱b	۱,۷۵b	۰,۵۴a	۰,۲۷a	۱۱۵a	۳۸b	۶۳a	۱۴b	۱۷b
BH	۱,۶۰ab	۰,۳۳ab	۱,۸۴ab	۰,۵۸a	۰,۲۹a	۱۲۰a	۴۰ab	۶۴a	۱۵ab	۱۸b
F	۱,۶۲ab	۰,۳۳ab	۱,۸۶ab	۰,۵۸a	۰,۲۹a	۱۲۱a	۴۱ab	۶۴a	۱۶ab	۱۸b
FA+BH	۱,۷۵a	۰,۳۶a	۱,۹۹a	۰,۶۱a	۰,۳۲a	۱۲۷a	۴۳a	۶۸a	۱۷a	۲۰a
F آزمون	**	**	**	ns	ns	ns	**	ns	*	**
تأثیر متقابل										
(کنترل) FI	۱,۵۲cde	۰,۳۲cde	۱,۸۵bcd	۰,۵۶abcd	۰,۲۸bcd	۱۲۰abc	۴۰bcd	۶۵abcd	۱۵bc	۱۸bc
DI	۱,۳۸e	۰,۲۹f	۱,۶۴d	۰,۵۱d	۰,۲۵d	۱۱۰c	۳۶d	۶۰d	۱۳c	۱۶d
FI+BH	۱,۶۸abc	۰,۳۴bc	۱,۹۲abc	۰,۶۰abc	۰,۳۰abc	۱۲۵abc	۴۲abc	۶۸abc	۱۶ab	۱۹b
DI+BH	۱,۵۱cd	۰,۳۱def	۱,۷۵cd	۰,۵۵bcd	۰,۲۷bcd	۱۱۵bc	۳۸cd	۶۳bcd	۱۴bc	۱۷cd
FI+F	۱,۷۵ab	۰,۳۶ab	۲,۰۱ab	۰,۶۲ab	۰,۳۲ab	۱۳۰ab	۴۴ab	۷۰ab	۱۷ab	۲۰ab
DI+F	۱,۴۹de	۰,۳۰ef	۱,۷۱cd	۰,۵۳cd	۰,۲۶cd	۱۱۲c	۳۷cd	۶۱cd	۱۴bc	۱۶d
FI+F+BH	۱,۸۸a	۰,۳۹a	۲,۱۵a	۰,۶۵a	۰,۳۵a	۱۳۵a	۴۶a	۷۲a	۱۸a	۲۲a
DI+F+BH	۱,۶۲bcd	۰,۳۲bcd	۱,۸۳bcd	۰,۵۷abcd	۰,۲۹bcd	۱۱۸abc	۳۹bcd	۶۴abcd	۱۵bc	۱۸bc
F آزمون	**	**	**	*	**	*	**	*	**	**

همچنین ترکیب F+BH غلظت عناصر دانه را به‌طور معنی‌داری افزایش داد و کمبود ناشی از کم‌آبیاری را جبران کرد. از نظر صفات فیزیولوژیکی، DI سبب کاهش کلروفیل، نرخ فتوسنتز، هدایت روزنه‌ای و محتوای نسبی آب برگ شد و محتوای پرولین را ۴۲ درصد افزایش داد. در مقابل، تیمار ترکیبی F+BH مقادیر کلروفیل، فتوسنتز و هدایت روزنه‌ای را بهبود و محتوای پرولین را کاهش داد که بیانگر کاهش تنش اسمزی بود. در مجموع، کاربرد همزمان زیست‌کود، اسید هیومیک و محلول‌پاشی در شرایط آبیاری کامل یا محدود، بهترین نتیجه را در بهبود تغذیه و عملکرد فیزیولوژیکی گندم نشان داد.

جدول ۷. اثر رژیم‌های آبیاری و مدیریت تلفیقی تغذیه‌ای بر صفات فیزیولوژیکی گندم (*Triticum aestivum* var. chamrane-2)، میانگین دو سال.

تیمار	کلروفیل a	کلروفیل b	نرخ فتوسنتز	هدایت روزنه‌ای	محتوای	پتانسیل	پرولین
	(میلی گرم بر گرم وزن تر)	(میلی گرم بر گرم وزن تر)	(میکرومول CO <sub>2</sub> بر متر مربع در ثانیه)	(مول بر متر مربع در ثانیه)	نسبی آب	آب برگ	(میکرومول بر گرم وزن تر)
(FI) آبیاری کامل	۴,۶۵a	۳,۱۸a	۱۸,۸۸a	۰,۳۷a	۸۵,۸۸a	-۰,۷۵a	۱,۵۰b
(DI) آبیاری محدود	۳,۸۳b	۲,۸۵b	۱۵,۲۰b	۰,۲۴b	۷۴,۴۵a	-۱,۲۵b	۲,۱۳a
F آزمون	**	**	**	**	**	**	**
مدیریت تغذیه‌ای تلفیقی							
(ON) تغذیه بهینه	۴,۰۵b	۲,۹۰b	۱۶,۳۵b	۰,۲۹b	۷۸,۸۵a	-۱,۱۰a	۲,۱۰a
BH	۴,۳۰a	۳,۰۵ab	۱۷,۴۰a	۰,۳۲ab	۸۰,۹۰a	-۰,۹۵a	۱,۸۰a
F	۴,۲۰ab	۲,۹۵ab	۱۶,۸۰ab	۰,۳۰ab	۷۹,۴۰a	-۱,۰۵a	۱,۸۰a
F+BH	۴,۴۰a	۳,۱۵a	۱۷,۶۰a	۰,۳۲a	۸۱,۵۰a	-۰,۹۰a	۱,۵۵b
F آزمون	**	**	**	ns	ns	ns	**
تأثیر متقابل							
(کنترل) FI	۴,۵a	۳,۱abc	۱۸,۵a	۰,۳۵a	۸۵,۲a	-۰,۸a	۱,۸cd
DI	۳,۶c	۲,۷e	۱۴,۲c	۰,۲۲d	۷۲,۵c	-۱,۴c	۲,۴a
FI+BH	۴,۷a	۳,۲ab	۱۹,۰a	۰,۳۸a	۸۶,۰a	-۰,۷a	۱,۶de
DI+BH	۳,۹b	۲,۹cd	۱۵,۸b	۰,۲۵bc	۷۵,۸bc	-۱,۲b	۲,۰abc
FI+F	۴,۶a	۳,۱abc	۱۸,۸a	۰,۳۷a	۸۵,۸a	-۰,۸a	۱,۴ef

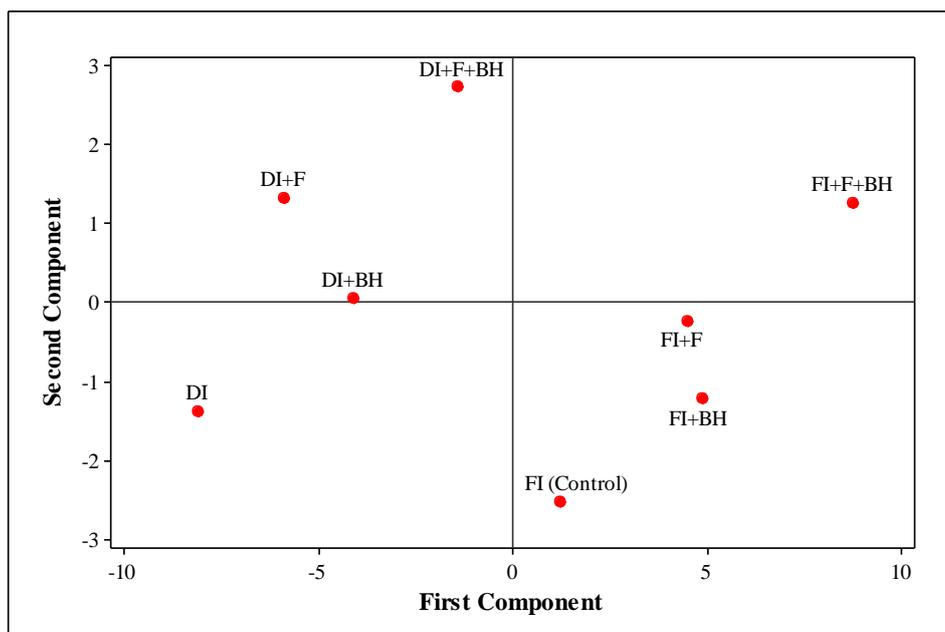
۲,۲ab	-۱,۳b	۷۳,۰bc	۰,۲۳cd	۱۴,۸c	۲,۸de	۳,۸b	DI+F
۱,۲f	-۰,۷a	۸۶,۵a	۰,۳۹a	۱۹,۲a	۳,۳a	۴,۸a	FI+F+BH
۱,۹bcd	-۱,۱b	۷۶,۵b	۰,۲۷b	۱۶,۰b	۳,۰bcd	۴,۰b	DI+F+BH
**	*	**	**	**	**	**	F آزمون

در این پژوهش، اثرات سطوح مختلف آبیاری و مدیریت تغذیه‌ای تلفیقی (INM) بر عملکرد و اجزای عملکرد گندم رقم «چمران-۲» بررسی شد. نتایج نشان داد که آبیاری کامل (FI) بالاترین ارتفاع بوته (۱۰۶/۷۳ سانتی‌متر)، شاخص سطح برگ (۳/۶۵)، وزن خشک ریشه (۳/۶۸ گرم) و درصد پروتئین دانه (۱۳/۱۸ درصد) را به همراه داشت، در حالی که کم‌آبیاری (DI) این شاخص‌ها را به‌طور قابل توجهی کاهش داد. در میان تیمارهای تغذیه‌ای، کاربرد محلول‌پاشی همراه با کود زیستی و اسید هیومیک (F+BH) بهترین نتایج را داشت و سبب بهبود ارتفاع گیاه، سطح برگ، وزن ریشه و پروتئین دانه نسبت به تغذیه بهینه شد. ترکیب FI با F+BH بیشترین مقادیر برای صفات رشدی و عملکردی را ایجاد کرد. تحت شرایط کم‌آبی، ترکیب DI+F+BH توانست اثرات منفی خشکی را تا حدی جبران کند و بازده آب مصرفی (WUE) و شاخص برداشت را بهبود دهد.

جدول ۹. اثرات اصلی و متقابل آبیاری و مدیریت تغذیه‌ای بر عملکرد دانه، بیوماس، شاخص برداشت و کارایی مصرف آب گندم (*Triticum aestivum* var. chamrane-2)، میانگین دو سال.

تیمار	عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار)	بیوماس (کیلوگرم در هکتار)	(%) شاخص برداشت	کارایی مصرف آب (کیلوگرم بر مترمکعب)
<b>مدیریت آبیاری</b>				
مدیریت آبیاری کامل (FI)	۶۰۸۴,۲۵a	۱۵۴۹۸,۲۵a	۳۹,۲۶a	۱,۱۳b
آبیاری محدود (DI)	۵۲۸۴,۵۰b	۱۲۵۲۷,۷۵b	۴۲,۲۶a	۱,۴۹a
F آزمون	**	**	ns	**
<b>مدیریت تغذیه‌ای تلفیقی</b>				
(ON) تغذیه بهینه	۵۲۵۸,۰۰d	۱۴۱۶۳,۵۰c	۳۷,۱۳c	۱,۲۱c
BH	۵۵۳۵,۵۰c	۱۴۰۰۰,۵۰a	۳۹,۶۹bc	۱,۲۸bc
F	۵۸۰۷,۵۰b	۱۳۶۸۴,۵۰b	۴۲,۷۴ab	۱,۳۴ab
F+BH	۶۱۳۶,۵۰a	۱۴۲۰۳,۵۰a	۴۳,۴۹a	۱,۴۲a
F آزمون	**	**	**	**
<b>تأثیر متقابل</b>				
(کنترل) FI	۵۷۳۵c	۱۵۵۲۳a	۳۶,۹۳c	۱,۰۷e
DI	۴۷۸۱f	۱۲۸۰۴c	۳۷,۲۳c	۱,۳۵c
FI+BH	۵۹۶۷b	۱۵۴۲۵b	۳۸,۷۳bc	۱,۱۱de
DI+BH	۵۱۰۴e	۱۲۵۷۶c	۴۰,۶۴b	۱,۴۴bc
FI+F	۶۱۵۳b	۱۵۲۵۵b	۴۰,۳۴b	۱,۱۴de
DI+F	۵۴۶۲d	۱۲۱۱۴d	۴۵,۱۴a	۱,۵۴ab
FI+F+BH	۶۴۸۲a	۱۵۷۹۰a	۴۱,۰۴b	۱,۲۰d
DI+F+BH	۵۷۹۱c	۱۲۶۱۷c	۴۵,۹۴a	۱,۶۴a
F آزمون	**	**	**	**

تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) نشان داد که بیشترین واریانس صفات به تغذیه کافی عناصر مغذی، فتوسنتز مطلوب و حفظ وضعیت آب گیاه مرتبط بود. الگوی خوشه‌بندی تیمارها اثر بخشی آن‌ها را منعکس می‌کند (شکل ۱)، به‌طوری‌که راهبردهای کم‌آبیاری همراه با مدیریت تلفیقی تغذیه‌ای (DI+F، DI+F+BH) عملکردی نزدیک به آبیاری کامل داشته و نقش آن‌ها را در تولید پایدار گندم در شرایط کم‌آبی تأیید می‌نماید. تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) نیز اهمیت عناصر اصلی مانند نیتروژن، فسفر و پتاسیم در تثبیت فتوسنتز و عملکرد در کم‌آبی را تأیید کرد (Tahir et al., 2024).



شکل ۱. نمودار امتیازی تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) تأثیر آبیاری محدود (DI) و مدیریت تلفیقی تغذیه‌ای (INM) را بر عملکرد گندم (*Triticum aestivum* L. «چمران-۲» نشان می‌دهد. تیمارها بر اساس مؤلفه‌های اصلی PC1 (با ۸۸٪ واریانس) و PC2 (با ۷٪ واریانس) توزیع شده‌اند، به طوری که تیمار FI+F+BH (آبیاری کامل + محلول‌پاشی + زیست‌کود + اسید هیومیک) بیشترین عملکرد دانه و صفات فیزیولوژیکی مطلوب را نشان می‌دهد، در حالی که DI+F+BH با بهبود جذب عناصر غذایی و کارایی مصرف آب (WUE) نقش مؤثری در کاهش تنش آبی و افزایش مقاومت به خشکی ایفا می‌کند.

نتایج اقتصادی نیز نشان داد که تیمار DI+F+BH با نسبت سود به هزینه ۱/۹۳، به عنوان سودآورترین گزینه در شرایط کم‌آبی معرفی شد. این یافته‌ها اهمیت راهبردهای تلفیقی تغذیه‌ای را در افزایش تاب‌آوری گندم در برابر تنش خشکی تأیید می‌کند.

### نتیجه‌گیری

این مطالعه نقش کلیدی مدیریت تلفیقی تغذیه‌ای (INM) و استراتژی‌های آبیاری را در کاهش اثرات منفی تنش آبی بر گندم نشان می‌دهد. تیمار DI+F+BH نسبت به آبیاری محدود تنها، رشد، شاخص سطح برگ، بیوماس، پروتئین دانه، بهره‌وری مصرف آب و شاخص برداشت را به طور قابل توجهی افزایش داد و نشان داد که آبیاری محدود متوسط یک استراتژی مؤثر صرفه‌جویی در آب و ارتقای سازگاری فیزیولوژیکی گندم است. نتایج توصیه می‌کند کشاورزان مناطق خشک از آبیاری محدود متوسط همراه با مدیریت تلفیقی تغذیه‌ای استفاده کنند و در مراحل غیر بحرانی رشد، رطوبت خاک را در حدود ۵۰٪ ظرفیت مزرعه حفظ نمایند. این رویکرد تلفیقی، عملکرد فیزیولوژیکی گیاه را بهبود داده، کمبودهای تغذیه‌ای را کاهش می‌دهد و بهره‌وری محصول و آب را بیش از ۵۰٪ نسبت به روش‌های سنتی افزایش می‌دهد.

### فهرست منابع

1. Abdelaziz, M.S., Niel, E.M., Yahya, A.I.A. (2023). Foliar application of different potassium silicate fertilizer types and their effect on enhancing drought tolerance, growth and yield of wheat genotypes. *Alexandria Science Exchange Journal*, 44(4), 819–836.
2. Akol, A.M., Hassan, D.F., Mohammed, R.J., Al Janaby, Z.A.A., Kadium Abed, M.A., Hussain, S., Nassif, N., Jaddoa, K.A., Razzaq, H.K. (2024). Optimizing wheat yield and water use efficiency using AquaCrop model calibration and validation in various irrigation and tillage systems under climate change. *Soil Science Annual*, 75(3).
3. El Bouchtaoui, F.Z., Ablouh, E.H., Mhada, M., Kassem, I., Gracia, D.R., El Achaby, M. (2024). Humic acid-functionalized lignin-based coatings regulate nutrient release and promote wheat productivity and grain quality. *ACS Applied Materials & Interfaces*.
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* (pp. 1–22). Elsevier.

5. 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.
6. 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.
7. 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).
8. Tahir, M., Arshad, M.A., Akbar, B.A., Bibi, A., Ain, Q.U., Bilal, A., Arqam, S.M., Asif, M., Ishtiaq, M.H., Rasheed, H.U., Pervaiz, R. (2024). Integrated nitrogen and irrigation management strategies for sustainable wheat production: Enhancing yield and environmental efficiency. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 13(4), 209–222.
9. Ullah, A., Arif, A.R., Yasin, M.H., Zubair, M.M., Salman, M., Mustafa, M.G., Khalid, S., Bashir, U., Usman, M. (2024). Worldwide wheat diseases, their current status and mode of resistance: A review. *Asian Journal of Biotechnology and Genetic Engineering*, 7(1), 139–149.
10. Wang, B., Li, L., Feng, P., Chen, C., Luo, J.J., Taschetto, A.S., Harrison, M.T., Liu, K., Li Liu, D., Yu, Q., Guo, X. (2024). Probabilistic analysis of drought impact on wheat yield and climate change implications. *Weather and Climate Extremes*, 45, 100708.
11. Zhu, S., Mi, J., Zhao, B., Wang, Z., Yang, Z., Wang, M., Liu, J. (2024). Integrative transcriptome and metabolome analysis reveals the mechanism of fulvic acid alleviating drought stress in oat. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1439747.

## Enhancing Wheat Resilience and Productivity under Drought Stress through Integrated Nutrient Management and Deficit Irrigation

Mohammad Saeed Tadayon<sup>1</sup>, Seyed Majid Mousavi<sup>2</sup>, Sohrab Sadeghi<sup>3</sup>

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

### Abstract

Water scarcity and drought stress are major challenges for wheat (*Triticum aestivum* L.) production, particularly in arid and semi-arid regions. This study, conducted from 2022 to 2024 in Fars Province, Iran, evaluated integrated nutrient management (INM) strategies under deficit irrigation (DI). The experiment was arranged as a split-plot factorial based on a randomized complete block design (RCBD) with four replications. The main plots comprised full irrigation (FI) and DI applied during non-critical growth stages (tillering, stem elongation, and post-pollination), while the subplots included four INM treatments: optimal nutrition (ON), biofertilizer with humic acid (BH), foliar application of fulvic acid, potassium silicate, and amino acids (F), and their combination (F+BH). DI reduced nutrient uptake, photosynthesis, and grain quality; however, INM, particularly the combined F+BH treatment—mitigated these negative effects by improving nutrient translocation, osmotic adjustment, and oxidative stress tolerance. The F+BH treatment increased chlorophyll a and b by 8.6%, photosynthesis rate by 7.7%, stomatal conductance by 13.8%, and reduced proline by 26.2%, indicating reduced stress. Under DI+F+BH, water use efficiency (WUE) was 53.3% higher than FI+ON. Principal component analysis (PCA) showed that calcium, boron, and zinc play critical roles in metabolic efficiency and drought tolerance. The DI+F+BH treatment-maintained productivity, improved physiological traits, increased grain protein content, and ensured higher economic returns, recommending it as an effective strategy for water saving in dry regions.

**Keywords:** Water Use Efficiency, Drought Stress Mitigation, Deficit Irrigation, Physiological Resilience, Integrated Nutrient Management