نشریه تولید گیاهان زراعی
جلد دوازدهم، شماره چهارم، زمستان ۹۸
۱-۲۴
http://ejcp.gau.ac.ir
DOI: 10.22069/ejcp.2020.17166.2268

اثر کاربرد ریزجانداران محرک رشد گیاه وکود فسفاته بر عملکرد و اجزای عملکرد گندم و کارایی مصرف آب در سطوح آب آبیاری

فرهاد آذرمی آتاجان[۱*]، حسین حمامی[۲]، مصطفی یعقوب‌زاده[۳]

[۱]استادیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران
[۲]استادیار گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران
[۳]استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

تاریخ دریافت: ۹۸/۶/۳۱ ؛ تاریخ پذیرش: ۹۸/۱۲/۱۷

چکیده

سابقه و هدف: کمبود آب و پایین بودن حاصلخیزی خاک از مهم‌ترین عوامل محدود کننده رشد و عملکرد گیاهان در مناطق خشک و نیمه‌خشک است. استفاده از کودهای شیمیایی مرسوم‌ترین روش برای تأمین عناصر غذایی مورد نیاز گیاهان از جمله فسفر است. با توجه به تثبیت بخش اعظم کودهای فسفاته به‌ویژه در خاک‌های آهکی، مصرف بیش از حد این کودها علاوه برکارایی کمتر،مشکلات زیست‌محیطی و اقتصادی نیز به دنبال دارد. استفاده از ریزجانداران مفید خاکزی می‌تواند علاوه بر تأمین عناصر غذایی مورد نیاز گیاه، تحمل آن را به تنش‌های محیطی به‌ویژه خشکی افزایش دهد. بنابراین، هدف از این پژوهش بررسی نقش باکتری‌های حل کننده فسفات (*Pseudomonas fluorescens 187* و *Pseudomonas fluorescens sp.*) و قارچ‌های مایکوریزا (گونه‌های مختلف *Glomus*) بر عملکرد و اجزای عملکرد گندم و بهبود کارایی مصرف آب در سطوح مختلف آب آبیاری است.

مواد و روش‌ها: این مطالعه به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار بر روی گندم (رقم آنفارم ۴) در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه بیرجند در سال زراعی ۹۷-۱۳۹۶ انجام شد. تیمارهای آزمایشی شامل چهار سطح آب آبیاری (I_0، I_1، I_2 و I_3 به ترتیب معادل ۱۰۰، ۷۵، ۵۰ و ۲۵ درصد ظرفیت زراعی (FC)) و چهار سطح تیمار کودی (F_0، F_1، F_2 و F_3 به‌ترتیب شاهد، ریزجانداران محرک رشد گیاه، سوپرفسفات تریپل به مقدار ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار و ریزجانداران محرک رشد گیاه + سوپرفسفات تریپل به مقدار ۷۵ کیلوگرم در هکتار) بود. پس از رسیدگی کامل، از هر کرت تعداد ۱۰ بوته با رعایت اثر حاشیه‌ای انتخاب سپس ارتفاع و تعداد پنجه آن‌ها اندازه‌گیری شد. پس از برداشت نیز شاخص‌های طول سنبله، تعداد دانه در سنبله، وزن هزار دانه، عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیک، غلظت فسفر دانه و درصد کلونیزاسیون ریشه اندازه‌گیری و شاخص برداشت و کارایی مصرف آب نیز محاسبه شد.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که با کاهش مصرف آب از ۱۰۰ درصد به ۵۰ درصد ظرفیت زراعی پارامترهای ارتفاع بوته (۱۹ درصد)، تعداد پنجه (۳۵ درصد)، تعداد سنبله (۲۲ درصد)، تعداد دانه در سنبله (۱۷ درصد)، وزن هزار دانه (۲۰ درصد) و عملکرد دانه (۳۵ درصد) گندم کاهش، ولی غلظت فسفر دانه (۴۲ درصد) به طور معنی‌داری افزایش یافت. تنش آبی عملکرد دانه را در مقایسه با عملکرد بیولوژیک بیشتر کاهش داد. به طوری که، اعمال تنش آبی به مقدار ۷۵، ۵۰ و ۲۵ درصد ظرفیت زراعی،

* نویسنده مسئول: farhadazarmi@birjand.ac.ir

عملکرد دانه را به‌ترتیب ۲۵، ۳۶ و ۴۴ درصد و عملکرد بیولوژیک را به‌ترتیب ۲۱، ۳۰ و ۳۸ درصد نسبت به شرایط بدون تنش کاهش داد. از طرف دیگر، کاربرد ریزجانداران محرک رشد گیاه و کود فسفاته موجب افزایش پارامترهای فوق در سطوح مختلف آب آبیاری شد. براساس نتایج، در بیشتر شاخص‌های مورد مطالعه از جمله تعداد سنبله، تعداد دانه در سنبله، وزن هزار دانه، عملکرد دانه و غلظت فسفر دانه تفاوت معنی‌داری بین کاربرد کود فسفاته و ریزجانداران محرک رشد گیاه + ۵۰ درصد کود شیمیایی در سطوح مختلف آب آبیاری مشاهده نشد. کاربرد همزمان ریزجانداران محرک رشد گیاه با۵۰ درصد کود شیمیایی در سطوح آب آبیاری ۷۵، ۵۰ و ۲۵ درصد ظرفیت زراعی، عملکرد دانه را به‌ترتیب ۷۹، ۸۸ و ۷۵ درصد و عملکرد بیولوژیک را به‌ترتیب ۵۷، ۷۱ و ۶۱ درصد نسبت به همان سطح آبیاری افزایش داد. همچنین، با کاهش مصرف آب از ۱۰۰ درصد به ۲۵ درصد ظرفیت زراعی، درصد کلونیزاسیون ریشه ۳۳ درصد و با مصرف کود فسفاته مقدار آن۲۲ درصد کاهش یافت. همچنین، با کاهش مصرف آب از ۱۰۰ به ۲۵ درصد ظرفیت زراعی، کارایی مصرف آب حدود ۲/۳ برابر افزایش یافت. تأثیر مثبت باکتری‌های حل کننده فسفات و قارچ‌های مایکوریزا بر عملکرد و اجزای عملکرد گندم به‌ویژه در شرایط کمبود آب را می‌توان به تولید ترکیبات مختلف مانند اکسین، اسیدهای آلی و سیدروفور توسط باکتری‌ها و آلوده کردن ریشه توسط قارچ و دسترسی به نقاط بیشتر خاک و در نتیجه افزایش جذب عناصر غذایی مانند فسفر و آب برای گیاه نسبت داد.

نتیجه‌گیری: با توجه به نتایج به‌دست آمده، اگرچه در بیشتر شاخص‌های اندازه‌گیری شده کاربرد کودهای شیمیایی بیش‌ترین تأثیر را در افزایش این شاخص‌ها داشت ولی، کاربرد ریزجانداران محرک رشد گیاه همراه با ۵۰ درصد کود فسفاته از لحاظ آماری تفاوتی با کاربرد کامل کود شیمیایی نداشت. به عبارتی، با توجه به مشکلات زیست‌محیطی کودهای شیمیایی و هزینه بالای آن‌ها، می‌توان تا حدود ۵۰ درصد مصرف کودهای شیمیایی را بدون تأثیر معنی‌دار بر عملکرد، کاهش داد. علاوه بر این، نتایج نشان داد که در شرایط تنش خشکی کاربرد همزمان کودهای شیمیایی و ریزجانداران محرک رشد گیاه نتایج بهتری نسبت به کاربرد تنهای کود شیمیایی داشت که این امر نشان‌دهنده پتانسیل زیاد ریزجانداران مفید خاکزی در سازگاری با شرایط محیطی نامساعد و در نتیجه بهبود رشد و عملکرد گیاه است. بنابراین، کاربرد هم‌زمان کودهای شیمیایی و ریزجانداران محرک رشد گیاه به‌ویژه در شرایط کمبود آب در تولید گندم توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: بیرجند، فسفر، کمبود آب، گندم، مایکوریزا.

مقدمه

به‌دلیل قرار گرفتن بخش اعظم اراضی زیرکشت گندم ایران در مناطق خشک و نیمه‌خشک، کمبود آب در خاک یکی از عوامل محدودکننده عملکرد بهینه این محصول به شمار می‌رود. کشور ایران از نظر منابع آبی محدودیت داشته و متوسط بارندگی سالیانه آن حدود ۲۵۰ میلی‌متر است که یک سوم متوسط بارندگی جهانی است. محدودیت منابع آب در ایران سبب شده است که بخش قابل‌توجهی از عملکرد گندم به دلیل تنش خشکی کاهش یابد (۲۷ و ۴۸). تنش خشکی یکی از مهم‌ترین تهدیدها برای امنیت غذایی و تولید محصولات کشاورزی است (۴۹). در مناطق خشک و نیمه‌خشک، مرحله پر شدن دانه گندم معمولاً با تنش خشکی همراه بوده و این امر موجب کاهش عملکرد دانه گندم از طریق کاهش سرعت فتوسنتز و کوتاه شدن دوره پر شدن دانه می‌شود (۳۷). گندم از محصولات زراعی مهم در کشور بوده و نقش مهمی در تأمین انرژی و تغذیه انسان دارد. اهمیت اقتصادی گندم چه از نظر تولید و چه از نظر تغذیه در دنیا بیش از سایر محصولات کشاورزی است (۸). براساس آمارنامه کشاورزی وزارت جهاد کشاورزی در سال زراعی ۹۶-۱۳۹۵ سطح زیرکشت

گندم حدود ۵/۴ میلیون هکتار و عملکرد آن در کشت آبی حدود ۴/۳ تن در هکتار در کشور برآورد شده است. عملکرد گندم در ایران به دلایل مختلفی مانند آهکی بودن خاک‌ها، تغذیه نامتعادل، کمبود مواد آلی در خاک، کمبود فرم قابل‌جذب عناصر غذایی در خاک به دلیل pH بالا، شوری خاک و آب و کمبود بارش‌ها کمتر از متوسط تولید جهانی است.

با توجه به شرایط اقلیمی و ماهیت ذاتی خاک‌های کشاورزی ایران، گیاهان کشت شده در این اراضی علاوه‌بر تنش‌های محیطی با کمبود و عدم تعادل تغذیه‌ای نیز مواجه هستند (۲۰).فسفر یکی از مهم‌ترین عناصر پرمصرف مورد نیاز گیاهان بوده که بیش از ۰/۲ درصد وزن خشک گیاهان را تشکیل می‌دهد (۴). غلظت فسفر قابل‌جذب در خاک کمتر از ۰/۱ درصد فسفر کل است (۱). رایج‌ترین شیوه برای تامین فسفر مورد نیاز گیاهان استفاده از کودهای فسفاته است. علی‌رغم نقش عمده کودهای شیمیایی در افزایش تولید و عملکرد محصولات زراعی، مصرف بی‌رویه و نامتعادل این کودها علاوه بر افزایش هزینه‌های تولید، تخریب منابع زیست‌محیطی از جمله خاک را نیز موجب شده است (۱۵). از طرفی، فسفر افزوده شده به خاک به شکل کودهای فسفاته، به دلیل واکنش با کلسیم به ویژه در خاک‌های آهکی، به فسفات‌های کلسیم کم‌محلول در خاک تبدیل شده و برای گیاه غیرقابل جذب می‌گردد (۵۱).

تاکنون راهکارهای مختلفی برای افزایش کارایی و هم‌چنین کاهش مصرف کودهای فسفاته ارائه شده است. یکی از روش‌های نوین در این زمینه، استفاده از ریزجانداران مفید خاکزی است. ریزجانداران نقش مهمی در فرآیندهای بیوشیمیایی مانند انحلال، تثبیت و معدنی شدن عناصر غذایی دارند. مطالعات نشان داده است که استفاده از ریزجانداران خاکزی مانند باکتری‌های حل کننده فسفات[1] (PSB) می‌تواند کارایی کودهای فسفاته و جذب فسفر توسط گیاه را افزایش دهد (۹ و ۱۳). باکتری‌های حل کننده فسفات گروهی از ریزجانداران خاک هستند که می‌توانند با سازوکارهای مختلفی مانند تولید اسیدهای آلی، اسیدهای معدنی، پروتون و ترشح آنزیم‌های فسفاتاز pH محیط ریشه را کاهش داده و فراهمی فسفر برای گیاه را افزایش دهند (۲۲). از مؤثرترین باکتری‌های حل کننده فسفات در محیط خاک باکتری‌های جنس *سودوموناس* می‌باشند (۴۵). علاوه بر PSB، قارچ‌های مایکوریزا (MF) نیز نقش مهمی در افزایش فراهمی عناصر غذایی برای گیاه و کاهش اثرات تنش‌های محیطی مانند خشکی دارند. این ریزجانداران با سیستم ریشه‌ای بیش از ۸۰ درصد گیاهان همزیستی داشته و در اغلب خاک‌ها نیز یافت می‌شوند. قارچ‌های مایکوریزا به دلیل داشتن هیف‌های گسترده با سطح ویژه زیاد به سطح بیشتری از خاک دسترسی داشته و از این‌رو، می‌توانند جذب عناصر غذایی مانند فسفر در گیاه را افزایش دهند (۱۵). این قارچ‌ها هم‌چنین می‌توانند با تأثیر بر روابط آبی گیاه میزبان و از طریق سازوکارهایی مانند بهبود خصوصیات خاک ریزوسفری، افزایش سطح ریشه، افزایش کارایی استفاده از آب، جذب عناصر غذایی، فعال کردن سریع سیستم دفاعی و مقابله با تنش‌های اکسیداتیو، مقاومت گیاهان را به تنش خشکی افزایش دهند (۳). افزایش تعداد، تنوع و همچنین روابط متقابل بین ریزجانداران در ریزوسفر، موجب افزایش تعداد و تنوع اسیدهای آلی موثر در فرآیند انحلال فسفات‌های نامحلول می‌شود (۴۴). برهم‌کنش مثبت قارچ‌های مایکوریزا و باکتری‌های محرک رشد گیاه مانند PSB در افزایش کارایی مصرف کودهای فسفاته، عملکرد و مقاومت

1. Phosphate Solubilizing Bacteria

گیاهان به تنش خشکی گزارش شده است (۲ و ۱۳). در مطالعه‌ای کاربرد باکتری‌های حل کننده فسفات با سطوح مختلف کود سوپرفسفات تریپل توانست علاوه بر افزایش عملکرد گندم، مصرف کودهای شیمیایی را کاهش دهد (۱۰). همچنین، قورچیانی و همکاران (۲۰۱۸) گزارش کردند که کاربرد همزمان باکتری‌های حل کننده فسفات و قارچ‌های مایکوریزا همراه با کودهای سوپرفسفات تریپل و خاک فسفات موجب افزایش رشد، عملکرد و جذب عناصر غذایی ذرت در شرایط تنش خشکی شد (۱۳). کاربرد همزمان PSB با دیگر باکتری‌های محرک رشد گیاه می‌تواند مصرف کودهای فسفاته را تا ۵۰ درصد کاهش دهد بدون آنکه عملکرد به طور معنی‌داری کاهش یابد (۱۸).

با توجه به اقلیم خشک دشت بیرجند با بارندگی سالیانه کمتر از ۱۲۰ میلی‌متر (۴۳) و حاصلخیزی ضعیف خاک‌های منطقه، اغلب گیاهان کشاورزی کشت شده در آن با کمبود عناصر غذایی مانند فسفر و تنش آبی مواجه هستند. از طرفی، کارایی کودهای فسفاته به‌ویژه در مناطق خشک پایین بوده و بخش اعظم آن بلافاصله بعد از افزودن به خاک، از دسترس گیاه خارج می‌شود. بنابراین، هدف از این پژوهش بررسی نقش باکتری‌های حل کننده فسفات، قارچ‌های مایکوریزا و کودهای شیمیایی فسفاته بر عملکرد، اجزای عملکرد، غلظت فسفر دانه و کارایی مصرف آب گندم در سطوح مختلف آب آبیاری است.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه بیرجند (عرض جغرافیایی ۳۲ درجه و ۵۳ دقیقه، طول جغرافیایی ۵۵ درجه و ۷ دقیقه و ارتفاع ۱۴۸۰ متر از سطح دریا) در سال زراعی ۹۷-۱۳۹۶ انجام شد. قبل از کشت از خاک محل آزمایش نمونه مرکب تهیه و برخی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آن تعیین شد (جدول ۱). خصوصیات آب آبیاری مورد استفاده نیز اندازه‌گیری شد (جدول ۲).

جدول ۱- برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک قطعه مورد آزمایش.

Table 1- Some soil physical and chemical properties of the plot.

بافت خاک Texture	جرم مخصوص ظاهری Bulk density	قابلیت هدایت الکتریکی EC	اسیدیته pH	مواد آلی Organic matter	فسفر قابل جذب Available P*	پتاسیم قابل جذب Available K
	($g\ cm^{-3}$)	($dS\ m^{-1}$)		(%)	($mg\ kg^{-1}$)	($mg\ kg^{-1}$)
Loam	1.42	6.64	7.7	0.51	11.1	246

* حد بحرانی فسفر خاک برای گندم ۱۵-۱۲ میلی‌گرم در کیلوگرماست (۲۶).

* Critical limit of P in the soil for wheat is 12-15 mg kg^{-1} (26).

جدول ۲- برخی خصوصیات آب آبیاری مورد استفاده.

Table 2- Some irrigation water characteristics.

قابلیت هدایت الکتریکی(EC)	اسیدیته (pH)	نسبت جذب سدیم (SAR)	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^{+}	K^{+}	Cl^{-}	HCO_3^{-}	CO_3^{2-}	SO_4^{2-}
$dS\ m^{-1}$			$meq\ L^{-1}$							
1.41	8.0	7.5	3.5	2.7	13.3	0.08	8.8	4.9	0	6.4

جدول ۳- متوسط حداقل و حداکثر دمای ماهانه و مجموع بارندگی، تبخیر و ساعات آفتابی ماهانه در سال زراعی ۹۷-۱۳۹۶ بیرجند.

Table 3- Average minimum and maximum monthly temperature and total monthly precipitation, evaporation and sunny hours in Brjand, 2017-2018.

ماه و سال Month and Year	متوسط حداقل دما (درجه سانتی‌گراد) Mean of min temperature (°C)	متوسط حداکثر دما (درجه سانتی‌گراد) Mean of max temperature (°C)	مجموع تبخیر (میلی‌متر) Total evaporation (mm)	مجموع ساعات آفتابی Total sunny hours	مجموع بارندگی (میلی‌متر) Total precipitation (mm)
December 2017	-3.37	15.1	-	249	0
January 2018	-3.07	14.4	-	250	7.4
February 2018	0.93	16.5	-	189	23.1
March 2018	6.98	23.2	201	243	13.0
April 2018	11.1	25.3	256	245	29.1
May 2018	12.8	28.6	317	312	13.1
June 2018	19.1	36.1	488	357	0
July 2018	21.3	35.9	559	379	0

پژوهش حاضر به صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار بر روی گندم (رقم آنفارم ۴) در شرایط مزرعه‌ای انجام شد. این رقم گندم برای کشت در مناطق معتدل با شوری آب و خاک مانند بیرجند توصیه شده است. تاریخ مناسب کاشت آن از اوایل آبان ماه تا اواخر آذر ماه و تاریخ رسیدن آن اواخر خرداد و اوایل تیرماه است. تیمارهای آزمایشی شامل چهار سطح آب آبیاری (I_0، I_1، I_2 و I_3 به‌ترتیب معادل ۱۰۰، ۷۵، ۵۰ و ۲۵ درصد ظرفیت زراعی) و چهار سطح تیمار کودی (F_0، F_1، F_2 و F_3 به‌ترتیب شاهد، ریزجانداران محرک رشد گیاه (باکتری‌های حل کننده فسفات + قارچ‌های مایکوریزا)، سوپرفسفات تریپل به مقدار ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار و ریزجانداران محرک رشد گیاه + سوپرفسفات تریپل به مقدار ۷۵ کیلوگرم در هکتار) بود. باکتری‌های حل کننده فسفات شامل دو سویه *Pseudomonas fluorescens 187* (تهیه شده از بخش بیولوژی مؤسسه تحقیقات خاک و آب) و *Pseudomonas* sp. (تهیه شده از بانک میکروبی گروه علوم و مهندسی خاک دانشکده کشاورزی دانشگاه بیرجند) بود. براساس مطالعات آزمایشگاهی، این دو گونه باکتری توانایی انحلال فسفات‌های معدنی نامحلول در محیط جامد و مایع، تولید اکسین (ایندول استیک اسید)، تولید سیدروفور و آنزیم ACC-دآمیناز را دارا هستند. مایه تلقیح قارچ‌های مایکوریزا نیز از شرکت زیست فناور پیشتاز واریان تهیه شد. کرت‌های آزمایشی به ابعاد ۲ متر در ۲ متر، فاصله بین کرت‌ها ۱ متر و فاصله بین بلوک‌ها ۱/۵ متر لحاظ شد. براساس آزمون خاک کودهای اوره (۲۰۰ کیلوگرم در هکتار در سه نوبت و به مقدار مساوی در مراحل قبل کشت، پنجه‌زنی و قبل از ظهور سنبله‌ها) و سولفات پتاسیم (۳۰۰ کیلوگرم در هکتار قبل از کشت) به خاک اضافه شد. کود سوپرفسفات تریپل نیز براساس نقشه طرح قبل از کشت استفاده شد. در تیمارهای مربوط به باکتری‌های حل کننده فسفات، بذور گندم با مایه تلقیح این باکتری‌ها با جمعیت 10^8 سلول در میلی‌لیتر آغشته شده و کشت گردید. برای اعمال تیمارهای مربوط به قارچ‌های مایکوریزا، براساس توصیه شرکت سازنده، هر کیلوگرم بذر گندم با ۲۰ گرم مایه تلقیح حاوی قارچ‌های مایکوریزا (ترکیبی از گونه‌های

مختلف جنس *Glomus*) با جمعیت ۳۵ عدد اسپور در گرم آغشته شده و پس از آن عملیات کشت انجام گردید. کشت به صورت دستی و در هر کرت ۱۰ ردیف کشت به فاصله ۲۰ سانتی‌متر و با تراکم ۴۰۰ بوته در مترمربع کشت گردید. با توجه به شرایط آب و هوایی منطقه و کمبود بارش‌ها در فصل پاییز (جدول ۳) کشت در هفته آخر آذرماه (۲۱ آذرماه ۱۳۹۶) انجام شد. در طی دوره رشد، بر اساس تقویم آبیاری منطقه، ۹ نوبت آبیاری به روش آبیاری کرتی با استفاده از لوله‌ای با دبی ۱/۶ لیتر برثانیه انجام شد. اولین و دومین آب آبیاری برای جلوگیری از تشکیل سله و افزایش سبز شدن بذرهای کشت شده به‌صورت یکسان برای همه کرت‌ها انجام شد و از نوبت سوم به بعد آبیاری براساس تیمارهای آزمایشی صورت گرفت. مقدار آب مورد نیاز در هر مرحله از آبیاری با استفاده از کنتورهای حجمی نصب شده در انتهای لوله‌های انتقال آب اندازه‌گیری گردید. در هر نوبت آبیاری، عمق خالص آب در تیمار شاهد با روش مستقیم تعیین شد. بدین منظور، قبل از هر نوبت آبیاری، نمونه‌های خاک از محدوده‌های عمقی ۰-۲۰ و ۲۰-۴۰ سانتی‌متری برداشت و میزان رطوبت وزنی در آن‌ها تعیین شد. سپس، از آنجایی که هدف از آبیاری در تیمار شاهد (۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی)، رساندن میزان رطوبت خاک به حد ظرفیت زراعی است، از رابطه ۱ برای تعیین عمق آب آبیاری استفاده شد:

رابطه ۱: $D_{I1} = \sum_{j=1}^{2} \left((\theta_{FCj} - \theta_{BIj}) \times D_j \right)$

در این رابطه D_{I1}: عمق آب آبیاری در تیمار بر حسب میلی‌متر، Θ_{FCj}: درصد رطوبت حجمی در نقطه رطوبتی ظرفیت زراعی، Θ_{BIj}: درصد رطوبت حجمی قبل از آبیاری، D_j: عمق نمونه‌برداری جهت اندازه‌گیری رطوبت و j: تعداد لایه‌های اندازه‌گیری شده می‌باشند. مقدار آب آبیاری با ضرب نمودن عمق آب محاسبه شده در مساحت هر کرت به دست آمد. مقدار آب مصرفی برای تیمارهای ۱۰۰، ۷۵، ۵۰ و ۲۵ درصد ظرفیت زراعی بر اساس نتایج شهیدی و همکاران (۴۲) و محاسبه عمق آبیاری به ترتیب برابر ۵۳۴۰، ۴۰۰۵، ۲۶۷۰ و ۱۳۳۵ مترمکعب در هکتار تعیین شد. پس از طی دوره رشد و رسیدگی کامل، از هر کرت تعداد ۱۰ بوته با رعایت اثر حاشیه‌ای انتخاب و سپس ارتفاع و تعداد کل پنجه‌ها در آن‌ها اندازه‌گیری شده و از میانگین آن‌ها برای تجزیه و تحلیل استفاده شد. برای برداشت محصول نیز از کادر مربعی شکل به ابعاد یک متر در یک متر استفاده شد. پس از برداشت شاخص‌هایی مانند تعداد سنبله در مترمربع (شمارش کامل تعداد سنبله در مترمربع)، طول سنبله (میانگین ۲۰ سنبله)، تعداد دانه در سنبله (میانگین ۲۰ سنبله)، وزن هزار دانه (۱۰۰۰ دانه از بذرهای برداشت شده در یک مترمربع)، عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیک، غلظت فسفر دانه و درصد کلونیزاسیون ریشه اندازه‌گیری شد. همچنین، شاخص برداشت و کارایی مصرف آب (نسبت عملکرد دانه به مقدار آب مصرفی) نیز محاسبه شد.

برای اندازه‌گیری درصد کلونیزاسیون ریشه، از هر کرت ۱۰ بوته به‌طور تصادفی انتخاب و سپس ریشه‌ها به آرامی از خاک جدا شده و پس از تمیز کردن به داخل ظروف حاوی محلول آب و الکل انتقال داده شدند. برای رنگ‌آمیزی، ریشه‌ها به‌مدت یک ساعت در محلول KOH ده درصد و دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد حرارت داده شدند. سپس ریشه‌ها با آب شستشو داده شده و برای انجام عمل رنگبری ۲۰ دقیقه در محلول آب اکسیژنه قلیایی ده درصد قرار داده شدند. پس از آن ریشه‌ها مجدداً شسته شده و برای رنگ‌پذیری بهتر، ۳ دقیقه در محلول HCl یک درصد قرار گرفتند. سپس ریشه‌ها در محلول لاکتوگلیسیرین- تریپان‌بلو به‌مدت ۴۸ ساعت قرار داده

شدند تا رنگ بگیرند (۳۳). ریشه‌های رنگ‌آمیزی شده با آب شستشو داده شده و به قطعات یک سانتی‌متری برش داده شدند و به‌روشGrind line Intersect درصد کلونیزاسیون اندازه‌گیری شد (۱۴).

برای اندازه‌گیری فسفر دانه از روش کالریمتری (مولیبدو وانادات) استفاده شد. نمونه‌ها پس از خشک شدن در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد، به‌مدت ۶ ساعت در دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد درون کوره به خاکستر تبدیل شدند. به هر ظرف حاوی نمونه ۵ میلی‌لیتر اسیدکلریدریک ۲ نرمال اضافه شده و سپس محتویات ظروف به‌وسیله شستشو با آب مقطر به داخل بالن ۵۰ میلی‌لیتری منتقل گردیده و به حجم رسانده شد. پس از صاف کردن محلول با کاغذ صافی، ۲ میلی‌لیتر از محلول عصاره گیاهی به بالن ژوژه ۲۵ میلی‌لیتری منتقل گردیده و ۵ میلی‌لیتر از محلول مولیبدو وانادات به آن اضافه شد. پس از ۳۰ دقیقه فسفر نمونه‌ها در طول موج ۴۷۰ نانومتر با دستگاه اسپکتروفتومتر اندازه‌گیری شد (۱۹).

تجزیه آماری داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS ver 9.2 انجام شد. مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون LSD محافظت شده در سطح احتمال ۵ درصد و در صورت معنی‌دار بودن اثر متقابل، برش‌دهی انجام و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون lsmeans انجام شد.

نتایج و بحث

ارتفاع بوته: نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثرات اصلی و برهم‌کنش سطوح آبیاری و تیمارهای کودی بر ارتفاع بوته‌های گندم معنی‌دار شد (جدول ۴). با توجه به نتایج به دست آمده، با کاهش مصرف آب به ۵۰ و ۲۵ درصد ظرفیت زراعی، ارتفاع بوته به‌ترتیب ۱۹ و ۲۵ درصد نسبت به شاهد بدون تنش کاهش یافت. سطح ۷۵ درصد تأثیری بر این پارامتر نشان نداد. کاهش ارتفاع گیاه در شرایط تنش رطوبتی می‌تواند به کاهش جذب آب توسط گیاهچه‌ها و در نتیجه کاهش رطوبت در دسترس گیاه مربوط باشد (۱۱). گزارش شده است که هورمون‌های تنظیم‌کننده رشد گیاه مانند آبسیزیک اسید در اندام هوایی گیاهان در معرض کمبود آب تولید می‌شوند که به توقف رشد، انسداد روزنه‌ها و کاهش تولید مثل منجر می‌شود (۵۰). از طرفی، اگرچه کاربرد تنهای ریزجانداران محرک رشد گیاه (PSB+AMF) در شرایط بدون تنش تأثیری بر ارتفاع بوته نداشت، اما کاربرد ۱۵۰ کیلوگرم سوپرفسفات‌تریپل (TSP) و ریزجانداران محرک رشد گیاه + ۵۰ درصد TSP، ارتفاع بوته‌های گندم را به‌ترتیب ۲۹ و ۲۵ درصد نسبت به شاهد افزایش دادند. تیمارهای کودی تأثیر معنی‌داری بر ارتفاع بوته در سطوح ۵۰ و ۲۵ درصد ظرفیت زراعی گندم نشان ندادند، ولی در سطح ۷۵ درصد، کاربرد TSP و ریزجانداران محرک رشد گیاه + ۵۰درصد TSP، ارتفاع بوته را به‌ترتیب ۱۹ و ۱۴ درصد نسبت به شاهد در همان سطح تنش افزایش دادند. از لحاظ آماری، تفاوت معنی‌داری بین تیمار TSP و ریزجانداران محرک رشد گیاه + ۵۰ درصد TSP در سطوح ۱۰۰ و ۷۵ درصد ظرفیت زراعی در رابطه با ارتفاع بوته مشاهده نشد (جدول ۶). به‌عبارتی، با کاربرد ریزجانداران محرک رشد گیاه می‌توان ۲۵ درصد مصرف آب و ۵۰ درصد کودهای شیمیایی فسفاته را بدون تأثیر معنی‌دار بر ارتفاع گندم کاهش داد. براساس نتایج تجزیه واریانس به‌روش برش‌دهی (جدول ۵)، کاربرد تیمارهای کودی اثر معنی‌داری در سطح ۱ درصد بر ارتفاع بوته‌های گندم داشت. نتایج برش‌دهی (جدول ۶) نشان داد که فقط دو تیمار کود فسفاته و ریزجانداران محرک رشد گیاه + ۵۰ درصد کود فسفاته موجب افزایش معنی‌دار ارتفاع بوته در سطوح ۱۰۰ و ۷۵ درصد ظرفیت

زراعی شدند. هیچ‌کدام از تیمارهای کودی تأثیر معنی‌داری بر مقدار این پارامتر در سطوح آبیاری ۵۰ و ۲۵ درصد نشان ندادند. با توجه به تولید اکسین و سیدروفور و ترشح آنزیم ACC دآمیناز توسط باکتری‌های مورد استفاده در این مطالعه در شرایط آزمایشگاهی، افزایش رشد بوته‌های گندم را می‌توان به آن مرتبط دانست. باکتری‌های محرک رشد گیاه و قارچ‌های مایکوریزا از طریق تولید هورمون‌های گیاهی از جمله اکسین و سیتوکینین، تولید سیدروفور و تولید اسیدهای آلی می‌توانند رشد گیاه را افزایش دهند. اکسین تولید شده توسط باکتری‌ها می‌تواند به صورت مستقیم موجب افزایش تقسیم و رشد سلول شده و یا به‌صورت غیرمستقیم موجب افزایش تولید آنزیم ACC دآمیناز شود (۳۲). آنزیم ACC دآمیناز نقش مهمی در کاهش اتیلن تنشی در گیاه و در نتیجه افزایش مقاومت آن به تنش‌های محیطی دارد.

تعداد پنجه: براساس نتایج تجزیه واریانس داده‌ها اثرات اصلی و برهم‌کنش سطوح آبیاری و تیمارهای کودی بر تعداد پنجه‌های گندم معنی‌دار شد (جدول ۴). نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که با کاهش مصرف آب از ۱۰۰ به ۷۵، ۵۰ و ۲۵ درصد ظرفیت زراعی، تعداد پنجه در بوته به‌ترتیب ۲۵، ۳۴ و ۴۷ درصد نسبت به سطح بدون تنش کاهش یافت. شمار پنجه‌های بارور از مهم‌ترین اجزای عملکرد گندم است که اغلب توسط عوامل ژنتیکی کنترل می‌گردد، هرچند وضعیت رطوبتی خاک طی دوره رشد نیز بر آن مؤثر است. از طرفی، تولید پنجه‌های بیشتر اگرچه صفت مطلوبی محسوب می‌شود ولی تنش در آغاز گل‌دهی موجب می‌شود تا بیشتر پنجه‌ها به تولید سنبله و عملکرد منتهی نشود و این امر می‌تواند به‌دلیل مصرف مواد فتوسنتزی توسط این پنجه‌ها برای گیاه زیان‌آور باشد (۳۵). از طرف دیگر، کاربرد ریزجانداران محرک رشد گیاه، TSP و ریزجانداران محرک رشد گیاه همراه با ۵۰ درصد TSP، تعداد پنجه در بوته را در شرایط بدون تنش آبی به‌ترتیب ۱۵، ۴۸ و ۲۹ درصد نسبت به شاهد بدون مصرف کود افزایش داد. همچنین با توجه به نتایج، ریزجانداران محرک رشد گیاه به‌تنهایی تأثیر معنی‌داری بر تعداد پنجه در سطوح ۷۵، ۵۰ و ۲۵ درصد ظرفیت زراعی نشان نداد (جدول ۶). کاربرد ۱۵۰ کیلوگرم TSP در هکتار این پارامتر را در سطوح ۷۵، ۵۰ و ۲۵ درصد ظرفیت زراعی به‌ترتیب ۳۸، ۳۳ و ۳۴ درصد نسبت به شاهد در همان سطح تنش افزایش داد. از طرف دیگر، با کاربرد ریزجانداران محرک رشد گیاه همراه با ۵۰ درصد TSP تعداد پنجه‌های گندم در سطوح ۷۵ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی به‌ترتیب ۲۳ و ۲۵ درصد نسبت به همان سطح تنش افزایش یافت. این تیمار تأثیر معنی‌داری بر تعداد پنجه در سطح ۲۵ درصد ظرفیت زراعی نشان نداد (جدول ۶). نتایج تجزیه واریانس به‌روش برش‌دهی (جدول ۵) نشان داد که کاربرد تیمارهای کودی اثر معنی‌داری در سطح ۱ درصد بر تعداد پنجه داشت.مقایسه میانگین‌ها به روش برش‌دهی نشان داد که در شرایط بدون تنش آبی، همه تیمارهای کودی موجب افزایش معنی‌دار تعداد پنجه‌های گندم شدند که در بین تیمارهای کودی بیش‌ترین تعداد پنجه متعلق کاربرد کود فسفاته (۱۲/۲ عدد در بوته) بود. در سطح ۷۵ و ۲۵ درصد ظرفیت زراعی نیز فقط دو تیمار کود فسفاته و ریزجانداران محرک رشد گیاه + ۵۰ درصد کود فسفاته اثر معنی‌داری بر افزایش این پارامتر نشان دادند. همچنین، در سطح آبیاری ۵۰ درصد ظرفیت زراعی نیز هر سه تیمار کودی موجب افزایش تعداد پنجه شدند که اختلاف معنی‌داری بین سه تیمار کودی مشاهده نشد (جدول ۶). تاثیر مثبت ریزجانداران بر اجزای عملکرد گندم مانند تعداد پنجه‌ها مشخص شده است. با توجه به همبستگی مثبت و معنی‌دار بین

تعداد پنجه و درصد کلونیزاسیون ریشه (جدول ۷)، افزایش تعداد پنجه با کاربرد ریزجانداران محرک رشد گیاه می‌تواند به افزایش آلودگی ریشه‌ها با قارچ‌های مایکوریزا مربوط باشد. توسعه شبکه هیف قارچ‌ها در اطراف ریشه موجب افزایش سطوح جذب‌کننده عناصر غذایی و آب توسط گیاه شده و این منجر به افزایش فتوسنتز و در نتیجه رشد گیاه می‌شود (۳۶).

تعداد سنبله: نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثرات اصلی و برهم‌کنش سطوح آبیاری و تیمارهای کودی بر تعداد سنبله‌های گندم معنی‌دار شد (جدول ۴). با توجه به نتایج حاصل‌شده، با کاهش مصرف آب از ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی به ۷۵، ۵۰ و ۲۵ درصد، تعداد سنبله در مترمربع به‌ترتیب ۱۵، ۲۲ و ۲۳ درصد نسبت به شاهد بدون تنش کاهش یافت. به‌جز سطح آبیاری ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی، تفاوت معنی‌داری بین دیگر سطوح آبیاری مشاهده نشد. با توجه به تشکیل بیشتر سنبله‌های بارور در زمان پنجه‌دهی گیاه، کاهش تعداد سنبله در شرایط تنش رطوبتی را به کاهش در تعداد پنجه‌های بارور در واحد سطح می‌توان نسبت داد. تنش خشکی موجب کاهش تعداد سنبله به‌دلیل افزایش ناباروری پنجه‌ها، کاهش تعداد دانه در سنبله از طریق افزایش عقیمی گلچه‌های انتهایی سنبله و کاهش وزن هزار دانه به‌دلیل کاهش ظرفیت فتوسنتزی و تسریع پیری گیاه می‌گردد (۱۷). از طرف دیگر، تیمارهای کودی موجب افزایش تعداد سنبله در گندم شدند. به‌طوری‌که با کاربرد ریزجانداران محرک رشد گیاه، TSP و ریزجانداران محرک رشد گیاه + ۵۰ درصد TSP تعداد سنبله در مترمربع به‌ترتیب ۱۸، ۵۴ و ۴۶ درصد نسبت به شاهد افزایش نشان داد. کاربرد ریزجانداران محرک رشد گیاه به‌تنهایی تأثیر معنی‌داری بر این پارامتر در هیچ‌یک از سطوح آبیاری (به‌غیر از شرایط بدون تنش) نداشت. ولی کاربرد ۱۵۰ کیلوگرم TSP در هکتار و ریزجانداران محرک رشد گیاه + ۵۰ درصد TSP تعداد سنبله را در سطح آبیاری ۷۵ درصد به‌ترتیب ۲۶ و ۱۱ درصد و در سطح ۵۰ درصد ظرفیت زراعی به‌ترتیب ۱۶ و ۱۸ درصد نسبت به شاهد در همان سطح آبیاری افزایش داد. هیچ‌یک از تیمارهای کودی اثر معنی‌داری بر تعداد سنبله در سطح آبیاری ۲۵ درصد نشان ندادند (جدول ۶). با توجه به نتایج برش‌دهی (جدول ۶)، اگرچه کاربرد تنهای ریزجانداران محرک رشد گیاه تأثیر معنی‌داری بر تعداد سنبله‌ها در شرایط تنش آبی نداشت، ولی کاربرد کود فسفاته و ریزجانداران محرک رشد گیاه + ۵۰ درصد کود فسفاته موجب افزایش معنی‌دار این پارامتر در مقایسه با شاهد بدون کود شد. از طرفی، به‌غیر از سطح آبیاری ۷۵ درصد ظرفیت زراعی، اختلاف معنی‌داری بین دو تیمار کود فسفاته و ریزجانداران محرک رشد گیاه + ۵۰ درصد کود فسفاته در رابطه با تعداد سنبله‌های گندم مشاهده نشد. حبیبی و همکاران (۱۳۹۴) گزارش کردند که کاربرد گونه‌های مختلف قارچ‌های مایکوریزا موجب افزایش تعداد سنبله در بوته گندم شد (۱۶). به نظر می‌رسد که قارچ‌های مایکوریزا و باکتری‌های حل کننده فسفات با بهبود رشد و تغذیه گیاه، اجزای عملکرد و عملکرد گیاه را افزایش می‌دهند.

تعداد دانه در سنبله: براساس نتایج تجزیه واریانس داده‌ها اثرات اصلی و برهم‌کنش سطوح آبیاری و تیمارهای کودی بر تعداد دانه در سنبله معنی‌دار شد (جدول ۴). نتایج نشان داد که کاهش مصرف آب موجب کاهش معنی‌دار تعداد دانه در سنبله گردید. از لحاظ آماری تفاوت معنی‌داری بین سطوح آبیاری ۷۵ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی مشاهده نشد. از طرف دیگر، اعمال تیمارهای کودی موجب افزایش معنی‌دار این پارامتر نسبت به شاهد در شرایط بدون تنش شد. کاهش تعداد دانه در سنبله می‌تواند به کاهش درصد

تلقیح گل‌ها در شرایط تنش رطوبتی مربوط باشد. بیان شده است که تلفات دانه در شرایط تنش خشکی می‌تواند به عدم همزمانی نمو گل‌ها، نمو غیرعادی کیسه جنینی و عدم نمو دانه پس از گرده‌افشانی و باروری مربوط باشد (۴۱). علت کاهش معنی‌دار تعداد دانه در سنبله با کاهش مصرف آب، تأثیر منفی تنش آبی بر فتوسنتز و در نتیجه تعداد دانه‌ها است (۶). کاربرد تنهای ریزجانداران محرک رشد گیاه فقط در سطح ۱۰۰ و ۷۵ درصد ظرفیت زراعی تأثیر معنی‌داری بر تعداد دانه در سنبله داشت، به‌طوری‌که این تیمار تعداد دانه در سنبله را در سطوح آبیاری فوق به‌ترتیب ۱۹ و ۱۲ درصد نسبت به شاهد در همان سطح آبیاری افزایش داد. همچنین، کاربرد TSP و ریزجانداران محرک رشد گیاه +۵۰ درصد TSP تعداد دانه در سنبله را در سطح آبیاری ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی به‌ترتیب ۳۰ و ۲۸ درصد، در سطح ۷۵ درصد ظرفیت زراعی به‌ترتیب ۲۱ و ۲۵ درصد، در سطح ۵۰ درصد ظرفیت زراعی به‌ترتیب ۱۰ و ۲۴ درصد و در سطح ۲۵ درصد ظرفیت زراعی به‌ترتیب ۱۱ و ۱۴ درصد نسبت به شاهد در همان سطح آبیاری افزایش دادند. به‌غیر از سطح ۵۰ درصد ظرفیت زراعی که اثر کاربرد ریزجانداران محرک رشد گیاه + ۵۰ درصد TSP بیشتر از کاربرد TSP بود، در دیگر سطوح آبیاری تفاوت معنی‌داری بین این دو تیمار کودی مشاهده نشد (جدول ۶). بنابراین، در تمام سطوح آبیاری، می‌توان مصرف کود شیمیایی فسفاته را بدون کاهش تعداد دانه در سنبله، با کاربرد باکتری‌های حل کننده فسفات و قارچ‌های مایکوریزا کاهش داد. نتایج برش‌دهی (جدول ۶) نشان داد که در سطوح آبیاری ۱۰۰ و ۷۵ درصد ظرفیت زراعی هر سه تیمار کودی، در سطح آبیاری ۵۰ درصد ظرفیت زراعی تیمار ریزجانداران محرک رشد گیاه + ۵۰ درصد کود فسفاته و در سطح آبیاری ۲۵ درصد ظرفیت زراعی دو تیمار کود فسفاته و ریزجانداران محرک رشد گیاه + ۵۰ درصد کود فسفاته موجب افزایش معنی‌دار تعداد دانه در سنبله شدند. بیش‌ترین تعداد دانه در سنبله (۳۱/۴ عدد) از کاربرد کود فسفاته‌به دست آمد که اختلاف معنی‌داری با تیمار ریزجانداران محرک رشد گیاه + ۵۰ درصد کود فسفاته نداشت. با توجه به توانایی باکتری‌های مورد استفاده در این مطالعه در انحلال فسفات‌های نامحلول، مقدار کم فسفر قابل جذب خاک مزرعه (جدول ۱) و همچنین، افزایش غلظت فسفر دانه در تیمارهای تلقیح شده با ریزجانداران محرک رشد گیاه (جدول ۵)، افزایش تعداد دانه را می‌توان به افزایش جذب عناصر غذایی مانند فسفر، بهبود شرایط تغذیه‌ای و در نتیجه افزایش رشد دانه نسبت داد. در این مطالعه همبستگی مثبت و معنی‌داری بین غلظت فسفر دانه و تعداد دانه در سنبله مشاهده شد (جدول ۷). افزایش تعداد دانه در سنبله گندم با کاربرد ریزجانداران مفید خاک (۲۳) و کاربرد همزمان باکتری‌های حل کننده فسفات و قارچ‌های مایکوریزا (۴۰) نیز گزارش شده است. مطالعات مختلف نشان داده است که باکتری‌های محرک رشد گیاه اثر آنتاگونیستی با قارچ‌های مایکوریزا در آلوده کردن ریشه گیاه میزبان نداشته و کاربرد همزمان این ریزجانداران کارایی آن‌ها را در افزایش جذب آب و عناصر معدنی و در نتیجه توسعه رشد گیاه افزایش می‌دهد (۳۹).

جدول ٤- تجزیه واریانس(میانگین مربعات) برهم‌کنش سطوح آبیاری و تیمارهای کودی بر صفات اندازه‌گیری شده گندم.

Table 4- Analysis of variance (mean of squares) for interaction effects of irrigation levels and fertilizers on studied traits wheat.

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی df	ارتفاع بوته Plant height	تعداد پنجه Tiller number	تعداد سنبله Spike number	طول سنبله Spike length	تعداد دانه در سنبله Number of seeds per spike	وزن هزار دانه 1000- Seed weight	عملکرد دانه Grain yield	عملکرد بیولوژیک Biological yield	شاخص برداشت Harvest index	کارایی مصرف آب Water use efficiency	غلظت فسفر دانه P Concentration in seed	کلونیزاسیون ریشه Root colonization
بلوک Block	2	2.65 ns	0.36 ns	351 ns	0.81 ns	4.21 ns	1.90 ns	13125 ns	110953 ns	4.08 ns	0.002 ns	0.002 *	0.14 ns
تیمار کودی Fertilizers	3	109 **	13 **	16708 **	7.16 **	57.6 **	73.1 **	7477307 **	32293955 *	47.4 **	0.71 **	0.191 **	2647 **
سطوح آبیاری Irrigation Levels	3	631**	56.3 **	61072 **	20.1 **	148 **	177 **	14499424**	66874562**	55.9 **	0.79 **	0.013 **	294 **
تیمار کودی ×سطوح آبیاری Fertilizers × Irrigaton Levels	9	15.4*	0.68 *	3243 *	0.22 ns	3.91 **	2.79 ns	829831 **	3300024 **	2.59 ns	0.03 **	0.001 *	11.57 *
خطا Error	30	6.34	0.31	404	0.24	1.29	2.45	56878	370438	1.57	0.007	0.0004	5.11
ضریب تغییرات (درصد) CV (%)		6.04	7.64	6.17	6.76	4.73	5.45	9.29	9.40	3.24	9.71	5.09	6.67

ns،*و**:به‌ترتیب عدم معنی‌داری و معنی‌داری در سطح ۵ و ۱ درصد است.

ns, *, and ** non-significant and significant at 5% and 1% probability levels, respectively.

جدول ۵- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) برش‌دهی اثر سطوح آبیاری در تیمارهای مختلف کودی بر صفات اندازه‌گیری شده گندم.

Table 5- Sliced analysis of variance (mean of squares) of the effect of irrigation levels on fertilizer on measured wheat traits.

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی df	ارتفاع بوته Plant height	تعداد پنجه Tiller number	تعداد سنبله Spike number	تعداد دانه در سنبله Number of seeds per spike	عملکرد دانه Grainyield	عملکرد بیولوژیک Biological yield	غلظت فسفر دانه P Concentration in seed	کلونیزاسیون ریشه Root colonization	**کارایی مصرف آب** Water use efficiency
شاهد بدون مصرف کود Control	3	69.8 **	8.30 **	9.27 **	9.97 **	9.22 **	7.71 **	0.008 **	29.1 **	0.18 **
ریزجانداران محرک رشد گیاه Plant growth promoting microorganisms (PGPM)	3	115 **	11.7 **	23.3 **	33.4 **	57.6 **	49.0 **	0.002 **	137 **	0.11 **
۱۵۰ کیلوگرم در هکتار سوپرفسفات تریپل Triple superphosphate (150 kg ha^{-1})	3	261 **	22.6 **	80. 2**	48.7 **	137 **	87.9 **	0.004 **	39.1 **	0.18 **
ریزجانداران محرک رشد گیاه+ ۷۵ کیلوگرم سوپرفسفات تریپل PGPM+ Triple superphosphate (75 kg ha^{-1})	3	231**	15.7 **	62.7 **	31.6 **	94.7 **	62.6 **	0.001 **	123 **	0.42 **

**: معنی‌دار در سطح ۱ درصد است.

**: significant at 1% probability level.

جدول ٦- مقایسه میانگین برهم‌کنش سطوح آبیاری و تیمارهای کودی بر عملکرد، اجزای عملکرد، غلظت فسفر دانه، کلونیزاسیون ریشه و کارایی مصرف آب گندم.

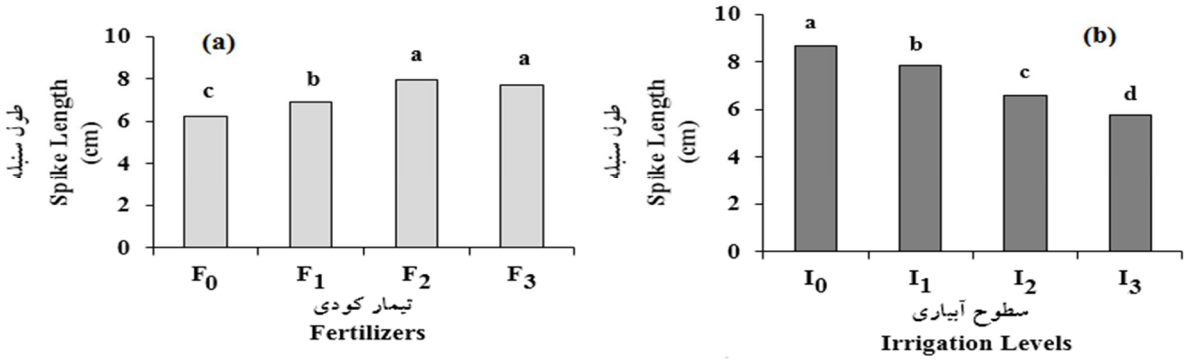
Table 6- The effect of fertilizers and irrigation water levels on the yield, yield component, seed P concentration, root colonization and water use efficiency of wheat.

تیمار کودی Fertilizers	سطوح آبیاری Irrigation Levels				سطوح آبیاری Irrigation Levels				سطوح آبیاری Irrigation Levels			
	I_0	I_1	I_2	I_3	I_0	I_1	I_2	I_3	I_0	I_1	I_2	I_3
	ارتفاع بوته (سانتی‌متر) Plant height (cm)				تعداد پنجه در بوته Tiller numbers per plant				تعداد سنبله در مترمربع Spike numbers per m^2			
F_0	43.6 cd (B)	40.6 de (B)	35.5 fg (A)	32.9 g (A)	8.23 de (D)	6.13 gh (C)	5.37 hij (B)	4.30 k (B)	331 cd (C)	281 efg (B)	259 g (C)	255 g (B)
F_1	46.8 bc (B)	44.3 bcd (AB)	36.9 efg (A)	33.5 g (A)	9.50 c (C)	6.67 fg (BC)	6.10 ghi (A)	4.83 jk (AB)	390 b(B)	306 def (B)	278 fg (BC)	261 g (AB)
F_2	56.3 a (A)	48.4 b (A)	38.8 ef (A)	35.9 fg (A)	12.2 a (A)	8.50 d (A)	7.17 f (A)	5.87 ghi (A)	512 a (A)	355 c (A)	301 def (AB)	284 efg (AB)
F_3	54.4 a (A)	46.4 bc (A)	38.3 ef (A)	34.7 fg (A)	10.6 b (B)	7.53 ef (B)	6.70 fg (A)	5.20 ijk (A)	486 a (A)	313 de (B)	311 def (A)	287 efg (A)
	تعداد دانه در سنبله Seed numbers per spike				عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار) Grain yield (kg ha^{-1})				عملکرد بیولوژیک (کیلوگرم در هکتار) Biological yield (kg ha^{-1})			
F_0	24.1 de (C)	21.3 gh (C)	20.1 hi (B)	19.3 i (C)	2192 fg (C)	1641 hi (C)	1417 hij (C)	1225 j (B)	5773 f (C)	4530 gh (C)	3986 ghi (C)	3510 i (B)
F_1	28.7 b (B)	23.8 ef (B)	21.4 gh (B)	20.1 hi (BC)	3650 b (B)	2308 ef (B)	1583 hij (C)	1317 ij (B)	9184 b (B)	5923 ef (B)	4243 ghi (C)	3735 hi (B)
F_2	31.4 a (A)	25.8 cd (AB)	22.1 fg (B)	21.4 gh (AB)	5433 a (A)	3283 bc (A)	2267 f (B)	1808 gh (A)	12279 a (A)	8148 c (A)	5759 f (B)	4929 fg (A)
F_3	30.9 a (A)	26.6 c (A)	25.1 cde (A)	22.1 fg (A)	5185 a (A)	2943 cd (A)	2667 de (A)	2150 fg (A)	11960 a (A)	7133 cd (AB)	6830 de (A)	5672 f (A)
	غلظت فسفر دانه (درصد) P Concentration in seed (%)				کلونیزاسیون ریشه (درصد) Root colonization (%)				کارایی مصرف آب (کیلوگرم در متر مکعب) Water use efficiency (Kg m^{-3})			
F_0	0.19 j (C)	0.24 i (C)	0.27 i (C)	0.32 h (C)	24.1 g (C)	21.9gh (B)	19.0hi (B)	17.1ij (C)	0.40j (C)	0.41j (C)	0.53ji (C)	0.92cde (B)
F_1	0.34 gh (B)	0.35 fg (B)	0.38 ef (B)	0.40 e (B)	54.0a (A)	45.5bc (A)	41.6de (A)	38.6e (A)	0.68gh (B)	0.57hi (B)	0.59hi (C)	0.99c (B)
F_2	0.48 cd (A)	0.46 d (A)	0.51 bc (A)	0.54 a (A)	18.7hij (D)	15.0jk (C)	12.7kl (C)	10.2l (D)	1.02c (A)	0.82ef (A)	0.85def (B)	1.35b (A)
F_3	0.52 abc (A)	0.50 bc (A)	0.53 ab (A)	0.55 a (A)	48.1b (B)	41.8cd (A)	37.5e (A)	33.0f (B)	0.97cd (A)	0.73fg (A)	1.00c (A)	1.61 a (A)

اعداد میانگین برای هر صفت که حداقل دارای یک حرف مشابه می‌باشند از نظر آماری اختلاف معنی‌داری در سطح ۵٪ بر اساس آزمون LSD ندارند. حروف بیرون پرانتز مقایسه میانگین اثرات متقابل کلی و حروف درون پرانتز مقایسه میانگین به‌روش برش دهی در هر سطح آبیاری را نشان می‌دهد. F_0، F_1، F_2 و F_3 به‌ترتیب شاهد، ریزجانداران محرک رشد گیاه، سوپرفسفات تریپل به مقدار ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار و ریزجانداران محرک رشد گیاه+ سوپرفسفات تریپل به مقدار ۷۵ کیلوگرم در هکتار می‌باشند. I_0، I_1، I_2 و I_3 به‌ترتیب معادل ۱۰۰، ۷۵، ۵۰ و ۲۵ درصد ظرفیت زراعی می‌باشند.

Means numbers for each parameter followed by at least one similar letter are not significantly different at the 5% probability level according to LSD test. The letters outside the parentheses show the comparison of overall mean interactions and the letters inside the parentheses show the mean comparison by slicing method.F_0, F_1, F_2 and F_3 representscontrol, plant growth promotin microorganisms (PGPM), 150 kg ha^{-1} triple super phosphate (TSP), and PGPM + 75 kg ha^{-1} TSP, respectively. I_0, I_1, I_2 and I_3represent 100%, 75%, 50% and 25% of field capacity, respectively.

طول سنبله: نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که فقط اثرات اصلی سطوح آبیاری و تیمارهای کودی بر طول سنبله‌های گندم معنی‌دار شد (جدول ۴). براساس نتایج به دست آمده از مقایسه میانگین داده‌ها، با کاهش مصرف آب از ۱۰۰ به ۷۵، ۵۰ و ۲۵ درصد ظرفیت زراعی، طول سنبله به‌ترتیب ۹، ۲۴ و ۳۳ درصد کاهش یافت (شکل ۱- a). از طرف دیگر، اعمال تیمارهای کودی موجب افزایش طول سنبله گردید. به‌طوری‌که کاربرد ریزجانداران محرک رشد گیاه، TSP و ریزجانداران محرک رشد گیاه +۵۰ درصد TSP، طول سنبله‌ها را به‌ترتیب ۱۱، ۲۷ و ۲۳ درصد نسبت به شاهد بدون اعمال کود افزایش داد (شکل ۱- b). از نظر آماری، تفاوت معنی‌داری بین مصرف ۱۵۰ کیلوگرم TSP در هکتار و ریزجانداران محرک رشد گیاه + ۷۵ کیلوگرم TSPدر هکتار مشاهده نشد. ریزجانداران مفید خاکزی می‌توانند با سازوکارهای مختلفی مانند تولید هورمون‌های گیاهی، سیدروفور و ترشح آنزیم‌های مختلف فراهمی عناصر غذایی برای گیاه را افزایش داده و موجب افزایش رشد گیاه شوند. با بهبود رشد و فعالیت‌های متابولیکی گیاه، رشد گیاهان سریع‌تر شده و در نتیجه به تولید سنبله‌های طویل‌تر منجر می‌شود (۳۴).

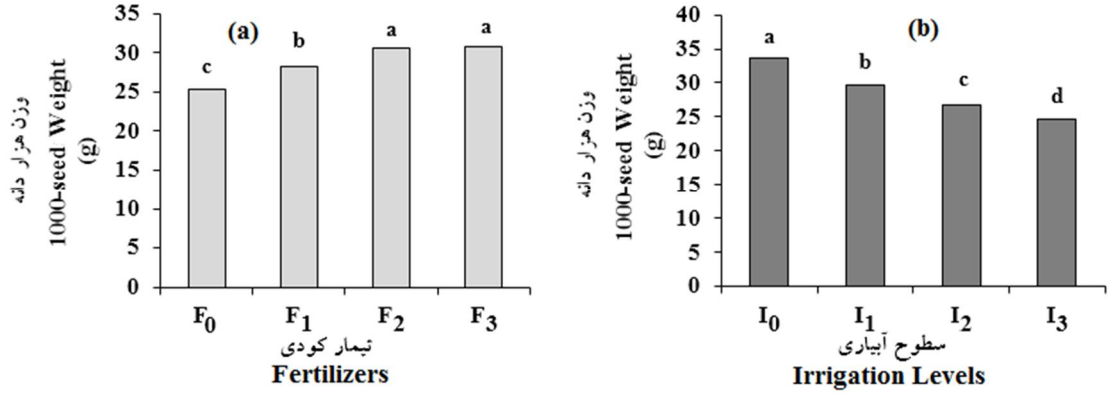


شکل ۱- مقایسه میانگین اثرات اصلی تیمارهای کودی (a) و سطوح آب آبیاری (b) بر طول سنبله گندم. در هر نمودار اعداد میانگین با حروف متفاوت از نظر آماری اختلاف معنی‌داری در سطح ۵٪ با یکدیگر دارند. F_0، F_1، F_2 و F_3 به‌ترتیب شاهد، ریزجانداران محرک رشد گیاه، سوپرفسفات تریپل به مقدار ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار و ریزجانداران محرک رشد گیاه+ سوپرفسفات تریپل به مقدار ۷۵ کیلوگرم در هکتار می‌باشند. I_0، I_1، I_2 و I_3 به‌ترتیب معادل ۱۰۰، ۷۵، ۵۰ و ۲۵ درصد ظرفیت زراعی می‌باشند.

Figure 1- Main effect of Fertilizers (a) and Irrigation water (b) on the spike length of wheat.In each graph means with different letter are significantly different at the 5% probability level.F_0, F_1, F_2 and F_3 represents Control, plant growth promoting microorganisms (PGPM), 150 kg ha^{-1} triple super phosphate (TSP), and PGPM+ 75 kg ha^{-1} TSP, respectively. I_0, I_1, I_2 and I_3 represent 100%, 75%, 50% and 25% of field capacity, respectively.

وزن هزار دانه: با توجه به نتایج تجزیه واریانس داده‌ها، فقط اثرات اصلی سطوح آبیاری و تیمارهای کودی بر وزن هزار دانه گندم معنی‌دار شد (جدول ۴). نتایج نشان داد که با کاهش مصرف آب از ۱۰۰ به ۷۵، ۵۰ و ۲۵ درصد ظرفیت زراعی، وزن هزار دانه به‌ترتیب ۱۲، ۲۰ و ۲۶ درصد کاهش یافت (شکل ۲- a). کاهش رشد و گسترش برگ‌ها در زمان پر شدن دانه در شرایط تنش آبی منجر به کاهش ظرفیت فتوسنتزی شده و در نتیجه باعث کاهش وزن هزار دانه می‌گردد (۳۰). اختلاف در راندمان جذب، تأثیرپذیری ریشه و اختلاف در انتقال مواد فتوسنتزی در درون گیاه از دیگر دلایل کاهش وزن هزار دانه در شرایط کمبود آب عنوان شده است (۴۷). از طرفی، اعمال تیمارهای کودی موجب افزایش وزن هزار دانه شد. به‌طوری‌که با کاربرد ریزجانداران محرک رشد گیاه، TSP و ریزجانداران محرک رشد گیاه+ ۵۰

درصد TSP، وزن هزار دانه به‌ترتیب ۱۱، ۲۰ و ۲۱ درصد نسبت به شاهد بدون اعمال کود افزایش یافت. بین تیمارهای TSP و ریزجانداران محرک رشد گیاه+ ۵۰ درصد TSP از لحاظ آماری تفاوتی مشاهده نشد (شکل ۲- b). باکتری‌های محرک رشد گیاه و قارچ‌های مایکوریزا می‌توانند از طریق توسعه سیستم ریشه‌ای گیاه، افزایش قابلیت جذب عناصرغذایی، بهبود ساختمان خاک، افزایش ظرفیت نگهداری آب و افزایش بیان ژن‌های مسئول ایجاد مقاومت در مقابل تنش‌های محیطی، باعث افزایش تحمل گیاه به تنش خشکی شوند (۲۱). نقش اکسین و آنزیم ACC- دآمیناز در توسعه ریشه گیاهان مختلف به اثبات رسیده است. یکی از سازوکارهای تحمل به تنش کمبود آب در گیاهان، افزایش حداکثر طول و حجم ریشه برای استفاده بیشتر از ذخایر آب است (۴۶). با توجه به شوری نسبتاً زیاد خاک مزرعه (جدول ۱)، علاوه بر تنش کمبود آب، تنش شوری نیز رشد گیاه گندم را تحت تأثیر قرار داده است. آنزیم ACC- دآمیناز ترشح‌شده توسط باکتری‌ها با کاهش اتیلن تولید شده در شرایط تنش نقش مهمی در جلوگیری از زوال برگ‌ها و در نتیجه بهبود تغذیه دانه ایفا می‌کند. با بهبود تغذیه، گیاه مواد فتوسنتزی مازاد بر نیاز خود را ذخیره کرده و بعد از گرده افشانی به دانه منتقل می‌کند. در شرایط بروز تنش‌های محیطی، ترکیبات ذخیره شده در اندام‌های هوایی نقش مهمی در رشد و پر شدن دانه ایفا می‌کنند (۴۰).



شکل ۲- مقایسه میانگین اثرات اصلی تیمارهای کودی (a) و سطوح آب آبیاری (b) بر وزن هزار دانه گندم. در هر نمودار اعداد میانگین با حروف متفاوت از نظر آماری اختلاف معنی‌داری در سطح ۵٪ با یکدیگر دارند. F_0، F_1، F_2 و F_3 به‌ترتیب شاهد، ریزجانداران محرک رشد گیاه، سوپرفسفات تریپل به مقدار ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار و ریزجانداران محرک رشد گیاه + سوپرفسفات تریپل به مقدار ۷۵ کیلوگرم در هکتار می‌باشند. I_0، I_1، I_2 و I_3 به‌ترتیب معادل ۱۰۰، ۷۵، ۵۰ و ۲۵ درصد ظرفیت زراعی می‌باشند.

Figure 2- Main effect of Fertilizers (a) and Irrigation water (b) on the 1000-seed weights of wheat. In each graph means with different letter are significantly different at the 5% probability level.F_0, F_1, F_2 and F_3 represents Control, plant growth promoting microorganisms (PGPM), 150 kg ha^{-1} triple super phosphate (TSP), and PGPM + 75 kg ha^{-1} TSP, respectively .I_0, I_1, I_2 and I_3 represent 100%, 75%, 50% and 25% of field capacity, respectively.

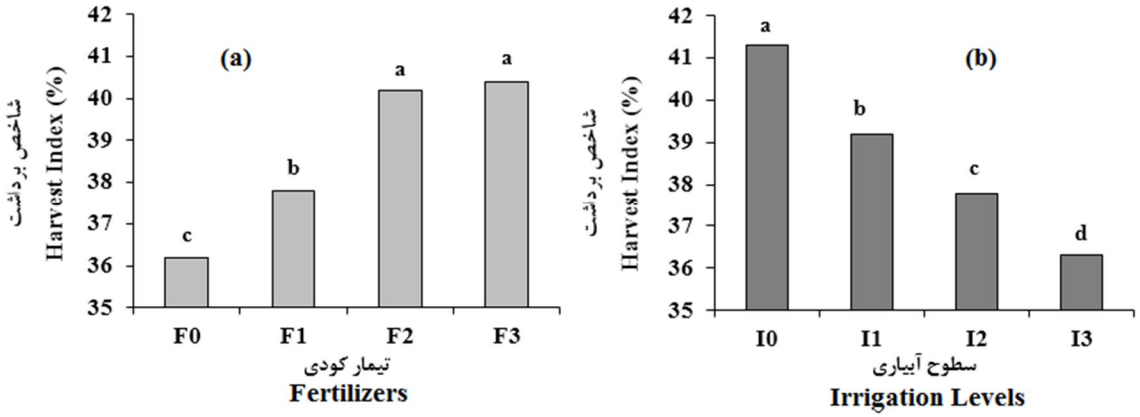
عملکرد دانه و بیولوژیک: براساس نتایج تجزیه واریانس داده‌ها اثرات اصلی و برهم‌کنش سطوح آبیاری و تیمارهای کودی بر عملکرد دانه و بیولوژیک گندم معنی‌دار شد (جدول ۴). نتایج نشان داد که با کاهش مصرف آب از ۱۰۰ به ۷۵، ۵۰ و ۲۵ درصد ظرفیت زراعی، عملکرد دانه به‌ترتیب ۲۵، ۳۵ و ۴۴ درصد و عملکرد بیولوژیک به‌ترتیب ۲۱، ۳۰ و ۳۹ درصد کاهش یافت. هر چند، بین سطوح آبیاری ۷۵ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی و همچنین، سطوح آبیاری ۵۰ و ۲۵ درصد ظرفیت زراعی تفاوت معنی‌داری

برای شاخص عملکرد بیولوژیک مشاهده نشد. تنش آبی با کاهش سطح برگ، کاهش فتوسنتز، و اختلال در روند جذب و انتقال مواد غذایی، موجب کاهش عرضه مواد پرورده شده و در نتیجه باعث تغییر در اجزای عملکرد و کاهش عملکرد دانه می‌شود (۷). با توجه به همبستگی بالای عملکرد بیولوژیک با تعداد پنجه و تعداد سنبله (جدول ۷)، کاهش عملکرد بیولوژیک با افزایش تنش آبی را می‌توان به تأثیر تنش آبی بر این پارامترها مرتبط دانست. کاهش عملکرد بیولوژیک در شرایط تنش آبی می‌تواند به دلیل کاهش طول دوره سبزمانی و توسعه برگ‌ها و در نتیجه ایجاد منبع فیزیولوژیک کوچک‌تر مربوط باشد (۳۱). پیری و ریزش برگ‌های گیاه تحت تأثیر کمبود آب نیز از دیگر عوامل کاهش‌دهنده عملکرد بیولوژیک عنوان شده است (۵). از طرفی با کاربرد ریزجانداران محرک رشد گیاه، TSP و ریزجانداران محرک رشد گیاه + ۵۰ درصد TSP در شرایط بدون تنش، عملکرد دانه به‌ترتیب ۶۶، ۱۴۸ و ۱۳۶ درصد نسبت به شاهد بدون کود افزایش یافت. در شرایط تنش آبی، کاربرد ریزجانداران محرک رشد گیاه فقط در سطح ۷۵ درصد ظرفیت زراعی بر عملکرد دانه مؤثر بود که این پارامتر را ۴۰ درصد نسبت به شاهد در همین سطح تنش افزایش داد. همچنین، کاربرد ریزجانداران محرک رشد گیاه، TSP و ریزجانداران محرک رشد گیاه + ۵۰ درصد TSP عملکرد دانه در هکتار را در سطح آبیاری ۷۵ درصد ظرفیت زراعی به‌ترتیب ۱۰۰ و ۷۹ درصد، در سطح ۵۰ درصد ظرفیت زراعی به‌ترتیب ۶۰ و ۸۸ درصد و در سطح ۲۵ درصد ظرفیت زراعی به‌ترتیب ۴۷ و ۷۵ درصد نسبت به شاهد در همان سطح آبیاری افزایش داد. با توجه به نتایج حاصل‌شده، بین تیمارهای TSP و ریزجانداران محرک رشد گیاه + ۵۰ درصد TSP در سطوح آبیاری ۱۰۰، ۷۵ و ۲۵ درصد ظرفیت زراعی تفاوت معنی‌داری مشاهده نگردید. در سطح ۵۰ درصد ظرفیت زراعی، عملکرد دانه در تیمار ریزجانداران محرک رشد گیاه + ۵۰ درصد TSP ۱۸ درصد نسبت به تیمار TSP بیشتر بود (جدول ۶). براساس نتایج تجزیه واریانس به‌روش برش‌دهی (جدول ۵)، کاربرد تیمارهای کودی اثر معنی‌داری در سطح ۱ درصد بر عملکرد دانه و بیولوژیک گندم داشت. مقایسه میانگین‌ها به‌روش برش‌دهی نشان داد که هر سه تیمار کودی عملکرد دانه را در سطوح آبیاری ۱۰۰ و ۷۵ درصد ظرفیت زراعی به‌طور معنی‌داری افزایش دادند، ولی در سطح آبیاری ۵۰ درصد فقط دو تیمار کود فسفاته و ریزجانداران محرک رشد گیاه + ۵۰ درصد کود فسفاته اثر معنی‌داری بر افزایش عملکرد دانه نشان دادند. همچنین، به‌غیر از سطح آبیاری ۵۰ درصد، اختلاف معنی‌داری بین تیمار کود فسفاته با تیمار ریزجانداران محرک رشد گیاه + ۵۰ درصد کود فسفاته در افزایش عملکرد دانه مشاهده نشد (جدول ۶). این نتایج نشان می‌دهد که در شرایط تنش خشکی کاربرد همزمان کودهای شیمیایی وریزجانداران محرک رشد گیاه نقش بیشتری در بهبود رشد و عملکرد گیاه دارد. این امر می‌تواند به نقش ریزجانداران به‌کار برده شده به‌ویژه قارچ‌های مایکوریزا در افزایش فراهمی آب و عناصر غذایی مربوط باشد. قارچ‌های مایکوریزا به‌دلیل داشتن هیف‌های گسترده به بخش بیشتری از خاک دسترسی داشته و بدین ترتیب به افزایش آب و عناصر غذایی در گیاه کمک می‌کند. از طرفی، افزایش تعداد، تنوع و همچنین، روابط متقابل بین ریزجانداران در ریزوسفر، موجب افزایش تعداد و تنوع اسیدهای آلی موثر در فرآیند انحلال فسفات‌های نامحلول می‌شود (۴۴). در مطالعه حاضر، بیش‌ترین همبستگی عملکرد دانه به‌ترتیب با اجزای عملکرد تعداد سنبله (۰/۹۴)، تعداد دانه در سنبله (۰/۹۳)، تعداد پنجه (۰/۹۱) و وزن هزار دانه (۰/۹۰) مشاهده شد که نشان‌دهنده

نقش آن‌ها در افزایش عملکرد دانه است (جدول ۷). اگر چه تاثیر تیمارها به صورت جزئی بر هر یک از اجزای عملکرد بوده ولی این اثر در مورد عملکرد که برآیند اجزای عملکرد است، شدیدتر بوده است و اثر کودها تحت شرایط تنش بر عملکرد حاصل اثر افزایشی آن‌ها بر اجزای عملکرد بوده است. همچنین، کاربرد ریزجانداران محرک رشد گیاه، TSP و ریزجانداران محرک رشد گیاه + ۵۰ درصد TSP در شرایط بدون تنش، عملکرد بیولوژیک را به‌ترتیب ۵۹، ۱۱۲ و ۱۰۶ درصد نسبت به شاهد بدون کود افزایش داد. علاوه برسطح ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی، کاربرد تنهای ریزجانداران محرک رشد گیاه عملکرد بیولوژیک را در سطح آبیاری ۷۵ درصد، ۳۰ درصد افزایش داد. این تیمار در دیگر سطوح آبیاری تأثیری بر عملکرد بیولوژیک نشان نداد. کاربرد ریزجانداران محرک رشد گیاه، TSP و ریزجانداران محرک رشد گیاه + ۵۰ درصد TSP عملکرد بیولوژیک را در سطح آبیاری ۷۵ درصد ظرفیت زراعی به‌ترتیب ۸۰ و ۵۷ درصد، در سطح آبیاری ۵۰ درصد به‌ترتیب ۴۴ و ۷۱ درصد و در سطح آبیاری ۲۵ درصد ظرفیت زراعی به‌ترتیب ۴۰ و ۶۲ درصد نسبت به شاهد در همان سطح آبیاری افزایش داد. بین تیمارهای TSP و ریزجانداران محرک رشد گیاه + ۵۰ درصد TSP در سطوح آبیاری ۱۰۰, ۷۵ و ۲۵ درصد ظرفیت زراعی تفاوت معنی‌داری برای عملکرد بیولوژیک مشاهده نشد (جدول ۶). نتایج برش‌دهی نشان داد که تیمارهای کودی نقش معنی‌داری در افزایش عملکرد بیولوژیک در سطوح آبیاری ۱۰۰ و ۷۵ درصد ظرفیت زراعی داشتند، هر چند در شرایط بدون تنش نقش دو تیمار کود فسفاته و ریزجانداران محرک رشد گیاه + کود فسفاته بیشتر از کاربرد تنهای ریزجانداران محرک رشد گیاه بود. از طرفی، اگرچه بین دو تیمار کود فسفاته و ریزجانداران محرک رشد گیاه + ۵۰ درصد کود فسفاته اختلاف معنی‌داری در سطوح آبیاری ۱۰۰، ۷۵ و ۲۵ درصد ظرفیت زراعی مشاهده نشد، ولی در سطح آبیاری ۵۰ درصد، تیمار کودی ریزجانداران محرک رشد گیاه + ۵۰ درصد کود فسفاته تأثیر بیشتری در افزایش عملکرد بیولوژیک داشت که از نظر آماری با دیگر تیمارهای کودی اختلاف معنی‌دار داشت (جدول ۶). کمبود آب از معمول‌ترین تنش‌های محیطی مؤثر بر رشد و عملکرد گیاهان در مناطق خشک و نیمه‌خشک است. به‌دلیل توانایی ریزجانداران خاکزی در سازگاری سریع با شرایط محیطی مختلف، استفاده از این ریزجانداران از جمله باکتری‌های محرک رشد گیاه و قارچ‌های مایکوریزا می‌تواند به بهبود رشد و عملکرد گیاه در این مناطق کمک کند (۲۵). دلیل افزایش عملکرد دانه با اعمال تیمارهای کودی را می‌توان به افزایش جذب عناصر غذایی از جمله فسفر در اندام هوایی گندم و نقش این عناصر در فرآیندهای فیزیولوژیکی که در نهایت به افزایش عملکرد دانه منتهی می‌شود، مربوط دانست. در این مطالعه همبستگی مثبت و معنی‌داری بین غلظت فسفر دانه با عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیک و شاخص برداشت مشاهده شد (جدول ۷). به‌دلیل تحرک بسیار کم فسفر در خاک به‌ویژه تحت شرایط تنش‌های محیطی مانند خشکی و شوری، ریزجانداران مفید خاکزی مانند باکتری‌های حل کننده فسفات و قارچ‌های میکوریزا نقش مهمی در افزایش فراهمی فسفر برای گیاه دارند. در خاک‌های شور یون‌های فسفات با کاتیون‌های کلسیم و منیزیم تشکیل کمپلکس داده و از دسترس گیاه خارج می‌شوند (۱۲). کاربرد همزمان قارچ‌های مایکوریزا و باکتری‌های محرک رشد گیاه مانند PSB می‌تواند مقاومت گیاه و در نتیجه رشد آن را در برابر تنش خشکی افزایش دهد (۲ و ۱۳). با افزایش جذب فسفر، روابط آبی گیاه اصلاح‌شده، روزنه‌ها مدت زمان بیشتری بازمانده و در نتیجه شدت

فتوسنتز افزایش‌یافته و منجر به افزایش عملکرد می‌شود (۳۶).

شاخص برداشت: نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که فقط اثرات اصلی سطوح آبیاری و تیمارهای کودی بر شاخص برداشت گندم معنی‌دار شد (جدول ۴). براساس نتایج به دست آمده از مقایسه میانگین داده‌ها، با کاهش مصرف آب از ۱۰۰ به ۷۵، ۵۰ و ۲۵ درصد، شاخص برداشت به‌ترتیب ۵، ۸ و ۱۲ درصد کاهش یافت (شکل ۳- الف). از طرف دیگر، اعمال تیمارهای کودی موجب افزایش شاخص برداشت گردید. به‌طوری‌که کاربرد ریزجانداران محرک رشد گیاه، TSP و ریزجانداران محرک رشد گیاه همراه با ۵۰ درصد TSP، شاخص برداشت را به‌ترتیب ۴، ۱۱ و ۱۲ درصد نسبت به شاهد بدون اعمال کود افزایش داد (شکل ۳- ب). شاخص برداشت از معیارهای فیزیولوژیکی مهم در گیاهان است که نشان دهنده کارایی توزیع مواد فتوسنتزی در اندام‌های مختلف گیاه است. شاخص برداشت بیش‌ترین همبستگی را با عملکرد دانه (۰/۸۹)، تعداد دانه در سنبله (۰/۸۶) و وزن هزار دانه (۰/۸۵) داشت. از طرفی، اگر چه رابطه بین شاخص برداشت با عملکرد بیولوژیک مثبت بود (۰/۵۳) ولی، در مقایسه با عملکرد دانه مقدار این همبستگی بسیار پایین بود که این نشان‌دهنده تاثیر بیشتر عملکرد دانه بر شاخص برداشت است. کاهش شاخص برداشت در شرایط کمبود آب نشان‌دهنده تأثیر بیشتر تنش خشکی بر عملکرد دانه در مقایسه با عملکرد بیولوژیک است. به‌عبارت دیگر، حساسیت اندام زایشی به تنش خشکی نسبت به اندام رویشی بیشتر است (۳۰). باتوجه به همبستگی مثبت و معنی‌دار شاخص برداشت با درصد کلونیزاسیون ریشه و غلظت فسفر دانه (جدول ۷)، به‌نظر می‌رسد ریزجانداران محرک رشد گیاه با افزایش فراهمی و دسترسی عناصر غذایی مانند فسفر موجب بهبود وضعیت تغذیه‌ای گیاه و در نتیجه عملکرد آن می‌شوند.



شکل ۳- مقایسه میانگین اثرات اصلی تیمارهای کودی (a) و سطوح آب آبیاری (b) بر شاخص برداشت گندم. در هر نمودار اعداد میانگین با حروف متفاوت از نظر آماری اختلاف معنی‌داری در سطح ۵٪ با یکدیگر دارند. F_0، F_1، F_2 و F_3 به‌ترتیب شاهد، ریزجانداران محرک رشد گیاه، سوپرفسفات تریپل به مقدار ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار و ریزجانداران محرک رشد گیاه + سوپرفسفات تریپل به مقدار ۷۵ کیلوگرم در هکتار می‌باشند. I_0، I_1، I_2 و I_3 به‌ترتیب معادل ۱۰۰، ۷۵، ۵۰ و ۲۵ درصد ظرفیت زراعی می‌باشند.

Figure 3- Main effect of Fertilizers (a) and Irrigation water (b) on the harvest index of wheat. In each graph means with different letter are significantly different at the 5% probability level.F_0, F_1, F_2 and F_3 represents Control, plant growth promoting microorganisms (PGPM), 150 kg ha^{-1} triple super phosphate (TSP), and PGPM + 75 kg ha^{-1} TSP, respectively. I_0, I_1, I_2 and I_3 represent 100%, 75%, 50% and 25% of field capacity, respectively.

غلظت فسفر دانه: براساس نتایج تجزیه واریانس داده‌ها اثرات اصلی و برهم‌کنش سطوح آبیاری و تیمارهای کودی بر غلظت دانه گندم معنی‌دار شد (جدول ۴). نتایج نشان داد که با کاهش مصرف آب غلظت فسفر دانه به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. به‌طوری‌که اعمال سطوح آبیاری ۷۵، ۵۰ و ۲۵ درصد ظرفیت زراعی، غلظت فسفر دانه را به‌ترتیب ۲۶، ۴۲ و ۶۸ درصد نسبت به شاهد بدون تنش (۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی) افزایش داد (جدول ۶). با توجه به کاهش وزن هزار دانه و عملکرد دانه با کاهش مصرف آب، دلیل افزایش غلظت فسفر دانه با افزایش تنش خشکی می‌تواند به‌دلیل کاهش رشد و اندازه دانه مربوط باشد. از طرف دیگر، کاربرد تیمارهای کودی موجب افزایش غلظت فسفر دانه نسبت به شاهد در همان سطح آبیاری شد. اگرچه درصد افزایش این پارامتر در سطوح تنشی شدید کمتر از سطوح تنشی پایین بود (جدول ۶). بر اساس نتایج، کاربرد باکتری‌های حل کننده فسفات + قارچ‌های مایکوریزا در سطوح ۱۰۰، ۷۵، ۵۰ و ۲۵ درصد ظرفیت زراعی، غلظت فسفر دانه را به‌ترتیب ۷۸، ۴۵، ۴۰ و ۲۵ درصد نسبت به شاهد در همان سطح آبیاری افزایش داد. بیش‌ترین غلظت فسفر دانه از کاربرد همزمان ریزجانداران محرک رشد و ۷۵ کیلوگرم کود شیمیایی در سطوح مختلف آب آبیاری حاصل شد که به غیر از سطح آبیاری ۷۵ درصد ظرفیت زراعی، تفاوت معنی‌داری با کاربرد ۱۵۰ کیلوگرم کود فسفاته در هکتار نداشت. مقایسه میانگین‌ها به‌روش برش‌دهی نشان داد که در تمام سطوح آب آبیاری، تیمارهای کودی موجب افزایش معنی‌دار غلظت فسفر دانه نسبت به شاهد بدون مصرف کود در همان سطح آبیاری شدند، هر چند تأثیر دو تیمار کود فسفاته و ریزجانداران محرک رشد گیاه + ۵۰ درصد کود فسفاته بیشتر کاربرد تنهای ریزجانداران محرک رشد گیاه بود. همچنین، بین دو تیمار کود فسفاته و ریزجانداران محرک رشد گیاه + ۵۰ درصد کود فسفاته در افزایش غلظت فسفر دانه اختلاف معنی‌داری در هیچ‌یک از سطوح آبیاری مشاهده نشد (جدول ۶). به‌دلیل کمتر بودن فسفر قابل جذب خاک از حد بحرانی فسفر خاک برای گندم و شوری به نسبت زیاد خاک مزرعه (جدول ۱)، بوته‌های گندم علاوه بر تنش کم آبی با تنش شوری و کمبود فسفر قابل جذب گیاه نیز مواجه بودند. گیاهان مایکوریزایی در مقایسه با گیاهان غیر مایکوریزایی به‌دلیل تشکیل شبکه هیف قارچ در محیط پیرامون ریشه، سطوح جذب‌کننده بیشتری برای جذب آب و عناصر غذایی ایجاد کرده و در نتیجه موجب افزایش هدایت هیدرولیکی ریشه می‌گردند. افزایش غلظت عناصر غذایی از جمله فسفردر گیاه پس از تلقیح با باکتری *سودوموناس* اغلب به‌دلیل تولید تنظیم‌کننده‌های رشد گیاه مانند اکسین توسط باکتری و اثر آن بر رشد ریشه است که موجب افزایش جذب آب و عناصر غذایی می‌گردد. افزایش جذب عناصر غذایی توسط گیاه منجر به تجمع مواد معدنی در اندام هوایی و انتقال آن به اندام زایشی در طول دوره زایش شده و در نتیجه عملکرد گیاه افزایش می‌دهد (۱۰). گزارش شده است که کاربرد همزمان باکتری‌های حل کننده فسفات و کودهای فسفاته موجب افزایش جذب فسفر در گندم می‌شود (۳۸).

کلونیزاسیون ریشه: اثرات اصلی و برهم‌کنش سطوح آبیاری و تیمارهای کودی بر درصد کلونیزاسیون ریشه‌های گندم معنی‌دار شد (جدول ۴). نتایج نشان داد که با کاهش مصرف آب درصد کلونیزاسیون ریشه نیز کاهش یافت، به‌طوری‌که در سطح ۲۵ درصد ظرفیت زراعی، مقدار این پارامتر ۲۹ درصد نسبت به شاهد کاهش پیدا کرد. کاهش معنی‌دار درصد کلونیزاسیون ریشه با افزایش تنش خشکی را می‌توان

به کاهش جوانه‌زنی اسپور و رشد هیف ارتباط داد. رشد هیف حاصل از جوانه‌زنی اسپور نقش عمده‌ای در کلونیزاسیون ریشه دارد (۳۹). از طرف دیگر، تلقیح با ریزجانداران محرک رشد گیاه موجب افزایش درصد کلونیزاسیون ریشه در سطوح مختلف آب آبیاری شد. همچنین، کاربرد همزمان ریزجانداران محرک رشد گیاه و ۷۵ کیلوگرم کود فسفاته در هکتار موجب افزایش درصد کلونیزاسیون ریشه شد، هرچند این افزایش در مقایسه با کاربرد بدون کود شیمیایی ریزجانداران کمتر بود. بیش‌ترین درصد کلونیزاسیون ریشه (۵۵ درصد) از کاربرد همزمان ریزجانداران محرک رشد گیاه (باکتری‌های حل کننده فسفات + قارچ‌های مایکوریزا) در شرایط بدون تنش آبی به دست آمد که اختلاف معنی‌داری با دیگر تیمارها داشت (جدول ۶). کاهش عملکرد گندم با کاهش مصرف آب می‌تواند در نتیجه کاهش درصد کلونیزاسیون ریشه و کاهش جذب آب و عناصر غذایی مربوط باشد. نتایج مطالعه حاضر نشان داد که همبستگی مثبت و معنی‌داری بین درصد کلونیزاسیون ریشه با تعداد پنجه، تعداد دانه در سنبله، وزن هزار دانه, عملکرد و شاخص برداشت مشاهده شد (جدول ۷). از طرف دیگر، با مصرف کود شیمیایی درصد کلونیزاسیون ریشه کاهش یافت. کاربرد ۱۵۰ کیلوگرم سوپرفسفات تریپل در هکتار در سطوح آبیاری ۱۰۰، ۷۵، ۵۰ و ۲۵ درصد ظرفیت زراعی، درصد کلونیزاسیون ریشه را به‌ترتیب ۲۲، ۳۱، ۳۳ و ۴۰ درصد نسبت به شاهد در همان سطح آبیاری کاهش داد (جدول ۶). نتایج برش‌دهی (جدول ۶) نشان داد که بیش‌ترین درصد کلونیزاسیون ریشه در تمام سطوح آبیاری از کاربرد تنهای ریزجانداران محرک رشد گیاه به دست آمد که به‌غیر از سطوح آبیاری ۷۵ و ۲۵ درصد ظرفیت زراعی اختلاف معنی‌داری با دیگر تیمارهای کودی داشت. هم‌چنین در تمام سطوح آب آبیاری کمترین درصد کلونیزاسیون ریشه مربوط به کاربرد ۱۵۰ کیلوگرم TSP در هکتار بود. نقش منفی کودهای شیمیایی از جمله کودهای فسفاته بر فعالیت ریزجانداران خاکزی و درصد کلونیزاسیون ریشه به اثبات رسیده است (۳۹).

کارایی مصرف آب: نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثرات اصلی و برهم‌کنش سطوح آبیاری و تیمارهای کودی بر کارایی مصرف آب گندم معنی‌دار شد (جدول ۴). براساس نتایج به دست آمده، اگر چه سطوح ۷۵ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی تأثیر معنی‌داری بر کارایی مصرف آب گندم نشان نداد، ولی سطح ۲۵ درصد ظرفیت زراعی مقدار این پارامتر را ۲/۳ برابر نسبت به شرایط بدون تنش افزایش داد. با افزایش شدت تنش خشکی، کارایی مصرف آب برای ماده خشک کل و عملکرد دانه افزایش می‌یابد، به‌طوری‌که اختلاف معنی‌داری با شرایط بدون تنش ایجاد می‌کند (۲۴). همچنین، با اعمال تیمارهای کودی کارایی مصرف آب افزایش نشان داد که در بین تیمارهای کودی، کاربرد همزمان ریزجانداران محرک رشد گیاه و ۵۰ درصد کود فسفاته تأثیر بیشتری در این افزایش به‌ویژه در سطوح تنشی زیاد داشت. بیش‌ترین کارایی مصرف آب (۱/۶۱ کیلوگرم بر مترمکعب) از کاربرد همزمان ریزجانداران محرک رشد گیاه + ۷۵ کیلوگرم کود فسفاته در سطح ۲۵ درصد ظرفیت زراعی به دست آمد. کاربرد ریزجانداران محرک رشد گیاه بدون کود شیمیایی در سطوح ۱۰۰ و ۷۵ درصد ظرفیت زراعی، مقدار این پارامتر را به‌ترتیب ۷۰ و ۳۹ درصد نسبت به شاهد در همان سطح آب آبیاری افزایش داد (جدول ۶). با توجه به نتایج به دست آمده از برشی‌دهی، کاربرد تنهای ریزجانداران محرک رشد گیاه فقط در سطوح آب آبیاری ۱۰۰ و ۷۵ درصد ظرفیت زراعی تأثیر معنی‌داری در افزایش کارایی مصرف آب داشت.

همچنین، کاربرد کود فسفاته و ریزجانداران محرک رشد گیاه + ۵۰ درصد کود فسفاته موجب افزایش معنی‌دار این پارامتر در تمام سطوح آب آبیاری نسبت به شاهد در همان سطح آبیاری شد. به‌غیر از سطح ۵۰ درصد ظرفیت زراعی، اختلاف معنی‌داری بین کود فسفاته و ریزجانداران محرک رشد گیاه + ۵۰ درصد کود فسفاته در افزایش کارایی مصرف آب مشاهده نشد (جدول ۶). عمده‌ترین دلیل افزایش کارایی مصرف آب با کاربرد باکتری‌های محرک رشد گیاه مربوط به ترشح تنظیم‌کننده‌های رشد، سیدروفور و آنزیم‌ها است که نتیجه آن افزایش رشد ریشه و جذب عناصر غذایی است. گزارش شده است که پتانسیل آب برگ و هدایت روزنه‌ای در گیاهان مایکوریزی نسبت به گیاهان غیر مایکوریزی بیشتر بوده و این گیاهان دارای مواد فتوسنتزی بیشتری می‌باشند (۲۸). در این مطالعه نیز همبستگی مثبت و معنی‌داری بین کارایی مصرف آب با غلظت فسفر دانه و درصد کلونیزاسیون ریشه مشاهده شد که نشان‌دهنده اهمیت قارچ‌های مایکوریزا در افزایش جذب آب و عناصر غذایی توسط گیاه است.

جدول ۷- ضریب همبستگی صفات مورد مطالعه گندم.

Table 7- Correlation coefficients between measured traits of wheat.

Variable	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	1											
2	0.90**	1										
3	0.86**	0.92**	1									
4	0.87**	0.89**	0.70**	1								
5	0.86**	0.70**	0.59**	0.47**	1							
6	0.58**	0.46**	0.55**	0.37**	0.72**	1						
7	0.51**	0.91**	0.94**	0.87**	0.93**	0.90**	1					
8	0.49**	0.92**	0.72**	0.65**	0.60**	0.61**	0.79**	1				
9	0.39**	0.83**	0.78**	0.80**	0.86**	0.85**	0.89**	0.53**	1			
10	0.14ns	0.19ns	0.27*	0.26*	0.32*	0.32*	0.39*	0.38*	0.42**	1		
11	0.23ns	0.37**	0.20ns	0.23ns	0.36**	0.32**	0.35**	0.36**	0.26*	0.38**	1	
12	-0.15ns	-0.07ns	0.08ns	-0.10ns	0.03ns	-0.003ns	0.16ns	0.16ns	0.09ns	0.76**	0.42**	1

صفات اندازه‌گیری شده: ۱: ارتفاع گیاه، ۲: تعداد پنجه، ۳: تعداد سنبله، ۴: طول سنبله، ۵: تعداد دانه در سنبله، ۶: وزن هزار دانه، ۷: عملکرد دانه، ۸: عملکرد بیولوژیک، ۹: شاخص برداشت، ۱۰: غلظت فسفر دانه، ۱۱: درصد کلونیزاسیون ریشه، ۱۲: کارایی مصرف آب.ns، *و**: به ترتیب عدم معنی‌داری و معنی‌داری در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد است.

Measured trait: 1: Plant height, 2: Tiller number 3: Spike number, 4: Spike length, 5: Number of seed per spike, 6: 1000 seeds weight, 7: Grain yield, 8: Biological yield, 9: Harvest index, 10: Seed P concentration, 11: Root colonization, 12: Water use efficiency.ns,* and ** non-significant and significant at 5% and 1% probability levels, respectively.

نتیجه‌گیری کلی

به‌طور کلی نتایج این مطالعه نشان داد که استفاده از ریزجانداران مفید خاکزی از قبیل باکتری‌های حل کننده فسفات و قارچ‌های مایکوریزا می‌تواند موجب افزایش رشد و عملکرد گندم در شرایط مزرعه‌ای شود. با توجه به نتایج به دست آمده، اگرچه در بیشتر شاخص‌های اندازه‌گیری شده کاربرد کودهای شیمیایی بیش‌ترین تأثیر را در افزایش عملکرد داشت، ولی کاربرد ریزجانداران محرک رشد گیاه (AM+PSB) همراه با ۵۰ درصد کود شیمیایی از لحاظ آماری تفاوتی با کاربرد کامل کود شیمیایی نداشت. به‌عبارتی، با توجه به مشکلات زیست‌محیطی کودهای شیمیایی و هزینه بالای آن‌ها، می‌توان تا حدود ۵۰ درصد کودهای شیمیایی را بدون آنکه تأثیری بر عملکرد داشته باشد، کاهش داد. از طرفی، اگرچه کمبود آب و تنش خشکی جز جدا نشدنی مناطق خشک و نیمه‌خشک است، ولی با توجه به نتایج این مطالعه، با مصرف بهینه و تلفیقی کودهای شیمیایی و ریزجانداران محرک رشد گیاه می‌توان تا حدودی از

خسارت‌های ناشی از تنش خشکی در تولید محصولات کشاورزی در این مناطق جلوگیری کرد. علاوه بر این، نتایج نشان داد که در شرایط تنش خشکی کاربرد همزمان کودهای شیمیایی و ریزجانداران محرک رشد گیاه نتایج بهتری نسبت به کاربرد تنهای کود شیمیایی داشت که این امر نشان‌دهنده پتانسیل زیاد ریزجانداران مفید خاکزی در افزایش تحمل گیاه به شرایط نامساعد محیطی و در نتیجه بهبود رشد و عملکرد گیاه است. با توجه به نتایج بدست آمده، کاربرد ریزجانداران محرک رشد گیاه (قارچ‌های مایکوریزا + باکتری‌های حل کننده فسفات) همراه با ۵۰ درصد کود فسفاته موجب افزایش ۷۰ درصدی عملکرد دانه در تنش رطوبتی شدید شد. بنابراین، کاربرد هم‌زمان کودهای شیمیایی و ریزجانداران محرک رشد گیاه به‌ویژه در شرایط کمبود آب در تولید گندم توصیه می‌شود.

منابع

1. Adesemoye, A.O., and Kloepper, J.W. 2009. Plant–microbes interactions in enhanced fertilizer-use efficiency. Appl. Microbiol. Biotechnol. 85: 1. 1-12.
2. Adesemoye, A.O., Torbert, H.A., and Kloepper, J.W. 2009. Plant growth-promoting rhizobacteria allow reduced application rates of chemical fertilizers. Microb. Ecol. 58: 4. 921-929.
3. Augé, R.M., Toler, H.D., and Saxton, A.M. 2015. Arbuscular mycorrhizal symbiosis alters stomatal conductance of host plants more under drought than under amply watered conditions: a meta-analysis. Mycorrhiza. 25: 1. 13-24.
4. Das, K., Katiyar, V., and Goel, R. 2003. Phophorous solubilization potential of plant growth promoting *Pseudomonas* mutants at low temperature. Microbiol. Res. 158: 4. 359-362.
5. Dehghanzadeh, H. 2019. Evaluation of some physiological growth indices effective on growth and grain yield of three wheat cultivars under drought stress. Environ. Stresses Crop Sci. 12: 2. 365-375. (In Persian)
6. Duggan, B.L., and Fowler, D.B. 2006. Yield structure and kernel potential of winter wheat on the Canadian prairies. Crop Sci. 46: 4. 1479-1488.
7. Earl, H., and Davis, R. F. 2003. Effect of drought stress on leaf and whole canopy radiation use efficiency and yield of maize. Agron. J. 95: 3. 688-696.
8. Emam, Y. 2007. Cereal crops. Shiraz University Press, 190p. (In Persian)
9. Emami, S., Alikhani, H.A., Pourbabaei, A.A., Etesami, H., MotashareZadeh, B., and Sarmadian, F. 2018. Improved growth and nutrient acquisition of wheat genotypes in phosphorus deficient soils by plant growth-promoting rhizospheric and endophytic bacteria. Soil Sci. Plant Nutr. 64: 6. 719-727.
10. FallahNosrat Abad, A., and Shariati, Sh. 2014. Effect of *Pseudomonas* and *Bacillus* bacteria on yield and nutrient uptake in comparison with chemical and organic fertilizers in wheat. J. Water Soil 28: 5. 976-986. (In Persian)
11. Farooq, M.A., Wahid, N., Kobayashi, D.F., and Basra, S.M.A. 2009. Plant drought stress: effects, mechanisms and management. Agron. Sustain. Dev. 29: 1. 185-212.
12. Garg, N., and Bhandari, P. 2016. Silicon nutrition and mycorrhizal inoculations improve growth, nutrient status, K^+/Na^+ ratio and yield of *Cicer arietinum* L. genotypes under salinity stress. Plant Growth Regul. 78: 3. 371-378.
13. Ghorchiani, M., Etesami, H., and Alikhani, H.A. 2018. Improvement of growth and yield of maize under water stress by co-inoculating an arbuscular mycorrhizal fungus and a plant growth promoting rhizobacterium together with phosphate fertilizers. Agric. Ecosyst. Environ. 258: 1. 59-70.
14. Giovannetti, M., and Mosse, B. 1980. An evaluation of techniques for measuring vesicular-arbuscular infection in roots. New Phytol. 84: 3. 489-500.
15. Gyaneshwar, P., Kumar, G.N., Parekh, L.J., and Poole, P.S. 2002. Role of Soil Microorganisms in Improving P Nutrition of Plants, Food Security in Nutrient-stressed Environments:

Exploiting Plants' Genetic Capabilities. Springer, Pp, 133-143.
16. Habibi, S., Meskarbashee, M., and Farzaneh, M. 2015. Effect of mycorrhizal fungus (*Glomus* spp) on wheat (*Triticum aestivum*) yield and yield components with regard to irrigation water quality. Iranian J. Field Crops Res. 13: 3. 471-483. (In Persian)
17. Jian-yong, W., You-Cai, X., Feng-Min, L., Kadambot, H.M., and Neil, C.T. 2017. Effects of drought stress on morpho-physiological traits, biochemical characteristics, yield, and yield components in different ploidy wheat: A meta-analysis. Adv. Agron. 134: 1. 139-173.
18. Jilani, G., Akram, A., Ali, R.M., Hafeez, F.Y., Shamsi, I.H., Chaudhry, A.N., and Chaudhry, A.G. 2007. Enhancing crop growth, nutrients availability, economics and beneficial rhizospheremicroflora through organic and biofertilizers. Ann. Microbiol. 57: 2. 177-183.
19. Jones, J.B. 2001. Laboratory guide for conducting soil tests and plant analysis, 384. Boca Raton, FL: CRC Press. 382 p.
20. Karimian, N., and Tehrani, M.M. 2018. Soil fertility, In: The soils of Iran. Roozitalab, M.H., Siadat, H., and Farshad, A., Eds. Springer, Switzerlans. 143 p.
21. Karlidag, H., Esitken, A., Turan, M., and Sahin, F. 2007. Effects of root inoculation of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) on yield, growth and nutrient elements contents of leaves of apple. Sci. Hortic. 114: 1. 16-20.
22. Khan, M.S., Zaidi, A., and Ahmad, E. 2014. Mechanism of phosphate solubilization and physiological functions of phosphate-solubilizing microorganisms. Phosphate Solubilizing Microorganisms. Springer, Pp, 31-62.
23. Kordzangeneh, R., and Marashi, S.K. 2018. Studying the effects of combined application of chemical and biological fertilizers of potassium on yield and yield components of wheat (*Triticum aestivum* L.) under soil moisture shortage. Environ. Stresses Crop Sci. 11: 4. 863-872. (In Persian)
24. Liu, E.K., Mei, X.R., Yan, C.R., Gong, D.Z., and Zhang, Y.Q. 2016. Effects of water stress on photosynthetic characteristics, dry matter translocation and WUE in two winter wheat genotypes. Agric. Water Manag. 167: 1. 75-85.
25. Mäder, P., Kaiser, F., Adholeya, A., Singh, R., Uppal, H.S., Sharma, A.K., Srivastava, R., Sahai, V., Aragno, M., and Wiemken, A. 2011. Inoculation of root microorganisms for sustainable wheat–rice and wheat–black gram rotations in India. Soil Biol. Biochem. 43: 3. 609-619.
26. Malakouti, M.J., Keshavarz, P., and Karimian, N. 2008. A comprehensive approach towards identification of nutrient deficiencies and optimal fertilization for sustainable agriculture. Tarbiat Modares University Press, Tehran, Iran. 804 p. (In Persian)
27. Malek, M.M., Galavi, M., Ramroudi, M., and Nakhzari Moghaddam, A. 2019. Evaluation of drought tolerance of wheat cultivars under water deficiency stress after flowering. J. Crop Prod. 12: 2. 123-136. (In Persian)
28. Ortas, I., Sari, N., Akpinar, C., and Yetisir, H. 2011. Screening mycorrhiza species for plant growth, P and Zn uptake in pepper seedling grown under greenhouse conditions. Sci. Hortic. 128: 2. 92-98.
29. Pandey, R.K., Maranville, J.W., and Adamou, A., 2001. Tropical wheat response to irrigation and nitrogen in a sahelian environment. I. Grain yield, yield components and water use efficiency. Eur. J. Agron. 15: 2. 93-105.
30. Pandey, R.K., Maranville, J.W., and Chetima, M.M. 2000. Deficit irrigation and nitrogen effects on maize in a Sahelian environment: II. Shoot growth, nitrogen uptake and water extraction. Agric. Water Manag. 46: 1. 15-27.
31. Paolo, E.D., and Rinaldi, M. 2008. Yield response of corn to irrigation and nitrogen fertilization in a Mediterranean environment. Field Crops Res. 105: 3. 202-210.
32. Patten, C.L., and Glick, B.R. 2002. Role of *Pseudomonas putida* indole acetic acid in development of the host plant root system. Appl. Environ. Microbiol. 68: 8. 3795-3801.

33. Phillips, J.M., and Hayman, D.S. 1970. Improved procedures for clearing roots and staining parasitic vesicular-arbuscular mycorrizal fungi for rapid assessment of infection. Trans. Br. Mycol. Soc. 55: 1. 158-161.
34. Razzaq, A., Mahmood, I., Iqbal, J., Rasheed, A.Q.M., and Ahmad, M. 2013. Enhancing drought tolerance of wheat (*Triticum aestivum* L.) through chemical priming. Wulfenia. 20: 7. 44-58.
35. Rebetzke, G.J. 2002. Selection for reduced carbon-isotope discrimination increases aerial biomass and grain yield of rainfed bread wheat. Crop Sci. 42: 3. 453-465.
36. Rejali, F., Esmaeilizad, A., and Saghafi, K. 2019. Effect of symbiosis interaction of mycorrhizae arbuscular on mineral uptake in wheat (*Pishtaz cultivar*). Iranian J. Field Crop Sci. 49: 4. 51-65.
37. Reynolds, M.P., Ortizi-Monasterio, I., and McNab, A. 2001. Application of physiology in wheat breeding. CIMMYT, Mexico, 240 p.
38. Rezakhani, L., Motesharezadeh, B., Tehrani, M.M., Etesami, H., and Hosseini, H.M. 2019. Phosphate–solubilizing bacteria and silicon synergistically augment phosphorus (P) uptake by wheat (*Triticum aestivum* L.) plant fertilized with soluble or insoluble P source. Ecotoxicol. Environ. Saf. 173: 1. 504-513.
39. Sawers, R.J.H., Gutjahr, C., and Paszkowski, U. 2008. Cereal mycorrhiza: an ancient symbiosis in modern agriculture. Trends Plant Sci. 13: 2. 93-97.
40. Saxena, M.J., Chandra, S., and Nain, L. 2013. Synergistic effect of phosphate solubilizing rhizobacteria and arbuscular mycorrhiza on growth and yield of wheat plants. J. Soil Sci. Plant Nutr. 13: 2. 511-525.
41. Sepehri, A., Modarres Sanavi, S.A., Gharehyazi, B., and Yamini, Y. 2002. Effect of water deficit and different nitrogen rates on growth and development stages, yield and yield component of maize (*Zea mays* L.). Iranian J. Crop Sci. 4: 3. 184-201. (In Persian)
42. Shahidi, A. 2008. Interaction of deficit irrigation and salinity on yield and yield components of wheat cultivars and determining water–salinity production function in the Birjand region. PhD Thesis, Shahid Chamran University. (In Persian)
43. Shahidi, A., and Miri, Z. 2018. The effect of salinity on yield and yield components of two wheat cultivars in the plain of Birjand. J. Crop Prod. 11: 2. 51-61. (In Persian)
44. Sharma, A.K. 2002. Biofertilizers for sustainable agriculture. Agrobios Indian Publications. 456 p.
45. Sharma, S.B., Sayyed, R.Z., Trivedi, M.H., and Gobi, T.A. 2013. Phosphate solubilizing microbes: sustainable approach for managing phosphorus deficiency in agricultural soils. Springer Plus 2. 587 p.
46. Sharp, R.E., Poroyko, V., Hejlek, J.G., Spollen, W.G., Springer, G.K., Bohnert, H.J., and Nguyen, H.T. 2004. Root growth maintenance during water deficits: physiology to functional genomics. J. Exp. Bot. 55: 407. 2343-2351.
47. Siddique, M.R.B., Hamid, A., and Islam, M.S., 1999. Drought stress effects on photosynthesis rate and leaf gas exchange of wheat Bot Bull. Academic Sci. 40: 1. 141-145.
48. Soleymani, A. 2016. Effect of drought stress on yield and yield components of wheat by ET-HS model. Environ. Stresses Crop Sci. 9: 3. 205-313. (In Persian)
49. Tardieu, F. 2011. Any trait or trait-related allele can confer drought tolerance: just design the right drought scenario. J. Exp. Bot. 63: 1. 25-31.
50. Wilkinson, S., and Davies, W.J. 2010. Drought, ozone, ABA and ethylene: new insights from cell to plant to community. Plant cell Environ. 33: 4. 510-525.
51. Zaidi, A., Khan, M.S., Ahemad, M., Oves, M., and Wani, P.A. 2009. Recent advances in plant growth promotion by phosphate-solubilizing microbes, microbial strategies for crop improvement. Springer, Pp, 23-50.