تنش‌های محیطی در علوم زراعی
Environmental Stresses in Crop Sciences
جلد سیزدهم، شماره چهارم، زمستان ۱۳۹۹
۱۲۰۳-۱۲۱۸
http://dx.doi.org/10.22077/escs.2020.2298.1591

*مقاله پژوهشی*

# تأثیر محلول‌پاشی نانوذرات اکسید روی بر اجزای عملکرد، عملکرد و شاخص‌های کارایی روی در برنج تحت شرایط تنش کم‌آبی

**نوراله خیری[1*]، مریم عباسعلی‌پور[2]**

۱. گروه زراعت، واحد گرگان، دانشگاه آزاد اسلامی، گرگان، ایران
۲. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه علوم و صنایع غذایی، واحد آیت‌الله آملی، دانشگاه آزاد اسلامی، آمل، ایران

**تاریخ دریافت: ۹۷/۱۲/۰۵؛ تاریخ پذیرش: ۹۸/۰۲/۰۳**

**چکیده**

**روی از طریق تنظیم روزنه و تعادل یونی در گیاهان زراعی نقش مهمی در کاهش اثرات منفی تنش خشکی ایفا می‌نماید. از طرفی کاربرد روی به فرم نانوذرات به دلیل کارایی جذب و انتقال بهتر نسبت به فرم معمولی می‌تواند در شرایط تنش خشکی اثرات بهتری بر رشد و عملکرد داشته باشد. به همین منظور، آزمایشی با هدف بررسی تأثیر محلول‌پاشی نانوذرات اکسید روی بر اجزای عملکرد، عملکرد و شاخص‌های کارایی روی در برنج رقم طارم هاشمی در شرایط کم‌آبیاری به‌صورت کرت‌های خردشده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در سال ۱۳۹۵ در مزرعه‌ای واقع در شهرستان آمل اجرا گردید. آبیاری در چهار سطح (شاهد یا غرقاب دائم، تنش کم‌آبی در مرحله پنجه‌زنی به مدت ۱۵ روز، تنش کم‌آبی در مرحله گلدهی به مدت ۱۵ روز و تنش کم‌آبی در مرحله پر شدن دانه به مدت ۱۵ روز به‌عنوان فاکتور اصلی و محلول‌پاشی نانوذرات اکسید روی در چهار سطح (صفر، ۲۵، ۵۰ و ۷۵ میلی‌گرم اکسید روی در لیتر) به‌عنوان فاکتور فرعی در نظر گرفته شدند. نتایج نشان داد که عملکرد، اجزای عملکرد و هم‌چنین غلظت و جذب روی در دانه و کاه برنج در شرایط تنش کم‌آبی به‌خصوص در مرحله گلدهی به‌طور معنی‌داری کاهش یافتند. استفاده از مقادیر ۵۰ و ۷۵ میلی‌گرم بر لیتر نانوذرات اکسید روی منجر به بهبود طول خوشه (به‌ترتیب ۲/۷ و ۳/۶ درصد)، تعداد پنجه بارور در کپه (به‌ترتیب ۱۰/۴ و ۱۲/۹ درصد)، تعداد دانه پر در خوشه (به‌ترتیب ۱۱/۶ و ۱۳/۷ درصد)، غلظت (به‌ترتیب ۴۴/۲ و ۵۱/۸ درصد) و جذب (به‌ترتیب ۵۱/۶ و ۵۹/۶ درصد) روی در دانه و درنهایت عملکرد دانه (به‌ترتیب ۱۳ و ۱۶/۳ درصد) در مقایسه با شاهد یا عدم مصرف نانوذرات اکسید روی گردید؛ بنابراین آبیاری غرقاب دائم همراه با مصرف ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر نانوذرات اکسید روی جهت بهبود عملکرد و جذب روی در دانه برنج مناسب است.**

***واژه‌های کلیدی*: برنج، تنش کم‌آبی، عملکرد دانه، محلول‌پاشی روی، نانوکود**

## مقدمه

برنج غذای اصلی بیش از نیمی از جمعیت دنیاست (Reis et al., 2018) و به‌عنوان یک گیاه غرقابی، از حساس‌ترین گیاهان نسبت به تنش آبی بوده و بیشترین نیاز آبی را در بین غلات دارد (Yang et al., 2008). در بین تنش‌های مختلف محیطی، تنش خشکی به دلیل کاهش قابل‌توجه عملکرد محصول از مهم‌ترین تنش‌های خسارت‌زا محسوب می‌شود که خسارت سالانه آن در سراسر دنیا میلیاردها دلار است (Tardieu et al., 2014). پیش‌بینی‌ها حاکی از آن است که تا سال ۲۰۵۰ میلادی که جمعیت دنیا به حدود ۹/۷ میلیارد نفر می‌رسد تقریباً ۴۹ درصد از تولیدات جهانی دانه در مناطقی اتفاق می‌افتد که با کم‌آبی مواجه هستند (Rosegrant, 2016).

کمبود آب منجر به کاهش پتانسیل آب خاک و ازاین‌رو تأثیر مستقیمی بر فتوسنتز، تعرق، دمای برگ، باز شدن

* نگارنده پاسخگو: نوراله خیری. پست الکترونیک: norollah.kheyri@yahoo.com

روزنه‌ها و متابولیسم آنتی‌اکسیدانی دارد که این عوامل نهایتاً بر میزان رشد، نمو و به‌خصوص عملکرد محصولات مهم اقتصادی تأثیرگذار است (Reis et al., 2015). اعمال تنش آبی در مراحل مختلف رشد گیاه سبب کاهش رشد و عملکرد دانه و کاه برنج می‌گردد (Venkatesan et al., 2005). تنش کمبود آب پس از مرحله گرده‌افشانی بر عملکرد و اجزای عملکرد برنج تأثیر ناچیزی دارد و به‌نوعی مقاومت به خشکی در این مرحله از رشد گیاه بیشتر است (Wu et al., 2011). گزارش‌ها حاکی از آن است با اعمال تنش خشکی، صفاتی نظیر وزن خشک خوشه و ساقه، وزن هزار دانه، تعداد پنجه و خوشه، تعداد دانه پر و عملکرد دانه ارقام برنج در مقایسه با آبیاری غرقاب کاهش یافت (Mostajeran and Rahimi-Eichi, 2009). کاهش شدید رشد و عملکرد گیاه برنج با اعمال تنش آبی در نتایج سایر پژوهشگران گزارش شده است (Andrade et al., 2018). بررسی‌های به‌عمل‌آمده نشان داده که با افزایش سطح تنش آبی و کاهش رطوبت خاک از ۱۰۰ به ۴۰ درصد ظرفیت زراعی، تعداد دانه پر در خوشه به میزان ۳۲/۸۰ درصد، وزن هزار دانه به مقدار ۱۲/۵ درصد و عملکرد دانه در کپه به میزان ۵۳/۰۸ درصد کاهش یافت (Zubaer et al., 2007).

روی یکی از عناصر غذایی کم‌مصرف ضروری برای گیاهان به‌خصوص جهت رشد برنج تحت شرایط غرقاب است (Naik and Das, 2007) که به‌عنوان کوفاکتور آنزیم‌های پراکسیداز و سوپراکسید دسموتاز که از عوامل مؤثر در مکانیسم‌های دفاعی گیاهان در شرایط تنش خشکی می‌باشند سبب مقاومت گیاه در مواجهه با رادیکال‌های آزاد مثل گروه هیدروکسیل و پراکسید شده و از این نظر نقش مهمی در مقاومت گیاه ایجاد می‌نماید (Welch, 2001). این عنصر از طریق تنظیم روزنه و تعادل یونی در گیاهان زراعی سبب کاهش اثرات منفی خشک‌سالی می‌گردد (Tohidi Moghadam et al., 2013). گزارش‌ها حاکی از آن است که محلول‌پاشی برگی روی موجب افزایش نمو رویشی و زایشی گیاه، جذب بسیاری از عناصر غذایی و درنهایت منجر به کاهش اثرات مضر تنش خشکی می‌گردد (Sabir and Sari, 2019). کاربرد غلظت مناسب روی در برنج برای جلوگیری از هرگونه آسیب ناشی از دوره‌های کوتاه‌مدت خشکی مفید است (Adiko et al., 2017). اگرچه فناوری نانو در بخش کشاورزی به دلیل سرمایه‌گذاری کمتر در مقایسه با سایر بخش‌ها توسعه کمتری یافته است ولی نانوتکنولوژی در بهبود تولید محصولات کشاورزی بسیار مؤثر است (Huang et al., 2015). از مهم‌ترین کاربردهای فناوری نانو در جنبه‌های مختلف کشاورزی در بخش آب‌وخاک، استفاده از نانوکودها برای تغذیه گیاهان زراعی می‌باشند (Rezaei et al., 2009). کاربرد عناصر به‌صورت نانوذره می‌تواند سبب تسریع در جوانه‌زنی گیاه، بهبود مقاومت به تنش‌های زنده و غیرزنده، افزایش کارایی مصرف عناصر غذایی، افزایش رشد گیاه و هم‌چنین کاهش اثرات زیست‌محیطی در مقایسه با روش‌های سنتی بکار گرفته‌شده گردد (Alharby et al., 2016). گزارش شده که عناصر ریزمغذی به شکل نانوذرات در تولید و افزایش عملکرد محصول مؤثر می‌باشند (Reynolds, 2002). محلول‌پاشی نانوذرات روی به دلیل کارایی جذب و انتقال بالا، مؤثرتر از ذرات معمولی روی در شرایط تنش خشکی است (Shojaei and Makarian, 2014). نتایج به‌دست‌آمده توسط چن و همکاران (Chen et al., 2015) نشان داد که زیست‌توده گیاه برنج تا مصرف ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر نانوذرات اکسید روی روند افزایشی داشت ولی کاربرد غلظت‌های بسیار بالای نانواکسید روی سبب کاهش زیست‌توده گردید به‌طوری‌که در غلظت ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر، کمترین میزان ماده خشک تولید شد. تجمع، ماندگاری و تأثیر نانوذرات بر روی رشد گیاه به‌اندازه و غلظت مورداستفاده نانوذرات بستگی دارد (Dietz and Herth, 2011; Adhikari et al., 2013). محلول‌پاشی با نانواکسید روی می‌تواند در بهبود عملکرد زیست‌توده کل و شاخص سطح برگ در شرایط محدودیت آبی مؤثر واقع شود (Kheirizadeh Arough et al., 2015). اثرات مثبت محلول‌پاشی نانوذرات اکسید روی بر بهبود عملکرد و میزان غلظت و جذب روی در دانه و کاه برنج توسط سایر محققان گزارش شده است (Kheyri et al., 2019). با توجه به کمبود منابع آب و از طرفی نیاز بالای آبی گیاه برنج و حساسیت آن به تنش کم‌آبی، این پژوهش با هدف بررسی اثرات مقادیر مختلف نانوذرات اکسید روی در مراحل مختلف تنش آبی بر اجزای عملکرد، عملکرد، غلظت و جذب روی در بافت گیاه و هم‌چنین شاخص‌های کارایی روی در برنج رقم طارم هاشمی اجرا گردید.

## مواد و روش‌ها

این آزمایش به‌صورت کرت‌های خردشده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در سال ۱۳۹۵ در مزرعه‌ای

واقع در شهرستان آمل، شهر امامزاده عبدالله و روستای اسکومحله با مختصات جغرافیایی ۵۲ درجه و ۱۹ دقیقه طول شرقی و ۳۶ درجه و ۲۴ دقیقه عرض شمالی، در ارتفاع ۱۷۰ متری از سطح دریا اجرا گردید. آبیاری در چهار سطح (شاهد یا غرقاب دائم، تنش کم‌آبی در مرحله پنجه‌زنی به مدت ۱۵ روز، تنش کم‌آبی در مرحله گلدهی به مدت ۱۵ روز و تنش کم‌آبی در مرحله پر شدن دانه به مدت ۱۵ روز) به‌عنوان فاکتور اصلی و محلول‌پاشی نانوذرات اکسید روی در چهار سطح (صفر، ۲۵، ۵۰ و ۷۵ میلی‌گرم اکسید روی در لیتر) به‌عنوان فاکتور فرعی در نظر گرفته شدند. قبل از کاشت، نمونه‌ی خاک مرکب سطحی از عمق شخم تهیه و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آن تعیین گردید (جدول ۱).

**جدول ۱. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک قبل از اجرای آزمایش.**

**Table 1. The physical and chemical properties of the soil before the experiment.**

| بافت خاک Soil texture | رس Clay | سیلت Silt | شن Sand | نیتروژن کل Nitrogen | ماده آلی Organic matter | فسفر Phosphorus | پتاسیم Potassium | روی Zinc | اسیدیته کل اشباع pH | هدایت الکتریکی EC |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | ---------- (٪) ---------- | | | | | ---------- ($mg.kg^{-1}$) ---------- | | | | ($dS.m^{-1}$) |
| رسی (Clay) | 45 | 37 | 18 | 0.158 | 3.17 | 12.3 | 184 | 0.98 | 7.30 | 1.59 |

کود نانواکسید روی با خلوص بیش از ۹۹ درصد، اندازه ذرات ۱۰ تا ۳۰ نانومتر، با مرفولوژی کریستال متمایل به کروی، تراکم واقعی ۵/۶۰۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب و به‌صورت پودر با رنگ سفید شیری که تولید شرکت تحقیقات نانومواد آمریکا (US Research Nanomaterials, Inc.) بود از شرکت پیشگامان نانو مواد ایرانیان تهیه گردید و در این آزمایش مورداستفاده قرار گرفت. رقم برنج مورداستفاده در آزمایش با توجه به کشت وسیع در منطقه، طارم هاشمی بود. نشاکاری به تعداد چهار نشا در هر کپه با فواصل ۲۰×۲۰ سانتی‌متر در کرت‌های به ابعاد ۲×۵ مترمربع انجام شد. محلول‌پاشی نانواکسید روی در چهار مرحله از رشد گیاه شامل اوایل پنجه‌زنی، اواسط پنجه‌زنی، مرحله آبستنی و مرحله خوشه‌دهی کامل با استفاده از پمپ دستی انجام شد که بر این اساس برای مقادیر ۲۵، ۵۰ و ۷۵ میلی‌گرم اکسید روی در لیتر به‌ترتیب ۱۶۶/۶۶، ۳۳۳/۳۳ و ۵۰۰ گرم نانوذرات اکسید روی در هکتار مصرف گردید. کودهای فسفاته و پتاسیمی به‌ترتیب از منابع سوپرفسفات تریپل و سولفات پتاسیم بر اساس نتایج تجزیه خاک به میزان ۷۰ و ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار قبل از نشاکاری به‌صورت پایه در کرت‌ها مورداستفاده قرار گرفت. کود نیتروژن از منبع اوره با توجه به نتایج آزمون خاک به میزان ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار در سه مرحله؛ یک‌سوم قبل از نشاکاری، یک‌سوم در مرحله پنجه‌زنی و یک‌سوم در مرحله ظهور خوشه به‌صورت یکنواخت در تمام کرت‌های آزمایش مصرف شد. مدیریت زراعی نظیر کنترل علف‌های هرز و مبارزه با کرم ساقه‌خوار برنج طبق عرف محل و کشاورز انجام گردید.

در مرحله رسیدگی فیزیولوژیکی، ۱۲ بوته از هر کرت آزمایشی به‌صورت تصادفی انتخاب و صفات ارتفاع بوته، طول خوشه و تعداد پنجه بارور در کپه اندازه‌گیری و شمارش گردید. جهت تعیین تعداد دانه پر و پوک در خوشه، ۱۵ عدد خوشه از هر تیمار انتخاب و دانه‌های آن‌ها شمارش و میانگین آن محاسبه شد. وزن هزار دانه با شمارش ۱۰۰۰ دانه (شلتوک) سالم و پر و توزین آن بر اساس رطوبت ۱۴ درصد تعیین گردید. در زمان رسیدگی فیزیولوژیکی، عملکرد دانه (شلتوک) و کاه با برداشت دو مترمربع از هر واحد آزمایشی و با رطوبت ۱۴ درصد محاسبه شد (Kheyri et al., 2018). انواع کارایی کود روی در برنج با استفاده از فرمول‌های زیر محاسبه گردید (Fageria, 2009):

$$AE_{Zn}=\frac{Y_{Znx}-Y_{Zn0}}{Znf} \qquad [۱]$$

که در آن $AE_{Zn}$[1] کارایی زراعی روی (کیلوگرم بر میلی‌گرم)، حاصل تفاضل عملکرد در تیمار کودی ($Y_{Znx}$) و عملکرد در تیمار شاهد ($Y_{Zn0}$) برحسب کیلوگرم بر مقدار کود روی مصرفی Znf (گرم) است.

$$UE_{Zn}=\frac{Y_{Znx}}{Znf} \qquad [۲]$$

[1] Zn Agronomic Efficiency

که در آن کارایی مصرف روی[۲] $UE_{Zn}$ (کیلوگرم بر میلی‌گرم) حاصل نسبت عملکرد دانه ($Y_{Znx}$) برحسب کیلوگرم بر مقدار کود روی مصرفی (Znf) برحسب گرم است.

$$AR_{Zn}=\frac{D-E}{B}\times 100 \qquad [۳]$$

که در آن بازیافت ظاهری روی[۳] $AR_{Zn}$ (درصد) حاصل تفاضل جذب عنصر غذایی توسط گیاه در تیمار کودی (D) و جذب عنصر غذایی توسط گیاه در تیمار شاهد (E) برحسب گرم بر مقدار کود روی مصرفی (B) برحسب گرم در عدد ۱۰۰ است.

$$PE_{Zn}=\frac{Y_{Znx}-Y_{Zn0}}{D-E} \qquad [۴]$$

در این معادله کارایی فیزیولوژیک روی[۴] $PE_{Zn}$ (کیلوگرم بر گرم) حاصل تفاضل عملکرد در تیمار کودی ($Y_{Znx}$) و عملکرد در تیمار شاهد ($Y_{Zn0}$) برحسب کیلوگرم بر تفاضل جذب عنصر غذایی توسط گیاه در تیمار کودی (D) و جذب عنصر غذایی توسط گیاه در تیمار شاهد (E) برحسب گرم است.

$$UPE_{Zn}=\frac{Znt}{Znf} \qquad [۵]$$

که در آن کارایی جذب روی[۵] $UPE_{Zn}$ (گرم بر میلی‌گرم) حاصل میزان روی جذب‌شده توسط دانه (Znt) برحسب گرم بر مقدار روی مصرف‌شده به‌صورت کود (Znf) برحسب گرم است.

$$USE_{Zn}=\frac{Y_{Znx}}{Znt} \qquad [۶]$$

در این معادله کارایی استفاده از روی[۶] $USE_{Zn}$ (کیلوگرم بر گرم) حاصل نسبت عملکرد دانه ($Y_{Znx}$) برحسب کیلوگرم بر مقدار کود روی جذب‌شده توسط گیاه (Znt) برحسب گرم است.

غلظت روی در دانه و کاه با روش جذب اتمی شعله‌ای (A.A.S[۷]) (Emami, 1996) و با استفاده از دستگاه جذب اتمی (مدل Thermo electron, USA) بر اساس میلی‌گرم بر کیلوگرم اندازه‌گیری شد. سپس با استفاده از حاصل‌ضرب عملکرد دانه و کاه در غلظت روی دانه و کاه، میزان جذب روی در دانه و کاه برنج برحسب گرم در هکتار محاسبه گردید.

درنهایت داده‌های آماری با استفاده از نرم‌افزار MSTAT-C تجزیه‌وتحلیل و مقایسه میانگین داده‌ها با آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار (LSD) در سطح احتمال پنج درصد انجام شد. رسم نمودارها توسط نرم‌افزار Excel صورت گرفت.

## نتایج و بحث

### *طول خوشه*

طول خوشه تحت تأثیر تیمارهای آبیاری ($P<۰/۰۱$) و نانواکسید روی ($P<۰/۰۵$) معنی‌دار گردید ولی اثر متقابل سطوح آبیاری و مقادیر نانواکسید روی بر طول خوشه معنی‌دار نشد (جدول ۲). نتایج نشان داد که بیشترین طول خوشه با میانگین ۲۵/۴۲ سانتی‌متر تحت شرایط غرقاب دائم حاصل شد و با تنش کم‌آبی در مراحل مختلف رشد گیاه از طول خوشه کاسته گردید که این میزان کاهش با تنش کم‌آبی در مراحل پنجه‌زنی و گلدهی بیشتر از مرحله پر شدن دانه بود (جدول ۳). کاهش ۴/۲ درصدی طول خوشه برنج با اعمال تنش خشکی در نتایج فلاح‌شمسی و همکاران (Fallah-Shamsi et al., 2014) گزارش شده است. این محققان همزمانی تمایز آغازه انشعابات اولیه محور خوشه و تمایز انشعابات ثانویه و تکامل ریخت‌زایی اندام‌های داخلی گل طی یک الی دو روز قبل از ظهور خوشه با تنش کم‌آبی را دلیل کاهش میزان طول خوشه عنوان نمودند. در بین سطوح مختلف مصرف نانواکسید روی، مصرف ۲۵ میلی‌گرم بر لیتر نانواکسید روی اختلاف معنی‌داری با شاهد یا عدم مصرف نانواکسید روی ازنظر طول خوشه ایجاد ننمود ولی مصرف مقادیر بالاتر نانواکسید روی سبب افزایش معنی‌دار طول خوشه گردید به‌گونه‌ای که با کاربرد ۵۰ و ۷۵ میلی‌گرم بر لیتر نانواکسید روی، طول خوشه به‌ترتیب حدود ۲/۷ و ۳/۶ درصد افزایش یافت (جدول ۴). افزایش ۶/۳ درصدی طول خوشه با مصرف مقدار ۴۰ میلی‌گرم بر لیتر نانوذرات اکسید روی در مراحل پنجه‌زنی و ظهور خوشه در مقایسه با عدم مصرف نانواکسید روی در نتایج سایر محققان گزارش شده است (Ghasemi et al., 2017). نتایج سایر پژوهشگران نیز حاکی از افزایش میزان طول خوشه برنج با مصرف کود روی است (Ghasemi et al., 2014; Mahbubur Rahman et al., 2011). گزارش شده که با محلول‌پاشی یک گرم بر لیتر نانواکسید روی، بیشترین طول سنبله تریتیکاله و با عدم

[2] Zn Utilization Efficiency
[3] Zn Apparent Recovery
[4] Zn Physiological Efficiency
[5] Zn Uptake Efficiency
[6] Zn Use Efficiency
[7] Atomic Absorption Spectrophotometer

مصرف نانواکسید روی، کمترین طول خوشه مشاهده شد (Kamari et al., 2014).

### *تعداد پنجه بارور در کپه*

نتایج حاصل از جدول تجزیه واریانس نشان داد که ازنظر تعداد پنجه بارور در کپه، تیمارهای آبیاری و نانواکسید روی دارای اختلاف معنی‌داری ($P<0/01$) بودند ولی اثر متقابل دو عامل بر ویژگی یادشده معنی‌دار نشد (جدول ۲). تعداد پنجه بارور در کپه در شرایط غرقاب دائم و هم‌چنین با تنش کم‌آبی در مراحل گلدهی و پر شدن دانه دارای مقادیر بالایی بود ولی تنها با تنش کم‌آبی در مرحله پنجه‌زنی، تعداد پنجه بارور به‌طور معنی‌داری کاهش یافت به‌گونه‌ای که ویژگی یادشده

**جدول ۲. تجزیه واریانس اجزای عملکرد و عملکرد دانه و کاه برنج رقم طارم هاشمی تحت تأثیر تیمارهای آبیاری و نانوذرات اکسید روی.**

**Table 2. Variance analysis for yield components and grain and straw yields of rice (cv. Tarom Hashemi) under the influence of zinc oxide nanoparticles and irrigation treatments.**

| منابع تغییرات Source of variation | درجه آزادی df | طول خوشه Panicle length | تعداد پنجه بارور در کپه Number of fertile tiller per hill | تعداد دانه پر در خوشه Number of filled grain per panicle | وزن هزار دانه 1000-grain weight | عملکرد دانه Grain yield | عملکرد کاه Straw yield |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| تکرار Replication | 2 | 0.739 | 1.006 | 56.494 | 0.131 | 75767.646 | 196163.771 |
| آبیاری Irrigation | 3 | 13.402$^{**}$ | 19.751$^{**}$ | 3207.015$^{**}$ | 20.850$^{**}$ | 3272508.465$^{**}$ | 2788116.465$^{**}$ |
| خطای a Error (a) | 6 | 0.088 | 0.845 | 16.016 | 0.461 | 56317.340 | 72147.715 |
| نانواکسید روی Zinc oxide NPs | 3 | 1.865$^{*}$ | 13.366$^{**}$ | 367.688$^{**}$ | 0.541$^{ns}$ | 1023087.965$^{**}$ | 1010351.854$^{*}$ |
| آبیاری× نانواکسید روی I × N | 9 | 0.096$^{ns}$ | 0.159$^{ns}$ | 11.267$^{ns}$ | 0.043$^{ns}$ | 16110.984$^{ns}$ | 17616.836$^{ns}$ |
| خطای b Error (b) | 24 | 0.515 | 1.220 | 66.489 | 0.650 | 106007.667 | 266137.090 |
| ضریب تغییرات (٪) CV (%) | | *2.97* | *6.59* | *9.64* | *3.05* | *9.10* | *10.67* |

$^{ns}$، $^{*}$ و $^{**}$: به‌ترتیب غیر معنی‌دار و معنی‌دار در سطوح احتمال پنج و یک درصد.

$^{ns}$, $^{*}$ and $^{**}$: non-significant and significant at probability levels of 5 and 1%, respectively.

**جدول ۳. مقایسه میانگین اجزای عملکرد و عملکرد دانه و کاه برنج رقم طارم هاشمی تحت تأثیر سطوح مختلف آبیاری.**

**Table 3. Means comparison for yield components and grain and straw yields of rice (cv. Tarom Hashemi) under the influence of different levels of irrigation.**

| آبیاری Irrigation | طول خوشه (سانتی‌متر) Panicle length (cm) | تعداد پنجه بارور در کپه Fertile tiller number per hill | تعداد دانه پر در خوشه Filled grain number per panicle | وزن هزار دانه 1000-grain weight | عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار) Grain yield (kg.ha$^{-1}$) | عملکرد کاه (کیلوگرم در هکتار) Straw yield (kg.ha$^{-1}$) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $I_1$† | 25.42$^{a}$ | 17.70$^{a}$ | 96.83$^{a}$ | 27.44$^{a}$ | 4103$^{a}$ | 5386$^{a}$ |
| $I_2$ | 23.32$^{c}$ | 14.87$^{b}$ | 94.28$^{a}$ | 27.26$^{a}$ | 3600$^{b}$ | 4800$^{b}$ |
| $I_3$ | 23.25$^{c}$ | 17.11$^{a}$ | 61.02$^{c}$ | 26.43$^{a}$ | 2860$^{c}$ | 4218$^{c}$ |
| $I_4$ | 24.64$^{b}$ | 17.35$^{a}$ | 86.13$^{b}$ | 24.56$^{b}$ | 3742$^{ab}$ | 4940$^{ab}$ |

*در هر ستون میانگین‌های دارای حروف مشترک ازنظر آماری اختلاف معنی‌داری ندارند.

† $I_1$ (شاهد یا آبیاری غرقاب دائم)، $I_2$ (تنش کم‌آبی در مرحله پنجه‌زنی)، $I_3$ (تنش کم‌آبی در مرحله گلدهی و $I_4$: تنش کم‌آبی در مرحله پر شدن دانه).

*Means with similar letters in each column are not significantly different.

† $I_1$ (control or flood irrigation), $I_2$ (water stress at tillering stage), $I_3$ (water stress at flowering stage), $I_4$ (water stress at grain filling stage).

حدود ۱۵/۹ درصد در مقایسه با شاهد کاهش نشان داد (جدول ۳). کاهش تولید پنجه در سطوح پایین رطوبت خاک به دلیل عدم تولید آسیمیلات کافی جهت فتوسنتز در گیاهان تحت شرایط تنش آبی است (Mostajeran and Rahimi-Eichi, 2009). اعمال تنش آبی در مرحله رویشی منجر به کاهش تعداد پنجه در برنج می‌گردد (Rahman et al., 2002). گزارش‌ها حاکی از آن است که با کاهش سطح آبیاری از ۱۰۰ درصد به ۴۰ درصد ظرفیت زراعی، تعداد پنجه در کپه در ارقام Basmoti، Binadhan 4 و RD2585 به‌ترتیب حدود ۳۶، ۳۰ و ۳۷ درصد کاهش یافت (Zubaer et al., 2007). تحت تأثیر مقادیر مختلف نانواکسید روی مصرفی، بیشترین تعداد پنجه بارور در کپه با میانگین ۱۷/۸۸ پنجه با مصرف ۷۵ میلی‌گرم بر لیتر نانو اکسید روی حاصل شد، اگرچه با تیمارهای مصرف ۲۵ و ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر نانو اکسید روی اختلاف آماری معنی‌داری نداشت ولی با عدم مصرف نانواکسید روی، پنجه بارور به میزان ۱۲/۹ درصد در مقایسه با مصرف ۷۵ میلی‌گرم بر لیتر نانو اکسید روی کاهش یافت (جدول ۴). عنصر روی از طریق افزایش جذب و فراهمی سایر عناصر غذایی ضروری گیاه و هم‌چنین بهبود فرآیند متابولیکی گیاه منجر به بهبود رشد و افزایش تعداد پنجه بارور در برنج می‌گردد (Naik and Das, 2007). محققان نشان دادند که با افزایش مصرف روی از صفر به ۱۰ کیلوگرم در هکتار، تعداد پنجه بارور در مترمربع طی هر دو سال زراعی ۲۰۱۲ و ۲۰۱۳ حدود ۲۹ درصد افزایش یافت (Anzer Alam and Kumar, 2015).

### *تعداد دانه پر در خوشه*

تعداد دانه پر در خوشه تحت تأثیر اثرات اصلی سطوح مختلف آبیاری و مقادیر نانواکسید روی در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد ولی تحت تأثیر اثر متقابل دو عامل قرار نگرفت (جدول ۲). تحت اثر اصلی سطوح آبیاری، بیشترین تعداد دانه پر در خوشه به‌ترتیب با میانگین‌های ۹۶/۸۳ و ۹۴/۲۸ دانه پر در شرایط غرقاب دائم و تنش کم‌آبی در مرحله پنجه‌زنی حاصل شد ولی با تنش کم‌آبی در مراحل گلدهی و پر شدن دانه، ویژگی یادشده به‌ترتیب حدود ۳۶/۹ و ۱۱ درصد کاهش یافت (جدول ۳). کاهش تعداد دانه پر در خوشه با تنش کم‌آبی در مرحله گلدهی به دلیل حساسیت این مرحله از رشد گیاه به کمبود آبی است، به‌طوری‌که کم‌آبی سبب اختلال در فتوسنتز جاری و کاهش انتقال مواد ذخیره‌شده به دانه می‌گردد که نهایتاً بر تعداد دانه پر در خوشه تأثیر منفی می‌گذارد (Tahmasebi Sarvestani and Pirdashti, 2008). اعمال تنش آبی در مرحله پر شدن دانه سبب پیری زودرس و تسریع در دوره پر شدن دانه و از طرفی موجب افزایش انتقال مجدد مواد فتوسنتزی ذخیره‌شده از کاه به دانه‌ها می‌گردد (Xu and Zhou, 2007). آبیاری مناسب در طول دوره رشد برنج سبب پر شدن تعداد بیشتری از دانه‌های برنج می‌گردد درحالی‌که کم‌آبی و تنش خشکی از طریق عقیم کردن دانه‌های گرده منجر به کاهش تعداد دانه‌های پر در خوشه می‌شود (Mohammadi et al., 2015). مقایسه میانگین اثرات مقادیر نانواکسید روی نشان داد کمترین تعداد دانه پر در خوشه (۷۷/۶۵ دانه پر) در شرایط شاهد یا عدم مصرف نانواکسید روی به دست آمد ولی با مصرف مقادیر نانواکسید روی به ۲۵، ۵۰ و ۷۵ میلی‌گرم بر لیتر، تعداد دانه پر به‌ترتیب حدود ۶/۱، ۱۱/۶ و ۱۳/۷ درصد افزایش یافت (جدول ۴). گزارش شده با مصرف یک کیلوگرم در هکتار عنصر روی به‌صورت کلات، درصد دانه پر در خوشه برنج در مقایسه با عدم مصرف روی به میزان ۱۶/۲ افزایش یافت (Naik and Das, 2007). خیری‌زاده آروق و همکاران (Kheirizadeh Arough et al., 2015) با بررسی مقادیر مختلف نانواکسید روی (صفر، ۰/۳، ۰/۶ و ۰/۹ گرم بر لیتر) گزارش نمودند که بیشترین تعداد دانه در سنبله تریتیکاله با محلول‌پاشی ۰/۹ گرم بر لیتر نانواکسید روی و کمترین آن با عدم محلول‌پاشی به دست آمد که با نتایج این آزمایش مطابقت دارد.

### *وزن هزار دانه*

نتایج نشان داد که وزن هزار دانه تحت تأثیر سطوح مختلف آبیاری در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد ولی ویژگی یادشده تحت تأثیر مقادیر نانواکسید روی و هم‌چنین اثر متقابل دو عامل قرار نگرفت (جدول ۲). مقایسه میانگین سطوح مختلف آبیاری نشان داد که حداکثر وزن هزار دانه (۲۷/۴۴ گرم) با آبیاری غرقاب دائم (شاهد) حاصل شد که با تیمارهای تنش کم‌آبی در مراحل پنجه‌زنی و گلدهی در یک گروه آماری قرار گرفت ولی با تنش کم‌آبی در مرحله پر شدن دانه، وزن هزار دانه به میزان ۱۰/۴ درصد کاهش یافت (جدول ۳). به نظر می‌رسد در شرایط آبیاری غرقاب دائم (شاهد) به دلیل بهبود انتقال مواد فتوسنتزی به دانه، میزان مواد ذخیره‌ای دانه افزایش‌یافته و این امر موجب افزایش وزن هزار

دانه گردیده است، درحالی‌که تنش کم‌آبی سبب کوتاه شدن دوره پر شدن دانه و درنهایت کاهش وزن دانه گردید. کاهش وزن هزار دانه با اعمال تنش آبی در مرحله زایشی و پر شدن دانه در نتایج سایر محققان گزارش شده است (Rahman et al., 2002). میری و همکاران (Miri et al., 2012) بیان نمودند که سطوح مختلف آبیاری تناوبی سبب کاهش معنی‌دار وزن هزار دانه در مقایسه با آبیاری مرسوم گردیدند. گروه دیگری از پژوهشگران با بررسی اثرات مدیریت آبیاری بر عملکرد ارقام برنج اظهار نمودند که وزن دانه تمامی ارقام مورد آزمایش با اعمال تیمار آبیاری غرقاب بیشتر از آبیاری تناوبی با دورهای مختلف بوده است (Katozi et al., 2009).

**جدول ۴. مقایسه میانگین اجزای عملکرد و عملکرد دانه و کاه برنج رقم طارم هاشمی تحت تأثیر مقادیر نانوذرات اکسید روی.**

**Table 4. Means comparison for yield components and grain and straw yields of rice (cv. Tarom Hashemi) under the influence of zinc oxide nanoparticles doses.**

| نانو اکسید روی Nano zinc oxide | طول خوشه (سانتی‌متر) Panicle length (cm) | تعداد پنجه بارور در کپه Number of fertile tiller per hill | تعداد دانه پر در خوشه Number of filled grain per panicle | وزن هزار دانه 1000-grain weight | عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار) Grain yield ($kg.ha^{-1}$) | عملکرد کاه (کیلوگرم در هکتار) Straw yield ($kg.ha^{-1}$) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $Zn_1$† | $23.69^{b}$ | $15.56^{b}$ | $77.65^{b}$ | $26.18^{a}$ | $3255^{b}$ | $4513^{b}$ |
| $Zn_2$ | $23.99^{ab}$ | $16.23^{ab}$ | $82.70^{ab}$ | $26.33^{a}$ | $3416^{ab}$ | $4686^{ab}$ |
| $Zn_3$ | $24.36^{a}$ | $17.37^{ab}$ | $87.91^{a}$ | $26.52^{a}$ | $3745^{ab}$ | $4989^{ab}$ |
| $Zn_4$ | $24.58^{a}$ | $17.88^{a}$ | $89.99^{a}$ | $26.67^{a}$ | $3890^{a}$ | $5156^{a}$ |

*در هر ستون میانگین‌های دارای حروف مشترک از نظر آماری اختلاف معنی‌داری ندارند.

† $Zn_1$ (صفر یا شاهد)، $Zn_2$ (۲۵ میلی‌گرم بر لیتر)، $Zn_3$ (۵۰ میلی‌گرم بر لیتر) و $Zn_4$ (۷۵ میلی‌گرم بر لیتر).

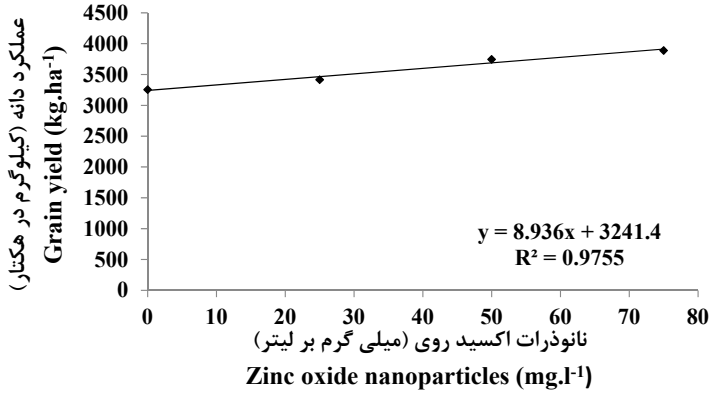
*Means with similar letters in each column are not significantly different.

† $Zn_1$ (0 or control), $Zn_2$ (25 $mg.l^{-1}$), $Zn_3$ (50 $mg.l^{-1}$) and $Zn_4$ (75 $mg.l^{-1}$).

### *عملکرد دانه و کاه*

نتایج نشان داد عملکرد دانه تحت تأثیر اثرات اصلی سطوح مختلف آبیاری و مقادیر نانواکسید روی ($P<۰/۰۱$)، هم‌چنین عملکرد کاه تحت تأثیر اثرات ساده تیمارهای آبیاری ($P<۰/۰۱$) و نانواکسید روی ($P<۰/۰۵$) قرار گرفتند ولی اثر متقابل دو عامل بر عملکرد دانه و کاه معنی‌دار نشد (جدول ۲). مقایسه میانگین اثرات سطوح آبیاری نشان داد با آبیاری غرقاب دائم یا شاهد، بیشترین میزان عملکرد دانه و کاه به‌ترتیب با میانگین‌های ۴۱۰۳ و ۵۳۸۶ کیلوگرم در هکتار حاصل شد که با تنش کم‌آبی در مرحله پر شدن دانه اختلاف آماری معنی‌داری از نظر عملکردهای دانه و کاه ایجاد نشد ولی با تنش کم‌آبی در مراحل پنجه‌زنی و گلدهی، عملکرد دانه به‌ترتیب به میزان ۱۲/۲ و ۳۰/۲ درصد و عملکرد کاه به‌ترتیب حدود ۱۰/۸ و ۲۱/۶ درصد کاهش یافتند (جدول ۳). تنش کم‌آبی در مرحله پر شدن دانه سبب کاهش عملکرد دانه و کاه نسبت به شاهد گردید ولی این اختلاف معنی‌دار نبود. وقوع تنش آبی در مرحله پنجه‌زنی به‌واسطه کاهش معنی‌دار طول خوشه و تعداد پنجه بارور در کپه و هم‌چنین تنش کم‌آبی در مرحله گلدهی به دلیل کاهش طول خوشه و تعداد دانه پر در خوشه منجر به کاهش معنی‌دار عملکردهای کمی برنج در مقایسه با شرایط غرقاب دائم گردیدند. نتیجه نشان داد که شدت کاهش عملکرد دانه با تنش کم‌آبی در مرحله گلدهی (I3) بیشتر از وقوع تنش کم‌آبی در سایر مراحل رشدی گیاه بوده است. طهماسبی سروستانی و پیردشتی (Tahmasebi Sarvestani and Pirdashti, 2008) بیان نمودند که خسارت ناشی از تنش آبی در مرحله گلدهی بیشتر از سایر مراحل رویشی و زایشی گیاه بوده و منجر به کاهش شدید عملکرد نهایی دانه ارقام مختلف برنج گردید که با نتایج حاصل از این آزمایش مطابقت داشت. شرایط غرقاب وضعیت مساعدی را در مراحل مختلف رشد برنج فراهم می‌آورد درحالی‌که در شرایط تنش خشکی، ویژگی‌های مختلف و درنهایت عملکرد دانه کاهش می‌یابد (Golesorkhy et al., 2016). برخی از محققان گزارش نمودند که جهت حصول حداکثر عملکرد دانه برنج، اعمال تیمار آبیاری غرقاب برتر از آبیاری تناوبی است (Katozi et al., 2009; Mohammadi et al., 2015). گزارش شده که با اعمال تنش آبی، عملکرد دانه برنج رقم DLR121 حدود ۳۰ درصد در مقایسه با شرایط شاهد (آبیاری مرسوم) کاهش یافت (Wu et al.,

2011). سایر پژوهشگران نیز کاهش معنی‌دار عملکرد دانه برنج با اعمال تنش خشکی را اظهار نمودند (Shirazi et al., 2019). تحت تأثیر مقادیر نانواکسید روی، حداکثر عملکرد دانه و کاه به‌ترتیب با میانگین‌های ۳۸۹۰ و ۵۱۵۶ کیلوگرم در هکتار با مصرف ۷۵ میلی‌گرم بر لیتر نانواکسید روی حاصل شد، اگرچه با تیمارهای مصرف ۲۵ و ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر نانواکسید روی اختلاف آماری معنی‌داری نداشت ولی با عدم مصرف نانواکسید روی، عملکردهای دانه و کاه به‌ترتیب حدود ۱۶/۳ و ۱۲/۴ درصد کاهش نشان دادند (جدول ۴). نتایج ضریب رگرسیونی نیز نشان داد که بین مصرف مقادیر نانواکسید روی و عملکرد دانه یک همبستگی مثبت معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد وجود دارد به‌گونه‌ای که این همبستگی ۹۷ درصد از تغییرات مربوط به عملکرد را توجیه کرد (شکل ۱). انحلال‌پذیری بیشتر، فعالیت‌های شیمیایی و قابلیت نفوذ در غشای سلولی (Mazaherinia et al., 2010) و هم‌چنین بالا بودن کارایی جذب و سطح مخصوص ذرات نانو (Monica and Cremonini, 2009) سبب جذب و انتقال سریع‌تر عنصر روی در گیاه و نهایتاً افزایش اجزای عملکرد و بهبود عملکرد دانه گردید. رابطه مثبتی بین غلظت روی در دانه برنج و عملکرد دانه وجود دارد، به‌گونه‌ای که افزایش کاربرد روی در ارقامی از برنج که میزان غلظت روی در دانه آن‌ها کم است موجب افزایش معنی‌دار جذب روی در دانه و درنهایت عملکرد دانه برنج می‌گردد (Jaksomsak et al., 2017). گزارش شده که حداکثر مقدار ماده خشک برنج با کاربرد ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر نانواکسید روی به دست آمد و مصرف مقادیر بیش از ۲۵۰ میلی‌گرم بر لیتر نانوذرات اکسید روی به دلیل سمیت ایجادشده سبب کاهش معنی‌دار فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی نظیر کاتالاز، پراکسیداز و آسکوربات پراکسیداز در ریشه و اندام هوایی برنج و درنتیجه کاهش مقاومت گیاه و میزان ماده خشک تولیدی گردید (Chen et al., 2015). نتایج سایر تحقیقات روی گیاهان گندم (Karimi, 2014)، تریتیکاله (Kheirizadeh et al., 2015 Arough)، ماش (Shojaei and Makarian, 2014) و ارزن دم‌روباهی (Davoodi et al., 2013) نیز حاکی از اثرات مثبت کود نانواکسید روی بر افزایش عملکرد محصول است که با نتایج این آزمایش مطابقت دارد.




**شکل ۱. تغییرات رگرسیونی عملکرد دانه تحت تأثیر مقادیر مختلف نانوذرات اکسید روی.**

**Fig. 1. Regression changes of grain yield under the influence of different doses of zinc oxide nanoparticles.**

### *غلظت و جذب روی در دانه و کاه*

نتایج حاصل از جدول تجزیه واریانس حاکی از آن بود که اثرات اصلی تیمارهای آبیاری و نانواکسید روی بر میزان غلظت و جذب روی در دانه و کاه برنج در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود ولی ویژگی‌های یادشده تحت تأثیر اثر متقابل فاکتورهای آزمایش قرار نگرفتند (جدول ۵). حداکثر میزان غلظت روی در دانه به‌ترتیب با میانگین‌های ۲۶/۴۳ و ۲۵/۲۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم تحت شرایط شاهد و تنش کم‌آبی در مرحله پنجه‌زنی مشاهده شد ولی با تنش کم‌آبی در مراحل گلدهی و پر شدن دانه، غلظت روی در دانه به‌ترتیب حدود ۱۵/۸ و ۲۱/۹ درصد کاهش یافت، درحالی‌که بیشترین میزان غلظت روی در کاه (۳۳/۴۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم) فقط در شرایط شاهد حاصل شد و با اعمال تنش کم‌آبی در تمام مراحل رشدی گیاه، غلظت روی کاه روند نزولی داشت. حداکثر میزان جذب روی در دانه و کاه (به‌ترتیب با میانگین‌های ۱۱۰/۶ و ۱۸۲/۱ گرم در هکتار) در شرایط

غرقاب دائم حاصل شد و با تنش کم‌آبی در مراحل مختلف رشد رویشی و زایشی، میزان جذب روی در دانه و کاه به‌طور معنی‌داری کاهش یافت که این مقدار کاهش در مرحله گلدهی بیشتر از سایر مراحل رشد بوده است (جدول ۶). میزان اثرپذیری جذب عناصر غذایی در مراحل مختلف رشدی گیاه تحت شرایط تنش خشکی متفاوت است به‌گونه‌ای که با افزایش نیاز گیاه در هر مرحله از رشد به عناصر غذایی، اثر تنش خشکی نیز در آن دوره بیشتر خواهد بود (Xiong et al., 2002). گزارش‌ها حاکی از آن است که تنش خشکی منجر به کاهش فتوسنتز، رشد، عملکرد و جذب عناصر غذایی در دانه می‌گردد (Andrade et al., 2018). کاهش جذب عناصر غذایی در گیاه تحت شرایط تنش خشکی در نتایج سایر محققان نیز ارائه شده است (Sajedi et al., 2010). تحت تأثیر مقادیر نانواکسید روی، بیشترین میزان غلظت روی در دانه و کاه (به‌ترتیب با میانگین‌های ۳۰/۹۸ و ۳۴/۶۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و هم‌چنین حداکثر جذب روی در دانه و کاه (به‌ترتیب با میانگین‌های ۱۲۱/۴ و ۱۸۰/۱ گرم در هکتار) با کاربرد ۷۵ میلی‌گرم بر لیتر نانواکسید روی به دست آمد، اگرچه با مصرف ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر نانواکسید روی اختلاف آماری معنی‌داری نداشت. با عدم مصرف نانواکسید روی، میزان غلظت روی در دانه و کاه به‌ترتیب حدود ۵۱/۸ و ۴۷/۷ درصد و مقدار جذب روی در دانه و کاه به‌ترتیب ۵۹/۶ و ۵۴/۲ درصد در مقایسه با کاربرد ۷۵ میلی‌گرم بر لیتر نانواکسید روی کاهش یافت (جدول ۷). مقدار افزایش محتوای روی در دانه به عوامل مختلفی نظیر ژنوتیپ، نوع کود و غلظت و زمان مصرف آن بستگی دارد (Ramazani et al., 2018). بررسی‌های به‌عمل‌آمده توسط مابسا و همکاران (Mabesa et al., 2013) نشان داد که محلول‌پاشی روی در مراحل مختلف رشد گیاه (مرحله آبستنی + مرحله اولیه شیری) منجر به حصول بیشترین میزان جذب روی در گیاه گردید. گزارش شده که محلول‌پاشی نانوذرات اکسید روی به‌ترتیب منجر به افزایش ۳۳/۲ و ۴۲/۲ درصدی غلظت روی در دانه و کاه برنج در مقایسه با شاهد یا عدم مصرف نانواکسید روی گردید (Kheyri et al., 2019) که با نتایج آزمایش حاضر مطابقت داشت.

نتایج محاسبات رگرسیونی نشان داد که یک رابطه مستقیم مثبت و معنی‌داری بین غلظت روی دانه و عملکرد دانه وجود داشت به‌طوری‌که این همبستگی ۳۳ درصد از تغییرات مربوط به عملکرد دانه را توجیه کرد (شکل ۲). افزایش محتوی روی در دانه برنج و نهایتاً افزایش عملکرد دانه با کاربرد کود روی توسط سایر محققان نیز گزارش شده است (Ghasemi et al., 2014; Anzer Alam and Kumar, 2015).

### *شاخص‌های کارایی روی در برنج*

مقایسه بین سطوح مختلف نانواکسید روی مصرفی نشان داد که کاربرد ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر نانوذرات اکسید روی با میانگین ۱/۴۷ کیلوگرم بر گرم، بیشترین کارایی زراعی روی را به خود اختصاص داد ولی با مصرف مقدار بیشتر نانواکسید روی (۷۵ میلی‌گرم بر لیتر نانوذرات اکسید روی)، مقدار کارایی زراعی روی (حدود ۱۳/۶ درصد) کاهش یافت (جدول ۸). افزایش کارایی زراعی روی با مصرف مقدار ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر نانواکسید روی را می‌توان به بهبود میزان غلظت روی در دانه، افزایش میزان جذب و انتقال مناسب مواد به دانه، افزایش رشد گیاه و نهایتاً افزایش عملکرد دانه در این تیمار کودی نسبت داد. درواقع افزایش معنی‌دار عملکرد دانه با توجه به میزان کود روی مصرفی منجر به افزایش در مقدار کارایی زراعی در این تیمار کودی گردید. کاهش میزان کارایی زراعی روی در برنج با مصرف بیشترین مقدار روی، در نتایج سایر پژوهشگران ارائه گردیده است (Muthukumararaja and Sriramachandrasekharan, 2012).

کارایی مصرف روی با افزایش سطوح نانواکسید روی مصرفی کاهش یافت، به‌گونه‌ای که بیشترین کارایی مصرف روی با اعمال تیمار $Zn_2$ (۲۰/۴ کیلوگرم بر گرم) حاصل گردید و با کاربرد تیمار $Zn_4$ (۷/۷۸ کیلوگرم بر گرم)، کارایی مصرف روی به میزان ۶۱/۸ درصد کاهش یافت (جدول ۸). نتیجه مؤید این مطلب بود که با افزایش مقدار مصرف نانواکسید روی به همان میزان عملکرد دانه بهبود نیافت به‌گونه‌ای که علی‌رغم اینکه حداکثر عملکرد دانه با کاربرد ۷۵ میلی‌گرم بر لیتر نانواکسید روی حاصل شد ولی با تیمارهای کاربرد ۲۵ و ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر اختلاف آماری معنی‌داری نداشت که همین مسئله منجر به کاهش کارایی مصرف روی در مقادیر بالاتر کاربرد نانواکسید روی شد. سایر محققان در نتایج خود بیان نمودند که با افزایش سطوح مصرف روی از میزان کارایی مصرف روی به‌طور معنی‌داری کاسته گردید به‌گونه‌ای که با افزایش سطح روی از ۲/۵ به ۷/۵ میلی‌گرم بر

**جدول ۵. تجزیه واریانس میزان غلظت و جذب روی در دانه و کاه برنج رقم طارم هاشمی تحت تأثیر تیمارهای آبیاری و نانوذرات اکسید روی.**

**Table 5. Variance analysis for zinc concentration and uptake in grain and straw of rice (cv. Tarom Hashemi) under the influence of zinc oxide nanoparticles and irrigation treatments.**

| Source of variation | منابع تغییرات | درجه آزادی df | غلظت روی در دانه Zn concentration in grain | جذب روی در دانه Zn uptake in grain | غلظت روی در کاه Zn concentration in straw | جذب روی در کاه Zn uptake in straw |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Replication | تکرار | 2 | 7.489 | 178.170 | 6.876 | 304.045 |
| Irrigation | آبیاری | 3 | 86.091$^{**}$ | 4655.438$^{**}$ | 205.690$^{**}$ | 13183.892$^{**}$ |
| Error (a) | خطای a | 6 | 1.278 | 59.767 | 3.981 | 140.281 |
| Zinc oxide NPs | نانواکسید روی | 3 | 569.740$^{**}$ | 11872.591$^{**}$ | 589.757$^{**}$ | 20569.526$^{**}$ |
| I × N | آبیاری× نانواکسید روی | 9 | 5.025$^{ns}$ | 211.136$^{ns}$ | 15.535$^{ns}$ | 636.859$^{ns}$ |
| Error (b) | خطای b | 24 | 8.525 | 298.976 | 13.555 | 580.802 |
| CV (%) | ضریب تغییرات (٪) | | *12.35* | *19.92* | *13.38* | *17.76* |

$^{ns}$ و $^{**}$: به‌ترتیب غیر معنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد.

$^{ns}$ and $^{**}$: non-significant and significant at probability level of 1%, respectively.

**جدول ۶. مقایسه میانگین میزان غلظت و جذب روی در دانه و کاه برنج رقم طارم هاشمی تحت تأثیر سطوح مختلف آبیاری.**

**Table 6. Means comparison for zinc concentration and uptake in grain and straw of rice (cv. Tarom Hashemi) under the influence of different levels of irrigation.**

| آبیاری Irrigation | غلظت روی در دانه (میلی‌گرم بر کیلوگرم) Zn concentration in grain (mg kg$^{-1}$) | جذب روی در دانه (گرم در هکتار) Zn uptake in grain (g ha$^{-1}$) | غلظت روی در کاه (میلی‌گرم بر کیلوگرم) Zn concentration in straw (mg kg$^{-1}$) | جذب روی در کاه (گرم در هکتار) Zn uptake in straw (g ha$^{-1}$) |
|---|---|---|---|---|
| $I_1$† | 26.43$^{a}$ | 110.6$^{a}$ | 33.47$^{a}$ | 182.1$^{a}$ |
| $I_2$ | 25.29$^{a}$ | 93.29$^{b}$ | 24.23$^{b}$ | 117.6$^{bc}$ |
| $I_3$ | 22.23$^{b}$ | 64.59$^{c}$ | 25.27$^{b}$ | 107.1$^{c}$ |
| $I_4$ | 20.64$^{b}$ | 78.84$^{bc}$ | 27.12$^{b}$ | 136.1$^{b}$ |

*در هر ستون میانگین‌های دارای حروف مشترک ازنظر آماری اختلاف معنی‌داری ندارند.

† $I_1$ (شاهد یا آبیاری غرقاب دائم)، $I_2$ (تنش کم‌آبی در مرحله پنجه‌زنی)، $I_3$ (تنش کم‌آبی در مرحله گلدهی و $I_4$: تنش کم‌آبی در مرحله پر شدن دانه).

*Means with similar letters in each column are not significantly different.

† $I_1$ (control or flood irrigation), $I_2$ (water stress at tillering stage), $I_3$ (water stress at flowering stage), $I_4$ (water stress at grain filling stage).

**جدول ۷. مقایسه میانگین میزان غلظت و جذب روی در دانه و کاه برنج رقم طارم هاشمی تحت تأثیر مقادیر نانوذرات اکسید روی.**

**Table 7. Means comparison for zinc concentration and uptake in grain and straw of rice (cv. Tarom Hashemi) under the influence of zinc oxide nanoparticles doses.**

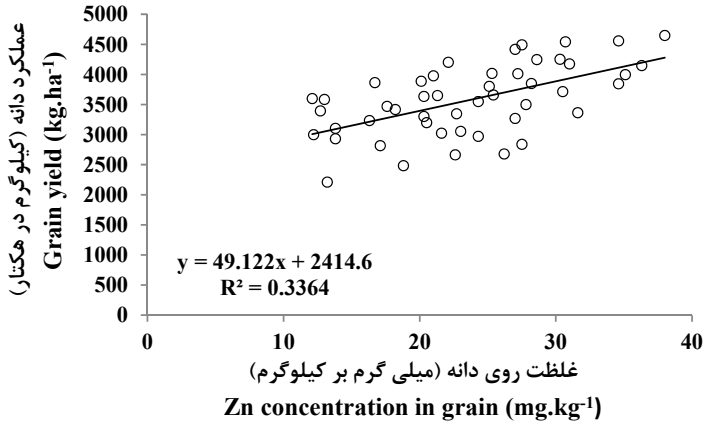
| نانو اکسید روی Nano zinc oxide | غلظت روی در دانه (میلی‌گرم بر کیلوگرم) Zn concentration in grain (mg kg$^{-1}$) | جذب روی در دانه (گرم در هکتار) Zn uptake in grain (g ha$^{-1}$) | غلظت روی در کاه (میلی‌گرم بر کیلوگرم) Zn concentration in straw (mg kg$^{-1}$) | جذب روی در کاه (گرم در هکتار) Zn uptake in straw (g ha$^{-1}$) |
|---|---|---|---|---|
| $Zn_1$† | 14.93$^{c}$ | 48.98$^{c}$ | 18.14$^{c}$ | 82.33$^{c}$ |
| $Zn_2$ | 21.91$^{b}$ | 75.54$^{bc}$ | 26.95$^{b}$ | 128.3$^{b}$ |
| $Zn_3$ | 26.77$^{ab}$ | 101.3$^{ab}$ | 30.30$^{ab}$ | 152.0$^{ab}$ |
| $Zn_4$ | 30.98$^{a}$ | 121.4$^{a}$ | 34.69$^{a}$ | 180.1$^{a}$ |

*در هر ستون میانگین‌های دارای حروف مشترک ازنظر آماری اختلاف معنی‌داری ندارند.

† $Zn_1$ (صفر یا شاهد)، $Zn_2$ (۲۵ میلی‌گرم بر لیتر)، $Zn_3$ (۵۰ میلی‌گرم بر لیتر) و $Zn_4$ (۷۵ میلی‌گرم بر لیتر).

*Means with similar letters in each column are not significantly different.

† $Zn_1$ (0 or control), $Zn_2$ (25 mg.l$^{-1}$), $Zn_3$ (50 mg.l$^{-1}$) and $Zn_4$ (75 mg.l$^{-1}$).




**شکل ۲. رابطه بین غلظت روی در دانه با عملکرد دانه برنج تحت تأثیر تیمارهای آبیاری و نانوذرات اکسید روی.**

**Fig. 2. The relationship between Zn concentration in grain and rice grain yield affected by treatments of irrigation and zinc oxide nanoparticles.**

کیلوگرم، کارایی مصرف روی حدود ۵۰/۴ درصد کاهش یافت (Muthukumararaja and Sriramachandrasekharan, 2012). مقدار بالاتر کارایی مصرف روی با کاربرد مقادیر کمتر روی در بررسی‌های سایر پژوهشگران روی گیاه برنج نیز گزارش شده است (Fageria et al., 2011).

با افزایش کاربرد نانواکسید روی از ۲۵ به ۷۵ میلی‌گرم بر لیتر، میزان بازیافت ظاهری روی از ۴۳/۵ به ۳۴ درصد رسید که نشان‌دهنده کاهش بازیافت ظاهری روی با افزایش مصرف نانواکسید روی بوده است (جدول ۸). گزارش شده که با افزایش سطوح مصرف کود روی، مقدار بازیافت ظاهری روی نیز کاهش یافت (Muthukumararaja and Sriramachandrasekharan, 2012) که با نتایج آزمایش حاضر مطابقت داشت.

کارایی فیزیولوژیک روی توانایی گیاه در استفاده از روی جهت تولید عملکرد اقتصادی را نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که بیشترین کارایی فیزیولوژیک روی با مصرف ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر نانواکسید روی (۴/۰۱ کیلوگرم بر گرم) حاصل شد که به‌ترتیب حدود ۴۴/۸ و ۶/۹ درصد بیشتر از کاربرد مقادیر ۲۵ و ۷۵ میلی‌گرم بر لیتر نانواکسید روی بوده است (جدول ۸). عملکرد پایین دانه در تیمار $Zn_2$ و هم‌چنین میزان جذب بالای روی در اندام هوایی گیاه در تیمار $Zn_4$ منجر به کاهش کارایی فیزیولوژیک در مقایسه با تیمار $Zn_3$ گردید. استفاده از باکتری محرک رشد به دلیل افزایش میزان نیتروژن و فسفر موجود در اندام‌های هوایی گیاه سبب کاهش کارایی فیزیولوژیک نیتروژن و فسفر گردید (Ehteshami and Amin Deldar, 2013). سایر محققان گزارش دادند که با افزایش سطوح کاربرد روی، میزان کارایی فیزیولوژیک روی کاهش یافت (Muthukumararaja and Sriramachandrasekharan, 2012).

کارایی جذب روی با افزایش سطوح مصرف نانواکسید روی روند کاهشی داشت، به‌گونه‌ای که بیشترین و کمترین میزان کارایی جذب روی به‌ترتیب با اعمال تیمارهای $Zn_2$ (۰/۴۵ گرم بر گرم) و $Zn_4$ (۰/۲۴ گرم بر گرم) حاصل شد (جدول ۸). در این پژوهش کارایی جذب روی روندی مشابه با کارایی مصرف روی داشت. اگرچه با افزایش مقدار مصرف نانواکسید روی، عملکرد دانه نیز تا حدودی افزایش یافت ولی توانایی گیاه در میزان جذب روی هم‌راستا با افزایش در مقدار کود نانواکسید روی مصرفی نبود درواقع در مقادیر بالاتر نانواکسید روی مصرفی، میزان روی جذب‌شده در دانه هم‌راستا با میزان مصرف آن نیست. گزارش‌های مشابهی توسط سایر پژوهشگران با بررسی اثرات نیتروژن بر کارایی جذب نیتروژن در گندم (Hosseini et al., 2013) و ذرت (Mirzashahi and Hossainpour, 2014) ارائه گردیده است.

کارایی استفاده از روی نیز با افزایش مقدار مصرف نانواکسید روی کاهش یافت که ناشی از افزایش میزان روی جذب‌شده در تیمارهای بالاتر مصرف روی بوده است. تفاوت شاخص کارایی استفاده از روی بین دو شرایط عدم مصرف کود نانواکسید روی (شاهد) و بیشینه‌ی کاربرد نانواکسید روی (۷۵ میلی‌گرم بر لیتر) حدود ۴۷/۷ درصد است (جدول ۸).

کاهش کارایی استفاده از روی با مصرف مقادیر بالای نیتروژن در گیاه ذرت گزارش شده است (Mirzashahi and Hossainpour, 2014) که در راستای نتایج این آزمایش است.

**جدول ۸. مقایسه میانگین کارایی‌های روی در برنج (رقم طارم هاشمی) تحت تأثیر مقادیر نانوذرات اکسید روی.**

**Table 8. Means comparison for zinc efficiencies in rice (cv. Tarom Hashemi) under the influence of zinc oxide nanoparticles rates.**

| نانو اکسید روی Nano zinc oxide | کارایی زراعی روی (کیلوگرم بر گرم) Zn Agronomic Efficiency ($kg.g^{-1}$) | کارایی مصرف روی (کیلوگرم بر گرم) Zn Utilization Efficiency ($kg.g^{-1}$) | بازیافت ظاهری روی (درصد) Zn Apparent Recovery (%) | کارایی فیزیولوژیک روی (کیلوگرم بر گرم) Zn Physiological Efficiency ($kg.g^{-1}$) | کارایی جذب روی (گرم بر گرم) Zn Uptake Efficiency ($g.g^{-1}$) | کارایی استفاده از روی (کیلوگرم بر گرم) Zn Use Efficiency ($kg.g^{-1}$) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $Zn_1$ | - | - | - | - | - | 24.7 |
| $Zn_2$ | 0.96 | 20.4 | 43.5 | 2.21 | 0.45 | 16.7 |
| $Zn_3$ | 1.47 | 11.2 | 36.5 | 4.01 | 0.30 | 14.7 |
| $Zn_4$ | 1.27 | 7.78 | 34.0 | 3.73 | 0.24 | 12.9 |

$Zn_1$ (صفر یا شاهد)، $Zn_2$ (۲۵ میلی‌گرم بر لیتر)، $Zn_3$ (۵۰ میلی‌گرم بر لیتر) و $Zn_4$ (۷۵ میلی‌گرم بر لیتر).

$Zn_1$ (0 or control), $Zn_2$ (25 $mg.l^{-1}$), $Zn_3$ (50 $mg.l^{-1}$) and $Zn_4$ (75 $mg.l^{-1}$).

## نتیجه‌گیری کلی

در شرایط آبیاری غرقاب، بیشترین عملکرد دانه حاصل شد و با اعمال تنش کم‌آبی در مرحله پر شدن دانه، کاهش معنی‌داری در عملکرد مشاهده نگردید ولی تنش کم‌آبی در مرحله گلدهی موجب کاهش شدید عملکرد و جذب روی در دانه و کاه برنج شد که نشان‌دهنده حساسیت شدید گیاه به کمبود آب در این مرحله رشدی است. اگرچه کاربرد مقادیر مختلف نانوذرات اکسید روی موجب بهبود اجزای عملکرد، عملکرد و جذب روی در دانه برنج در مقایسه با شاهد گردید ولی مصرف ۵۰ و ۷۵ میلی‌گرم بر لیتر نانواکسید روی سبب حصول حداکثر عملکرد و جذب روی در دانه شد. با افزایش مصرف نانوذرات اکسید روی در مقادیر بالاتر به‌خصوص در مقدار مصرف ۷۵ میلی‌گرم بر لیتر، شاخص‌های کارایی روی روند نزولی داشتند؛ بنابراین اعمال تیمار آبیاری غرقاب در طول دوره رشد گیاه و هم‌چنین مصرف ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر نانوذرات اکسید روی جهت بهبود عملکرد و جذب روی دانه برنج مناسب است.

## منابع


Adhikari, T., Kundu, S., Rao, A.S., 2013. Impact of $Sio_2$ and Mo nanoparticles on seed germination of rice (*Oryza sativa* L.). International Journal of Agriculture and Food Science Technology. 4(8), 809-816.

Adiko, N.N., Ratnadewi, D., Miftahudin, 2017. Physiological responses of rice (*Oryza sativa* L.) to zinc treatments under drought stress. Pakistan Journal of Biotechnology. 14(2), 173-181.

Alharby, H.F., Metwali, E.M.R., Fuller, M.P., Aldhebiani, A.Y., 2016. Impact of application of zinc oxide nanoparticles on callus induction, plant regeneration, element content and antioxidant enzyme activity in tomato (*Solanum lycopersicum* L.) under salt stress. Archives of Biological Sciences. 68(4), 723-735.

Andrade, F.R., da Silva, G.N., Guimaraes, K.C., Barreto, H.B.F., de Souza, K.R.D., Guilherme, L.R.G., Faquin, V., dos Reis, A.R., 2018. Selenium protects rice plants from water deficit stress. Ecotoxicology and Environmental Safety. 164, 562-570.

Anzer Alam, Md., Kumar, M., 2015. Effect of zinc on growth and yield of rice var. Pusa Basmati-1 in Saran district Bihar. Asian Journal of Plant Science and Research. 5(2), 82-85.

Chen, J., Liu, X., Wang, C., Yin, S.S., Li, X.L., Hu, W.J., Simon, M., Shen, Z.J., Xiao, Q., Chu, C.C., Peng, X.X., 2015. Nitric oxide ameliorates zink oxide nanoparticles-induced phytotoxicity in rice seedlings. Journal of Hazardous Materials. 297, 173-182.

Davoody, N., Seghatoleslami, M.J., Mousavi, S.G.R., Azari Nasrabad, A., 2013. The effect of foliar application of nano-zinc oxide on yield and water use efficiency of foxtail millet in drought stress conditions. Environmental Stresses in Crop Sciences. 6(1), 37-46. [In Persian with English summary].

Dietz, K.J., Herth, S., 2011. Plant nanotoxicology. Trends in Plant Science. 16, 582-589.

Ehteshami, M.R., Amin Deldar, Z., 2013. The effects of different strains of *Pseuodomonas* on uptake efficiency, yield and yield components of rice. Journal of Plant Process and Function. 1(2), 73-85. [In Persian with English summary].

Fageria, N.K. 2009. The use of nutrients in crop plants. Boca Raton, F1, USA: CRC Press. pp. 430.

Fageria, N.K., Dos Santos, A.B., Cobucci, T., 2011. Zinc nutrition of lowland rice. Communication in Soil Science and Plant Analysis. 42, 1719-1727.

Fallah-Shamsi, S.A., Esfahani, M., Ghodsi, M., Samizadeh, H., 2014. Effect of drought stress on grain yield and agronomic parameters in local and improved rice (*Oryza sativa* L.) genotypes. 1st International and 13th Iranian Crop Science Congress, and 3rd Iranian Seed Science and Technology Conference. Seed and Plant Improvement Institute, Karaj. Iran. [In Persian].

Ghasemi, M., Mobasser, H.R., Asadimanesh, H., Gholizadeh, A., 2014. Investigating the effect of potassium, zinc and silicon on grain yield, yield components and their absorption in grain rice (*Oryza sativa* L.). Electronic Journal of Soil Management and Sustainable Production. 4(2), 1-24. [In Persian with English summary].

Ghasemi, M., Noormohammadi, Gh., Madani, H., Mobasser, H.R., Nouri, M.Z., 2017. Effect of foliar application of zinc nano oxide on agronomic traits of two varieties of rice (*Oryza sativa* L.). Crop Research. 52(6), 195-201.

Golesorkhy, M., Biabani, A., Sabouri, H., Esmaeili, M.M., 2016. Studying the relationship between agronomy traits of rice under flooding and drought stress conditions. Environmental Stresses in Crop Sciences. 8(2), 191-204. [In Persian with English summary].

Hosseini, R., Galeshi, S., Soltani, A, Kalateh, M., Zahed, M., 2013. The effect of nitrogen rate on nitrogen use efficiency index in wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars. Iranian Journal of Field Crops Research. 11(2), 300-306. [In Persian with English summary].

Huang, S., Wang, L., Liu, L., Hou, Y., Li, L., 2015. Nanotechnology in agriculture, livestock, and aquaculture in China, A review. Agronomy for Sustainable Development. 35, 369-400.

Jaksomsak, P., Rerkasem, B., Thai, C.P.U., 2017. Response of grain zinc and nitrogen concentration to nitrogen fertilizer application in rice varieties with high-yielding low-grain zinc and low-yielding high grain zinc concentration. Plant and Soil. 411, 101-109.

Kamari, H., Seyed Sharifi, R., Sedghi, M., 2014. Effect of Nano Zinc oxide foliar application and application of free living nitrogen fixing bacteria on yield and morphophysiological characteristics of Triticale. Crop Physiology Journal. 6(22), 37-52. [In Persian with English summary].

Karimi, A., 2014. The effect of different levels of magnesium and zinc nanoparticles on agronomic traits of wheat (*Triticum aestivum* L.). M.Sc thesis. Department of Agronomy. Islamic Azad University of Ghaemshahr. [In Persian].

Katozi, M., Rahimzadeh Khouee, F., Sabori, H., 2009. Effect of irrigation management on grain filling rate, grain filling duration and leaf relative water content on three rice (*Oryza sativa* L.) cultivars. Journal of Water and Soil Science. 13(47), 623-638. [In Persian with English summary].

Kheirizadeh Arough, Y., Seyed Sharifi, R., Sedghi, M., Barmaki, M., 2015. Effects of biofertilizers and nano zinc oxide on remobilization and some growth indices of triticale under water limitation conditions. Crop Physiology Journal. 7(26), 37-56. [In Persian with English summary].

Kheyri, N., Ajam Norouzi, H., Mobasser, H.R., Torabi, B., 2018. Effect of different resources and methods of silicon and zinc application on agronomic traits, nutrient uptake and grain yield of rice (*Oryza sativa* L.). Applied Ecology

and Environmental Research. 16(5), 5781-5798.

Kheyri, N., Ajam Norouzi, H., Mobasser, H.R., Torabi, B., 2019. Effects of silicon and zinc nanoparticles on growth, yield, and biochemical characteristics of rice. Agronomy Journal. 111(6), 3084-3090.

Mabesa, R.L., Impa, S.M., Grewal, D., Johnson-Beebout, S.E., 2013. Contrasting grain-Zn response of biofortification rice (*Oryza sativa* L.) breeding lines to foliar Zn application. Field Crops Research. 149, 223-233.

Mahbubur Rahman, K.M., Abul Khair Chowdhury, M.D., Sharmeen, F., Sarkar, A., Hye, M.A., Biswas, G.C., 2011. Effect of zinc and phosphorus on yield of *Oryza sativa* (cv. BR-11). Bangladesh Research Publications Journal. 5(4), 351-358.

Mazaherinia, S., Astaraei, A.R., Fotovat, A., Monshi, A., 2010. Nano iron oxide particles efficiency on Fe, Mn, Zn and Cu concentrations in wheat plant. World Applied Sciences Journal. 7(1), 36-40.

Miri, H.R., Niakan, V., Bagheri, A.R., 2012. Effect of alternating irrigation on yield, yield components and water productivity in direct seeding of rice in Kazerun Region. Journal of Crop Production and Processing. 2(5), 13-27. [In Persian with English summary].

Mirzashahi, K., Hossainpour, M., 2014. The effect of nitrogen fertilization management on grain yield and nitrogen efficiency indices in corn. Applied Field Crops Research. 27(102), 31-40. [In Persian with English summary].

Mohammadi, S., Nahvi, M., Mohadesi, A., 2015. The effect of irrigation interval on vegetative different stage on yield and yield component in rice line and varieties. Applied Field Crops Research. 28(107), 108-114. [In Persian with English summary].

Monica, R.C., Cremonini, R., 2009. Nanoparticles and higher plants. Caryologia. 62, 161-165.

Mostajeran, A., Rahimi-Eichi, V., 2009. Effects of drought stress on growth and yield of rice (*Oryza sativa* L.) cultivars and accumulation of proline and soluble sugars in sheath and blades of their different ages leaves. American-Eurasian Journal of Agricultural and Environmental Sciences. 5(2), 264-272.

Muthukumararaja, T.M., Sriramachandrasekharan, M.V., 2012. Effect of zinc on yield, zinc nutrition and zinc use efficiency of lowland rice. Journal of Agricultural Technology. 8(2), 551-561.

Naik, S.K., Das, D.K., 2007. Effect of split application of zinc on yield of rice (*Oryza sativa* L.) in an inceptisol. Archives of Agronomy and Soil Science. 53(3), 305-313.

Rahman, M.T., Islam, M.T., Islam, M.O., 2002. Effect of water stress at different growth stages on yield and yield contributing characters of transplanted Aman rice. Pakistan Journal of Biological Sciences. 5(2), 169-172.

Ramazani, A., Solhi, M., Rezaei, M., 2018. Effects of foliar application of zinc fertilizer on grain yield and zinc content of rice grain cv. Sazandegi. Iranian Journal of Field Crops Research. 16(1), 125-136. [In Persian with English summary].

Reis, A.R., Favarin, J.L., Gratão, P.L., Capaldi, F.R., Azevedo, R.A., 2015. Antioxidant metabolism in coffee (*Coffea arabica* L.) plants in response to nitrogen supply. Theoretical and Experimental Plant Physiology. 27, 203-213.

Reis, H.P.G., Barcelos, J.P.Q., Junior, E.F., Santos, E.F., Silva, V.M., Moraes, M.F., Putti, F.F., Reis, A.R., 2018. Agronomic biofortification of upland rice with selenium and nitrogen and its relation to grain quality. Journal of Cereal Science. 79, 508–515.

Reynolds, G.H., 2002. Forward to the future nanotechnology and regulatory policy. Pacific Research Institute. 24, 1-23.

Rezaei, R., Hosseini, M., Shabanali Fami, H., Safa, L., 2009. Identification and analysis of the barriers of nanotechnology development in the Iranian agricultural sector from the viewpoint of the researchers. Journal of Sciences and Technology Policy. 2(1), 17-26. [In Persian with English summary].

Rosegrant, M.W., 2016. Challenges and policies for global water and food security. Economic Review-Federal Reserve Bank of Kansas City. 5–20.

Sabir, A., Sari, G., 2019. Zinc pulverization alleviates the adverse effect of water deficit on plant growth, yield and nutrient acquisition in grapevines (*Vitis vinifera* L.). Scientia Horticulturae. 244, 61-67.

Sajedi, N.A., Ardakani, M.R., Sajedi, A., Bahrami, A., 2010. Absorption of some nutrient as affected by mycorrhizae, different levels of zinc and drought stress in maize.

Iranian Journal of Field Crops Research. 8(5), 784-791. [In Persian with English summary].

Shirazi, H., Biabani, A., Saboori, H., Naemi, M., 2019. Effect of different irrigation managements on morphological traits and yield of rice (*Oryza sativa* L.) cultivars in Gonbad-e-Kavus. Environmental Stresses in Crop Sciences. 12(1), 165-179. [In Persian with English summary].

Shojaei, H., Makarian, H., 2014. The effect of nano and non-nano zinc oxide particles foliar application on yield and yield components of mungbean (*Vigna radiate*) under drought stress. Iranian Journal of Field Crops Research. 12(4), 727-737. [In Persian with English summary].

Tahmasebi Sarvestani, Z., Pirdashti, H., 2008. Study of water stress effects in different growth stages on yield and yield components of different rice (*Oryza sativa* L.) cultivars. Pakistan Journal of Biological Sciences. 11(10), 1303-1309.

Tardieu, F., Parent, B., Caldeira, C.F., Welcker, C., 2014. Genetic and physiological controls of growth under water deficit. Plant Physiology. 164, 1628–1635.

Tohidi Moghadam, H.R., Zahedi, H., Ashkiani, A., 2013. Effect of zinc foliar application on auxin and gibberellin hormones and catalase and superoxide dismutase enzyme activity of corn (*Zea mays* L) under water stress. Maydica. 58(3), 218-223.

Venkatesan, G., Tamil Selvam, M., Swaminathan, G., Krishnamoorthi, K., 2005. Effect of water stress on yield of rice crop. International Journal of Ecology and Development. 3(F05), 77-89.

Welch, R.M., 2001. Impact of mineral nutrients in plants on human nutrition on a worldwide scale. Journal of Plant Nutrition. 92, 284-285.

Wu, N., Guan, Y., Shi, Y., 2011. Effect of water stress on physiological traits and yield in rice backcross lines after anthesis. Energy Procedia, 5, 255-260.

Xiong, L., Schumaker, K.S., Zhu, J.K., 2002. Cell signaling during cold, drought, and salt stress. Plant Cell. 14, 165-183.

Xu, Z.Z., Zhou, G.S, 2007. Photosynthetic recovery of a perennial grass *Leymus chinesis* after different periods of soil drought. Plant Production Science. 10(3), 277-285.

Yang, J.C., Liu, K., Zhang, S.F., Wang, X.M., Wang, Z.Q., Liu, L.J., 2008. Hormones in rice spikelets in responses to water stress during meiosis. Acta Agronomica Sinica. 34, 111–118.

Zubaer, M.A., Chowdhury, A.K.M.M.B., Islam, M.Z., Ahmed, T., Hasan, M.A., 2007. Effects of water stress on growth and yield attributes of aman rice genotypes. International Journal of Sustainable Crop Production. 2(6), 25-30.

University of Birjand

تنشهای محیطی در علوم زراعی
Environmental Stresses In Crop Sciences
*Vol. 13, No. 4, pp. 1203-1218*
*Winter 2021*
http://dx.doi.org/10.22077/escs.2020. 2298.1591

*Original article*

# Effect of foliar application of ZnO nanoparticles on yield components, yield and Zn efficiency indices in rice under water stress

**N. Kheyri[1*], M. Abbasalipour[2]**

*1. Department of Agronomy, Gorgan Branch, Islamic Azad University, Gorgan, Iran*
*2. M.Sc. Graduate, Department of Food Science and Technology, Ayatollah Amoli Branch, Islamic Azad University, Amol, Iran*

Received 24 February 2019; Accepted 23 April 2019

**Abstract**

Zinc (Zn) plays an important role in reducing the negative effects of drought stress by regulating stomata and ionic balance in crops. On the other hand, application of Zn to nanoparticles form due to better uptake and transfer than conventional form can have better impacts on growth and yield in drought stress conditions. For this purpose, a field experiment was conducted to investigate the effect of foliar application of ZnO nanoparticles on yield components, yield and Zn efficiency indices in rice (cv. Tarom Hashemi) under deficit irrigation conditions as split plot in a randomized complete block design with three replications in Amol in 2016. Irrigation in four levels ($I_1$: control or flood irrigation, $I_2$: water stress at tillering stage for 15 days, $I_3$: water stress at flowering stage for 15 days, and $I_4$: water stress at grain filling stage for 15 days) were considered as main plots and foliar application of ZnO nanoparticles in four levels ($Zn_1$: 0, $Zn_2$: 25, $Zn_3$: 50 and $Zn_4$: 75 mg ZnO $l^{-1}$) as sub-plots. The results showed that yield, yield components, as well as Zn concentration and uptake in grain and straw of rice were significantly decreased under water stress, especially at flowering stage. The use of 50 and 75 mg.$l^{-1}$ ZnO nanoparticles resulted in improved the panicle length (2.7 and 3.6%, respectively), number of fertile tillers per hill (10.4 and 12.9%, respectively), number of filled grains per panicle (11.6 and 13.7%, respectively), Zn concentration (44.2 and 51.8%, respectively) and uptake (51.6 and 59.6%, respectively) in grain, and finally the grain yield (13 and 16.3%, respectively) compared with control. Therefore, the flood irrigation with application of 50 mg.$l^{-1}$ ZnO nanoparticles is appropriate for improving the yield and Zn uptake in rice grains.

***Keywords:*** Grain yield, Nano fertilizer, Rice, Water stress, Zinc foliar application

[*]Correspondent author: Norollah Kheyri; E-Mail: norollah.kheyri@yahoo.com