Archive of SID
DOI: 10.22059/ijswr.2020.302497.668606 تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۵۱، شماره ۹، آذر ماه ۱۳۹۹ (ص ۲۳۲۲-۲۳۰۷)

Investigating the Effect of Spraying Silica Nanoparticles in Increasing the Drought Resistance of Millet Seedlings in Kashmar Weather Conditions

MAHDI MOKARI[*1], MEYSAM ABEDINPOUR[1]
1. Water Engineering Department, Kashmar Higher Education Institute, Kashmar, Iran.
(Received: May. 12, 2020- Revised: June. 25, 2020- Accepted: July. 13, 2020)

ABSTRACT

Today, application of nanoparticles in various sciences including agriculture has expanded greatly. One of the important roles of nanoparticles in agricultural and horticultural production is to increase plant resistance to environmental stresses, such as salinity and water stress. Therefore, the present study investigated the effect of spraying with silica nanoparticles on increasing drought resistance of grain millet. For this purpose, a field research was conducted in the form of split plots in a completely randomized design with three replications. The main plots consisted of four irrigation treatments *i.e.* 100, 80, 60, and 40 percent of the crop water requirement, and the sub-plots included six spraying treatments with concentrations of 0, 100, 200, 300, 400 and 500 mg/l of silica nanoparticles. The results indicated that the deficit irrigation significantly reduced plant height, grain weight, grain yield, harvest index and water productivity at 1% level. On the other hand, in all irrigation treatments, spraying with silica nanoparticles could significantly increase grain yield, harvest index and water productivity. The highest grain yield, harvest index and water productivity were observed in full irrigation treatment (100% water requirement) and 500 mg/l spraying of nanoparticles and the lowest amount was observed in 40% water treatment without spraying. Due to the severe scarcity of water resources in the arid region of Kashmar, providing 80% of the water requirement of millet along with spraying with a concentration of 500 mg/l silica nanoparticles is recommended in the tillering stage and flowering to deal with water crisis in the study area.

Keywords: Deficit Irrigation, Silica Nanoparticles, Grain Yield, Water Productivity.

* Corresponding Author's Email: mehdimokari@gmail.com
www.SID.ir

Archive of SID

بررسی تأثیر محلول‌پاشی با نانوذرات سیلیس در افزایش مقاومت به خشکی ارزن دانه‌ای در شرایط آب و هوایی کاشمر

مهدی مکاری[1*]، میثم عابدین‌پور[1]

۱. گروه علوم و مهندسی آب، مرکز آموزش عالی کاشمر، کاشمر، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۲/۲۳- تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۴/۵- تاریخ تصویب: ۱۳۹۹/۴/۲۳)

چکیده

امروزه استفاده از نانوذرات در علوم مختلف و از جمله کشاورزی گسترش زیادی یافته است. یکی از نقش‌های مهم نانوذرات در تولید گیاهان زراعی و باغی، افزایش مقاومت گیاهان در برابر تنش‌های محیطی از جمله تنش شوری و خشکی است. بنابراین هدف پژوهش حاضر بررسی تأثیر محلول‌پاشی با نانوذرات سیلیس در افزایش مقاومت به تنش خشکی در ارزن دانه‌ای بود. به این منظور پژوهشی مزرعه‌ای به‌صورت کرت‌های یک بار خرد شده در قالب طرح کاملاً تصادفی و در سه تکرار اجرا گردید. کرت‌های اصلی شامل چهار تیمار آبیاری تأمین ۱۰۰، ۸۰، ۶۰ و ۴۰ درصد نیاز آبی و کرت‌های فرعی شامل شش تیمار محلول‌پاشی با غلظت‌های صفر، ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات سیلیس بودند. نتایج نشان داد که کم‌آبیاری باعث کاهش معنی‌دار ارتفاع گیاه، وزن هزار دانه، عملکرد دانه، شاخص برداشت و بهره‌وری آب در سطح احتمال یک درصد گردید. از طرفی در تمام تیمارهای آبیاری محلول‌پاشی با نانوذرات سیلیس، عملکرد دانه، شاخص برداشت و بهره‌وری آب را به‌طور معنی‌داری افزایش داد. بیش‌ترین عملکرد دانه، شاخص برداشت و بهره‌وری آب در تیمار آبیاری کامل (۱۰۰ درصد نیاز آبی) و محلول‌پاشی با غلظت ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات و کمترین مقدار آن‌ها در تیمار ۴۰ درصد نیاز آبی و بدون محلول‌پاشی مشاهده گردید. با توجه به بحران شدید منابع آبی در منطقه خشک کاشمر، تأمین ۸۰ درصد نیاز آبی ارزن دانه‌ای به همراه محلول‌پاشی با غلظت ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات سیلیس در مرحله پنجه‌زنی و گلدهی ارزن دانه‌ای، برای مقابله با بحران کم‌آبی در این منطقه قابل توصیه است.

واژه‌های کلیدی: کم‌آبیاری، نانوذرات سیلیس، عملکرد دانه، بهره‌وری آب.

مقدمه

سیلیسیم دومین عنصر فراوان پوسته زمین (۳۱ ٪) بعد از اکسیژن (۴۹ ٪) است (۳۹ و ۱۸) که نقش آن در بیولوژی کمتر درک شده و تلاش برای درک ارتباط سیلیسیم با متابولیسم و فعالیت‌های فیزیولوژیک گیاه در حال انجام است. با وجود فراوانی سیلیسیم در پوسته زمین، اکثر فرم‌های آن قابل‌جذب برای گیاه نیست. این عنصر در افزایش کارایی مصرف آب و همچنین بر رشد و عملکرد گیاه اثرهای مثبتی دارد و باعث افزایش تولید و کیفیت محصول، کاهش تبخیر و تعرق، افزایش مقاومت به تنش‌هایی مانند خشکی و سمیت فلزات سنگین، افزایش تحریک تولید برخی آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان و کاهش حساسیت به بعضی بیماری‌های قارچی در گیاه می‌شود (Ma, 2004؛ Gao *et al.*, 2006). همچنین وجود سیلیسیم جهت تولید آنزیم روبیسکو (Rubisco) در برگ لازم است. این آنزیم کارایی تثبیت دی‌اکسید کربن توسط گیاهان را افزایش داده و در نهایت منجر به بهبود فتوسنتز در گیاه می‌شود (Mohaghegh *et al.*, 2010). جذب سیلیس به‌وسیله گیاه اثرات مفیدی مانند افزایش مقاومت به آفات و بیماری‌ها (Hossain *et al.*, 2007)، تحمل به تنش‌های غیرزنده (Liang *et al.*, 2005) و بهبود کیفیت و عملکرد محصول (Kamenidou *et al.*, 2010) را به همراه دارد.

کاربرد نوظهور فناوری نانو در علوم گیاهی یکی از موضوعات روز دنیاست که پژوهش‌ها در این حیطه در آغاز راه و رو به گسترش بوده و هنوز بسیاری از اثرها و کارکردهای نانو مواد بر مکانیسم‌های فیزیولوژیک و متابولیک گیاهان ناشناخته است. استفاده از فناوری نانو در دهه‌های اخیر توانسته است تحولات وسیعی در تمام زمینه‌های علوم ایجاد نماید (Peyvandi *et al.*, 2011) و علم کشاورزی نیز از این قاعده مستثنی نیست (Das *et al.*, 2004). به دلیل اثرات مضری که کودهای شیمیایی در محیط‌زیست و کیفیت غذا ایجاد می‌کنند، مدت‌هاست که استفاده از آن‌ها مورد نکوهش قرار گرفته است. در نانوکودها به‌عنوان جایگزین کودهای مرسوم، عناصر غذایی کود به‌تدریج و به‌صورت کنترل‌شده در خاک آزاد می‌شوند و در نتیجه از بروز پدیده مردابی

* نویسنده مسئول: mehdimokari@gmail.com

www.SID.ir

Archive of SID

شدن آب‌های ساکن و همچنین آلودگی اب آشامیدنی جلوگیری به عمل خواهد آمد. در حقیقت با بهره‌گیری از فناوری نانو در طراحی و ساخت نانوکودها، فرصت‌های جدیدی به‌منظور افزایش کارایی مصرف آب عناصر غذایی و به حداقل رساندن هزینه‌های حفاظت از محیط‌زیست، پیش روی انسان گشوده شده است (Naderi and Abedi, 2012). نتایج پژوهشی نشان داد که استفاده از نانوذرات روی باعث افزایش عملکرد پیاز گردید (Laware and Raskar, 2014). در پژوهشی اثر نانوذرات آهن، کبالت و مس بر جوانه‌زنی، رشد، عملکرد محصول و کیفیت تولید سویا بررسی گردید. نتایج نشان داد که جوانه‌زنی در بذرهایی که با نانوذرات مس، کبالت و آهن تیمار شده بودند به‌ترتیب ۶۵، ۸۰ و ۸۰ درصد بود در حالی که جوانه‌زنی در بذرهای تیمار نشده به‌اندازه ۵۵ درصد بود (Ngo *et al*., 2014). نتایج بررسی اثر ترکیبی نانوذرات سیلیس و تیتانیوم بر جوانه‌زنی و رشد گیاه سویا نشان داد که ترکیب نانوذرات سیلیس و تیتانیوم درصد جوانه‌زنی و رشد سویا را افزایش داد (Lu *et al*., 2002). در پژوهشی دیگر اثر نانوذرات اکسید روی بر جوانه‌زنی، رشد و عملکرد بادام‌زمینی مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج حاکی از تأثیر معنی‌دار نانوذرات اکسید روی در افزایش رشد و عملکرد محصول بود (Prasad *et al*., 2012). نتایج پژوهش بررسی تأثیر نانوذرات کیتوزان بر عملکرد و اجزای عملکرد جو تحت تنش خشکی آخر فصل نشان داد که محلول-پاشی با غلظت‌های ۶۰ و ۹۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات کیتوزان، سطح برگ، تعداد دانه در خوشه، عملکرد دانه و شاخص برداشت را نسبت به تیمار شاهد (بدون محلول‌پاشی) به‌طور معنی‌داری افزایش داد. همچنین نتایج نشان داد که استفاده از نانوذرات کیتوزان در گیاهان تحت تنش خشکی، باعث افزایش معنی‌دار محتوی نسبی آب در گیاه، وزن هزار دانه و پروتئین دانه در مقایسه با تیمار شاهد گردید و استفاده از غلظت‌های بالای نانوذرات کیتوزان باعث افزایش مقاومت به خشکی در تیمارهای تحت تنش آبی شد (Behboudi *et al*., 2018).

کم‌آبیاری یکی از راهکارهای بهینه‌سازی مصرف آب است که طی آن به گیاه زراعی اجازه داده می‌شود مقداری تنش کم‌آبی را در طول فصل رشد تحمل نمایند. گزارش شده تنش خشکی به‌طور معنی‌داری عملکرد دانه را در سه گونه ارزن دم‌روباهی، معمولی و مرواریدی کاهش داد. کاهش عملکرد عمدتاً از طریق کاهش تعداد خوشه در مترمربع و کاهش تعداد دانه در خوشه ایجاد گردید (Seghatoleslami *et al*., 2005). در پژوهشی دیگر نتایج نشان دادند که تنش خشکی باعث کاهش تعداد خوشه در مترمربع، تعداد دانه در خوشه، وزن هزار دانه و در نهایت عملکرد دانه، شاخص برداشت و کارایی مصرف آب ارزن دم‌روباهی گردید. نتایج همچنین نشان داد که محلول‌پاشی با اکسید روی معمولی و نانواکسید روی بر هیچ‌یک از صفات فوق معنی‌دار نبود (Davoody *et al*., 2013).

با توجه به مدیریت نامناسب منابع آبی در مناطق خشک و نیمه‌خشک و رویارویی کشاورزان این مناطق با پدیده بحران آب، این ضرورت احساس می‌شود که بتوان با ارائه راهکارهای مدیریتی مناسب، آسیب‌های ناشی از کمبود آب و تنش خشکی در تولید محصولات کشاورزی را به حداقل رساند. یکی از راهکارهایی که می‌تواند به افزایش مقاومت گیاه به خشکی و بالابردن کارایی مصرف آب کمک نماید استفاده از نانوذرات در کشاورزی است. اما نکته‌ای که باید به آن توجه نمود این است که نوع نانوذرات و روش استفاده از آن‌ها باید در هر منطقه و برای هر نوع گیاه به‌طور جداگانه مورد مطالعه قرار گیرد. متأسفانه در زمینه استفاده از نانوذرات و نقش آن‌ها به‌عنوان مکمل در افزایش مقاومت گیاهان زراعی در برابر تنش‌های محیطی و به‌خصوص تنش شوری و خشکی مطالعات بسیار کمی در کشور انجام شده است. بنابراین در این پژوهش سعی شد تا اثر محلول‌پاشی نانوذرات سیلیس بر عملکرد و اجزای عملکرد و بهره‌وری آب ارزن دانه‌ای در شرایط تنش خشکی در منطقه خشک کاشمر مورد بررسی قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

محل مورد مطالعه

این پژوهش در سال زراعی ۱۳۹۸ در مزرعه پژوهشی مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی شهرستان کاشمر انجام شد. ایستگاه تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی شهرستان کاشمر در فاصله ۲ کیلومتر از مرکز شهرستان و در طول جغرافیایی ۵۸ درجه و ۳۰ دقیقه تا ۵۸ درجه و ۵۰ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۱۲ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۲۴ دقیقه شمالی قرار دارد. ارتفاع این مرکز ۱۱۰۹/۷ متر از سطح دریا است. میانگین بلندمدت دمای سالیانه محل آزمایش ۱۷/۸ درجه سانتی‌گراد و میانگین بارش سالانه ۱۹۲/۱ میلی‌متر است. اقلیم منطقه بر اساس طبقه‌بندی دو مارتن، خشک است. خصوصیات شیمیایی و فیزیکی خاک زراعی محل آزمایش به ترتیب در جدول‌های (۱ و ۲) و خصوصیات شیمیایی آب آبیاری مزرعه تحقیقاتی که از چاه عمیق تأمین می‌شد در جدول (۳) ارائه شده است.

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۱- خصوصیات شیمیایی خاک مزرعه تحقیقاتی

عمق خاک (cm)	pH	EC (ds/m)	OC (%)	TNV (%)	N (%)	P (mg/kg)	K (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Mn (mg/kg)
۰-۳۰	۷/۹	۰/۵۹۸	۰/۵۰۲	۲۰/۵	۰/۰۷۱	۹/۶	۳۱۰	۰/۰۴۹	۷/۹۱
۳۰-۶۰	۷/۷	۰/۵۷۰	۰/۲۵۰	۳۶	۰/۰۳۴	۴	۲۸۰	۰/۰۳۰	۴/۴۰

جدول ۲- خصوصیات فیزیکی خاک مزرعه تحقیقاتی

عمق خاک (cm)	درصد رس	درصد سیلت	درصد شن	بافت خاک	وزن مخصوص ظاهری (gr/cm^3)
۰-۳۰	۳۱/۵	۴۳/۵	۲۵	لومی- رسی	۱/۳۶
۳۰-۶۰	۴۵	۳۸	۱۷	رسی	۱/۴۱

جدول ۳- خصوصیات شیمیایی آب مزرعه تحقیقاتی

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
pH	۷/۳۵	HCO^{3-} (meq/L)	۴/۳
EC (dS/m)	۰/۳۴۵	CO_3^{2-} (meq/L)	۰
Na+ (meq/L)	۰/۲۱	$SO4^{2-}$ (meq/L)	۰/۰۳
K+ (meq/L)	۰/۴۲	Ca^{2+} (meq/L)	۳/۱۱
Cl^- (meq/L)	۰/۵۱	Mg^{2+} (meq/L)	۱/۲۷

این پژوهش به‌صورت کرت‌های یک‌بار خردشده در قالب طرح کاملاً تصادفی با ۳ تکرار انجام شد. هر تکرار شامل چهار کرت اصلی به‌عنوان تیمارهای آبیاری بود که عبارت بودند از ۱) آبیاری مطلوب بر اساس نیاز آبی تعیین‌شده برای گیاه در منطقه کاشمر؛ ۲) کم‌آبیاری که در آن ۸۰ درصد نیاز آبی گیاه در اختیار آن قرار داده شد؛ ۳) کم‌آبیاری که در آن ۶۰ درصد نیاز آبی گیاه در اختیار آن قرار داده شد و ۴) کم‌آبیاری که در آن ۴۰ درصد نیاز آبی گیاه در اختیار آن قرار داده شد.

هر کرت اصلی شامل ۶ کرت فرعی به‌عنوان تیمارهای محلول‌پاشی به این شرح بود: ۱) بدون محلول‌پاشی؛ ۲) محلول-پاشی با غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانو ذرات سیلیس؛ ۳) محلول‌پاشی با غلظت ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانو ذرات سیلیس ؛ ۴) محلول‌پاشی با غلظت ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانو ذرات سیلیس ؛ ۵) محلول‌پاشی با غلظت ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانو ذرات سیلیس و ۶) محلول‌پاشی با غلظت ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانو ذرات سیلیس. عمل محلول‌پاشی در دو مرحله (یعنی مرحله پنجه‌زنی و گلدهی) با غلظت‌های موردنظر انجام شد. هر کرت فرعی شامل ۴ خط کشت به طول ۵ متر و به فاصله ۵۰ سانتی‌متر بود. در شکل (۱) نقشه واحدهای آزمایشی نشان داده شده است.

نانوذرات سیلیس از شرکت نانو صدرا تهیه شد. اندازه ذرات نانو سیلیس ۳۰-۲۰ نانومتر بود. به‌منظور پراکنده شدن ذرات و تهیه سوسپانسیون همگن از نانوسیلیس، سوسپانسیون اولیه قبل از استفاده به مدت ۳۰ دقیقه داخل دستگاه هموژنایزر اولتراسونیک (باندلین، یووی ۳۱۰۰) قرار داده شد تا سوسپانسیون یکنواختی از آن به دست آید که بلافاصله برای اعمال تیمارها استفاده شد.

قبل از کاشت آزمون خاک انجام شده و بر اساس نتایج، کود کامل (شامل ازت و فسفر ترکیبی، گوگرد، پتاس، مواد آلی و سولفات منیزیم) به میزان ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار و اوره در دو مرحله (هر مرحله ۵۰ کیلوگرم در هکتار) داده شد. کنترل علف های هرز در طول دوره رشد از طریق وجین دستی صورت گرفت.

برداشت زمانی که خوشه‌ها کاملاً زردرنگ شده بود با حذف دو ردیف کناری و نیم متر ابتدا و انتهای ردیف‌ها به‌عنوان اثر حاشیه‌ای، انجام گرفت. عملکرد و اجزای عملکرد تیمارها شامل ارتفاع گیاه، وزن هزار دانه، تعداد پانیکول در هر گیاه، عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیک اندازه‌گیری شده و تحلیل نتایج با استفاده از نرم‌افزار SPSS صورت گرفت. برای محاسبه تعداد پانیکول در هر بوته، از هر کرت تعداد ۳۰ بوته به‌طور تصادفی انتخاب شد و متوسط تعداد پانیکول‌ها محاسبه شد. برای اندازه‌گیری وزن هزار دانه نیز تعداد ۵ نمونه ۱۰۰ تایی از هر کرت انتخاب و وزن هر نمونه اندازه‌گیری شده و به ۱۰۰۰ دانه تعمیم داده شد.

در نهایت میانگین ۵ نمونه به‌عنوان وزن هزار دانه پذیرفته شد (Omidi Nasab *et al*., 2015). برای به دست آوردن میزان کاه تولیدی، وزن دانه به‌دست‌آمده از واحد سطح از وزن کل محصول برداشت‌شده در واحد سطح کسر گردید. شاخص برداشت از تقسیم عملکرد دانه به عملکرد بیولوژیک به دست آمد.

www.SID.ir

Archive of SID

	I1	I3	I4	I2
R1	C0	C1	C0	C5
	C1	C4	C3	C2
	C2	C0	C2	C4
	C3	C2	C5	C1
	C4	C5	C1	C0
	C5	C3	C4	C3
	I2	I4	I1	I3
R2	C3	C4	C2	C5
	C5	C0	C4	C0
	C0	C3	C0	C3
	C2	C1	C5	C1
	C4	C5	C1	C4
	C1	C2	C3	C2
	I3	I1	I2	I4
R3	C2	C5	C1	C1
	C4	C2	C4	C5
	C5	C1	C5	C2
	C1	C3	C2	C0
	C0	C0	C3	C4
	C3	C4	C0	C3

R1، R2 و R3 به‌ترتیب تکرار اول، دوم و سوم؛ I1، I2، I3 و I4 به‌ترتیب تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی، ۸۰ درصد نیاز آبی، ۶۰ درصد نیاز آبی و ۴۰ درصد نیاز آبی؛ C0، C1، C2، C3، C4 و C5 به‌ترتیب بدون محلول‌پاشی، محلول‌پاشی با غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر، محلول‌پاشی با غلظت ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر، محلول‌پاشی با غلظت ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر، محلول‌پاشی با غلظت ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر و محلول‌پاشی با غلظت ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات سیلیس.

شکل ۱- شمایی از نقشه طرح استفاده‌شده در این پژوهش

با توجه به محدودیت منابع آبی و لزوم مدیریت آب در بخش کشاورزی، ارائه راهکاری که بتواند بهره‌وری آب را افزایش دهد، حائز اهمیت است. بنابراین بهره‌وری آب برای تیمارها از طریق رابطه ۱ محاسبه شد (Liu *et al.*, 2015):

$$WP = \frac{GY}{TWU} \quad \text{(رابطه ۱)}$$

که در این رابطه، WP بهره‌وری آب (کیلوگرم بر مترمکعب)، GY مقدار عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار) و TWU کل آب مصرفی شامل آبیاری و بارندگی مؤثر (مترمکعب در هکتار) است.

محاسبه نیاز آبی

ابتدا با استفاده از داده‌های هواشناسی روزانه شامل دمای کمینه و بیشینه، رطوبت نسبی کمینه و بیشینه، سرعت باد و ساعات آفتابی در منطقه (اخذشده از ایستگاه همدیدی کاشمر) تبخیر و تعرق مرجع با استفاده از فرمول پنمن- مانتیث محاسبه شد.

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \left[\frac{890}{T+273}\right]U_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad \text{(رابطه ۲)}$$

که در این رابطه، ET_0 تبخیر- تعرق مرجع (mm/day)، R_n تابش خالص در سطح پوشش گیاهی ($MJm^{-2}d^{-1}$)، T متوسط دمای هوا در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین (^0C)، U_2 متوسط سرعت باد در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین (m/s)، (e_s-e_a) کمبود فشار بخار در ارتفاع ۲ متری (Kpa)، Δ شیب منحنی فشار بخار ($Kpa/0^C$)، γ ضریب رطوبتی (Kpa/0C) و G شار گرما به داخل خاک ($MJm^{-2}d^{-1}$) می‌باشند.

سپس نیاز آبی گیاه با اعمال ضریب گیاهی ارزن در مراحل مختلف رشد (مرحله اولیه رشد ۰/۱۵، در مرحله میانی ۱ و مرحله انتهایی ۰/۳) (اقتباس از نشریه ۵۶ فائو) و با استفاده از رابطه زیر تعیین گردید:

$$ET_C = K_C \times ET_0 \quad \text{(رابطه ۳)}$$

که در رابطه فوق، ET_0 تبخیر و تعرق پتانسیل گیاه مرجع (میلی‌متر در روز)، ET_C نیاز آبی گیاه (میلی‌متر بر روز) و K_C ضریب گیاهی است.

دور آبیاری برای آبیاری سطحی جوی و پشته‌ای ۷ روز و بر اساس عرف منطقه در نظر گرفته شد. برای محاسبه عمق خالص آبیاری از رابطه (۳) استفاده گردید:

$$d_n = \sum_{i=1}^{7} ET_{Ci} \quad \text{(رابطه ۴)}$$

که در رابطه فوق، d_n عمق خالص آبیاری (mm) است.

در این پژوهش راندمان آبیاری در کرت‌های ۱۵ مترمربعی،

www.SID.ir

Archive of SID

۱۰۰ درصد در نظر گرفته شد. زیرا در غیر این صورت، تلفات آبیاری ناشی از راندمان‌های کمتر از ۱۰۰ درصد در تیمارهای کم‌آبیاری نفوذ عمقی نکرده و در ناحیه ریشه باقی می‌ماند و تنش رطوبتی را به کمتر از حد مورد انتظار می‌رساند. بنابراین با در نظر گرفتن راندمان آبیاری ۱۰۰ درصد، عمق ناخالص آبیاری و در نهایت حجم آب آبیاری موردنیاز در طول دوره رشد برای هر کرت از روابط زیر محاسبه گردید:

$$d_g = \frac{d_n}{E_a}$$ (رابطه ۵)

$$V = d_g \times A$$ (رابطه ۶)

که در روابط فوق، d_g عمق ناخالص آبیاری (mm)، E_a راندمان کاربرد (۱۰۰ درصد)، A مساحت هر کرت (مترمربع) و V حجم آب آبیاری بر حسب لیتر است. در نهایت حجم آب آبیاری موردنیاز با استفاده از کنتور اندازه‌گیری و به هر کرت منتقل شد. بعد از عملیات کاشت اولین آبیاری در تاریخ ۱۳۹۸/۰۵/۱۰ صورت گرفت و آبیاری‌های بعدی با رعایت دور آبیاری تا تاریخ ۱۳۹۸/۰۷/۱۱ انجام گردید. در جدول (۴) مقادیر آب مصرف‌شده در تاریخ‌های آبیاری و در تیمارهای مختلف آبیاری بر حسب میلی‌متر ارائه شده است.

در جدول (۵) طول مراحل فنولوژیکی و مقدار آب مصرف‌شده در هر مرحله بر حسب میلی‌متر در تیمارهای مختلف آبیاری ارائه شده است.

جدول ۴- مقادیر آب مصرف‌شده در تیمارهای مختلف آبیاری بر حسب میلی‌متر

تاریخ‌های آبیاری	تیمارهای آبیاری			
	۱۰۰ درصد نیاز آبی	۸۰ درصد نیاز آبی	۶۰ درصد نیاز آبی	۴۰ درصد نیاز آبی
۱۳۹۸/۰۵/۱۰	۱۰/۲	۸/۱	۶/۱	۴
۱۳۹۸/۰۵/۱۷	۴۰/۸	۳۲/۶	۲۴/۴	۱۶/۳
۱۳۹۸/۰۵/۲۴	۶۰/۴	۴۸/۳	۳۶/۲	۲۴/۱
۱۳۹۸/۰۵/۳۱	۵۹/۶	۴۷/۶	۳۵/۷	۲۳/۸
۱۳۹۸/۰۶/۰۷	۵۴/۴	۴۳/۵	۳۲/۶	۲۱/۷
۱۳۹۸/۰۶/۱۴	۵۰/۶	۴۰/۴	۳۰/۳	۲۰/۲
۱۳۹۸/۰۶/۲۱	۴۸/۵	۳۸/۸	۲۹/۱	۱۹/۴
۱۳۹۸/۰۶/۲۸	۳۸/۶	۳۰/۸	۲۳/۱	۱۵/۴
۱۳۹۸/۰۷/۴	۱۲/۴	۹/۹	۷/۴	۴/۹
۱۳۹۸/۰۷/۱۱	۱۲	۹/۶	۷/۲	۴/۸
مقدار کل آب داده‌شده (mm)	۳۸۷/۵	۳۰۹/۶	۲۳۲/۱	۱۵۴/۶

جدول ۵- طول مراحل فنولوژیکی ارزن دانه‌ای و مقدار آب مصرف‌شده در هر مرحله در تیمارهای مختلف آبیاری برحسب میلی‌متر

تیمار آبیاری	۱۰۰ درصد نیاز آبی		۸۰ درصد نیاز آبی		۶۰ درصد نیاز آبی		۴۰ درصد نیاز آبی	
دوره رشد	روز	مقدار آب داده‌شده (mm)	روز	مقدار آب داده‌شده (mm)	روز	مقدار آب داده‌شده (mm)	روز	مقدار آب داده‌شده (mm)
از کاشت تا سبز شدن	۴	۵/۹	۴	۴/۷	۴	۳/۵	۴	۲/۳
از سبز شدن تا پنجه‌زنی	۱۲	۶۲/۸	۱۲	۵۰/۲	۱۳	۴۲/۶	۱۳	۲۸/۴
از پنجه‌زنی تا ساقه رفتن	۱۱	۹۴/۵	۱۲	۸۱/۹	۱۳	۶۵/۸	۱۵	۵۰/۶
از ساقه رفتن تا ظهور خوشه	۱۹	۱۴۱/۳	۲۰	۱۱۷/۳	۲۱	۹۰/۳	۲۱	۵۹/۲
از ظهور خوشه تا گلدهی	۵	۳۳	۵	۲۵	۴	۱۴/۴	۴	۸
از گلدهی تا پرشدن دانه	۱۱	۳۶/۵	۹	۲۰	۹	۹/۶	۸	۵/۶
از پرشدن دانه تا رسیدن	۱۲	۱۳/۵	۱۱	۱۰/۵	۱۰	۶	۹	۳/۶

نتایج و بحث

نتایج جدول تجزیه واریانس (جدول ۶) نشان داد که اثر رژیم آبیاری، نانوکود سیلیس و اثر متقابل رژیم آبیاری و نانوکود سیلیس بر ارتفاع گیاه، تعداد پانیکول در هر گیاه، عملکرد کاه، وزن هزار دانه، عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیک، شاخص برداشت و بهره‌وری آب در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود.

ارتفاع گیاه

کم‌آبیاری اثر معنی‌داری در کاهش ارتفاع گیاه داشت به طوری که ارتفاع گیاه در تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی در مقایسه تیمارهای دیگر بیش‌تر بود (جدول ۷).

www.SID.ir

Archive of SID

جدول۶- تجزیه واریانس عملکرد، اجزای عملکرد و بهره‌وری آب ارزن دانه‌ای معمولی تحت تأثیر محلول‌پاشی با غلظت‌های مختلف نانو کود سیلیس و رژیم‌های مختلف آبیاری

منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات							
		ارتفاع گیاه (سانتی‌متر)	تعداد پانیکول در هر گیاه	وزن هزار دانه (گرم)	عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار)	عملکرد کاه (کیلوگرم در هکتار)	عملکرد بیولوژیک (کیلوگرم در هکتار)	شاخص برداشت (درصد)	بهره‌وری آب (کیلوگرم بر مترمکعب)
رژیم آبیاری	۳	۵۵۴/۴۴۸ **	۱۸/۹۰۳ **	۲/۲۴۴ **	۳۲۲۸۷۴۵/۷۷۸ **	۳۰۵۰۵۲۵/۰۳۷ **	۱/۲۵۵×۱۰^۷ **	۲۱/۸۶۶ **	۰/۱۷۷ **
نانو کود سیلیس	۵	۳۱/۵۳۷ **	۱/۰۸۱ **	۰/۳۰۵ **	۱۵۸۱۶۱/۰۶۷ **	۱۶۷۹۲۱/۹۵۶ **	۶۴۸۰۷۵/۵۵۶ **	۱/۹۷۸ *	۰/۰۱۱ **
نانو کود سیلیس × رژیم آبیاری	۱۵	۲/۲۳۷ **	۰/۲۳۶ **	۰/۰۶۳ **	۶۸۷۷/۵۱۱ **	۵۴۷۹/۸۸۱ **	۱۵۳۷۶/۲۹۶ **	۴/۰۴۲ **	۰/۰۰۲ **
خطا	۴۸	۰/۴۶۹	۰/۰۵۶	۰/۰۰۴	۱۰۹۵/۵۵۶	۱۸۸۶/۶۶۷	۳۸۸۸/۸۸۹	۰/۷۴۲	۰/۱۴×۱۰^-۳
ضریب تغییرات (درصد)		۰/۹۳	۸/۱۵	۰/۷۶	۲/۱۰	۲/۵۰	۱/۸۸	۱/۸۱	۱/۸۱

****: معنی‌داری در سطح یک درصد، *: معنی‌داری در سطح پنج درصد، ns: غیر معنی‌دار**

جدول ۷- مقایسه میانگین اثر توأمان تیمارهای آبیاری و محلول‌پاشی با غلظت‌های مختلف نانوذرات سیلیس بر ارتفاع، شاخص برداشت و بهره‌وری آب ارزن دانه‌ای

تیمار	ارتفاع (سانتی‌متر)	شاخص برداشت (درصد)	بهره‌وری آب (کیلوگرم بر مترمکعب)
I_0C_0	۷۷/۳۳ c	۴۸/۲۱ abc	۰/۷۱ e
I_0C_1	۷۸/۳۳ c	۴۸/۲۷ ab	۰/۷۴ d
I_0C_2	۸۰/۰ b	۴۸/۳۲ ab	۰/۷۹ c
I_0C_3	۸۰/۰ b	۴۸/۵۴ ab	۰/۸۱ c
I_0C_4	۸۰/۰ b	۴۸/۷۷ a	۰/۸۴ b
I_0C_5	۸۳/۶۷ a	۴۸/۸۰ a	۰/۸۹ a
I_1C_0	۷۳/۰ fgh	۴۷/۷۶ abcde	۰/۶۵ hi
I_1C_1	۷۳/۳۳ fg	۴۷/۸۴ abcde	۰/۶۵ hi
I_1C_2	۷۴/۰ ef	۴۷/۸۴ abcde	۰/۶۶ gh
I_1C_3	۷۵/۰ de	۴۷/۸۵ abcde	۰/۶۷ fg
I_1C_4	۷۵/۳۳ d	۴۸/۰۹ abcd	۰/۶۹ ef
I_1C_5	۷۶/۰ d	۴۸/۱۶ abc	۰/۶۹ ef
I_2C_0	۷۰/۰ kl	۴۶/۸۷ bcdefg	۰/۶۰ m
I_2C_1	۷۰/۰ kl	۴۷/۴۴ abcdef	۰/۶۱ lm
I_2C_2	۷۱/۰ jk	۴۷/۴۹ abcdef	۰/۶۱ lm
I_2C_3	۷۱/۵۰ ij	۴۷/۴۹ abcdef	۰/۶۲ kl
I_2C_4	۷۲/۰ hij	۴۷/۴۹ abcdef	۰/۶۳ jkl
I_2C_5	۷۲/۳۳ ghi	۴۷/۷۲ abcdef	۰/۶۴ ijk
I_3C_0	۶۲/۶۷ o	۴۲/۱۳ h	۰/۵۳ q
I_3C_1	۷۷/۳۳ n	۴۵/۶۰ g	۰/۵۵ p
I_3C_2	۶۷/۰ m	۴۶/۰۹ fg	۰/۵۶ op
I_3C_3	۶۸/۰ m	۴۶/۲۰ efg	۰/۵۷ op
I_3C_4	۶۸/۰ m	۴۶/۴۳ defg	۰/۵۸ no
I_3C_5	۶۹/۳۳ l	۴۶/۵۳ cdefg	۰/۵۹ mn

میانگین‌هایی که در هر ستون دارای حروف مشترک هستند از لحاظ آماری در سطح پنج درصد اختلاف معنی‌دار ندارند.

I0، I1، I2 و I3 به ترتیب تیمار آبیاری ۱۰۰ درصد نیاز آبی، ۸۰ درصد نیاز آبی، ۶۰ درصد نیاز آبی و ۴۰ درصد نیاز آبی و C0، C1، C2، C3، C4 و C5 به‌ترتیب بدون محلول‌پاشی، محلول‌پاشی با غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر، محلول‌پاشی با غلظت ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر، محلول‌پاشی با غلظت ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر، محلول‌پاشی با غلظت ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر و محلول‌پاشی با غلظت ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات سیلیس می‌باشند.

در تمام تیمارهای آبیاری محلول‌پاشی با نانوذرات سیلیس منجر به افزایش معنی‌دار ارتفاع گیاه شد اما روند افزایش ارتفاع گیاه در تیمارهای مختلف آبیاری با یکدیگر متفاوت بود. در تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی، ارتفاع گیاه در غلظت‌های ۲۰۰ تا ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات تفاوت معنی‌داری نداشت. با افزایش غلظت نانوذرات به ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر بیش‌ترین ارتفاع گیاه

www.SID.ir

Archive of SID

اتفاق افتاد. در تیمار ۸۰ درصد نیاز آبی، بیش‌ترین ارتفاع گیاه در غلظت‌های ۳۰۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات اتفاق افتاد و بین غلظت‌های مذکور تفاوت معنی‌داری وجود نداشت. این روند در تیمار ۶۰ درصد نیاز آبی نیز مشاهده گردید. در تیمار ۴۰ درصد نیاز آبی نیز مشابه تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی، بیش‌ترین ارتفاع گیاه در غلظت ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات سیلیس مشاهده گردید. همچنین نتایج نشان داد که ارتفاع گیاه در این تیمار با ارتفاع گیاه در تیمار آبیاری ۶۰ درصد نیاز آبی و عدم محلول‌پاشی (I_2C_0) تفاوت معنی‌داری نداشت. این موضوع نشان می‌دهد که در این شرایط با وجود اعمال تنش خشکی بیش‌تر به گیاه، ارتفاع آن کاهش نیافته است. دلیل آن تأثیر محلول‌پاشی با نانوذرات سیلیس بوده که باعث شده مقاومت گیاه در برابر تنش خشکی افزایش یابد. کاربرد نانوذرات سیلیس باعث کاهش تعرق از طریق کاهش هدایت روزنه‌ای برگ‌ها و افزایش فعالیت‌های فتوسنتزی در برگ می‌گردد. کاهش هدایت روزنه‌ای برگ در اثر مصرف نانوذرات سیلیس می‌تواند منجر به کاهش اتلاف آب در گیاه و در نتیجه افزایش مقاومت نسبی به شرایط تنش خشکی شود. سیلیسیم همچنین باعث بهبود تعادل آبی گیاه، تقویت فعالیت سیستم دفاعی گیاه، تغییرات ساختاری در برگ، افزایش محتوای کلروفیل، بهبود فعالیت فتوسنتزی و مقاومت به تنش‌های محیطی می‌گردد (Epstein, 1994). بررسی اثر توأم تنش خشکی و محلول‌پاشی با نانوذرات سیلیس نشان داد که بیش‌ترین ارتفاع گیاه در تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی و محلول‌پاشی با غلظت ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات (۸۳/۶۷ سانتی‌متر) و کمترین مقدار آن در تیمار ۴۰ درصد نیاز آبی و محلول‌پاشی با غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر (۷۷/۳۳ سانتی‌متر) اتفاق افتاد.

عملکرد دانه

با افزایش تنش خشکی عملکرد دانه به‌طور معنی‌داری کاهش یافت به‌طوری که بیش‌ترین عملکرد دانه متعلق به تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی و به مقدار ۲۰۷۳/۵۶ کیلوگرم در هکتار و کمترین مقدار آن متعلق به تیمار ۴۰ درصد نیاز آبی و به مقدار ۱۰۸۲/۲۲ کیلوگرم در هکتار بود. میزان عملکرد دانه در تیمارهای ۸۰، ۶۰ و ۴۰ درصد نیاز آبی نسبت به تیمار شاهد (یعنی ۱۰۰ درصد نیاز آبی) به ترتیب ۱۶/۹۴، ۳۱/۶۷ و ۴۷/۸ درصد کاهش یافت. نتایج تحقیقات دیگر نیز نشان داد که تنش آب عملکرد دانه در ارزن را کاهش داد که با نتیجه به‌دست‌آمده در این پژوهش همخوانی داشت (Maqsood and Azam Ali, 2007). Davoody *et al.* (2013) نیز نشان دادند که کم‌آبیاری به‌طور معنی‌داری عملکرد دانه ارزن را کاهش داد. کاهش عملکرد دانه عمدتاً از طریق کاهش تعداد خوشه در مترمربع و تعداد دانه در خوشه و وزن هزار دانه ایجاد شد. دلیل آن این است که تنش خشکی در مرحله رشد رویشی منجر به کاهش سطح برگ و در نتیجه مقدار فتوسنتز می‌شود و در مرحله رشد زایشی با کاهش طول دوره پرشدن دانه (جدول ۵) و اختلال در انتقال مواد به دانه باعث کاهش عملکرد دانه می‌گردد (Alizadeh *et al.*, 2007). کاهش عملکرد دانه تحت تأثیر تنش خشکی توسط محققین دیگری نیز گزارش شده است (Khokhar *et al.*, 2012).

در یک تیمار آبیاری مشخص (مثلاً تیمار ۱۰۰ نیاز آبی)، با افزایش غلظت نانوذرات سیلیس، عملکرد دانه به‌طور معنی‌داری افزایش پیدا کرد (شکل ۲) به‌طوری که عملکرد دانه در تیمار محلول‌پاشی با غلظت ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات سیلیس در مقایسه با تیمارهای ۴۰۰، ۳۰۰، ۲۰۰، ۱۰۰ و صفر میلی‌گرم در لیتر غلظت نانوذرات به ترتیب ۴/۵۴، ۶/۱۳، ۱۰/۸۶، ۱۲/۶۳ و ۱۴/۹۹ درصد افزایش نشان داد. دلیل آن افزایش رنگدانه‌های فتوسنتزی و کلروفیل سطح برگ گیاه در اثر مصرف نانوذرات سیلیس است (Sadak, 2019).

با افزایش غلظت نانوذرات سیلیس، تولید اتیلن، کلروپلاست و اسید آبسیزیک در گیاه افزایش یافته و جذب بیش‌تر مواد مغذی توسط گیاه افزایش عملکرد دانه را به همراه خواهد داشت (Ghassemi Golezani *et al.*, 2012). در پژوهشی دیگر نیز مشخص گردید که محلول‌پاشی با نانوذرات سیلیس عملکرد دانه را به میزان ۳۷ درصد نسبت به تیمار بدون محلول‌پاشی (تیمار شاهد) در شرایط تنش خشکی افزایش داد (Abdul Qados and Moftah, 2015).

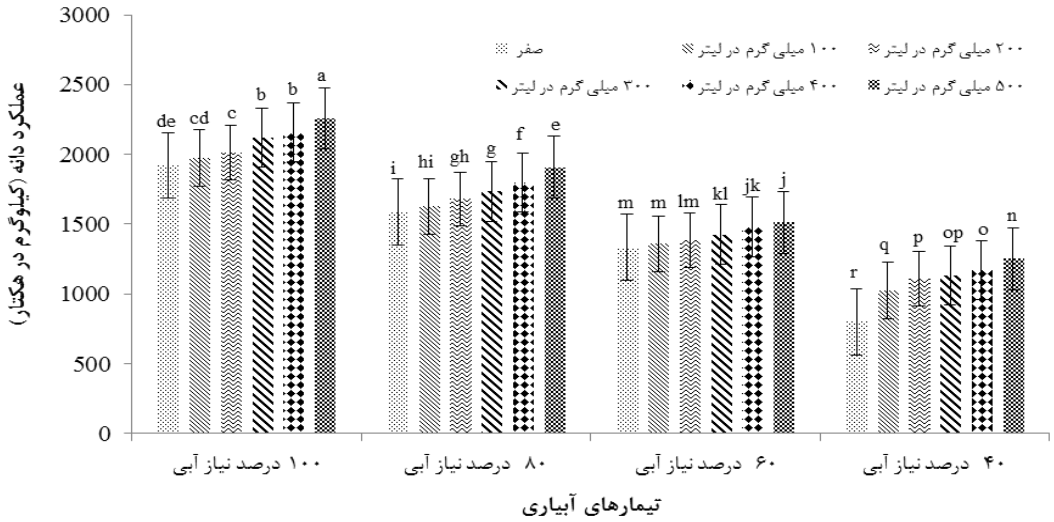
البته به این نکته نیز باید اشاره نمود که با افزایش تنش خشکی شیب افزایش عملکرد دانه در غلظت‌های مختلف نانوذرات سیلیس کمتر است. مثلاً در تیمار ۶۰ درصد نیاز آبی، افزایش عملکرد دانه در غلظت ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات در مقایسه با غلظت‌های ۴۰۰، ۳۰۰، ۲۰۰، ۱۰۰ و صفر میلی‌گرم در لیتر به ترتیب ۲/۲، ۵/۷۲، ۸/۳۶، ۱۰/۱۳ و ۱۱/۸۹ درصد بود که نسبت به درصد افزایش عملکرد دانه در غلظت‌های مشابه در تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی کمتر است. این موضوع مؤید آن است که تأثیر نانوذرات سیلیس در افزایش عملکرد دانه در تنش‌های خشکی شدیدتر کمتر است. Behboudi *et al.* (2018) نیز نشان دادند که تأثیر منفی تنش خشکی در کاهش عملکرد دانه در تیمارهایی که با غلظت‌های ۶۰ و ۹۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات کیتازون محلول‌پاشی شدند نسبت به تیمار شاهد (بدون محلول‌پاشی) کمتر بود. نقش نانوذرات در کاهش اثرات مضر تنش خشکی ممکن است به دلیل افزایش هدایت روزنه‌ای و تثبیت دی‌اکسید

www.SID.ir

Archive of SID

کربن برای انجام فتوسنتز تحت شرایط خشکی باشد (Khan *et al.*, 2002). همچنین نانوذرات قادرند که مقاومت برگ در برابر خروج بخار آب را افزایش دهند که در نتیجه آن کارایی مصرف آب در گیاه بهبود یافته و عملکرد دانه و بیولوژیک افزایش می‌یابد (Tambussi *et al.*, 2007).

با توجه به شکل (۲) مشخص می‌شود که بیش‌ترین عملکرد دانه متعلق به تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی و محلول‌پاشی ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات سیلیس و کمترین مقدار آن متعلق به تیمار ۴۰ درصد نیاز آبی و بدون محلول‌پاشی نانوذرات سیلیس است. در تمام تیمارهای آبیاری استفاده از غلظت ۵۰۰ میلی‌گرم نانوذرات سیلیس باعث افزایش معنی‌داری در عملکرد دانه ارزن نسبت به تیمار شاهد گردیده است. با افزایش تنش خشکی، افزایش غلظت نانوذرات سیلیس تأثیر کمتری در افزایش عملکرد دانه داشت. عملکرد دانه در تیمار ۸۰ درصد نیاز آبی و استفاده از غلظت ۵۰۰ میلی‌گرم نانوذرات سیلیس تفاوت معنی‌داری با عملکرد دانه در تیمار شاهد نداشت. این مطلب بیان‌گر آن است که افزایش غلظت نانوذرات سیلیس، اثر تنش خشکی در کاهش عملکرد دانه را کاهش داده است به عبارتی دیگر محلول‌پاشی با نانوذرات سیلیس مقاومت گیاه به تنش خشکی را افزایش داده است. یکی از اثرات تنش خشکی برهم زدن تعادل تغذیه‌ای در گیاه است. با تکمیل مصرف عناصر غذایی کم‌مصرف از طریق محلول‌پاشی، می‌توان وضعیت رشد گیاه را در شرایط تنش بهبود بخشید (Paygzar *et al.*, 2009). Paygzar *et al.* (2009) نیز گزارش کردند که بالاترین عملکرد علوفه تازه و علوفه خشک ارزن مرواریدی از تیمار بدون تنش آبی همراه با محلول‌پاشی عناصر روی و منگنز حاصل شد.



شکل ۲- اثر متقابل تیمارهای آبیاری و محلول‌پاشی با غلظت‌های مختلف نانوذرات سیلیس بر عملکرد دانه

عملکرد کاه

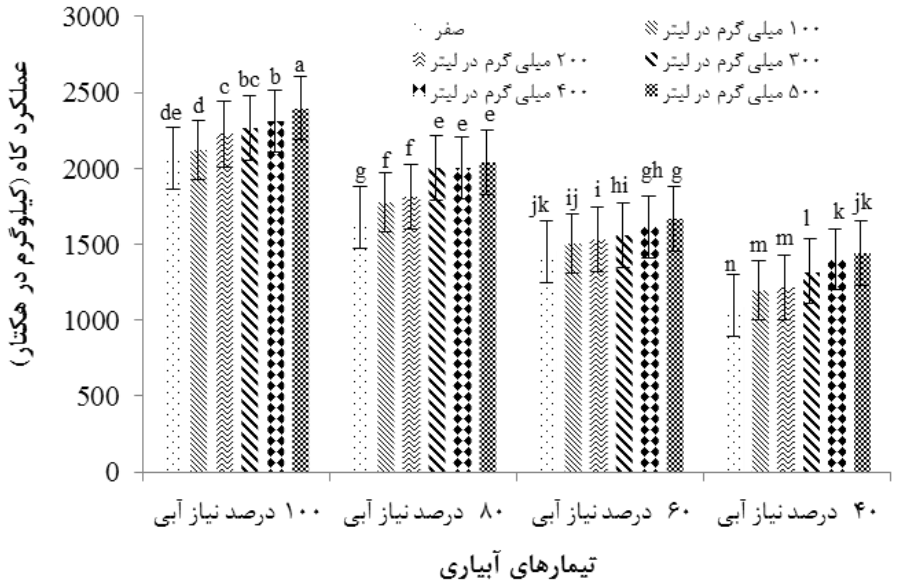
نتایج مقایسه میانگین عملکرد کاه در تیمارهای مختلف آبیاری نشان داد که کم‌آبیاری اثر معنی‌داری بر کاهش عملکرد کاه داشت. کاهش عملکرد کاه در تیمارهای کم‌آبیاری ۸۰، ۶۰ و ۴۰ درصد نیاز آبی نسبت تیمار آبیاری کامل به ترتیب ۱۵/۵۶، ۳۰/۲۶ و ۴۲/۷۳ درصد بود. اثرات بازدارنده تنش خشکی بر برخی از فعالیت‌های متابولیکی در اندام‌های گیاهی از جمله سیتوپلاسم را که منجر به از دست دادن آب سلول و کوچک ماندن اندام‌های گیاهی و همچنین ایجاد اختلال در تشکیل کلروپلاست و فرآیند فتوسنتز گیاه می‌گردد را می‌توان دلیلی بر کاهش عملکرد کاه در اثر تنش خشکی عنوان نمود (Ghassemi Golezani *et al.*, 2012).

همچنین نتایج نشان داد که عملکرد کاه در تیمار ۸۰ درصد نیاز آبی و محلول‌پاشی با غلظت ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات با عملکرد کاه در تیمار شاهد (یعنی تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی و بدون محلول‌پاشی) تفاوت معنی‌داری نداشت (شکل ۳). البته این روند در تیمارهای ۶۰ و ۴۰ درصد نیاز آبی نیز مشاهده گردید. به‌عنوان مثال عملکرد کاه در تیمار ۶۰ درصد نیاز آبی و محلول‌پاشی با غلظت ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات با عملکرد کاه در تیمار ۸۰ درصد نیاز آبی و بدون محلول‌پاشی تفاوت معنی‌داری نداشت. به عبارت دیگر می‌توان گفت که محلول‌پاشی با غلظت ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات سیلیس، کاهش عملکرد کاه در ازای افزایش ۲۰ درصد تنش آبی را جبران می‌کند. این مطلب مؤید آن است که محلول‌پاشی با غلظت ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات ضمن افزایش مقاومت گیاه به تنش

www.SID.ir

Archive of SID

خشکی از کاهش معنی‌دار عملکرد کاه جلوگیری می‌نماید.



شکل ۳- اثر متقابل تیمارهای آبیاری و محلول‌پاشی با غلظت‌های مختلف نانوذرات سیلیس بر عملکرد کاه

عملکرد بیولوژیک

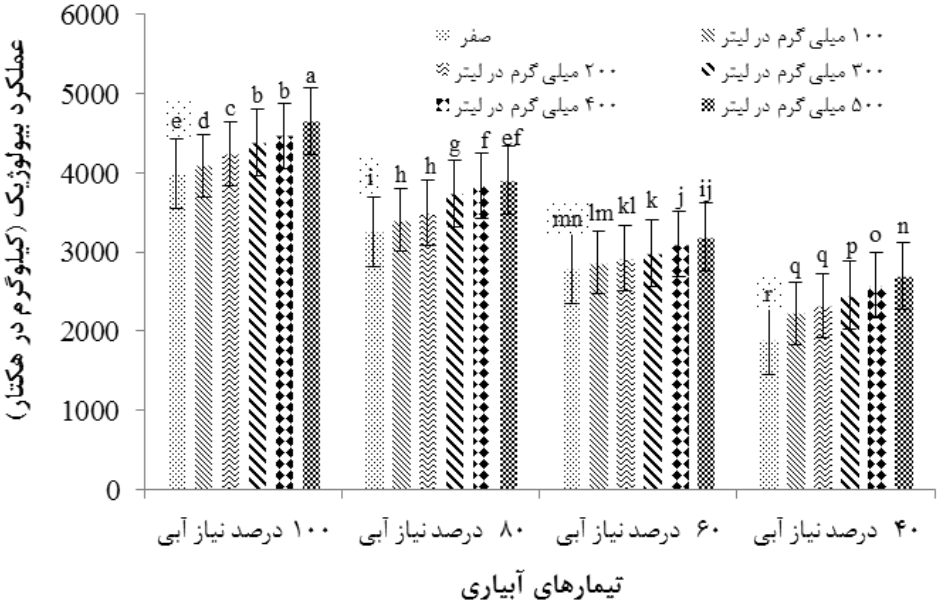
به مجموع عملکرد دانه و عملکرد کاه، عملکرد بیولوژیک گفته می‌شود. از آنجایی که با اعمال ۲۰ درصد کم‌آبیاری (یعنی تیمار ۸۰ درصد نیاز آبی)، عملکرد بیولوژیک نسبت به تیمار شاهد (یعنی تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی و بدون محلول‌پاشی) به‌طور معنی‌داری کاهش یافت، نتیجه می‌گردد که ارزن دانه‌ای گیاهی حساس به کم‌آبی بوده و در صورتی که نیاز آبی گیاه به‌طور کامل تأمین نگردد کاهش محسوسی در عملکرد این گیاه رخ می‌دهد. از طرفی در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند منطقه موردمطالعه دسترسی به منابع آبی محدود بوده و کشاورزان اغلب کم‌آبیاری انجام می‌دهند. بنابراین کاهش محصول امری حتمی خواهد بود. به‌منظور جلوگیری از کاهش معنی‌دار عملکرد بیولوژیک باید به دنبال راهکاری برای افزایش مقاومت گیاه به خشکی بود. نتایج نشان داد که با محلول‌پاشی نانوذرات سیلیس در مرحله پنجه‌زنی و تشکیل گل‌آذین می‌توان تا حدودی از کاهش محصول ناشی از کم‌آبی جلوگیری نمود به‌طوری که عملکرد بیولوژیک در تیمار ۸۰ درصد نیاز آبی و محلول‌پاشی با غلظت ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات سیلیس تفاوت معنی‌داری با عملکرد بیولوژیک در تیمار شاهد نداشت. این موضوع بیانگر آن است که محلول‌پاشی با نانوذرات سیلیس منجر به افزایش مقاومت گیاه به تنش کم‌آبی شده است. برخی از مستندات موجود حاکی از آن است که نانوذرات سیلیس با شرکت در فرآیند تنظیم اسمزی باعث افزایش مقاومت گیاه به تنش خشکی می‌گردد (Kaya *et al*., 2006).

مقایسه میانگین اثر متقابل تنش خشکی و استفاده از نانوذرات سیلیس نشان داد که در تمام تیمارهای کم‌آبیاری، با افزایش غلظت نانوذرات سیلیس از ۱۰۰ به ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر عملکرد بیولوژیک به‌طور معنی‌دار افزایش پیدا کرد (شکل ۳). با توجه به شکل (۴) مشخص می‌شود که بیش‌ترین عملکرد بیولوژیک در تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی و محلول‌پاشی با غلظت ۵۰۰ میلی‌گرم نانوذرات و کمترین مقدار آن در تیمار ۴۰ درصد نیاز آبی و بدون محلول‌پاشی اتفاق افتاد. مقدار عملکرد بیولوژیک در تیمارهای ۸۰، ۶۰ و ۴۰ درصد نیاز آبی و در شرایط عدم استفاده از محلول‌پاشی با نانوذرات سیلیس در مقایسه با تیمار شاهد به ترتیب ۱۸/۳۸، ۳۰/۱ و ۵۲/۵ درصد کاهش یافت این در حالی است که اگر در همین شرایط تیمارهای کم‌آبیاری با ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات سیلیس محلول‌پاشی شوند درصد کاهش عملکرد بیولوژیک در آن‌ها نسبت به تیمار شاهد به ترتیب ۲، ۲۰ و ۳۲/۴۳ درصد خواهد بود که در مقایسه با مقادیر قبلی کاهش چشمگیری را نشان می‌دهد. این مطلب نیز گواهی بر افزایش مقاومت به تنش خشکی گیاه ارزن در شرایط استفاده از محلول‌پاشی با نانوذرات سیلیس است. به‌طور کلی محلول‌پاشی با نانوذرات سیلیس باعث افزایش جذب پتاسیم و کاهش جذب سدیم توسط گیاه می‌گردد که می‌تواند مکانیسم اصلی رشد بهتر گیاه در شرایط تنش خشکی و تولید عملکرد بیولوژیک بیش‌تر گیاه در این شرایط باشد (Al-Aghabary *et al*., 2004). البته به این نکته نیز باید توجه داشت که مقدار ۲ درصد کاهش عملکرد بیولوژیک در تیمار ۸۰ درصد نیاز آبی در مقایسه با کاهش ۳۲/۴۳ درصدی آن در تیمار ۴۰ درصد نیاز آبی نشان می‌دهد که با

www.SID.ir

Archive of SID

افزایش تنش خشکی میزان تأثیرپذیری نانوذرات سیلیس در جلوگیری از کاهش عملکرد بیولوژیک کمتر می‌شود. از سوی دیگر نتایج همچنین نشان می‌دهد که در شرایط بدون تنش آبی هم استفاده از محلول‌پاشی با نانوذرات سیلیس منجر به افزایش معنی‌دار عملکرد بیولوژیک در ارزن دانه‌ای می‌گردد به‌طوری که محلول‌پاشی با غلظت‌های ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات به‌ترتیب باعث افزایش ۲/۶۸، ۶/۳۷، ۱۰، ۱۲/۰۴ و ۱۶/۷۳ درصدی عملکرد بیولوژیک نسبت به تیمار شاهد گردید.



شکل ۴- اثر متقابل تیمارهای آبیاری و محلول‌پاشی با غلظت‌های مختلف نانوذرات سیلیس بر عملکرد بیولوژیک

تعداد پانیکول در هر بوته

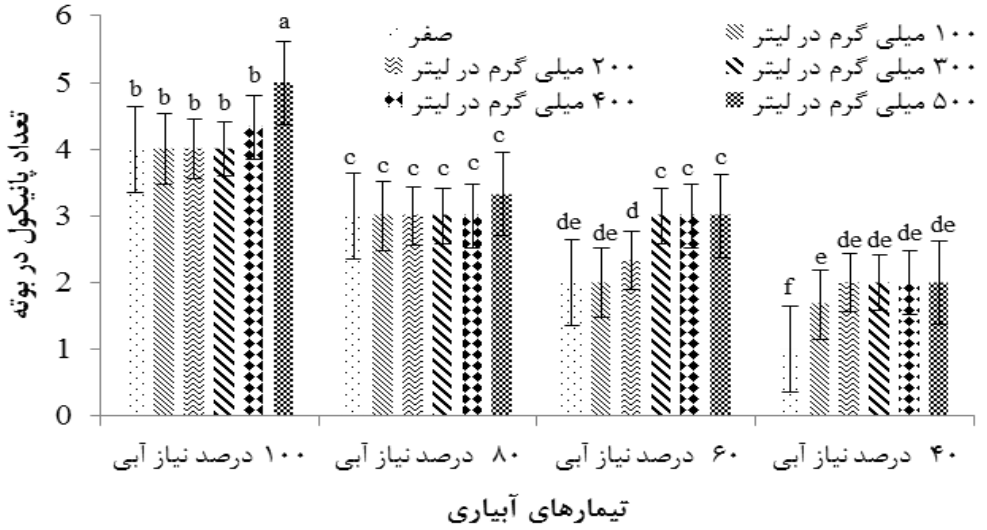
نتایج جدول تجزیه واریانس نشان داد که اثر تنش خشکی، محلول‌پاشی با نانوذرات سیلیس و اثر متقابل تنش خشکی و محلول‌پاشی با نانوذرات سیلیس بر تعداد پانیکول در هر بوته در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. در شرایطی که تنش خشکی بدون استفاده از محلول‌پاشی با نانوذرات سیلیس اعمال گردد، بیش‌ترین تعداد پانیکول در تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی و به تعداد چهار عدد و کمترین مقدار آن در تیمار ۴۰ درصد نیاز آبی و به تعداد یک عدد مشاهده شد که این نتیجه حاکی از کاهش معنی‌دار تعداد پانیکول در اثر اعمال تنش خشکی بود. اثر محلول-پاشی با غلظت‌های مختلف نانوذرات سیلیس بر تعداد پانیکول، در تیمارهای آبیاری متفاوت بود به‌طوری که در تیمار آبیاری کامل (یعنی ۱۰۰ درصد نیاز آبی)، افزایش نانوذرات سیلیس تا ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر تأثیری در افزایش معنی‌دار تعداد پانیکول نداشت اما با افزایش غلظت نانوذرات از ۴۰۰ به ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر، تعداد پانیکول در هر گیاه به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. در تیمار آبیاری ۸۰ درصد نیاز آبی، تمام غلظت‌های نانوذرات سیلیس (یعنی از ۱۰۰ تا ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر) تأثیری در افزایش معنی‌دار تعداد پانیکول در هر گیاه نداشتند. در تیمار ۶۰ درصد نیاز آبی افزایش غلظت نانوذرات تا ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر تأثیر معنی‌داری در افزایش تعداد پانیکول نداشت اما با تغییر غلظت نانوذرات از ۲۰۰ به ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر تعداد پانیکول به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. در این تیمار آبیاری غلظت‌های ۳۰۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات اثر مشابهی در افزایش تعداد پانیکول داشتند و تفاوت بین آن‌ها معنی‌دار نبود. در تیمار ۴۰ درصد نیاز آبی نیز اثر غلظت‌های مختلف نانوذرات بر افزایش تعداد پانیکول در هر گیاه مشابه بود و همه غلظت‌های استفاده‌شده باعث افزایش معنی‌دار تعداد پانیکول نسبت به تیمار بدون استفاده از محلول‌پاشی شدند. Abdul Qados and Moftah, (2015) نیز نشان دادند که محلول‌پاشی با نانوذرات سیلیس منجر به افزایش ۷۰ درصدی تعداد پانیکول در هر بوته نسبت به تیمار شاهد (بدون محلول‌پاشی) در شرایط تنش خشکی گردید.

در شرایط همزمان تنش خشکی و استفاده از محلول‌پاشی، بیش‌ترین تعداد پانیکول مربوط به تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی و غلظت ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات و به تعداد پنج عدد بود (شکل ۵). مقایسه میانگین تعداد پانیکول در تیمارهای مختلف

www.SID.ir

Archive of SID

نشان داد که بین تعداد پانیکول در تیمار ۸۰ درصد نیاز آبی و همه غلظت‌های نانوذرات سیلیس با تعداد آن در تیمار ۶۰ درصد نیاز آبی و غلظت‌های ۳۰۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر، تفاوت معنی‌داری وجود نداشت. این مطلب مؤید آن است که با وجود تنش خشکی بیش‌تر در تیمار ۶۰ درصد نیاز آبی نسبت به تیمار ۸۰ درصد، به علت استفاده از محلول‌پاشی با نانوذرات سیلیس، اثر تنش خشکی در کاهش تعداد پانیکول خنثی شده است.



شکل ۵- اثر متقابل تیمارهای آبیاری و محلول‌پاشی با غلظت‌های مختلف نانوذرات سیلیس بر تعداد پانیکول در هر بوته

وزن هزار دانه

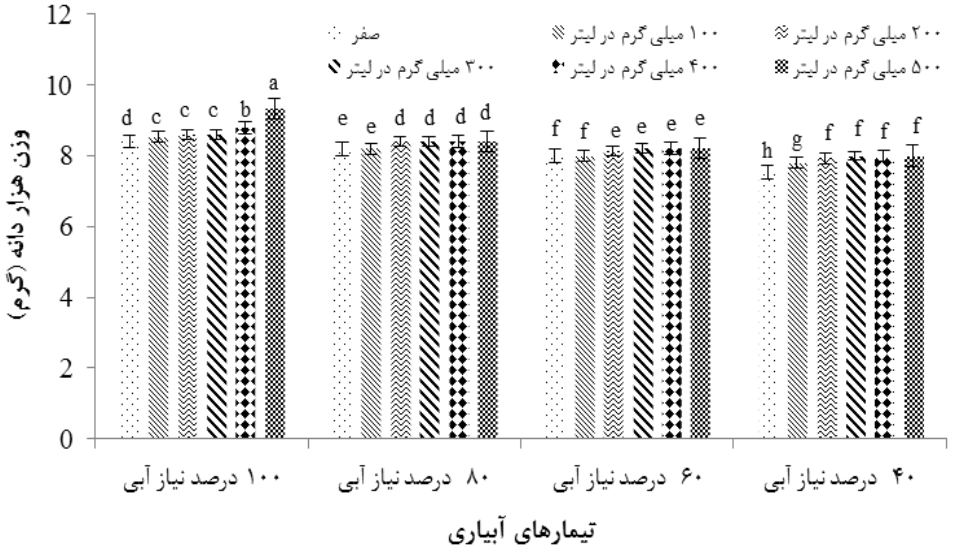
در شرایط عدم استفاده از محلول‌پاشی با نانوذرات سیلیس، بیش‌ترین وزن هزار دانه با مقدار ۸/۴ گرم متعلق به تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی و کمترین آن با مقدار ۷/۵۳ گرم متعلق به تیمار ۴۰ درصد نیاز آبی بود. در این شرایط کاهش معنی‌دار وزن هزار دانه در تیمارهای کم‌آبیاری ۸۰، ۶۰ و ۴۰ درصد نسبت به تیمار آبیاری کامل به ترتیب ۲/۳۸، ۴/۷۶ و ۱۰/۷۱ درصد بود. Davoody *et al*. (2013) نیز نشان دادند که وزن هزاردانه ارزن در تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی از تیمار ۵۰ درصد نیاز آبی بیش‌تر بود که با نتیجه به‌دست‌آمده در این پژوهش همخوانی داشت. وقتی‌که گیاه در معرض تنش خشکی قرار می‌گیرد، برای فرار از خشکی طول دوره پرشدن دانه را کوتاه می‌کند که این منجر به کاهش نهایی وزن دانه‌ها می‌گردد (Fredrick *et al*., 1990). نتیجه تحقیقات پژوهشگران دیگر نیز حاکی از کاهش وزن هزار دانه در اثر تنش خشکی است (Abdoli and Saeidi, 2012). کاهش وزن هزار دانه در شرایط تنش خشکی به دلیل جذب کمتر آب و مواد مغذی توسط گیاه در طول دوره پرشدن دانه‌ها صورت می‌گیرد. محلول‌پاشی با غلظت ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات سیلیس در تمام تیمارهای کم‌آبیاری باعث افزایش معنی‌دار وزن هزار دانه نسبت به تیمار بدون محلول‌پاشی در آن‌ها گردید. اما افزایش غلظت نانوذرات از ۲۰۰ تا ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر، تأثیری در افزایش معنی‌دار وزن هزار دانه در این تیمارها نداشت. Behboudi *et al*. (2018) نیز نشان دادند که استفاده از محلول‌پاشی نانوذرات منجر به افزایش معنی‌دار وزن هزار دانه گردید. در پژوهشی دیگر نیز مشخص گردید که استفاده از محلول‌پاشی با نانوذرات سیلیس باعث افزایش ۱۰ درصدی در وزن هزار دانه گردید (Abdul Qados and Moftah, 2015).

بر خلاف تیمارهای کم‌آبیاری در تیمار آبیاری کامل، تغییر غلظت نانوذرات از ۳۰۰ به ۴۰۰ و از ۴۰۰ به ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر، افزایش معنی‌داری را در وزن هزار دانه ایجاد نمود. نتایج همچنین نشان داد که بین وزن هزار دانه در تیمار شاهد و تیمار ۸۰ درصد نیاز آبی و محلول‌پاشی با غلظت ۲۰۰ تا ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات سیلیس، تفاوت معنی‌داری وجود نداشت (شکل ۶). بنابراین در شرایط اعمال کم‌آبیاری، با مصرف نانوذرات سیلیس به‌صورت محلول‌پاشی در مرحله پنجه‌زنی و گلدهی گیاه ارزن دانه‌ای می‌توان از کاهش وزن هزار دانه گیاه جلوگیری نمود. البته تعیین غلظت بهینه نانوذرات سیلیس جهت محلول‌پاشی، در هر شرایط آب و هوایی و هر منطقه خاص باید به‌صورت جداگانه مورد مطالعه قرار گیرد. از آن جایی که در پژوهش حاضر، عملکرد دانه، کاه و بیولوژیک محصول در تیمار ۸۰ درصد نیاز آبی و محلول‌پاشی با غلظت ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات سیلیس تفاوت معنی‌داری با تیمار شاهد نداشت لذا می‌توان گفت که در منطقه کاشمر در شرایط اعمال کم‌آبیاری به میزان ۲۰ درصد نسبت به آبیاری کامل، حد بهینه غلظت نانوذرات سیلیس جهت

www.SID.ir

Archive of SID

جلوگیری از کاهش معنی‌دار عملکرد و اجزای آن در ارزن دانه‌ای، ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر است.



شکل ۶- اثر متقابل تیمارهای آبیاری و محلول‌پاشی با غلظت‌های مختلف نانوذرات سیلیس بر وزن هزار دانه

شاخص برداشت

شاخص برداشت از تقسیم عملکرد دانه به عملکرد بیولوژیک به‌دست می‌آید. مقایسه میانگین شاخص برداشت در تیمارهای آبیاری و در شرایط استفاده نکردن از محلول‌پاشی با نانوذرات سیلیس نشان داد که این شاخص در تیمارهای آبیاری ۱۰۰، ۸۰ و ۶۰ درصد نیاز آبی تفاوت معنی‌داری نداشت و نسبت به تیمار آبیاری ۴۰ درصد نیاز آبی بیش‌تر بود (جدول ۷). Kobraee *et al*. (2011) نیز در مطالعه خود کاهش معنی‌دار شاخص برداشت در شرایط کمبود آب را گزارش کردند. آن‌ها در مطالعه خود دریافتند که تنش کمبود آب باعث کاهش معنی‌دار شاخص برداشت گردید ولی استفاده از نانوذرات سیلیس در این شرایط شاخص برداشت را به‌طور معنی‌داری افزایش داد. این نتیجه با یافته‌های این پژوهش همخوانی داشت.

در تیمارهای ۱۰۰، ۸۰ و ۶۰ درصد نیاز آبی استفاده از محلول‌پاشی با نانوذرات سیلیس تأثیری در افزایش معنی‌دار شاخص برداشت نسبت به شرایط بدون محلول‌پاشی نداشت. اما در تیمار ۴۰ درصد نیاز آبی، محلول‌پاشی با نانوذرات سیلیس شاخص برداشت را نسبت به شرایط بدون محلول‌پاشی در این تیمار به‌طور معنی‌داری افزایش داد. البته بین غلظت‌های مختلف نانوذرات در این تیمار، تفاوت معنی‌داری در افزایش شاخص برداشت وجود نداشت. کمترین شاخص برداشت مربوط به تیمار ۴۰ درصد نیاز آبی و بدون محلول‌پاشی و به مقدار ۴۲/۱۳ درصد بود. شاخص برداشت در تیمار ۶۰ درصد نیاز آبی و بدون محلول‌پاشی با مقدار این شاخص در تیمار ۴۰ درصد نیاز آبی و محلول‌پاشی با غلظت‌های مختلف تفاوت معنی‌داری نداشت (جدول ۷).

بهره‌وری آب

با اعمال کم‌آبیاری در تیمارهای بدون محلول‌پاشی با نانوذرات سیلیس، بهره‌وری آب به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. بیش‌ترین بهره‌وری آب مربوط به تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی و به مقدار ۰/۷۱ کیلوگرم بر مترمکعب و کمترین مقدار آن مربوط به تیمار ۴۰ درصد نیاز آبی و به مقدار ۰/۵۳ کیلوگرم بر مترمکعب بود (جدول ۷). Davoody *et al*. (2013) نیز نشان داد که بهره‌وری آب ارزن در تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی بیش‌تر از تیمار ۵۰ درصد نیاز آبی بود. با توجه به مقایسه میانگین داده‌ها می‌توان استنباط نمود که تأثیر کم‌آبی بر تولید دانه بیش‌تر از تأثیر آن بر تولید عملکرد بیولوژیک بوده است و به همین دلیل نیز بهره‌وری آب برای عملکرد دانه نیز بر اثر تنش خشکی کاهش یافت، زیرا میزان کاهش عملکرد دانه بر اثر تنش بیش‌تر از کاهش مصرف آب بوده است.

در تمام تیمارهای آبیاری محلول‌پاشی با غلظت‌های مختلف نانوذرات سیلیس باعث افزایش معنی‌دار بهره‌وری آب گردید. در تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی بیش‌ترین بهره‌وری آب در محلول‌پاشی با غلظت ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات سیلیس به‌دست آمد. در تیمار ۸۰ درصد نیاز آبی تغییر غلظت نانوذرات از ۲۰۰ به ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر باعث افزایش معنی‌دار بهره‌وری آب نسبت

www.SID.ir

Archive of SID

به تیمار بدون محلول‌پاشی شد اما از غلظت ۳۰۰ تا ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر افزایش معنی‌داری در بهره‌وری آب اتفاق نیفتاد. در تیمار ۶۰ درصد نیاز آبی، محلول‌پاشی با غلظت ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات سیلیس باعث افزایش معنی‌دار بهره‌وری آب نسبت به شرایط بدون محلول‌پاشی گردید. اما بین غلظت‌های ۳۰۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر تفاوت معنی‌داری وجود نداشت. در تیمار ۴۰ درصد نیاز آبی مشابه تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی، محلول‌پاشی با غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات باعث افزایش معنی‌دار بهره‌وری آب نسبت به شرایط بدون محلول‌پاشی گردید. اما بین تیمارهای ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر تفاوت معنی‌داری وجود نداشت. این نشان می‌دهد که تأثیر نانوذرات سیلیس در افزایش بهره‌وری آب در شرایط بدون تنش خشکی (I_0) و یا تنش خشکی (I_3) شدید نسبت به شرایطی که تنش خشکی نسبتاً کم (I_1) تا متوسط (I_2) است، بیش‌تر است. به عبارتی در شرایطی که گیاه با تنش خشکی شدید مواجه می‌شود (مشابه شرایط دیم) با مصرف اندک نانوذرات سیلیس به‌صورت محلول‌پاشی در مرحله پنجه‌زنی و گلدهی می‌توان بهره‌وری آب را به‌طور معنی‌داری افزایش داد. نتایج پژوهشی دیگر نیز نشان داد که استفاده از نانوذرات سیلیس منجر به افزایش بهره‌وری آب گیاه تحت شرایط تنش خشکی گردید که دلیل آن ممکن است به نقش نانوذرات سیلیس در فعالیت آنزیم‌ها و فرآیندهای بیوشیمیایی در بافت‌های گیاهی مربوط باشد (Parveen and Ashraf, 2010).

بررسی مقایسه میانگین اثر متقابل تیمارهای آبیاری و محلول‌پاشی با نانوذرات سیلیس نشان داد که بیش‌ترین بهره‌وری آب در تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی و محلول‌پاشی با غلظت ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات و به مقدار ۰/۸۹ کیلوگرم بر مترمکعب و کمترین مقدار آن در تیمار ۴۰ درصد نیاز آبی و محلول‌پاشی با غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات سیلیس و به مقدار ۰/۵۵ کیلوگرم بر مترمکعب به‌دست آمد (جدول ۷).

نتیجه‌گیری

یافته‌های به‌دست‌آمده در این پژوهش حاکی از آن است که کم-آبیاری باعث کاهش عملکرد دانه و بهره‌وری آب ارزن نسبت به شرایطی که نیاز آبی گیاه به‌طور کامل تأمین شود، می‌گردد. اما محلول‌پاشی با نانوذرات سیلیس در مرحله پنجه‌زنی و گلدهی می‌تواند تا حدودی اثرات مخرب تنش خشکی در کاهش عملکرد و بهره‌وری آب را خنثی نماید. به‌طوری که محلول‌پاشی با غلظت-های بالای نانوذرات سیلیس قادر است کاهش عملکردی را که در اثر ۲۰ درصد تنش خشکی ایجاد می‌شود، جبران نماید. بنابراین با توجه به نتایج به‌دست‌آمده در این پژوهش می‌توان گفت که برای منطقه خشکی مانند کاشمر که مصرف کمتر آب در کاشت ارزن دانه‌ای حتی به‌اندازه ۲۰ درصد می‌تواند کمک شایانی به جبران کسری مخزن آب زیرزمینی در این منطقه نماید، آبیاری با ۸۰ درصد نیاز آبی ارزن و محلول‌پاشی با غلظت ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات سیلیس در مرحله پنجه‌زنی و گلدهی ارزن دانه‌ای قابل توصیه است.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCES

Abdoli, M. and Saeidi, M. (2012). Using different indices for selection of resistance wheat cultivars to post anthesis water deficit in the west of Iran. Annals of Biological Research. 3(3), 1322-1333.

Abdul Qados, A. M. S. and Moftah, A. E. (2015). Influence of silicon and nano-silicon on germination, growth and yield of faba bean (*Vicia faba* L.) under salt stress conditions. American Journal of Experimental Agriculture. 5(6), 509-524.

Al-Aghabary, K., Zhu, Z. and Shi, Q. H. (2004). Influence of silicon supply on chlorophyll content, chlorophyll fluorescence, and antioxidative enzyme activities in tomato plants under salt stress. Journal of Plant Nutition. 27, 2101-2115.

Alizadeh, O., Majidi, I., Nadian, H., Nour-Mohammadi, G. and Amerian, M. (2007). Effect of water stress and nitrogen rates on yield and components of Maize (Zea mays L.). Journal of Agricultural Sciences. 13(2), 427-434. (In Farsi).

Behboudi, F., Tahmasebi Sarvestani, Z., Kassaee, M. Z., Modares Sanavi, S. A. M., Sorooshzadeh, A. and Ahmadi, S. B. (2018). Evaluation of chitosan nanoparticles effects on yield and yield components of barley (*Hordeum vulgare L.*) under late season drought stress. Journal of Water and Environment Technology. 3(1), 22-39.

Das, R., Kiley, P. J., Segal, M., Norville, J., Amy Yu, A., Wang, L., Trammell, S. A., Reddick, L. E., Kumar, R., Stellacci, F., Lebedev, N., Schnur, J., Bruce, B. D., Zhang, S. and Baldo, M. (2004). Integration of photosynthesic protein molecular complexes in solid-state electronic devices. Nano Lett. 4(6), 1079-1083.

Davoody, N., Seghatoleslami, M. J., Mousavi, G. R. and 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 Farsi).

Epstein, E. (1994). The Anomaly of Silicon in Plant Biology. Proceedings of the National Academy of

www.SID.ir

Archive of SID

Sciences of the United States of America. pp. 11-17.

Fredrick, J. R., Below, F. E. and Hesketh, J. D. (1990). Carbohydrate, nitrogen and dry matter accumulation and partitioning of maize hybrids under drought stress. Annals of Botany Journal. 66, 407-415.

Gao, X., Zou, C., Wang, L. and Zhang, F. (2006). Silicon decreases transpiration rate and conductance from stomata of maize plants. Journal of Plant Nutrition. 29, 1637-1647.

Ghassemi-Golezani, K., Nikpour-Rashidabad, N. and Zehtab-Salmasi, S. (2012). Physiological performance of pinto bean cultivars under salinity. International Journal of Plant, Animal and Environmental Science. 2, 223-228.

Hossain, M. T., Soga, K., Wakabayashi, K., Kamisaka, S., Fujii, S., Yamamoto, R. and Takayuki, H. (2007). Modification of chemical properties of cell walls by silicon and its role in regulation of the cell wall extensibility in oat leaves. Journal of Plant Physiology. 164, 385-393.

Kamenidou, S., Cavins, T. J. and Marek, S. (2010). Silicon supplements affect floricultural quality traits and elemental nutrient concentrations of greenhouse produced gerbera. Science Horticulture. 123, 390-394.

Kaya, C., Tuna, L. and Higgs, D. (2006). Effect of silicon on plant growth and mineral nutrition of maize grown under water stress conditions. Journal of Plant Nutrition. 29, 1469-1480.

Khan, W. M., Prithiviraj, B. and Smith, D. L. (2002). Effect of foliar application of chitin and chitosan oligosaccharides on photosynthesis of maize and soybean. Photosynthetica. 40(4), 621-624.

Khokhar, M. I., Silva, J. T. and Spiertz, H. (2012). Evaluation of barley genotypes for yielding ability and drought tolerance under irrigated and water-stressed conditions. American-Eurasian Journal of Agricultural and Environmental Sciences. 12(3), 287-292.

Kobraee, S., Shamsi, K. and Rasekhi, B. (2011). Soybean production under water deficit conditions. Annals of Biological Research. 2(2), 423-434.

Laware, S. L. and Raskar, S. (2014). Influence of zinc oxide nanoparticles on growth, flowering and seed productivity in onion. International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences. 3(7), 874-881.

Liang, Y. C., Wong, J. W. and Long, W. (2005). Silicon-mediated enhancement of cadmium tolerance in maize (*Zea mays* L.) grown in cadmium contaminated soil. Chmosphere. 58, 475-483.

Liu, E. K., Mei, X. R., Yan, C. R., Gong, D. Z. and Zhang, Y. Q. (2015). Effects of water stress on photosynthetic characteristics, dry matter translocation and WUE in two winter wheat genotypes. Agricultural Water Management. 167, 75-85.

Lu, C. M., Zhang, C. Y., Wen, J. Q., Wu, G. R. and Tao, M. Z. (2002). Research of the effect of nanometer materials on germination and growth enhancement of glycine max and its mechanism. Soybean Science. 21(3), 168-171.

Ma, J. F. (2004). Role of silicon in enhancing the resistance of plant to biotic and abiotic stresses. Soil Science & Plant Nutrition. 50(1), 11-18.

Maqsood, M. and Azam Ali, S. N. (2007). Effects of environmental stress on growth, radiation use efficiency and yield of finger millet (*Eleucine Coracona*). Pakistan Journal of Botany. 39(2), 463-474.

Mohaghegh, P., Shirvani, M. and Ghasemi, S. (2010). Silicon application effects on yield and growth of two cucumber genotypes in hydroponics system. Journal of Science and Technology of Greenhouse Culture. 1(1), 35-40. (In Farsi).

Naderi, M. R. and Abedi, A. (2012). Application of nanotechnology in agriculture and refinement of environmental pollutants. Journal of Nanotechnology. 11(1), 18-26. (In Farsi).

Ngo, Q. B., Dao, T. H., Nguyen, H. C., Tran, X. T., Nguyen, T., Khuu, T. D. and Huynh, T. H. (2014). Effects of nanocrystalline powders (Fe, Co and Cu) on the germination, growth, crop yield and product quality of soybean (Vietnamese species DT-51). Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology. 5,1-7.

Omidi Nasab, D., Gharineh, M. H., Bakhshande, A., Sharafizade, M., Shafeinia, A. and Saghali, A. (2015). The effect of seeding rates and nitrogen fertilizer on yield and yield components of wheat cultivars in corn residue (no tillage). Iranian Journal of Field Crops Research. 13(3), 598-610. (In Farsi).

Parveen, N. and Ashraf, M. (2010). Role of silicon in mitigating the adverse effects of salt stress on growth and photosynthetic attributes of two maize (Zea mays L.) cultivars grown hydroponically. Pakistan Journal of Botany. 42(3), 1675-1684.

Paygzar, Y., Ghanbari, A., Heidari, M. and Tavassoli, A. (2009). Effect foliar of micronutrients on the quantitative and qualitative characteristics of millet under drought stress (Pennisetum glacum) species notrifed. Iranian Journal of Agriculture Science. 3(10), 67-78. (In Farsi).

Peyvandi, M., Mirza, M. and Kamali Jamakani, Z. (2011). The effect of nono Fe chelate and Fe chelate on the growth and activity of some antioxidant. New Cellular and Molecular Biotechnology. 2(5), 25-32. (In Farsi).

Prasad, T. N., Sudhakar, P., Sreenivasulu, Y., Latha, P., Munaswamy, V., Reddy, K. R., Sreeprasad, T. S., Sajanlal, P. R. and Pradeep, T. (2012). Effect of nanoscale zinc oxide particles on the germination, growth and yield of peanut. Journal of Plant Nutrition. 35, 905-927.

Sadak, M. S. (2019). Impact of silver nanoparticles on plant growth, some biochemical aspects, and yield of fenugreek plant (*Trigonella foenumgraecum*). Bulletin of the National Research center. 38-43.

Seghatoleslami, M. J., Majidi, E., Kafi, M., Noor Mohammadi, Gh., Darvish, F. and Mousavi, S.

www.SID.ir

Archive of SID

Gh. (2005). Phenological and morphological response of three millets species to deficit irrigation. Journal of Agricultural Science, Islamic Azad University. 11(3), 89-99. (In Farsi).

Tambussi, E. A., Bort, J. and Araus, J. L. (2007). Water use efficiency in C3 cereals under Mediterranean conditions: a review of physiological aspects. Annals of Applied Biology. 150(3), 307-321.

www.SID.ir