

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

MAHDI MOKARI<sup>\*1</sup>, MEYSAM ABEDINPOUR<sup>1</sup>

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.

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

مهدی مکاری<sup>۱\*</sup>، میثم عابدین پور<sup>۱</sup>

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 محلول پاشی با نانوذرات سیلیس در افزایش مقاومت به تنش خشکی در ارزن دانه‌ای بود. به این منظور پژوهشی مزرعه‌ای به صورت کرت‌های یک بار خرد شده در قالب طرح کاملاً تصادفی و در سه تکرار اجرا گردید. کرت‌های اصلی شامل چهار تیمار آبیاری تأمین ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ میلی گرم در لیتر نانوذرات سیلیس بودند. شامل شش تیمار محلول پاشی با غلظت‌های صفر، ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ میلی گرم در لیتر نانوذرات سیلیس بودند. نتایج نشان داد که کم آبیاری باعث کاهش معنی دار ارتفاع گیاه، وزن هزار دانه، عملکرد دانه، شاخص برداشت و بهره‌وری آب در سطح احتمال یک درصد گردید. از طرفی در تمام تیمارهای آبیاری محلول پاشی با نانوذرات سیلیس، عملکرد دانه، شاخص برداشت و بهره‌وری آب را به طور معنی داری افزایش داد. بیشترین عملکرد دانه، شاخص برداشت و بهره‌وری آب در تیمار آبیاری کامل (۱۰۰ درصد نیاز آبی) و محلول پاشی با غلظت ۵۰۰ میلی گرم در لیتر نانوذرات و کمترین مقدار آن‌ها در تیمار ۴۰ درصد نیاز آبی و بدون محلول پاشی مشاهده گردید. با توجه به بحران شدید منابع آبی در منطقه خشک کاشمر، تأمین ۸۰ درصد نیاز آبی ارزن دانه‌ای به همراه محلول پاشی با غلظت ۵۰۰ میلی گرم در لیتر نانوذرات سیلیس در مرحله پنجه‌زنی و گلدهی ارزن دانه‌ای، برای مقابله با بحران کم آبی در این منطقه قابل توصیه است.

**واژه‌های کلیدی:** کم آبیاری، نانوذرات سیلیس، عملکرد دانه، بهره‌وری آب.

### مقدمه

سیلیسیم دومین عنصر فراوان پوسته زمین (۳۱٪) بعد از اکسیژن (۴۹٪) است (۱۸ و ۳۹) 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 قابل جذب 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 به وسیله 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 مضر که کودهای شیمیایی در محیط زیست و کیفیت غذا ایجاد می‌کنند، مدت‌هاست که استفاده از آن‌ها مورد نکوهش قرار گرفته است. در نانو کودها به عنوان جایگزین کودهای مرسوم، عناصر غذایی کود به تدریج و به صورت کنترل شده در خاک آزاد می‌شوند و در نتیجه از بروز پدیده مردابی

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 محلول پاشی با اکسید روی معمولی و نانو اکسید روی بر هیچ یک از صفات فوق معنی دار نبود (Davoody *et al.*, 2013).

با توجه به مدیریت نامناسب منابع آبی در مناطق خشک و نیمه خشک و رویارویی کشاورزان این مناطق با پدیده بحران آب، این ضرورت احساس می شود که بتوان با ارائه راهکارهای مدیریتی مناسب، آسیب های ناشی از کمبود آب و تنش خشکی در تولید محصولات کشاورزی را به حداقل رساند. یکی از راهکارهایی که می تواند به افزایش مقاومت گیاه به خشکی و بالابردن کارایی مصرف آب کمک نماید استفاده از نانوذرات در کشاورزی است. اما نکته ای که باید به آن توجه نمود این است که نوع نانوذرات و روش استفاده از آن ها باید در هر منطقه و برای هر نوع گیاه به طور جداگانه مورد مطالعه قرار گیرد. متأسفانه در زمینه استفاده از نانوذرات و نقش آن ها به عنوان مکمل در افزایش مقاومت گیاهان زراعی در برابر تنش های محیطی و به خصوص تنش شوری و خشکی مطالعات بسیار کمی در کشور انجام شده است. بنابراین در این پژوهش سعی شد تا اثر محلول پاشی نانوذرات سیلیس بر عملکرد و اجزای عملکرد و بهره وری آب ارزن دانه ای در شرایط تنش خشکی در منطقه خشک کاشمر مورد بررسی قرار گیرد.

## مواد و روش ها

### 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 سانتی گراد و میانگین بارش سالانه ۱۹۲/۱ میلی متر است. اقلیم منطقه بر اساس طبقه بندی دو مارتن، خشک است. خصوصیات شیمیایی و فیزیکی خاک زراعی محل آزمایش به ترتیب در جدول های (۱ و ۲) و خصوصیات شیمیایی آب آبیاری مزرعه تحقیقاتی که از چاه عمیق تأمین می شد در جدول (۳) ارائه شده است.

شدن آب های ساکن و همچنین آلودگی آب آشامیدنی جلوگیری به عمل خواهد آمد. در حقیقت با بهره گیری از فناوری نانو در طراحی و ساخت نانوکودها، فرصت های جدیدی به منظور افزایش کارایی مصرف آب عناصر غذایی و به حداقل رساندن هزینه های حفاظت از محیط زیست، 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 جوانه زنی، رشد، عملکرد محصول و کیفیت تولید سویا بررسی گردید. نتایج نشان داد که جوانه زنی در بذرهایی که با نانوذرات مس، کبالت و آهن تیمار شده بودند به ترتیب ۶۵، ۸۰ و ۸۰ درصد بود در حالی که جوانه زنی در بذرهایی تیمار نشده به اندازه ۵۵ درصد بود (Ngo *et al.*, 2014). نتایج بررسی اثر ترکیبی نانوذرات سیلیس و تیتانیوم بر جوانه زنی و رشد گیاه سویا نشان داد که ترکیب نانوذرات سیلیس و تیتانیوم درصد جوانه زنی و رشد سویا را افزایش داد (Lu *et al.*, 2002). در پژوهشی دیگر اثر نانوذرات اکسید روی بر جوانه زنی، رشد و عملکرد بادام زمینی مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج حاکی از تأثیر معنی دار 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 غلظت های ۶۰ و ۹۰ میلی گرم در لیتر نانوذرات کیتوزان، سطح برگ، تعداد دانه در خوشه، عملکرد دانه و شاخص برداشت را نسبت به تیمار شاهد (بدون محلول پاشی) به طور معنی داری افزایش داد. همچنین نتایج نشان داد که استفاده از نانوذرات کیتوزان در گیاهان تحت تنش خشکی، باعث افزایش معنی دار محتوی نسبی آب در گیاه، وزن هزار دانه و پروتئین دانه در مقایسه با تیمار شاهد گردید و استفاده از غلظت های بالای نانوذرات کیتوزان باعث افزایش مقاومت به خشکی در تیمارهای تحت تنش آبی شد (Behboudi *et al.*, 2018).

کم آبیاری یکی از راهکارهای بهینه سازی مصرف آب است که طی آن به گیاه زراعی اجازه داده می شود مقداری تنش کم آبی را در طول فصل رشد تحمل نمایند. گزارش شده تنش خشکی به طور معنی داری 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

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 <sup>3</sup> ) |
|--------------|---------|-----------|---------|----------|---------------------------------------|
| ۰-۳۰         | ۳۱/۵    | ۴۳/۵      | ۲۵      | لومی-رسی | ۱/۲۶                                  |
| ۳۰-۶۰        | ۴۵      | ۳۸        | ۱۷      | رسی      | ۱/۴۱                                  |

جدول ۳- خصوصیات شیمیایی آب مزرعه تحقیقاتی

| پارامتر                 | مقدار | پارامتر                               | مقدار |
|-------------------------|-------|---------------------------------------|-------|
| pH                      | ۷/۳۵  | HCO <sup>3-</sup> (meq/L)             | ۴/۳   |
| EC (dS/m)               | ۰/۳۴۵ | CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> (meq/L) | ۰     |
| Na+ (meq/L)             | ۰/۲۱  | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (meq/L) | ۰/۰۳  |
| K+ (meq/L)              | ۰/۴۲  | Ca <sup>2+</sup> (meq/L)              | ۳/۱۱  |
| Cl <sup>-</sup> (meq/L) | ۰/۵۱  | Mg <sup>2+</sup> (meq/L)              | ۱/۲۷  |

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 خوشه ها کاملاً زرد رنگ شده بود با حذف دو ردیف کناری و نیم متر ابتدا و انتهای ردیف ها به عنوان اثر حاشیه ای، انجام گرفت. عملکرد و اجزای عملکرد تیمارها شامل ارتفاع گیاه، وزن هزار دانه، تعداد پانیکول در هر گیاه، عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیک اندازه گیری شده و تحلیل نتایج با استفاده از نرم افزار SPSS صورت گرفت. برای محاسبه تعداد پانیکول در هر بوته، از هر کرت تعداد ۳۰ بوته به طور تصادفی انتخاب شد و متوسط تعداد پانیکول ها محاسبه شد. برای اندازه گیری وزن هزار دانه نیز تعداد ۵ نمونه ۱۰۰ تایی از هر کرت انتخاب و وزن هر نمونه اندازه گیری شده و به ۱۰۰۰ دانه تعمیم داده شد.

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

این پژوهش به صورت کرت های یک بار خرد شده در قالب طرح کاملاً تصادفی با ۳ تکرار انجام شد. هر تکرار شامل چهار کرت اصلی به عنوان تیمارهای آبیاری بود که عبارت بودند از (۱) آبیاری مطلوب بر اساس نیاز آبی تعیین شده برای گیاه در منطقه کاشمر؛ (۲) کم آبیاری که در آن ۸۰ درصد نیاز آبی گیاه در اختیار آن قرار داده شد؛ (۳) کم آبیاری که در آن ۶۰ درصد نیاز آبی گیاه در اختیار آن قرار داده شد و (۴) کم آبیاری که در آن ۴۰ درصد نیاز آبی گیاه در اختیار آن قرار داده شد.

هر کرت اصلی شامل ۶ کرت فرعی به عنوان تیمارهای محلول پاشی به این شرح بود: (۱) بدون محلول پاشی؛ (۲) محلول پاشی با غلظت ۱۰۰ میلی گرم در لیتر نانو ذرات سیلیس؛ (۳) محلول پاشی با غلظت ۲۰۰ میلی گرم در لیتر نانو ذرات سیلیس؛ (۴) محلول پاشی با غلظت ۳۰۰ میلی گرم در لیتر نانو ذرات سیلیس؛ (۵) محلول پاشی با غلظت ۴۰۰ میلی گرم در لیتر نانو ذرات سیلیس و (۶) محلول پاشی با غلظت ۵۰۰ میلی گرم در لیتر نانو ذرات سیلیس. عمل محلول پاشی در دو مرحله (یعنی مرحله پنجه زنی و گلدهی) با غلظت های مورد نظر انجام شد. هر کرت فرعی شامل ۴ خط کشت به طول ۵ متر و به فاصله ۵۰ سانتی متر 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. به منظور 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

|    |    |  |    |  |    |  |    |
|----|----|--|----|--|----|--|----|
|    | 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 به ترتیب تکرار اول، دوم و سوم؛ I1, J1, I3 و I4 به ترتیب 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 به ترتیب بدون محلول پاشی، محلول پاشی با غلظت ۱۰۰ میلی گرم در لیتر، محلول پاشی با غلظت ۲۰۰ میلی گرم در لیتر، محلول پاشی با غلظت ۳۰۰ میلی گرم در لیتر، محلول پاشی با غلظت ۴۰۰ میلی گرم در لیتر و محلول پاشی با غلظت ۵۰۰ میلی گرم در لیتر نانوذرات سیلیس.

شکل ۱- شمایی از نقشه طرح استفاده شده در این پژوهش

سرعت باد در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین (m/s)،  $(e_s - e_a)$  کمبود فشار بخار در ارتفاع ۲ متری (Kpa)،  $\Delta$  شیب منحنی فشار بخار  $(Kpa/0C)$ ،  $\gamma$  ضریب رطوبتی (Kpa/0C) و G شار گرما به داخل خاک  $(MJm^{-2}d^{-1})$  می باشند.

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 (میلی متر در روز)،  $ET_c$  نیاز آبی گیاه (میلی متر 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،

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 (اخذ شده از ایستگاه همدیدی کاشمر) تبخیر و تعرق مرجع با استفاده از فرمول پنمن-مانتیت 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

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.

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:

$$d_g = \frac{d_n}{E_a} \quad (\text{رابطه ۵})$$

$$V = d_g \times A \quad (\text{رابطه ۶})$$

که در روابط فوق،  $d_g$  عمق ناخالص آبیاری (mm)،  $E_a$

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

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

جدول ۵- طول مراحل فنولوژیکی ارزن دانه‌ای و مقدار آب مصرف‌شده در هر مرحله در تیمارهای مختلف آبیاری بر حسب 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) | روز |
| از کاشت تا سبز شدن        | ۴   | ۵/۹                    | ۴   | ۴/۷                    | ۴   | ۳/۵                    | ۴   | ۲/۳                    | ۴   |
| از سبز شدن تا پنجه‌زنی    | ۱۲  | ۶۲/۸                   | ۱۲  | ۵۰/۲                   | ۱۳  | ۴۲/۶                   | ۱۳  | ۲۸/۴                   | ۱۳  |
| از پنجه‌زنی تا ساقه رفتن  | ۱۱  | ۹۴/۵                   | ۱۲  | ۸۱/۹                   | ۱۳  | ۶۵/۸                   | ۱۳  | ۵۰/۶                   | ۱۵  |
| از ساقه رفتن تا ظهور خوشه | ۱۹  | ۱۴۱/۳                  | ۲۰  | ۱۱۷/۳                  | ۲۱  | ۹۰/۳                   | ۲۱  | ۵۹/۲                   | ۲۱  |
| از ظهور خوشه تا گلدهی     | ۵   | ۳۳                     | ۵   | ۲۵                     | ۴   | ۱۴/۴                   | ۴   | ۸                      | ۴   |
| از گلدهی تا پرشدن دانه    | ۱۱  | ۳۶/۵                   | ۹   | ۲۰                     | ۹   | ۹/۶                    | ۹   | ۵/۶                    | ۸   |
| از پرشدن دانه تا رسیدن    | ۱۲  | ۱۳/۵                   | ۱۱  | ۱۰/۵                   | ۱۰  | ۶                      | ۱۰  | ۳/۶                    | ۹   |

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).

#### 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

جدول ۶- تجزیه واریانس عملکرد، اجزای عملکرد و بهره‌وری آب ارزن دانه‌های معمولی تحت تأثیر محلول پاشی با غلظت‌های مختلف نانو کود سیلیس و رژیم‌های

| مختلف آبیاری                 |            |                         |                          |                     |                                |                               |                                    |                    |                                  |
|------------------------------|------------|-------------------------|--------------------------|---------------------|--------------------------------|-------------------------------|------------------------------------|--------------------|----------------------------------|
| میانگین مربعات               |            |                         |                          |                     |                                |                               |                                    |                    |                                  |
| منابع تغییر                  | درجه آزادی | 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 <sup>۷</sup> **           | 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 <sup>-۳</sup>            |
| ضریب تغییرات (درصد)          |            | ۰/۹۳                    | ۸/۱۵                     | ۰/۷۶                | ۲/۱۰                           | ۲/۵۰                          | ۱/۸۸                               | ۱/۸۱               | ۱/۸۱                             |

\*\* : معنی داری در سطح یک درصد، \* : معنی داری در سطح پنج درصد، ns : غیر معنی دار

جدول ۷- مقایسه میانگین اثر توأمان تیمارهای آبیاری و محلول پاشی 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 <sub>0</sub> C <sub>0</sub> | ۷۷/۳۳ c            | ۴۸/۲۱ abc          | ۰/۷۱ e                           |
| I <sub>0</sub> C <sub>1</sub> | ۷۸/۳۳ c            | ۴۸/۲۷ ab           | ۰/۷۴ d                           |
| I <sub>0</sub> C <sub>2</sub> | ۸۰/۰ b             | ۴۸/۳۲ ab           | ۰/۷۹ c                           |
| I <sub>0</sub> C <sub>3</sub> | ۸۰/۰ b             | ۴۸/۵۴ ab           | ۰/۸۱ c                           |
| I <sub>0</sub> C <sub>4</sub> | ۸۰/۰ b             | ۴۸/۷۷ a            | ۰/۸۴ b                           |
| I <sub>0</sub> C <sub>5</sub> | ۸۳/۶۷ a            | ۴۸/۸۰ a            | ۰/۸۹ a                           |
| I <sub>1</sub> C <sub>0</sub> | ۷۳/۰ fgh           | ۴۷/۷۶ abcde        | ۰/۶۵ hi                          |
| I <sub>1</sub> C <sub>1</sub> | ۷۳/۳۳ fg           | ۴۷/۸۴ abcde        | ۰/۶۵ hi                          |
| I <sub>1</sub> C <sub>2</sub> | ۷۴/۰ ef            | ۴۷/۸۴ abcde        | ۰/۶۶ gh                          |
| I <sub>1</sub> C <sub>3</sub> | ۷۵/۰ de            | ۴۷/۸۵ abcde        | ۰/۶۷ fg                          |
| I <sub>1</sub> C <sub>4</sub> | ۷۵/۳۳ d            | ۴۸/۰۹ abcd         | ۰/۶۹ ef                          |
| I <sub>1</sub> C <sub>5</sub> | ۷۶/۰ d             | ۴۸/۱۶ abc          | ۰/۶۹ ef                          |
| I <sub>2</sub> C <sub>0</sub> | ۷۰/۰ kl            | ۴۶/۸۷ bcdefg       | ۰/۶۰ m                           |
| I <sub>2</sub> C <sub>1</sub> | ۷۰/۰ kl            | ۴۷/۴۴ abcdef       | ۰/۶۱ lm                          |
| I <sub>2</sub> C <sub>2</sub> | ۷۱/۰ jk            | ۴۷/۴۹ abcdef       | ۰/۶۱ lm                          |
| I <sub>2</sub> C <sub>3</sub> | ۷۱/۵۰ ij           | ۴۷/۴۹ abcdef       | ۰/۶۲ kl                          |
| I <sub>2</sub> C <sub>4</sub> | ۷۲/۰ hij           | ۴۷/۴۹ abcdef       | ۰/۶۳ jkl                         |
| I <sub>2</sub> C <sub>5</sub> | ۷۲/۳۳ ghi          | ۴۷/۷۲ abcdef       | ۰/۶۴ ijk                         |
| I <sub>3</sub> C <sub>0</sub> | ۶۲/۶۷ o            | ۴۲/۱۳ h            | ۰/۵۳ q                           |
| I <sub>3</sub> C <sub>1</sub> | ۷۷/۳۳ n            | ۴۵/۶۰ g            | ۰/۵۵ p                           |
| I <sub>3</sub> C <sub>2</sub> | ۶۷/۰ m             | ۴۶/۰۹ fg           | ۰/۵۶ op                          |
| I <sub>3</sub> C <sub>3</sub> | ۶۸/۰ m             | ۴۶/۲۰ efg          | ۰/۵۷ op                          |
| I <sub>3</sub> C <sub>4</sub> | ۶۸/۰ m             | ۴۶/۴۳ defg         | ۰/۵۸ no                          |
| I <sub>3</sub> C <sub>5</sub> | 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 معنی دار ندارند.

I<sub>0</sub>, I<sub>1</sub>, I<sub>2</sub> و I<sub>3</sub> به ترتیب تیمار آبیاری ۱۰۰ درصد نیاز آبی، ۸۰ درصد نیاز آبی، ۶۰ درصد نیاز آبی و ۴۰ درصد نیاز آبی و C<sub>0</sub>, C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>, C<sub>4</sub> و C<sub>5</sub> به ترتیب بدون محلول پاشی، محلول پاشی با غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر، محلول پاشی با غلظت ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر، محلول پاشی با غلظت ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر، محلول پاشی با غلظت ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر و محلول پاشی با غلظت ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات سیلیس می‌باشند.

در تمام تیمارهای آبیاری محلول پاشی با نانوذرات سیلیس منجر به افزایش معنی دار 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 معنی داری نداشت. با افزایش غلظت نانوذرات به ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر بیش‌ترین ارتفاع گیاه

در تمام تیمارهای آبیاری محلول پاشی با نانوذرات سیلیس منجر به افزایش معنی دار 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 معنی داری نداشت. با افزایش غلظت نانوذرات به ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر بیش‌ترین ارتفاع گیاه

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 تخریب از طریق کاهش هدایت روزه‌ای برگ‌ها و افزایش فعالیت‌های فتوسنتزی در برگ می‌گردد. کاهش هدایت روزه‌ای 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 تنش-های 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).

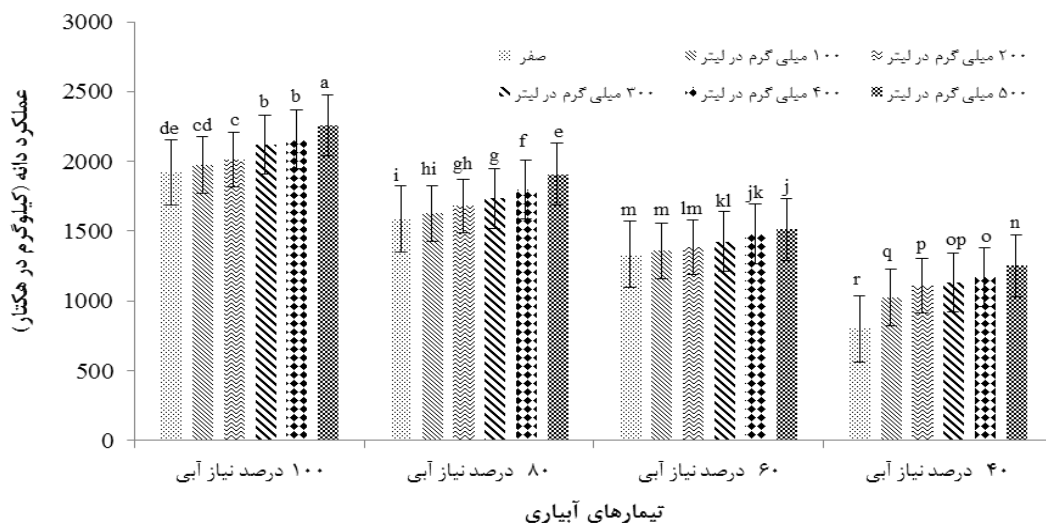
در یک تیمار آبیاری مشخص (مثلاً تیمار ۱۰۰ نیاز آبی)، با افزایش غلظت نانوذرات سیلیس، عملکرد دانه به‌طور معنی‌داری افزایش پیدا کرد (شکل ۲) به‌طوری که عملکرد دانه در تیمار محلول‌پاشی با غلظت ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات سیلیس در مقایسه با تیمارهای ۴۰۰، ۳۰۰، ۲۰۰، ۱۰۰ و صفر میلی‌گرم در لیتر غلظت نانوذرات 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 آسزیک 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 روزه‌ای و تثبیت دی‌اکسید



دانه داشت. عملکرد دانه در تیمار ۸۰ درصد نیاز آبی و استفاده از غلظت ۵۰۰ میلی گرم نانوذرات سیلیس تفاوت معنی داری 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 محلول پاشی با نانوذرات سیلیس مقاومت گیاه به تنش خشکی را افزایش داده است. یکی از اثرات تنش خشکی برهم زدن تعادل تغذیه ای در گیاه است. با تکمیل مصرف عناصر غذایی کم مصرف از طریق محلول پاشی، می توان 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 مروریدی از تیمار بدون تنش آبی همراه با محلول پاشی عناصر روی و منگنز حاصل شد.



شکل ۲- اثر متقابل تیمارهای آبیاری و محلول پاشی با غلظت های مختلف نانوذرات سیلیس بر عملکرد دانه

همچنین نتایج نشان داد که عملکرد کاه در تیمار ۸۰ درصد نیاز آبی و محلول پاشی با غلظت ۵۰۰ میلی گرم در لیتر نانوذرات با عملکرد کاه در تیمار شاهد (یعنی تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی و بدون محلول پاشی) تفاوت معنی داری نداشت (شکل ۳). البته این روند در تیمارهای ۶۰ و ۴۰ درصد نیاز آبی نیز مشاهده گردید. به عنوان مثال عملکرد کاه در تیمار ۶۰ درصد نیاز آبی و محلول پاشی با غلظت ۵۰۰ میلی گرم در لیتر نانوذرات با عملکرد کاه در تیمار ۸۰ درصد نیاز آبی و بدون محلول پاشی تفاوت معنی داری نداشت. به عبارت دیگر می توان گفت که محلول پاشی با غلظت ۵۰۰ میلی گرم در لیتر نانوذرات سیلیس، کاهش عملکرد کاه در ازای افزایش ۲۰ درصد تنش آبی را جبران می کند. این مطلب مؤید آن است که محلول پاشی با غلظت ۵۰۰ میلی گرم در لیتر نانوذرات ضمن افزایش مقاومت گیاه به تنش

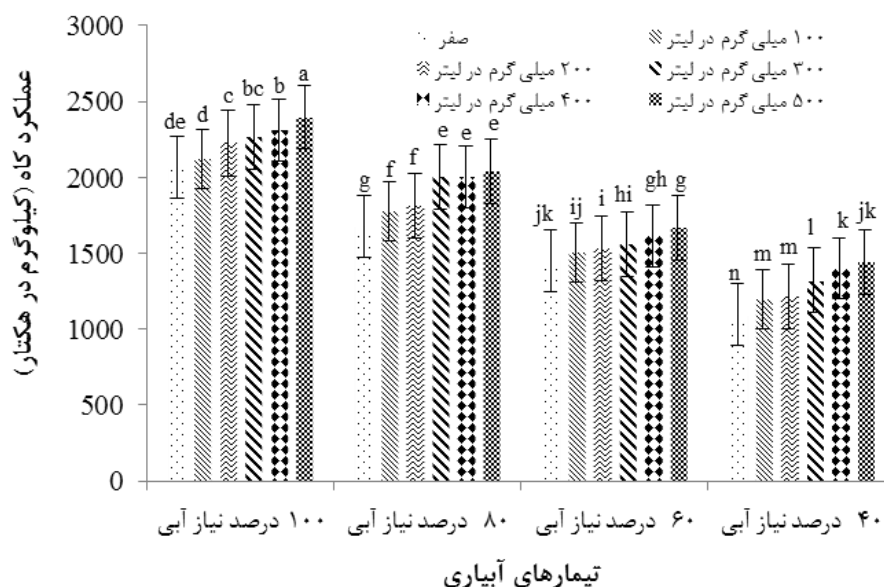
کربن برای انجام فتوسنتز تحت شرایط خشکی باشد (Khan et al., 2002). همچنین نانوذرات قادرند که مقاومت برگ در برابر خروج بخار آب را افزایش دهند که در نتیجه آن کارایی مصرف آب در گیاه بهبود یافته و عملکرد دانه و بیولوژیک افزایش می یابد (Tambussi et al., 2007).

با توجه به شکل (۲) مشخص می شود که بیشترین عملکرد دانه متعلق به تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی و محلول پاشی ۵۰۰ میلی گرم در لیتر نانوذرات سیلیس و کمترین مقدار آن متعلق به تیمار ۴۰ درصد نیاز آبی و بدون محلول پاشی نانوذرات سیلیس است. در تمام تیمارهای آبیاری استفاده از غلظت ۵۰۰ میلی گرم نانوذرات سیلیس باعث افزایش معنی داری در عملکرد دانه ارزن نسبت به تیمار شاهد گردیده است. با افزایش تنش خشکی، افزایش غلظت نانوذرات سیلیس تأثیر کمتری در افزایش عملکرد

## عملکرد کاه

نتایج مقایسه میانگین عملکرد کاه در تیمارهای مختلف آبیاری نشان داد که کم آبیاری اثر معنی داری بر کاهش عملکرد کاه داشت. کاهش عملکرد کاه در تیمارهای کم آبیاری 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 فعالیت های متابولیکی در اندام های گیاهی از جمله سیتوپلاسم را که منجر به از دست دادن آب سلول و کوچک ماندن اندام های گیاهی و همچنین ایجاد اختلال در تشکیل کلروپلاست و فرآیند فتوسنتز گیاه می گردد را می توان دلیلی بر کاهش عملکرد کاه در اثر تنش خشکی عنوان نمود (Ghassemi Golezani et al., 2012).

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

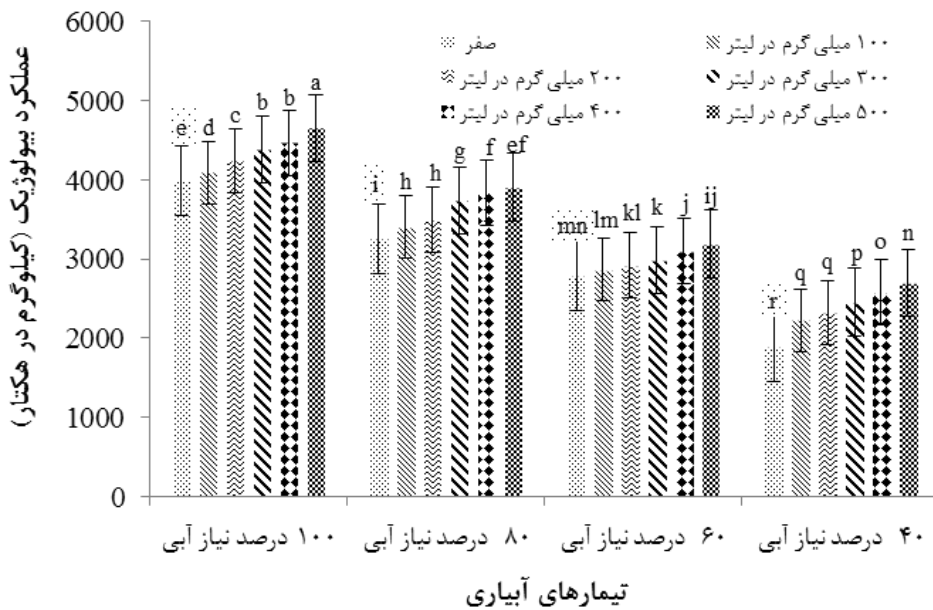
به مجموع عملکرد دانه و عملکرد کاه، عملکرد بیولوژیک گفته می‌شود. از آنجایی که با اعمال ۲۰ درصد کم‌آبیاری (یعنی تیمار ۸۰ درصد نیاز آبی)، عملکرد بیولوژیک نسبت به تیمار شاهد (یعنی تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی و بدون محلول‌پاشی) به‌طور معنی‌داری کاهش یافت، نتیجه می‌گردد که ارزش دانه‌ای گیاهی حساس به کم‌آبی بوده 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 مورد مطالعه 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). 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 ۲۰، ۲ 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

محلول پاشی با غلظت‌های ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ میلی-گرم در لیتر نانوذرات به ترتیب باعث افزایش ۶/۳۷، ۲/۶۸، ۱۰، ۱۲/۰۴ و ۱۶/۷۳ درصدی عملکرد بیولوژیک نسبت به تیمار شاهد گردید.

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 محلول پاشی با نانوذرات سیلیس منجر به افزایش معنی‌دار عملکرد بیولوژیک در ارزیابی دانه‌ای می‌گردد به طوری که



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

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 محلول پاشی شدند. Abdul Qados and Mofteh (2015) نیز نشان دادند که محلول پاشی با نانوذرات سیلیس منجر به افزایش ۷۰ درصدی تعداد پانیکول در هر بوته نسبت به تیمار شاهد (بدون محلول پاشی) در شرایط تنش خشکی گردید.

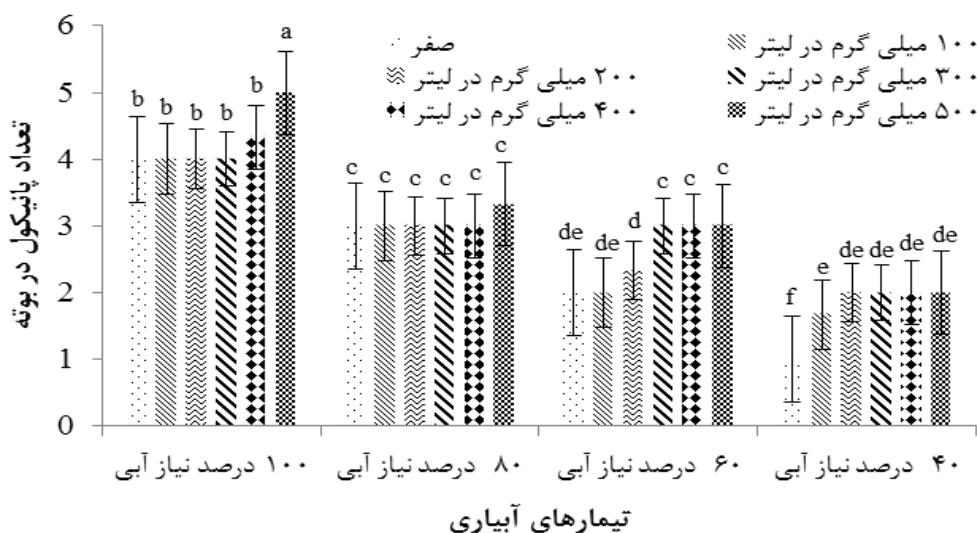
در شرایط همزمان تنش خشکی و استفاده از محلول پاشی، بیش‌ترین تعداد پانیکول مربوط به تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی و غلظت ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات و به تعداد پنج عدد بود (شکل ۵). مقایسه میانگین تعداد پانیکول در تیمارهای مختلف

#### تعداد پانیکول در هر بوته

نتایج جدول تجزیه واریانس نشان داد که اثر تنش خشکی، محلول پاشی با نانوذرات سیلیس و اثر متقابل تنش خشکی و محلول پاشی با نانوذرات سیلیس بر تعداد پانیکول در هر بوته در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. در شرایطی که تنش خشکی بدون استفاده از محلول پاشی 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 به طوری 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

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.

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



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

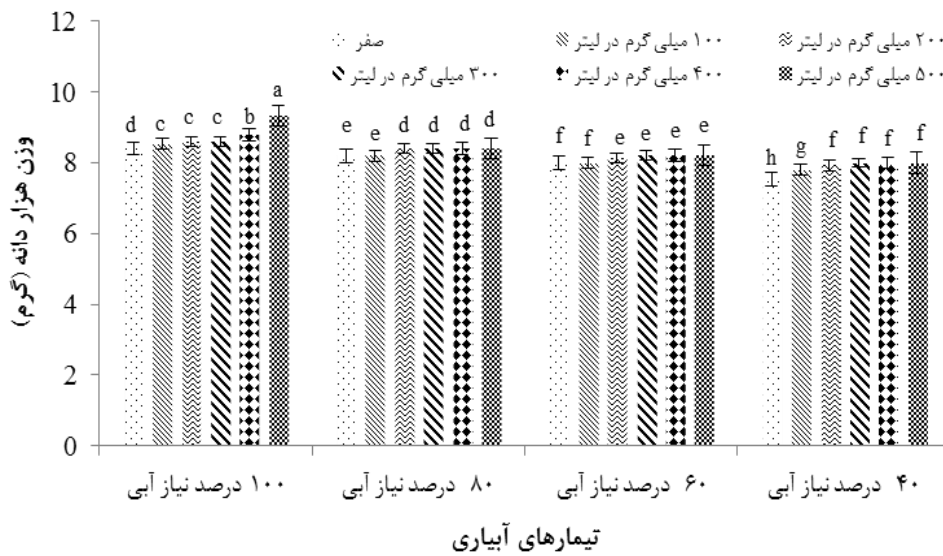
(2018) نیز نشان دادند که استفاده از محلول‌پاشی نانوذرات منجر به افزایش معنی‌دار وزن هزار دانه گردید. در پژوهشی دیگر نیز مشخص گردید که استفاده از محلول‌پاشی با نانوذرات سیلیس باعث افزایش ۱۰ درصدی در وزن هزار دانه گردید (Abdul Qados and Moftah, 2015).

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

#### 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. وقتی که 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.

جلوگیری از کاهش معنی دار عملکرد و اجزای آن در ارزن دانه‌ای، ۵۰۰ میلی گرم در لیتر است.



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

بود. شاخص برداشت در تیمار ۶۰ درصد نیاز آبی و بدون محلول پاشی با مقدار این شاخص در تیمار ۴۰ درصد نیاز آبی و محلول پاشی با غلظت‌های مختلف تفاوت معنی داری نداشت (جدول ۷).

#### بهره‌وری آب

با اعمال کم آبیاری در تیمارهای بدون محلول پاشی با نانوذرات سیلیس، بهره‌وری آب به‌طور معنی داری 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 کم آبی 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 محلول پاشی با غلظت‌های مختلف نانوذرات سیلیس باعث افزایش معنی دار بهره‌وری آب گردید. در تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی بیش‌ترین بهره‌وری آب در محلول پاشی با غلظت ۵۰۰ میلی گرم در لیتر نانوذرات سیلیس به دست آمد. در تیمار ۸۰ درصد نیاز آبی تغییر غلظت نانوذرات از ۲۰۰ به ۳۰۰ میلی گرم در لیتر باعث افزایش معنی دار بهره‌وری آب نسبت

#### شاخص برداشت

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

در تیمارهای ۱۰۰، ۸۰ و ۶۰ درصد نیاز آبی استفاده از محلول پاشی با نانوذرات سیلیس تأثیری در افزایش معنی دار شاخص برداشت نسبت به شرایط بدون محلول پاشی نداشت. اما در تیمار ۴۰ درصد نیاز آبی، محلول پاشی با نانوذرات سیلیس شاخص برداشت را نسبت به شرایط بدون محلول پاشی در این تیمار به‌طور معنی داری افزایش داد. البته بین غلظت‌های مختلف نانوذرات در این تیمار، تفاوت معنی داری در افزایش شاخص برداشت وجود نداشت. کمترین شاخص برداشت مربوط به تیمار ۴۰ درصد نیاز آبی و بدون محلول پاشی و به مقدار ۴۲/۱۳ درصد

آب در تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی و محلول پاشی با غلظت ۵۰۰ میلی گرم در لیتر نانوذرات و به مقدار ۰/۸۹ کیلوگرم بر مترمکعب و کمترین مقدار آن در تیمار ۴۰ درصد نیاز آبی و محلول پاشی با غلظت ۱۰۰ میلی گرم در لیتر نانوذرات سیلیس و به مقدار ۰/۵۵ کیلوگرم بر مترمکعب به دست آمد (جدول ۷).

### نتیجه گیری

یافته‌های به دست آمده 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 به طور کامل تأمین شود، می‌گردد. اما محلول پاشی با نانوذرات سیلیس در مرحله پنجه‌زنی و گلدهی می‌تواند تا حدودی اثرات مخرب تنش خشکی در کاهش عملکرد و بهره‌وری آب را خنثی نماید. به طوری که محلول پاشی 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 به دست آمده در این پژوهش می‌توان گفت که برای منطقه خشکی مانند کاشمر که مصرف کمتر آب در کاشت ارزن دانه‌ای حتی به اندازه ۲۰ درصد می‌تواند کمک شایانی به جبران کسری مخزن آب زیرزمینی در این منطقه نماید، آبیاری با ۸۰ درصد نیاز آبی ارزن و محلول پاشی با غلظت ۵۰۰ میلی گرم در لیتر نانوذرات سیلیس در مرحله پنجه‌زنی و گلدهی ارزن دانه‌ای قابل توصیه است.

"هیچ گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

به تیمار بدون محلول پاشی شد اما از غلظت ۳۰۰ تا ۵۰۰ میلی گرم در لیتر افزایش معنی داری در بهره‌وری آب اتفاق نیفتاد. در تیمار ۶۰ درصد نیاز آبی، محلول پاشی با غلظت ۳۰۰ میلی گرم در لیتر نانوذرات سیلیس باعث افزایش معنی دار بهره‌وری آب نسبت به شرایط بدون محلول پاشی گردید. اما بین غلظت‌های ۳۰۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ میلی گرم در لیتر تفاوت معنی داری وجود نداشت. در تیمار ۴۰ درصد نیاز آبی مشابه تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی، محلول پاشی با غلظت ۱۰۰ میلی گرم در لیتر نانوذرات باعث افزایش معنی دار بهره‌وری آب نسبت به شرایط بدون محلول پاشی گردید. اما بین تیمارهای ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ میلی گرم در لیتر تفاوت معنی داری 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، بیش تر است. به عبارتی در شرایطی که گیاه با تنش خشکی شدید مواجه می‌شود (مشابه شرایط  $I_3$ ) با مصرف اندک نانوذرات سیلیس به صورت محلول پاشی در مرحله پنجه‌زنی و گلدهی می‌توان بهره‌وری آب را به طور معنی داری 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 محلول پاشی با نانوذرات سیلیس نشان داد که بیشترین بهره‌وری

### 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 Nutrition*. 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., Kassaei, 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 photosynthetic 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*

- 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. *Chemosphere*. 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 (*Eleusine 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., Sharafzade, 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 glaucum*) 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., Sajanalal, 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.

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.