مقاله پژوهشی

برهمکنش نانوذرات اکسید روی و عصاره جلبک دریایی بر ویژگی‌های جوانه‌زنی بذر و رشد گیاهچه گوجه‌فرنگی در شرایط تنش خشکی

پروین سهرابی[۱]، مجید رستمی[۱*]، احمد جوادی[۲]

[۱] گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران

[۳] گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

(تاریخ دریافت:۱۴۰۰/۱۱/۲۴، تاریخ پذیرش نهایی:۱۴۰۱/۰۳/۰۳)

چکیده

به‌منظور بررسی تأثیر عصاره جلبک دریایی و نانوذرات اکسید روی بر ویژگی‌های جوانه‌زنی بذر گوجه‌فرنگی در شرایط تنش خشکی، پژوهشی به‌صورت آزمایش فاکتوریل بر پایه طرح بلوک‌های کاملاً تصادفی انجام شد. جهت تعیین بهترین غلظت عصاره جلبک دریایی و نانوذرات اکسید روی، آزمون‌های مقدماتی جوانه‌زنی و رشد گیاهچه انجام شد. تیمارهای آزمایشی شامل سه سطح تنش خشکی (صفر، ۲- و ۳- بار)، چهار سطح کاربرد نانوذرات اکسید روی و عصاره جلبک دریایی (شاهد، عصاره جلبک دریایی ۴ درصد، نانوذرات اکسید روی ۱۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر و ترکیب عصاره جلبک دریایی و نانوذرات اکسید روی) بود. نتایج نشان داد که با کاهش پتانسیل آب در بستر کشت بذرهای گوجه‌فرنگی، درصد جوانه‌زنی استاندارد، سرعت جوانه‌زنی بذر، طول و وزن خشک گیاهچه، شاخص طولی و شاخص وزنی قدرت گیاهچه کاهش یافت و میانگین زمان جوانه‌زنی افزایش پیدا کرد. با تشدید تنش خشکی، میزان تجمع پراکسید هیدروژن افزایش و فعالیت آنزیم‌های پراکسیداز و کاتالاز در گیاهچه نیز افزایش یافت. استفاده از عصاره جلبک دریایی و نانوذرات اکسید روی در سطوح مختلف تنش خشکی، باعث کاهش قابل‌توجه اثرات منفی این تنش شد. به‌نحوی‌که استفاده از این ترکیبات در سطوح مختلف تنش خشکی باعث افزایش قابل‌توجه درصد جوانه‌زنی استاندارد، سرعت جوانه‌زنی بذر، طول و وزن خشک گیاهچه، شاخص‌های طولی و وزنی قدرت گیاهچه و کاهش میانگین زمان جوانه‌زنی بذر گردید. همچنین استفاده از عصاره جلبک دریایی و نانوذرات اکسید روی در شرایط تنش خشکی، با افزایش فعالیت آنزیم‌های پراکسیداز و کاتالاز موجب کاهش تجمع پراکسید هیدروژن در گیاهچه‌های گوجه‌فرنگی شد. بنابراین می‌توان گفت که، در شرایط کم آبی استفاده از نانوذرات روی و جلبک دریایی موجب بهبود جوانه زنی و رشد گیاهچه گوجه-فرنگی می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: پتانسیل آب، سرعت جوانه‌زنی، رشد گیاهچه، آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان

مقدمه

کیفیت فیزیولوژیک بذرها که با اصطلاحاتی مانند درصد، سرعت و یکنواختی جوانه‌زنی تعریف می‌شود، تأثیر زیادی بر راندمان تولید محصولات مختلف دارد. علاوه بر قوه نامیه بالا، جوانه‌زنی سریع و استقرار گیاهچه یکنواخت و با کیفیت از مهم‌ترین عوامل کیفی بذر هستند (Finch-Savage, 2013).

*نویسنده مسؤل، نشانی پست الکترونیکی: majidrostami7@yahoo.com

فرآیند جوانه‌زنی بذر تحت کنترل عوامل ژنتیکی، هورمونی و محیطی است. در بین عوامل محیطی مقدار آب خاک از مهمترین عوامل تأثیرگذار بر جوانه‌زنی بذرهای گیاهان محسوب می‌شود. به‌نحوی‌که کمبود آن به‌عنوان اساسی‌ترین عامل بازدارنده جوانه‌زنی قلمداد می‌گردد. بذرهایی که قادر به جوانه‌زنی تحت شرایط تنش رطوبتی هستند از شانس بیشتری در استقرار گیاه و تراکم مطلوب برخوردارند (Finch-Savage, 2013). بروز تنش خشکی در مرحله جوانه‌زنی با کاهش پتانسیل آب در بستر بذر همراه است که پیامد آن کاهش سرعت و درصد جوانه‌زنی و نیز رشد گیاهچه است (Kaya *et al.*, 2006). جوانه‌زنی بذرها به میزان آب در دسترس بذر بستگی دارد. بذری که در معرض تنش خشکی است با کمبود آب مواجه می‌شود، درنتیجه سرعت و درصد جوانه‌زنی کاهش می‌یابد. درحالی‌که سبزشدن سریع و سرعت بالای رشد گیاهچه نقش مهمی در تولید گیاهان زراعی در مناطق خشک دارد. درصورتی‌که اثرات منفی ناشی از تنش خشکی در مراحل ابتدایی رشد کاهش یابد، رشد گیاه در مراحل بعدی بهبود خواهد یافت. مطالعات زیادی نشان داده است که مقاومت به خشکی گیاهان به‌واسطه استفاده از ترکیبات آلی و معدنی مناسب در بستر کشت بذرها، بهبود می‌یابد (کافی و همکاران،۱۳۸۸). از جمله این ترکیبات آلی و معدنی می‌توان به عصاره جلبک دریایی و عناصر ریزمغذی به‌خصوص عنصر روی اشاره کرد.

کاربرد عصاره جلبک دریایی که منبع فراوانی از پلی‌ساکاریدهای پیچیده و عناصر غذایی مانند نیتروژن و پتاسیم است، ضمن اینکه موجب القای مقاومت در گیاه نسبت به تنش‌های محیطی و تغذیه‌ای می‌شود، بر تولید هورمون‌های رشد از جمله جیبرلین، سیتوکینین و اکسین تأثیرگذار است (Erulan *et al.*, 2009). جلبک‌های دریایی منبع غنی از ترکیبات فعال زیستی هستند. این ترکیبات زیستی بر جوانه‌زنی بذر و رشد گیاهچه مؤثر هستند، به‌طوری‌که، امروزه کودهای زیستی جلبکی به‌طور گسترده در جهان جهت افزایش رشد و عملکرد گیاهان استفاده می‌شوند. ترکیبات فعال زیستی موجود در عصاره جلبک‌های دریایی، همه واکنش‌های فیزیولوژیکی که منجر به رشد مناسب گیاه می‌شوند را افزایش می‌دهند (Faheed and Fattah, 2008).

عنصر ریزمغذی روی (Zn) نقش اساسی در متابولیسم گیاه و نیز بیوسنتز پروتئین‌ها، RNA و DNA ایفا می‌کند (Marschner, 2011). اگر چه نیاز گیاهان به روی اندک (۵ تا ۱۰۰ قسمت در میلیون) است، ولی اگر مقدار کافی از این عنصر در دسترس نباشد گیاهان از صدمات فیزیولوژیکی ناشی از ناکارآمدی سیستم‌های متعدد آنزیمی و سایر فرآیندهای متابولیکی مرتبط با روی متأثر خواهند شد. روی برای حفظ پیوستگی ساختار غشای سلول‌های ریشه ضروری است، به‌طوری‌که در شرایط کمبود روی نفوذپذیری غشای سلول‌های ریشه افزایش می‌یابد (Marschner, 2011). اگرچه اهمیت عنصر روی و سایر عناصر ریزمغذی در عملکرد گیاهان در سطوح سلولی و مولکولی به اثبات رسیده است، اما رسانش این عناصر در قالب مکمل و یا کود همچنان با چالش رو به رو است. با استفاده از نانوذرات و نانو پودرها می‌توان کودهایی با رهایش کنترل‌شده یا تأخیری تولید کرد. چرا که سطح ویژه بالای نانوذرات، چگالی بیشتر نواحی واکنش‌پذیر بر روی سطح ذره و همچنین افزایش واکنش‌پذیری این نواحی بر روی سطح، سبب واکنش‌پذیری بالای نانوذرات می‌شوند. این ویژگی‌ها موجب جذب راحت‌تر کودهایی می‌شوند که با این ابعاد تولید شده‌اند و نسبت به کودهای رایج تأثیر بیشتری خواهند داشت (پاریاد، ۱۳۹۱).

گوجه‌فرنگی پس از سیب‌زمینی دومین محصول پر مصرف دنیا است که به‌عنوان یک منبع غذایی غنی از ویتامین و مواد معدنی مطرح است (Quinet *et al.*, 2019). برای نیل به کشاورزی موفق، نیاز به در اختیار داشتن بذرهایی است که ضمن دارابودن استانداردهای لازم فیزیکی و مورفولوژیکی و اندوخته غذایی لازم برای تضمین استقرار گیاهچه، کمترین خسارت‌های مکانیکی و زیستی و تلفات فرسودگی را تجربه کرده باشند (اکرم‌قادری، ۱۳۸۷). بنابراین، برای موفقیت در تولید گوجه‌فرنگی، دستیابی به بذر با کیفیت آن بسیار حایز

اهمیت است. هدف از اجرای این پژوهش، افزایش قابلیت جوانه‌زنی بذر و رشد گیاهچه گوجه‌فرنگی و درنتیجه بهبود قابلیت تحمل گیاهچه‌های تولیدشده در شرایط تنش خشکی بود، که این مهم از طریق کاربرد خارجی جلبک دریایی و نانوذرات اکسید روی در محیط جوانه‌زنی در شرایط تنش خشکی مورد مطالعه قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر به‌صورت آزمایش فاکتوریل بر پایه طرح بلوک‌های کاملاً تصادفی با سه تکرار انجام شد. بذور گوجه‌فرنگی، رقم وای (*Solanum lycopersicum* L. CV. 'Y') از شرکت تولید بذر فلات تهیه گردید. در این آزمایش از عصاره جلبک دریایی تولیدشده در شرکت کیمیا کود بهار و نانوذرات اکسید روی شرکت نانو پارس لیما استفاده شد. به منظور تهیه بهترین غلظت عنصر نانواکسید روی (N-ZnO) و عصاره جلبک دریایی (SWE) یک آزمایش مقدماتی جوانه‌زنی استاندارد طراحی و اجرا گردید و در این آزمون شاخص‌های سرعت و درصد جوانه‌زنی و رشد گیاهچه اندازه‌گیری شد. فاکتورهای این آزمون شامل غلظت‌های نانواکسید روی: صفر (شاهد)، ۳۰۰، ۶۰۰، ۹۰۰، ۱۲۰۰، ۱۵۰۰، ۱۸۰۰ و ۲۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر و غلظت‌های عصاره جلبک دریایی: صفر (شاهد)، ۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸، ۹، ۱۰ و ۱۵ درصد بودند. در نهایت پس از انجام این آزمون در آزمایشگاه و جمع‌آوری داده‌ها و تجزیه و تحلیل نتایج، غلظت ۱۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر برای نانواکسید روی و غلظت ۴ درصد برای عصاره جلبک دریایی در نظر گرفته شد. در این مطالعه از پلی‌اتیلن گلایکول ۶۰۰۰ جهت ایجاد سطوح مختلف تنش خشکی استفاده شد. تنش خشکی در سه سطح صفر (D1)، ۲- (D2) و ۳- بار(D3) مورد آزمایش قرار گرفت.

در آزمایش اصلی برای سنجش شاخص‌های جوانه‌زنی بذر و رشد گیاهچه گوجه‌فرنگی تعداد ۳۶ ظرف کشت انتخاب شد و کاغذ صافی به اندازه کف ظرف‌ها برش داده شد و درون ظرف‌ها قرار گرفت، تعداد ۲۵ بذر با فاصله‌های مناسب برای هر تیمار درون ظروف قرار داده شد و تیمارها اعمال شدند. جهت سنجش صفات بیوشیمیایی نیز ۳۶ ظرف انتخاب شد و تعداد ۵۰ بذر برای هر تیمار کشت گردید و تیمارها اعمال شد.

آزمون جوانه‌زنی استاندارد بذرهای گوجه‌فرنگی مطابق با قوانین انجمن بین‌المللی آزمون بذر (ISTA)، پس از ۱۰ دقیقه ضدعفونی سطحی با محلول یک درصد هیپوکلریت سدیم، به صورت سه تکرار ۲۵ بذری در دمای متناوب ۳۰-۲۵ درجه سانتی‌گراد در ۱۴ روز انجام شد. شمارش روزانه تعداد بذرهای جوانه‌زده (خروج دو میلی‌متری ریشه‌چه) تا پایان روز چهاردهم از شروع آزمایش ادامه یافت. در هر واحد آزمایشی، درصد جوانه‌زنی استاندارد و طول و وزن خشک گیاهچه اندازه‌گیری شد. سرعت جوانه‌زنی بذر نیز با استفاده از رابطه زیر محاسبه گردید (Ellis and Roberts, 1981):

$$\bar{R} = \frac{\sum n}{\sum Dn}$$

n= تعداد بذور جوانه‌زده در هر روز، D= تعداد روز از آغاز آزمایش

پس از پایان دوره ۱۴ روزه آزمایش و اندازه‌گیری طول و وزن خشک گیاهچه‌های نرمال، شاخص طولی و وزنی قدرت با استفاده از فرمول‌های زیر محاسبه شد (ISTA., 2010).

VIL = GP (%) × SL (cm)

VIW = GP (%) × WL (mg)

در فرمول‌های فوق VIL= شاخص طولی قدرت، VIW= شاخص وزنی قدرت، GP= جوانه‌زنی استاندارد، SL= میانگین طول گیاهچه و WL= میانگین وزن خشک گیاهچه است.

به‌منظور سنجش فعالیت آنزیم کاتالاز، ۱۰۰ میلی‌گرم بافت گیاهچه توسط یک میلی‌لیتر بافر استخراج (۵۰ میلی‌لیتر بافر فسفات ۵۰ میلی‌مولار (pH=۶) تهیه و ۴ گرم پودر PVP اضافه شد) در چهار درجه سانتی‌گراد هموژن گردید. هموژنای حاصل با سرعت ۱۲۰۰۰ دور در دقیقه و دمای چهار درجه سانتی‌گراد به‌مدت ۱۵ دقیقه سانتریفیوژ شد. در ادامه، ۳ میلی‌لیتر بافر فسفات ۱۰۰ میلی‌مولار (pH=۶) و ۴۰ میکرولیتر محلول ۳۰ میلی‌مولار آب اکسیژنه (H_2O_2) با هم مخلوط گردید. پس از افزودن ۱۰۰ میکرولیتر عصاره آنزیمی، در پایان پنج دقیقه از شروع واکنش در دمای آزمایشگاه، جذب در طول

موج ۲۴۰ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر خوانده شد. اعداد جذب بر عدد ضریب خاموشی پراکسید هیدروژن (۳۹/۴ $\mu M^{-1}.cm^{-1}$) تقسیم و فعالیت آنزیم کاتالاز براساس میکرومول H_2O_2 تولیدشده در دقیقه بیان شد (Aebi, 1984).

سنجش فعالیت آنزیم پراکسیداز با استفاده از روش MacAdam (۱۹۹۲) انجام شد. به‌منظور استخراج آنزیم پراکسیداز، ۱۰۰ میلی‌گرم از نمونه گیاهی در یک میلی‌لیتر بافر استخراج (بافر فسفات + KCl + PVP) (pH=۷)، در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد ساییده شد. همگنای تهیه‌شده پس از انتقال به لوله اپندورف در ۱۲۰۰۰ دور در دقیقه و دمای ۴ درجه سانتی‌گراد به‌مدت ۱۵ دقیقه سانتریفیوژ شد. جهت ممانعت از تخریب آنزیم تا زمان اندازه‌گیری فعالیت، نمونه‌های سانتریفیوژشده در دمای ۲۰- درجه سانتی‌گراد نگهداری شد. سپس نمونه‌های عصاره حاوی آنزیم از فریزر خارج و در حمام یخ قرار داده شدند. در ادامه ۳ میلی‌لیتر بافر فسفات ۱۰۰ میلی‌مولار، ۵۰ میکرولیتر گایاکول ۲۰۰ میلی‌مولار و ۴۰ میکرولیتر محلول ۳۰ میلی‌مولار آب اکسیژنه با هم مخلوط گردید. سپس ۱۰۰ میکرولیتر عصاره آنزیمی به آن اضافه و بعد از ۵ دقیقه از شروع واکنش در دمای آزمایشگاه، جذب در طول‌موج ۴۷۰ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر خوانده شد. اعداد مربوط به جذب بر عدد ضریب خاموشی تتراگایاکول (۲۶/۶ $\mu M^{-1}.cm^{-1}$) تقسیم شدند و فعالیت آنزیم پراکسیداز براساس میکرومول تتراگایاکول تولیدشده در دقیقه بیان شد. محلول جذب زمینه شامل تمام موارد بجز عصاره استخراج‌شده بود.

جهت سنجش پراکسید هیدروژن ابتدا ۰/۱ گرم از بافت موردنظر در ۱ میلی‌لیتر تری‌کلرو استیک اسید ۰/۱ (TCA) هموژن گردید و سپس عصاره حاصل در ۱۰۰۰۰ دور در دقیقه به‌مدت ۱۰ دقیقه سانتریفیوژ گردید. سپس ۰/۵ میلی‌لیتر از محلول سانتریفیوژشده به ۰/۵ میلی‌لیتر بافر فسفات پتاسیم ۱۰ میلی‌مولار (pH=۷) و ۱ میلی‌لیتر یدید پتاسیم یک مولار اضافه شد و جذب در طول‌موج ۳۹۰ نانومتر خوانده شد (Shu-Hsien *et al.*, 2005). مقدار پراکسید هیدروژن در هر نمونه با استفاده از ضریب خاموشی (۰/۲۸ $M^{-1}.cm^{-1}$) محاسبه گردید و مقادیر با واحد میکرومول بر گرم ماده تر گیاهی بیان گردید. پس از آزمون نرمال‌بودن توزیع داده‌ها (براساس آزمون شاپیرو-ویلک) و بررسی یکنواختی واریانس خطاهای آزمایشی (طبق آزمون لون)، تجزیه واریانس متغیرهای اندازه‌گیری‌شده با نرم‌افزار آماری SAS و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از روش LSD در سطح احتمال پنج درصد صورت گرفت و شکل‌ها توسط برنامه EXCEL ترسیم شد.

نتایج

با توجه به نتایج تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۱)، استفاده از عصاره جلبک دریایی و نانواکسید روی (SWE +N-ZnO) و تنش خشکی از نظر درصد و سرعت جوانه‌زنی بذر، طول و وزن خشک گیاهچه، شاخص طولی و وزنی قدرت، فعالیت آنزیم‌های پراکسیداز و کاتالاز و میزان تجمع پراکسید هیدروژن گیاهچه در سطح احتمال یک درصد و از نظر میانگین زمان جوانه‌زنی در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار بود. اثر متقابل فاکتورهای آزمایشی (SWE +N-ZnO × خشکی) از نظر تمامی صفات مذکور در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۱).

نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد با افزایش تنش خشکی در بستر کشت گوجه‌فرنگی، درصد جوانه‌زنی استاندارد بذرها به‌شدت کاهش یافت. به‌طوری‌که بیشترین درصد جوانه‌زنی (۹۶/۶ درصد) در شرایط بدون تنش خشکی مشاهده شد و کمترین آن (۸۶/۶ درصد) مربوط به سطح سوم تنش (۲- پاسکال) بود. از طرف دیگر استفاده از تیمارهای نانواکسید روی و جلبک دریایی اثرات منفی تنش خشکی را کاهش داد. به‌طوری‌که بیشترین درصد جوانه‌زنی مربوط به تیمار نانواکسید روی در شرایط بدون تنش بود که از لحاظ آماری با استفاده همزمان نانواکسید روی و عصاره جلبک دریایی اختلاف معنی‌داری نداشت (شکل ۱).

با کاهش پتانسیل اسمزی در محیط جوانه‌زنی بذرهای گوجه‌فرنگی، سرعت جوانه‌زنی بذر در همه تیمارها کاهش

جدول ۱- تجزیه واریانس اثر عصاره جلبک دریایی و نانواکسید روی بر شاخص‌های جوانه‌زنی و بیوشیمیایی گوجه‌فرنگی در شرایط تنش خشکی

منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات				
		درصد جوانه‌زنی استاندارد	سرعت جوانه‌زنی	میانگین زمان جوانه زنی	طول گیاهچه	وزن خشک گیاهچه
بلوک	۲	۵/۸۶۱^{ns}	۰/۰۰۲۰ ^{ns}	۰/۱۶۴ ^{ns}	۸/۴۰۹*	۰/۰۳۸ ^{ns}
SWE+N-ZnO	۳	۸۸/۶۶۶**	۰/۰۰۳۵**	۰/۳۴۸*	۸۷/۳۶۲**	۰/۱۷۳**
خشکی	۲	۵۴/۵۲۷**	۰/۰۲۴۴**	۱/۹۵۳**	۱۲/۹۸۴**	۰/۰۶۴**
خشکی × SWE +N-ZnO	۶	۵۷/۱۹۴**	۰/۰۰۵۴**	۰/۴۹۹**	۵۸/۷۴۴**	۰/۱۴۶**
خطا	۲۲	۸/۷۰۹	۰/۰۰۱۵	۰/۱۳۱	۲/۲۴۲	۰/۰۲۳
ضریب تغییرات (٪)	–	۳/۳۴۷	۴/۰۴۰	۱/۸۳۱	۱/۸۹۷	۲/۵۴۴

ns، ** و * به‌ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال یک و پنج درصد

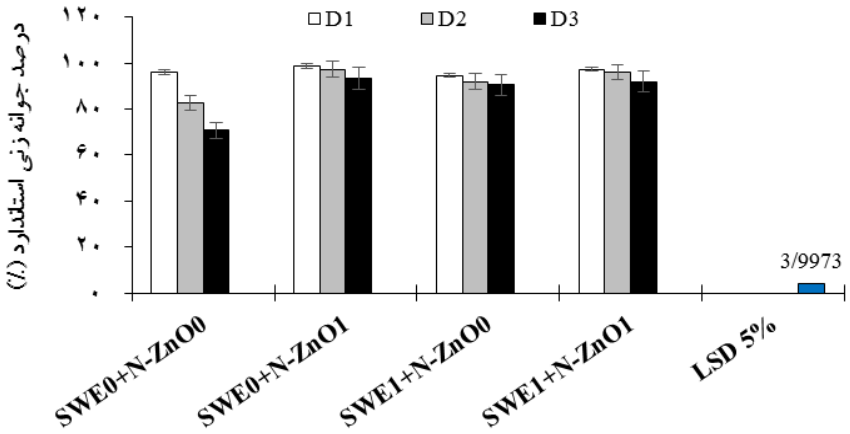
جدول ۱- ادامه

منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات				
		شاخص طولی قدرت	شاخص وزنی قدرت	فعالیت آنزیم پراکسیداز	فعالیت آنزیم کاتالاز	پراکسید هیدروژن
بلوک	۲	۲/۷۰۰^{ns}	۰/۰۰۰۴۳ ^{ns}	۱/۰۹۱ ^{ns}	۰/۰۰۷۵۳ ^{ns}	۰/۰۰۹۷ ^{ns}
SWE+N-ZnO	۳	۳۴/۴۷**	۰/۰۲۵۴**	۴۷/۸۰۱*	۲/۹۶۰**	۰/۰۲۹۰**
خشکی	۲	۶/۸۱۰**	۰/۰۳۳۳**	۲۰/۷۶۰**	۱/۹۹۷**	۰/۱۰۰۴**
خشکی × SWE +N-ZnO	۶	۲۶/۱۹۴**	۰/۰۱۸۰**	۰/۹۸۱**	۰/۳۲۱**	۰/۰۰۱۷**
خطا	۲۲	۰/۱۵۲	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۱
ضریب تغییرات (٪)	–	۳/۳۴۷	۴/۰۴۰	۱/۸۳۱	۱/۸۹۷	۱/۵۴۴

ns، ** و * به‌ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال یک و پنج درصد. نانواکسید روی: (N-ZnO) و عصاره جلبک دریایی: (SWE). میانگین مربعات فعالیت آنزیم‌های پراکسیداز و کاتالاز در عدد $۱۰^{۶}$ ضرب شدند.

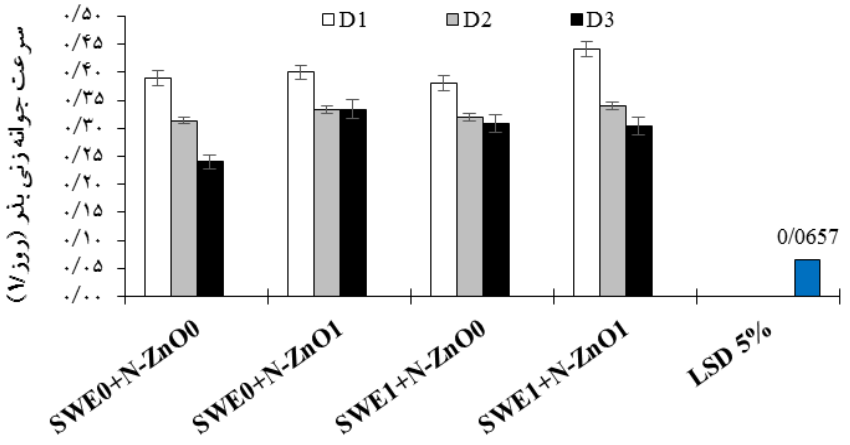
قابل ملاحظه‌ای را نشان داد. به‌عنوان نمونه در تیمار شاهد بیشترین سرعت جوانه‌زنی (۰/۳۸۹) مربوط به شرایط بدون تنش خشکی و کمترین آن (۰/۲۴) مربوط به سطح سوم تنش خشکی بود. استفاده تلفیقی از تیمارهای نانواکسید روی و جلبک دریایی اثرات سوء ناشی از تنش خشکی را کاهش داد. به‌طوری‌که بیشترین سرعت جوانه‌زنی (۰/۴۴) مربوط به تیمار برهمکنش جلبک دریایی و نانواکسید روی در شرایط بدون تنش بود (شکل ۲).

با خشک‌ترشدن محیط‌کشت بذرهای گوجه‌فرنگی، جوانه‌زنی بذرها با تأخیر بیشتری انجام شد، به‌طوری‌که با افزایش شدت تنش خشکی، میانگین زمان جوانه‌زنی بذرها به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافت. به‌نحوی‌که کمترین میانگین (۲/۴۹ روز) مربوط به شرایط بدون تنش خشکی و بیشترین آن (۳/۴۲ روز) مربوط به سطح سوم تنش خشکی بود. استفاده از تیمارهای نانواکسید روی و عصاره جلبک دریایی، روند افزایش زمان جوانه‌زنی تحت تنش خشکی را کاهش داد.



سطوح مختلف عصاره جلبک دریایی و نانواکسید روی

شکل ۱- اثر کاربرد عصاره جلبک دریایی و نانواکسید روی بر درصد جوانه‌زنی استاندارد بذر گوجه‌فرنگی در شرایط تنش خشکی (نانواکسید روی (SWE0 +N-ZnO0= شاهد، SWE0 +N-ZnO1= نانوذرات روی ۱۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر، SWE1 +N-ZnO0= عصاره جلبک دریایی ۴ درصد، SWE1 +N-ZnO1= ترکیب عصاره جلبک دریایی ۴ درصد و نانوذرات اکسید روی ۱۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر)

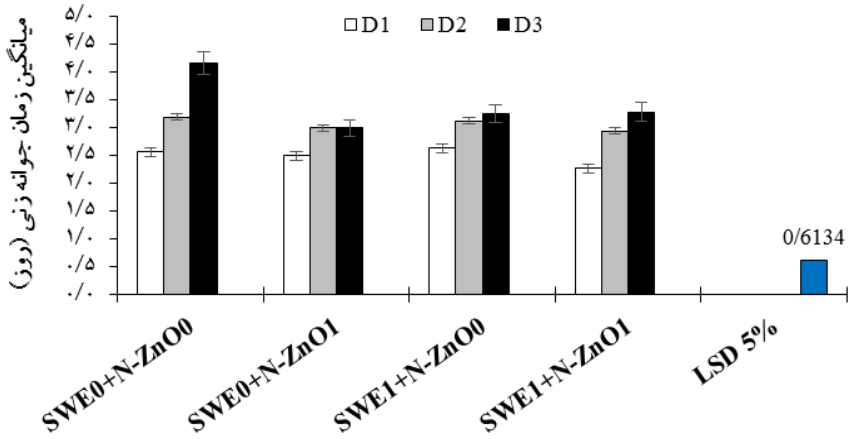


سطوح مختلف عصاره جلبک دریایی و نانواکسید روی

شکل ۲- اثر کاربرد عصاره جلبک دریایی و نانواکسید روی بر سرعت جوانه‌زنی بذر گوجه‌فرنگی در شرایط تنش خشکی (نانواکسید روی (SWE0 +N-ZnO0= شاهد، SWE0 +N-ZnO1= نانوذرات روی ۱۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر، SWE1 +N-ZnO0= عصاره جلبک دریایی ۴ درصد، SWE1 +N-ZnO1= ترکیب عصاره جلبک دریایی ۴ درصد و نانوذرات اکسید روی ۱۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر)

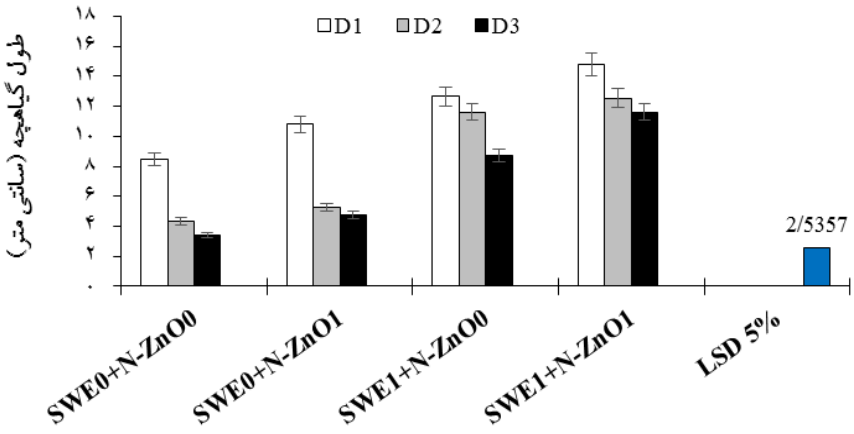
به‌طوری‌که کمترین زمان جوانه‌زنی در سطوح مختلف تنش خشکی مربوط به تیمار برهمکنش عصاره جلبک دریایی و نانواکسید روی بود که با کاربرد منفرد عصاره جلبک دریایی و نانواکسید روی در یک گروه آماری قرار گرفت (شکل ۳).

با افزایش محدودیت جذب آب در محیط‌کشت بذرهای گوجه‌فرنگی، طول و وزن خشک گیاهچه به‌شدت کاهش یافت. به‌طوری‌که بیشترین طول گیاهچه (۸/۴۴ سانتی‌متر) مربوط به شرایط بدون تنش خشکی و کمترین طول گیاهچه (۳/۳۸ سانتی‌متر) مربوط به سطح سوم تنش خشکی بود. بیشترین وزن گیاهچه (۱/۱۲ میلی‌گرم) مربوط به شرایط بدون تنش خشکی و کمترین وزن گیاهچه (۰/۷۵۳ میلی‌گرم) به سطح سوم تنش خشکی تعلق داشت. استفاده از تیمارهای نانواکسید روی و جلبک دریایی اثرات سوء ناشی از تنش خشکی را کاهش داد و در گیاهان تیمارشده افزایش طول و



سطوح مختلف عصاره جلبک دریایی و نانواکسید روی

شکل ۳- اثر کاربرد عصاره جلبک دریایی و نانواکسید روی بر میانگین زمان جوانه‌زنی بذرگوجه‌فرنگی در شرایط تنش خشکی (نانواکسید روی (SWE0 +N-ZnO0= شاهد، SWE0 +N-ZnO1= نانوذرات روی ۱۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر، SWE1 +N-ZnO0= عصاره جلبک دریایی ۴ درصد، SWE1 +N-ZnO1= ترکیب عصاره جلبک دریایی ۴ درصد و نانوذرات اکسید روی ۱۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر)

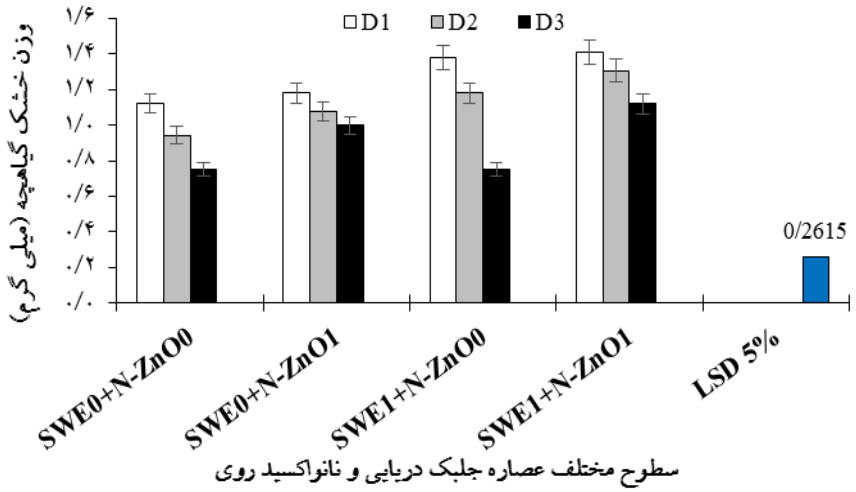


سطوح مختلف عصاره جلبک دریایی و نانواکسید روی

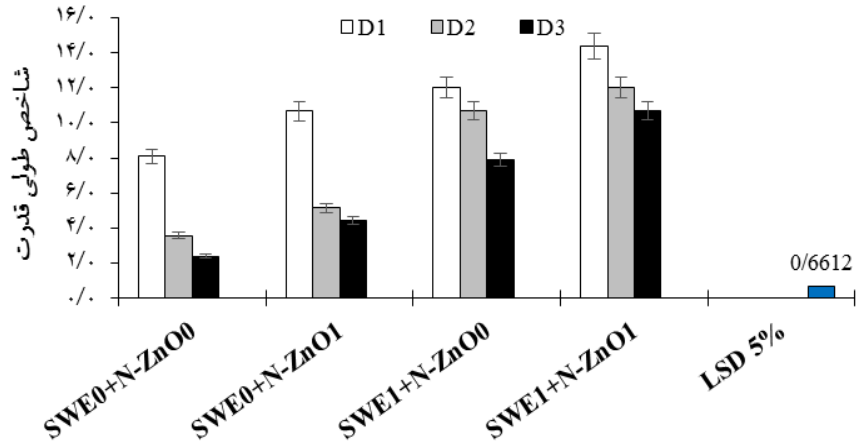
شکل ۴- اثر کاربرد عصاره جلبک دریایی و نانواکسید روی بر طول گیاهچه گوجه‌فرنگی در شرایط تنش خشکی (نانواکسید روی (SWE0 +N-ZnO0= شاهد، SWE0 +N-ZnO1= نانوذرات روی ۱۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر، SWE1 +N-ZnO0= عصاره جلبک دریایی ۴ درصد، SWE1 +N-ZnO1= ترکیب عصاره جلبک دریایی ۴ درصد و نانوذرات اکسید روی ۱۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر)

وزن خشک گیاهچه نسبت به گیاهان تیمارنشده مشاهده شد به‌طوری‌که بیشترین طول و وزن خشک گیاهچه مربوط به تیمار برهمکنش جلبک دریایی و نانواکسید روی بوده است (شکل‌های ۴ و ۵).

نتایج مقایسه میانگین داده‌ها (شکل‌های ۶ و ۷) نشان داد با افزایش تنش خشکی در گیاهان شاخص طولی و وزنی قدرت گیاهچه کاهش یافت به‌طوری‌که کمترین شاخص طولی (۲/۳۹) و وزنی (۰/۵۳) قدرت گیاهچه مربوط به سطح سوم تنش خشکی و در شرایط عدم کاربرد نانواکسید روی و عصاره جلبک دریایی مشاهده شد. استفاده از تیمارهای نانواکسید روی و عصاره جلبک دریایی اثرات منفی تنش خشکی بر شاخص طولی و وزنی قدرت گیاهچه را کاهش داد. به‌طوری که در سطوح مختلف تنش خشکی بیشترین شاخص طولی و



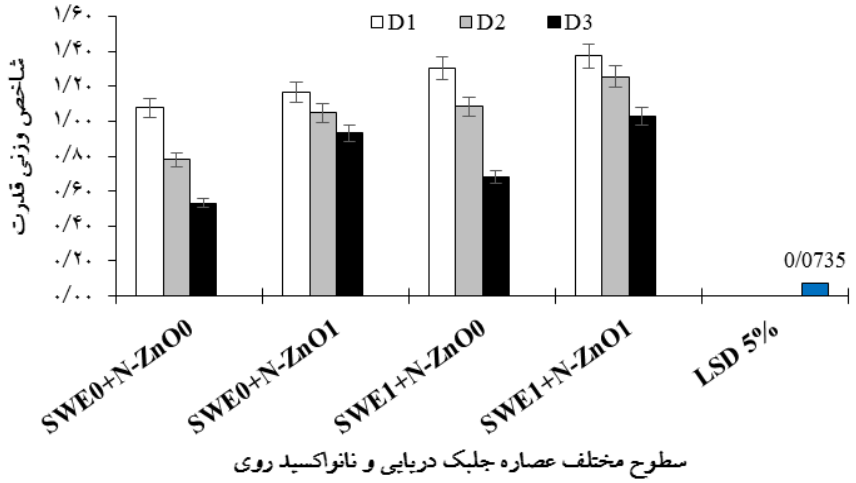
شکل ۵- اثر کاربرد عصاره جلبک دریایی و نانواکسید روی بر وزن خشک گیاهچه گوجه‌فرنگی در شرایط تنش خشکی (نانواکسید روی (SWE0 +N-ZnO0= شاهد، SWE0 +N-ZnO1= نانوذرات روی ۱۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر، SWE1 +N-ZnO0= عصاره جلبک دریایی ۴ درصد، SWE1 +N-ZnO1= ترکیب عصاره جلبک دریایی ۴ درصد و نانوذرات اکسید روی ۱۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر)



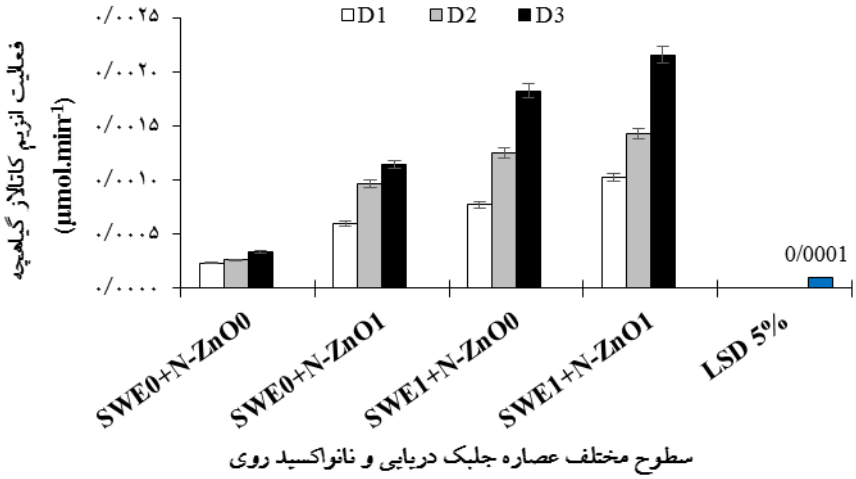
شکل ۶- اثر کاربرد عصاره جلبک دریایی و نانواکسید روی بر شاخص طولی قدرت گیاهچه گوجه‌فرنگی در شرایط تنش خشکی (نانواکسید روی (SWE0 +N-ZnO0= شاهد، SWE0 +N-ZnO1= نانوذرات روی ۱۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر، SWE1 +N-ZnO0= عصاره جلبک دریایی ۴ درصد، SWE1 +N-ZnO1= ترکیب عصاره جلبک دریایی ۴ درصد و نانوذرات اکسید روی ۱۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر)

وزنی قدرت گیاهچه مربوط به تیمار برهمکنش جلبک دریایی و نانواکسید روی بوده است (شکل‌های ۶ و ۷).

با کاهش پتانسیل آب در بستر کشت بذرهای گوجه‌فرنگی فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و پراکسیداز گیاهچه به‌شدت افزایش یافت به‌طوری‌که کمترین فعالیت آنزیم‌های کاتالاز (۰/۰۰۰۲) و پراکسیداز (۰/۰۰۱) مربوط به شرایط بدون تنش خشکی بود و بیشترین فعالیت این آنزیم‌ها به سطح سوم تنش خشکی تعلق داشت. استفاده از تیمارهای نانواکسید روی و جلبک دریایی در سطوح مختلف تنش خشکی باعث تشدید فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و پراکسیداز گیاهچه گوجه‌فرنگی شد. به‌طوری‌که بیشترین فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و پراکسیداز در سطوح مختلف تنش خشکی مربوط به تیمار برهمکنش جلبک دریایی و نانواکسید روی بود و کمترین فعالیت این آنزیم‌ها در سطوح مختلف تنش در تیمار شاهد (عدم استفاده از نانواکسید روی و



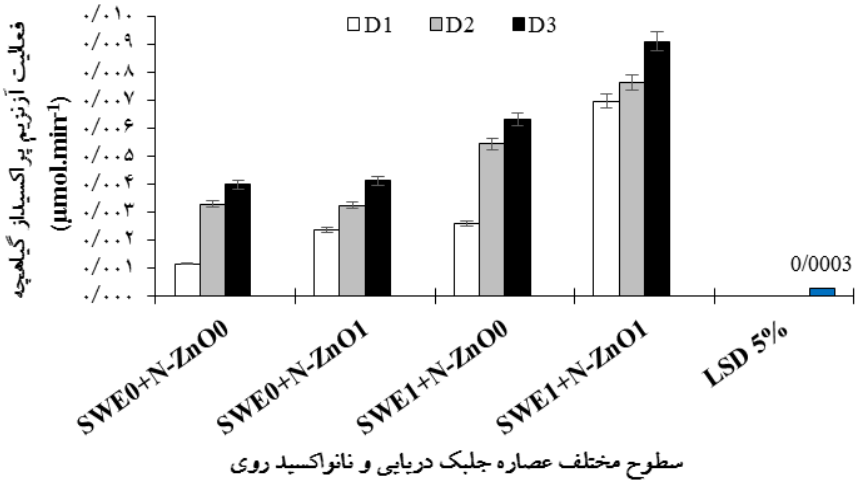
شکل ۷- اثر کاربرد عصاره جلبک دریایی و نانواکسید روی بر شاخص وزنی قدرت گیاهچه گوجه‌فرنگی در شرایط تنش خشکی (نانواکسید روی (N-ZnO0+ SWE0= شاهد، N-ZnO1+ SWE0= نانوذرات روی ۱۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر، N-ZnO0+ SWE1= عصاره جلبک دریایی ۴ درصد، N-ZnO1+ SWE1= ترکیب عصاره جلبک دریایی ۴ درصد و نانوذرات اکسید روی ۱۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر)



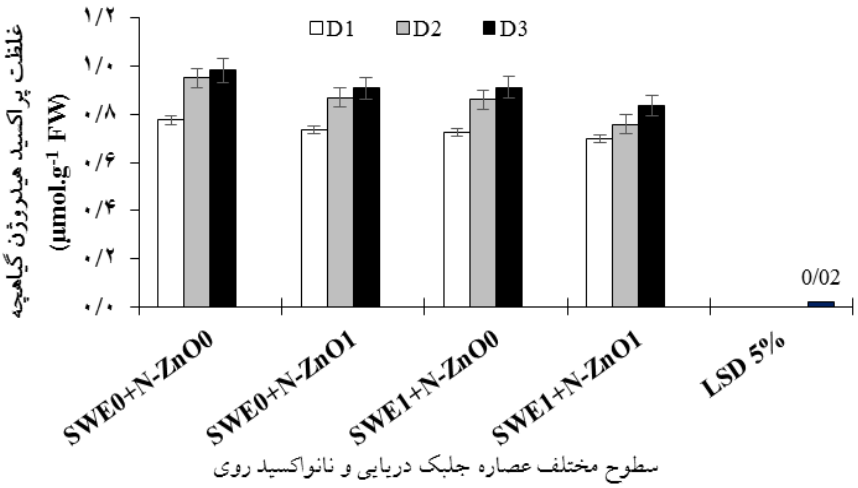
شکل ۸- اثر کاربرد عصاره جلبک دریایی و نانواکسید روی بر فعالیت آنزیم کاتالاز گیاهچه در شرایط تنش خشکی (نانواکسید روی (N-ZnO0+ SWE0= شاهد، N-ZnO1+ SWE0= نانوذرات روی ۱۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر، N-ZnO0+ SWE1= عصاره جلبک دریایی ۴ درصد، N-ZnO1+ SWE1= ترکیب عصاره جلبک دریایی ۴ درصد و نانوذرات اکسید روی ۱۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر)

جلبک دریایی) مشاهده شد (شکل‌های ۸ و ۹).

میزان تجمع پراکسید هیدروژن با افزایش تنش خشکی در بستر کشت بذرهای گوجه‌فرنگی افزایش یافت. به‌طوری‌که در تیمار شاهد کمترین غلظت پراکسید هیدروژن (۰/۷۷۵) مربوط به شرایط بدون تنش خشکی و بیشترین آن (۰/۹۸۳) مربوط به سطح سوم تنش خشکی بود. استفاده از تیمارهای نانواکسید روی و جلبک دریایی در سطوح مختلف تنش خشکی موجب کاهش قابل‌توجهی در تجمع پراکسید هیدروژن در گیاهچه گوجه‌فرنگی شد. به‌طوری‌که کمترین غلظت پراکسید هیدروژن در سطوح مختلف تنش خشکی مربوط به تیمار برهمکنش جلبک دریایی و نانواکسید روی بود (در شرایط بدون تنش ۰/۶۹۷ و در تنش ۲-پاسگال ۰/۷۵۹ و در تنش ۳-پاسگال ۰/۸۳۶) و بیشترین میزان تجمع این ترکیب سمی در سطوح مختلف تنش خشکی در شرایطی مشاهده شد که از نانواکسید



شکل ۹- اثر کاربرد عصاره جلبک دریایی و نانواکسید روی بر فعالیت آنزیم پراکسیداز گیاهچه گوجه‌فرنگی در شرایط تنش خشکی (نانواکسید روی (SWE0 +N-ZnO0= شاهد، SWE0 +N-ZnO1= نانوذرات روی ۱۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر، SWE1 +N-ZnO0= عصاره جلبک دریایی ۴ درصد، SWE1 +N-ZnO1= ترکیب عصاره جلبک دریایی ۴ درصد و نانوذرات اکسید روی ۱۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر)



شکل ۱۰- اثر عصاره جلبک دریایی و نانواکسید روی بر میزان تجمع پراکسیداز هیدروژن در گیاهچه گوجه‌فرنگی در شرایط تنش خشکی (نانواکسید روی (SWE0 +N-ZnO0= شاهد، SWE0 +N-ZnO1= نانوذرات روی ۱۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر، SWE1 +N-ZnO0= عصاره جلبک دریایی ۴ درصد، SWE1 +N-ZnO1= ترکیب عصاره جلبک دریایی ۴ درصد و نانوذرات اکسید روی ۱۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر)

روی و عصاره جلبک دریایی استفاده نشد (شکل ۱۰).

بحث

با توجه به سیستم‌های آنتی‌اکسیدان، شاخص‌های جوانه‌زنی بذر و رشد گیاهچه، مهمترین نتیجه این مطالعه القای مقاومت به تنش خشکی با استفاده از عصاره جلبک دریایی و نانواکسید روی در گوجه‌فرنگی بود. در این پژوهش شاخص‌های جوانه‌زنی بذرهای گوجه‌فرنگی با افزایش محدودیت آب در بستر کشت کاهش قابل‌ملاحظه‌ای داشت. مطابق با نتایج این مطالعه، محققان گزارش نمودند که تنش خشکی موجب کاهش قابل‌توجه شاخص‌های جوانه‌زنی بذرها و رشد گیاهچه‌های گوجه‌فرنگی شد (Javadi *et al.*, 2018). به نظر می‌رسد در اثر اختلال در جذب آب توسط بذر، فعالیت‌های متابولیکی جوانه‌زنی در داخل بذر به آرامی صورت می‌گیرد و

درنتیجه کاهش شاخص‌های جوانه‌زنی بذر و رشد گیاهچه را در پی خواهد داشت. یکی از دلایل احتمالی کاهش رشد گیاهچه گوجه‌فرنگی تحت تنش خشکی را می‌توان به تغییرات هورمونی نسبت داد، چراکه محدودیت آب در بستر بذر با افزایش اسید آبسیزیک، مانع از جوانه‌زنی بذر و رشد مطلوب گیاهچه‌ها در مراحل ابتدایی رشد می‌شود (Taiz *et al*., 2015). به‌نظر می‌رسد حضور ترکیباتی چون هورمون‌های جیبرلین، سیتوکینین و اکسین و همچنین عناصر نیتروژن، فسفر و پتاسیم در عصاره جلبک دریایی موجب تسهیل جوانه‌زنی بذر و رشد گیاهچه گوجه‌فرنگی در شرایط محدودیت آب گردیده است (Erulan *et al*., 2009; Eshghi *et al*., 2013). چرا که در شرایط تنش سطوح هورمون‌های گیاهی مانند سیتوکینین، اکسین و جیبرلین کاهش می‌یابد و جذب عناصر غذایی از جمله نیتروژن، فسفر و پتاسیم دچار اخلال می‌گردد (Marschner, 2011). با توجه به نتایج آزمایشی که بر روی گیاه برنج انجام شده است، اثر مثبت عصاره جلبک دریایی بر شاخص‌های جوانه‌زنی بذر و رشد گیاهچه‌ها را می‌توان به حضور ترکیبات محرک رشد (نظیر جیبرلین، سیتوکینین و اکسین) در این عصاره ارتباط داد (Gupta, 1996). در آزمایش دیگری پژوهشگران اثر عصاره جلبک دریایی بر شاخص‌های جوانه‌زنی بذر گوجه‌فرنگی را بررسی نمودند، که نتایج نشان داد تیمار عصاره جلبک دریایی باعث تسریع جوانه‌زنی و افزایش طول ساقه‌چه و ریشه‌چه شد (Mahadik and Jadhav, 2015). در پژوهشی که با هدف مطالعه اثر کود مایع جلبک دریایی روی صفات جوانه‌زنی بذر، تعداد برگ و وزن میوه گیاهان بادمجان، فلفل و گوجه‌فرنگی انجام شد، پژوهشگران مشاهده نمودند که کاربرد عصاره جلبک دریایی سبب بهبود جوانه‌زنی، افزایش تعداد برگ و وزن میوه در هر سه گیاه شد (Rao and Chatterjee, 2014). در مطالعه Hernandez-Herrera و همکاران (۲۰۱۳)، اعلام شد که عصاره جلبک دریایی به‌عنوان محرک زیستی شاخص جوانه‌زنی را افزایش، زمان جوانه‌زنی را کاهش، طول ریشه‌چه و ساقه‌چه را افزایش داده است. همچنین در این پژوهش کاربرد نانوذرات اکسید روی (N-ZnO) در بستر کشت بذرهای گوجه‌فرنگی باعث شد بذرهای گوجه‌فرنگی در شرایط تنش خشکی از شاخص‌های جوانه‌زنی بذر و رشد گیاهچه بالاتری برخوردار باشند. در این راستا، نتایج مشابهی در مورد افزایش جوانه‌زنی بذر و رشد گیاهچه بر اثر تیمار با روی در شرایط تنش خشکی گزارش شده است، به‌طوری‌که کاربرد نانوذرات روی افزایش معنی‌داری در جوانه‌زنی بذر، طول و وزن خشک گیاهچه و شاخص قدرت نسبت به شاهد ایجاد کرد (Prasad *et al*., 2012). سطح ویژه بالای نانوذرات و چگالی بیشتر نواحی واکنش‌پذیر روی سطح ذره سبب واکنش‌پذیری بالای نانوذرات می‌شوند. لذا این ویژگی‌ها موجب جذب راحت‌تر کودها و سمومی می‌شوند که با این ابعاد تولید شده‌اند و نسبت به کودها و سموم رایج تأثیر بیشتری خواهند داشت (پاریاد، ۱۳۹۱).

در این تحقیق، با کاهش پتانسیل آب در بستر کشت، تجمع رادیکال‌های آزاد اکسیژن در گیاهچه گوجه‌فرنگی افزایش یافت که این امر موجب افزایش واکنش‌های پراکسیداتیو و تجمع پراکسید هیدروژن گردید. از طرفی سیستم‌های آنتی‌اکسیدان نظیر آنزیم‌های کاتالاز و پراکسیداز در گیاهچه گوجه‌فرنگی در جهت خنثی‌کردن این اثرات سوء افزایش قابل ملاحظه‌ای نشان دادند. دلایل محکمی وجود دارد که تنش خشکی در گیاهان می‌تواند سبب تجمع انواع اکسیژن واکنش‌گر مانند آنیون سوپراکسید، رادیکال‌های هیدروکسیل، اکسیژن منفرد و پراکسید هیدروژن گردد (Ahmed *et al*., 2017). این رادیکال‌های آزاد ضمن راه‌اندازی واکنش‌های پراکسیداتیو، قابلیت آسیب‌زدن به غشاء و ماکروملکول‌های ضروری مثل رنگدانه‌های فتوسنتزی، پروتئین‌ها، اسیدهای نوکلئیک و لیپیدها را دارند و منجر به تشکیل محصولات سمی نظیر مالون دی‌آلدهید می‌شوند (Tavallali *et al*., 2010). از طرفی، افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان نظیر کاتالاز و پراکسیداز در شرایط تنش خشکی می‌تواند باعث کاهش محتوی رادیکال‌های آزاد اکسیژن در سلول‌های گیاهی گردد. زمانی‌که مقدار رادیکال‌های آزاد اکسیژن نظیر پراکسید

هیدروژن در سلول زیاد شود، فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و پراکسیداز در سلول‌های گیاهی افزایش می‌یابد (Javadi *et al.*, 2018). آنزیم کاتالاز، پراکسید هیدروژن را به آب و اکسیژن تبدیل می‌کند (Nayyar and Gupta, 2006). آنزیم پراکسیداز نیز با استفاده از مواد فنولیک به‌عنوان دهنده الکترون باعث تجزیه پراکسید هیدروژن می‌گردد (Chernane *et al.*, 2015). لذا در این پژوهش، کاهش تجمع H_2O_2 در اثر تیمار با عصاره جلبک دریایی و نانواکسید روی نشان‌دهنده کاهش پراکسیداسیون لیپیدی و حفظ سلامت غشاء تحت تنش خشکی است. همسو با نتایج این پژوهش، پژوهشگران متعددی گزارش نمودند که مصرف عصاره جلبک دریایی موجب افزایش قابل‌ملاحظه فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان در گیاهان مختلفی نظیر آفتابگردان و گندم می‌گردد (Akila and Jeyados, 2010; Chernane *et al.*, 2015). محققان اثرات مثبت ضدتنشی عصاره جلبک دریایی را به حضور هورمون سیتوکینین در این ترکیب ارتباط داده‌اند. زیرا سیتوکینین‌ها در تمام مراحل جوانه‌زنی بذر فعال بوده و قادرند خسارات وارده به بذرها را که درنتیجه تنش‌های اکسیداتیو، خشکی و شوری ایجاد می‌شود را به حداقل برسانند (Miransari and Smith, 2014). سیتوکینین‌ها رادیکال‌های آزاد اکسیژن ناشی از تنش را با خنثی‌سازی مستقیم و یا با جلوگیری از تولید گونه‌های فعال اکسیژن بیشتر از طریق مهارکردن اکسیداسیون زانتین، کاهش می‌دهند (Fike *et al.*, 2001).

از سوی دیگر در این پژوهش عنصر روی با کاهش تجمع H_2O_2 و افزایش فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و پراکسیداز، آسیب اکسیداتیو ایجادشده به‌وسیله تنش خشکی را تا حدود زیادی کاهش داد، چرا که عنصر روی در القای بیان ژن‌های مسئول سنتز پروتئین‌ها و آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان مؤثر است و در پاره‌ای موارد حتی به‌عنوان کوفاکتور این دسته از آنزیم‌ها نیز محسوب می‌شود (Bagci *et al.*, 2007). در پژوهشی بیان شد که یک پاسخ سازگاریافته در برابر تنش اکسیداتیو، سنتز آنزیم‌هایی مانند کاتالاز و پراکسیداز است (Mittler, 2002). عناصر کم مصرف مانند آهن، روی، مس، منیزیم و منگنز به‌عنوان کوفاکتور، نقش مهمی را در ساختمان برخی از آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان ایفاء می‌کنند. بنابراین، زمانی که گیاهان با کمبود این عناصر روبرو شوند، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان کاهش یافته و درنتیجه باعث افزایش حساسیت به تنش‌های محیطی می‌شود (Rostami *et al.*, 2019).

نتیجه‌گیری

به‌طور کلی وقوع تنش خشکی در مرحله جوانه‌زنی بذر و رشد اولیه گیاهچه گوجه‌فرنگی باعث کاهش قابل‌ملاحظه‌ای در شاخص‌های جوانه‌زنی بذر و رشد گیاهچه شد. به‌طوری‌که با کاهش پتانسیل آب در بستر کشت بذرهای گوجه‌فرنگی درصد جوانه‌زنی استاندارد، سرعت جوانه‌زنی بذر، طول و وزن خشک گیاهچه، شاخص‌های طولی و وزنی قدرت گیاهچه کاهش یافت و میانگین زمان جوانه‌زنی افزایش پیدا کرد. در آزمون‌های بیوشیمیایی با تشدید تنش خشکی در محیط رشد گیاهچه‌های گوجه‌فرنگی میزان تجمع پراکسید هیدروژن افزایش یافت. در کنار افزایش این ترکیب سمی، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان مانند پراکسیداز و کاتالاز گیاهچه‌های گوجه‌فرنگی افزایش یافت. افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان موجب کاهش تجمع پراکسید هیدروژن در گیاهچه گوجه‌فرنگی شد. از سوی دیگر استفاده از عصاره جلبک دریایی و نانواکسید روی در سطوح مختلف تنش خشکی، باعث کاهش قابل‌توجه اثرات منفی این تنش در جوانه‌زنی بذر و رشد اولیه گیاهچه گوجه‌فرنگی شد. به نحوی که استفاده از این ترکیبات در سطوح مختلف تنش خشکی باعث افزایش قابل‌توجه درصد جوانه‌زنی استاندارد، سرعت جوانه‌زنی بذر، طول و وزن خشک گیاهچه، شاخص‌های طولی و وزنی قدرت گیاهچه و کاهش میانگین زمان جوانه‌زنی بذر گردید. همچنین استفاده از عصاره جلبک دریایی و نانواکسید روی در شرایط تنش خشکی، با افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان پراکسیداز و کاتالاز موجب کاهش تجمع پراکسید هیدروژن در گیاهچه‌های گوجه‌فرنگی شد.

منابع

اکرم‌قادری، ف.، کامکار، ب. و سلطانی، ا. (۱۳۸۷) علوم و تکنولوژی بذر. چاپ اول، انتشارات جهاد دانشگاهی مشهد.

پاریاد، س. (۱۳۹۱) اثر اندازه بذر و تغذیه گیاه مادری بر کیفیت بذور حاصل در کدوی دارویی (*Cucurbita pepo* L.). پایان‌نامه کارشناسی ارشد رشته علوم و تکولوژی بذر، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

کافی، م.، برزونی، ا.، صالحی، م.، کمندی، ع.، معصومی، ع. و نباتی، ج. (۱۳۸۸) فیزیولوژی تنش‌های محیطی در گیاهان. چاپ اول، انتشارات جهاد دانشگاهی مشهد.

Aebi, H. (1984) Catalase in vitro. Methods in Enzymology 105: 121-126.

Ahmed, A. H., Darwish, E. and Alobaidy, M. G. (2017) Impact of putrescine and 24-epibrassinolide on growth, yield and chemical constituents of cotton (*Gossypium barbadense* L.) plant grown under drought stress conditions. Asian Journal of Plant Sciences 16: 9-23.

Akila, N. and Jeyadoss, T. (2010) The potential of seaweed liquid fertilizer on the growth and antioxidant enhancement of *Helianthus annuus* L. Oriental Journal of Chemistry 26: 1353-1360.

Bagci, S. A., Ekiz, H., Yilmaz, A. and Cakmak, I. (2007) Effects of zinc deficiency and water stress on grain yield of field-grown wheat cultivars in central Anatolia. Journal of Agronomy and Crop Science 193: 198-206.

Chernane, H., Latique, S., Mansori, M. and El Kaoua, M. (2015) Salt stress tolerance and antioxidative mechanisms in wheat plants (*Triticum durum* L.) by seaweed extracts application. Journal of Agriculture and Veterinary Science 8: 36-44.

Ellis, R. H. and Roberts, E. H. (1981) The quantification of aging and survival in orthodox seeds. Seed Science and Technology 9: 373-409.

Erulan, V., Thirumaran, G., Soundarapandian, P. and Ananthan, G. (2009) Studies on the effect of *Sargassum polycystum* (C. agardh, 1824) extract on the growth and biochemical composition of *Cajanus cajan* (L.) Mill sp. American-Eurasian Journal of Agricultural and Environmental Sciences 6: 392-399.

Eshghi, S., Zare, M., Jamali, B., Ghraghani, A. and Hoseini Farahi, M. (2013) Vegetative and reproductive parameters of selva Strawberry as influenced by Algarean, brown and green foliar application. Agricultural Communications 1: 27-32.

Faheed, F. A. and Fattah, Z. A. (2008) Effect of *Chlorella vulgaris* as bio-fertilizer on growth parameters and metabolic aspects of lettuce plant. Journal of Agriculture and Social Sciences 4: 165-169.

Fike, J. H., Allen, V. G., Schmidt, R. E., Zhang, X., Fontenot, J. P., Bagley, C. P., Ivy, R. L., Evans, R. R., Coelho, R. W. and Wester, D. B. (2001) Tasco forage: I. Influence of a seaweed extract on antioxidant activity in tall fescue and in ruminants. Journal of Animal Science 79: 1011-1021.

Finch-Savage, B. (2013) Seeds. In: Physiology of Development, Germination and Dormancy (eds. Bewley, J. D. and Bradford, K. J.) Pp. 392. HWM Hilhorst H. Nonogaki, Springer, New York.

Gupta, A. B. (1966) Algal flora and its importance in the economy of rice fields. Hydrobiologia 28: 213-222.

Hernandez-Herrera, R. M., Santacruz-Ruvalcaba, F., Ruiz-Lopez, A., Norrie, J. and Hernandez-Carmona, G. (2013) Effect of liquid seaweed extracts on growth of tomato seedlings (*Lycopersicum sculentum* L.). Journal of Applied Phycology 26: 619-628.

Shu-Hsien, H., Chih-Wen, Y. U. and Lin, C. H. (2005) Hydrogen peroxide functions as a stress signal in plants. Botanical Bulletin of Academia Sinica 46: 1-10.

ISTA. (2010) International Rules for Seed Testing. Rules 2010. – International Seed Testing Association.

Javadi, A., Khomari, S., Esmaeilpour, B. and Asghari, A. (2018) Exogenous application of 24-epibrassinolide and nano-zinc oxide at flowering improves osmotic stress tolerance in harvested tomato seeds. Applied Ecology and Environmental Research 16: 4401-4417.

Kaya, M. D., Okcu, G., Atak, M., Cikili, Y. and Kolsarici, O. (2006) Seed treatments to overcome salt and drought stress during germination in sunflower (*Helianthus anuuus* L.). European Journal of Agronomy 24: 291-295.

MacAdam, J. W., Nelson, C. J. and Sharp, R. E. (1992) Peroxidase activity in the leaf elongation zone of tall fescue. Plant Physiology 99: 872-878.

Mahadik, B. B. and Jadhav, M. J. (2015) Effect of extracts of green algea *Spirogyra jugalis* Kuetzing on seed germination of tomato. Global Journal of Research Analysis 4: 227-8160.

Marschner, H. (2011) Mineral Nutrition of Higher Plants. 3rd Ed. Academic Press.

Miransari, M. and Smith, D. L. (2014) Plant hormones and seed germination. Environmental and Experimental Botany 99: 110-121.

Mittler, R. (2002) Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance. Trends in Plant Science 7: 405-410.

Nayyar, H. and Gupta, D. (2006) Differential sensitivity of C3 and C4 plants to water deficit stress: Association with oxidative stress and antioxidants. Environmental and Experimental Botany 58: 106-113.

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

Quinet, M., Angosto, T., Yuste-Lisbona, F. J., Blanchard-Gros, R., Bigot, S., Martinez, J. P. and Lutts, S. (2019) Tomato fruit development and metabolism. Frontiers in Plant Science 10: 1554.

Rao, G. M. N. and Chatterjee, R. (2014) Effect of seaweed liquid fertilizer from *Gracilaria textorri* and *Hypnea musciformis* on seed germination and productivity of some vegetable crops. Universal Journal of Plant Science 2: 115-120.

Rostami, M., Talarposhti, R., Mohammadi, H. and Demyan, M. S. (2019) Morpho-physiological response of Saffron (*Crocus sativus* L.) to particle size and rates of zinc fertilizer. Communications in Soil Science and Plant Analysis 50: 1250-1257.

Taiz, L., Zeiger, E., Moller, I. M. and Murphy, A. (2015) Plant Physiology and Development. Sinauer Associates, Sunderland.

Tavallali, V., Rahemi, M. Eshghi, S. kholdebarin, B. and Ramezanian, A. (2010) Zinc alleviates salt stress and increases antioxidant enzyme activity in the leaves of pistachio (*Pistacia vera* L. Badami) seedlings. Turkish Journal of Agriculture and Forestry 34: 349-359.

Effects of seaweed extract and nano-zinc oxide on seed germination characteristics and growth of tomato seedling under drought stress conditions

Parvin Sohrabi[1], Majid Rostami[1*], Ahmad Javadi [2]

[1] Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, Malayer University, Malayer, Iran
[2] Department of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agriculture, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran
(Received: 13/02/2022, Accepted: 24/05/2022)

Abstract

In order to study the effect of seaweed extract and nano-ZnO on germination characteristics of tomato seed, a factorial experiment was conducted based on a randomized complete block design. Preliminary germination and seedling growth tests were performed to determine the best concentration of seaweed extract and nano-ZnO. Experimental treatments included three levels of drought stress (0, 2- and 3-bar), four levels of application of nano-ZnO and seaweed extract (control, seaweed extract 4%, nano-ZnO 1200 ppm, and a combination of seaweed extract and nano-ZnO). The results showed that by decreasing the water potential standard germination percentage, seed germination rate, seedling length and dry weight, length and weight vigor indices decreased, whereas mean germination time increased. As the drought stress intensified, the amount of hydrogen peroxide accumulation was increased and also the activity of peroxidase and catalase enzymes in tomato seedlings increased. As well, application of seaweed extract and nano-ZnO at different levels of drought stress significantly reduced the negative effects of this stress on seed germination and the early growth of seedlings. Application of these compounds at different drought stress levels significantly increased the standard germination percentage, seed germination rate, seedling length and dry weight, length and weight vigor indices, but reduced seed germination time. Also, the use of seaweed extract and nano-ZnO under drought stress conditions increased the activity of peroxidase and catalase enzymes but reduced the accumulation of hydrogen peroxide in tomato seedlings.

Keywords: Antioxidant enzymes, germination rate, seedling growth, water potential

Corresponding author, Email: majidrostami7@yahoo.com