Journal of Vegetables Sciences
Vol 3, No 6, Autumn & Winter 2020, Pages (93-107)
DOI: 10.22034/iuvs.2020.105078.1040

دو فصلنامه علمی- پژوهشی علوم سبزی‌ها
سال ۳- شماره ۶- پاییز و زمستان ۱۳۹۸- صفحات (۱۰۷-۹۳)

تأثیر متاسیلیکات سدیم بر کاهش آسیب‌های اکسایشی در گیاه کاهو (*Lactuca sativa* cv. Siahoo) تحت تنش سمیت منگنز

داود رفیعی کشکسرای[1*]، فرهاد بهتاش[2]، سید بهمن موسوی[3] و احمد آقایی[4]

۱- دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد علوم و مهندسی باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران
۲- استادیار گروه علوم و مهندسی باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران
۳- دانشیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران
۴- استادیار گروه زیست‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران
* نویسنده مسئول: alpina_mp@yahoo.com
(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۲/۲۵- تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۳/۲۶)

چکیده

منگنز جزء عناصر کم‌مصرف برای گیاهان بوده و در حقیقت به‌عنوان یک آلاینده‌ی فلزی به‌حساب نمی‌آید. سمیت منگنز در بعضی خاک‌های کشاورزی به‌دلیل احیای بیش از حد آن منجر به اثرات نامطلوب در گیاهان می‌شود. سیلیسیم به‌عنوان عنصر کاهنده‌ی تنش و جلوگیری از بروز اثرات سمی بعضی عناصر شناخته شده است. به‌منظور بررسی اثرات سیلیسیم و منگنز در برگ گیاه کاهو رقم سیاهو آزمایشی با سه سطح منگنز (۰/۵، ۲/۵ و ۵/۰ میلی‌گرم در لیتر) از منبع سولفات منگنز و سه سطح سیلیسیم (صفر، ۱۴ و ۲۸ میلی‌گرم در لیتر) از منبع متاسیلیکات سدیم به‌صورت فاکتوریل و در قالب طرح کاملاً تصادفی به‌صورت کشت هیدروپونیک در گلخانه‌ی تحقیقاتی دانشکده کشاورزی مراغه صورت گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش غلظت منگنز در محلول غذایی میزان مالون‌دی‌آلدئید، آنزیم‌های آنتی اکسیدان کاتالاز، آسکوربات پراکسیداز و پراکسید هیدروژن افزایش و پروتئین محلول کل، وزن تر و خشک گیاه کاهش یافت. بیشترین کاهش وزن تر و خشک مربوط به تیمار پنج میلی‌گرم در لیتر منگنز بود. کاربرد متاسیلیکات سدیم به‌طور معنی‌داری میزان مالون‌دی‌آلدئید و پراکسید هیدروژن را کاهش و فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، آسکوربات پراکسیداز، پروتئین محلول کل، وزن تر و خشک گیاه را افزایش داد. به‌طور کلی نتایج این تحقیق نمایانگر آن است که کاربرد غلظت‌های بالای منگنز در محلول غذایی باعث کاهش رشد و عملکرد شده و در مقابل کاربرد سیلیسیم باعث تعدیل اثرات سمی منگنز و افزایش عملکرد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: پراکسید هیدروژن، تنش منگنز، سیلیسیم، مالون‌دی‌آلدئید.

مقدمه

سبزی‌ها به‌علت ارزش غذایی بالا در اکثر مناطق دنیا جزء غذاهای اصلی محسوب می‌شوند. سبزی‌ها به‌لحاظ تازه‌خوری و فرآوری زیاد، اهمیت زیادی را در بین گیاهان زراعی به خود اختصاص داده‌اند و از نظر تولید جهانی در مقام چهارم پس از گندم (*Triticum aestivum* L.)، برنج (*Oryza sativa* L.) و ذرت (*Zea mays* L.) قرار دارند (Peyvast, 2006).

کاهو (*Lactuca sativa* L.) گیاهی یک‌ساله از خانواده‌ی Compositae و روزبلند است که در تابستان به گل می‌نشیند (Peyvast, 2006). کاهو

حاوی مقادیر قابل‌توجهی از آنتی‌اکسیدان‌های محلول در چربی مانند Lutein یا Tocopherols و آنتی‌اکسیدان‌های محلول در آب نظیر ویتامین ث و انواع ترکیبات فنولیک (اسیدهای فنولیک و آنتوسیانیدها) است (Nicolle *et al*., 2004). سال‌های اخیر به‌علت توسعه‌ی منابع ژنی، تولید ارقام متحمل به انواع تنش‌های زیستی و غیرزیستی، اهمیت فعالیت آنتی‌اکسیدانی و ارزش تغذیه‌ای کاهو، تولید جهانی آن افزایش قابل‌توجهی داشته است (Mou, 2008).

یکی از عوارض صنعتی‌شدن جوامع، مصرف مواد شیمیایی مختلف است که به‌طور عمده بسیار خطرناک و کشنده هستند. فلزات سنگین نیز جزء این دسته از آلاینده‌ها به‌حساب می‌آیند (Shabankhani *et al*., 2001). فلزات سنگین عناصری با جرم اتمی بیشتر از ۸/۵۵ مول در گرم هستند که غیرقابل تجزیه زیستی بوده و تمایل به تجمع در بخش‌های زیستی دارند و زمانی که مقدار آنها بیش از حد مجاز است می‌توانند سلامتی انسان‌ها را به‌خطر اندازند (Gardea-Torresdey *et al*., 2005). جذب فلزات سنگین از اراضی آلوده به‌وسیله‌ی گیاهان و به‌ویژه محصولات کشاورزی یکی از مهم‌ترین راه‌های ورود این عناصر به زنجیره‌ی غذایی است (Salehipour *et al*., 2015). در دو دهه‌ی گذشته مشخص شد که آلاینده‌های محیطی خیلی بیشتر از آن چیزی هستند که قبلاً تصور می‌شد و بعضی از این آلاینده‌ها به‌مدت طولانی در محیط باقی مانده و آن‌قدر تجمع می‌یابند که باعث آسیب به انسان می‌شوند (Gratao *et al*., 2005).

منگنز یکی از عناصر کم‌مصرف برای گیاهان بوده و مقدار کل آن در خاک بر اساس نوع مواد مادری بین ۶۰۰ الی ۲۰۰ و متوسط آن ۴۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک است. در حالی‌که حد مطلوب قابل‌استفاده‌ی آن به‌روش DTPA به‌طور متوسط ۱۲-۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک است (Jones, 2012). تماس بیش از حد با منگنز باعث ایجاد سمیت شده و در انسان اثر خودش را به‌طور عمده در سیستم عصبی مرکزی آشکار می‌سازد و علایمی شبیه به علایم بیماری پارکینسون دارد (Zheng & Crossgroveej, 2004).

هر چند سیلیسیم (Si) عنصر ضروری در گیاهان به‌حساب نمی‌آید (Guntzer *et al*., 2012). اما بررسی‌ها نشان داده است که تأثیر مثبتی در بهبود رشد و عملکرد گیاه به‌ویژه در شرایط تنش دارد (Balakhnina & Borkowska, 2013). این عنصر باعث بهبود تعادل مواد غذایی، کاهش سمیت فلزات، بهبود ویژگی‌های مکانیکی بافت‌های گیاهی و افزایش تحمل در برابر تنش‌های غیرزیستی می‌شود (Liang *et al*., 2005). تحقیقات نشان داده، سیلیسیم باعث کاهش تأثیر سمیت منگنز، آلومینیوم و شوری شده است (Epstein, 1999).

Pessarakli و Haghighi (۲۰۱۳) تأثیر مثبت غلظت‌های یک و دو میلی‌مولار سیلیکات پتاسیم بر ویژگی‌های رویشی و فتوسنتز گوجه‌فرنگی (*Solanum lycopersicum* L.) در شرایط تنش شوری را نشان دادند. سیلیسیم با تغییر فعالیت آنزیم‌های پاداکسنده (Antioxidant) در تحمل به سمیت منگنز در خیار (*Cucumis sativus* L.) نقش مهمی را ایفا می‌کند (Shi *et al*., 2005). سیلیسیم در نگهداری آب سلول نقش مهمی داشته و همین امر باعث ایجاد تحمل و افزایش رشد گیاه در شرایط تنش می‌شود (Romero-Aranda *et al*., 2006).

از مزایای کشت بدون خاک یا آبکشت، آلودگی کمتر به بیماری‌های خاک‌زی، تولید بیشتر محصول، وابستگی نداشتن به کیفیت خاک،

کنترل دقیق آب، مواد غذایی و سایر شرایط محیطی است (Valance *et al*., 2011). کاهو اغلب در گلخانه در سیستم آبکشتی (هیدروپونیک) در محلول‌های غذایی فاقد سیلیسیم رشد می‌کند.

با توجه به سطح زیر کشت بالای کاهو در ایران و جهان به‌عنوان یک سبزی فصل خنک و سالادی، این پژوهش با هدف بررسی اثر متاسیلیکات سدیم بر رشد و عملکرد گیاه کاهو تحت شرایط مقادیر مختلف غلظت منگنز انجام شد.

مواد و روش‌ها

به‌منظور بررسی اثرات سیلیسیم و منگنز در برگ گیاه کاهو، آزمایشی در گلخانه‌ی تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه مراغه با مختصات جغرافیایی ۳۷ درجه و ۲۳ دقیقه عرض شمالی و ۴۶ درجه و ۱۶ دقیقه طول شرقی و ۱۴۸۵ متر ارتفاع از سطح دریا در سال ۱۳۹۳ اجرا گردید. آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی با سه تکرار انجام شد. فاکتورهای مورد بررسی شامل منگنز از منبع سولفات منگنز ($MnSO_4.H_2O$) در سه سطح (۰/۵، ۲/۵، ۵ میلی‌گرم در لیتر) و سیلیسیم از منبع متاسیلیکات سدیم ($Na_2SiO_3.5H_2O$) در سه سطح (صفر، ۱۴، ۲۸ میلی‌گرم در لیتر) بود.

آزمایش به‌صورت گلدانی و در محیط گلخانه به‌صورت هیدروپونیک انجام گرفت. از گلدان‌های پلاستیکی با قطر دهانه و ارتفاع به‌ترتیب ۱۹ و ۱۵ سانتی‌متری و از ماسه به‌عنوان بستر کشت استفاده گردید. آزمایش با استفاده از محلول غذایی هوگلند انجام گرفت. pH محلول جهت افزایش جذب عناصر غذایی با استفاده از اسید کلریدریک یک مولار در حدود ۶/۵ تنظیم شد. بعد از استقرار کامل گیاهچه‌های کاهو، تیمارها شروع و مقدار مصرف محلول براساس اندازه‌ی گیاهچه‌ها و در طول زمان رشد متفاوت بود و به‌طور متوسط به هر گلدان مقدار یک لیتر محلول حاوی تیمارها داده شد. دو ماه بعد از اعمال تیمارها، وزن تر، وزن خشک، پروتئین محلول کل، فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و آسکوربات پراکسیداز، غلظت مالون‌دی‌آلدئید و پراکسید هیدروژن اندازه‌گیری شد.

جدول ۱- ترکیب و غلظت نمک‌ها در محلول غذایی هوگلند تغییریافته (Coolong *et al*., 2004)

نوع نمک	غلظت (میلی‌گرم بر لیتر)	نوع نمک	غلظت (میلی‌گرم بر لیتر)
$Ca(NO_3)_2.4H2O$	۴۷۰	H_3BO_3	۲/۸۶
KNO_3	۳۰۰	$MnSO_4.\ H_2O$	۰/۲۰
$MgSO_4.7H_2O$	۲۵۰	$ZnSO_4.7H_2O$	۰/۲۲
$NH_4H_2PO_4$	۶۰	$Na_2MoO_4.2H_2O$	۰/۰۲
Fe-EDDHA	۱۰۰	$CuSO_4.5H_2O$	۰/۰۸

اندازه‌گیری وزن تر و وزن خشک

به‌طور تصادفی از هر واحد آزمایشی یک بوته برداشت و بلافاصله وزن تر اندام‌های هوایی اندازه‌گیری گردید. سپس اندام‌های هوایی به‌مدت ۴۸ ساعت در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد در دستگاه آون (UF55/UN55, Germany) قرار داده شدند تا وزن خشک آنها تعیین گردد. وزن تر و وزن خشک به‌وسیله‌ی ترازوی دیجیتالی با دقت ۰/۱ گرم (Germany Basic Sartorius,) اندازه‌گیری شد.

سنجش فعالیت پروتئین محلول کل

برای استخراج عصاره‌ی پروتئینی ۰/۵ گرم ماده گیاهی با استفاده از نیتروژن مایع در هاون چینی (روی یخ) ساییده شده و روی ماده گیاهی کاملاً پودر شده ۱/۵ میلی‌لیتر بافر فسفات‌پتاسیم ۵۰ میلی‌مولار (pH=7) و ۰/۰۲۵ گرم پلی‌وینیل‌پیرولیدون (PVP) اضافه شد. مخلوط حاصل بلافاصله پس از ورتکس، به‌مدت ۳۰ دقیقه در دمای چهار درجه سانتی‌گراد در ۱۵۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ شد. بعد از این مرحله محلول رویی برداشته شد. برای اندازه‌گیری میزان پروتئین کل با استفاده از عصاره‌ی تهیه شده، معرف رنگی کوماسی برلیانت بلو- G۲۵۰ در اتانول ۹۵ درصد و ارتوفسفریک اسید ۸۵ درصد انجام شد (Bradford, 1976). از پروتئین گاما گلوبولین پلاسمای گاوی (Bovine Serum Albumin)، به‌عنوان پروتئین استاندارد برای رسم منحنی استاندارد استفاده شد. بدین منظور محلول رویی آنزیمی استخراج شده به ۲/۵ میلی‌لیتر از معرف برادفورد اضافه و محتویات لوله‌ها پس از مخلوط شدن به‌مدت ۱۵ دقیقه در تاریکی قرار گرفتند. جذب نمونه‌ها در طول موج ۵۹۵ نانومتر با دستگاه اسپکتروفتومتر (UV-1800, Shimadzu, Japan) خوانده شد و غلظت پروتئینی بر اساس مقایسه با منحنی استاندارد تهیه شده، محاسبه گردید.

سنجش فعالیت آنزیم کاتالاز

بررسی میزان فعالیت آنزیم کاتالاز (CAT) با بررسی کاهش مقدار پراکسید هیدروژن در طول موج ۲۴۰ نانومتر انجام شد. مخلوط واکنش شامل بافر فسفات ۵۰ میلی‌مولار (pH=7) و پراکسید هیدروژن ۱۵ میلی‌مولار بود. واکنش با افزودن ۱۰۰ میکرولیتر عصاره‌ی آنزیمی در حجم نهایی سه میلی‌لیتر آغاز گردید. تغییرات جذب در طول موج ۲۴۰ نانومتر به‌مدت سه دقیقه ثبت شد. سپس فعالیت آنزیم به‌صورت تغییرات جذب در دقیقه به‌ازای وزن تر بیان گردید (Dazy *et al*., 2008). برای محاسبه واحد آنزیمی از ضریب خاموشی ۴۰ میلی‌مولار در سانتی‌متر استفاده شد.

سنجش فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز

برای سنجش فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز، مخلوط واکنش شامل بافر فسفات ۲۵۰ میلی‌مولار (pH=۷)، آب اکسیژنه ۱/۲ میلی‌مولار، اسید آسکوربیک ۰/۵ میلی‌مولار و EDTA ۰/۱ میلی‌مولار بود. با اضافه کردن آب اکسیژنه به مخلوط واکنش فعالیت آنزیمی شروع شد. کاهش جذب نور به‌علت پراکسیداسیون اسید آسکوربیک در طول موج ۲۹۰ نانومتر به‌مدت دو دقیقه با دستگاه اسپکتروفتومتر (UV-1800, Shimadzu, Japan) خوانده شد. برای محاسبه فعالیت آنزیم از تغییرات جذب در یک دقیقه و ضریب خاموشی ۲/۸ میلی‌مولار در سانتی‌متر استفاده شد (Dazy *et al*., 2008).

غلظت مالون‌دی‌آلدئید

برای سنجش غلظت مالون‌دی‌آلدئید ۰/۱ گرم بافت گیاهی در هاون چینی (بر روی یخ و دمای چهار درجه سانتی‌گراد) ساییده شد. سپس به آن ۱/۵ میلی‌لیتر تری‌کلرواستیک‌اسید یک درصد اضافه و ورتکس گردید. محلول حاصله در شرایط ۱۰۰۰۰ دور و به‌مدت ۱۰ دقیقه در دمای چهار درجه سانتی‌گراد سانتریفیوژ شد. روی ۰/۵ میلی‌لیتر از محلول رویی، یک میلی‌لیتر محلول تری‌کلرواستیک ۲۰ درصد که حاوی ۰/۵ درصد تیوباربیوتیک‌اسید بود اضافه شد. سپس مخلوط واکنش به‌مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۹۵ درجه سانتی‌گراد درون حمام بخار قرار گرفت تا واکنش خاتمه یابد. بعد از ۱۰ دقیقه سانتریفیوژ نمونه‌ها در ۱۰۰۰۰ دور جذب

محلول رویی حاصل در دو طول موج ۵۳۲ و ۶۰۰ نانومتر خوانده شد. ضریب‌خاموشی ۱۵۵ میلی‌مولار در سانتی‌متر نیز در محاسبه‌ی غلظت مالون‌دی‌آلدئید لحاظ گردید (Heath & Packer, 1968).

غلظت پراکسید هیدروژن

به‌منظور اندازه‌گیری پراکسید هیدروژن، ۰/۱ گرم نمونه‌ی گیاهی با پنج میلی‌لیتر محلول یک درصد تری‌کلرواستیک اسید درون هاون چینی عصاره‌گیری شد. مخلوط حاصله به‌مدت ۱۵ دقیقه با دور ۱۲۰۰۰ و دمای چهار درجه سانتی‌گراد سانتریفیوژ شد. سپس به ۰/۵ میلی‌لیتر از محلول رویی ۰/۵ میلی‌لیتر بافر فسفات پتاسیم ۵۰ میلی‌مولار (pH=7) و یک میلی‌لیتر یدید پتاسیم یک مولار اضافه گردید. جذب نمونه‌ها در طول موج ۳۹۰ نانومتر با دستگاه اسپکتروفتومتر خوانده شد (Velikova *et al*., 2000).

تجزیه‌ی آماری داده‌ها

تجزیه واریانس داده‌ها توسط نرم‌افزار SAS 9.2 و مقایسه میانگین تیمارها با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد و رسم شکل‌ها با استفاده از نرم‌افزار Excel انجام شد.

نتایج و بحث

تأثیر متاسیلیکات سدیم بر وزن تر و خشک برگ کاهو

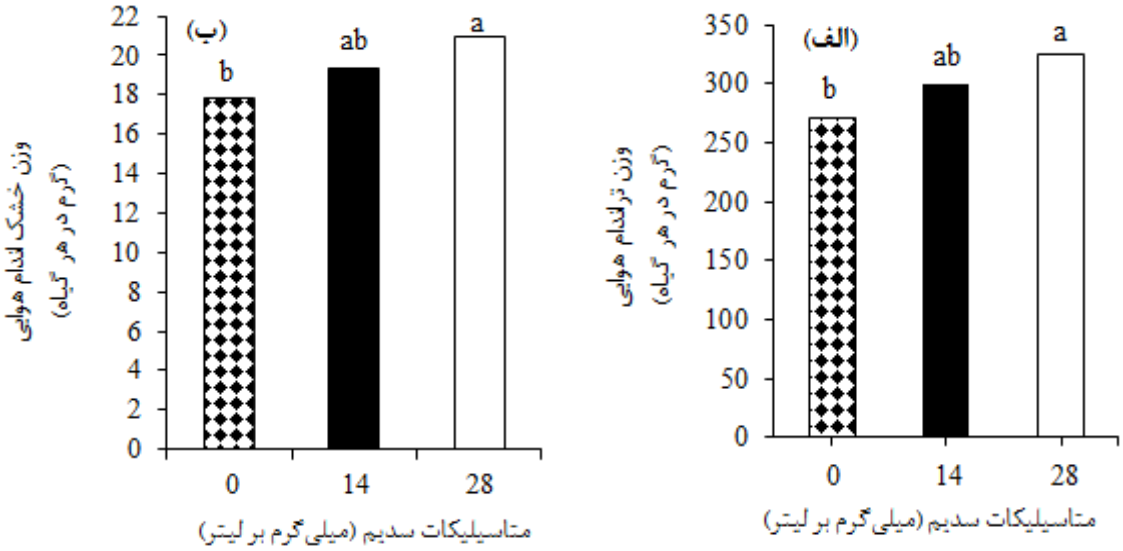
مقایسه میانگین‌ها نشان داد که با کاربرد سیلیسیم وزن تر و خشک در گیاه کاهو به‌ترتیب ۱۵ و ۱۳ درصد نسبت به شاهد افزایش یافت (شکل ۱ الف و ب). مقایسه میانگین‌ها نشان داد که با کاربرد متاسیلیکات سدیم وزن تر برگ از ۲۷۲/۴۹ گرم در تیمار شاهد (صفر میلی‌گرم در لیتر) به ۲۹۹/۹۲ و ۳۲۵/۳۵ گرم به‌ترتیب در تیمارهای ۱۴ و ۲۸ میلی‌گرم بر لیتر افزایش یافت (شکل ۱ الف). همچنین مقایسه میانگین‌ها نشان داد که در اثر کاربرد سیلیسیم وزن خشک از ۱۷/۸۲ گرم در تیمار شاهد (صفر میلی‌گرم در لیتر) به ۱۹/۴۱ و ۲۰/۹۱ گرم در هر گیاه به‌ترتیب در تیمارهای ۱۴ و ۲۸ میلی‌گرم بر لیتر افزایش یافت (شکل ۱ ب).

اگرچه سیلیسیم به‌عنوان یک عنصر ضروری برای گیاهان عالی در نظر گرفته نمی‌شود اما ثابت شده است که برای توسعه و رشد بسیاری از گونه‌های گیاهی مفید است (Shi *et al*., 2005). سیلیسیم در دیواره‌های سلولی اپیدرم هر دو سطح برگ تجمع می‌یابد. در نتیجه باعث کاهش اتلاف آب از طریق کوتیکول می‌شود. همچنین هنگامی که تعرق زیاد است از تخریب آوندها جلوگیری کرده و از شدت تعرق گیاه می‌کاهد (Jhanshah & Najafi, 2011). سیلیسیم بعد از جذب توسط ریشه، به بخش هوایی گیاه انتقال می‌یابد و روی دیواره‌ی سلول‌ها به‌صورت پلیمر هیدراته، سیلیکای بی‌شکل، لایه دوتایی سیلیکا-کوتیکول و لایه دوتایی سیلیکا- سلولز در سطح برگ و ساقه ذخیره می‌شود و از شدت تعرق می‌کاهد (Ma & Yamaji, 2006). Zhu و همکاران (۲۰۰۴) نیز به نتایج مشابهی در مورد افزایش وزن شاخساره‌ی دو رقم خیار با کاربرد سیلیسیم دست یافتند.

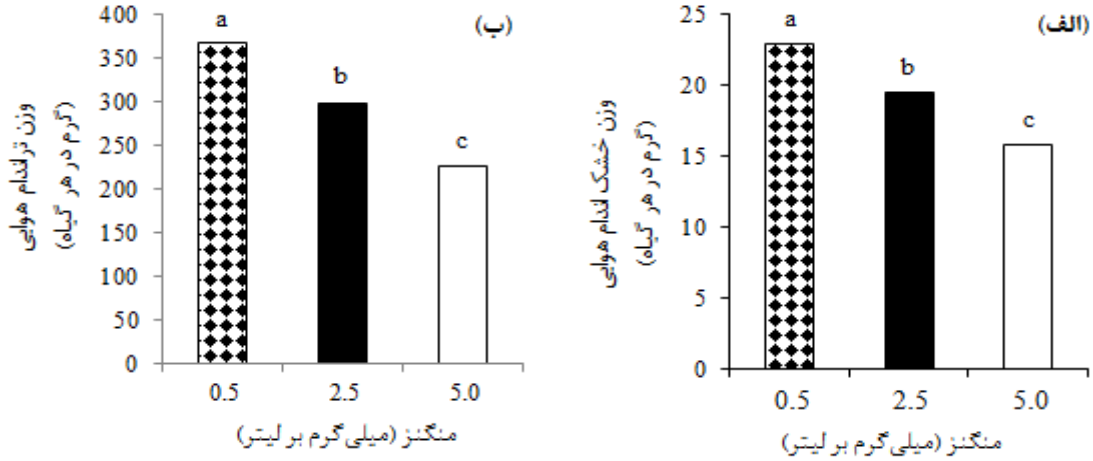
تأثیر منگنز بر وزن تر و خشک برگ کاهو

مقایسه میانگین‌ها نشان داد که با کاربرد منگنز وزن تر و خشک در گیاه کاهو به‌طور متوسط به‌ترتیب ۳۰ و ۲۳ درصد نسبت به شاهد کاهش یافت (شکل ۲ الف و ب). مقایسه میانگین‌ها نشان داد که با کاربرد منگنز وزن تر از ۳۶۹/۶۸ گرم در بوته در تیمار ۰/۵ میلی‌گرم در لیتر به ۳۰۰/۱۳ و ۲۲۵/۹۵ گرم در بوته به‌ترتیب در تیمارهای ۲/۵ و پنج میلی‌گرم بر لیتر کاهش یافت که اختلاف بین هر سه تیمار معنی‌دار بود (شکل ۲ الف). بیشترین

میزان وزن تر مربوط به کمترین سطح منگنز (۰/۵ میلی‌گرم در لیتر) بود. به‌عبارت دیگر با افزایش سطح منگنز، وزن تر برگ کاهو کاهش یافت (شکل ۲ الف). مقایسه میانگین‌ها نشان داد که با کاربرد منگنز وزن خشک از ۲۲/۸۸ گرم در بوته در تیمار شاهد (۰/۵ میلی‌گرم در لیتر) به ۱۹/۵۱ و ۱۵/۷۵ گرم در بوته به‌ترتیب در تیمارهای ۲/۵ و پنج میلی‌گرم بر لیتر کاهش یافت که اختلاف بین هر سه تیمار معنی‌دار بود (شکل ۲ ب). با توجه به نتایج پژوهش حاضر کمترین وزن تر و وزن خشک مربوط به بیشترین سطح منگنز (پنج میلی‌گرم بر لیتر) بود (شکل ۲ ب).



شکل ۱- تأثیر غلظت‌های مختلف متاسیلیکات سدیم بر وزن تر (الف) و وزن خشک (ب) در برگ کاهو



شکل ۲- تأثیر غلظت‌های مختلف منگنز بر وزن تر (الف) و وزن خشک (ب) در برگ کاهو

حروف مشابه بیانگر عدم اختلاف معنی‌داری بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد می‌باشند.

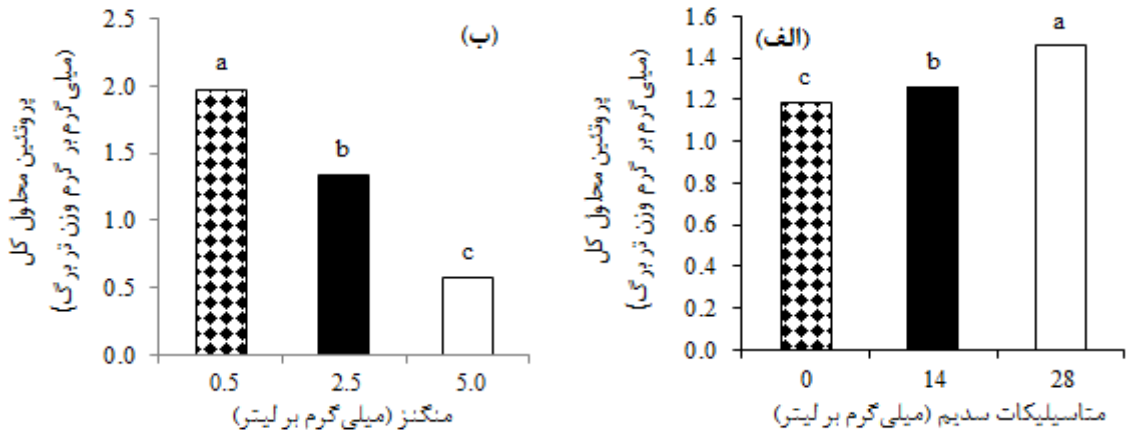
از اثرات فلزات سنگین بر بیوسنتز کلروفیل می‌توان به جانشین‌شدن فلزات سنگین مانند منگنز به‌جای منیزیم (Mg) مرکزی مولکول کلروفیل اشاره کرد که این جانشینی سبب کاهش دریافت

نور به‌وسیله‌ی کلروفیل شده و منجر به زردی برگ‌ها و در نهایت کاهش فتوسنتز می‌شود (Jiang & Huang, 2001). حضور فلزات سنگین مانند کادمیوم منجر به کاهش سرعت رشد، تبخیر و تعرق و جذب یون توسط گیاه می‌شود و با کاهش جذب آب و غلظت یون‌ها، فعالیت ریشه مختل و به‌تبع آن وزن تر و خشک گیاه کاهش می‌یابد (Veselov *et al*., 2003). مهار رشد ریشه توسط منگنز اضافی و به‌دنبال آن کاهش وزن تر و خشک به‌دلیل اختلال در رابطه‌ی اسموتیکی گیاه بوده و کاهش رشد ساقه بر اثر افزایش سمیت منگنز به‌دلیل افزایش فعالیت ایندول استیک اکسیداز است (Shi & Zhu, 2008). مشابه با این نتایج سمیت کادمیوم باعث کاهش وزن تر و خشک ریشه و اندام هوایی گیاه جو (Metwally *et al*., 2003) و کاهش وزن خشک گیاه لوبیا به‌میزان ۳۵ درصد (Rady, 2011) گردید.

پروتئین محلول کل

کاربرد متاسیلیکات سدیم باعث افزایش پروتئین محلول کل گردید (شکل ۳ الف). با افزایش غلظت منگنز در محلول غذایی غلظت پروتئین محلول کل در برگ کاهو کاهش و در غلظت پنج میلی‌گرم بر لیتر به حداقل مقدار خود رسید (شکل ۳ ب).

پروتئین‌های زیادی به‌طور عمده در پاسخ به تنش‌های محیطی مختلف تغییر می‌یابند و این کار باعث به‌وجود آمدن نتایج متفاوت در میزان پروتئین کل در شرایط تنش‌های مختلف می‌شود (Ranjan *et al*., 2001). فلزات سنگین با اختلال در متابولیسم نیتروژن از طریق مهار فعالیت آنزیم‌هایی مانند گلوتامین سنتاز، گلوتامات سنتتاز و نیترات ردوکتاز و فرآیند احیای نیترات سبب کاهش تولید پروتئین شده و رشد را متوقف می‌کند (Wang *et al*., 2008). Khudsar و Iqbal (۲۰۰۱) کاهش میزان پروتئین کل با افزایش کادمیوم را گزارش نمودند که این روند کاهش معنی‌دار پروتئین در گیاه کاهو را می‌توان هم به تخریب پروتئین و هم کاهش سنتز آن نسبت داد (Hagar *et al*., 1996). به گزارش Palma و همکاران (۲۰۰۲) کاهش مقدار پروتئین در گیاه تحت تنش سمیت آلومینیوم می‌تواند به‌دلیل افزایش فعالیت پروتئازها باشد. افزایش در میزان پروتئین محلول در تیمار سیلیسیم به‌دلیل ساخت پروتئین‌های جدید و با افزایش سطح پروتئین‌های مرتبط با سازگاری گیاه به شرایط تنش است (Gunes *et al*., 2005). افزایش میزان پروتئین محلول کل در اثر اعمال سیلیسیم در خیار (Zhu *et al*., 2004) و گوجه‌فرنگی (Al-aghabary, 2005) تحت تنش شوری گزارش شده است. سیلیسیم از راه تأثیر مثبت بر شمار پلی‌زوم‌ها باعث افزایش میزان پروتئین محلول در شرایط تنش می‌شود (Zhu *et al*., 2004).



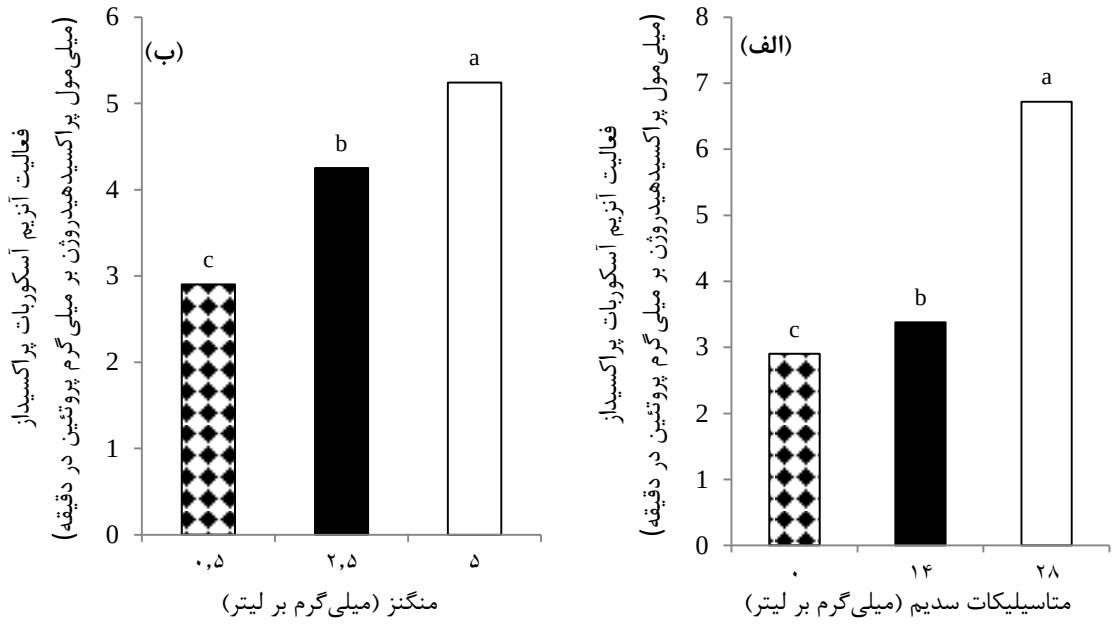
شکل۳- تأثیر غلظت‌های مختلف متاسیلیکات سدیم (الف) و منگنز (ب) بر میزان پروتئین محلول کل در برگ کاهو

حروف مشابه بیانگر عدم اختلاف معنی‌داری بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد می‌باشند.

فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز

با کاربرد متاسیلیکات سدیم فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز در برگ گیاه کاهو نسبت به شاهد افزایش یافت (شکل ۴ الف). با افزایش غلظت منگنز در محلول غذایی فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز در برگ کاهو نسبت به شاهد افزایش یافت (شکل ۴ ب).

سلول‌های گیاهی برای حفاظت در برابر آسیب‌های اکسایشی مجهز به یک سامانه‌ی جاروب کننده‌ی (Scavenger) رادیکال‌های آزاد هستند. این سامانه شامل آنزیم‌های پاداکسنده مانند کاتالاز، پراکسیداز و سوپراکسید دیسموتاز و نیز سامانه‌ی غیرآنزیمی مانند گلوتاتیون و آسکوربات هستند (Mittler *et al.*, 2004). طبق تحقیقاتی Achary و همکاران (۲۰۰۸) گزارش کردند میزان فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز در پیاز (*Allium cepa* L.) تحت تنش سمیت آلومینیوم افزایش می‌یابد. Eraslan و همکاران (۲۰۰۸) با انجام آزمایش‌هایی روی گیاه اسفناج (*Spinacia oleracea* L.) تحت سمیت بور به این نتیجه رسیدند که سمیت بور باعث افزایش فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، آسکوربات پراکسیداز و سوپراکسید دیسموتاز می‌شود و کاربرد سلیسیم هم باعث کاهش سمیت بور در این گیاه می‌گردد. Feng و همکاران (۲۰۰۹) با انجام پژوهشی بر روی گیاه خیار تحت سمیت منگنز گزارش کردند که سمیت منگنز باعث افزایش فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز در کلروپلاست‌های برگ خیار می‌شود. همچنین گزارش نمودند که کاربرد سیلیسیم نیز باعث افزایش فعالیت این آنزیم می‌شود.

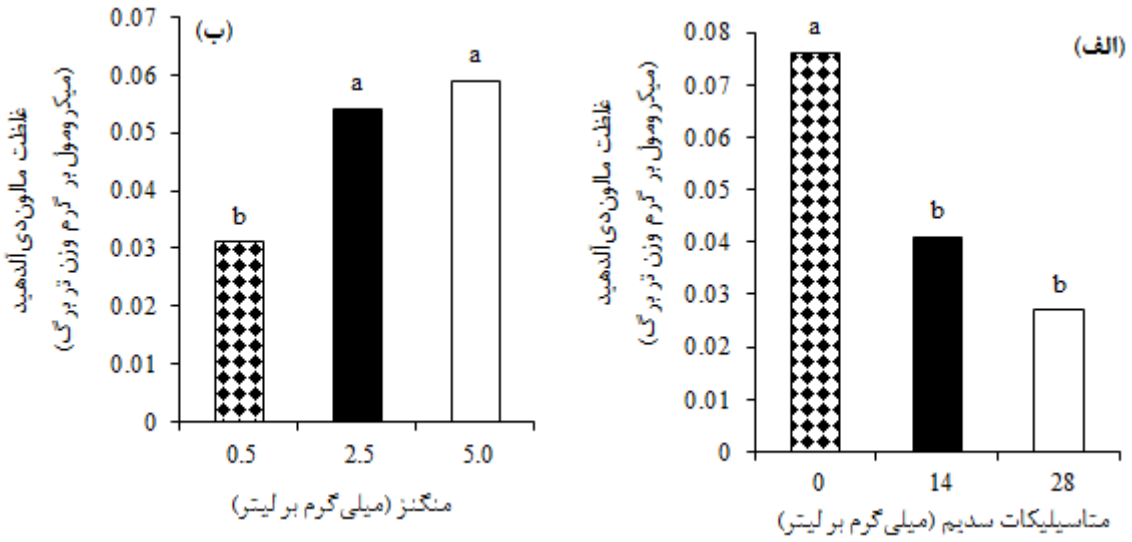


شکل۴- تأثیر غلظت‌های مختلف و متاسیلیکات سدیم (الف) و منگنز (ب) بر فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز در برگ کاهو

حروف مشابه بیانگر عدم اختلاف معنی‌داری بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد می‌باشند.

مالون‌دی‌آلدئید (MAD)

با کاربرد متاسیلیکات سدیم غلظت مالون‌دی‌آلدئید از ۰/۰۷۶ میکرومول بر گرم وزن تر برگ در تیمار شاهد (میلی‌گرم در لیتر) به ۰/۰۴۱ و ۰/۰۲۷ میکرومول بر گرم وزن تر برگ به‌ترتیب درتیمارهای ۱۴ و ۲۸ میلی‌گرم بر لیتر کاهش یافت که اختلاف بین هر سه تیمار متاسیلیکات سدیم معنی‌دار بود (شکل ۵ الف). نتایج به‌دست آمده از این پژوهش نشان می‌دهد، با افزایش غلظت منگنز میزان مالون‌دی‌آلدئید به‌طور معنی‌داری افزایش می‌یابد (شکل ۵ ب). بر اثر کاربرد منگنز غلظت مالون‌دی‌آلدئید از ۰/۰۳۱ میکرومول بر گرم وزن تر برگ کاهو در تیمار شاهد (۰/۵ میلی‌گرم در لیتر) به ۰/۰۵۴ و ۰/۰۵۹ میکرومول بر گرم وزن تر برگ به‌ترتیب در تیمارهای ۲/۵ و پنج میلی‌گرم بر لیتر افزایش یافت. بیشترین غلظت مالون‌دی‌آلدئید مربوط به تیمار پنج میلی‌گرم بر لیتر منگنز بود (شکل ۵ ب). سمیت فلزات سنگین باعث آسیب‌های اکسایشی به‌وسیله تولید گونه‌های واکنش‌گر اکسیژن می‌شود. همچنین زیادی مواد اکسیداتیو باعث افزایش موادی نظیر مالون‌دی‌آلدئید شده و پراکسیداسیون لیپیدها افزایش می‌یابد (Shi *et al.*, 2005). یکی از مکانیسم‌های بروز سمیت در بافت‌های گیاهی در حضور فلزات سنگین مانند منگنز تولید رادیکال‌های آزاد و ایجاد آسیب‌های اکسایشی است (Bidwell *et al.*, 2002).



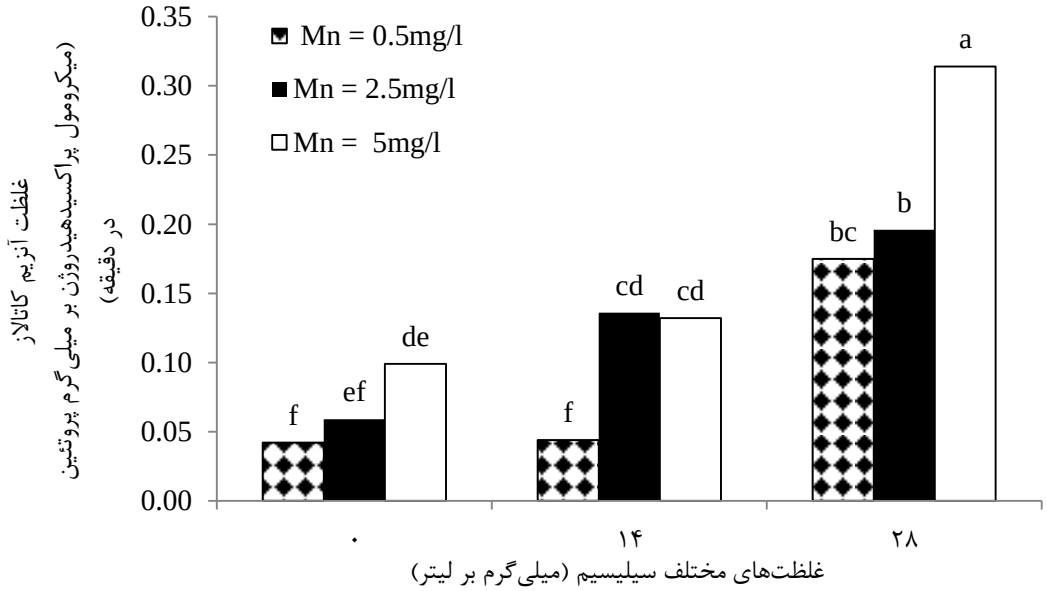
شکل۵- تأثیر غلظت‌های مختلف متاسیلیکات سدیم (الف) و منگنز (ب) بر غلظت مالون‌دی‌آلدئید در برگ کاهو

حروف مشابه بیانگر عدم اختلاف معنی‌داری بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد می‌باشند.

مالون‌دی‌آلدئید محصول انحلال و متلاشی‌شدن اسیدهای چرب غیراشباع است که به‌عنوان یک زیست نشانگر (Biomarker) برای پراکسیداسیون چربی‌ها به‌کار می‌رود (Ayvaz *et al.*, 2013). پراکسیداسیون لیپیدها در نتیجه رادیکال‌های آزاد ایجاد شده و بازتابی از خسارت ناشی از تنش‌ها در سطح سلولی می‌باشند؛ بنابراین مقدار مالون‌دی‌آلدئید که در طی پراکسیداسیون لیپید ایجاد می‌شود به‌عنوان شاخصی از آسیب اکسیداسیون محسوب می‌گردد. مالون‌دی‌آلدئید می‌تواند با اتصال به پروتئین‌های غشاء و آنزیم‌ها منجر به آسیب‌رسانی به ساختار و عمل غشاء شود. پراکسیداسیون چربی همچنین می‌تواند از راه عمل لیپواکسیژناز (یک آنزیم گیاهی که اکسیژن مولکولی را به اسیدهای چرب برای تشکیل هیدروپراکسیدهای چربی ترکیب می‌کند) آغاز شود (El-Feky *et al.*, 2014). افزودن سیلیسیم به محیط رشد گیاه نفوذپذیری دیواره‌ی پلاسمای سلول‌های برگ را کاهش داده و باعث کاهش پراکسیداسیون لیپید می‌شود و از دیواره سلولی در شرایط تنش خشکی و گرما محافظت و از تخریب آن جلوگیری می‌کند (Liang, 1999). Shi و Zhu (۲۰۰۸) گزارش کردند که غلظت بالای منگنز باعث افزایش محتوای مالون‌دی‌آلدئید در گیاه چای (*Camellia sinensis* L.) می‌شود. با کاربرد متاسیلیکات سدیم میزان مالون‌دی‌آلدئید در برگ کاهو در شرایط منگنز اضافی به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. سیلیسیم باعث کاهش غلظت مالون‌دی‌آلدئید در برگ‌های گیاهان آلوده به کادمیوم شده و از این طریق آسیب اکسایشی ناشی از سمیت کادمیوم را کاهش می‌دهد (Epstein, 1999). در آزمایشی که Eraslan و همکاران (۲۰۰۸) انجام دادند، آسیب‌پذیری غشاء که با غلظت مالون‌دی‌آلدئید نشان داده می‌شود با شوری افزایش و با تیمار سیلیسیم به‌طور قابل‌توجهی کاهش یافت. کاربرد سیلیسیم باعث کاهش در غلظت مالون‌دی‌آلدئید، و در پی آن غلظت پراکسید هیدروژن می‌شود (Eraslan *et al.*, 2008).

فعالیت آنزیم کاتالاز

با افزایش غلظت متاسیلیکات سدیم در محلول غذایی، فعالیت آنزیم کاتالاز به‌طور متوسط ۴۴ درصد نسبت به تیمار شاهد افزایش پیدا کرد. همچنین با افزایش غلظت منگنز در محلول غذایی میانگین فعالیت آنزیم کاتالاز ۸۸ درصد نسبت به تیمار شاهد افزایش یافت. بیشترین فعالیت آنزیم کاتالاز مربوط به بیشترین سطح منگنز (پنج میلی‌گرم بر لیتر) توأم با بیشترین سطح متاسیلیکات سدیم (۲۸ میلی‌گرم بر لیتر) است. کمترین فعالیت آن هم مربوط به کمترین سطح منگنز (۰/۵ میلی‌گرم بر لیتر) توأم با کمترین سطح متاسیلیکات سدیم (صفر میلی‌گرم بر لیتر) است (شکل ۶).



شکل ۶- اثرمتقابل سطوح مختلف منگنز و متاسیلیکات سدیم بر فعالیت آنزیم کاتالاز در برگ گیاه کاهو

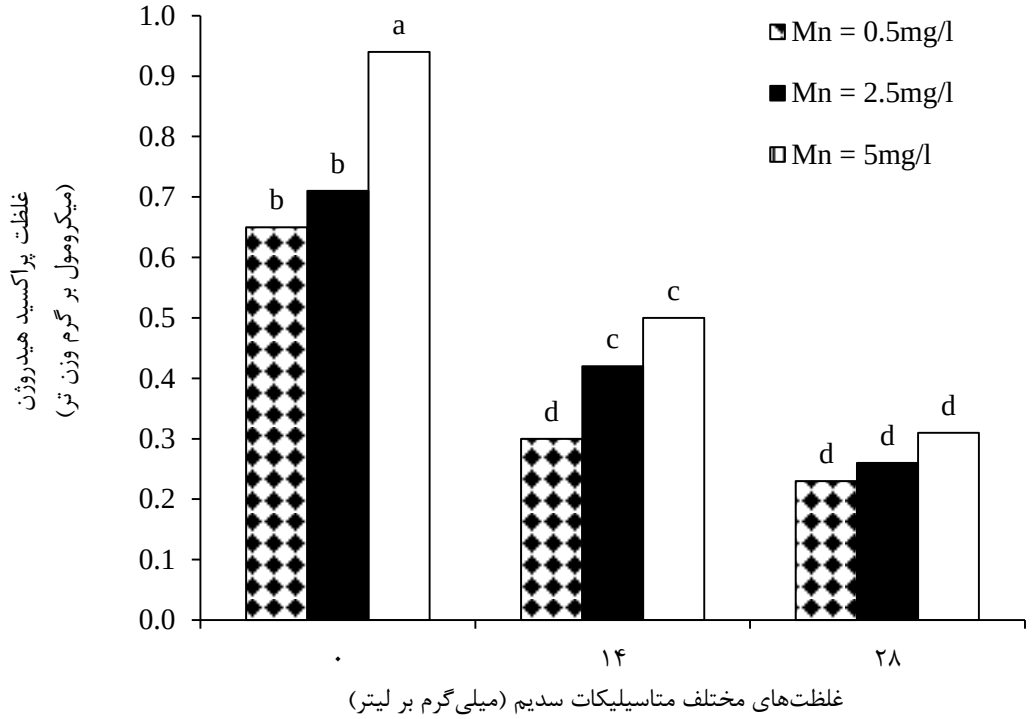
حروف مشابه بیانگر عدم اختلاف معنی‌داری بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد می‌باشند.

کاتالاز در تمام سلول‌های گیاهی یافت می‌شود و سلول‌های گیاهی را از سمیت پراکسید هیدروژن که در نتیجه فعالیت متابولیکی سلول تولید می‌شود حفظ می‌کند. یک مولکول از کاتالاز قادر است در یک ثانیه یک میلیون مولکول پراکسید هیدروژن را به آب و اکسیژن تبدیل کند. وجود این آنزیم برای حذف پراکسید هیدروژن که در نتیجه‌ی تنفس نوری به‌وجود آمده، لازم و ضروری است (Luna *et al.*, 2004). سیلیسیم با افزایش فعالیت آنزیم‌های پاداکسنده نظیر کاتالاز و پراکسیداز باعث کاهش غلظت پراکسید هیدروژن و مالون‌دی‌آلدئید می‌شود (Al-aghabary, 2005). کاتالاز باعث تجزیه پراکسید هیدروژن به آب و مولکول اکسیژن می‌شود و یکی از آنزیم‌های مهم در سمیت‌زدایی پراکسید هیدروژن محسوب می‌شود. کاربرد سیلیسیم باعث افزایش فعالیت کاتالاز نسبت به تیمار شاهد در گیاه خیار تحت سمیت منگنز گردید (Shi *et al.*, 2005). سیلیسیم با افزایش فعالیت آنزیم کاتالاز در برگ‌های گیاهان آلوده به کادمیوم شده و از این طریق خسارت اکسیداتیو ناشی از سمیت کادمیوم را کاهش داد (Epstein, 1999).

پراکسید هیدروژن

مقایسه میانگین‌ها نشان می‌دهد که با افزایش غلظت متاسیلیکات سدیم در محلول غذایی میانگین غلظت پراکسید هیدروژن ۶۰ درصد کاهش و با افزایش غلظت منگنز غلظت آن ۳۰ درصد افزایش

یافت (شکل ۷). با توجه به نتایج به‌دست آمده حداکثر غلظت پراکسید هیدروژن مربوط به کمترین مقدار متاسیلیکات سدیم توأم با بیشترین مقدار منگنز و برعکس حداقل غلظت آن هم مربوط به بیشترین مقدار متاسیلیکات سدیم توأم با کمترین مقدار منگنز بود (شکل ۷).



شکل ۷- اثر متقابل سطوح مختلف منگنز و متاسیلیکات سدیم بر غلظت پراکسید هیدروژن در برگ گیاه کاهو

حروف مشابه بیانگر عدم اختلاف معنی‌داری بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد می‌باشند.

پراکسید هیدروژن در گیاهان، می‌تواند نقشی دوگانه داشته باشد. به‌طوری‌که این ترکیب در غلظت‌های پایین به‌عنوان یک پیام حد واسط جهت تولید سالسیلیک اسید و اتیلن عمل می‌نماید که سبب تطابق بیشتر با شرایط تنش‌زا می‌شود (Hu *et al*., 2009)؛ اما پراکسید هیدروژن در غلظت‌های بالا تخریب بافت و در نهایت مرگ گیاه را به‌دنبال دارد (Villa *et al*., 2003).

از طرفی سمیت منگنز می‌تواند منجر به افزایش گونه‌های فعال اکسیژن نظیر رادیکال‌های سوپراکسید، هیدروکسیل و پراکسید هیدروژن گردد (Demirevska, 2004). Mussa (۲۰۰۶) طی تحقیقی گزارش کرد که در گیاه ذرت (*Zea mays* L.) تحت تنش شوری غلظت پراکسید هیدروژن افزایش یافت که در اثر افزودن سیلیسیم به محیط کشت به‌طور معنی‌داری سبب کاهش غلظت آن گردید و این بدان علت است که با مصرف سیلیسیم فعالیت آنزیم‌های سوپراکسید دیسموتاز و کاتالاز افزایش یافته و سبب محافظت بافت‌های گیاهی از آسیب اکسایشی ناشی از تنش شوری می‌شود. Zhu و همکاران (۲۰۰۴) با انجام تحقیقاتی بر روی خیار تحت تنش شوری گزارش کردند که کاربرد سیلیسیم در خیار تحت تنش شوری باعث کاهش معنی‌دار پراکسید هیدروژن می‌گردد. Feng و همکاران (۲۰۰۹) هم در تحقیقی بر روی گیاه خیار تحت تنش سمیت منگنز گزارش کردند که تیمار

منگنز سبب افزایش غلظت پراکسید هیدروژن در برگ گیاه خیار شده و تیمار توأم منگنز و سیلیسیم باعث کاهش معنی‌داری در غلظت آن می‌شود؛ که همه‌ی این گزارش‌ها با نتایج این پژوهش مطابقت دارند.

نتیجه‌گیری کلی

نتایج این پژوهش نشان داد سمیت منگنز شاخص‌های بیوشیمیایی و فیزیولوژیکی در کاهو رقم سیاهو را تحت تأثیر قرار داد. با افزایش غلظت منگنز در محلول غذایی، فعالیت آنزیم کاتالاز، آسکوربات پراکسیداز، غلظت مالون‌دی‌آلدئید و پراکسید هیدروژن افزایش و وزن تر، وزن خشک و پروتئین محلول برگ کاهو کاهش یافت. تیمار متاسیلیکات سدیم باعث افزایش فعالیت آنزیم کاتالاز، آسکوربات پراکسیداز، پروتئین محلول، غلظت پراکسید هیدروژن، وزن تر و وزن خشک برگ کاهو و همچنین کاهش غلظت مالون‌دی‌آلدئید شد. تیمار متاسیلیکات سدیم با تحریک سامانه پاداکسندگی و ایجاد کمپلکس با فلزات، آسیب‌های ناشی از سمیت منگنز را تعدیل می‌کند.

References

- Achary, V. M., Jena, S., Panda, K. K. & Panda, B. B. (2008). Aluminium induced oxidative stress and DNA damage in root cells of *Allium cepa* L. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 70(2), 300-310.
- Al-aghabary, K., Zhu, Z. & Shi, Q. (2005). Influence of silicon supply on chlorophyll content, chlorophyll fluorescence, and antioxidative enzyme activities in tomato plants under salt stress. *Journal of Plant Nutrition*, 27(12), 2101-2115.
- Ayvaz, M., Avci, M. K., Yamaner, C., Koyuncu, M., Guven, A. & Fagerstedt, K. (2013). Does excess boron affect the malondialdehyde levels of potato cultivars. *EurAsian Journal of BioSciences*, 7, 47-53.
- Balakhnina, T. & Borkowska, A. (2013). Effects of silicon on plant resistance to environmental stresses. *International Agrophysics*, 27(2), 225-232.
- Bidwell, S. D., Woodrow, I. E., Batianoff, G. N. & Sommer-Knudsen, J. (2002). Hyperaccumulation of manganese in the rainforest tree *Austromyrtus bidwillii* (Myrtaceae) from Queensland, Australia. *Functional Plant Biology*, 29(7), 899-905.
- Bradford, M. M. (1976). A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical Biochemistry*, 72(1), 248-254.
- Coolong, T. W., Randle, W. M., Toler, H. D. & Sams, C. E. (2004). Zinc availability in hydroponic culture influences glucosinolate concentrations in *Brassica rapa*. *Hortscience*, 39(1), 84-86.
- Crossgrove, J. & Zheng, W. (2004). Manganese toxicity upon overexposure. *NMR in Biomedicine: An International Journal Devoted to the Development and Application of Magnetic Resonance in Vivo*, 17(8), 544-553.
- Dazy, M., Jung, V., Ferard, J. F. & Masfaraud, J. F. (2008). Ecological recovery of vegetation on a coke-factory soil: role of plant antioxidant enzymes and possible implications in site restoration. *Chemosphere*, 74(1), 57-63.
- Demirevska-Kepova, K., Simova-Stoilova, L., Stoyanova, Z., Holzer, R. & Feller, U. (2004). Biochemical changes in barley plants after excessive supply of copper and manganese. *Environmental and Experimental Botany*, 52(3), 253-266.
- El-Feky, S. S., El-Shintinawy, F. A. & Shaker, E. M. (2014). Role of $CaCl_2$ and salicylic acid on metabolic activities and productivity of boron stressed barley

(*Hordeum vulgare* L.). *International Journal of Current Microbiology and Applied Scinces*, 3, 368-380.
- Epstein, E. (1999). Silicon. *Annual Review of Plant Biology*, 50(1), 641-664.
- Eraslan, F., Inal, A., Pilbeam, D. J. & Gunes, A. (2008). Interactive effects of salicylic acid and silicon on oxidative damage and antioxidant activity in spinach (*Spinacia oleracea* L. cv. Matador) grown under boron toxicity and salinity. *Plant Growth Regulation*, 55(3), 207-219.
- Feng, J. P., Shi, Q. H. & Wang, X. F. (2009). Effects of exogenous silicon on photosynthetic capacity and antioxidant enzyme activities in chloroplast of cucumber seedlings under excess manganese. *Agricultural Sciences in China*, 8(1), 40-50.
- Gardea-Torresdey, J. L., Peralta-Videa, J. R., De La Rosa, G. & Parsons, J. G. (2005). Phytoremediation of heavy metals and study of the metal coordination by X-ray absorption spectroscopy. *Coordination Chemistry Reviews*, 249(17), 1797-1810.
- Gratao, P. L., Polle, A., Lea, P. J. & Azevedo, R. A. (2005). Making the life of heavy metal-stressed plants a little easier. *Functional Plant Biology*, 32(6), 481-494.
- Gunes, A., Inal, A., Alpaslan, M., Cicek, N., Guneri, E., Eraslan, F. & Guzelordu, T. (2005). Effects of exogenously applied salicylic acid on the induction of multiple stress tolerance and mineral nutrition in maize (*Zea mays* L.). *Archives of Agronomy and Soil Science*, 51(6), 687-695.
- Guntzer, F., Keller, C. & Meunier, J. D. (2012). Benefits of plant silicon for crops: a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 32(1), 201-213.
- Hagar, H. A., Ueda, N. O. & Shah, S. V. (1996). Role of reactive oxygen metabolites in DNA damage and cell death in chemical hypoxic injury to LLC-PK1 cells. *American Journal of Physiology-Renal Physiology*, 271(1), 209-215.
- Haghighi, M. & Pessarakli, M. (2013). Influence of silicon and nano-silicon on salinity tolerance of cherry tomatoes (*Solanum lycopersicum* L.) at early growth stage. *Scientia Horticulturae*, 161, 111-117.
- Heath, R. L. & Packer, L. (1968). Photoperoxidation in isolated chloroplasts: I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 125(1), 189-198.
- Hu, Y., Ge, Y., Zhang, C., Ju, T. & Cheng, W. (2009). Cadmium toxicity and translocation in rice seedlings are reduced by hydrogen peroxide pretreatment. *Plant Growth Regulation*, 59(1), 51-61.
- Jiang, Y. & Huang, B. (2001). Drought and heat stress injury to two cool-season turfgrasses in relation to antioxidant metabolism and lipid peroxidation. *Crop Science*, 41(2), 436-442.
- Jhanshah, S. & Najafi, N. (2011). Silicon functions in olive plant. *Zeitun*, 31, 8-16. (In Farsi)
- Jones Jr, J. B. (2012). *Plant nutrition and soil fertility manual*. CRC press.
- Khudsar, T. & Iqbal, M. (2001). Cadmium-induced changes in leaf epidermes, photosynthetic rate and pigment concentrations in *Cajanus cajan*. *Biologia Plantarum*, 44(1), 59-64.
- Liang, Y. (1999). Effects of silicon on enzyme activity and sodium, potassium and calcium concentration in barley under salt stress. *Plant and Soil*, 209(2), 217-224.
- Liang, Y., Wong, J. W. C. & Wei, L. (2005). Silicon-mediated enhancement of cadmium tolerance in maize (*Zea mays* L.) grown in cadmium contaminated soil. *Chemosphere*, 58(4), 475-483.

- Luna, C. M., Pastori, G. M., Driscoll, S., Groten, K., Bernard, S. & Foyer, C. H. (2004). Drought controls on H_2O_2 accumulation, catalase (CAT) activity and CAT gene expression in wheat. *Journal of Experimental Botany*, 56(411), 417-423.
- Ma, J. F. & Yamaji, N. (2006). Silicon uptake and accumulation in higher plants. *Trends in Plant Science*, 11(8), 392-397.
- Metwally, A., Finkemeier, I., Georgi, M. & Dietz, K. J. (2003). Salicylic acid alleviates the cadmium toxicity in barley seedlings. *Plant Physiology*, 132(1), 272-281.
- Mittler, R., Vanderauwera, S., Gollery, M. & Van Breusegem, F. (2004). Reactive oxygen gene network of plants. *Trends in Plant Science*, 9(10), 490-498.
- Mou, B. (2008). Lettuce. In: J. Prohens & F. Nuez (Eds), *Handbook of Plant Breeding. Vegetables I. Asteraceae, Brassicaceae, Chenopodiaceae and Cucurbitaceae*. (pp. 75-116). Springer Science.
- Mussa, H. R. (2006). Influence of exogenous application of silicon on physiological response of salt-stressed maize (*Zea mays* L.). *Agriculture and Biology Journal*, 2, 293-297.
- Nicolle, C., Cardinault, N., Gueux, E., Jaffrelo, L., Rock, E., Mazur, A., Amouroux, P. & Remesy, C. (2004). Health effect of vegetable-based diet: lettuce consumption improves cholesterol metabolism and antioxidant status in the rat. *Clinical Nutrition*, 23, 605-614.
- Palma, J. M., Sandalio, L. M., Corpas, F. J., Romero-Puertas, M. C., McCarthy, I. & Luis, A. (2002). Plant proteases, protein degradation, and oxidative stress: role of peroxisomes. *Plant Physiology and Biochemistry*, 40, 521-530.
- Peyvast, G. H, (2006). *Olericulture*. Daneshpazir Publications Press. (In Farsi).
- Rady, M. M. (2011). Effect of 24-epibrassinolide on growth, yield, antioxidant system and cadmium content of bean (*Phaseolus vulgaris* L.) plants under salinity and cadmium stress. *Scientia Horticulturae*, 129(2), 232-237.
- Ranjan, R., Bohra, S. P. & Jeet, A. M. (2001). *Book of plant senescence*. Jodhpur, Agro bios New York.
- Romero-Aranda, M. R., Jurado, O. & Cuartero, J. (2006). Silicon alleviates the deleterious salt effect on tomato plant growth by improving plant water status. *Journal of Plant Physiology*, 163(8), 847-855.
- Salehipour, M., Ghorbani, H., Kheirabadi, H. & Afyuni, M. (2015). Health risks from heavy metals via consumption of cereals and vegetables in Isfahan Province, Iran. Human and ecological risk assessment. *An International Journal*, 21(7), 1920-1935.
- Shabankhani, B., Azadbakht, M., Shokrzadeh Lemoky, M. & Bahramighane, S. (2001). Measurment of Pb and Cd in spinach and radish vegetables Sary city. *Journal of Mazandaran University of Medical Sciences*, 30, 27-30. (In Farsi)
- Shi, X., Zhang, C., Wang, H. & Zhang, F. (2005). Effect of Si on the distribution of Cd in rice seedlings. *Plant and Soil*, 272(1-2), 53-60.
- Shi, Q. & Zhu, Z. (2008). Effects of exogenous salicylic acid on manganese toxicity, element contents and antioxidative system in cucumber. *Environmental and Experimental Botany*, 63(1-3), 317-326.
- Valance, J., Deniel, F., Le Floch, G., Guerin-dubrana, L., Blancard, D. & Rey, P. (2011). Pathogenic and beneficial microorganism in soilless cultures. *Agronomy for Sustainable Development*, 2, 711-726.

- Velikova, V., Yordanov, I. & Edreva, A. (2000). Oxidative stress and some antioxidant systems in acid rain-treated bean plants: protective role of exogenous polyamines. *Plant Science*, 151(1), 59-66.
- Veselov, D., Kudoyarova, G., Symonyan, M. & Veselov, S. (2003). Effect of cadmium onion uptake, transpiration and cytokinin content in wheat seedlings. *Bulg Journal Plant Physiol*ogy, 29(3-4), 353-359.
- Villa-Castorena, M., Ulery, A. L., Valencia, E. A. C. & Remmenga, M. D. (2003). Division S-4-soil fertility and plant nutrition. *Soil Science Society of America Journal*, 67, 1781-1789.
- Wang, L., Zhou, Q., Ding, L. & Sun, Y. (2008). Effect of cadmium toxicity on nitrogen metabolism in leaves of *Solanum nigrum* L. as a newly found cadmium hyperaccumulator. *Journal of Hazardous Materials*, 154(1-3), 818-825.
- Zhu, Z., Wei, G., Li, J., Qian, Q. & Yu, J. (2004). Silicon alleviates salt stress and increases antioxidant enzymes activity in leaves of salt-stressed cucumber (*Cucumis sativus* L.). *Plant Science*, 167(3), 527-533.