بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده کشاورزی

رشته کشاورزی گرایش زراعت

رساله دکتری

نقش محلول‌پاشی کلسیم و روی بر خصوصیات زراعی و فیزیولوژیک گیاه گلرنگ تحت تنش سرب

نگارنده

پریسا جمشیدی

استاد راهنما

دکتر مهدی برادران فیروزآبادی

اساتید مشاور

دکتر حکیمه علومی

دکتر هرمزد نقوی

تیر ۱۳۹۶

تقدیم به

پدر و مادر عزیزم

و

استاد فرهیخته جناب آقای دکتر برادران

تشکر و قدردانی

به پایان رساندن این پایان نامه بدون مساعدت بزرگوارانی که بی هیچ چشم‌داشتی مـرا یـاری نمودنـد مقدور نبود که در این راستا خود را ملزم می‌دانم از

جناب آقای دکتر مهدی برادران که از راهنمایی‌های ارزنده ایشان همواره بهره‌مند گردید.

اساتید مشاورم خانم دکتر علومی و آقای دکتر نقوی که در راه کسب علم و معرفت مرا یاری نمودند.

نماینده تحصیلات تکمیلی آقای دکتر عامریان و همچنین آقای دکتر غلامی، آقـای دکتـر حیـدری و جناب آقای دکتر پیردشتی که داوری این پایان نامه را بر عهده گرفتند.

خانم مهندس ایرانمنش که چون مادری دلسوز و معلمی فرهیخته همیشه همراه من بودند.

رئیس بخش آب و خاک جناب آقای دکتر اسفندیارپور که زحمات بسیاری در مراحـل اجـرای پایـان-نامه‌ام داشتند.

کارشناسان محترم آزمایشگاه آب و خاک و کارمندان بخش آب و خاک و نهال و بذر مرکـز تحقیقـات کشاورزی کرمان که هر کدام از ایشان به نحوی در انجام این پژوهش یاری‌ام دادند.

و تمامی کسانی که به نوعی مرا در اجرای این پایان نامـه یـاری کردنـد بـه خصـوص خـانم‌هـا دکتـر خالوندی، دکتر نظارت، دکتر بیطرفان، دکتر پارسامطلق، مهندس مشایخی، دکتر خواجه‌پور، مهنـدس رشیدی و آقایان دکتر فلاح هروی، دکتر مقبلی، مهندس پاکنژاد و مهندس صـباح تشـکر و قـدردانی می‌کنم.

پیوست شماره ۳

تعهد نامه

اینجانب پریسا جمشیدی دانشجوی دوره دکتری رشته زراعت دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده رساله نقش محلول‌پاشی کلسیم و روی بر خصوصیات زراعی و فیزیولوژیک گیاه گلرنگ تحت تنش سرب تحت راهنمائی جناب آقای دکتر مهدی برادران فیروزآبادی متعهد می شوم.

- تحقیقات در این رساله توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در رساله تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از رساله رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در رساله بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

لیست مقالات مستخرج از رساله

جمشیدی، پ.، برادران فیروزآبادی، م.، علومی، ح. و نقوی، ه. ۱۳۹۶. بررسی محلول‌پاشی کود روی و کلسیم بر عملکرد و صفات فیزیولوژیکی گلرنگ تحت تنش سرب، نشریه پژوهش‌های زراعی ایران، جلد ۱۵، شماره ۲، ص ۳۶۸-۳۶۹.

جمشیدی، پ.، برادران فیروزآبادی، م.، علومی، ح. و نقوی، ه. مقایسه اثرات محلول‌پاشی کلسیم و روی بر خصوصیات زراعی و فیزیولوژیکی گلرنگ در جذب برگی و خاکی سرب، مجله علمی پژوهشی فرآیند و کارکرد گیاهی

جمشیدی، پ.، برادران فیروزآبادی، م.، علومی، ح. و نقوی، ه. ۱۳۹۵. تأثیر محلول‌پاشی روی بر عملکرد و میزان روغن گیاه گلرنگ در جذب برگی و خاکی سرب، دومین کنگره بین المللی و چهاردهمین کنگره ملی علوم زراعت و اصلاح نباتات، دانشگاه گیلان، رشت.

جمشیدی، پ.، برادران فیروزآبادی، م.، علومی، ح. و نقوی، ه. ۱۳۹۵. تأثیر محلول‌پاشی روی و کلسیم بر صفات زراعی گیاه گلرنگ در جذب برگی و خاکی سرب، دومین کنگره بین المللی و چهاردهمین کنگره ملی علوم زراعت و اصلاح نباتات، دانشگاه گیلان، رشت.

چکیده

وجود سرب در محیط تهدید عمده‌ای بر رشد گیاه است و می‌تواند از طریق برگ و ریشه جذب گیاه شود. در چنین شرایطی تغذیه گیاه می‌تواند در تحمل آن به تنش سرب مؤثر باشد. بنابراین در این پژوهش تأثیر محلول‌پاشی روی و کلسیم بر صفات زراعی و فیزیولوژیکی گیاه گلرنگ در تنش سرب مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در گلخانه و مزرعه مرکز تحقیقات کشاورزی کرمان اجرا شد. فاکتور اول تیمار سرب بود که در آزمایش گلدانی شامل (شاهد، کاربرد خاکی، محلول‌پاشی اندام هوایی و کاربرد توأم) و در آزمایش مزرعه‌ای، به صورت محلول‌پاشی سرب در سه غلظت (صفر، ۰/۵ و ۱ میلی‌مولار به صورت استات سرب) بود، فاکتور دوم محلول‌پاشی روی در سه غلظت (صفر، ۱۰ و ۲۰ میلی‌مولار به صورت سولفات روی) و فاکتور سوم محلول‌پاشی کلسیم در دو سطح (صفر و ۱۰ میلی‌مولار به صورت کلرید کلسیم) انجام شد که در هر دو آزمایش گلدانی و مزرعه‌ای یکسان بود. محلول‌پاشی در آزمایش گلدانی و مزرعه‌ای به‌ترتیب ۶۵ و ۱۳۰ روز پس از کاشت صورت پذیرفت و ۱۵ روز پس از آن اقدام به نمونه-برداری و اندازه‌گیری صفات شد. در آزمایش مزرعه‌ای و گلدانی، محلول‌پاشی روی تأثیر مثبتی بر کاهش تجمع سرب در قسمت‌های مختلف گیاه، حفظ کلروفیل، افزایش کربوهیدرات محلول و آنتوسیانین، کاهش پراکسیداسیون لیپیدهای غشاء، بهبود رشد و عملکرد و میزان روغن دانه گیاه و افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان در شرایط تنش سرب داشت و در آزمایش گلدانی، با محلول-پاشی روی (۲۰ میلی‌مولار) در تیمار کاربرد توأم سرب، میزان سرب در برگ، دانه و ریشه به‌ترتیب ۶۵، ۵۰ و ۳۹ درصد نسبت به سطح صفر روی کاهش یافت و در آزمایش مزرعه‌ای، با محلول‌پاشی روی (۲۰ میلی‌مولار) در تیمار ۱ میلی‌مولار سرب، محتوای سرب در برگ و دانه به‌ترتیب ۵۷ و ۵۰ درصد نسبت به سطح صفر روی کاهش یافت. در آزمایش گلدانی، کاربرد کلسیم سبب افزایش عملکرد بیولوژیک، عملکرد روغن، تجمع عنصر کلسیم در بخش‌های مختلف گیاه، افزایش حجم ریشه، سطح برگ، وزن خشک گیاه، فعالیت آنزیم‌های آسکوربات پراکسیداز، کاهش میزان سرب و مالون دی

آلدهید در برگ در تیمار تنش سرب گردید. به عنوان مثال میزان عملکرد بیولوژیک ۱۱ درصد، عملکرد روغن ۴۵ درصد، سطح برگ ۲۰ درصد نسبت به سطح صفر کلسیم در تیمار کاربرد توأم سرب افزایش یافت. در آزمایش مزرعه‌ای نیز تغذیه گیاه با کلسیم، محتوای کلسیم در برگ و دانه، تعداد طبق در بوته، شاخص سطح برگ، محتوای آب نسبی برگ و تجمع کلروفیل را در شرایط تنش سرب (۱ میلی‌مولار) افزایش داد و کمترین میزان تجمع سرب در برگ و دانه در تیمار کاربرد کلسیم مشاهده شد و محتوای سرب در برگ و دانه به‌ترتیب ۴۰ و ۴۵ درصد کاهش یافت. کاربرد توأم کلسیم (۱۰ میلی‌مولار) و روی (۲۰ میلی‌مولار) بیشترین اثر بهبودبخش را در آزمایش گلدانی بر تعداد دانه در طبق، وزن خشک برگ و ساقه، عملکرد بیولوژیک، کاهش تجمع مالون دی آلدهید و غلظت سرب در دانه گیاه در کاربرد توأم خاکی و برگی سرب و در آزمایش مزرعه‌ای بر میزان تجمع سرب در دانه و غلظت کلروفیل در تنش سرب با غلظت ۱ میلی‌مولار داشت. استفاده از غلظت ۲۰ میلی‌مولار سولفات روی و غلظت ۱۰ میلی‌مولار کلرید کلسیم به‌صورت محلول‌پاشی در محدوده تیمارهای تنش سرب در آزمایش گلدانی و مزرعه‌ای قابل توجیه است. بنابراین به نظر می‌رسد کلسیم و روی به وسیله بهبود واکنش‌های فیزیولوژیکی و رشدی گیاه موجب سمیت‌زدایی سرب شد و به بیان دیگر منجر به مقاومت گیاه به تنش سرب گردید.

کلمات کلیدی: فلز سنگین، آنتی‌اکسیدان، عملکرد، عناصر معدنی، روغن دانه

فهرست

عنوان ..... **صفحه**
فصل اول: مقدمه ۱
فصل دوم: بررسی منابع ۵
۲-۱- گلرنگ ۶
۲-۱-۱- ویژگی‌های ریخت‌شناسی ۶
۲-۱-۲- منشاء و اهمیت گیاه گلرنگ ۷
۲-۱-۳- موارد مصرف ۷
۲-۲- سرب ۸
۲-۲-۱- نحوه ورود سرب به محیط ۸
۲-۲-۲- سمیت سرب در گیاهان ۹
۲-۳- نقش روی در گیاهان ۱۲
۲-۴- نقش کلسیم در گیاهان ۱۲
۲-۵- نقش گوگرد در گیاهان ۱۳
۲-۶- محلول‌پاشی روی و کلسیم ۱۴
۲-۷- نقش روی در سمیت‌زدایی سرب ۱۵
۲-۸- نقش کلسیم در سمیت‌زدایی سرب ۱۷
۲-۹- اثرات متقابل کلسیم و روی بر صفات فیزیولوژیکی گیاه ۱۹
فصل سوم: مواد و روش‌ها ۲۱
۳-۱- مشخصات محل اجرای آزمایش و طرح آزمایشی (بخش گلدانی) ۲۲
۳-۲- کاشت در گلدان ۲۲
۳-۳- اعمال تیمارها در بخش گلدانی ۲۲
۳-۳-۱- تیمار آلوده کردن خاک ۲۲
۳-۳-۲- تیمار محلول‌پاشی بر سطح برگ ۲۳
۳-۴- نمونه‌برداری در گلدان ۲۳
۳-۵- مشخصات محل اجرای آزمایش و طرح آزمایشی (بخش مزرعه‌ای) ۲۳
۳-۶- عملیات اجرایی در بخش مزرعه ۲۴
۳-۶-۱- آماده سازی زمین ۲۴
۳-۶-۲- کاشت در مزرعه ۲۴
۳-۶-۳- داشت در مزرعه ۲۵
۳-۷- اعمال تیمارها در بخش مزرعه ۲۵

۳-۸- نمونه‌برداری در مزرعه ۲۵
۳-۹- اندازه‌گیری صفات زراعی و مورفولوژیک در آزمایش گلدانی ۲۶
۳-۹-۱- تعیین عملکرد و اجزای عملکرد ۲۶
۳-۹-۲- سطح برگ ۲۶
۳-۹-۳- طول و قطر ساقه ۲۶
۳-۹-۴- حجم ریشه و وزن خشک برگ، ساقه و ریشه ۲۶
۳-۱۰- اندازه‌گیری صفات زراعی و مورفولوژیک در بخش مزرعه ۲۶
۳-۱۰-۱- تعیین عملکرد و اجزای عملکرد ۲۶
۳-۱۰-۲- سطح برگ ۲۷
۳-۱۰-۳- طول و قطر ساقه ۲۷
۳-۱۰-۴- وزن خشک برگ و ساقه ۲۷
۳-۱۱- اندازه‌گیری صفات فیزیولوژیک و کیفی در هر دو بخش گلدانی و مزرعه‌ای ۲۷
۳-۱۱-۱- اندازه‌گیری روغن دانه ۲۷
۳-۱۱-۲- میزان پروتئین دانه ۲۸
۳-۱۱-۳- اندازه‌گیری کربوهیدرات محلول در برگ ۲۸
۳-۱۱-۴- سنجش میزان پراکسیداسیون لیپیدهای غشاء ۲۹
۳-۱۱-۵- استخراج آنزیم ۳۰
۳-۱۱-۵-۱- عصاره آنزیمی ۳۰
۳-۱۱-۵-۲- فعالیت آنزیم گلوتاتیون اس- ترانسفراز ۳۰
۳-۱۱-۵-۳- فعالیت آنزیم کاتالاز ۳۰
۳-۱۱-۵-۴- فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز ۳۰
۳-۱۱-۵-۵- فعالیت آنزیم پراکسیداز ۳۱
۳-۱۱-۶- محتوای نسبی آب برگ (RWC) ۳۱
۳-۱۱-۷- سنجش میزان آنتوسیانین در برگ ۳۱
۳-۱۱-۸- سنجش میزان رنگیزه‌های فتوسنتزی (کلروفیل و کاروتنوئیدها) ۳۲
۳-۱۱-۹- سنجش میزان سرب، روی و کلسیم در ریشه، برگ و دانه ۳۲
۳-۱۲- تجزیه و تحلیل داده‌ها ۳۳
فصل چهارم: نتایج و بحث ۳۵
۴-۱- صفات رشدی ۳۶
۴-۱-۱- حجم ریشه ۳۶
۴-۱-۲- طول ریشه ۳۸
۴-۱-۳- ارتفاع ساقه ۴۰
۴-۱-۴- قطر ساقه ۴۴

۴-۲- تجمع ماده خشک ۴۸
۴-۲-۱- وزن خشک ریشه و نسبت وزن خشک ریشه به ساقه ۴۸
۴-۲-۲- وزن خشک برگ ۵۳
۴-۲-۳- وزن خشک ساقه ۵۹
۴-۳- سطح برگ ۶۳
۴-۴- عملکرد بیولوژیک گیاه ۶۸
۴-۵- وزن طبق در بوته ۷۳
۴-۶- عملکرد و اجزای عملکرد ۷۵
۴-۷- صفات کیفی دانه ۸۶
۴-۷-۱- درصد و عملکرد روغن دانه ۸۶
۴-۷-۲- پروتئین دانه ۹۴
۴-۸- صفات فیزیولوژیکی ۹۸
۴-۸-۱- کربوهیدرات محلول در برگ ۹۸
۴-۸-۲- پراکسیداسیون لیپیدهای غشاء (مالون دی آلدهید) ۱۰۱
۴-۸-۳- آنزیم گلوتاتیون اس ترانسفراز ۱۰۷
۴-۸-۴- آنزیم کاتالاز ۱۱۱
۴-۸-۵- آنزیم آسکوربات پراکسیداز ۱۱۶
۴-۸-۶- فعالیت آنزیم پراکسیداز ۱۲۲
۴-۸-۷- محتوای آب نسبی برگ (RWC) ۱۲۶
۴-۸-۸- آنتوسیانین ۱۲۹
۴-۸-۹- رنگیزه‌های فتوسنتزی ۱۳۱
۴-۸-۱۰- غلظت سرب در برگ، ریشه و دانه ۱۴۳
۴-۸-۱۱- غلظت روی در برگ، دانه و ریشه ۱۵۴
۴-۸-۱۲- میزان کلسیم در برگ، دانه و ریشه ۱۶۱
نتیجه‌گیری ۱۶۶
پیشنهادها ۱۶۸
پیوست ۱۶۹
منابع ۱۷۹

فهرست اشکال

شکل .....صفحه
شکل ۴-۱- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی کلسیم و روی بر حجم ریشه گیاه گلرنگ (آزمایش گلدانی) ۳۷
شکل ۴-۲- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی کلسیم در شرایط تنش سرب بر حجم ریشه گیاه گلرنگ (آزمایش گلدانی) ۳۸
شکل ۴-۳- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی در شرایط تنش سرب بر طول ریشه گیاه گلرنگ (آزمایش گلدانی) ۴۰
شکل ۴-۴- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی در شرایط تنش سرب بر ارتفاع ساقه گلرنگ (آزمایش گلدانی) ۴۲
شکل ۴-۵- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی کلسیم و روی بر ارتفاع ساقه گلرنگ (آزمایش گلدانی) ۴۲
شکل ۴-۶- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی در شرایط تنش سرب بر ارتفاع ساقه گلرنگ (آزمایش مزرعه‌ای) ۴۳
شکل ۴-۷- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی کلسیم و روی بر ارتفاع ساقه گلرنگ (آزمایش مزرعه‌ای) ۴۳
شکل ۴-۸- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی و کلسیم بر قطر ساقه گلرنگ (آزمایش گلدانی) ۴۶
شکل ۴-۹- رابطه بین میزان سرب در برگ و قطر ساقه گیاه گلرنگ (آزمایش گلدانی) ۴۷
شکل ۴-۱۰- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی و کلسیم بر قطر ساقه گلرنگ (آزمایش مزرعه-ای) ۴۷
شکل ۴-۱۱- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی و کلسیم بر وزن خشک ریشه گیاه گلرنگ (آزمایش گلدانی) ۵۰
شکل ۴-۱۲- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی و کلسیم بر نسبت وزن خشک ریشه به ساقه گیاه گلرنگ (آزمایش گلدانی) ۵۱
شکل ۴-۱۳- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی کلسیم در شرایط تنش سرب بر وزن خشک ریشه گیاه گلرنگ (آزمایش گلدانی) ۵۱
شکل ۴-۱۴- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی کلسیم در شرایط تنش سرب بر نسبت وزن خشک ریشه به ساقه گیاه گلرنگ (آزمایش گلدانی) ۵۲
شکل ۴-۱۵- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی در شرایط تنش سرب بر وزن خشک ریشه گیاه گلرنگ (آزمایش گلدانی) ۵۲
شکل ۴-۱۶- رابطه بین وزن خشک برگ و وزن خشک ریشه گیاه گلرنگ (آزمایش گلدانی) ۵۳

شکل ۴-۱۷- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی کلسیم در شرایط تنش سرب بر وزن خشک برگ گیاه گلرنگ (آزمایش گلدانی) ۵۶
شکل ۴-۱۸- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی کلسیم و روی بر وزن خشک برگ گیاه گلرنگ (آزمایش گلدانی) ۵۷
شکل ۴-۱۹- مقایسه اثر برهمکنش سه‌جانبه روی، کلسیم و سرب بر وزن خشک برگ گیاه گلرنگ (آزمایش گلدانی) ۵۷
شکل ۴-۲۰- رابطه بین کلروفیل کل و وزن خشک برگ گیاه گلرنگ (آزمایش گلدانی) ۵۸
شکل ۴-۲۱- رابطه بین شاخص سطح برگ و وزن خشک برگ گیاه گلرنگ (آزمایش مزرعه‌ای). ۵۸
شکل ۴-۲۲- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی در شرایط تنش سرب بر وزن خشک ساقه گیاه گلرنگ (آزمایش گلدانی) ۶۱
شکل ۴-۲۳- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی کلسیم در شرایط تنش سرب بر وزن خشک ساقه گیاه گلرنگ (آزمایش گلدانی) ۶۲
شکل ۴-۲۴- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی کلسیم و روی بر وزن خشک ساقه گیاه گلرنگ (آزمایش گلدانی) ۶۲
شکل ۴-۲۵- مقایسه اثر برهمکنش سه‌جانبه روی، کلسیم و سرب بر وزن خشک ساقه گیاه گلرنگ (آزمایش گلدانی) ۶۳
شکل ۴-۲۶- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی در شرایط تنش سرب بر سطح برگ گیاه گلرنگ (آزمایش گلدانی) ۶۶
شکل ۴-۲۷- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی کلسیم در شرایط تنش سرب بر سطح برگ گیاه گلرنگ (آزمایش گلدانی) ۶۶
شکل ۴-۲۸- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی کلسیم در شرایط تنش سرب بر شاخص سطح برگ گیاه گلرنگ (آزمایش مزرعه‌ای) ۶۷
شکل ۴-۲۹- رابطه بین محتوای روی در برگ و شاخص سطح برگ (آزمایش مزرعه‌ای) ۶۷
شکل ۴-۳۰- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی کلسیم در شرایط تنش سرب بر عملکرد بیولوژیک گیاه گلرنگ (آزمایش گلدانی) ۷۰
شکل ۴-۳۱- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی در شرایط تنش سرب بر عملکرد بیولوژیک گیاه گلرنگ (آزمایش گلدانی) ۷۱
شکل ۴-۳۲- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی کلسیم و روی بر عملکرد بیولوژیک گیاه گلرنگ (آزمایش گلدانی) ۷۱
شکل ۴-۳۳- مقایسه اثر برهم‌کنش سه‌جانبه روی، کلسیم و سرب بر عملکرد بیولوژیک گیاه گلرنگ (آزمایش گلدانی) ۷۲
شکل ۴-۳۴- رابطه بین میزان روی در برگ و عملکرد بیولوژیک در گیاه گلرنگ (آزمایش گلدانی) ۷۲

شکل ۴-۳۵- رابطه بین شاخص سطح برگ و عملکرد بیولوژیک در گیاه گلرنگ (آزمایش مزرعه‌ای) ۷۳
شکل ۴-۳۶- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی کلسیم و روی بر تعداد دانه در طبق (آزمایش گلدانی) ۸۱
شکل ۴-۳۷- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی کلسیم و روی بر عملکرد دانه گیاه گلرنگ (آزمایش گلدانی) ۸۱
شکل ۴-۳۸- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی در شرایط تنش سرب بر تعداد طبق در بوته گلرنگ ۸۲
شکل ۴-۳۹- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی در شرایط تنش سرب بر عملکرد دانه گیاه گلرنگ (آزمایش گلدانی) ۸۲
شکل ۴-۴۰- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی در شرایط تنش سرب بر شاخص برداشت گیاه گلرنگ (آزمایش گلدانی) ۸۳
شکل ۴-۴۱- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی در شرایط تنش سرب بر تعداد دانه در طبق گلرنگ (آزمایش گلدانی) ۸۳
شکل ۴-۴۲- مقایسه اثر برهمکنش سه‌جانبه روی، کلسیم و سرب بر تعداد دانه در طبق گلرنگ (آزمایش گلدانی) ۸۴
شکل ۴-۴۳- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی در شرایط تنش سرب بر میزان عملکرد دانه گیاه گلرنگ (آزمایش مزرعه‌ای) ۸۴
شکل ۴-۴۴- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی در شرایط تنش سرب بر شاخص برداشت گلرنگ (آزمایش مزرعه‌ای) ۸۵
شکل ۴-۴۵- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی در شرایط تنش سرب بر تعداد طبق در بوته گلرنگ (آزمایش مزرعه‌ای) ۸۵
شکل ۴-۴۶- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی کلسیم در شرایط تنش سرب بر تعداد طبق در بوته گلرنگ (آزمایش مزرعه‌ای) ۸۶
شکل ۴-۴۷- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی در شرایط تنش سرب بر درصد روغن گیاه گلرنگ (آزمایش گلدانی) ۹۰
شکل ۴-۴۸- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی کلسیم و روی بر درصد روغن گیاه گلرنگ (آزمایش گلدانی) ۹۰
شکل ۴-۴۹- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی در شرایط تنش سرب بر عملکرد روغن گیاه گلرنگ (آزمایش گلدانی) ۹۱
شکل ۴-۵۰- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی کلسیم و روی بر عملکرد روغن گیاه گلرنگ (آزمایش گلدانی) ۹۱

شکل ۴-۵۱- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی کلسیم در شرایط تنش سرب بر عملکرد روغن گیاه گلرنگ (آزمایش گلدانی) ۹۲
شکل ۴-۵۲- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی کلسیم در شرایط تنش سرب بر عملکرد روغن گیاه گلرنگ (آزمایش گلدانی) ۹۲
شکل ۴-۵۳- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی در شرایط تنش سرب بر درصد روغن گیاه گلرنگ (آزمایش مزرعه‌ای) ۹۳
شکل ۴-۵۴- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی کلسیم و روی بر درصد روغن گیاه گلرنگ (آزمایش مزرعه‌ای) ۹۳
شکل ۴-۵۵- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی در شرایط تنش سرب بر عملکرد روغن گیاه گلرنگ (آزمایش مزرعه‌ای) ۹۴
شکل ۴-۵۶- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی در شرایط تنش سرب بر عملکرد پروتئین دانه گیاه گلرنگ (آزمایش گلدانی) ۹۷
شکل ۴-۵۷- رابطه بین درصد پروتئین دانه و عملکرد روغن (آزمایش گلدانی) ۹۷
شکل ۴-۵۸- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی در شرایط تنش سرب بر عملکرد پروتئین دانه گیاه گلرنگ (آزمایش مزرعه‌ای) ۹۸
شکل ۴-۵۹- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی در شرایط تنش سرب بر کربوهیدرات محلول گیاه گلرنگ (آزمایش گلدانی) ۱۰۱
شکل ۴-۶۰- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی در شرایط تنش سرب بر کربوهیدرات محلول گیاه گلرنگ (آزمایش مزرعه‌ای) ۱۰۱
شکل ۴-۶۱- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی کلسیم در شرایط تنش سرب بر میزان مالون دی آلدهید در گیاه گلرنگ (آزمایش گلدانی) ۱۰۴
شکل ۴-۶۲- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی در شرایط تنش سرب بر میزان مالون دی آلدهید در گیاه گلرنگ (آزمایش گلدانی) ۱۰۵
شکل ۴-۶۳- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی و کلسیم بر میزان مالون دی آلدهید در گیاه گلرنگ (آزمایش گلدانی) ۱۰۵
شکل ۴-۶۴- مقایسه اثر برهمکنش سه‌جانبه روی، کلسیم و سرب بر میزان مالون دی آلدهید در گیاه گلرنگ (آزمایش گلدانی) ۱۰۶
شکل ۴-۶۵- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی در شرایط تنش سرب بر میزان مالون دی آلدهید در گیاه گلرنگ (آزمایش مزرعه‌ای) ۱۰۶
شکل ۴-۶۶- رابطه بین میزان مالون دی آلدهید و عملکرد دانه گیاه گلرنگ (آزمایش مزرعه‌ای) ۱۰۷
شکل ۴-۶۷- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی در شرایط تنش سرب بر میزان فعالیت آنزیم گلوتاتیون اس- ترانسفراز گیاه گلرنگ (آزمایش گلدانی) ۱۰۹

شکل ۴-۶۸- رابطه بین میزان فعالیت آنزیم کاتالاز و آنزیم گلوتاتیون اس- ترانسفراز در گیاه گلرنگ (آزمایش گلدانی) ۱۱۰
شکل ۴-۶۹- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی در شرایط تنش سرب بر میزان فعالیت آنزیم گلوتاتیون اس- ترانسفراز گیاه گلرنگ (آزمایش مزرعه‌ای) ۱۱۰
شکل ۴-۷۰- رابطه بین میزان روی در برگ و فعالیت آنزیم گلوتاتیون اس- ترانسفراز در گیاه گلرنگ (آزمایش مزرعه‌ای) ۱۱۱
شکل ۴-۷۱- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی در شرایط تنش سرب بر فعالیت آنزیم کاتالاز در گیاه گلرنگ (آزمایش گلدانی) ۱۱۳
شکل ۴-۷۲- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی کلسیم و روی بر فعالیت آنزیم کاتالاز در گیاه گلرنگ (آزمایش گلدانی) ۱۱۴
شکل ۴-۷۳- رابطه بین فعالیت آنزیم پراکسیداز و آنزیم کاتالاز در گیاه گلرنگ (آزمایش گلدانی) ۱۱۴
شکل ۴-۷۴- رابطه بین میزان سرب در برگ و آنزیم کاتالاز در گیاه گلرنگ (آزمایش گلدانی). ۱۱۵
شکل ۴-۷۵- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی در شرایط تنش سرب بر فعالیت آنزیم کاتالاز گیاه گلرنگ (آزمایش مزرعه‌ای) ۱۱۵
شکل ۴-۷۶- رابطه بین میزان فعالیت آنزیم کاتالاز و عملکرد بیولوژیک در گیاه گلرنگ (آزمایش مزرعه‌ای) ۱۱۶
شکل ۴-۷۷- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی کلسیم در شرایط تنش سرب بر فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز در گیاه گلرنگ (آزمایش گلدانی) ۱۱۹
شکل ۴-۷۸- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی در شرایط تنش سرب بر فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز در گیاه گلرنگ (آزمایش گلدانی) ۱۲۰
شکل ۴-۷۹- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی و کلسیم بر فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز در گیاه گلرنگ (آزمایش گلدانی) ۱۲۰
شکل ۴-۸۰- رابطه بین فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز و میزان آنتوسیانین (آزمایش گلدانی) ۱۲۱
شکل ۴-۸۱- رابطه بین میزان فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز و عملکرد دانه گلرنگ (آزمایش گلدانی) ۱۲۱
شکل ۴-۸۲- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی و کلسیم بر فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز در گیاه گلرنگ (آزمایش مزرعه‌ای) ۱۲۲
شکل ۴-۸۳- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی در شرایط تنش سرب بر میزان فعالیت آنزیم پراکسیداز در گیاه گلرنگ (آزمایش گلدانی) ۱۲۴
شکل ۴-۸۴- رابطه بین فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز و پراکسیداز (آزمایش گلدانی)..... ۱۲۵
شکل ۴-۸۵- رابطه بین فعالیت آنزیم پراکسیداز و میزان سرب در برگ (آزمایش گلدانی)..... ۱۲۵

شکل ۴-۸۶- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی در شرایط تنش سرب بـر محتـوای نسـبی آب برگ گیاه گلرنگ (آزمایش مزرعه‌ای) ۱۲۸
شکل ۴-۸۷- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی کلسیم در شرایط تنش سرب بر محتوای نسبی آب برگ گیاه گلرنگ (آزمایش مزرعه‌ای) ۱۲۹
شکل ۴-۸۸- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی در شرایط تنش سـرب بـر میـزان آنتوسـیانین گیاه گلرنگ (آزمایش گلدانی) ۱۳۱
شکل ۴-۸۹- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی در شرایط تنش سـرب بـر میـزان آنتوسـیانین گیاه گلرنگ (آزمایش مزرعه‌ای) ۱۳۱
شکل ۴-۹۰- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی در شرایط تنش سرب بر میزان کلروفیل a گیاه گلرنگ (آزمایش گلدانی) ۱۳۸
شکل ۴-۹۱- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی در شرایط تنش سرب بر میزان کلروفیل b گیاه گلرنگ (آزمایش گلدانی) ۱۳۸
شکل ۴-۹۲- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی در شرایط تنش سرب بر نسبت کلروفیـل a/b گیاه گلرنگ (آزمایش گلدانی) ۱۳۹
شکل ۴-۹۳- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی در شرایط تنش سرب بر میزان کلروفیـل کـل گیاه گلرنگ (آزمایش گلدانی) ۱۳۹
شکل ۴-۹۴- رابطه بین محتوای سرب در برگ و میزان کلروفیل a (آزمایش گلدانی) ۱۴۰
شکل ۴-۹۵- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی کلسیم در شرایط تنش سرب بر میـزان کلروفیـل a گیاه گلرنگ (آزمایش مزرعه‌ای) ۱۴۰
شکل ۴-۹۶- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی کلسیم در شرایط تنش سرب بر میزان کلروفیل کل گیاه گلرنگ (آزمایش مزرعه‌ای) ۱۴۱
شکل ۴-۹۷- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی در شرایط تنش سرب بر میزان کلروفیل b گیاه گلرنگ (آزمایش مزرعه‌ای) ۱۴۱
شکل ۴-۹۸- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی در شرایط تنش سرب بر نسـبت کلروفیـل a/b گیاه گلرنگ (آزمایش مزرعه‌ای) ۱۴۲
شکل ۴-۹۹- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی در شرایط تنش سرب بر میزان کلروفیـل کـل گیاه گلرنگ (آزمایش مزرعه‌ای) ۱۴۲
شکل ۴-۱۰۰- مقایسه اثر برهمکنش سه‌جانبه روی، کلسیم و سرب بر میزان کلروفیل a در گیـاه گلرنگ (آزمایش مزرعه‌ای) ۱۴۳
شکل ۴-۱۰۱- مقایسه اثر برهمکنش سه‌جانبه روی، کلسیم و سرب بر میزان کلروفیل کل در گیاه گلرنگ (آزمایش مزرعه‌ای) ۱۴۳
شکل ۴-۱۰۲- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی در شرایط تنش سرب بـر محتـوای سـرب در برگ گلرنگ (آزمایش گلدانی) ۱۴۷

شکل ۴-۱۰۳- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی کلسیم در شرایط تنش سرب بر محتوای سرب در برگ گلرنگ (آزمایش گلدانی) ۱۴۸
شکل ۴-۱۰۴- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی کلسیم و روی بر محتوای سرب در برگ گلرنگ (آزمایش گلدانی) ۱۴۸
شکل ۴-۱۰۵ - مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی در شرایط تنش سرب بر محتوای سرب در ریشه گلرنگ (آزمایش گلدانی) ۱۴۹
شکل ۴-۱۰۶- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی در شرایط تنش سرب بر محتوای سرب در دانه گلرنگ (آزمایش گلدانی) ۱۴۹
شکل ۴-۱۰۷- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی کلسیم در شرایط تنش سرب بر محتوای سرب در دانه گلرنگ (آزمایش گلدانی) ۱۵۰
شکل ۴-۱۰۸- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی کلسیم و روی بر محتوای سرب در دانه گلرنگ (آزمایش گلدانی) ۱۵۰
شکل ۴-۱۰۹- مقایسه اثر برهمکنش سه‌جانبه روی، کلسیم و سرب بر محتوای سرب در دانه گلرنگ (آزمایش گلدانی) ۱۵۱
شکل ۴-۱۱۰- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی کلسیم در شرایط تنش سرب بر محتوای سرب در برگ گلرنگ (آزمایش مزرعه‌ای) ۱۵۱
شکل ۴-۱۱۱- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی در شرایط تنش سرب بر محتوای سرب در برگ گلرنگ (آزمایش مزرعه‌ای) ۱۵۲
شکل ۴-۱۱۲- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی در شرایط تنش سرب بر محتوای سرب در دانه گلرنگ (آزمایش مزرعه‌ای) ۱۵۲
شکل ۴-۱۱۳- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی کلسیم در شرایط تنش سرب بر محتوای سرب در دانه گلرنگ (آزمایش مزرعه‌ای) ۱۵۳
شکل ۴-۱۱۴- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی کلسیم و روی بر محتوای سرب در دانه (آزمایش مزرعه‌ای) ۱۵۳
شکل ۴-۱۱۵- مقایسه اثر برهم‌کنش سه‌جانبه روی، کلسیم و سرب بر محتوای سرب در دانه (آزمایش مزرعه‌ای) ۱۵۴
شکل ۴-۱۱۶- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی در شرایط تنش سرب بر محتوای روی در برگ گلرنگ (آزمایش گلدانی) ۱۵۸
شکل ۴-۱۱۷- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی در شرایط تنش سرب بر محتوای روی در دانه گلرنگ (آزمایش گلدانی) ۱۵۹
شکل ۴-۱۱۸- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی در شرایط تنش سرب بر محتوای روی در ریشه گلرنگ (آزمایش گلدانی) ۱۵۹

شکل ۴-۱۱۹- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی و کلسیم بر محتوای روی در ریشه گلرنگ (آزمایش گلدانی) ۱۶۰
شکل ۴-۱۲۰- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی در شرایط تنش سرب بر محتوای روی در برگ گلرنگ (آزمایش مزرعه‌ای) ۱۶۰
شکل ۴-۱۲۱- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی در شرایط تنش سرب بر محتوای روی در دانه گلرنگ (آزمایش مزرعه‌ای) ۱۶۱
شکل ۴-۱۲۲- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی کلسیم در شرایط تنش سرب بر محتوای کلسیم در برگ گلرنگ (آزمایش گلدانی) ۱۶۳
شکل ۴-۱۲۳- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی کلسیم در شرایط تنش سرب بر محتوای کلسیم در دانه گلرنگ (آزمایش گلدانی) ۱۶۴
شکل ۴-۱۲۴- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی کلسیم در شرایط تنش سرب بر محتوای کلسیم در ریشه گلرنگ (آزمایش گلدانی) ۱۶۴
شکل ۴-۱۲۵- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی کلسیم در شرایط تنش سرب بر محتوای کلسیم در برگ گلرنگ (آزمایش مزرعه‌ای) ۱۶۵
شکل ۴-۱۲۶- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی کلسیم در شرایط تنش سرب بر محتوای کلسیم در دانه گلرنگ (آزمایش مزرعه‌ای) ۱۶۵

فهرست جداول

جدول ..... صفحه
جدول ۳-۱- نتایج فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش (آزمایش گلدانی و مزرعه‌ای)..... ۲۴
جدول ۴-۱- مقایسه میانگین اثرهای ساده محلول‌پاشی کلسیم بر طول ریشه گیاه گلرنگ (آزمایش گلدانی) ۴۰
جدول ۴-۲- مقایسه میانگین اثرهای ساده سطوح مختلف تنش سرب بر قطر ساقه گیاه گلرنگ (آزمایش گلدانی) ۴۶
جدول ۴-۳- مقایسه میانگین اثرهای ساده سطوح مختلف تنش سرب بر قطر ساقه گیاه گلرنگ (آزمایش مزرعه‌ای) ۴۶
جدول ۴-۴- مقایسه میانگین اثرهای ساده سطوح مختلف تنش سرب و محلول‌پاشی روی و کلسیم بر وزن خشک برگ گیاه گلرنگ (آزمایش مزرعه‌ای) ۵۸
جدول ۴-۵- مقایسه میانگین اثرهای ساده سطوح مختلف محلول‌پاشی روی بر وزن خشک ساقه گیاه گلرنگ (آزمایش مزرعه‌ای) ۶۳
جدول ۴-۶- مقایسه میانگین اثرهای ساده سطوح مختلف محلول‌پاشی روی بر سطح برگ گیاه گلرنگ (آزمایش مزرعه‌ای) ۶۷
جدول ۴-۷- مقایسه میانگین اثرهای ساده سطوح مختلف تنش سرب و محلول‌پاشی روی و کلسیم بر عملکرد بیولوژیک گیاه گلرنگ (آزمایش مزرعه‌ای)..... ۷۳
جدول ۴-۸- مقایسه میانگین اثرهای ساده سطوح مختلف تنش سرب و محلول‌پاشی روی و کلسیم بر وزن طبق در بوته (آزمایش گلدانی) ۷۵
جدول ۴-۹- مقایسه میانگین اثرهای ساده سطوح مختلف تنش سرب و محلول‌پاشی روی بر وزن طبق در بوته (آزمایش مزرعه‌ای) ۷۵
جدول ۴-۱۰- مقایسه میانگین اثرهای ساده سطوح مختلف تنش سرب و محلول‌پاشی روی و کلسیم بر وزن هزار دانه و تعداد طبق در بوته (آزمایش گلدانی) ۸۰
جدول ۴-۱۱- مقایسه میانگین اثرهای ساده سطوح مختلف تنش سرب و محلول‌پاشی روی و کلسیم بر عملکرد دانه، وزن هزار دانه، تعداد دانه در طبق (آزمایش مزرعه‌ای) ۸۰
جدول ۴-۱۲- مقایسه میانگین اثرهای ساده محلول‌پاشی کلسیم بر عملکرد روغن گیاه گلرنگ (آزمایش مزرعه‌ای)..... ۸۹
جدول ۴-۱۳- مقایسه میانگین اثرهای ساده سطوح مختلف تنش سرب و محلول‌پاشی روی و کلسیم بر درصد و عملکرد پروتئین دانه گیاه گلرنگ (آزمایش گلدانی) ۹۶

جدول ۴-۱۴- مقایسه میانگین اثرهای ساده سطوح مختلف تنش سرب و محلول‌پاشی روی و کلسیم بر درصد و عملکرد پروتئین دانه گیاه گلرنگ (آزمایش مزرعه‌ای)..... ۹۶
جدول ۴-۱۵- مقایسه میانگین اثرهای ساده محلول‌پاشی کلسیم بر کربوهیدرات محلول در برگ گیاه گلرنگ (آزمایش گلدانی)..... ۱۰۰
جدول ۴-۱۶- مقایسه میانگین اثرهای ساده محلول‌پاشی کلسیم بر کربوهیدرات محلول در برگ گیاه گلرنگ (آزمایش مزرعه‌ای)..... ۱۰۰
جدول ۴-۱۷- مقایسه میانگین اثرهای ساده محلول‌پاشی کلسیم بر میزان مالون دی آلدهید گیاه گلرنگ (آزمایش گلدانی)..... ۱۰۴
جدول ۴-۱۸- مقایسه میانگین اثر ساده محلول‌پاشی کلسیم بر میزان فعالیت آنزیم آنتی اکسیدان کاتالاز (آزمایش مزرعه‌ای)..... ۱۱۶
جدول ۴-۱۹- مقایسه میانگین اثرهای ساده سطوح سرب بر میزان فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز (آزمایش مزرعه‌ای)..... ۱۲۱
جدول ۴-۲۰- مقایسه میانگین اثرهای ساده سطوح مختلف تنش سرب و محلول‌پاشی روی و کلسیم بر میزان فعالیت آنزیم پراکسیداز (آزمایش مزرعه‌ای)..... ۱۲۶
جدول ۴-۲۱- مقایسه میانگین اثرهای ساده سطوح مختلف تنش سرب و محلول‌پاشی روی و کلسیم بر محتوای نسبی آب برگ گیاه گلرنگ (آزمایش گلدانی)..... ۱۲۸
جدول ۴-۲۲- مقایسه میانگین اثرهای ساده محلول‌پاشی کلسیم بر میزان آنتوسیانین گیاه گلرنگ (آزمایش گلدانی)..... ۱۳۰
جدول ۴-۲۳- مقایسه میانگین اثرهای ساده محلول‌پاشی کلسیم بر میزان آنتوسیانین برگ گیاه گلرنگ (آزمایش مزرعه‌ای)..... ۱۳۰
جدول ۴-۲۴- مقایسه میانگین اثرهای ساده سطوح مختلف تنش سرب و محلول‌پاشی روی و کلسیم بر میزان کلروفیل a، b، کلروفیل کل و کاروتنوئید گیاه گلرنگ (آزمایش گلدانی)..... ۱۳۷
جدول ۴-۲۵- مقایسه میانگین اثرهای ساده سطوح مختلف تنش سرب و محلول‌پاشی روی و کلسیم بر میزان کلروفیل b و کاروتنوئید گیاه گلرنگ (آزمایش مزرعه‌ای)..... ۱۳۷
جدول ۴-۲۶- مقایسه میانگین اثرهای ساده سطوح مختلف محلول‌پاشی کلسیم بر محتوای روی در برگ (آزمایش گلدانی)..... ۱۵۷
جدول ۴-۲۷- مقایسه میانگین اثرهای ساده سطوح مختلف محلول‌پاشی کلسیم بر محتوای روی در برگ (آزمایش مزرعه‌ای)..... ۱۵۸
جدول ۴-۲۸- مقایسه میانگین اثرهای ساده سطوح مختلف محلول‌پاشی روی بر محتوای کلسیم در برگ (آزمایش مزرعه‌ای)..... ۱۶۳
جدول پیوست ۱- میانگین مربعات اثر سرب، روی و کلسیم بر حجم ریشه، طول ریشه، ارتفاع ساقه و قطر ساقه گلرنگ (آزمایش گلدانی)..... ۱۷۰

جدول پیوست ۲- میانگین مربعات اثر سرب، روی و کلسیم بر ارتفاع و قطر ساقه گلرنگ (آزمایش مزرعه‌ای) ۱۷۰
جدول پیوست ۳- میانگین مربعات اثر سرب، روی و کلسیم بر وزن خشک ریشه، برگ و ساقه، نسبت وزن خشک ریشه به ساقه، سطح برگ، عملکرد بیولوژیک و وزن طبق در بوته (آزمایش گلدانی).. ۱۷۱
جدول پیوست ۴- میانگین مربعات اثر سرب، روی و کلسیم بر وزن خشک برگ و ساقه، شاخص سطح برگ، عملکرد بیولوژیک و وزن طبق در بوته (آزمایش مزرعه‌ای) ۱۷۱
جدول پیوست ۵- میانگین مربعات اثر سرب، روی و کلسیم بر عملکرد دانه، وزن هزار دانه، تعداد دانه در طبق، تعداد طبق در بوته و شاخص برداشت (آزمایش گلدانی) ۱۷۲
جدول پیوست ۶- میانگین مربعات اثر سرب، روی و کلسیم بر عملکرد دانه، وزن هزار دانه، تعداد دانه در طبق، تعداد طبق در بوته و شاخص برداشت (آزمایش مزرعه‌ای) ۱۷۲
جدول پیوست ۷- میانگین مربعات اثر سرب، روی و کلسیم بر درصد و عملکرد روغن، درصد و عملکرد پروتئین و کربوهیدرات محلول (آزمایش گلدانی) ۱۷۳
جدول پیوست ۸- میانگین مربعات اثر سرب، روی و کلسیم بر درصد و عملکرد روغن، درصد و عملکرد پروتئین و کربوهیدرات محلول (آزمایش مزرعه‌ای) ۱۷۳
جدول پیوست ۹- میانگین مربعات اثر سرب، روی و کلسیم بر میزان مالون دی آلدهید، فعالیت آنزیم‌های گلوتاتیون اس ترانسفراز، کاتالاز، آسکوربات پراکسیداز و پراکسیداز، محتوای نسبی آب برگ و آنتوسیانین (آزمایش گلدانی) ۱۷۴
جدول پیوست ۱۰- میانگین مربعات اثر سرب، روی و کلسیم بر میزان مالون دی آلدهید، فعالیت آنزیم‌های گلوتاتیون اس ترانسفراز، کاتالاز، آسکوربات پراکسیداز و پراکسیداز، محتوای نسبی آب برگ و آنتوسیانین (آزمایش مزرعه‌ای) ۱۷۴
جدول پیوست ۱۱- میانگین مربعات اثر سرب، روی و کلسیم بر رنگیزه‌های فتوسنتزی (آزمایش گلدانی) ۱۷۵
جدول پیوست ۱۲- میانگین مربعات اثر سرب، روی و کلسیم بر رنگیزه‌های فتوسنتزی (آزمایش مزرعه‌ای) ۱۷۵
جدول پیوست ۱۳- میانگین مربعات اثر سرب، روی و کلسیم بر میزان سرب در برگ، ریشه و دانه (آزمایش گلدانی) ۱۷۶
جدول پیوست ۱۴- میانگین مربعات اثر سرب، روی و کلسیم بر میزان سرب در برگ و دانه (آزمایش مزرعه‌ای) ۱۷۶
جدول پیوست ۱۵- میانگین مربعات اثر سرب، روی و کلسیم بر محتوای روی و کلسیم در برگ، دانه و ریشه (آزمایش گلدانی) ۱۷۹
جدول پیوست ۱۶- میانگین مربعات اثر سرب، روی و کلسیم بر محتوای روی و کلسیم در برگ و دانه (آزمایش مزرعه‌ای) ۱۷۹

فصل اول: مقدمه

آلودگی فلزات سنگین درنتیجه فعالیت‌های گسترده صنعتی و کشاورزی یکی از مهم‌ترین مشکلات بوم شناختی در مقیاس جهانی است (اسلام و همکاران، ۲۰۰۷). فلز سرب یکی از فلزات سنگینی است که موجب آلودگی محیط زیست شده و با ایجاد مسمومیت در انسان و دیگر جانداران خسارت‌های جبران ناپذیری به بار می‌آورد. منابع عمده سرب دود خروجی از اگزوز وسایل نقلیه بنزین سوز، رنگ-های صنعتی و پساب‌های خانگی و صنعتی است (هریسون و لکسن، ۱۹۷۷). غلظت سرب در خاک‌های غیر آلوده در گستره ۱۵۰-۱۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک است (آلووی، ۲۰۱۳). لیکن حد مجاز آن در خاک براساس قوانین زیست محیطی و بهداشتی مناطق مختلف جهان ۱۵۰-۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک می باشد (کارینی، ۱۹۹۵). سطح کشت این نبات مربوط به استان‌های اصفهان، خراسان و یزد است (فروزان، ۱۳۷۸). میانگین غلظت فلز سرب در هوای شهرهای پرجمعیت مشهد ۳۲±۹۸/۲ نانو گرم بر متر مکعب و در هوای تهران ۱/۱۹ میکروگرم در مترمکعب هوا گزارش شد (صراف‌پور و همکاران، ۱۳۸۸؛ پورخباز و جوانمردی، ۱۳۹۳). در بررسی میزان آلودگی به سرب و کادمیوم در گیاهان کلزا و گلرنگ مزارع اطراف کارخانه ذوب آهن اصفهان مشخص گردید که تجمع فلزات سنگین به وفور در فرآورده‌ها و روغن‌های خوراکی دیده می‌شود و بیشترین میزان آلودگی به سرب در روغن-های گلرنگ و کلزا به ترتیب ۲۴/۷۴ و ۱۱/۸۵ میکروگرم بر لیتر مشاهده شد (مردانی نافچی، ۱۳۹۵). امروزه مشکلات آلودگی در کشور ما نیز مانند سایر کشورهای در حال توسعه، به واسطه پیشرفت تکنولوژیک و فعالیت‌های امروزی بشر، روز به روز در حال افزایش می‌باشد و لزوم توجه بیشتری را می-طلبد.

امنیت غذایی در کنار حفظ محیط زیست، به عنوان یک موضوع مهم جهانی در دهه‌های اخیر مطرح شده است، در جهان امروز که با رشد روز افزون جمعیت مواجه هستیم، اهمیت مدیریت کاربرد کودهای شیمیایی و عناصر غذایی بیشتر مشخص می‌شود (نظر و همکاران، ۲۰۱۲). محلول‌پاشی عناصر غذایی از مؤثرترین روش‌های تأمین مواد غذایی گیاهان است و تأثیر بیشتری نسبت به روش‌های کاربرد خاکی به ویژه در شرایط نامناسب خاک دارد (اردال و همکاران، ۲۰۰۴). روی یکی از ۷ عنصر کم مصرف و

ضروری در تغذیه گیاه می‌باشد و نقش مهمی در تولید زیست توده بازی می‌کند (کایا و هیگس، ۲۰۰۲). نیاز به روی برای رشد بهینه و مراحل فیزیولوژیک (میسرا، ۱۹۹۲) و غلظت بحرانی آن برای بهبود عملکرد روغن (میسرا و شرما، ۱۹۹۱) ضروری گزارش شده است و این عنصر از ترکیبات مهم بسیاری از آنزیم‌های حیاتی است و سبب پایداری ساختار پروتئین‌ها، پروتئین‌های باند شونده با غشاء و DNA، فعال کننده آنزیم‌های تنفسی و بیوسنتز کننده هورمون‌های رشدی گیاه است (واهبه، ۱۹۸۴). روی از عناصر کم مصرف است که در کاهش رادیکال‌های آزاد از طریق سیستم آنتی اکسیدانی در تخفیف تنش اکسیداتیو نقش دارد (ککمک، ۲۰۰۰) و موجب افزایش مقاومت گیاه در مقابل فلزات سرب، مس و کادمیوم می‌شود، همچنین این عنصر در تحمل گیاه در مقابل تنش اکسیداتیو حاصل از پراکسیدهیدروژن تأثیرگذار می‌باشد (تسوجی و همکاران، ۲۰۰۲) و همچنین این عنصر از طریق بیوسنتز آنزیم‌های آنتی اکسیدان کاتالاز و آسکوربات پراکسیداز سبب سمیت‌زدایی فلز سنگین در گیاه می‌شود (آراویند و پراساد، ۲۰۰۵). کلسیم نیز عنصری مهم است که در رشد و توسعه گیاه و واکنش‌های فتوسنتزی نقش دارد، این ماده معدنی همچنین جذب مواد غذایی در غشاءهای پلاسمایی و انتقال کربوهیدرات را تنظیم می‌کند (مظفری و همکاران، ۲۰۱۳). کلسیم جزء عناصر پرمصرفی است که به دلیل کارکردهای ویژه خود اهمیت زیادی در واکنش گیاهان به تنش‌های محیطی دارد (مانس، ۱۹۸۸). کاربرد کلسیم تأثیر زیادی در حفاظت از گیاه در مقابل ممانعت کننده-های رشدی حاصل از غلظت‌های بالای فلز سنگین دارد که می‌تواند ناشی از نقش کلسیم در تنظیم انتقال یون به داخل سلول گیاه باشد (مظفری و همکاران، ۲۰۱۳).

گلرنگ گیاهی است یک ساله از تیره چتریان که میزان روغن این گیاه در شرایط مساعد بسته به نوع ژنوتیپ تا ۴۵ درصد می رسد (کوه‌نورد و همکاران، ۱۳۹۰). یکی از امتیازات ارزشمند گیاه گلرنگ در ایران بومی بودن و سازگاری آن است؛ به طوری‌که این گیاه با شرایط محیطی خشک و نیمه خشک و رطوبت کم سازگاری داشته و امکان کشت آن در بسیاری از مناطق کشور وجود دارد (فروزان، ۱۳۷۸). بیش از ۶۰ کشور جهان تولیدکننده گلرنگ هستند. در ایران نیز کشت آن به عنوان یک گیاه

روغنی از سال ۱۳۳۶ آغاز شد (یونس سینکی، ۱۳۸۷). در بین دانه‌های روغنی، روغن گلرنگ کیفیت بالایی داشته و از روغن‌های خشک شونده با درصد بالایی از اسید لینولئیک است که یکی از سالم‌ترین روغن‌های گیاهی به شمار می‌رود (کفکا و کارنی، ۱۹۹۸).

با توجه به مطالب ارائه شده، امروزه به واسطه فعالیت‌های صنعتی بشر و پیشرفت‌های روزافزون آن، عناصر بسیار سمی و خطرناکی به طور پیوسته وارد محیط می‌شوند و اثرات مخربی بر رشد و تولید گیاهان و جانوران دارند و در نهایت از طریق ورود به زنجیره غذایی به انسان آسیب می‌رسانند. مطالعات زیادی در خصوص چگونگی آسیب فلزات سنگین به گیاهان و نیز چگونگی مهار آنها انجام شده است ولی کمتر به جذب این عناصر از طریق برگ پرداخته شده است. درحالی که به راحتی با رخ دادن یک بارندگی در مناطق آلوده یا استفاده از آبیاری بارانی این عناصر به سطح برگ آمده و به سرعت جذب می‌شوند و صدمات جبران ناپذیری را به مهمترین بخش گیاه یعنی سیستم فتوسنتزی وارد می‌کنند و بسیار آسان‌تر وارد زنجیره غذایی انسان می‌شوند درحالی که اگر فقط جذب این فلزات از طریق ریشه مطرح باشد بخش زیادی از آن در همان ریشه متوقف می‌شود و به اندام هوایی منتقل نمی‌گردد. از این رو در این تحقیق جذب سرب توسط گیاه گلرنگ و آسیب‌های ناشی از آن مورد بررسی قرار گرفته است و با توجه به مزایایی که برای عناصر کلسیم و روی در مهار فلزات سنگین بیان شده است، اثر این دو عنصر در تنش به وجود آمده توسط سرب بررسی گردید. اهداف این پژوهش به شرح زیر در نظر گرفته شد:

۱. تعیین میزان جذب برگی سرب در محدوده غلظت‌های این آزمایش و میزان تجمع آن در بخش‌های مختلف گیاه
۲. بررسی اثرات منفی سرب بر رشد، عملکرد و برخی پارامترهای فیزیولوژیکی گیاه گلرنگ
۳. بررسی تأثیر محلول‌پاشی سولفات روی و کلرید کلسیم بر رشد، عملکرد، کیفیت دانه و برخی صفات فیزیولوژیکی گلرنگ در هر دو شرایط حضور و عدم حضور سرب
۴. تعیین مناسب‌ترین غلظت عناصر روی و کلسیم در کاهش اثرات منفی فلز سنگین سرب

فصل دوم: بررسی منابع

۲-۱- گلرنگ

۲-۱-۱- ویژگی‌های ریخت شناسی

گلرنگ گیاهی است که ارتفاع بوته آن به ۶۰ الی ۱۵۰ سانتی‌متر می‌رسد و طول دوره رشد آن بسته به رقم، طول فصل رشد مؤثر و سایر عوامل محیطی از ۱۲۰ تا ۱۸۰ روز می‌باشد. گلرنگ دارای ریشه مستقیم، توسعه یافته و قوی با ریشه‌های جانبی زیاد است که می‌تواند تا عمق ۳ متری در خاک‌های نفوذپذیر رشد کند و رطوبت و مواد غذایی خاک را جذب نماید (حیدری و آساد، ۱۳۷۷). برگ‌های گلرنگ بیضی شکل، بدون دمبرگ، بدون کرک و به رنگ سبز تیره است و با آرایش مارپیچی روی ساقه قرار دارند. شکل برگ در قسمت‌های مختلف ساقه متفاوت است به‌طوری‌که بزرگ‌ترین برگ‌ها در وسط ساقه اصلی ظاهر می‌شود و برگ‌های بخش تحتانی گلرنگ ساده و بدون خار و برگ-های فوقانی بوته ممکن است از بدون خار تا پرخار تیغی باشد (باقری، ۱۳۷۴). انتهای آزاد ساقه اصلی و ساقه‌های فرعی گلرنگ به یک گل‌آذین ختم می‌شود. در نتیجه گلرنگ در زمره گیاهان رشد محدود یا گل‌انتهایی قرار می‌گیرد. گل‌آذین گلرنگ طبق نامیده می‌شود و از نوع کلاپرک است (کفکا و کارنی، ۱۹۹۸). تراکم بوته بر تعداد طبق و اندازه آن‌ها تأثیر می‌گذارد و معمولاً تراکم‌های کمتر در زراعت گلرنگ باعث ایجاد طبق‌های گل بیشتر و بزرگ‌تر می‌شوند. هر طبق ۱/۵تا ۳/۵ سانتی‌متر قطر دارد و از گلچه‌های متعدد تشکیل شده است، که روی یک نهنج نسبتاً هموار و مدور به‌صورت نزدیک به هم مجتمع شده‌اند. تعداد گلچه‌ها بسته به واریته و شرایط محیطی بین ۲۰ تا ۱۸۰ عدد متغیر است و هر گل می‌تواند مولد یک دانه باشد (حق‌پرست، ۱۳۷۱). گلدهی در هنگام صبح اتفاق می‌افتد. گلدهی یک طبق ظرف ۳ تا ۵ روز تکمیل می‌شود ولی طول دوره گلدهی در هر بوته و در هر مزرعه زیاد است و از ۱۰ تا ۴۰ روز به‌طول می‌انجامد. رنگ گل می‌تواند از زرد مایل به سفید تا قرمز پرتقالی تغییر کند که معمول‌ترین رنگ آن زرد تیره است (امیدبیگی، ۱۳۷۹). میوه گلرنگ از نظر گیاه‌شناسی فندقه نامیده می‌شود. دانه از نظر شکلی شبیه یک دانه کوچک آفتابگردان است ولی پوسته آن فیبر بیشتری داشته و ضخیم‌تر است. دانه به رنگ‌های سیاه، زرد، سفید یا کرمی با سطح خارجی صاف

دیده می‌شود. دانه‌ها معمولاً فاقد زواید کرکی هستند اما روی بعضی از دانه‌ها که در مرکز طبق قرار دارند ممکن است زواید کرکی وجود داشته باشد. ذخیره روغن در لپه‌ها انجام می‌شود. وزن هزار دانه گلرنگ از ۳۵ تا ۵۰ گرم متغیر است. دانه گلرنگ دارای ۳۰ تا ۶۴ درصد پوسته و ۱۲ تا ۲۲ درصد پروتئین می‌باشد (امام، ۱۳۷۴).

۲-۱-۲- منشاء و اهمیت گیاه گلرنگ

گلرنگ گیاهی یک‌ساله و از خانواده مرکبان است. گلرنگ از اولین گیاهانی است که در خاور نزدیک، ایران، افغانستان، پاکستان، هند، چین و ژاپن کشت می‌شده است. در ایران علاوه بر گونه زراعی، گونه‌های وحشی آن نیز در بسیاری مناطق به وفور یافت می‌شود. ایران از لحاظ ذخایر ژنتیکی گلرنگ یکی از غنی‌ترین مناطق جهان است. گلرنگ از دیر باز در خراسان، آذربایجان و اصفهان به صورت زراعت فرعی و با هدف تهیه رنگ ازگل آن کشت می‌گردد (خواجه‌پور، ۱۳۸۴). ارقام گلرنگ بر اساس کیفیت روغن به دو گروه تقسیم می‌شوند، دسته اول شامل ارقام دارای روغن با میزان اسید اولئیک بالا که در دمای زیاد پایدار می‌باشند و پس از سرخ‌کردن بوی نامطبوع تولید نمی‌کند و در مصارف آشپزی به‌کار می‌رود (پاسبان اسلام، ۱۳۸۳). دسته دوم، ارقام با اسید لینولئیک بالا می‌باشند که روغن آن‌ها در برابر دمای بالا ناپایدار است. ارقامی که اسید اولئیک و اسیدهای چرب غیراشباع کمی داشته باشند از نظر تجاری بیشتر مورد توجه قرار می‌گیرند (چاکرالحسینی، ۱۳۷۸).

۲-۱-۳- موارد مصرف

دانه گلرنگ دارای ۲۰ الی ۴۰ درصد روغن (در ارقام جدید ۴۵ درصد)، ۱۲ تا ۲۲ درصد پروتئین و ۳۵ الی ۶۰ درصد پوسته می‌باشد (گککل و همکاران، ۲۰۰۷). روغن گلرنگ در طباخی، تهیه صابون، رنگ، ورنیس و مواد پوشاننده مشابه مصرف می‌شود. روغن گلرنگ از نوع خشک شونده (دارای مقدار زیادی اسیدهای چرب اشباع نشده و ضریب یدی ۱۴۰ تا ۱۵۰) است و قسمت اعظم آن را (۷۷ درصد) اسید لینولئیک تشکیل می‌دهد و اسید لینولنیک کمی دارد و به همین جهت روغن گلرنگ برای تهیه رنگ‌های سفید ساختمانی استفاده می‌شود. از گلبرگ گلرنگ ماده قرمز کارتامین استخراج

می‌کنند که به صورت رنگ غذایی و جهت رنگ آمیزی پارچه استفاده می‌شود (کفکا و کارنی، ۱۹۹۸). گلبرگ‌های این گیاه نیز استفاده‌های دارویی دارند و می‌توانند به عنوان یک محرک برای جریان خون و هم چنین بهبود شکستگی‌ها، ضربه‌ها و کشیدگی‌ها مورد استفاده قرار گیرند. باقیمانده دانه گلرنگ پس از استخراج روغن، کنجاله نامیده می‌شود. کنجاله گلرنگ حدود ۲۳ درصد پروتئین و ۳۵ درصد فیبر دارد و به عنوان مکمل پروتئین در تغذیه دام و طیور استفاده می‌شود (ملکوتی و طهرانی، ۱۳۷۹).

۲-۲- سرب

۲-۲-۱- نحوه ورود سرب به محیط

سرب فلزی است نرم، به رنگ خاکستری مایل به آبی یا نقره ای کبود که دارای عدد اتمی ۸۲ و وزن اتمی ۲۰۷/۱۹ می‌باشد (پایس و بنتون جونس، ۱۹۹۷). نقطه ذوب سرب ۳۲۷/۴۳ و نقطه جوش آن ۱۷۴۰ درجه سانتی‌گراد است و درگروه فلزات سنگین، بعد از طلا و جیوه سنگین‌ترین فلز محسوب می‌شود (میسزالسکی و همکاران، ۱۹۹۸). براساس استانداردهای ملی کیفیت هوای آزاد حد مجاز غلظت سرب در هوا ۱/۵ میکروگرم در مترمکعب و غلظت مجاز صنعتی آن ۵۰ میکروگرم در مترمکعب در ۸ ساعت می‌باشد (دنورز، ۱۳۸۰). بر اساس استاندار حد مجاز سرب کل موجود در خاک ۵۰ میلی-گرم بر کیلوگرم می‌باشد (امینی و همکاران، ۲۰۰۵). دامنه طبیعی غلظت سرب در گیاهان از ۰/۲ تا ۲۰ میلی‌گرم در کیلوگرم و حد بحرانی آن ۳۰ تا ۳۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم گزارش شده است (عباسپور، ۱۳۸۶). نزولات جوی از قبیل باران و برف مؤثرترین راه زدایش آلاینده‌ها از اتمسفر می‌باشد و به محققین در تشخیص سهم نسبی منابع مختلف آلاینده‌ها کمک فراوانی می‌کند، فلزات سنگین موجود در نزولات جوی می‌توانند وضعیت آلودگی محیطی را در نواحی مختلف شهری به خوبی تشریح کنند (کمانی و همکاران، ۱۳۹۴). در بررسی غلظت فلزات سنگین در نزولات جوی شهر تهران و تعیین منشاء آن نشان داده شد که آلاینده‌هایی نظیر آلومینیوم، آهن و کروم دارای منشا طبیعی و آلاینده‌هایی نظیر روی، کادمیم، نیکل، سرب و مس دارای منشأ غیرطبیعی می‌باشند (کمانی و

همکاران، ۱۳۹۴). میزان جذب سرب توسط گیاهان با غلظت آن در محیط ارتباط دارد و با افزایش فاصله از جاده میزان سرب در گونه‌های گیاهی کاهش و با بالا رفتن میزان تردد خودروها مقدار تجمع آن در گیاه افزایش می‌یابد (خادمی و کرد، ۱۳۸۹). آلودگی خاک‌ها به سرب یکی از مشکلات بزرگی است که کشورهای در حال توسعه و صنعتی با آن رو به رو هستند (کاباتا- پندیاس، ۲۰۰۰). منابع آلوده کننده سرب خاک شامل فعالیت‌های صنعتی مانند معادن و تصفیه خانه‌ها، فعالیت‌های کشاورزی مانند کاربرد آفت کش‌ها و کاربرد لجن فاضلاب و فعالیت‌های شهری مانند کاربرد سرب در بنزین و رنگ‌ها می‌باشد (شن و همکاران، ۲۰۰۲). با افزایش جمعیت و پدیده صنعتی شدن جوامع، استفاده هر چه بیشتر از سوخت‌های فسیلی خصوصاً فرآورده‌های نفتی، بروز مسایل و مشکلات زیست محیطی را به‌دلیل تولید هیدروکربن‌ها، گازهای آلوده و فلزات سنگین موجب گردیده است، فلزات سنگین به دلیل غیر قابل تجزیه بودن و اثرات فیزیولوژیکی آنها بر موجودات زنده، حتی در غلظت‌های بسیار کم نیز حائز اهمیت هستند و از عوامل مختل کننده اکوسیستم‌ها به شمار می‌آیند (آدریانو، ۱۹۸۶).

۲-۲-۲- سمیت سرب در گیاهان

آلودگی سرب سبب بروز مشکلات فراوانی برای گیاهان از قبیل اختلال در میتوز، کلروز برگ‌ها، توقف رشد ریشه و ساقه می‌گردد و بر فعالیت‌های آنزیمی تأثیرگذار است، سرب نه تنها بر رشد گیاهان اثرگذار است، بلکه با وارد شدن به چرخه غذایی به موجودات زنده نیز آسیب می‌رساند (لیو و همکاران، ۲۰۰۹). این فلز از مهمترین فلزات آلاینده محیط زیست به حساب می‌آید که در فرآیندهای متابولیسمی عنصری غیرضروری است و ممکن است حتی در مقادیر بسیار کم نیز برای موجودات زنده سمی و کشنده باشد (اسلام و همکاران، ۲۰۰۸). غلظت بالای سرب در سطح مورفولوژیکی کاهش زیست توده ریشه و اندام هوایی، مهارجوانه‌زنی، القای کلروز و نکروز برگ، تغییر رنگ و سوبرینی شدن ریشه را موجب می‌گردد (اسلام و همکاران، ۲۰۰۷). در فراساختار سلول، تغییر در اندازه و شکل کلروپلاست و افزایش اندازه واکوئل را ایجاد می‌کند و در سطح فیزیولوژیکی، در عمل روزنه‌ها، محتوای نیترات، تعادل آب سلول‌ها، فتوسنتز و تنفس مشکل ایجاد نموده و سبب افزایش پراکسیداسیون

لیپیدها می‌شود (اسلام و همکاران، ۲۰۰۷؛ لیو و همکاران، ۲۰۰۸). گونه‌های فعال اکسیژن تولید شده به وسیله فلز سنگین سرب سبب آسیب‌رسانی به ملکول‌های زیستی به ویژه پروتئین‌ها می‌شود که دلیل آن افزایش میزان واکنش آنیون سوپراکسید با زنجیره آمینواسید است؛ کاهش در سطح پروتئین‌های محلول ممکن است به دلیل افزایش هیدرولیز پروتئین، فعالیت کاتالیزگر سرب، افزایش واکنش‌های تجزیه‌ای، کاهش آمینواسیدهای موجود و دناتوره شدن آنزیم‌های شرکت کننده در سنتز پروتئین باشد، همچنین تحریک پراکسیداسیون لیپیدها و متلاشی شدن پروتئین‌ها یکی از اثرات سمی گونه‌های فعال اکسیژن است که منجر به کاهش غلظت پروتئین می‌شود (ال- بتاجی و همکاران، ۲۰۱۰؛ ابراهیم و همکاران، ۲۰۱۲). در طی تنش با عناصر سنگین در گیاهان آثار مختلف سمی از قبیل اثر تنش اکسیداتیو و ممانعت از جذب مواد (جیبلن و همکاران، ۲۰۰۲) گزارش شده است و در تنش‌های اکسیداتیو القا شده توسط سرب در گیاهان آنزیم‌های محافظتی نظیر کاتالاز، سوپراکسید دیسموتاز و آسکوربات پراکسیداز افزایش می‌یابد (کاظمی، ۱۳۸۲). همچنین تیمار با سرب موجب تغییر در فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدانی و آسیب به ساختار ترکیبات آلی می‌شود (هوو و همکاران، ۲۰۰۷). تحت تنش، آنزیم‌های آنتی اکسیدانی شامل کاتالازها و تعداد زیادی از پراکسیدازها از جمله گایاکول پراکسیداز و آسکوربات پراکسیداز فعال می‌شوند (پراساد، ۱۹۹۷). مکانیسم‌های اثر آلودگی سرب عبارتند از واکنش با گروه تیول یا کاتیون، تغییر در نفوذپذیری غشای سلول، جانشینی با عناصر ضروری (کاتیون‌ها)، جایگزینی در محل گروه‌های ضروری مثل فسفات، نیترات، آرسنات، فلورات، بورات و برومات و آسیب به تشکیلات فتوسنتزی که بیشترین اثر ناشی از فلزات سنگین مربوط به آن است (پندیاس و پندیاس، ۲۰۰۱). مشخص شده است که یکی از تیره‌های گیاهی که میزان تجمع فلزات سنگین در آنها بالاست تیره کمپوزیته است که مانع جذب فلزات نشده و ساز و کارهایی را برای از بین بردن سمیت فلزات سنگین به کار می‌برند (مارشنر، ۱۹۹۵). گیاه فرا انباشته باید بتواند نزدیک به ۱۰۰ میکروگرم بر گرم سرب را در خود انباشته کنند که گلرنگ نمی‌تواند در ردیف گیاه فرا انباشته قرار گیرد (هوشمندفر و طهرانی، ۱۳۸۷). نورانی آزاد و همکاران (۱۳۹۰) گزارش کردند که

سرب در ریشه و اندام های هوایی گلرنگ انباشته می شود و بخش زیـادی از ایـن عنصـر در ریشـه هـا تجمع می یابند. در بررسی تاثیر غلظت‌های مختلف سرب (۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵، ۱، ۱/۵ و ۲ میلی‌مولار) بر گیاه کلزا نتایج نشان داد که غلظت‌های کاربردی سرب موجب ایجاد تنش در گیاه گردید و گیاهان نتوانستند دو غلظت بالای سرب (۱/۵ و ۲ میلـی مـولار) را تحمـل کننـد و از بـین رفتنـد (رنجبـر و همکاران، ۱۳۹۰). در آزمایشی تـأثیر غلظـت‌هـای مختلـف سـرب (۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ میلـی‌گـرم در کیلوگرم خاک) برگیاه گلرنگ بررسی شد نتایج نشان داد که سطوح مختلف کـاربردی سـرب موجـب ایجاد سمیت در گیاه و کاهش عملکرد گلرنگ گردید (هوشمندفر و طهرانی، ۱۳۸۷). در مطالعـه اثـر غلظت‌های مختلف سرب بر برخی پارامترهای فیزیولوژیکی گیاه کنگرفرنگی مشاهده شد که با افزایش غلظت سرب در محیط، میزان انباشت سرب در ریشه و ساقه گیاه کنگرفرنگی افزایش یافت، به طـوری که در تیمار ۱۵۰۰ میکرومولار میزان انباشت در ریشه‌ها ۴۱۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم و در ساقه ۲۱۷/۳۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود. میزان انباشت سرب در ریشه‌ها بیشتر از ساقه‌ها بود و با افزایش غلظت سرب در محلول غذایی، زیست توده ریشه و ساقه، محتوای کلروفیل b، a و کلروفیل کل و سطح بـرگ‌هـای گیاه کاهش معنی‌داری نشان داد (کریمی و همکاران، ۱۳۹۲). انباشتگی سرب در ریشه‌ها و فعال شدن دفاع آنتی اکسیدانی می‌تواند از سازوکارهای تحمل بـه سـمیت سـرب باشـد (نـورانی آزاد و همکـاران، ۱۳۹۰). موسوی و همکاران (۱۳۹۱) در بررسی تجمع سرب در قسمت‌های مختلف گیاه سیر و واکنش گیاه به تنش اکسیداتیو سرب نیز بیان داشتند که این گیاه در مواجهه با غلظت‌های مختلف سرب قادر است بیشترین میزان سرب را در ریشه جای دهد. اندازه‌گیری سطوح آنـزیم‌هـای کاتـالاز و پراکسـیداز نشان داد که میزان آنزیم کاتالاز در غلظت‌های مختلف سرب افزایش معنی‌داری نسبت به تیمار شاهد داشت و این در حالی است که تأثیر معنی‌داری بر سطوح آنزیم پراکسیداز در تیمارهای مختلـف سـرب نداشت.

۲-۳- نقش روی در گیاهان

روی یکی از عناصر ضروری در تغذیه گیاه می‌باشد (زند و همکاران، ۱۳۸۸) و نقش مهمی در تولید زیست توده بازی می‌کند (ککمک، ۲۰۰۰). با توجه به اینکه عناصر کم مصرف علاوه بر افزایش تولید، در سلامتی انسان نیز مؤثر می‌باشند، بنابراین یکی از راه‌های ساده و اقتصادی برای نیل به خودکفایی و جامعه سالم و تندرست، اضافه کردن عناصر غذایی کم مصرف به خاک و یا مصرف آن به صورت محلول‌پاشی می‌باشد تا بدین ترتیب علاوه بر افزایش تولید، غلظت این عناصر در محصولات کشاورزی افزایش یابد (سیادت و همکاران، ۱۳۷۸). بر اثر کمبود روی گیاهان از نظر عوامل تنظیم کننده رشد از جمله هورمون اکسین دچار اختلال می‌شوند (ثوابقی فیروزآبادی و همکاران، ۱۳۸۲). روی در بسیاری از سامانه‌های آنزیمی گیاه نقش کاتالیزوری فعال کننده و یا ساختمانی دارد و عنصری مهم در فعالیت آنزیم‌های دهیدروژناز، پروتئیناز، تشکیل RNA و تنظیم کننده‌های رشد است (خلیلی محله و رشدی، ۱۳۸۷). از دیگر نقش‌های روی ایجاد سیستم دفاعی سلولی در برابر گونه‌های واکنش‌دهنده با اکسیژن فعال می‌باشد؛ روی با اتصال به فسفولیپیدها و گروه‌های سولفیدریل غشاء سلولی سبب پایداری این غشاها می‌شود و آنها را در برابر خسارات ناشی از اکسایش محافظت می‌کند، به نحوی که در شرایط کمبود روی بروز خسارت‌های اکسیداتیو ناشی از تهاجم رادیکال‌های آزاد از طریق ایجاد اختلال در عملکرد غشاهای سلولی و تولید رادیکال‌های هیدروکسیل و سوپراکسیداز مشاهده می‌شود (مارشنر، ۱۹۹۵؛ ککمک، ۲۰۰۰). این عنصر به واسطه شرکت در ساختمان ریبوزوم‌ها، دارای نقش اساسی در پروتئین‌سازی است و در غیاب آن ریبوزوم‌ها متلاشی می‌شوند (خوش‌گفتارمنش، ۱۳۸۶)، همچنین روی در تولید کلروفیل، عمل گرده افشانی، لقاح و جوانه زنی مورد نیاز است (ککمک، ۲۰۰۰).

۲-۴- نقش کلسیم در گیاهان

کلسیم از عناصر غذایی ضروری برای رشد گیاه است که توسط سیستم ریشه به صورت کاتیون از محلول خاک جذب و توسط آوندهای چوبی به ساقه هدایت می‌شود. کلسیم وظایف بسیار مهمی در گیاه دارد، به عنوان مثال وجود کلسیم برای نگهداری و حفظ دیواره سلولی و ساختار غشاء ضروری

است و در بسیاری از فرآیندهای طبیعی رشد و نمو و پاسخ به تنش‌های زیستی و غیر زیستی به‌عنوان پیام آور ثانویه عمل می‌کند (رویز و همکاران، ۲۰۰۳). کلسیم در واکنش‌های فتوسنتزی نیز نقش مهمی دارد، این ماده معدنی همچنین جذب مواد غذایی در غشاءهای پلاسمایی، متابولیسم نیتروژن و انتقال کربوهیدرات را تنظیم می‌کند (وایت، ۲۰۰۰) و نیز تنظیم کننده فعالیت پروتئین‌های هدف به صورت مستقیم یا به وسیله پروتئین‌های باند شونده با کلسیم مانند کالمودولین است، که پس از باند شدن با کلسیم سبب فعالیت تعداد زیادی پروتئین کیناز و پروتئین‌های دیگر در سلول گیاهی می‌شود (وانگ و وانگ، ۲۰۰۷). همچنین مطالعات نشان داده که برای حفاظت غشاء سلولی در برابر آسیب های ناشی از تنش‌های مختلف، حضور کلسیم در محیط بیرونی ضروری است (نتوندا و همکاران، ۲۰۰۴). رویز و همکاران (۱۹۹۹) در آزمایشی تأثیر کاربرد سطوح مختلف کلرید کلسیم بر سنتز اسیدهای آمینه و پروتئین‌های موجود در تنباکو را مورد بررسی قرار دادند، نتایج حاکی از افزایش پروتئین سازی در حضور کلسیم بود، که در نتیجه آن وزن خشک گیاه افزایش یافت. نتایج تحقیقات نشان داد که نیترات کلسیم بر عملکرد کمی (عملکرد اندام هوایی و گل آذین) و عملکرد کیفی (متابولیت‌های ثانویه شامل فنل کل و تانن) گیاه گاو زبان تأثیر مثبتی داشته است (شمس، ۱۳۸۸).

۲-۵- نقش گوگرد در گیاهان

سولفور از چهار ماده غذایی اصلی مورد نیاز گیاه است و نقش مهمی در گیاهان دانه روغنی دارد به طوری که این گیاهان نسبت به سایر گیاهان به سولفور بیشتری نیاز دارند (گانگادهارا و همکاران، ۱۹۹۰). سولفور در گروه‌های تیول پروتئین‌ها و یا تیول‌های غیر پروتئینی قرار دارد. در چرخه آسکوربات - گلوتاتیون، آسکوربات همراه با گلوتاتیون بر تحمل گیاه نسبت به گونه‌های فعال اکسیژن تاثیر می‌گذارد و در سمیت‌زدائی آنها در سلول‌های گیاهی شرکت می‌کند (انجم و همکاران، ۲۰۰۸). یکی از مکانیسم‌های مهم سمیت زدایی فلزات سنگین بیوسنتز فیتوکلاتین‌ها است، فیتوکلاتین‌ها با یون‌های فلزات سنگین در سیتوسل کمپلکس تشکیل می‌دهند و سپس آنها را به واکوئل منتقل می‌کند و از این طریق از گیاه در مقابل اثرات مخرب فلزات سنگین محافظت می‌کنند (هو و همکاران،

۲۰۰۱)، بیوسنتز فیتوکلاتین‌ها بستگی به متابولیسم سولفور در گیاه دارد که از ایزوفرم‌های گلوتاتیون سنتز می‌شود و میزان سوپراکسید دیسموتاز تولیدی تحت شرایط تنش اکسیداتیو در گیاه را کاهش می‌دهد (گریل و همکاران، ۱۹۸۵).

۲-۶- محلول‌پاشی روی و کلسیم

مصرف خاکی عناصر کم مصرف، علاوه بر پایین بودن کارایی جذب آنها توسط گیاه، از لحاظ اقتصادی نیز بسیار پرهزینه است و از این رو می‌توان از روش‌های جایگزین مانند محلول‌پاشی بهره جست. جذب عنصر روی توسط گیاه با دو سازوکار فعال و غیرفعال صورت می‌گیرد. جذب غیرفعال آن از طریق جذب الکتروستاتیکی یون‌ها در دیواره سلولی سلول‌های ریشه صورت می‌گیرد. جذب فعال روی بیشتر تحت تأثیر دما و تهویه محیط ریشه می‌باشد و به نظر می‌رسد که سازوکار جذب فعال تأمین کننده بخش عمده روی مورد احتیاج گیاه باشد، با توجه به جذب اندک عنصر روی و سایر عناصر مشابه توسط ریشه بهتر است این عناصر از طریق اندام‌های هوایی در اختیار گیاه قرار داده شوند (سیاوشی و همکاران، ۱۳۸۳). مشکل اصلی در محلول‌پاشی، سوختگی برگ است، اگر فشار اسمزی عنصر محلول‌پاشی شده بیش از فشار اسمزی شیره سلولی باشد، آب از نسوج گیاهی خارج و سوختگی حاصل می‌گردد (ملکوتی و همایی، ۱۳۸۳). محلول‌پاشی بهتر است در صبح یا عصر که شدت نور خورشید کمتر است، صورت پذیرد. دمای محیط باید کمتر از ۲۹ درجه سانتی گراد باشد. درحالی که رطوبت نسبی بالاتر از ۷۰ درصد مطلوب است (ملکوتی و طهرانی، ۱۳۷۹; خوش گفتارمنش، ۱۳۸۶). محققین بیان کردند که محلول‌پاشی عناصر غذایی کم مصرف روی و برم سبب افزایش جذب فسفر، نیتروژن و پتاسیم در دانه گیاه نخود در مقایسه با شاهد شد، افزایش در جذب موادغذایی ممکن به دلیل تأثیر عناصر روی و برم بر تحریک فعالیت‌های بیولوژیکی به‌عنوان مثال فعالیت آنزیمی، سنتز کلروفیل، میزان انتقال تولیدات فتوسنتزی و جذب موادغذایی از ریشه پس از محلول‌پاشی کود باشد (ال‌کادر و مونا، ۲۰۱۳). محمد و همکاران (۱۹۹۰) گزارش کردند که کاربرد روی و آهن عملکرد گندم را نسبت به شاهد افزایش داده و با مصرف روی به‌صورت محلول‌پاشی، حداکثر عملکرد و غلظت روی

به‌دست آمد. در مطالعه تأثیر محلول پاشی ریزمغذی‌های آهن، روی و کلسیم بر عملکرد دانـه و روغـن ارقام کنجد نیز نتایج نشان داد که عناصر ریزمغذی سولفات روی و نیترات کلسیم اثـر معنـی‌داری بـر افزایش عملکرد دانه، عملکرد روغن، تعداد دانه در کپسول، وزن هزاردانه و درصد روغن کنجد داشتند و در نتیجه‌گیری نهایی از این پژوهش مشخص گردید که محلول پاشی عنصر روی بیشـترین تـأثیر را در افزایش درصد روغن (۳/۳ درصد افزایش نسبت به شاهد)، عملکرد دانه (۳۷ درصد افـزایش نسـبت بـه شاهد) و عملکرد روغن دانه (۴۱ درصـد افـزایش نسـبت بـه شـاهد) کنجـد داشـته اسـت (احمـدی و همکاران، ۱۳۹۱). محلول‌پاشی اندام‌های هوایی گاو زبان با نیترات کلسیم تأثیر معنی‌داری بـر میـزان کلروفیل داشت، بیشترین میزان کلروفیل با کاربرد نیترات کلسیم به غلظت ۱۵ میلی مولار حاصل شـد (شمس، ۱۳۸۸). در تحقیقی دیگری، دورداس (۲۰۰۹) نشان داد که با افزایش غلظت کلسیم، میـزان کلروفیل در گیاه مرزنجوش افزایش پیدا کرد. در آزمایشی اثر کاربرد کلسیم به‌صورت محلول‌پاشـی بـر گیاه گلرنگ بررسی شد، نتایج نشان داد که افـزایش سـطوح کلسـیم، سـبب تعـادل یـونی در سـلول، جلوگیری از نشت یون‌ها و افـزایش جـذب عناصـر غـذایی در گیـاه در شـرایط تـنش شـوری گردیـد (عطارزاده و همکاران، ۱۳۹۴).

۲-۷- نقش روی در سمیت‌زدایی سرب

تغذیه مناسب تحت شرایط تنش می‌تواند تا حدی به گیاه در تحمل تنش‌های مختلف کمـک کنـد. روی از عناصر کم مصرف است که برای رشد طبیعی و تولید مثل گیاهان زراعی ضروری است (آلـووی، ۲۰۰۴). عنصر روی چندین نقش حفاظتی دارد به‌عنوان مثال در بهبود آسیب‌هـای سـلولی بـه‌وجـود آمده توسط گونه‌های فعال اکسیژن تحت شرایط تنش‌های مختلف از جمله فلزات سنگین مؤثر اسـت. همچنین نقش مهی در حفاظت از کلروپلاست و واکنش‌های فتوشیمیایی مرتبط با آن دارد (ککمـک، ۲۰۰۰). عنصر روی در تشکیل ویتامین‌ها و آنزیم‌های مورد نیاز در واکنش‌های بیوشیمیای گیاه (شرر و همکاران، ۲۰۰۸) و نیز متعادل کردن رادیکال‌های آزاد و واکنش‌های مرتبط با آن از طریق سیستم-های آنتی اکسیدانی نقش دارد (زاگو و اوتیزا، ۲۰۰۱). تحقیقات نشان داده است کـه کـاربرد روی نـه

تنها اثر آنتاگونیستی با فلز سرب در گیاه کلزا و کاهو دارد بلکه جذب برخی مواد معدنی ضروری مانند منگنز و منیزیم را افزایش می‌دهد (هی و همکاران، ۲۰۰۴). محققین گزارش کردند روی در افزایش مقاومت گیاه در مقابل فلزات سرب، مس و کادمیوم مؤثر است، همچنین این عنصر در تحمل گیاه در مقابل تنش اکسیداتیو به وجود آمده به وسیله H_2O_2 تأثیرگذار می‌باشد (تسوجی و همکاران، ۲۰۰۲). روی با سرب در ریشه و ساقه اثر آنتاگونیستی دارد، کاربرد روی تحت شرایط تنش سرب، رشد و ظرفیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان را بهبود بخشید (اسلام و همکاران، ۲۰۱۱). کاربرد روی و مس در گیاه *Hibiscus sabdariffa* غلظت این عناصر را در گیاه افزایش داد و در همه قسمت‌های گیاه اثرات آنتاگونیستی با جذب فلزاتی نظیر نیکل و سرب داشت (آندو و همکاران، ۲۰۱۲). در بررسی پتانسیل استخراج سرب و روی در خاک به‌وسیله گلرنگ نتایج نشان داد که جذب عنصر سرب توسط گیاه گلرنگ با افزایش غلظت روی در خاک کاهش یافت و با افزایش مقادیر سرب در خاک، مقدار کل سرب انباشته شده در اندام هوایی با وجود افزایش غلظت سرب در گیاه کاهش نشان داد (هوشمندفر و طهرانی، ۱۳۸۷). در آزمایشی اثر کاربرد روی با غلظت نرمال (۰/۵ میکرومولار)، غلظت کم (۰/۰۵ میکرومولار) و غلظت بالای روی (۲۰ میکرومولار) تحت تنش فلز سنگین سرب با غلظت (۵۰ میکرومولار) بر رشد دو اکوتیپ *Elsholtzia argyi* بررسی شد؛ نتایج نشان داد که کاربرد سرب همراه با غلظت نرمال روی (۰/۵ میکرومولار) سبب آسیب‌رسانی به غشاء و پراکسیداسیون لیپیدها شد که به‌طور معنی‌داری میزان H_2O_2 و مالون‌دآلدئید و فعالیت آنزیم کاتالاز در غلظت کم روی (۰/۰۵ میکرومولار) افزایش یافت در حالی که بهبود اثرات نامطلوب سرب به وسیله کاربرد غلظت بالای روی (۲۰ میکرومولار) حاصل شد و نیز میزان رشد گیاه و وزن خشک ریشه، ارتفاع ریشه، قطر و حجم ریشه در مقایسه با شاهد افزایش یافت (اسلام و همکاران، ۲۰۱۱). کاربرد روی و سلنیوم میزان تجمع سرب و کادمیوم را در گیاه کاهو به‌طور قابل توجهی کاهش داد و جذب برخی از مواد معدنی همانند آهن، منیزیم، کلسیم، منگنز و مس را در گیاه افزایش داد (هی و همکاران، ۲۰۰۴). روی از طریق

بیوسنتز آنزیم‌های آنتی اکسیدان کاتالاز و آسکوربات پراکسیداز سبب سمیت‌زدایی فلز سنگین در گیاه می‌شود (آراویند و پراساد، ۲۰۰۴).

۲-۸- نقش کلسیم در سمیت‌زدایی سرب

کلسیم از عناصر غذایی ضروری است که نقش مهمی در شروع بسیاری از فرآیندهای انتقال سیگنال در سلول‌های گیاهی دارد (رویز و همکاران، ۲۰۰۳). محققین گزارش نمودند که افزایش کلسیم سیتوزولی در هنگام تنش آغاز کننده مسیرهای علامت‌دهی است که منجر به پاسخ‌های سلولی مناسب در مقابل تنش‌های محیطی و یا عوامل رشدی می‌شود (وایت، ۲۰۰۰). مطالعات انجام شده در گیاه آرابیدوپسیس نشان می‌دهد که پروتئین حس کننده کلسیم در هنگام تنش افزایش یافته و این افزایش توسط کلاتورهای کلسیم معکوس می‌شود (نایت و همکاران، ۱۹۹۷)، بنابراین کلسیم بیرون سلولی می‌تواند از طریق تغییر در میزان و نوع پروتئین‌های سلول، پاسخ به تنش را میانجی‌گری کند. کلسیم نقش مهمی در سمیت‌زدائی فلزات سنگین و تحمل گیاه به تنش زیستی و غیر زیستی دارد (دایود و همکاران، ۲۰۱۰). کلسیم می‌تواند از طریق رقابت با جریان یون فلز سمیت فلز سنگین را بهبود بخشد (سوزوکی، ۲۰۰۵). جذب بسیاری از فلزات سمی به‌وسیله کانال‌های کلسیم است، فلزات سنگین هم از طریق کانال‌های کلسیم و هم از طریق پروتئین‌های باندشونده با کلسیم رقابت می‌کنند (وایت، ۲۰۰۰). در گیاهان آثار سمیت با سرب معمولاً در غلظت‌های بالا در برگ ظاهر شده و به کاهش سنتز کلروفیل و کاهش رشد رویشی منجر می‌شود (رنجبر و همکاران، ۱۳۹۰). مواد غذایی معدنی در واکنش‌های فیزیولوژیکی، بیوشیمیایی و مکانیسم‌های تنظیم کننده فتوسنتز و سیستم‌های آنتی اکسیدان برای بهبود سمیت فلز سنگین نقش دارند (نظر و همکاران، ۲۰۱۲). در مطالعه اثر کلسیم بر جذب و سمیت سرب در گیاه جو نتایج نشان داد که با افزایش غلظت کلسیم میزان تجمع سرب در ریشه گیاه جو به‌طور معنی‌داری کاهش یافت و میزان جذب روی توسط ریشه گیاه افزیش یافت؛ که این امر می‌تواند به علت نقش کلسیم در تنظیم انتقال یون به داخل سلول گیاه باشد (گارلند و ویلکینز، ۱۹۸۱). کلسیم نقش مهمی در سمیت‌زدائی فلزات سنگین و تحمل گیاه به تنش‌های

محیطی دارد، کاربرد کلسیم به تنهایی یا همراه با فلز سنگین کادمیوم به‌طور معنی‌داری منجر به کاهش سطح مالون دی آلدهید در گیاه شبدر شد و اثرات سمی فلز سنگین کادمیوم را کاهش داد (وانگ و سانگ، ۲۰۰۹). کلسیم سبب بهبود سمیت فلزات سنگین به‌وسیله ترمیم متابولیسم گیاه و سنتز کلروفیل (صدیقی و همکاران، ۲۰۱۱) و حفظ پایداری غشاء تحت شرایط تنش فلزات سنگین گردید (هال، ۲۰۰۲). محققین بیان کرده‌اند که کلسیم جذب، انتقال و تجمع فلزات سنگین سرب (گارلند و ویلکینس، ۱۹۸۱ و کادمیوم (وانگ و سانگ، ۲۰۰۹) را در گیاهان کاهش می‌دهد. همچنین تحقیقات نشان داد که کلسیم با حفظ فعالیت سیستم آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان و تجمع پرولین می‌تواند آسیب‌های وارده از طریق تنش فلز نیکل در گیاه گندم را بکاهد (صدیقی و همکاران، ۲۰۱۱). لی و همکاران (۲۰۱۵) گزارش کردند که کاربرد کلسیم سبب افزایش جذب عناصر غذایی ضروری در شرایط تنش فلز سنگین کادمیوم می‌شود و میزان مالون‌دی آلدهید را در شرایط تنش کاهش داد. کاربرد مقدار مناسبی از کلسیم به صورت خارجی می‌تواند گیاه را در شرایط تنش به‌وسیله حفظ تمامیت غشاء پلاسمایی و برگرداندن سیستم سیگنال‌های انتقالی کلسیم محافظت کند (هال، ۲۰۰۲). نفوذپذیری غشاء پلاسمایی نسبت به یون‌های سمی در ارتباط با فعالیت دیواره سلولی و میزان کلسیم است، مکان اصلی کلسیم در بافت‌های گیاهی در آپوپلاست است که با دیواره سلولی باند می‌شود. البته در سطح خارجی غشاء پلاسمایی و دیگر ساختارها نیز قرار دارد (مارشنر، ۱۹۹۵). محققین گزارش کرده‌اند که کلسیم در سمیت‌زدائی غلظت‌های بالای عناصر سمی تحت شرایط تنش مؤثر است. کلسیم، سبب حفظ انتقال پتاسیم و نسبت K/Na انتخابی در غشاء سلولی می‌شود و همچنین نقش مهمی در کنترل تولید پرولین و گلایسین بتائین دارد (وو و همکاران، ۲۰۰۹). کاربرد کلسیم و هیستیدین تحت تنش نیکل در سه رقم گوجه سبب افزایش غلظت کلسیم و فعالیت گایاکول پراکسیداز، آسکوربات پراکسیداز و سوپراکسیددیسموتاز شد و نتایج نشان داده است که این عنصر تنش اکسیداتیو به‌وجود آمده توسط نیکل را توسط جذب و ممانعت از انتقال نیکل، به‌علاوه مکانیسم‌های کلاته کننده بهبود می‌بخشد (مظفری و همکاران، ۲۰۱۳).

۲-۹- اثرات متقابل کلسیم و روی بر صفات فیزیولوژیکی گیاه

روی نقش عمده‌ای در حفظ پایداری و نفوذپذیری غشاء سلولی دارد. کمبود روی منجر به افزایش نشت یونی در سلول‌های ریشه و ساقه گیاه می‌شود (ککمک، ۲۰۰۰). محققین مدلی را در رابطه با نقش توأم کلسیم و روی بر پایداری غشاء ارائه کردند، آنها نشان دادند که این یون‌ها به محل‌های مختلف غشاء باند می‌شوند که برای پایداری ویزیکول‌ها ضروری است. عنصر روی می‌تواند در فعالیت غشاء باند شونده با آنزیم‌های پمپ کننده پروتون و کانال‌های یونی تغییراتی ایجاد کند (کاسزوبا و هانت، ۱۹۹۰). البته مطالعات اندکی در رابطه با نقش این عنصر در فعالیت غشاء باند شونده با ATPase وجود دارد. کاستروپ و همکاران (۱۹۹۶) بیان کردند که عنصر روی تنظیم کننده فعالیت پمپ پروتون و جذب عناصرغذایی به‌وسیله ریشه گیاه است. حفاظت گروه‌های SH در کانال‌های کلسیم به‌وسیله عنصر روی توسط محققین مختلف گزارش شده است که این نقش حفاظتی ممکن است به‌واسطه کاهش فعالیت گونه‌های فعال اکسیژن تولید کننده NADPH اکسیداز باشد (ککمک، ۲۰۰۰). نتایج مطالعات همچنین نشان داد که غلظت کلسیم سیتوسولی ممکن است در شرایط کمبود روی دچار اختلال شود (ککمک، ۲۰۰۰). محققین گزارش کردند که سطوح مناسب کلسیم و روی در بافت گیاهی اثر سینرژیک در افزایش جذب عناصر پتاسیم و فسفر در گیاه دارد (رانادا- مالوی، ۲۰۱۱).

فصل سوم: مواد و روش‌ها

۳-۱- مشخصات محل اجرای آزمایش و طرح آزمایشی (بخش گلدانی)

در گلخانه مرکز تحقیقات و منابع طبیعی و آموزش کشاورزی کرمان در سال ۱۳۹۳ اجرا شد. عوامل در قالب آزمایش فاکتوریل بر پایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار سازماندهی شد. فاکتور اول شامل چهار سطح (شاهد، محلول‌پاشی ۱ میلی‌مولار سرب، کاربرد خاکی سرب در غلظت ۲۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک، محلول‌پاشی سرب در غلظت ۱ میلی‌مولار به همراه کاربرد خاکی سرب در غلظت ۲۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک)، فاکتور دوم محلول‌پاشی سولفات روی در سه غلظت (صفر، ۱۰ و ۲۰ میلی‌مولار) و فاکتور سوم محلول‌پاشی کلرید کلسیم در دو سطح (صفر و ۱۰ میلی‌مولار) بودند.

۳-۲- کاشت در گلدان

کشت بذر در بیستم مهرماه سال ۱۳۹۳ صورت گرفت. گلدان‌هایی با قطر دهانه ۲۲ سانتی‌متر و ارتفاع ۲۵ سانتی‌متر انتخاب و خاک گلدان به نسبت ماسه (دو قسمت) و رس (یک قسمت) (جدول ۳-۱) تهیه شد. کود نیتروژن از منبع کود اوره ۱۲ گرم در مترمربع و ۱۵ گرم در مترمربع سوپر فسفات تریپل و ۱۰ گرم در مترمربع سولفات پتاسیم به هر گلدان اضافه گردید. قبل از کاشت، بذور با قارچ کش ویتاواکس به میزان یک در هزار ضد عفونی شدند. در هر گلدان ۴ بذر کاشته شد که پس از استقرار گیاهچه‌ها به ۳ گیاهچه در هر گلدان تنک شدند. عمق کاشت ۴ سانتی متر در نظر گرفته شد. نتایج تجزیه فیزیکی و شیمیایی خاک گلدان در جدول ۳-۱ نشان داده شده است.

۳-۳- اعمال تیمارها در بخش گلدانی

۳-۳-۱- تیمار آلوده کردن خاک

برای آلوده کردن خاک، ابتدا مقدار لازم نمک استات سرب برای جرم مشخصی از خاک محاسبه شد. سپس جرم محاسبه شده‌ی نمک به یک کیلوگرم از خاک افزوده و کاملاً با آن مخلوط گردید تا پیش ماده‌ای همگن به‌دست آید. این پیش ماده‌ی آلوده سپس کاملاً با توده خاک مخلوط گردید. پس

از آن خاک‌های آلوده تقریباً تا رطوبت اشباع آبیاری و به مدت دو هفته رها شدند تا در حد امکان برهم کنش‌های آلاینده و خاک صورت پذیرد و شرایط آلودگی طبیعی‌تر باشد.

۳-۳-۲- تیمار محلول‌پاشی بر سطح برگ

محلول‌پاشی سرب، در اوایل مرحله ساقه‌دهی (۶۵ روز پس از کاشت) به وسیله مه‌پاش در یک مرحله روی اندام هوایی گیاه انجام گردید. محلول‌پاشی سولفات روی در فاصله ده روز و محلول‌پاشی کلرید کلسیم در فاصله زمانی سیزده روز پس از تیماردهی سرب اعمال شد.

۳-۴- نمونه‌برداری در گلدان

پس از گذشت پانزده روز از اعمال تیمارها، اقدام به نمونه‌برداری از بوته‌ها یا برگ‌های جوان و کاملاً توسعه یافته گردید و برای اندازه‌گیری صفات زراعی و فیزیولوژیکی در مرحله ساقه‌دهی از دو بوته نمونه‌برداری انجام شد که برگ‌های یک بوته بلافاصله در نیتروژن مایع غوطه‌ور گشت و پس از انتقال به آزمایشگاه تا زمان اندازه‌گیری پارامترهای فیزیولوژیکی در دمای ۸۰- درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند. برداشت نهایی از یک بوته زمانی صورت گرفت که کلیه برگها و طبق‌های روی ساقه خشک و قهوه‌ای و دانه‌های وسط طبق نیز خشک و سخت شده بودند.

۳-۵- مشخصات محل اجرای آزمایش و طرح آزمایشی (بخش مزرعه‌ای)

در مزرعه تحقیقاتی در ۲۰ کیلومتری جنوب شهر کرمان با مشخصات جغرافیایی ۵۷ درجه و ۵ دقیقه و صفر ثانیه طول شرقی و ۳۰ درجه و ۱۷ دقیقه و ۳۰ ثانیه عرض شمالی قرار داشت. ارتفاع آن از سطح دریا ۱۸۱۹ متر، دارای اقلیم خشک و نیمه معتدل و متوسط بارندگی سالیانه ۱۴۰ میلی‌متر در سال ۹۴-۱۳۹۳ بود. کمینه و بیشینه دمای در سال ۹۳-۹۴ به ترتیب ۵/۷- و ۳۷ درجه سانتی‌گراد، میانگین بارش باران و برف ۳۷ میلی‌متر در زمستان، میانگین سرعت باد ماهانه در زمستان ۳ و در بهار ۳/۹ متر بر ثانیه می‌باشد. نتایج تجزیه فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه در عمق صفر تا ۳۰ سانتی-متری در جدول ۳-۱ نشان داده شده است. عوامل در قالب آزمایش فاکتوریل بر پایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار سازماندهی شد. در آزمایش مزرعه‌ای، فاکتور اول شامل محلول‌پاشی سرب

در سه سطح (صفر، ۰/۵ و ۱ میلی‌مولار) به صورت استات سرب، فاکتور دوم محلول‌پاشی سولفات روی در سه غلظت (صفر، ۱۰ و ۲۰ میلی‌مولار) و فاکتور سوم محلول‌پاشی کلرید کلسیم در دو سطح (صفر و ۱۰ میلی‌مولار) بودند.

جدول ۳-۱- نتایج فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش (آزمایش گلدانی و مزرعه‌ای)

پارامترهای اندازه گیری شده	آزمایش گلدانی	آزمایش مزرعه‌ای
شن (درصد)	۷۲	۶۱
لای (درصد)	۲۰	۲۷
رس (درصد)	۸	۱۲
اسیدیته گل اشباع	۷/۴	۷/۷
هدایت الکتریکی ($dS\ m^{-1}$)	۲/۴	۲/۱
کلسیم (meq/L)	۸/۳	۱۱/۷
روی ($mg.\ Kg^{-1}$)	۱/۱۸	۱/۰۸
پتاسیم قابل جذب (ppm)	۱۹۳	۱۸۰
فسفر قابل جذب (ppm)	۳۷	۲۰
کربن آلی (٪)	۰/۱۶	۰/۲۴
سرب ($mg.\ Kg^{-1}$)	۰/۰۳۱	۰/۰۰۴۳

۳-۶- عملیات اجرایی در بخش مزرعه

۳-۶-۱- آماده سازی زمین

خاک مزرعه توسط گاوآهن برگردان‌دار زیر و رو گردید و پس از خرد کردن کلوخه‌ها توسط دیسک و مناسب شدن بستر جهت کاشت، زمین کرت‌بندی و جوی و پشته‌ها به فاصله ۵۰ سانتی متر از یکدیگر آماده شد.

۳-۶-۲- کاشت در مزرعه

گیاه مورد کاشت گلرنگ بود که از رقم گلدشت استفاده شد، این بذرها از مرکز تحقیقات کشاورزی کرج تهیه گردید. عملیات کاشت در تاریخ ۱۰ آبان ماه ۱۳۹۳ به صورت دستی انجام شد. در هر کرت آزمایشی ۴ خط کاشت، به طول ۵ متر ایجاد شد. دو خط کناری به عنوان حاشیه و ۲ خط وسط جهت

تعیین پارامترهای آزمایش در نظر گرفته شد. فاصله بین ردیف‌های کاشت ۵۰ سانتی‌متر و فاصله بوته ها روی ردیف ۱۰ سانتی‌متر در نظر گر فته شد، میزان تراکم کاشت ۲۰ گیاه در متر مربع بود. بذور در عمق ۴ سانتی‌متری در محل داغ آب و به فاصله ۱۰ سانتی‌متر از یکدیگر کاشته شدند و روی آن با خاک نرم پوشانده شد. کود نیتروژن از منبع کود اوره به مقدار ۱۲۰ کیلوگرم، ۱۵۰ کیلوگرم سوپر فسفات تریپل و ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار سولفات پتاسیم به مزرعه داده شد

۳-۶-۳- داشت در مزرعه

عملیات داشت شامل آبیاری با دور ۷ روز برای همه تیمارها تا زمان زرد شدن بوته‌ها، تنک کردن بوته‌های اضافی پس از استقرار کامل گیاه و مبارزه با علف های هرز با ۳ بار وجین کامل دستی انجام شد.

۳-۷- اعمال تیمارها در بخش مزرعه

محلول‌پاشی سرب، در اوایل مرحله ساقه‌دهی (۱۳۰ روز پس از کاشت در مزرعه) به وسیله مه‌پاش در یک مرحله روی اندام هوایی گیاه انجام گردید. محلول‌پاشی سولفات روی در فاصله زمانی ۱۰ و محلول‌پاشی کلرید کلسیم در فاصله زمانی سیزده روز پس از تیماردهی سرب اعمال شد.

۳-۸- نمونه‌برداری در مزرعه

پس از گذشت پانزده روز از اعمال تیمارها، اقدام به نمونه‌برداری از بوته‌ها یا برگ‌های جوان و کاملاً توسعه یافته گردید و صفات زراعی و فیزیولوژیکی در مرحله ساقه‌دهی اندازه‌گیری شد. برای ارزیابی صفات خاص فیزیولوژیکی نمونه‌ها بلافاصله در نیتروژن مایع غوطه‌ور گشتند و پس از انتقال به آزمایشگاه تا زمان اندازه‌گیری پارامترهای فیزیولوژیکی در دمای ۸۰- درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند. برداشت نهایی زمانی صورت گرفت که کلیه برگها و طبق‌های روی ساقه خشک و قهوه‌ای و دانه-های وسط طبق نیز خشک و سخت شده بودند.

۳-۹- اندازه گیری صفات زراعی و مورفولوژیک در آزمایش گلدانی

۳-۹-۱- تعیین عملکرد و اجزای عملکرد

در پایان دوره آزمایش و پس از رسیدگی نهایی یک بوته جهت تعیین عملکرد و اجزای عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیکی گیاه برداشت گردید.

۳-۹-۲- سطح برگ

اندازه‌گیری سطح برگ از یک بوته ۳۰ روز بعد از اعمال تیمارها با استفاده از دستگاه سطح برگ سنج مدل (Delta-T Devices Ltd.)، انجام شد.

۳-۹-۳- طول و قطر ساقه

برای اندازه‌گیری طول و قطر ساقه اصلی به ترتیب بر اساس سانتی‌متر و میلی‌متر از یک بوته در مرحله رسیدگی استفاده شد.

۳-۹-۴- حجم ریشه و وزن خشک برگ، ساقه و ریشه

بوته‌های برداشت شده در هر نمونه‌برداری به بخش‌های برگ، ساقه و ریشه تفکیک و به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۷۰ درجه سانتی گراد خشک و سپس به وسیله ترازو با دقت ۰/۰۰۱، وزن خشک برگ، ساقه و ریشه تعیین شد و همچنین نسبت وزن خشک ریشه به ساقه محاسبه گردید. برای اندازه‌گیری حجم ریشه‌ها بر اساس قانون ارشمیدس مستقیماً از طریق جابه‌جا شدن سطح آب در استوانه مدرج پس از وارد کردن ریشه‌های شسته شده به داخل آن تعیین گردید (علی‌زاده، ۱۳۹۲).

۳-۱۰- اندازه گیری صفات زراعی و مورفولوژیک در بخش مزرعه

۳-۱۰-۱- تعیین عملکرد و اجزای عملکرد

در پایان دوره آزمایش و پس از رسیدگی نهایی جهت تعیین عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیکی گیاهان پس از حذف دو ردیف حاشیه و ۵۰ سانتی‌متر از هر طرف کرت، سطحی معادل یک مترمربع

برداشت گردید. جهت اندازه‌گیری اجزای عملکرد دانه از هر کرت پنج بوته به‌صورت تصادفی انتخاب شدند.

۳-۱۰-۲- سطح برگ

اندازه‌گیری سطح برگ توسط کاغذ شطرنجی، ۳۰ روز بعد از اعمال تیمارها روی سه بوته انجام شد و با استفاده از دستگاه سطح برگ سنج مدل (.Delta-T Devices Ltd)، انجام شد.

۳-۱۰-۳- طول و قطر ساقه

طول و قطر ساقه اصلی در ۳ بوته نمونه گیری شده از هر کرت به ترتیب بر اساس سانتی‌متر و میلی‌متر از یک بوته در مرحله رسیدگی اندازه‌گیری شد و میانگین به‌عنوان طول و قطر بوته‌های آن ترکیب تیماری ثبت گردید.

۳-۱۰-۴- وزن خشک برگ و ساقه

بوته‌های برداشت شده در هر نمونه‌برداری به بخش‌های برگ و ساقه تفکیک و به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۷۰ درجه سانتی گراد خشک شدند و سپس به وسیله ترازو با دقت ۰/۰۰۱، وزن خشک برگ و ساقه تعیین شد.

۳-۱۱- اندازه گیری صفات فیزیولوژیک و کیفی در هر دو بخش گلدانی و مزرعه‌ای

۳-۱۱-۱- اندازه‌گیری روغن دانه

اندازه‌گیری روغن با استفاده از روش سوکسله صورت پذیرفت. برای این منظور ۳ گرم دانه روغنی داخل کاغذ صافی وزن گردید. سپس کاغذ صافی تا شد و در داخل قسمت استخراج کننده قرار گرفت. سپس حلال متانول و کلروفرم به نسبت ۱:۲ (دو قسمت متانول و یک قسمت کلروفرم) داخل استخراج کننده ریخته شد تا یک بار عملیات سیفون کردن از سوکسله به داخل بالن انجام شود، سپس مبرد وصل و جریان آب برقرار شد و حرارت‌دهی به مدت ۱ ساعت ادامه یافت. در مرحله بعد دستگاه خاموش شد. کاغذ صافی در آون قرار داده شد تا حلال به‌طور کامل خشک شود و پس از آن دوباره

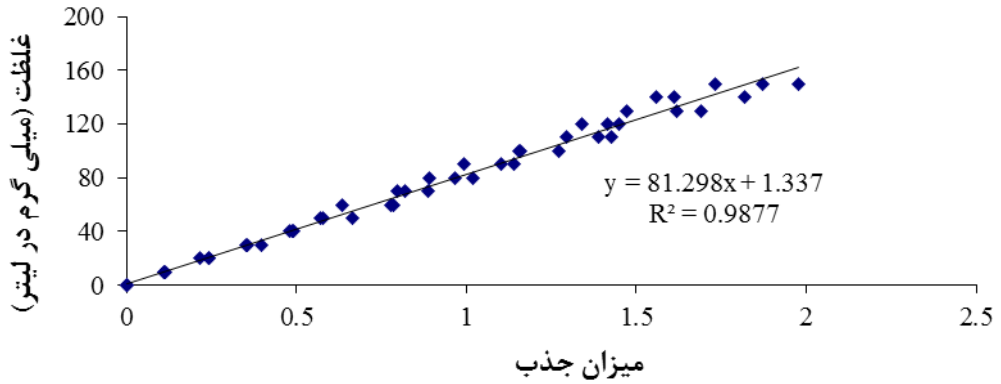
وزن گردید. درصد روغن با استفاده از وزن نمونه در ابتدا و انتهای کار محاسبه گردید. عملکرد روغن از حاصل ضرب روغن دانه و عملکرد دانه به‌دست آمد.

۳-۱۱-۲- میزان پروتئین دانه

مقدار نیتروژن در دانه با استفاده از دستگاه کجلدال تمام اتوماتیک (مدل ۹۸۴۰ ساخت کشور چین) اندازه‌گیری شد که شامل سه مرحله هضم، تقطیر و تیتراسیون بود. پس از تیتراسیون، با استفاده از ضریب تبدیل ۵/۳۰ (ساداسیوام و مانیکام، ۲۰۰۵) میزان پروتئین محاسبه شد که در این آزمایش درصد پروتئین و عملکرد پروتئین تعیین گردید.

۳-۱۱-۳- اندازه‌گیری کربوهیدرات محلول در برگ

برای اندازه‌گیری کربوهیدرات محلول از روش فنل اسید سولفوریک (کوچرت، ۱۹۷۸) استفاده گردید که مبتنی بر هیدرولیز اسیدی قندهای محلول و ایجاد ترکیب فورفورال است که با فنل تولید کمپلکس رنگی می کند. در این روش ۰/۱ گرم نمونه با الکل ۷۰ درصد به حجم ۱۰ میلی لیتر رسانده و مخلوط حاصل یک هفته در یخچال نگهداری و هر روز بهم زده شد. پس از یک هفته یک میلی لیتر از محلول رویی نمونه‌ها برداشته و حجم آنها با آب مقطر به دو میلی‌لیتر رسانده و با یک میلی‌لیتر فنل پنج درصد به خوبی مخلوط شد. سپس پنج میلی‌لیتر اسید سولفوریک غلیظ (۸۰ درصد) افزوده شد. جذب محلول‌ها در طول موج ۴۸۵ نانومتر قرائت گردید. برای اندازه‌گیری مقدار قند از منحنی استاندارد تهیه شده از گلوکز (شکل ۳-۱) استفاده شد.



شکل ۳-۱- منحنی استاندارد گلوکز

۳-۱۱-۴- سنجش میزان پراکسیداسیون لیپیدهای غشاء

سنجش میزان پراکسیداسیون لیپیدهای غشاء طبق روش هیس و پیکر (۱۹۶۸)، براساس تشکیل کمپلکس مالون دآلدئید در اثر پراکسیداسیون لیپیدهای غشاء با استفاده از تیوباربیتوریک اسید انجام شد. یک گرم از بافت تازه برگ با دو میلی‌لیتر تری کلرواستیک اسید ده درصد در هاون چینی ساییده شد. عصاره به‌دست آمده به‌مدت ۲۰ دقیقه در g ۱۵۰۰۰ سانتریفوژ گردید. به ۱ میلی لیتر از محلول شفاف روئی، ۴ میلی لیتر تری کلرو استیک اسید ۲۰ درصد که حاوی تیوباربیتوریک اسید ۰/۵ درصد بود افزوده شد. مخلوط به‌دست آمده به مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۹۶ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت و بلافاصله لوله‌های آزمایش در یخ خرد شده قرار داده شد. محتوی لوله‌ها مجدداً به‌مدت ۵ دقیقه سانتریفوژ و سپس جذب در طول موج ۵۳۲ نانومتر براساس تشکیل کمپلکس تیوباربیتوریک اسید مالون دآلدئید خوانده شد. با اندازه‌گیری جذب در طول موج های ۵۳۲ و ۶۰۰ نانومتر و با استفاده از ضریب خاموشی $\varepsilon=155\ cm^{-1}mM^{-1}$ غلظت کمپلکس مالون دآلدئید محاسبه شد.

۳-۱۱-۵- استخراج آنزیم

۳-۱۱-۵-۱- عصاره آنزیمی

به منظور استخراج عصاره آنزیمی جهت اندازه‌گیری فعالیت آنزیم‌ها، ۱ گرم از نمونه برگی در بافر فسفات پتاسیم ۰/۰۵ مولار با اسیدیته ۷/۸، پلی وینیل پیرولیدون ۲٪ و EDTA ۱ میلی‌مولار همگن شدند. همگنای حاصل در g × ۱۳۰۰۰ به مدت ۲۰ دقیقه سانتریفیوژ و بخش رویی برای سنجش آنزیم‌های مورد نظر برداشته شد (بور و همکاران، ۲۰۰۳).

۳-۱۱-۵-۲- فعالیت آنزیم گلوتاتیون اس- ترانسفراز

فعالیت این آنزیم طبق روش کارماگنول و همکاران (۱۹۸۱) اندازه‌گیری شد. کمپلکس واکنش شامل ۹۰۰ میکرولیتر بافر فسفات (PBS) ۱۰۰ میلی‌مولار (اسیدیته= ۶/۸)، ۴۵۰ میکرولیتر گلوتاتیون ۳/۵ میلی‌مولار، ۱۰۰ میکرولیتر ۱- کلرو، ۲ و ۴- دی نیتروبنزن ۳۰ میلی‌مولار و ۱۰۰ میکرولیتر از محلول آنزیمی استخراج شده بود. میزان جذب آن با اسپکتروفتومتر (مدل +T80 ساخت شرکت PG instrument کشور انگلستان) در طول موج ۳۴۰ نانومتر قرائت گردید. فعالیت آنزیم با استفاده از ضریب خاموشی $9/6\ mM^{-1}\ cm^{-1}$ محاسبه شد.

۳-۱۱-۵-۳- فعالیت آنزیم کاتالاز

فعالیت این آنزیم طبق روش بیرس و سیزر (۱۹۵۲)، اندازه‌گیری شد. کمپلکس واکنشی شامل ۱/۵ میلی‌لیتر بافر فسفات پتاسیم ۱۰۰ میلی‌مولار (pH =۷)، پراکسید هیدروژن ۷/۵ میلی‌مولار و ۵۰ میکرولیتر از محلول آنزیمی می‌باشد. تغییرات در جذب نمونه‌ها در طول موج ۲۴۰ نانومتر در مدت یک دقیقه ثبت گردید. فعالیت آنزیمی با استفاده از ضریب خاموشی $36/6\ mmol^{-1}\ cm^{-1}$ محاسبه شد.

۳-۱۱-۵-۴- فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز

اندازه‌گیری فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز طبق روش ناکانو و آسادا (۱۹۸۱) بود. کمپلکس واکنشی شامل ۲/۵ میلی‌لیتر بافر فسفات (اسیدیته= ۷/۸) ۵۰ میلی‌مولار، پراکسیدهیدروژن ۰/۱

میلی‌مولار، ۰/۱ میلی‌لیتر عصاره آنزیمی، آسکوربیک اسید ۳۰ درصد و EDTA ۰/۱ میلی‌مولار بود و بلافاصله در دستگاه اسپکتروفتومتر با طول موج ۲۹۰ نانومتر میزان جذب آن قرائت گردید. فعالیت آنزیمی با استفاده از ضریب خاموشی $mM^{-1}\ cm^{-1}$ ۲/۸ گزارش گردید.

۳-۱۱-۵-۵- فعالیت آنزیم پراکسیداز

برای سنجش فعالیت آنزیم پراکسیداز از روش پل و همکاران (۱۹۹۷) استفاده شد. محلول واکنش شامل ۲۴۰۰ میکرولیتر بافر فسفات پتاسیم ۱۰۰ میلی‌مولار با pH=۷، ۱۰۰ میکرولیتر گایاکول ۱۸ میلی‌مولار، ۱۰۰ میکرولیتر پراکسیدهیدروژن و ۵۰ میکرولیتر عصاره آنزیمی بود. تغییرات جذب محلول واکنش در طول موج ۴۳۶ نانومتر اندازه‌گیری و فعالیت آنزیمی با استفاده از ضریب خاموشی $mmol^{-1}\ cm^{-1}$ ۲۶/۶ محاسبه شد.

۳-۱۱-۶- محتوای نسبی آب برگ (RWC)

به منظور تعیین مقدار نسبی آب برگ، پس از گذشت پانزده روز از اعمال تیمارها (مرحله ساقه-دهی) نمونه‌برداری از آخرین برگ توسعه یافته تمامی تیمارهای آزمایشی انجام شد. وزن تر نمونه‌ها بلافاصله در آزمایشگاه با ترازوی دقیق اندازه‌گیری شده و سپس تمامی نمونه‌ها در آب مقطر قرار گرفته و به مدت ۲۴ ساعت در یخچال و در دمای ۴ درجه سانتی گراد قرار داده شد. پس از ۲۴ ساعت وزن اشباع برگی اندازه‌گیری و برگ‌ها دوباره به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد در آون قرار داده شدند و وزن خشک هر نمونه به‌دست آمد. مقدار نسبی آب برگ با استفاده از رابطه ۳-۴ محاسبه شد.

$$RWC = \{(\text{وزن خشک} - \text{وزن اشباع}) / (\text{وزن خشک} - \text{وزن تر})\} * ۱۰۰ \qquad \text{(رابطه ۳-۴)}$$

۳-۱۱-۷- سنجش میزان آنتوسیانین در برگ

برای سنجش میزان آنتوسیانین از روش واگنر (۱۹۷۹)، استفاده شد. به این منظور، ۰/۱ گرم از بافت تازه برگی در هاون چینی با ۱۰ میلی لیتر متانول اسیدی (متانول و اسید کلریدریک خالص با

نسبت حجمی ۱:۹۹ کاملاً ساییده و عصاره در لوله‌های سر پیچ دار ریخته شد و به مدت ۲۴ ساعت در تاریکی و دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت. سپس به مدت ۱۰ دقیقه با سرعت ۴۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفوژ و سپس جذب محلول بالایی در طول موج ۵۵۰ نانومتر اندازه‌گیری شد. محاسبه غلظت با استفاده از ضریب خاموشی $mol^{-1}\ cm^{-1}$ ۳۳۰۰۰ انجام و نتایج بر اساس میکرومول بر گرم وزن تر بیان شد.

۳-۱۱-۸- سنجش میزان رنگیزه های فتوسنتزی (کلروفیل و کاروتنوئیدها)

محاسبه غلظت کلروفیل‌ها و کاروتنوئید با استفاده از روش لیچتن تالر و ولبرن (۱۹۸۳) انجام شد. در این روش ابتدا مقدار ۰/۱ گرم بافت تازه با استفاده از ۲۰ میلی‌لیتر استون ۸۰ درصد کاملاً ساییده و محلول حاصل به مدت ده دقیقه در ۳۰۰۰ دور بر دقیقه سانتریفیوژ گردید. پس از سانتریفیوژ، محلول رویی برداشته و میزان جذب نمونه ها در طول موج‌های ۴۷۰ و ۶۴۶/۸ و ۶۶۳/۲ با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر خوانده شد. غلظت این رنگیزه‌ها با استفاده از روابط موجود و بر اساس مقدار گرم بافت برگی استفاده شده محاسبه گردید.

رابطه (۳-۱) $(Chl.a)\ \mu g.ml^{-1} = (12.25\ A_{663.2} - 2.79\ A_{646.8})$

رابطه (۳-۲) $(Chl.b)\ \mu g\ .ml^{-1} = (21.51\ A_{646.8} - 5.1\ A_{663.2})$

رابطه (۳-۳) $(Car)\ \mu g.ml^{-1} = (1000A_{470} - 1.8cha - 85.02chb)\ /198$

پس از جایگزین کردن داده‌ها در فرمول، اعداد به‌دست آمده در V/w×1000 ضرب و اعداد بر حسب میلی‌گرم بر گرم به‌دست آمد. V حجم محلول کلروفیلی بر حسب میلی‌لیتر و W وزن برگ بر حسب گرم می‌باشد. نسبت کلروفیلa/b و میزان کلروفیل کل نیز محاسبه گردید.

۳-۱۱-۹- سنجش میزان سرب، روی و کلسیم در ریشه، برگ و دانه

جهت سنجش میزان عناصر از روش هضم اسیدی استفاده شد. مقدار ۰/۵ گرم از ماده خشک گیاه در ده میلی لیتر اسید نیتریک غلیظ (۷۰ درصد) به مدت ۲۴ ساعت قرار گرفت و به خوبی در اسید هضم گردید. سپس محلول اسیدی گرم و بخارات آن خارج شد. در مرحله بعد حجم محلول با آب

مقطر به ۵۰ میلی لیتر رسانیده و به کمک کاغذ صافی واتمن شماره ۲ صاف و توسط دستگاه جذب اتمی (مدل Spectr AA220 ساخت کشور آلمان) اندازه‌گیری شد (وودیس و همکاران، ۱۹۷۷).

۳-۱۲- تجزیه و تحلیل داده‌ها

برای اطمینان از نرمال بودن داده‌ها، تست نرمال به روش کولموگروف-اسمیرنوف انجام شد و سپس با نرم‌افزار آماری SAS (نسخه ۹/۱) تجزیه و تحلیل شدند. رسم شکل‌ها با نرم افزار Excel و مقایسه میانگین صفات اندازه‌گیری شده، با استفاده از آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار (LSD) در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد.

فصل چهارم: نتایج و بحث

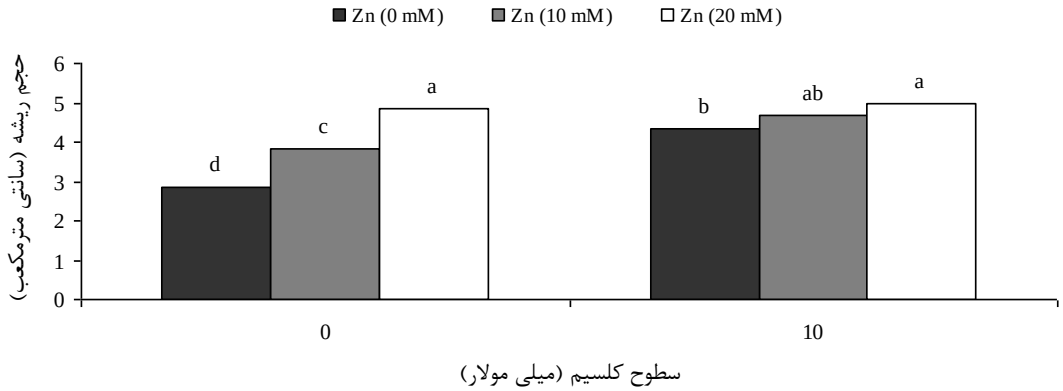
۴-۱- صفات رشدی

۴-۱-۱- حجم ریشه

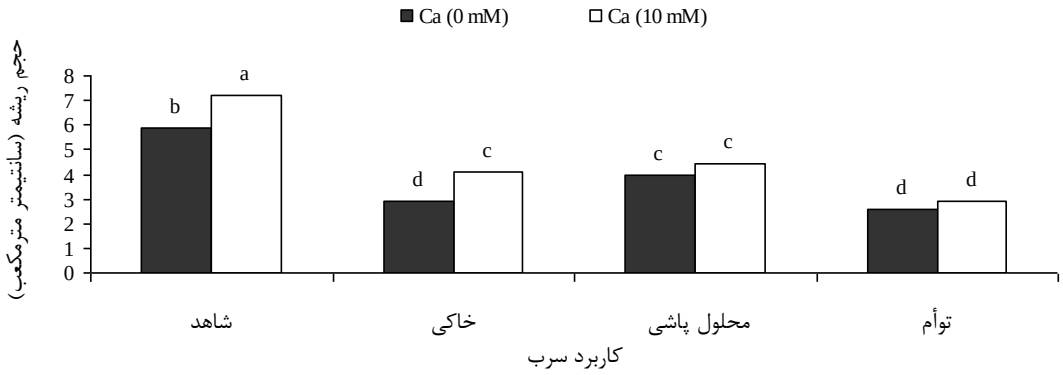
نتایج حاصل از تجزیه آماری داده‌ها نشان می‌دهد که تنش ناشی از سرب تأثیر منفی بر رشد ریشه گیاه گلرنگ داشت. همان‌طور که نتایج جدول پیوست ۱ نشان می‌دهد، کاربرد توأم عناصر کلسیم و روی بر حجم ریشه گلرنگ اثر معنی‌داری داشت. همانطورکه نتایج شکل ۴-۱ نشان می‌دهد، در مجموع گیاهانی که کلسیم دریافت کرده بودند، از حجم ریشه بالاتر و معنی‌داری نسبت به سایر گیاهان برخوردار بودند. در هر یک از سطوح کلسیم نیز اضافه شدن روی و افزایش غلظت آن به‌طور قابل توجهی (به ویژه در سطح صفر کلسیم) موجب حجیم‌تر شدن ریشه‌ها گردید. میزان تغییرات این صفت در غلظت ۲۰ میلی‌مولار روی در هر دو سطح کلسیم تقریباً یکسان بود و تفاوت معنی‌داری نداشت. همچنین در بین اثرات متقابل، تأثیر تغذیه گیاه با کلسیم در تنش سرب معنی‌دار بود. کاربرد کلسیم در تیمار شاهد و جذب خاکی سرب حجم ریشه را به‌ترتیب ۲۲ و ۴۲ درصد نسبت به شرایط عدم مصرف کلسیم افزایش داد. در شرایط محلول‌پاشی و کاربرد توأم سرب، استفاده از کلسیم اثر معنی‌داری نداشت (شکل ۴-۲).

ریشه اولین اندامی است که در معرض سمیت فلزات سنگین قرار می‌گیرد و به‌طور ویژه‌ای به حضور عناصر سمی در محیط رشد حساسیت نشان می‌دهد، بنابراین معیار رشد ریشه به‌عنوان یکی از مهمترین معیارهای تشخیص سمیت عناصر سنگین در نظر گرفته می‌شود (بارسلو و پوشنریدر، ۱۹۹۰). از علایم سمیت ناشی از سرب توقف سریع رشد ریشه‌ها، کلروز شدن برگ‌ها و کاهش رشد گیاه است (بورتون و همکاران، ۱۹۸۴). فلزات سنگین از طریق مکانیسم‌های مختلف در سلول گیاهی مانع رشد گیاهان می‌شوند. این یون‌های سمی با کاهش تورژسانس سلولی موجبات کاهش تقسیم سلولی و مهار رشد سلولی را فراهم می‌آورند و از طرف دیگر با تجمع در دیواره سلولی و ورود به سیتوپلاسم در متابولیسم طبیعی سلول اختلال ایجاد کرده و موجب کاهش رشد می‌گردند

(ملاسیوتیس و همکاران، ۲۰۰۶). نتایج این تحقیق نشان داد که کاربرد روی و کلسیم تأثیر به‌سزایی در رشد ریشه داشت. عنصر روی در سنتز و تولید کلروفیل نقش مؤثری دارد، بنابراین فتوسنتز و تولید مواد غذایی بیشتر را در گیاه افزایش می‌دهند که سبب تحریک رشد و تجمع ماده خشک در گیاه می‌شود. طبیعی است که سهم ریشه نیز از دریافت مواد غذایی بیشتر می‌شود. محققین بیان کردند که عنصر روی می‌تواند اثر مطلوبی بر فعالیت‌های فتوسنتزی برگ و انتقال بهتر مواد فتوسنتزی و در نهایت رشد گیاه داشته باشد (وانگ و دوان، ۲۰۰۶). مدیریت مواد غذایی معدنی ممکن است در بهبود تنش مفید باشد (نظر و همکاران، ۲۰۱۲). کلسیم از طریق تنظیم انتقال یون‌ها و مکانیزم‌های دفاعی گیاه باعث حفظ رشد و عملکرد گیاه تحت تنش‌های محیطی می‌شود (صدیقی و همکاران، ۲۰۱۱). نتایج محققین نشان داد که کاربرد کلسیم تأثیر زیادی در حفاظت از گیاه در مقابل ممانعت کننده-های رشدی حاصل از غلظت‌های بالای نیکل دارد که می‌تواند ناشی از نقش کلسیم در تنظیم انتقال یون به داخل سلول گیاه باشد (مظفری و همکاران، ۲۰۱۳). همچنین نتایج گلدانی و مزرعه‌ای این تحقیق نشان داد که افزودن کلسیم میزان روی در برگ را در شرایط عدم تنش افزایش داد (جدول ۴-۲۶ و ۴-۲۷).



شکل ۴-۱- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی کلسیم و روی بر حجم ریشه گیاه گلرنگ. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD است. (آزمایش گلدانی)



شکل ۴-۲- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی کلسیم در شرایط تنش سرب بر حجم ریشه گیاه گلرنگ. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD است (آزمایش گلدانی)

۴-۱-۲- طول ریشه

صفت طول ریشه در آزمایش گلدانی از همه اثرات اصلی سرب، روی و کلسیم در سطح احتمال یک درصد تأثیر پذیرفت. در بین اثرات متقابل، اثر سرب و روی از لحاظ آماری معنی‌داری بود (جدول پیوست ۱). نتایج شکل ۴-۳ تأثیر ترکیبات تیماری حاصل از سرب و کود روی را بر طول ریشه گیاه نشان می‌دهد. کمترین مقدار در گیاهانی دیده شد که هر دو فرم خاکی و برگی سرب را دریافت کرده ولی با روی تیمار نشده بودند، به‌طوری که در این ترکیب تیماری طول ریشه گیاه حدود هفت سانتی-متر معادل ۴۵ درصد نسبت به گیاه شاهد کاهش یافت. با کاربرد روی و دو برابر شدن غلظت آن در تنش سرب میزان طول ریشه گیاه نسبت به شرایط عدم مصرف روی افزایش نشان داد، به‌طوری که در تیمار محلول‌پاشی سرب با کاربرد روی در غلظت ۲۰ میلی‌مولار میزان طول ریشه بیشتر از گیاهان شاهد بود. بیشترین طول ریشه در گیاهانی ثبت شد که در معرض سرب قرار نداشتند و توسط غلظت ۲۰ میلی‌مولار عنصر روی محلول‌پاشی شدند. در تیمار کاربرد توأم سرب، تغذیه گیاه با روی (۲۰ میلی‌مولار) میزان طول ریشه را ۶۸ درصد نسبت به شرایط عدم مصرف روی در همین شرایط افزایش داد، به‌طوری که با گیاهان شاهد در یک گروه آماری قرار گرفت. در جدول ۴-۱ مشاهده گردید که

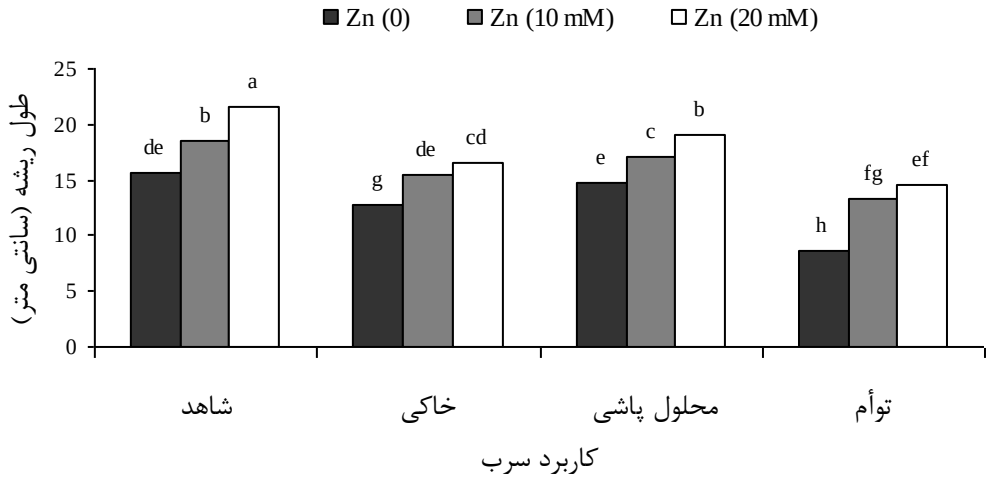
طول ریشه گیاهانی که توسط کلسیم محلول‌پاشی شده بودند، ۱۵/۶ درصد بیشتر از گیاهان شاهد بود. این اختلاف به لحاظ آماری معنی‌دار بود.

با توجه به نتایج به‌دست آمده در این تحقیق، سرب پس از جذب توسط گیاه ایجاد مسمومیت می‌کند و موجب کاهش رشد و تجمع ماده خشک در بخش هوایی و ریشه گیاه می‌گردد که این موضوع با یافته‌های کیم و همکاران (۲۰۰۲) همسو است. کاهش رشد ریشه و بخش هوایی تحت تنش سرب می‌تواند به دلیل تجمع زیاد سرب در ریشه، لیگنینی شدن دیواره تحت تأثیر فلز سنگین، تأثیر مستقیم فلز سنگین بر هسته سلولی و برهم کنش فلزات سنگین با گروه‌های سولفیدریل غشا سلول‌ها و غیرفعال کردن آن‌ها باشد (آلمیدا و همکاران، ۲۰۰۷؛ خودسار و همکاران، ۲۰۰۱). کاربرد روی سبب مهار گونه‌های فعال اکسیژن تولید شده در شرایط تنش شدید سرب گردید و ارتفاع ریشه را نسبت به تیمار عدم کاربرد کود افزایش داد. محققین گزارش کردند که عنصر روی موجب افزایش مقاومت گیاه در مقابل فلزات سرب، مس و کادمیوم می‌شود، همچنین این عنصر در تحمل گیاه در مقابل تنش اکسیداتیو حاصل از پراکسیدهیدروژن تأثیرگذار می‌باشد (تسوجی و همکاران، ۲۰۰۲). عنصر روی به طور غیرمستقیم بر افزایش رشد گیاه مؤثر می‌باشد (مارچنر، ۱۹۹۵). در سویا کاربرد روی موجب افزایش ماده خشک تولیدی در گیاه گردید (برنان، ۲۰۰۱). رمرودی و همکاران (۱۳۹۰) نیز بیان نمودند که کاربرد محلول‌پاشی عناصر ریزمغذی می‌تواند نقش مفیدی بر بهبود خصوصیات کمی و کیفی گیاهان از جمله اسفرزه ایفاء نماید.

جدول ۴-۱- مقایسه میانگین اثرهای ساده محلول‌پاشی کلسیم بر طول ریشه گیاه گلرنگ (آزمایش گلدانی)

تیمارها	طول ریشه (سانتی‌متر)
کلسیم (میلی‌مولار)	
صفر	۱۴/۵۳ b
۱۰	۱۶/۷۹ a

میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک در هر ستون و هر تیمار بر اساس آزمون LSD اختلاف معنی‌داری در سطح ۵ درصد ندارند.



شکل ۴-۳- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی در شرایط تنش سرب بر طول ریشه گیاه گلرنگ. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD است. (آزمایش گلدانی)

۴-۱-۳- ارتفاع ساقه

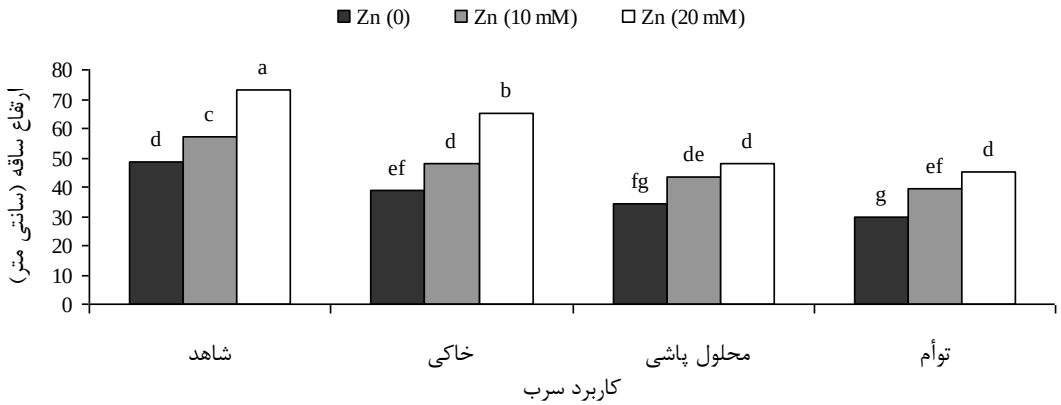
در هر دو آزمایش گلدانی و مزرعه‌ای، اثر هر سه تیمار سرب، روی و کلسیم بر صفت ارتفاع ساقه معنی‌دار ($P<$ ۰/۰۵) بود. در بین اثرات متقابل، اثر کاربرد توأم کلسیم و روی و همچنین محلول‌پاشی روی در تنش سرب معنی‌دار ($P<$ ۰/۰۵) بود (جدول پیوست ۱ و ۲). همانطور که نتایج مقایسه میانگین شکل ۴-۴ نشان می‌دهد تغذیه گیاه با روی موجب کاهش اثرات نامطلوب تنش سرب بر طول ساقه گلرنگ گردید؛ به‌طوری که در همه سطوح سرب چه در حضور و چه در عدم حضور این

عنصر، کاربرد کود روی سبب افزایش معنی‌دار طول ساقه نسبت به تیمار عدم کاربرد کود شد. به‌طور مشخص در اثر کاربرد ۲۰ میلی‌مولار روی در کاربرد خاکی سرب ارتفاع بوته حتی به‌طور معنی‌داری از گیاهان شاهد بهتر بود و در اثر محلول‌پاشی با غلظت ۱۰ میلی‌مولار روی در همین شرایط، هر دو غلظت روی در شرایط محلول‌پاشی سرب و غلظت ۲۰ میلی‌مولار روی در شرایط کاربرد توأم ارتفاع ساقه ثبت شده با گیاهان شاهد تقریباً برابر بود. در این بین بالاترین ارتفاع ساقه از گیاهانی به‌دست آمد که تنش سرب را تجربه نکردند و توسط بالاترین غلظت روی محلول‌پاشی شدند. همان‌طور که نتایج مقایسه میانگین شکل ۴-۵ نشان می‌دهد؛ بیشترین میزان ارتفاع ساقه در کاربرد کلسیم ۱۰ میلی‌مولار همراه با کاربرد کود روی ۲۰ میلی‌مولار به‌دست آمد.

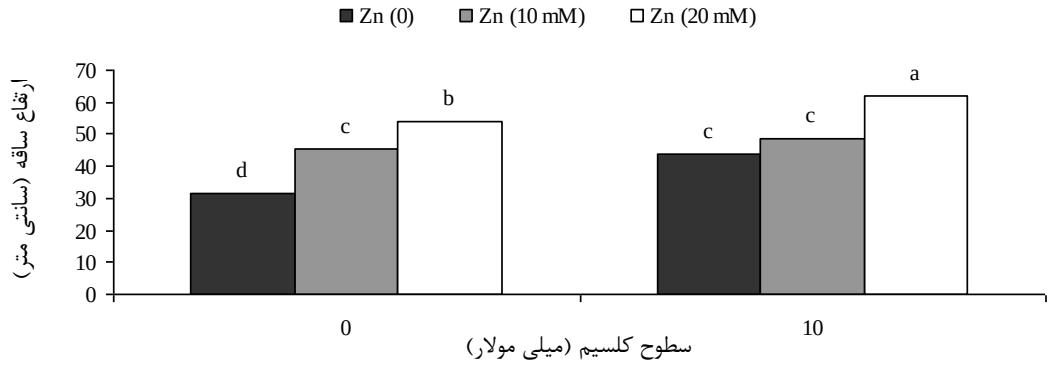
در آزمایش مزرعه‌ای، نیز محلول‌پاشی روی تأثیر معنی‌داری در افزایش ارتفاع ساقه در شرایط تنش سرب داشت. به‌طوری‌که ارتفاع ساقه در شدیدترین سطح آلودگی سرب (۱ میلی‌مولار)، از ۵۱ سانتی‌متر در شرایط عدم کاربرد کود روی به ۶۹ سانتی‌متر در شرایط محلول‌پاشی با روی ۲۰ میلی-مولار رسید، یعنی ۳۵ درصد افزایش حاصل شد. حتی در دو سطح دیگر سرب در اثر کاربرد برگی روی ارتفاع بالاتری ثبت شد که به لحاظ آماری اختلاف معنی‌داری داشت (شکل ۴-۶). شکل ۴-۷ نشان می‌دهد که نه تنها عنصر روی به تنهایی صفت ارتفاع ساقه را به‌طور معنی‌داری بهبود می‌بخشد، بلکه توأم شدن آن با کلسیم می‌تواند مفیدتر باشد، چراکه در اثر توأم شدن ۱۰ میلی‌مولار کلسیم یا ۲۰ میلی‌مولار روی ارتفاع ساقه ۶۲ درصد نسبت به تیمار شاهد افزایش یافت.

نتایج حاصل از پژوهش حاضر، نشان دهنده آثار تنش سرب در گیاه گلرنگ بود. کاهش رشد از مهم‌ترین آثار تنش سرب به‌ویژه در غلظت‌های بالا در گیاه مورد مطالعه محسوب می‌شود. کاهش رشد اندام‌های هوایی و ریشه ممکن است در اثر اختلال در فرآیند فتوسنتز و کاهش رنگیزه‌های فتوسنتزی باشد. نتایج این تحقیق نیز نشان داد که میزان کلروفیل a و b و کاروتنوئید در شرایط تنش سرب کاهش قابل توجهی نشان داد (جدول ۴-۲۴). فلزات سنگین با کاهش شدید فتوسنتز و انتقال تولیدات فتوسنتزی و تقسیم سلولی، رشد گیاه را به شدت کاهش می‌دهند (دالا وکچیا و همکاران، ۲۰۰۵).

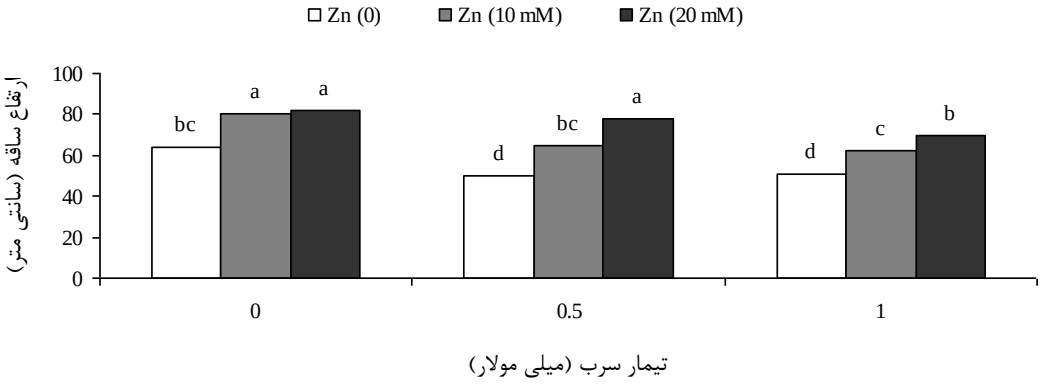
تغذیه مناسب تحت شرایط تنش می‌تواند تا حدی به گیاه در تحمل تنش‌های مختلف کمک کند. روی از عناصر کم مصرف ضروری است که نه تنها برای رشد طبیعی و تولیدمثل گیاهـان زراعـی لازم اسـت (آلووی، ۲۰۰۴)، بلکه در فعالیت بسیاری از آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان شرکت داشته و در سمیت‌زدایـی گونه‌های فعال اکسیژن نقش مهمی ایفا می‌کند (کیم و همکاران، ۲۰۰۲).



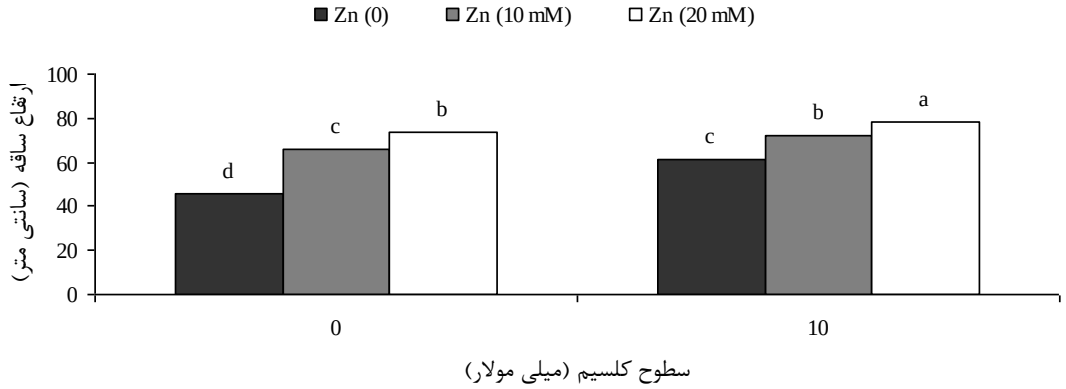
شکل ۴-۴- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی در شرایط تنش سرب بر ارتفاع ساقه گلرنگ. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD است. (آزمایش گلدانی)



شکل ۴-۵- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی کلسیم و روی بر ارتفاع ساقه گلرنگ. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD است. (آزمایش گلدانی)



شکل ۴-۶- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی در شرایط تنش سرب بر ارتفاع ساقه گلرنگ. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD است. (آزمایش مزرعه‌ای)



شکل ۴-۷- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی کلسیم و روی بر ارتفاع ساقه گلرنگ. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD است. (آزمایش مزرعه‌ای)

۴-۱-۴- قطر ساقه

قطر ساقه در هر دو آزمایش گلدانی و مزرعه‌ای به‌طور معنی‌داری از اثرات اصلی سرب، روی و کلسیم و اثر متقابل روی و کلسیم تأثیر پذیرفت (جدول پیوست ۱ و ۲). در آزمایش گلدانی، تنش سرب و افزایش میزان جذب آن در گیاه سبب کاهش قطر ساقه گردید، براساس نتایج حاصل، بیشترین و کمترین قطر ساقه به ترتیب در تیمار شاهد و کاربرد توأم سرب مشاهده گردید و بین تیمار محلول-پاشی سرب و تیمار کاربرد خاکی سرب تفاوت معنی‌داری از لحاظ آماری مشاهده نشد (جدول ۴-۲). کاربرد توأم کلسیم با هر دو غلظت روی نیز تأثیر مثبتی در افزایش قطر ساقه داشت. در این تیمارها میانگین قطر ساقه حدود ۴/۵ و در تیمار شاهد (عدم کاربرد کود) ۳/۴۵ میلی‌متر مربع بود. سایر ترکیبات تیماری نیز افزایش معنی‌داری در قطر ساقه نسبت به شاهد ایجاد نمودند (شکل ۴-۸).

تأثیر میزان تجمع سرب در برگ بر قطر ساقه از طریق آنالیز رگرسیونی مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۴-۹). نتایج نشان داد که رابطه منفی و خطی بین این صفت وجود دارد و مؤید این مطلب است که به ازای هر واحد تجمع سرب در برگ، قطر ساقه به میزان ۰/۰۵ واحد کاهش یافت.

در آزمایش مزرعه‌ای، مشاهده گردید که غلظت پایین سرب تأثیری بر قطر ساقه ندارد ولی دو برابر شدن غلظت آن اثر منفی برجا گذاشت. لذا کمترین قطر ساقه در گیاهانی ثبت شد که محلول سرب را با غلظت ۱ میلی‌مولار دریافت کرده بودند (جدول ۴-۳). استفاده از روی همراه با کلسیم یا به تنهایی موجب افزایش معنی‌داری و یکسان در قطر ساقه گردید. همان‌طور که نتایج مقایسه میانگین نشان می‌دهد، در سطوح مختلف تیمار کلسیم، کاربرد کود روی در غلظت ۱۰ و ۲۰ میلی‌مولار تفاوت معنی‌دار با یکدیگر نداشت. کاربرد کلسیم در شرایط عدم مصرف روی نیز توانست قطر ساقه را به‌طور معنی‌داری نسبت به شاهد افزایش دهد و در رتبه دوم به لحاظ آماری قرار گیرد (شکل ۴-۱۰).

نتایج مطالعات این تحقیق نشان داد که حضور سرب در محیط رشد گیاه، بازدارنده رشد اندام هوایی بوده و موجب کاهش قطر ساقه شده است. پوترس و همکاران (۲۰۰۷) بیان کردند که در تیمار فلزات سنگین اختلال در عمل هورمون‌هایی مانند اکسین، کاهش در رشد را در پی دارد. از آنجا که در

شرایط تنش سرب، گیاه با به‌کارگیری مکانیسم‌های مختلف سعی در کاهش اثرات تـنش سـرب دارد، مقدار زیادی از انرژی را که از اندام هوایی جهت رشد خود دریافت می کند، صرف مقابله با تـنش مـی-نماید، این عمل سبب کاهش کارایی در تأمین عناصر غذایی و آب برای قسمت‌های مختلف گیـاه مـی-شود و در نتیجه موجب کاهش رشد اندام هوایی می‌گردد. همچنین تجمع مقادیر بالای سرب در گیـاه ممکن است تأثیر منفی بر انتقال و تولید فرآورده‌های فتوسنتزی در سلول‌های گیاهی داشته باشد. بر اساس مطالعات انجام شده توسط هان و همکاران (۲۰۰۸)، دوودا و همکاران (۲۰۰۹) کاهش رشد اندام هوایی نمونه‌های گیاهی در شرایط تنش سرب ممکن است نتیجه کاهش فتوسنتز در مواجهه با آلودگی فلزت سنگین باشد. از طرف دیگر، خودسار و همکاران در سال ۲۰۰۱ اعـلام کردنـد کـه بـرهم کـنش فلزات سنگین با گروه‌های سولفیدریل و غیرفعال کردن پروتئین‌های گیاهی از رشد ریشه و اندام هوایی جلوگیری می‌کند.

نتایج این تحقیق نشان داد که کاربرد توأم عناصر کلسیم و روی اثر معنـی‌داری بـر افـزایش قطـر ساقه گیاه گلرنگ داشت. مصرف بهینه کود در گیاهان روغنی ضمن تأثیر بر رشد گیاه، افزایش مقاومت گیاه به تنش‌های محیطی و کاهش غلظت آلاینده‌هایی نظیر کادمیم در دانـه ، کـاهش سـمیت بـور و افزایش راندمان مصرف آب می‌گردد (ملکوتی و سپهر، ۱۳۸۳). مصـرف کودهـای محتـوی عناصـرکم مصرف موجب افزایش عملکرد کمی و کیفی زراعت گندم، کنجد، گلرنگ، کلزا، سـیب زمینـی، ذرت و سایر محصولات زراعی نیز گردیده است (بای بوردی و همکاران، ۱۳۸۲). همچنـین محققـین گـزارش کردند که کاربرد کلسیم به‌صورت محلول‌پاشی در شرایط تنش و هم عدم تنش سـبب افـزایش رشـد گیاه می‌شود (صادقی لطف آبادی، ۱۳۸۹). افزایش وزن خشک کل گیاه در تیمار کلسیم می‌توانـد بـه دلیل نقش مثبت آن در تولید مواد فتوسنتزی بیشتر در گیاه باشد (مظفری و همکاران، ۲۰۱۳).

جدول ۴-۲- مقایسه میانگین اثرهای ساده سطوح مختلف تنش سرب بر قطر ساقه گیاه گلرنگ (آزمایش گلدانی)

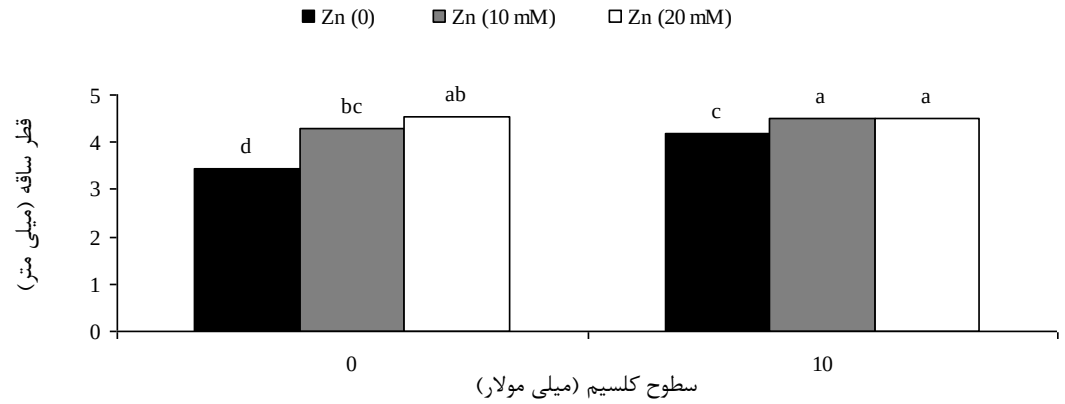
تیمارها	قطر ساقه (میلی‌متر)
سرب	
شاهد	۵/۱۵ a
کاربرد خاکی	۴/۲۱ b
محلول‌پاشی	۴/۰۶ b
کاربرد خاکی و محلول‌پاشی	۳/۵۷ c

میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک در هر ستون و هر تیمار بر اساس آزمون LSD اختلاف معنی‌داری در سطح ۵ درصد ندارند.

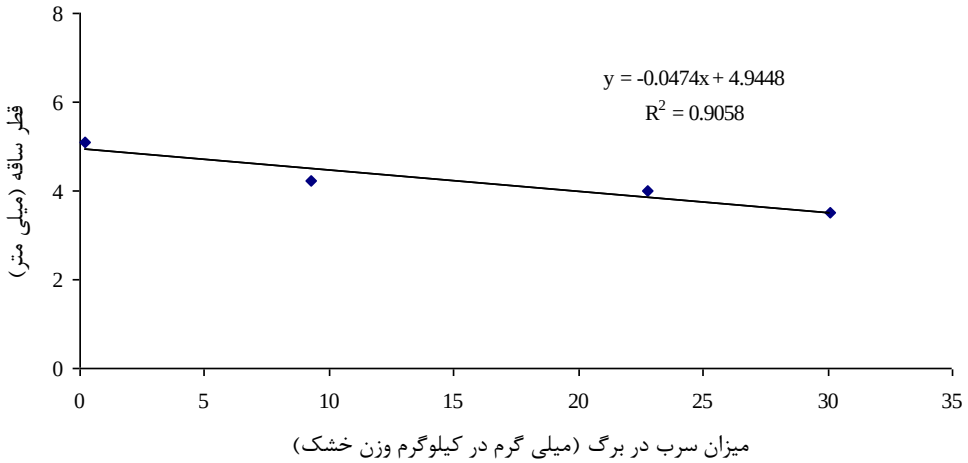
جدول ۴-۳- مقایسه میانگین اثرهای ساده سطوح مختلف تنش سرب بر قطر ساقه گیاه گلرنگ (آزمایش مزرعه‌ای)

تیمار	قطر ساقه (میلی‌متر)
سرب (میلی‌مولار)	
صفر	۷/۸۸ a
۰/۵	۷/۸۶ a
۱	۷/۶۵ b

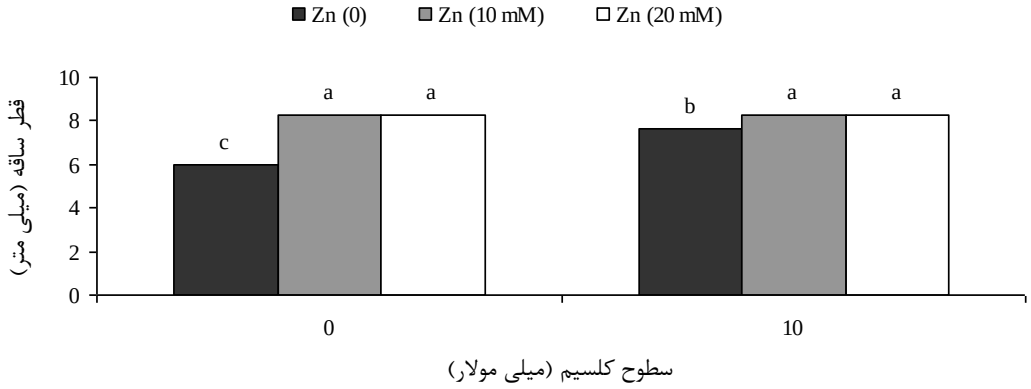
میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک در هر ستون و هر تیمار بر اساس آزمون LSD اختلاف معنی‌داری در سطح ۵ درصد ندارند.



شکل ۴-۸- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی و کلسیم بر قطر ساقه گلرنگ. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD است. (آزمایش گلدانی)



شکل ۴-۹- رابطه بین میزان سرب در برگ و قطر ساقه گیاه گلرنگ (آزمایش گلدانی)



شکل ۴-۱۰- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی و کلسیم بر قطر ساقه گلرنگ. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD است. (آزمایش مزرعه‌ای)

۴-۲- تجمع ماده خشک

۴-۲-۱- وزن خشک ریشه و نسبت وزن خشک ریشه به ساقه

در آزمایش گلدانی، اثر هر سه تیمار کلسیم، روی و سرب بر میزان ماده خشک تولیدی در ریشه و نسبت وزن خشک ریشه به ساقه معنی‌دار بود و در بین اثرات متقابل، اثر کلسیم و روی، کلسیم و سرب بر نسبت وزن خشک ریشه به ساقه و در رابطه با صفت وزن خشک ریشه اثر سه منبع تغییر به جز اثر متقابل سه جانبه معنی‌دار بود (جدول پیوست ۳). همان‌طور که نتایج شکل ۴-۱۱ نشان می‌دهد، در هر یک از سطوح کلسیم نیز اضافه شدن روی و افزایش غلظت آن به‌طور قابل توجهی موجب افزایش وزن خشک ریشه‌ها گردید و در شرایط مصرف کلسیم، میزان تغییرات این صفت در هر دو سطح روی تقریباً یکسان بود و تفاوت معنی‌داری نداشت. همچنین اثر متقابل کلسیم و روی اثر معنی‌داری بر نسبت وزن خشک ریشه به ساقه داشت، در شرایط مصرف کلسیم، جذب برگی روی موجب افزایش این صفت گردید اما بین دو غلظت کاربردی روی تفاوت معنی‌داری مشاهد نشد (شکل ۴-۱۲).

شکل ۴-۱۳ نشان می‌دهد که در تمام سطوح تیمارهای سرب تغذیه گیاه با کلسیم، اثر معنی‌داری بر میزان وزن خشک ریشه در شرایط تنش سرب ایجاد شده در گیاه داشت به‌طور مشخص در سطح صفر سرب ۴۶ درصد، در تیمار کاربرد خاکی ۳۶ درصد، در جذب برگی سرب ۴۰ درصد و در تیمار توأم سرب ۱۰۷ درصد میزان وزن خشک ریشه را نسبت به تیمار عدم مصرف کلسیم افزایش داد. همانطور که نتایج شکل ۴-۱۴ نشان می‌دهد محلول‌پاشی کلسیم به شکل معنی‌دار نسبت وزن خشک ریشه به ساقه را در شرایط تنش و عدم تنش سرب افزایش داد به‌طوری‌که در تیمار کاربرد خاکی، محلول‌پاشی و کاربرد توأم سرب به ترتیب ۳۳، ۲۷ و ۸۸ درصد نسبت به تیمار عدم مصرف کلسیم افزایش داد.

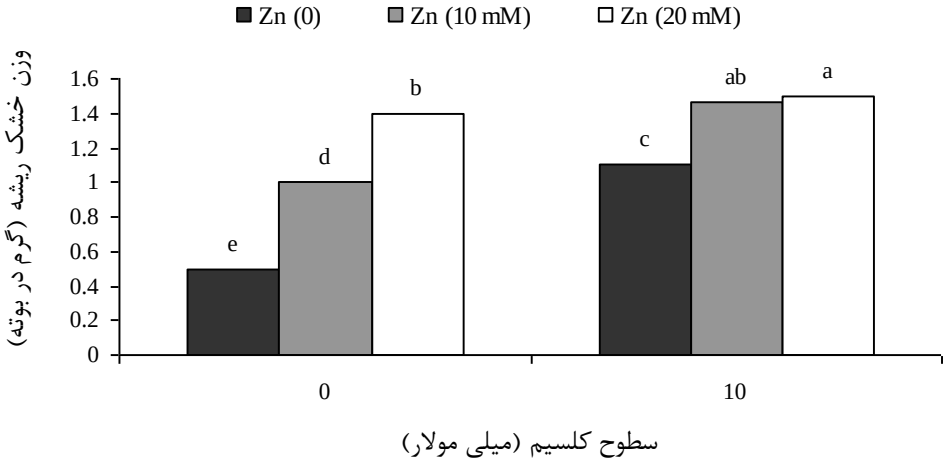
همچنین محلول‌پاشی روی و افزایش غلظت آن سبب کاهش اثرات نامطلوب تنش سرب گردید. جذب برگی این عنصر در شرایط عدم وجود سرب نیز از لحاظ تأثیرگذاری بر ریشه بسیار مفید بود،

به‌طوری‌که بیشترین وزن خشک ریشه در شرایط عدم تنش همراه با تغذیه برگی روی با غلظت ۲۰ میلی‌مولار و در مقابل کمترین مقدار در کاربرد توأم خاکی و محلول‌پاشی سرب و در شرایط عدم کاربرد روی به‌دست آمد (شکل ۴-۱۵).

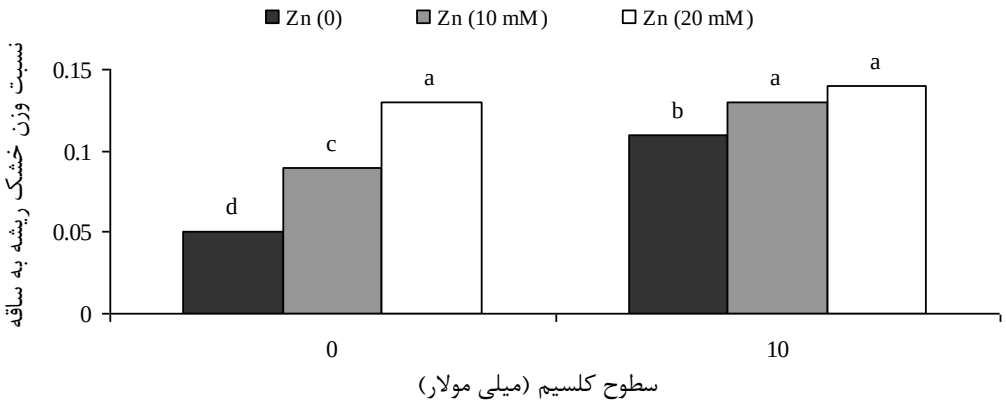
بر اساس روابط رگرسیونی (شکل ۴-۱۶) رابطه خطی و مثبتی بین وزن خشک برگ و ریشه وجود دارد که ۹۰ درصد تغییرات را توجیه نمود به‌طوری که با افزایش وزن خشک ریشه، وزن خشک برگ نیز افزایش یافت که ممکن است به علت افزایش جذب آب و مواد غذایی توسط ریشه و افزایش تولیدات فتوسنتزی و انتقال آن به بخش‌های مختلف گیاه باشد که موجب تولید ماده خشک در گیاه شود.

آثار سمی فلزات سنگین بر گیاهان ناشی از تولید انواع اکسیژن فعال می‌باشد که واکنش‌های مختلف رشدی را دچار اختلال می‌نمایند (گارلند و ویلکینز، ۱۹۸۱). در شرایط تنش با کاهش رشد ریشه‌ها، جذب و انتقال آب و مواد معدنی به بخش‌های هوایی گیاه کاهش می‌یابد که بر میزان رشد گیاه تأثیر منفی دارد. بر اساس نتایج مطالعات، کاهش رشد ریشه ممکن است نتیجه لیگنینی شدن دیواره سلولی تحت تنش فلز سنگین باشد (آلمیدا و همکاران، ۲۰۰۷). روی جزء اصلی بسیاری از آنزیم‌ها است و برای رشد و نمو طبیعی گیاهان ضروری می‌باشد (مرادی تلاوت، ۱۳۹۴). عناصر ریزمغذی از جمله روی از طریق تنظیم انتقال یون‌ها به‌وسیله کانال‌های یونی، فعال‌سازی آنزیم و کاهش گونه‌های فعال اکسیژن، نقش مؤثری بر بقای گیاه دارد (ککمک، ۲۰۰۰). محققین بیان کردند که عناصر ریزمغذی می‌توانند نقش مفیدی بر بهبود خصوصیات کمی و کیفی گیاهان ایفا کنند (رمرودی و همکاران، ۱۳۹۰). کاربرد عنصر روی سبب افزایش تولید ماده خشک، تعداد غلاف در بوته، تعداد دانه در غلاف و وزن ۱۰۰ دانه سویا می‌شود (کاناس و همکاران، ۲۰۰۸). براساس نتایج محققین، عنصر روی با افزایش سنتز کلروفیل و انتقال تولیدات فتوسنتزی نقش مؤثری بر تخصیص بیشتر ماده خشک به ریشه گیاه دارد (وانگ و دوان، ۲۰۰۵). همچنین نتایج نشان داده است که کلسیم در حفاظت از گیاه در مقابله با ممانعت کننده‌های رشدی نقش موثری دارد. محلول‌پاشی کلسیم راهکار

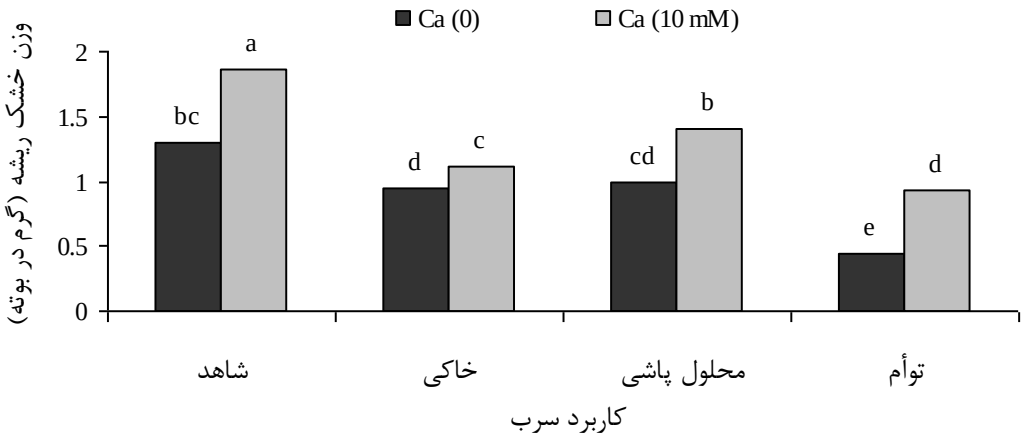
مناسبی در جهت کاهش خسارت گیاهان در شرایط تنش از طریق تنظیم واکنش‌های فیزیولوژیکی گیاه می‌باشد (عطارزاده و همکاران، ۱۳۹۴). تغذیه گیاهی با کلسیم می‌تواند میزان ماده خشک تولیدی در ریشه گیاه را افزایش دهد (چنگبین و همکاران، ۲۰۱۳). کلسیم به‌عنوان پیام آور ثانویه عمل می‌کند و با تأثیرگذاری بر پایداری و فعالیت پروتئین و آنزیم‌ها، سلول گیاهی را از شرایط تنش خارج می‌کند، در شرایط معمولی غلظت این یون در سیتوپلاسم پایین می‌باشد (مادریک و همکاران، ۲۰۰۳).



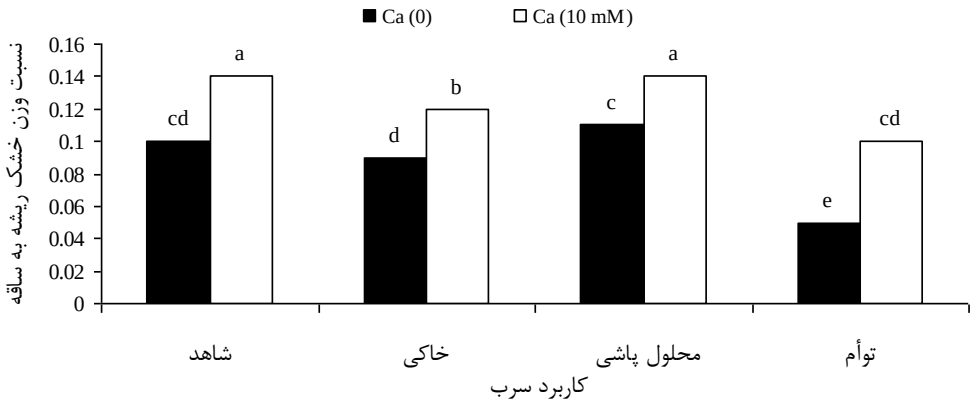
شکل ۴-۱۱- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی و کلسیم بر وزن خشک ریشه گیاه گلرنگ. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD است. (آزمایش گلدانی)



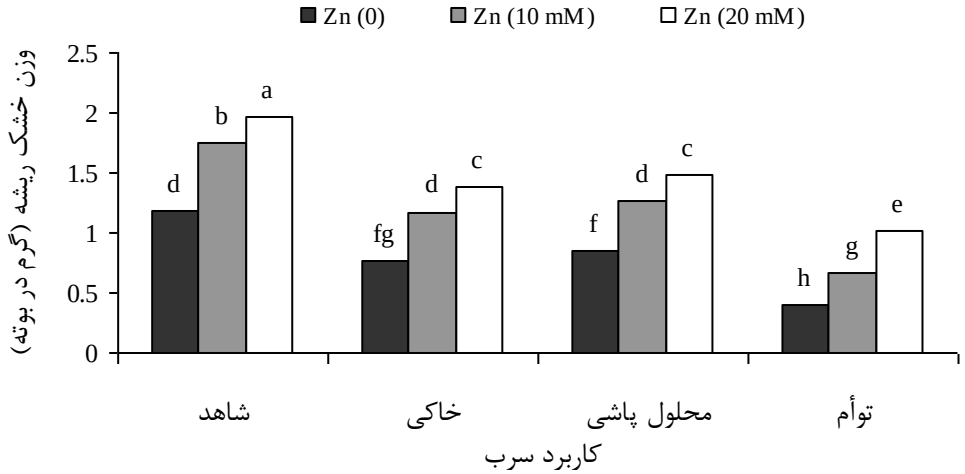
شکل ۴-۱۲- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی و کلسیم بر نسبت وزن خشک ریشه به ساقه گیاه گلرنگ. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD است. (آزمایش گلدانی)



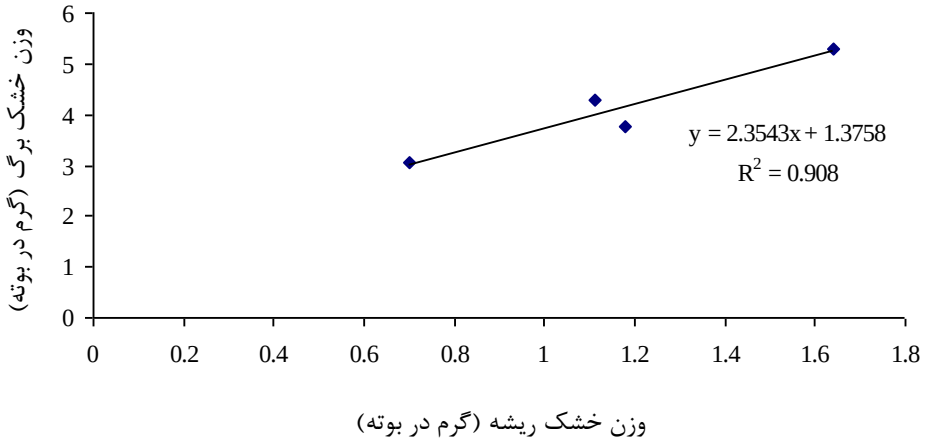
شکل ۴-۱۳- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی کلسیم در شرایط تنش سرب بر وزن خشک ریشه گیاه گلرنگ. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD است. (آزمایش گلدانی)



شکل ۴-۱۴- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی کلسیم در شرایط تنش سرب بر نسبت وزن خشک ریشه به ساقه گیاه گلرنگ. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD است. (آزمایش گلدانی)



شکل ۴-۱۵- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی در شرایط تنش سرب بر وزن خشک ریشه گیاه گلرنگ. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD است. (آزمایش گلدانی)



شکل ۴-۱۶- رابطه بین وزن خشک برگ و وزن خشک ریشه گیاه گلرنگ (آزمایش گلدانی)

۴-۲-۲- وزن خشک برگ

در آزمایش گلدانی، نتایج تجزیه واریانس (جدول پیوست ۳) نشان داد که تأثیر تیمارهای محلول-پاشی کود روی و کلسیم و نیز تنش سرب بر وزن خشک برگ معنی‌دار بود و در بین تیمارهای مورد آزمایش، اثرات متقابل کلسیم و روی، تنش سرب و کلسیم و نیز اثر سه جانبه بر میزان وزن خشک برگ از لحاظ آماری معنی‌دار بود. از یک سو، تنش سرب باعث کاهش در مقادیر وزن خشک برگ گردید و از سوی دیگر، جذب برگی سرب در مقایسه با جذب خاکی این فلز، اثرات کاهنده بیشتری بر ماده خشک تولیدی در گیاه داشت. بر این اساس، کمترین وزن خشک برگ در شدیدترین میزان آلودگی سرب (کاربرد توأم سرب) مشاهده شد. در این شرایط محلول‌پاشی کلسیم با غلظت ۱۰ میلی-مولار در تمام سطوح تیمار سرب، موجب کاهش اثرات نامطلوب این یون سمی گردید و به‌طور مشخص در کاربرد توأم سرب، میزان وزن خشک برگ ۱۷ درصد افزایش نشان داد. تأثیر کلسیم بر

گیاهانی که سرب دریافت نکرده بودند نیز قابل توجه بود، به‌طوری که در مجموع بیشترین وزن خشک برگ از این گیاهان حاصل شد (شکل ۴-۱۷). بر اساس نتایج شکل ۴-۱۸، در شرایط مصرف و عدم مصرف کلسیم، کاربرد روی مقدار وزن خشک برگ را افزایش داد. بیشترین مقدار این صفت در کاربرد کلسیم (۱۰ میلی مولار) همراه با روی (۲۰ میلی مولار) به‌دست آمد که نسبت به شاهد ۷۷ درصد بیشتر بود. مقایسه اثرات برهمکنش سه جانبه تیمارها نشان داد که در شرایط عدم تنش سرب، بیشترین میزان وزن خشک برگ در کاربرد کلسیم (۱۰ میلی مولار) همراه با روی مشاهده گردید و بین دو غلظت کاربردی روی میزان تغییرات یکسان بود و تفاوت معنی‌داری نداشت. در شرایط تنش سرب، کمترین میزان وزن خشک برگ در کاربرد توأم سرب که هیچ کودی دریافت نکرده بودند مشاهده گردید و در این سطح از تنش سرب، در شرایط مصرف و عدم مصرف کلسیم، محلول‌پاشی روی موجب افزایش وزن خشک برگ گردید و بین دو غلظت کاربردی روی تفاوت معنی‌داری مشاهده نگردید (شکل ۴-۱۹).

بر اساس روابط رگرسیونی (شکل ۴-۲۰) رابطه خطی و مثبتی بین وزن خشک برگ و میزان کلروفیل کل در برگ گیاه گلرنگ وجود دارد به‌طوری که با افزایش میزان کلروفیل، وزن خشک برگ نیز افزایش یافت که ۹۳ درصد تغییرات را توجیه نمود. براساس نتایج می‌توان چنین بیان کرد که با سنتز کلروفیل در گیاه و افزایش انتقال تولیدات فتوسنتزی میزان ماده خشک تولیدی در گیاه افزایش می‌یابد.

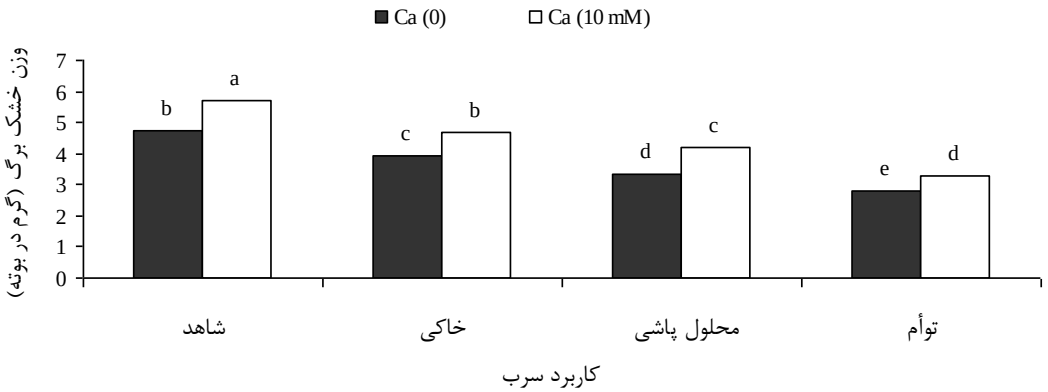
در آزمایش مزرعه‌ای تنها، تأثیر اثرات اصلی شامل کود روی و کلسیم و نیز سرب بر میزان وزن خشک برگ معنی‌دار بود (جدول پیوست ۴). جذب برگی سرب موجب کاهش معنی‌دار وزن خشک برگ گردید، به‌طوری که تیمارهای ۰/۵ و ۱ میلی‌مولار سرب به ترتیب ۹ و ۱۱ درصد وزن خشک برگ را کاهش دادند (جدول ۴-۴). بر اساس نتایج مقایسه میانگین، بیشترین میزان وزن خشک برگ در تیمار محلول‌پاشی سولفات روی با غلظت ۲۰ میلی‌مولار معادل ۹۰۷/۳۳ کیلوگرم در هکتار) حاصل گردید. همچنین نتایج این تحقیق نشان داد که تغذیه گیاه با کلسیم (۱۰ میلی‌مولار) میزان وزن

خشک برگ را به‌طور معنی‌داری نسبت به گیاهان شاهد افزایش داد (جدول ۴-۴). تأثیر شاخص سطح برگ بر میزان وزن خشک برگ از طریق آنالیز رگرسیونی مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۴-۲۱). نتایج نشان داد که رابطه مثبت و خطی بین این صفات وجود دارد و مؤید این مطلب است که با افزایش شاخص سطح برگ، وزن خشک برگ افزایش یافت.

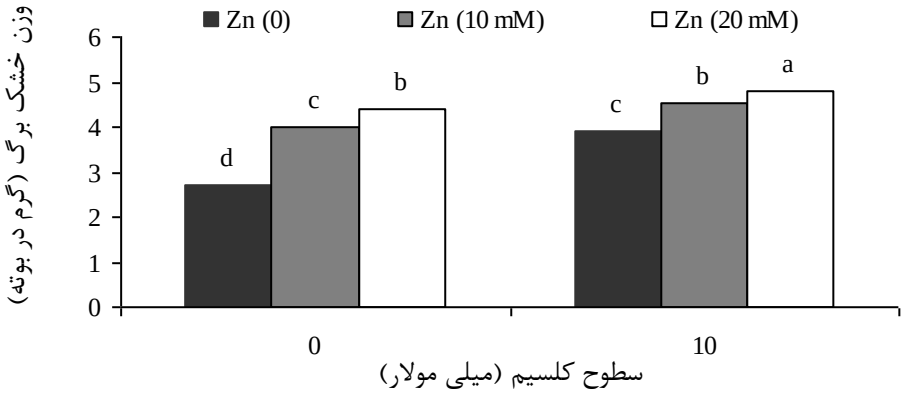
به‌طور کلی، نتایج نشان داد که تنش سرب می‌تواند میزان ماده خشک تولیدی در گیاه گلرنگ را تحت تأثیر قرار دهد و موجب کاهش تجمع ماده خشک برگ، ساقه و ریشه گردد. براساس نتایج این تحقیق به نظر می‌رسد، به دلیل تأثیر فلز سنگین سرب بر واکنش‌های فیزیولوژیکی گیاه و کاهش جذب عناصر غذایی ضروری گیاه، رشد و طویل شدن سلول‌های گیاهی در هر دو بخش اندام هوایی و ریشه آسیب می‌بیند. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد جذب برگی سرب نسبت به جذب خاکی سرب اثر بیشتری بر کاهش وزن خشک برگ گیاه داشت که می‌تواند به دلیل نقش ریشه باشد چراکه ریشه تا اندازه‌ای از انتقال سرب به بخش هوایی گیاه ممانعت می‌کند و سبب کاهش سمیت و در نهایت حفظ رشد گیاه در شرایط تنش می‌شود که مطابق با نتایج سایر محققین است (صادری و همکاران، ۱۳۹۰). در تیمار جذب خاکی سرب، کاهش وزن خشک برگ ممکن است به دلیل اثرات غیر مستقیم سرب باشد به‌طوری که این یون سمی با کاهش رشد و توسعه ریشه گیاه جذب آب و مواد غذایی مؤثر بر سنتز کلروفیل و تولیدات فتوسنتزی را کاهش می‌دهد. اسلام و همکاران (۲۰۱۱) گزارش کرده‌اند که غلظت‌های بالای فلز سنگین سرب منجر به سمیت و بازدارندگی رشد در گیاه می‌شود.

نتایج این تحقیق نشان داد که تیمار محلول‌پاشی کلسیم در شرایط تنش سرب اثر معنی‌داری بر میزان وزن خشک برگ داشت، به طوری که میزان ماده خشک تولیدی در برگ نسبت به تیمار عدم کاربرد کود در شرایط آلودگی سرب افزایش نشان داد، که حاکی از تأثیر به‌سزای محلول‌پاشی کلسیم بر این صفت می‌باشد. به‌طورکلی، کاربرد توأم کلسیم و روی بیشترین تأثیر را بر وزن خشک تولیدی در برگ نسبت به تیمار شاهد در شرایط تنش سرب داشت. عنصر روی نقش مؤثری بر سنتز و تولید کلروفیل دارد. جذب برگی روی سبب افزایش غلظت این عنصر در برگ و تجمع ماده خشک در گیاه

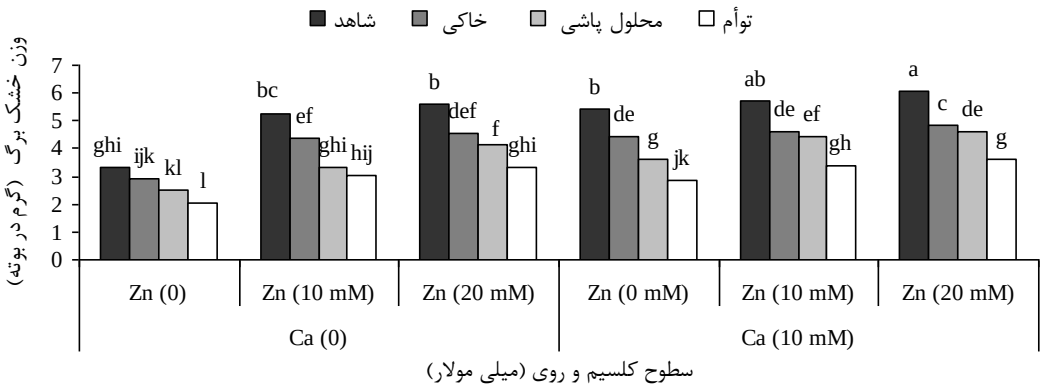
می‌شود (عابدی باباعربی و همکاران، ۱۳۹۰). سولفور از چهار ماده غذایی اصلی مورد نیاز گیاه است و نقش مهمی در گیاهان دانه روغنی دارد به‌طوری که این گیاهان نسبت به سایر گیاهان به سولفور بیشتری نیاز دارند (گانگادهارا و همکاران، ۱۹۹۰). در بررسی اثر سولفات روی بر غلظت سرب نتایج نشان داد که در ساقه اثر آنتاگونیستی بین سرب و سولفات روی وجود دارد و در ریشه سولفات روی به طورمعنی‌داری میزان جذب سرب را در گیاه کاهش داد (اسلام و همکاران، ۲۰۱۱). در تایید این مطلب تحقیقات دیگر نیز نشان داد که روی اثر آنتاگونیستی با جذب سرب در گیاه دارد (هی و همکاران، ۲۰۰۴). همچنین محققین گزارش کردند که افزایش وزن خشک کل گیاه در تیمار کلسیم می‌تواند به دلیل تأثیر مثبت آن در تولید مواد فتوسنتزی بیشتر در گیاه باشد (مظفری و همکاران، ۲۰۱۳). بر اساس نتایج تحقیقات، محلول‌پاشی کلسیم میزان بیوماس تولیدی در بخش هوایی و ریشه گیاه را در شرایط تنش از طریق تأثیر بر مکانیزم‌های دفاعی گیاه بهبود می‌بخشد (چنگبین و همکاران، ۲۰۱۳).



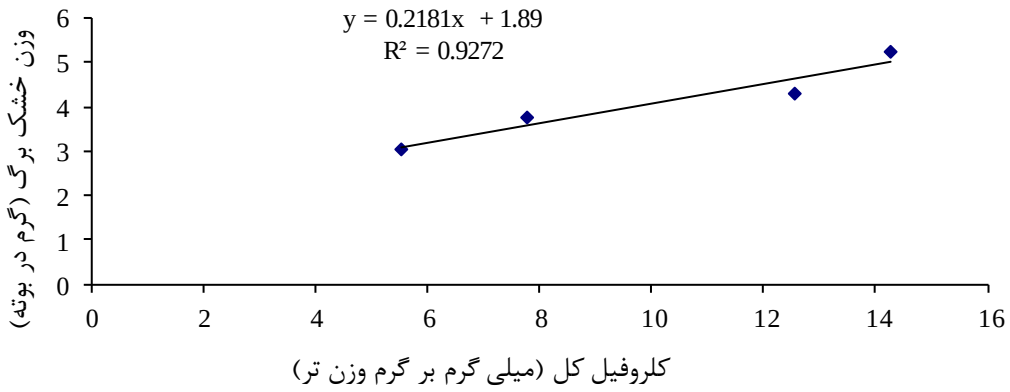
شکل ۴-۱۷- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی کلسیم در شرایط تنش سرب بر وزن خشک برگ گیاه گلرنگ. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD است. (آزمایش گلدانی)



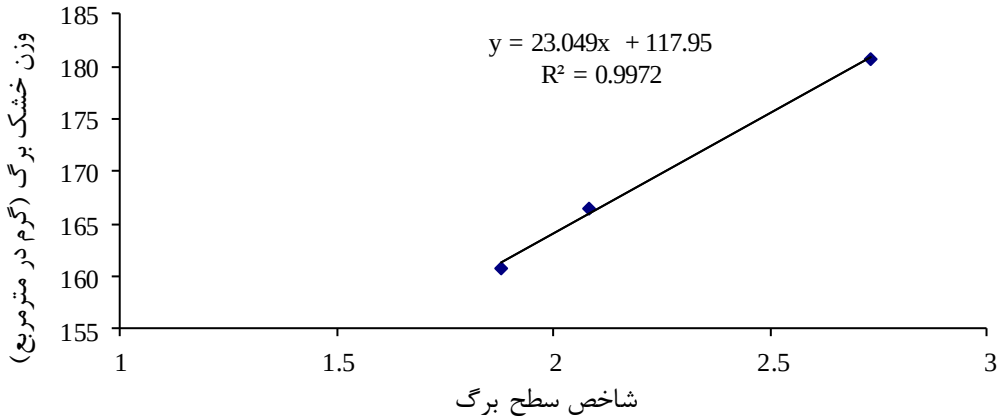
شکل ۴-۱۸- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی کلسیم و روی بر وزن خشک برگ گیاه گلرنگ. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD است. (آزمایش گلدانی)



شکل ۴-۱۹- مقایسه اثر برهمکنش سه‌جانبه روی، کلسیم و سرب بر وزن خشک برگ گیاه گلرنگ. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD است. (آزمایش گلدانی)



شکل ۴-۲۰- رابطه بین کلروفیل کل و وزن خشک برگ گیاه گلرنگ (آزمایش گلدانی)



شکل ۴-۲۱- رابطه بین شاخص سطح برگ و وزن خشک برگ گیاه گلرنگ (آزمایش مزرعه‌ای)

جدول ۴-۴- مقایسه میانگین اثرهای ساده سطوح مختلف تنش سرب و محلول‌پاشی روی و کلسیم بر وزن خشک برگ گیاه گلرنگ (آزمایش مزرعه‌ای)

تیمار	وزن خشک برگ (گرم در مترمربع)
سرب (میلی‌مولار)	
صفر	۱۸۰/۷۳ a
۰/۵	۱۶۶/۴۹ b
۱	۱۶۰/۸۲ b
روی (میلی‌مولار)	
صفر	۱۵۸/۸۰ b
۱۰	۱۶۷/۷۷ b
۲۰	۱۸۱/۴۷ a
کلسیم (میلی‌مولار)	
صفر	۱۶۴/۲۱ b
۱۰	۱۷۴/۴۹ a

میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک در هر ستون و هر تیمار بر اساس آزمون LSD اختلاف معنی‌داری در سطح ۵ درصد ندارند.

۴-۲-۳- وزن خشک ساقه

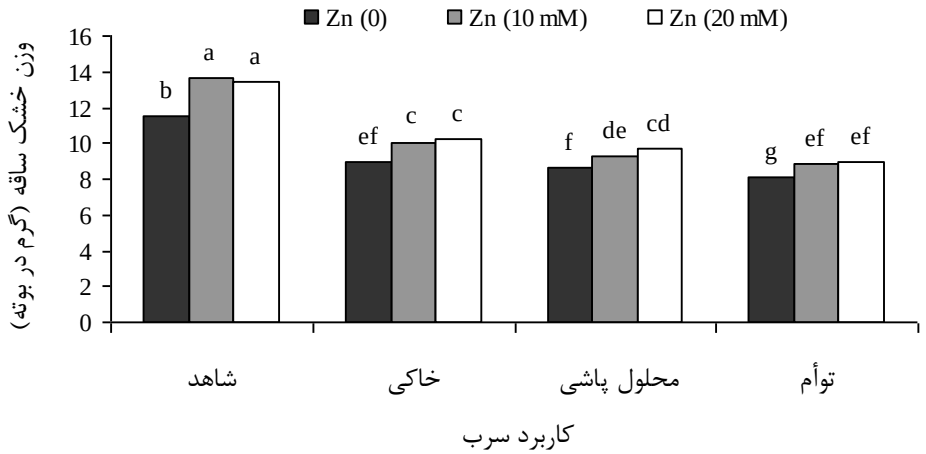
در آزمایش گلدانی، اثر همه منابع تغییر در سطح احتمال یک درصد بر صفت وزن خشک ساقه معنی‌دار گردید (جدول پیوست ۳). نتایج به دست آمده در این پژوهش نشان داد که جذب فلز سنگین سرب چه از برگ و چه از ریشه در محیط، اثر منفی بر میزان ماده خشک تولیدی در گیاه گلرنگ داشت و کمترین مقدار در کاربرد توأم سرب که هیچ کودی دریافت نکرده بودند مشاهده گردید (شکل ۴-۲۲ و ۴-۲۳). در شکل ۴-۲۲ مشاهده می‌گردد که در شرایط عدم تنش سرب، وزن خشک ساقه در اثر محلول‌پاشی با روی (۲۰ میلی مولار) ۱۷ درصد نسبت به تیمار عدم مصرف روی افزایش نشان داد. اگرچه محلول‌پاشی با روی نتوانست به‌طور کامل آثار منفی ناشی از سرب را خنثی کند ولی حضور آن در هر یک از سطوح سرب مفید واقع شد، به‌طوری‌که محلول‌پاشی روی با غلظت ۲۰ میلی-مولار میزان وزن خشک ساقه را در جذب خاکی سرب ۱۴ درصد، در جذب برگی سرب ۱۲ درصد و در کاربرد توأم سرب ۱۰ درصد نسبت به سطح صفر روی افزایش داد. نتایج شکل ۴-۲۳ تأثیر ترکیبات تیماری حاصل از سرب و کود کلسیم را بر وزن خشک ساقه گیاه نشان می‌دهد. محلول‌پاشی کلسیم (۱۰ میلی‌مولار)، نیز موجب کاهش اثرات نامطلوب سرب بر وزن خشک ساقه گردید. با توجه به این شکل بیشترین وزن خشک ساقه مربوط به گیاهانی بود که تحت تنش سرب نبوده و کلسیم دریافت کردند و کمترین مقدار در گیاهانی دیده شد که هر دو فرم خاکی و برگی سرب را دریافت کرده ولی با کلسیم تیمار نشده بودند. نتایج نشان داد، اگرچه کاربرد برگی عناصر روی و کلسیم به تنهایی موجب افزایش انباشت ماده خشک در ساقه می‌شود ولی کاربرد توأم این دو عنصر به مراتب مؤثرتر است. لذا بالاترین مقادیر وزن خشک ساقه زمانی به‌دست آمد که هر دو عنصر یاد شده روی گیاهان محلول‌پاشی گردید. البته در شرایط مصرف کلسیم، بین دو غلظت ۱۰ و ۲۰ میلی‌مولار روی اختلافات معنی‌داری وجود نداشت (شکل ۴-۲۴). در بررسی آثار سه جانبه تیمارها نیز مشخص گردید که کمترین میزان وزن خشک ساقه در کاربرد توأم سرب در شرایط عدم مصرف کود مشاهده گردید. کاربرد روی با غلظت ۲۰ همراه با کلسیم (۱۰ میلی‌مولار) فقط در شرایط عدم تنش سرب اثر هم

افزایشی نشان دادند و در بقیه تیمارهای سرب این تأثیر مشاهده نشد که ممکن است بـه علـت تـأثیر سرب بر کاهش جذب و انتقال عنصر روی و کلسیم در سلول‌های گیاهی باشد. در تیمار کـاربرد تـوأم سرب، میزان تغییرات این صفت در غلظت ۱۰ میلـی‌مـولار کلسـیم در هـر دو سـطح روی (۱۰ و ۲۰ میلی‌مولار) تقریباً مشابه بود (شکل ۴-۲۵).

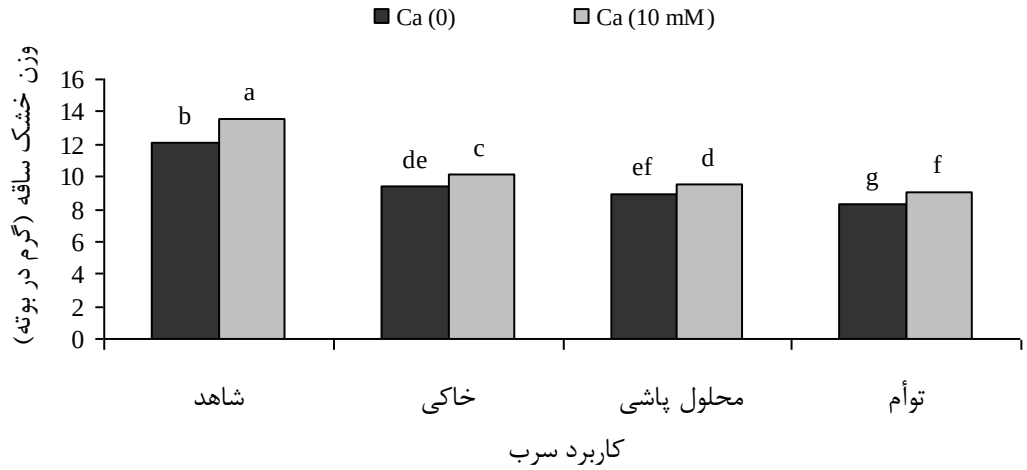
در آزمایش مزرعه‌ای، نتایج جدول تجزیه واریانس نشان داد که در بین تیمارهای مـورد آزمـایش تنها اثر محلول‌پاشی سولفات روی بر وزن خشک ساقه معنی‌داری بود (جـدول پیوسـت ۴). بیشـترین میزان وزن خشک ساقه در تیمار محلول‌پاشی سولفات روی با غلظت ۲۰ میلی‌مولار حاصل گردید کـه ۱۲ درصد بیشتر از شاهد بود شایان ذکر است که غلظت ۱۰ میلی‌مولار روی تأثیر معنی‌داری بر ایـن صفت در مزرعه نداشت (جدول ۴-۵). علت تفاوت معنی‌داری در دو بخش مزرعه‌ای و گلدانی ممکـن است به این علت باشد که شرایط رشدی در مزرعه و گلدان متفاوت بود و همین امر موجب تغییـرات در نتایج گردید.

غلظت زیاد سرب جذبی توسط گیاه باعث کاهش رشد سلول می‌گردد. کاهش رشد و عملکرد گیـاه تحت تنش احتمالا در اثر تغییرات در تولیدات فتوسنتزی گیاه می‌باشد که سبب کاهش تجمـع مـاده خشک در برگ و ساقه گیاه می‌گردد. فلزات سنگین با اختلال در مسیرهای مختلف متابولیکی به رشد و طویل شدن سلول‌های گیاهی آسیب می‌رسـانند (اسـلام، ۲۰۰۸). گارلنـد و ویلکینـز (۱۹۸۱) بیـان کردند که کاربرد کلسیم در تنش فلز سنگین سرب از طریق کاهش جذب یون‌های فلز در گیاه سـبب افزایش وزن خشک تولیدی در گیاه گندم شد. همچنین بهبـود رشـد گیـاه از طریـق تغذیـه گیـاه بـا کلسیم در سایر تنش‌های فلزات سنگین نیز گزارش شده است (صدیقی و همکاران، ۲۰۱۱). عنصر کم مصرف روی با افزایش جذب نیتروژن سبب افزایش سطح برگ، ارتفاع بوتـه و در نتیجـه افـزایش وزن خشک بوته می‌شود (پاترزیکی و گرزبیش، ۲۰۰۹). عنصر روی در سنتز و تولید کلروفیل نقش مؤثری دارد، بنابراین بهبود فتوسنتز و تولید مواد غذایی بیشتر را در گیاه موجب می‌شود. بـه‌طـورکلی تولیـد ماده خشک در گیاه و انتقال مواد به قسمت‌های مختلف گیاه در شرایط کمبود عناصر کم مصـرفی از

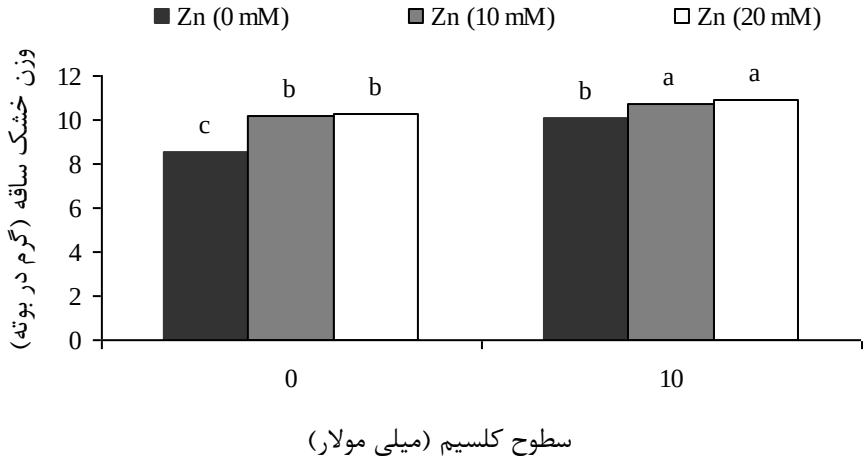
جمله عنصر روی کاهش می‌یابد. با محلول‌پاشی عناصر کم مصرف، عملکرد گیاه ذرت به علت بهبود فعالیت آنزیمی در گیاه افزایش یافت (پاترزیکی و گرزبیش، ۲۰۰۹). گوگرد موجود در کود سولفات روی یکی از عناصر ضروری برای رشد گیاهان محسوب می‌شود. راوی و همکاران (۲۰۰۸) اظهار داشتند که گوگرد باعث افزایش جذب عناصر غذایی مؤثر بر رشد و عملکرد در گیاه گلرنگ می‌شود.



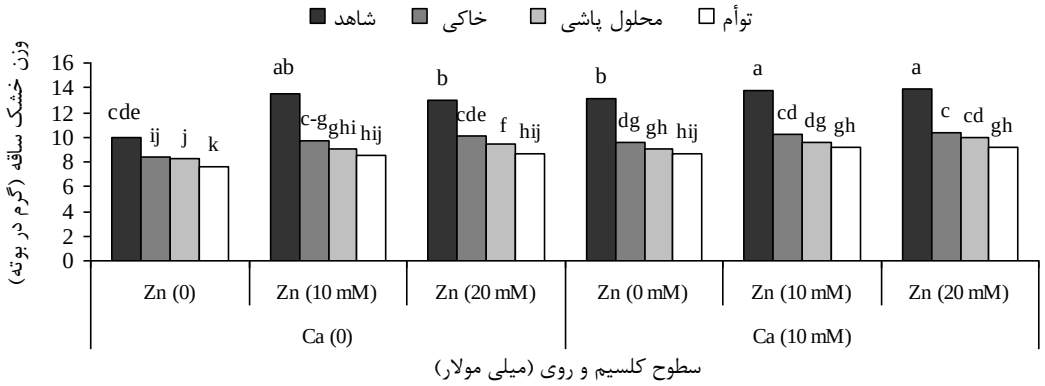
شکل ۴-۲۲- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی در شرایط تنش سرب بر وزن خشک ساقه گیاه گلرنگ. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD است. (آزمایش گلدانی)



شکل ۴-۲۳- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی کلسیم در شرایط تنش سرب بر وزن خشک ساقه گیاه گلرنگ. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD است. (آزمایش گلدانی)



شکل ۴-۲۴- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی کلسیم و روی بر وزن خشک ساقه گیاه گلرنگ. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD است. (آزمایش گلدانی)



شکل ۴-۲۵- مقایسه اثر برهمکنش سه‌جانبه روی، کلسیم و سرب بر وزن خشک ساقه گیاه گلرنگ. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD است. (آزمایش گلدانی)

جدول ۴-۵- مقایسه میانگین اثرهای ساده سطوح مختلف محلول‌پاشی روی بر وزن خشک ساقه گیاه گلرنگ (آزمایش مزرعه‌ای)

تیمار	وزن خشک ساقه (گرم در مترمربع)
روی (میلی‌مولار)	
صفر	۲۷۸/۶۰ b
۱۰	۲۸۴/۱۳ b
۲۰	۳۱۳/۵۳ a

میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک در هر ستون و هر تیمار بر اساس آزمون LSD اختلاف معنی‌داری در سطح ۵ درصد ندارند.

۴-۳- سطح برگ

در آزمایش گلدانی، بر اساس نتایج تجزیه واریانس (جدول پیوست ۳)، اثر هر سه عامل آزمایش و اثرات متقابل کلسیم و سرب، روی و سرب و اثر سه جانبه بر صفت سطح برگ معنی‌دار بود. نتایج مقایسه میانگین (شکل ۴-۲۶) نشان داد که محلول‌پاشی سولفات روی سبب افزایش معنی‌دار سطح برگ گیاه در تمام سطوح تیمار سرب گردید، به‌طوری که در بالاترین غلظت روی (۲۰ میلی‌مولار)، میزان سطح برگ در گیاهان شاهد ۲۴ درصد، در کاربرد خاکی سرب ۲۰ درصد، محلول‌پاشی سرب ۸۳ درصد و کاربرد توأم سرب ۶۷ درصد نسبت به سطح صفر عنصر روی افزایش یافت. افزایش سطح برگ در اثر محلول‌پاشی روی در کاربرد خاکی سرب به حدی بود که سطح برگ حاصل از گیاهان

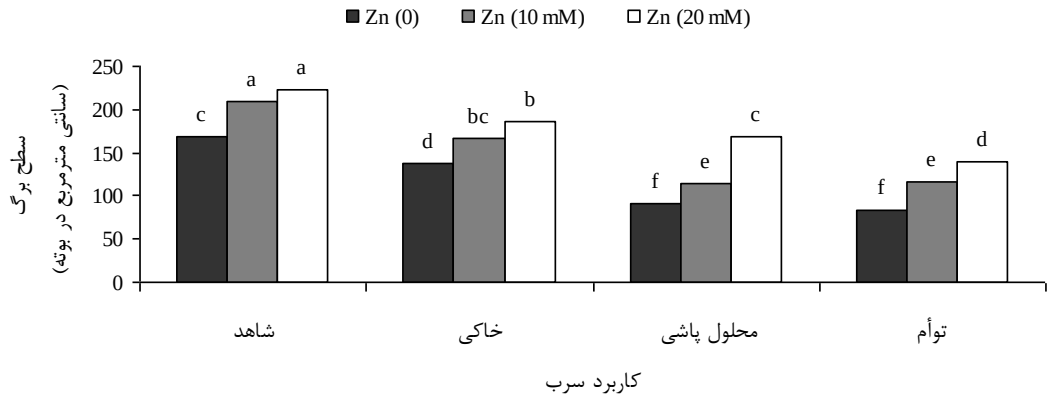
شاهد بهتر بود. بر اساس نتایج این تحقیق، محلول‌پاشی کلسیم سبب بهبود رشد گیاه در تیمار سرب گردید، به‌طوری‌که سطح برگ در گیاهانی که محلول کلسیم را با غلظت ۱۰ میلی‌مولار دریافت کرده بودند، به‌طور معنی‌داری بیشتر بود (شکل ۴-۲۷).

در آزمایش مزرعه‌ای، شاخص سطح برگ به‌طور معنی‌داری ($P <$ ۰/۰۱) تحت تأثیر جذب برگی سرب، کلسیم و روی قرار گرفت، اثر متقابل سرب و کلسیم نیز بر این صفت در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول پیوست ۴). در شکل ۴-۲۸ مشاهده می‌گردد که استفاده از کلسیم در شرایط عدم تنش سرب و یک میلی‌مولار سرب معنی‌دار بود و موجب افزایش معنی‌دار در سطح برگ گلرنگ گردید. در بالاترین غلظت سرب (غلظت یک میلی‌مولار)، محلول‌پاشی کلسیم با غلظت ۱۰ میلی‌مولار این صفت را ۲۳ درصد نسبت به تیمار عدم کاربرد کلسیم افزایش داد. همچنین اثر کلسیم بر شاخص سطح برگ در شرایط عادی و عدم حضور سرب معنی‌دار بود و از ۲/۲ در گیاهان شاهد به ۳ رساند. در جدول ۴-۶ مشاهده گردید که شاخص سطح برگ گیاهانی که توسط روی با غلظت ۱۰ و ۲۰ میلی‌مولار محلول‌پاشی شده بودند، به ترتیب ۲۰ و ۴۰ درصد بیشتر از گیاهان شاهد بود.

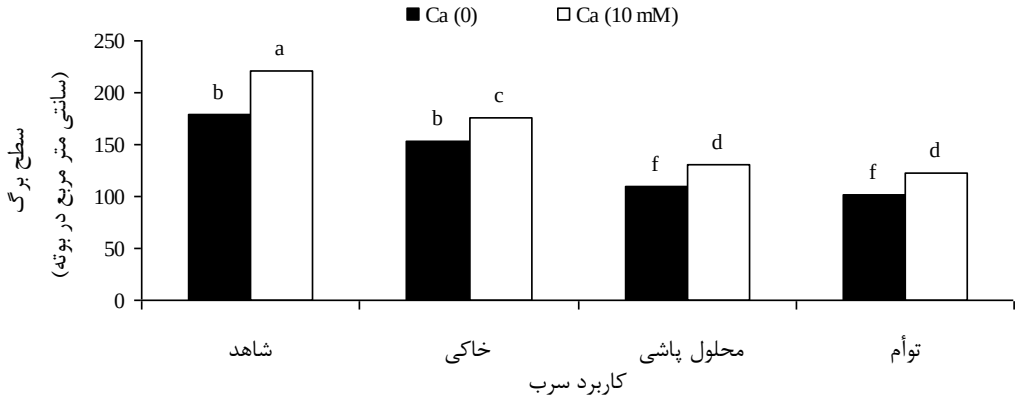
در بررسی روابط رگرسیونی بین شاخص سطح برگ و میزان روی در برگ رابطه خطی و مثبتی وجود داشت که ۹۹ درصد تغییرات را توجیه نمود و با هر واحد افزایش میزان روی در برگ، میزان شاخص سطح برگ ۰/۰۶ واحد افزایش یافت (شکل ۴-۲۹). عنصر روی نقش مؤثری بر رشد و تقسیم سلولی گیاه از طریق تأثیرگذاری بر سنتز کلروفیل و تولیدات فتوسنتزی در گیاه دارد.

سطح برگ گیاهان به عنوان یک عامل اساسی در فرآیندهای مهم رشد و نمو گیاه به تنش‌های محیطی پاسخ می‌دهد. عدم توسعه و گسترش مناسب سیستم ریشه‌ای در تنش سرب باعث کاهش سطوح جذب کنندهٔ مواد غذایی، تغییر در ساختار غشاء سلولی و کاهش جذب و محتوی آب می‌شود که این امر بر فرآیندهای فیزیولوژیکی مانند تعرق، تنفس و فتوسنتز اثر گذاشته و در نهایت موجب کاهش رشد در سایر قسمت‌های گیاه از جمله سطح برگ می‌شود (شرما و دوبی، ۲۰۰۵). در گیاهان آلوده به سرب ممکن است با کاهش فشار تورژسانس در سلول‌های گیاهی و جلوگیری از رشد و تقسیم

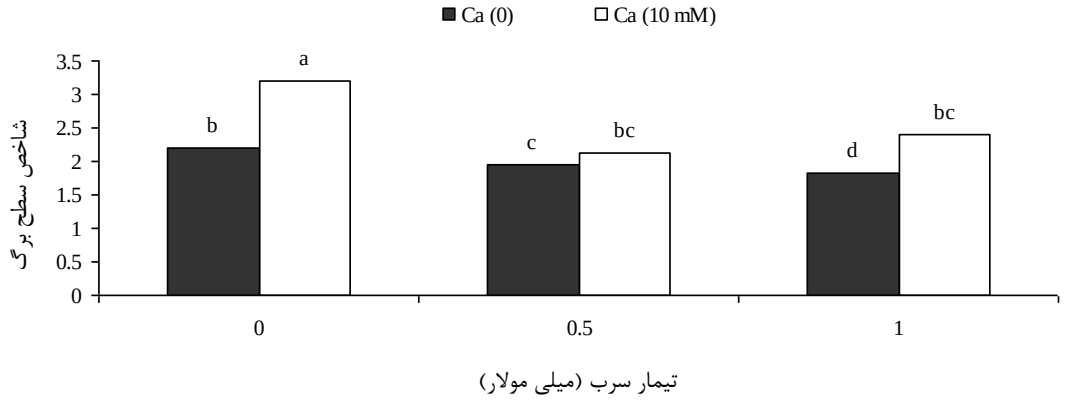
سلولی در نهایت موجب کاهش سطح برگ در گیاه شود. یون‌های فلزی همانند روی به عنوان کوفاکتور بسیاری از آنزیم‌های آنتی اکسیدان است لذا در شرایط کمبود عناصر ریزمغذی فعالیت این آنزیم‌ها و به دنبال آن مقاومت گیاهان به تنش‌های محیطی کاهش می‌یابد (ککمک، ۲۰۰۰). محلول‌پاشی روی می‌تواند از کاهش شدید کلروفیل در شرایط تنش جلوگیری کند و این امر موجب بهبود رشد گیاه می شود و به گیاه کمک می‌کند تا سعی در حفظ ثبات عملکرد خود داشته باشد (عابدی باباعربی، ۱۳۹۰). از آن جا که برگ‌ها اندام اصلی فتوسنتز کننده درگیاه می‌باشند، لذا افزایش شاخص سطح برگ موجب ایجاد مبدأ فیزیولوژیکی کافی جهت استفاده هر چه بیشتر از نور دریافتی و تأمین مواد پرورده لازم برای پر کردن دانه و افزایش عملکرد می‌گردد (گاردنر و همکاران، ۱۹۹۰). در بررسی اثر عناصر کم مصرف در گندم مشاهده گردید مصرف این عناصر موجب افزایش غلظت همان عنصر در برگ و همچنین افزایش رشد و عملکرد دانه می‌شود (آگراوال، ۱۹۹۲). روی با افزایش مقدار تنظیم کننده‌های رشد، کمک به متابولیسم مواد و تأثیر بر واکنش‌های انتقال الکترون در چرخه کربس نقش مؤثری بر رشد و تقسیم سلولی گیاه دارد (ولچ و شومان، ۱۹۹۵). یکی از آثار سوء تنش فلزات سنگین، برهم زدن تعادل عناصرغذایی در گیاهان است. از این رو، مصرف صحیح کود کلسیم ممکن است در محیط آلوده به سرب موجب کاهش عوارض فیزیولوژیکی ناشی از تنش و در نتیجه افزایش رشد گیاه شود. یون کلسیم اهمیت زیادی در فرآیندهای فیزیولوژیکی گیاهان داشته و حضور این یون باعث افزایش مقاومت گیاهان نسبت به تنش‌های مختلف در گیاه می‌شود (رنگل، ۱۹۹۲). کلسیم محیط به‌عنوان فعال کننده سیستم انتقال پیام‌های سلولی و همچنین به‌عنوان یک تنظیم کننده اسمزی در گیاه به‌شمار می‌رود (صفاری، ۱۳۷۵). نتایج تحقیقات نشان داده است که در صورت وجود میزان مناسبی از کلسیم در محیط رشد ریشه و یا محلول‌پاشی آن، جذب سایر عناصر بهبود یافته و در نتیجه رشد گیاه بهتر می‌گردد (ندجیمی و داوود، ۲۰۰۹).



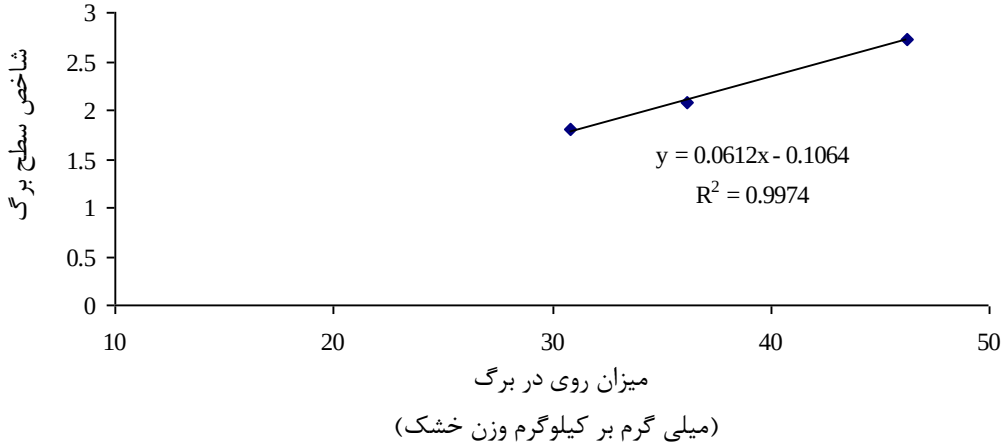
شکل ۴-۲۶- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی در شرایط تنش سرب بر سطح برگ گیاه گلرنگ. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD است. (آزمایش گلدانی)



شکل ۴-۲۷- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی کلسیم در شرایط تنش سرب بر سطح برگ گیاه گلرنگ. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD است. (آزمایش گلدانی)



شکل ۴-۲۸- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی کلسیم در شرایط تنش سرب بر شاخص سطح برگ گیاه گلرنگ. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD است. (آزمایش مزرعه‌ای)



شکل ۴-۲۹- رابطه بین محتوای روی در برگ و شاخص سطح برگ (آزمایش مزرعه‌ای)

جدول ۴-۶- مقایسه میانگین اثرهای ساده سطوح مختلف محلول‌پاشی روی بر سطح برگ گیاه گلرنگ (آزمایش مزرعه‌ای)

تیمار	شاخص سطح برگ
روی (میلی‌مولار)	
صفر	۱/۸۳ c
۱۰	۲/۲۲ b
۲۰	۲/۵۶ a

میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک در هر ستون و هر تیمار بر اساس آزمون LSD اختلاف معنی‌داری در سطح ۵ درصد ندارند.

۴-۴- عملکرد بیولوژیک گیاه

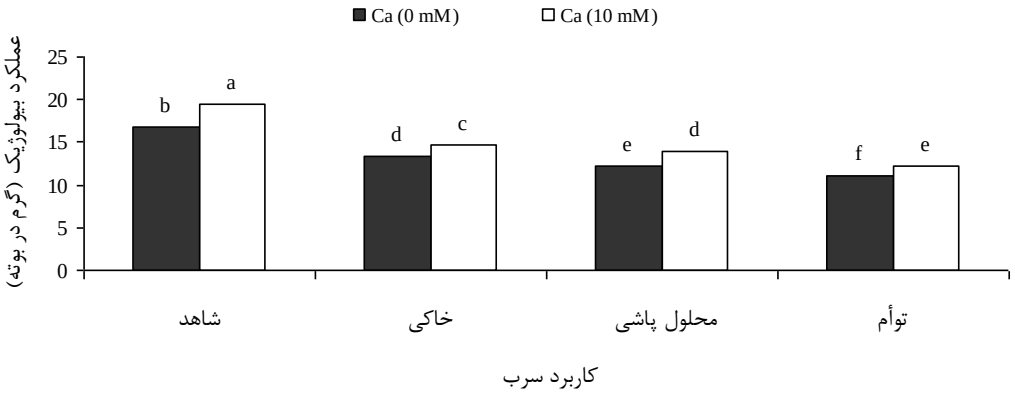
در آزمایش گلدانی، اثر همه منابع تغییر در سطح احتمال یک درصد بـر عملکـرد بیولوژیـک گیـاه گلرنگ معنی‌دار بود (جدول پیوست ۳). همان‌طور که نتایج مقایسه میانگین (شکل ۴-۳۰) نشان می-دهد استفاده از کلسیم در شرایط تنش سرب موجـب افـزایش معنـی‌دار در عملکـرد بیولوژیـک گیـاه گلرنگ گردید مقدار این افزایش در کاربرد خاکی سرب ۱۰ درصد، در محلول‌پاشی سرب ۱۳ درصد و در کاربرد توأم سرب ۱۱ درصد نسبت به سطح صفر کلسیم بود. جـذب برگـی روی در شـرایط تـنش سرب موجب کاهش اثرات نامطلوب این عنصر گردیـد و بـه‌طـور مشـخص در کـاربرد تـوأم سـرب بـا محلول‌پاشی روی در غلظت ۲۰ میلی‌مولار میزان عملکرد بیولوژیک گیاه ۱۷ درصد نسبت به شـرایط عدم مصرف روی افزایش نشان داد (شکل ۴-۳۱). نتایج شکل ۴-۳۲ نشان داد، اگرچه کـاربرد برگـی عناصر روی و کلسیم به تنهایی موجب افزایش عملکرد بیولوژیک گیاه می‌شود ولی کاربرد توأم این دو عنصر به مراتب مؤثرتر است. لذا بالاترین مقادیر عملکرد بیولوژیک گیاه زمانی به‌دست آمد که هـر دو عنصر یاد شده روی گیاهان محلول‌پاشی گردید. البته در شرایط مصرف کلسیم، بین دو غلظـت ۱۰ و ۲۰ میلی‌مولار روی اختلافات معنی‌داری وجود نداشت. در بررسی آثار سه جانبه تیمارها نیز مشـخص گردید که کمترین میزان عملکرد بیولوژیک در کاربرد تـوأم سـرب و در شـرایط عـدم کـاربرد کـود و بیشترین مقدار در محلول‌پاشی کلسیم همراه با روی به‌دست آمد. کاربرد روی با غلظت ۲۰ همـراه بـا کلسیم (۱۰ میلی‌مولار) فقط در شرایط عدم تـنش سـرب اثـر هـم افزایشـی نشـان دادنـد و در بقیـه تیمارهای سرب این تأثیر مشاهده نشد (شکل ۴-۳۳).

در بررسی روابط رگرسیونی بین عملکرد بیولوژیک گیاه و میزان روی در برگ رابطه خطی و مثبتی وجود داشت که ۹۷ درصد تغییرات را توجیه نمود و با افزایش میـزان روی در بـرگ، مقـدار عملکـرد بیولوژیک گیاه افزایش یافت (شکل ۴-۳۴). عنصر روی نقش مؤثری بر سنتز و تولیـد کلروفیـل دارد، بنابراین بهبود فتوسنتز و تولید مواد غذایی بیشتر را در گیاه موجب می‌شود.

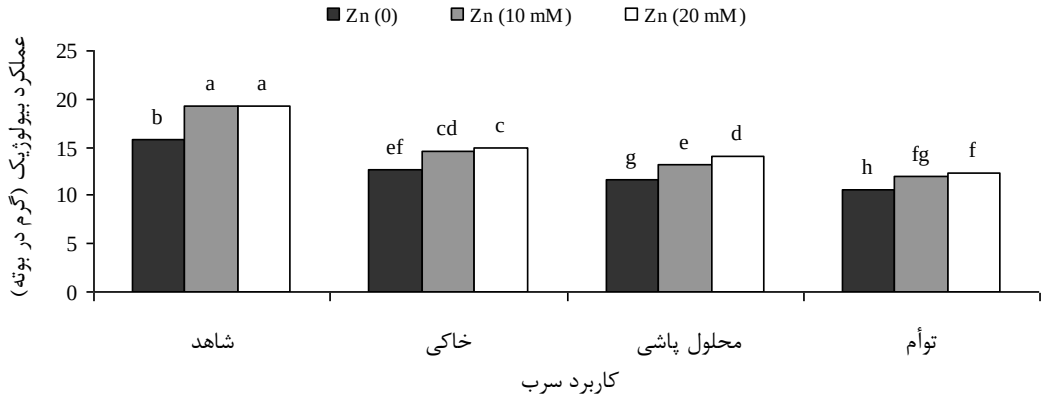
در آزمایش مزرعه‌ای تنها، تأثیر اثرات اصلی شامل کـود روی و کلسـیم و نیـز سـرب بـر عملکـرد بیولوژیک گیاه معنی‌دار بود (جدول پیوست ۴). جذب برگی سرب موجـب کـاهش معنـی‌دار عملکـرد بیولوژیک گردید، به‌طوری که تیمارهای ۰/۵ و ۱ میلی‌مولار سـرب بـه ترتیـب ۶ و ۸ درصـد عملکـرد بیولوژیک گیاه را کاهش دادند (جدول ۴-۷). بر اساس نتایج مقایسه میـانگین، بیشـترین میـزان وزن خشک برگ در تیمار محلول‌پاشی سولفات روی با غلظت ۲۰ میلی‌مولار معادل ۴۹۵ گرم در مترمربـع حاصل گردید. همچنین نتایج این تحقیق نشان داد که تغذیه گیاه با کلسیم (۱۰ میلی‌مـولار) میـزان عملکرد بیولوژیک گیاه را به‌طور معنی‌داری نسبت بـه گیاهـان شـاهد افـزایش داد (جـدول ۴-۷). بـر اساس روابط رگرسیونی (شکل ۴-۳۵) رابطه خطی و مثبتی بین عملکرد بیولوژیـک و شـاخص سـطح برگ وجود دارد که ۹۹ درصد تغییرات را توجیه نمود بـه‌طـوری کـه بـا افـزایش عملکـرد بیولوژیـک، شاخص سطح برگ افزایش یافت.

بررسی‌ها نشان می‌دهد که فلزسنگین بر رشد سلول‌ها و تقسیم سلولی منطقه مریستمی گیاهان اثر می‌گذارد و باعث کاهش زیست توده گیاه می‌شود (داس و همکاران، ۱۹۹۷). هان و همکـاران (۲۰۰۸) بیان کردند که کم شدن رشد بخش هوایی نمونه‌های گیاهی تحت تأثیر فلزات سنگین، ممکن است به علت کاهش فتوسنتز در نتیجهٔ تنش فلزات سنگین در گیاه باشد. سـینها و همکـاران (۲۰۰۶)، دلیـل کاهش زیست توده را اختلال در فتوسنتز و متابولیسم نیتروژن در اثر تنش سـرب نسـبت داد. اهـداف مصرف ریزمغذی ها شامل افزایش عملکرد محصول و ارتقاء خصوصیات کیفی و غنی‌سازی محصـولات کشاورزی، رشد گیاه و کاهش غلظت آلاینده هایی همانند فلز سنگین کادمیوم در سلول گیـاهی مـی-باشد (ملکوتی و طهرانی، ۱۳۷۹). روی می‌تواند اثر مطلوبی بر فعالیت‌های فتوسنتزی بـرگ‌هـا داشـته باشد و باعث انتقال بهتر مواد فتوسنتزی می شود. افزایش ماده خشک در اثر کاربرد عنصـر روی، مـی-تواند به علت افزایش غلظت کلروفیل، افزایش فعالیت فسـفوانول پیـروات کربوکسـیلاز و ریبولـوز بـی فسفات کربوکسیلاز، افزایش کارایی جذب نیتروژن و فسفر در حضور عنصر روی باشد (خلیلی محلـه و رشدی، ۱۳۸۷). گوگرد موجود در کود سولفات روی نیز می‌تواند بر افزایش رشد گیاه تأثیرگذار باشد.

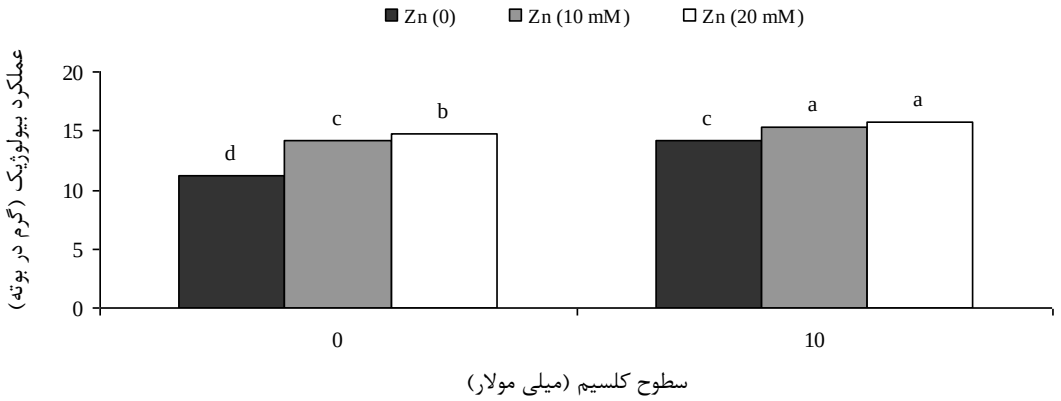
مصرف کود گوگرد باعث افزایش سطوح سبزگیاه، فتوسنتز و در نهایت باعث تولید ماده خشک در گیاه و افزایش عملکرد بیولوژیکی می‌گردد (پیری و همکاران، ۲۰۱۱). همچنین نتایج این تحقیق نشان داد که تغذیه گیاه با کلسیم سبب بهبود رشد گیاه در شرایط تنش سرب گردید که مطابق با نتـایج سـایر محققین است مبنی بر اینکه با تأثیرگذاری کلسیم بر کاهش جذب و انتقال فلز سنگین سرب و نیکل در سلول گیاهی منجر به کاهش اثرات سمیت فلز در فرآیندهای مختلف رشدی گیاه گردید (گارلند و ویلکینز، ۱۹۸۱؛ صدیقی و همکاران، ۲۰۱۱).



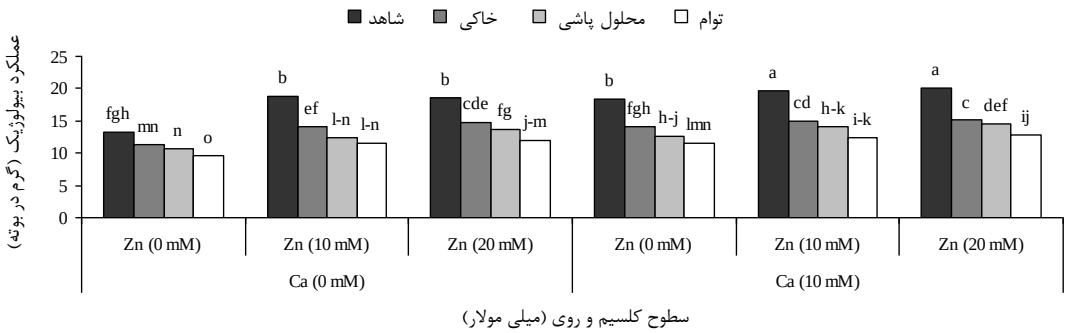
شکل ۴-۳۰- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی کلسیم در شرایط تنش سرب بر عملکرد بیولوژیک گیاه گلرنگ. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD است. (آزمایش گلدانی)



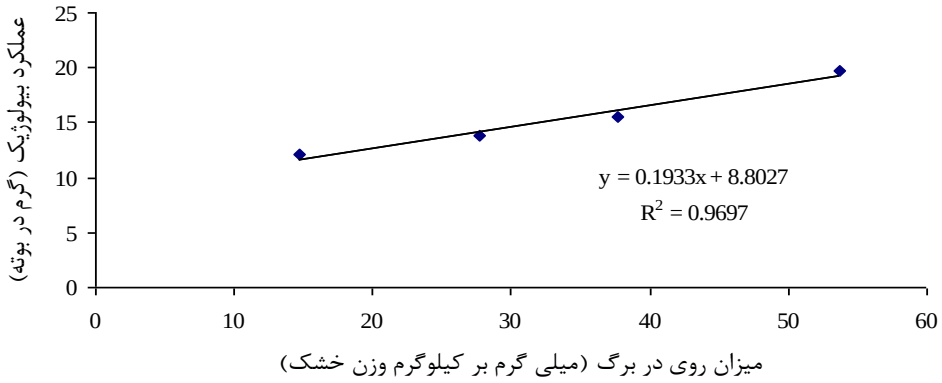
شکل ۴-۳۱- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی در شرایط تنش سرب بر عملکرد بیولوژیک گیاه گلرنگ. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD است. (آزمایش گلدانی)



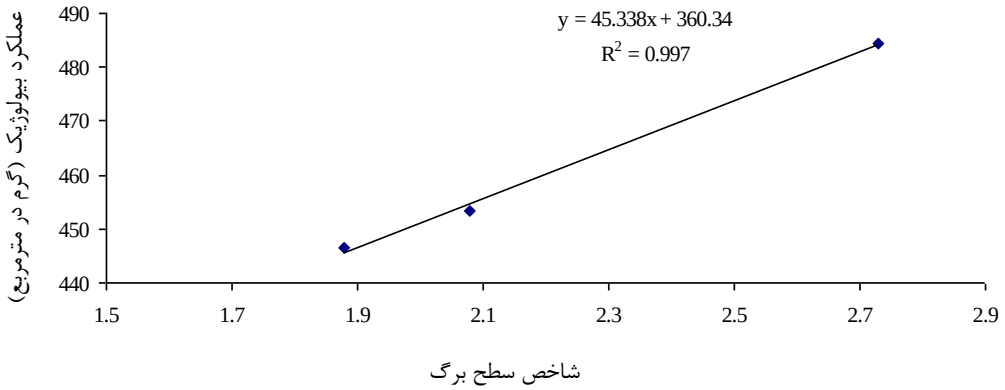
شکل ۴-۳۲- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی کلسیم و روی بر عملکرد بیولوژیک گیاه گلرنگ. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD است. (آزمایش گلدانی)



شکل ۴-۳۳- مقایسه اثر برهمکنش سه‌جانبه روی، کلسیم و سرب بر عملکرد بیولوژیک گیاه گلرنگ. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD است. (آزمایش گلدانی)



شکل ۴-۳۴- رابطه بین میزان روی در برگ و عملکرد بیولوژیک در گیاه گلرنگ (آزمایش گلدانی)



شکل ۴-۳۵- رابطه بین شاخص سطح برگ و عملکرد بیولوژیک در گیاه گلرنگ (آزمایش مزرعه‌ای)

جدول ۴-۷- مقایسه میانگین اثرهای ساده سطوح مختلف تنش سرب و محلول‌پاشی روی و کلسیم بر عملکرد بیولوژیک گیاه گلرنگ (آزمایش مزرعه‌ای)

تیمار	عملکرد بیولوژیک گرم در مترمربع
سرب (میلی‌مولار)	
صفر	۴۸۴/۳۸ a
۰/۵	۴۵۳/۴۲ b
۱	۴۴۶/۵۱ b
روی (میلی‌مولار)	
صفر	۴۳۷/۴۰ b
۱۰	۴۵۱/۹۱ b
۲۰	۴۹۵/۰۰ a
کلسیم (میلی‌مولار)	
صفر	۴۵۰/۳۰ b
۱۰	۴۷۲/۵۸ a

میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک در هر ستون و هر تیمار بر اساس آزمون LSD اختلاف معنی‌داری در سطح ۵ درصد ندارند.

۴-۵- وزن طبق در بوته

در آزمایش گلدانی، تنها اثرات اصلی شامل کلسیم، روی و سرب بر وزن طبق در بوته گیاه گلرنگ اثر معنی‌داری داشت (جدول پیوست ۳). در بین تیمارهای تنش سرب بیشترین میزان کاهش وزن طبق در بوته در جذب برگی همراه با جذب خاکی سرب مشاهده شد و ۱۷ درصد نسبت به گیاهان شاهد کاهش یافت. کاربرد خاکی سرب تأثیر معنی‌داری بر وزن طبق در بوته نداشت و این صفت

تقریباً به یک اندازه از محلول‌پاشی و کاربرد توأم سرب آسیب دید (جدول ۴-۸). جذب برگی روی موجب افزایش معنی‌دار وزن طبق در بوته گردید، به‌طوری که در تیمار محلول‌پاشی سولفات روی با غلظت ۲۰ میلی‌مولار ۱۴ درصد افزایش نشان داد (جدول ۴-۸). همچنین نتایج این تحقیق نشان داد که تغذیه گیاه با کلسیم (۱۰ میلی‌مولار) وزن طبق در بوته را به‌طور معنی‌داری نسبت به گیاهان شاهد افزایش داد (جدول ۴-۸).

در آزمایش مزرعه‌ای، تنها اثرات اصلی شامل روی و سرب بر وزن طبق در بوته گیاه گلرنگ اثر معنی‌داری داشت (جدول پیوست ۴). نتایج این تحقیق نشان داد که کمترین وزن طبق در بوته در غلظت ۱ میلی‌مولار مشاهده شد (جدول ۴-۹). نتایج مقایسه میانگین نشان داد که محلول‌پاشی کود سولفات روی سبب افزایش معنی‌دار این صفت گردید. به‌طور مشخص وزن طبق در بوته در اثر محلول‌پاشی روی با هر دو غلظت تقریباً به‌طور یکسان حدود ۶ درصد افزایش یافت. (جدول ۴-۹).

شرما و دوبی (۲۰۰۵) گزارش دادند که جلوگیری از رشد گیاه ممکن است به دلیل کاهش فتوسنتز، اختلال در تعادل آب و مواد معدنی، تغییر وضعیت هورمونی و اثر بر نفوذپذیری و ساختار غشا باشد. سرب از طرق مختلفی موجب کاهش فتوسنتز می‌شود. کاهش فتوسنتز در نتیجهٔ اختلال در ساختار کلروپلاست، ممانعت از ساخت کلروفیل، پلاستوکوئینون و کارتنوئیدها، جلوگیری از انتقال الکترون، جلوگیری از فعالیت آنزیمهای چرخهٔ کلوین و کمبود دی اکسیدکربن به دلیل بسته شدن روزنه‌ها ایجاد می‌شود که همهٔ این موارد به کاهش رشد و توسعهٔ گیاه می‌انجامد (آکینچی و همکاران، ۲۰۱۰). مرشدی (۱۳۷۹) با بررسی تغذیه برگی آهن و روی بر عملکرد، خواص کیفی و غنی‌سازی دانه‌های روغنی کلزا اعلام نمودند با افزایش غلظت روی، تعداد دانه در غلاف، تعداد غلاف در بوته، درصد روغن، عملکرد دانه و عملکرد روغن در واحد سطح افزایش یافت. آنان بیان داشتند محلول‌پاشی آهن و روی موجب بهبود کیفیت و غنی‌سازی دانه‌ها شد.

جدول ۴-۸- مقایسه میانگین اثرهای ساده سطوح مختلف تنش سرب و محلول‌پاشی روی و کلسیم بر وزن طبق در بوته (آزمایش گلدانی)

تیمار	وزن طبق (گرم در بوته)
سرب (میلی‌مولار)	
صفر	۶/۷۶ a
کاربرد خاکی	۶/۵۳ a
محلول‌پاشی سرب	۵/۸۰ b
کاربرد خاکی و محلول‌پاشی	۵/۵۷ b
روی (میلی‌مولار)	
صفر	۵/۷۹ c
۱۰	۶/۱۰ b
۲۰	۶/۶۳ a
کلسیم (میلی‌مولار)	
صفر	۵/۸۹ b
۱۰	۶/۴۴ a

میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک در هر ستون و هر تیمار بر اساس آزمون LSD اختلاف معنی‌داری در سطح ۵ درصد ندارند.

جدول ۴-۹- مقایسه میانگین اثرهای ساده سطوح مختلف تنش سرب و محلول‌پاشی روی بر وزن طبق در بوته (آزمایش مزرعه‌ای)

تیمار	وزن طبق در بوته (گرم در بوته)
سرب (میلی‌مولار)	
صفر	۷/۸۷ a
۰/۵	۷/۸۳ a
۱	۶/۷۳ b
روی (میلی‌مولار)	
صفر	۷/۱۶ b
۱۰	۷/۵۷ a
۲۰	۷/۶۹ a

میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک در هر ستون و هر تیمار بر اساس آزمون LSD اختلاف معنی‌داری در سطح ۵ درصد ندارند.

۴-۶- عملکرد و اجزای عملکرد

در آزمایش گلدانی، نتایج حاصل از تجزیه واریانس نشان داد که تنش سرب اثر معنی‌داری ($P<۰/۰۱$) بر عملکرد دانه، وزن هزار دانه، تعداد دانه در طبق، تعداد طبق در بوته و شاخص برداشت گیاه گلرنگ داشت (جدول پیوست ۵). در بین سطوح تنش سرب بیشترین میزان کاهش وزن هزار دانه در کاربرد توأم سرب مشاهده شد و میزان آن ۲۲ درصد نسبت به گیاهان شاهد کاهش یافت،

البته کاربرد خاکی و محلول‌پاشی سرب به تنهایی نتوانست وزن هزاردانه را تحت تأثیر قرار دهد و این صفت با توأم شدن مصرف خاکی و برگی سرب و مضاعف شدن تنش سرب کاهش یافت.

تأثیر محلول‌پاشی روی همراه با کلسیم بر تعداد دانه در طبق ($P<۰/۰۱$) و عملکرد دانه ($P<۰/۰۵$) معنی‌دار بود (جدول پیوست ۵). شکل ۴-۳۶ نشان می‌دهد که نه تنها عنصر روی به تنهایی صفت تعداد دانه در طبق را به‌طور معنی‌داری بهبود می‌بخشد، بلکه در اثر توأم شدن ۱۰ میلی‌مولار کلسیم و ۲۰ میلی‌مولار روی بیشترین تعداد دانه در طبق به‌دست آمد که نسبت به تیمار شاهد ۶۹ درصد افزایش نشان داد. همان‌طور که نتایج مقایسه میانگین نشان می‌دهد، در شرایط مصرف و عدم مصرف کلسیم، کاربرد روی در غلظت ۱۰ و ۲۰ میلی‌مولار تأثیر معنی‌داری بر افزایش عملکرد دانه داشت و کاربرد کلسیم به‌تنهایی (در شرایط عدم مصرف روی) نیز توانست عملکرد دانه را نسبت به شاهد افزایش دهد (شکل ۴-۳۷).

صفات عملکرد دانه، تعداد دانه در طبق، تعداد طبق در بوته و شاخص برداشت از برهمکنش تیمارهای سرب و روی تأثیر پذیرفتند (جدول پیوست ۵). بر اساس نتایج مقایسه میانگین (شکل ۴-۳۸)، جذب برگی روی در غلظت ۲۰ میلی‌مولار موجب کاهش اثرات نامطلوب سرب بر صفت تعداد طبق در بوته گردید. در بین ۱۲ ترکیب تیماری مورد مقایسه بیشترین طبق به تعداد ۹ در سطح ۲۰ میلی‌مولار روی (در شرایط عدم تنش) و کمترین تعداد آن با میانگین ۳/۵ عدد در تیمار توأم سرب و بدون کاربرد کود شمارش گردید. در مجموع تغذیه گیاه با روی تأثیر معنی‌داری بر میزان تغییرات عملکرد دانه گیاه گلرنگ داشت. عملکرد دانه در گیاهان شاهد ۷/۷ گرم در بوته بود که با محلول‌پاشی روی و دو برابر شدن غلظت آن در همین شرایط به ۱۰/۴ گرم در بوته رسید که بالاترین مقادیر ثبت شده بود. در تیمار محلول‌پاشی سرب و کاربرد توأم سرب غلظت ۱۰ میلی‌مولار روی با تیمار عدم مصرف روی تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد. عملکرد دانه در شدیدترین سطح آلودگی سرب (کاربرد توأم سرب)، با حداکثر کاهش مواجه بود و معادل ۴/۱ گرم در بوته ثبت شد که در اثر محلول‌پاشی روی با غلظت ۲۰ میلی‌مولار مقدار آن ۵۰ درصد افزایش یافت (شکل ۴-۳۹). همانطور که نتایج شکل

۴-۴۰ نشان می‌دهد محلول‌پاشی روی در شرایط تنش تنها در تیمار کاربرد توأم سرب بر میزان تغییرات درصد شاخص برداشت معنی‌دار بود و میزان آن را افزایش داد به‌طوری که با گیاهان شاهد در یک گروه آماری قرار گرفت. تأثیر جذب برگی روی بر تعداد دانه در طبق در تنش سرب در شکل ۴-۴۱ نشان داده شده است؛ در شرایط آلودگی گیاهان با سرب کاربرد کود روی در غلظت ۲۰ میلی-مولار بیشترین تأثیر را بر بهبود تنش ایجاد شده در گیاه و افزایش تعداد دانه در طبق داشت. به-طوری‌که مقدار این صفت برای این ترکیبات تیماری در حد گیاهان شاهد بود و در یک گروه آماری قرار گرفتند. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد، بیشترین کاهش تعداد دانه در طبق مربوط به دو روش محلول‌پاشی سرب و کاربرد توأم سرب بود و اختلاف این دو روش از لحاظ آماری معنی‌داری نبود. همچنین نتایج به‌دست آمده حکایت از تأثیر مثبت عنصر روی بر گیاهان غیرآلوده به سرب داشت، اما بین دو غلظت کاربردی تفاوت معنی‌داری مشاهد نشد. نتایج برهمکنش سه‌جانبه در شکل ۴-۴۲ نیز نشان می‌دهد که محلول‌پاشی روی همراه با کاربرد کلسیم تأثیر زیادی در حفاظت از گیاه در شرایط تنش سرب داشت. کمترین تعداد دانه در طبق در شرایط عدم کاربرد کود و در تنش سرب مشاهده گردید که در اثر کاربرد کلسیم همراه با محلول‌پاشی روی بهبود یافت. جذب برگی روی موجب افزایش معنی‌دار وزن هزار دانه گردید، به‌طوری که با محلول‌پاشی سولفات روی در غلظت ۲۰ میلی-مولار ۱۰ درصد افزایش نشان داد (جدول ۴-۱۰). بر اساس نتایج مقایسه میانگین (جدول ۴-۱۰)، بیشترین تعداد طبق در بوته در تیمار محلول‌پاشی کلسیم معادل ۶ عدد حاصل گردید.

در آزمایش مزرعه‌ای، اثر تنش سرب بر عملکرد دانه و همه اجزای عملکرد گیاه گلرنگ معنی‌دار بود. همچنین اثر کاربرد کلسیم بر عملکرد دانه، تعداد طبق در بوته و تعداد دانه در طبق و اثر روی بر عملکرد دانه، وزن هزار دانه و تعداد طبق در بوته معنی‌دار بود. در بین اثرات متقابل، برهمکنش سرب و روی بر عملکرد دانه، تعداد طبق در بوته و شاخص برداشت و نیز اثر متقابل سرب و کلسیم بر تعداد طبق در بوته تأثیر معنی‌داری نشان داد (جدول پیوست ۶). نتایج این تحقیق نشان داد که کمترین میزان وزن هزار دانه و تعداد دانه در طبق در غلظت یک میلی‌مولار سرب مشاهده شد (جدول ۴-۱۱).

نتایج مقایسه میانگین نشان داد که محلول‌پاشی کود سولفات روی سبب افزایش معنی‌دار در عملکرد و برخی از اجزای عملکرد گردید. به‌طور مشخص وزن هزار دانه، در اثر محلول‌پاشی روی با هر دو غلظت تقریباً به‌طور یکسان حدود ۷ درصد افزایش یافتند اما بین دو سطح کودی روی ۱۰ و ۲۰ میلی‌مولار تفاوت معنی‌داری از این لحاظ وجود نداشت (جدول ۴-۱۱). تغذیه برگی گیاهان با کود کلسیم نیز تأثیر مثبتی بر تعداد دانه در طبق و عملکرد دانه داشت، به‌طوری که بیشترین میزان صفات ذکر شده مربوط به محلول‌پاشی با ۱۰ میلی‌مولار کلسیم بود؛ به عنوان مثال، عملکرد دانه در اثر جذب برگی کلسیم ۴ درصد بهبود یافت (جدول ۴-۱۱).

نتایج شکل ۴-۴۳ تأثیر ترکیبات تیماری حاصل از سرب و کود روی را بر میزان عملکرد دانه نشان می‌دهد. عملکرد دانه در گیاهان شاهد ۲۲۲۹ کیلوگرم در هکتار بود که در اثر محلول‌پاشی روی در سطح صفر سرب تغییر معنی‌داری پیدا نکرد. اگرچه آلوده شدن برگ‌ها با تیمار سرب در غلظت ۰/۵ میلی‌مولار اندکی عملکرد را کاهش داد، ولی این افت عملکرد به لحاظ آماری نسبت به شاهد معنی‌دار نبود ولی دو برابر شدن غلظت سرب (۱ میلی‌مولار) موجب افت شدید عملکرد دانه گردید و عملکرد دانه را به ۱۲۰۲ کیلوگرم در هکتار در سطح صفر روی رساند. محلول‌پاشی سولفات روی با غلظت ۲۰ میلی‌مولار در این شرایط میزان عملکرد دانه را ۳۹ درصد نسبت به سطح صفر روی افزایش داد. همانطور که نتایج مقایسه میانگین (شکل ۴-۴۴) نشان می‌دهد جذب برگی روی در شرایط عدم تنش سرب تأثیر معنی‌داری بر شاخص برداشت نداشت و در شدیدترین سطح تنش سرب (۱ میلی‌مولار)، در اثر محلول‌پاشی روی با هر دو غلظت تقریباً به‌طور یکسان حدود ۱۸ درصد نسبت به سطح صفر روی افزایش نشان داد. همچنین در شرایط آلودگی گیاهان به سرب، تغذیه گیاه با روی تأثیر معنی‌داری بر تعداد طبق در بوته گیاه داشت و در محلول‌پاشی سولفات روی (با هر دو غلظت ۱۰ و ۲۰ میلی‌مولار) این صفت را در تنش ۰/۵ میلی‌مولار سرب حدود ۱۹ درصد و در غلظت ۱ میلی‌مولار سرب حدود ۴۲ درصد افزایش دادند، البته در بین ۹ ترکیب تیماری مورد مقایسه بیشترین تعداد طبق در بوته مربوط به گیاهانی بود که سرب دریافت نکرده بودند و با بالاترین غلظت روی محلول-

پاشی شدند (شکل ۴-۴۵). جذب برگی کلسیم تا اندازه‌ای موجب افـزایش تعـداد طبـق در بوتـه ایـن صفت در شرایط تنش سرب گردید ولی این افزایش به لحاظ آماری معنی‌دار نبود، درحالی که در عدم حضور سرب، کلسیم به طور متوسط تعداد طبق در بوته را ۱ عدد در بوته بهبـود بخشـید (شـکل ۴-۴۶).

نتایج این تحقیق با یافته‌های جان و همکاران (۲۰۰۹) مطابقت دارد، مبنی بر این که غلظـت‌هـای بالای سرب سبب کاهش عملکرد و اجزای عملکرد در گیاه می‌شود. در شرایط تنش همـراه بـا کوتـاه شدن دوره رشد و دوره پر شدن دانه، وزن نهایی دانه‌ها نیز کاهش می‌یابـد. از علایـم سـمیت ناشـی از سرب توقف سریع رشد گیاه می‌باشد (اسلام و همکاران، ۲۰۱۱). کاهش عملکرد در شرایط تنش سرب احتمالاً به دلیل تغییر در انتقال فرآورده‌های فتوسنتزی و کاهش رشد بخش هوایی گیاه است و به نظر می‌رسد بهبود شرایط تغذیه‌ای و نقش مثبت روی در فتوسنتز می‌تواند در افزایش رشد و عملکرد گیـاه نقش داشته باشد که در این تحقیق کاربرد کود سولفات روی به‌صورت محلول‌پاشـی تـأثیر مثبتـی در حفظ عملکرد دانه و اجزای عملکرد در شرایط تنش داشت. بر اساس نتایج این تحقیق استفاده از روی میزان کلروفیل a و b را نسبت به عدم مصرف روی افزایش داد (جدول ۴-۲۴) نتایج به‌دست آمـده از آزمایشات پاترزیکی و گرزبیش (۲۰۰۹) نیز نشان داد که کـاربرد کـود روی از طریـق افـزایش جـذب نیتروژن، اثر مثبتی بر اجزای عملکرد و در نهایت عملکـرد دانـه گیـاه ذرت داشـت. بـر اسـاس نتـایج مقایسه میانگین، در کاربرد توأم کلسیم و روی بیشترین میزان عملکـرد دانـه و تعـداد دانـه در طبـق مشاهده شد. احمدی و همکاران (۱۳۹۱) نیز گزارش کردند که محلـول‌پاشـی عناصـر کلسـیم و روی بیشترین تأثیر را بر افزایش عملکرد دانه از طریق تأثیرگذاری بر اجزای عملکـرد گیـاه کنجـد داشـت. کلسیـــم درخاک‌های مناطق خشک نسبت به سایر عناصر غذایی به مقدار بیشتری در محلول خـاک وجود دارد، ولی این عنصر تقریباً غیرمتحرک بوده و انتقال آن در داخل گیاه بسیار کـم اسـت کـه در این تحقیق، در شرایط عدم تنش، محلول‌پاشی کلسیم عملکرد دانه گلرنگ را نسبت به گیاهان شـاهد افزایش داد. گوگرد موجود در کود سولفات روی نیز ممکن است بر افـزایش عملکـرد گیـاه تأثیرگـذار

باشد. گوگرد با تأثیری که بر فتوسنتز گیاه دارد میزان تولید کربوهیدرات‌ها و مواد پروتئینی را در سلول گیاهی افزایش می‌دهد و از آنجایی که در نهایت ذخیره این مواد در دانه صورت می‌گیرد می‌توان اظهار داشت که مصرف کود گوگرد باعث افزایش عملکرد دانه می‌شود (سنگل و همکاران، ۱۹۹۸).

جدول ۴-۱۰- مقایسه میانگین اثرهای ساده سطوح مختلف تنش سرب و محلول‌پاشی روی و کلسیم بر وزن هزار دانه و تعداد طبق در بوته (آزمایش گلدانی)

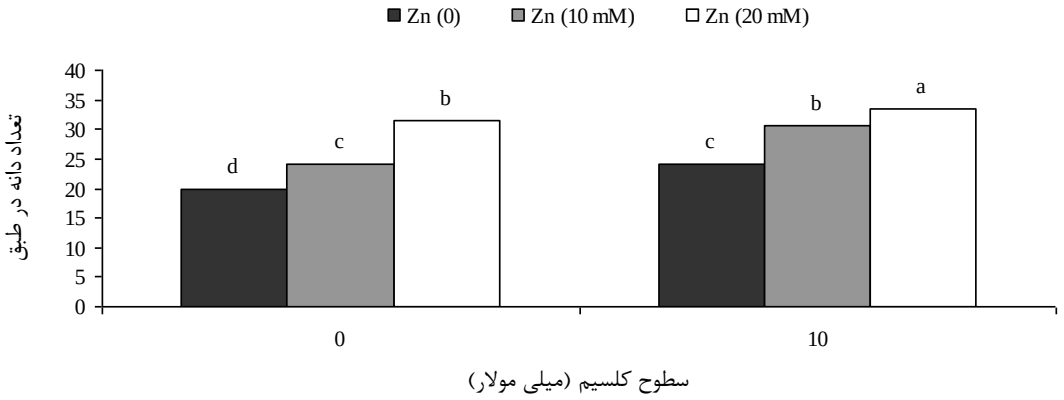
تیمار	وزن هزاردانه (گرم)	تعداد طبق در بوته
سرب (میلی‌مولار)		
صفر	۳۷/۴۳ a	۸/۳ a
کاربرد خاکی	۳۶/۷۸ a	۵/۶۱ b
محلول‌پاشی سرب	۳۶/۱۳ a	۵/۵ b
کاربرد خاکی و محلول‌پاشی	۲۹/۱۱ b	۴/۱ c
روی (میلی‌مولار)		
صفر	۳۳/۶۹ b	۵/۱۶ b
۱۰	۳۳/۷۰b	۶/۰۰ ab
۲۰	۳۷/۲۰a	۶/۵۰ a
کلسیم (میلی‌مولار)		
صفر	۳۴/۱۸ a	۶/۰۵ a
۱۰	۳۵/۵۴ a	۵/۷۰ b

میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک در هر ستون و هر تیمار بر اساس آزمون LSD اختلاف معنی‌داری در سطح ۵ درصد ندارند.

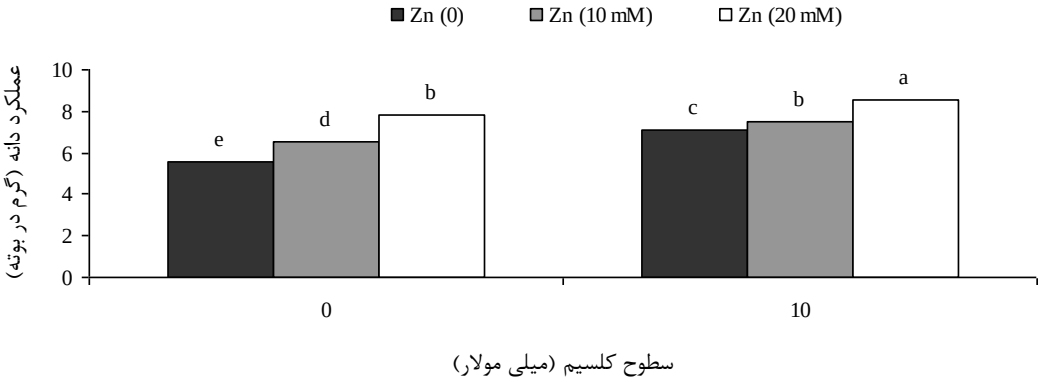
جدول ۴-۱۱- مقایسه میانگین اثرهای ساده سطوح مختلف تنش سرب و محلول‌پاشی روی و کلسیم بر عملکرد دانه، وزن هزار دانه، تعداد دانه در طبق (آزمایش مزرعه‌ای)

تیمار	عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار)	وزن هزاردانه (گرم)	تعداد دانه در طبق
سرب (میلی‌مولار)			
صفر	۲۳۲۸/۵۱ a	۵۳/۳۶ a	۴۶/۴۴ a
۰/۵	۲۱۱۲/۷۳ b	۵۱/۶۴ a	۴۳/۵۴ b
۱	۱۴۵۰/۶۰ c	۴۵/۸۳ b	۴۰/۱۱ c
روی (میلی‌مولار)			
صفر	۱۸۶۱/۶۰ c	۴۸/۵۵ b	۴۲/۶۱ a
۱۰	۱۹۶۳/۴۴ b	۵۰/۰۶ ab	۴۲/۸۳ a
۲۰	۲۰۶۶/۷۳ a	۵۱/۷۰ a	۴۴/۶۱ a
کلسیم (میلی‌مولار)			
صفر	۱۹۲۱/۵۰ b	۵۰/۱۵ a	۴۲/۳۰b
۱۰	۲۰۰۶/۳۰ a	۵۰/۴۲ a	۴۴/۴۱ a

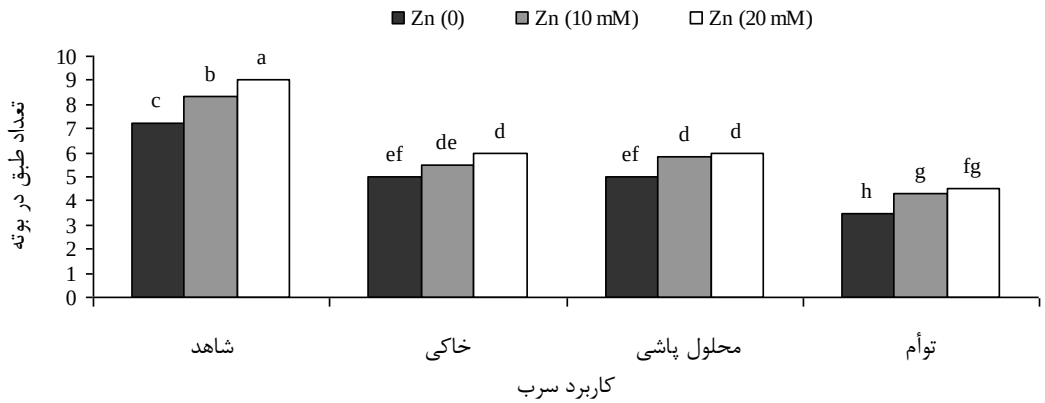
میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک در هر ستون و هر تیمار بر اساس آزمون LSD اختلاف معنی‌داری در سطح ۵ درصد ندارند.



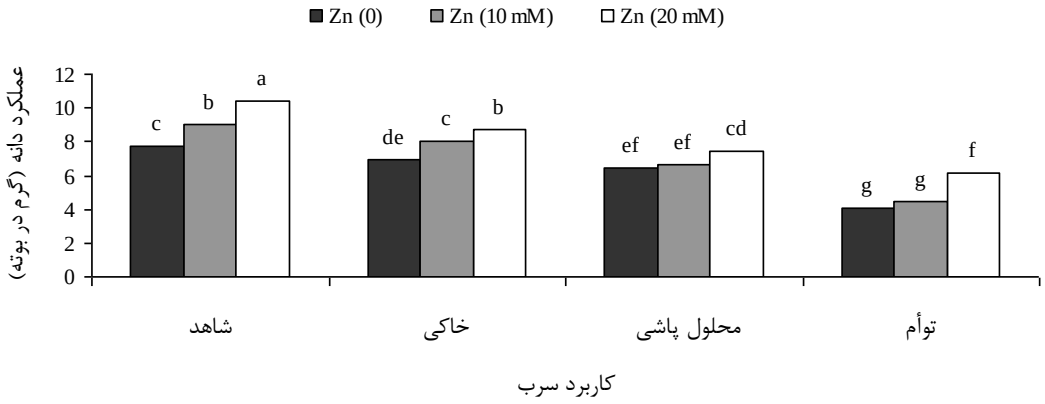
شکل ۴-۳۶- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی کلسیم و روی بر تعداد دانه در طبق. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD است. (آزمایش گلدانی)



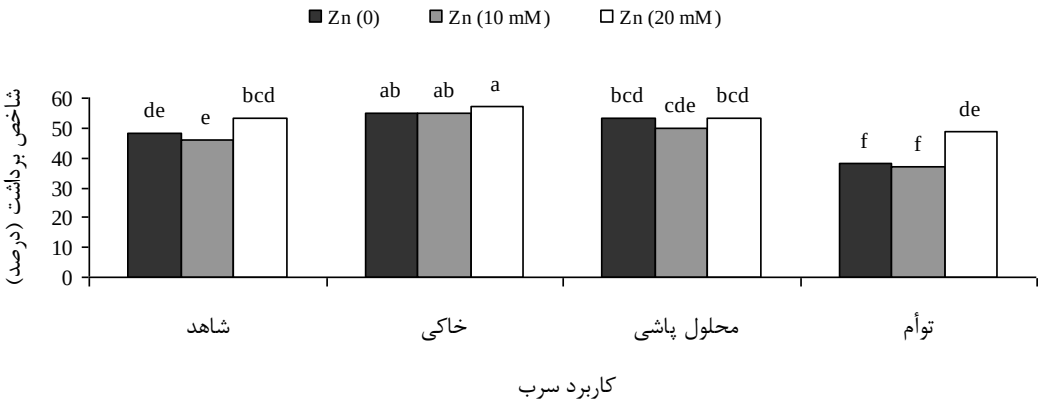
شکل ۴-۳۷- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی کلسیم و روی بر عملکرد دانه گیاه گلرنگ. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD است. (آزمایش گلدانی)



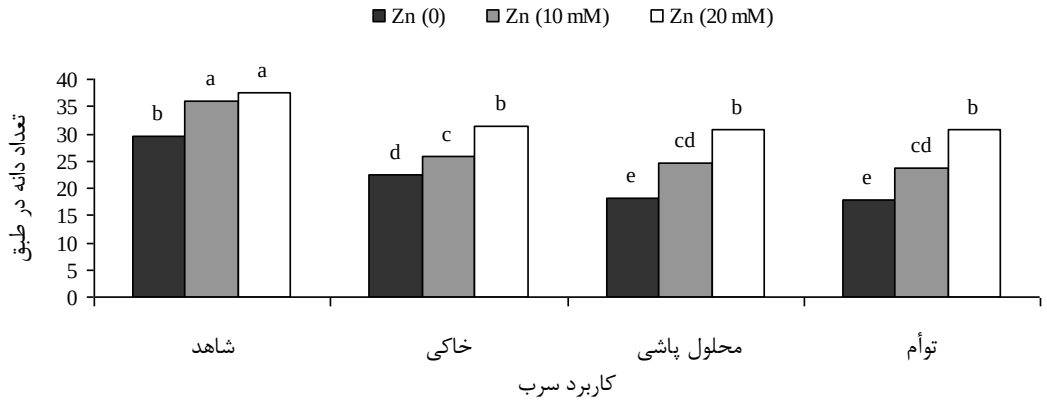
شکل ۴-۳۸- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی در شرایط تنش سرب بر تعداد طبق در بوته گلرنگ. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD است. (آزمایش گلدانی)



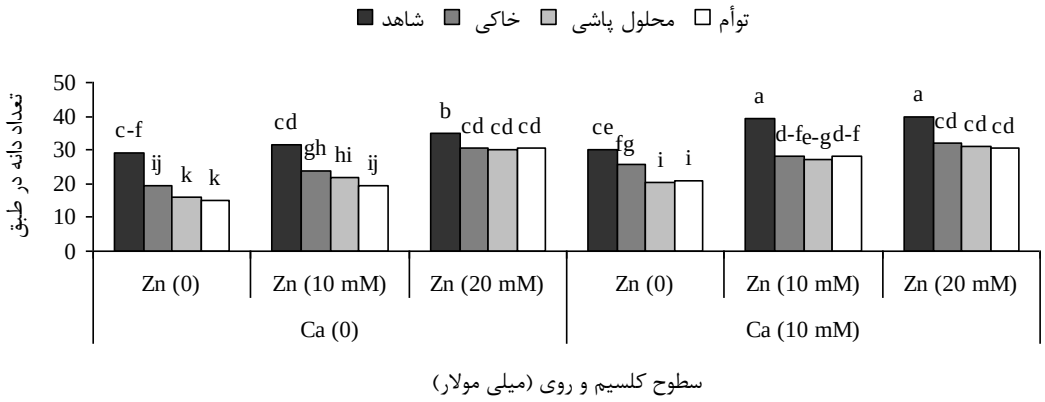
شکل ۴-۳۹- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی در شرایط تنش سرب بر عملکرد دانه گیاه گلرنگ. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD است. (آزمایش گلدانی)



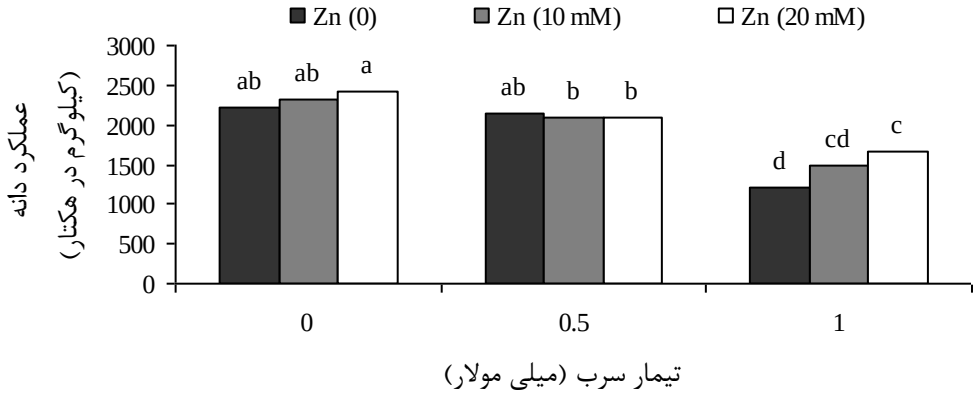
شکل ۴-۴۰- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی در شرایط تنش سرب بر شاخص برداشت گیاه گلرنگ. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD است. (آزمایش گلدانی)



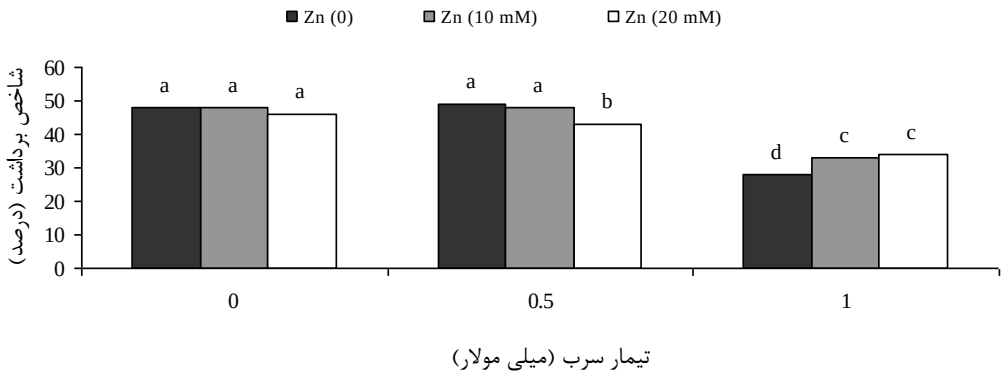
شکل ۴-۴۱- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی در شرایط تنش سرب بر تعداد دانه در طبق گلرنگ. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD است. (آزمایش گلدانی)



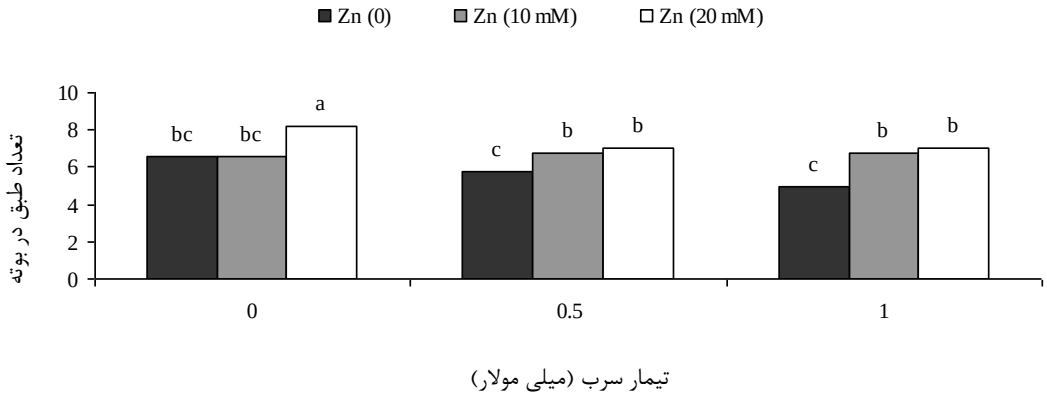
شکل ۴-۴۲- مقایسه اثر برهمکنش سه‌جانبه روی، کلسیم و سرب بر تعداد دانه در طبق گیاه گلرنگ. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD است. (آزمایش گلدانی)



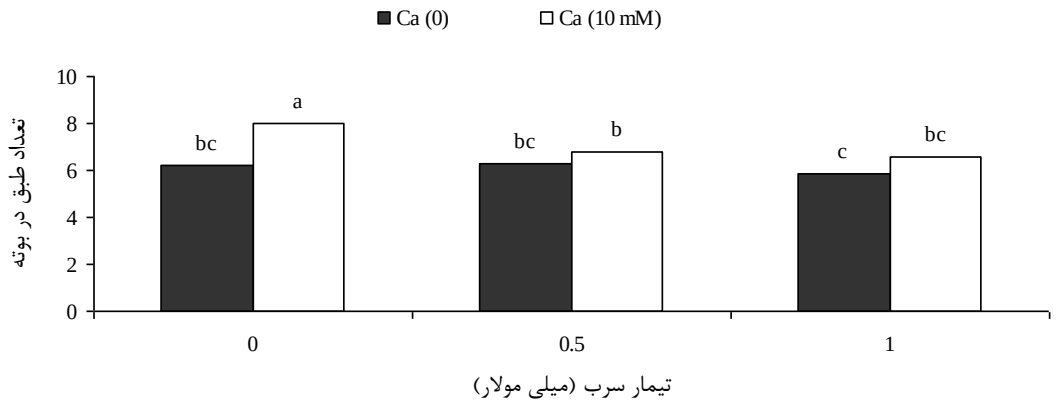
شکل ۴-۴۳- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی در شرایط تنش سرب بر میزان عملکرد دانه گیاه گلرنگ. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD است. (آزمایش مزرعه‌ای)



شکل ۴-۴۴- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی در شرایط تنش سرب بر شاخص برداشت گیاه گلرنگ. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD است. (آزمایش مزرعه‌ای)



شکل ۴-۴۵- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی در شرایط تنش سرب بر تعداد طبق در بوته گلرنگ. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD است. (آزمایش مزرعه‌ای)



شکل ۴-۴۶- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی کلسیم در شرایط تنش سرب بر تعداد طبق در بوته گلرنگ. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD است. (آزمایش مزرعه‌ای)

۴-۷- صفات کیفی دانه

۴-۷-۱- درصد و عملکرد روغن دانه

در آزمایش گلدانی، نتایج جدول تجزیه واریانس(جدول پیوست ۷) نشان داد که تأثیر تیمارهای اصلی روی، کلسیم و سرب از لحاظ آماری بر درصد و عملکرد روغن معنی‌دار بود و همچنین اثرات متقابل کلسیم و روی، سرب و روی بر درصد و عملکرد روغن و همچنین اثر متقابل کلسیم و سرب بر عملکرد روغن معنی‌دار بود. همانطورکه نتایج مقایسه میانگین شکل ۴-۴۷ نشان می‌دهد کمترین درصد روغن دانه هنگامی مشاهده شد که آلودگی سرب به صورت توأم از طریق خاک و برگ ایجاد گردید و هیچ کودی گیاه دریافت نکرد. با محلول‌پاشی روی در غلظت ۲۰ میلی‌مولار میزان درصد روغن در سطح صفر سرب ۴۱/۸، در جذب خاکی سرب ۳۲/۲ درصد، در جذب برگی سرب ۲۴/۸ و در کاربرد توأم سرب ۱۸/۹۶ درصد بود. تأثیر مثبت روی به‌حدی بود که در دو شرایط کاربرد خاکی و برگی سرب نه تنها اثرات منفی سرب جبران شد بلکه در شرایط کاربرد خاکی درصد روغن به لحاظ آماری برتر از گیاهان شاهد بود. همچنین روغن دانه در اثر محلول‌پاشی روی در شرایط عادی (عدم حضور سرب) افزایش یافت. کاربرد توأم کود کلسیم و روی نیز اثر معنی‌داری بر درصد روغن داشت و

در شرایط مصرف کلسیم (۱۰ میلی‌مولار)، بیشترین مقدار (معادل ۳۰/۸ درصد) در تیمار محلول‌پاشی روی با غلظت ۲۰ میلی‌مولار به‌دست آمد و کمترین درصد روغن (معادل ۱۶/۲۵ درصد) از دانه گیاهانی به‌دست آمد که هیچکدام از عناصر روی و کلسیم را دریافت نکرده بودند (شکل ۴-۴۸).

بر اساس نتایج جدول تجزیه واریانس (جدول پیوست ۷) اثر متقابل سرب و روی بر عملکرد روغن در سطح یک درصد معنی‌دار بود. شکل ۴-۴۹ نشان می‌دهد که عملکرد روغن نیز تحت تأثیر تنش سرب کاهش یافت و کمترین مقدار این صفت در کاربرد توأم سرب و در شرایط عدم مصرف کود به‌دست آمد. عنصر روی در هر دو غلظت ۱۰ و ۲۰ میلی‌مولار در همه سطوح سرب نقش مؤثر و مثبتی داشت. به‌طوری که بیشترین میزان عملکرد روغن، در تیمار محلول‌پاشی روی (۲۰ میلی‌مولار) در شرایط عدم حضور سرب به‌دست آمد. کاربرد توأم کلسیم با هر دو غلظت روی نیز سبب افزایش معنی‌دار عملکرد روغن نسبت به تیمار شاهد گردید و بیشترین مقدار در استفاده از روی با غلظت ۲۰ میلی‌مولار همراه با کلسیم در غلظت ۱۰ میلی‌مولار به‌دست آمد (۴-۵۰). همان‌طور که نتایج شکل ۴-۵۱ نشان می‌دهد، کود کلسیم نیز سبب کاهش اثرات نامطلوب سرب بر میزان عملکرد روغن تولیدی در گیاه گلرنگ گردید، به‌طوری که این صفت در گیاهانی که محلول کلسیم را با غلظت ۱۰ میلی‌مولار دریافت کرده بودند، در جذب خاکی سرب ۲۸ درصد و در جذب برگی سرب ۲۵ درصد و در کاربرد توأم سرب ۴۵ درصد نسبت به عدم محلول‌پاشی کلسیم افزایش یافت. همه این افزایش‌ها به لحاظ آماری نیز معنی‌دار بود. شایان ذکر است که محلول‌پاشی کلسیم در گیاهان شاهد (بدون سرب) عملکرد روغن را از ۲/۸ به ۳/۶ گرم در بوته رساند که بالاترین مقدار ثبت شده بود.

تأثیر میزان تجمع سرب در برگ بر عملکرد روغن از طریق آنالیز رگرسیونی مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۴-۵۲). نتایج نشان داد که رابطه منفی و خطی بین میزان تجمع سرب در برگ و عملکرد روغن وجود دارد و مؤید این مطلب است که با هر واحد افزایش تجمع سرب در برگ، عملکرد روغن به میزان ۰/۰۷۶ گرم در بوته کاهش یافت.

نتایج آزمایش مزرعه‌ای نیز تأثیر منفی سرب بر روغن دانه و آثار مثبت محلول‌پاشی روی و کلسیم را بر این صفت نشان می‌دهد و به نوعی نتایج گلدانی را تأیید نمود. در شکل ۴-۵۳ در بین ۹ ترکیب تیماری مورد مقایسه، درصد روغن از ۲۳ تا ۳۶ درصد متغییر بود. در غلظت یک میلی‌مولار سرب استفاده از روی تنها در غلظت ۲۰ میلی‌مولار معنی‌دار بود و میزان درصد روغن در سطح صفر روی و غلظت ۲۰ میلی‌مولار به‌ترتیب ۲۳ و ۳۰ درصد بود. شکل ۴-۵۴ نتایج مقایسه میانگین اثر محلول-پاشی کلسیم و روی بر درصد روغن دانه گیاه گلرنگ را نشان می‌دهد، در سطح صفر کلسیم بین غلظت‌های کاربردی روی تفاوت معنی‌داری مشاهده نگردید. میزان تغییرات این صفت در غلظت ۱۰ میلی‌مولار کلسیم در هر دو سطح روی (۱۰ و ۲۰ میلی‌مولار) تقریباً مشابه بود و موجب افزایش درصد روغن گردید به‌طوری که مقدار آن در این ترکیب تیماری حدود ۳۳ درصد به‌دست آمد درحالی که در تیمار شاهد ۲۹/۱۵ درصد بود.

در شرایط مزرعه نیز اثر متقابل روی و سرب بر عملکرد روغن معنی‌دار بود (شکل ۴-۵۵) و در غلظت ۰/۵ میلی‌مولار سرب بین غلظت‌های کاربردی روی تفاوت معنی‌داری مشاهده نگردید و در تنش ۱ میلی‌مولار سرب، بیشترین میزان عملکرد روغن، در تیمار محلول‌پاشی روی (۲۰ میلی‌مولار) به‌دست آمد و بین تیمار عدم مصرف روی و غلظت ۱۰ میلی‌مولار روی تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد. کاربرد کلسیم در شرایط عادی مقدار عملکرد روغن را افزایش داد، به‌طوری‌که مقدار آن در غلظت ۱۰ میلی‌مولار به ۶۱۹ کیلوگرم در هکتار رسید (جدول ۴-۱۲).

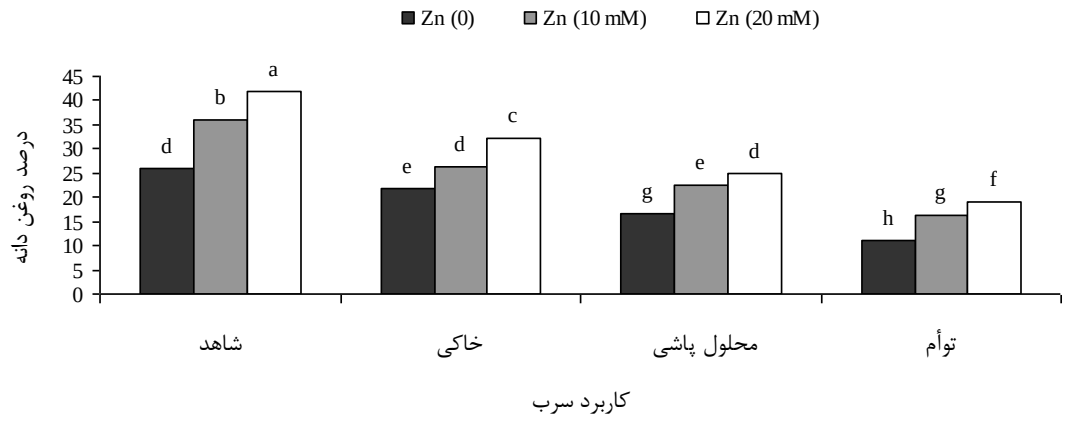
محققین بیان کردند که تجمع مقادیر بالای سرب و کادمیوم در گیاه، با اختلال در انتقال کربن فتوسنتزی و ایجاد سمیت میزان روغن تولیدی در گیاه را کاهش می‌دهد (امیرمرادی و همکاران، ۲۰۱۲). کاهش بیشتر درصد روغن در جذب برگی سرب نسبت به جذب خاکی آن ممکن است به دلیل مکانیسم‌های مقاومت گیاه در جهت کاهش انتقال سرب از ریشه به اندام هوایی گیاه باشد که میزان سمیت سرب را در گیاه کاهش می‌دهد و علاوه بر این کاهش میزان روغن در شرایط تنش سرب می‌تواند به دلیل اثرات تنش بر تسریع در رسیدگی گیاه، کاهش در تولید مواد فتوسنتزی در

گیاه و اختلال در انتقال آسیمیلات‌ها به دانه گیاه باشد. محققین نیز گزارش کردند که کاربرد عناصر کم مصرف به‌صورت محلول‌پاشی موجب افزایش درصد روغن دانه در نباتات روغنی گردید (بای‌بوردی و ملکوتی، ۱۳۸۲). نتایج مطالعات کوه‌نورد و همکاران (۱۳۹۰)، حاکی از اثر مثبت محلول‌پاشی روی بر افزایش میزان روغن دانه گلرنگ می‌باشد. اثر سه عنصر گوگرد، روی و آهن بر رشد و عملکرد گیاه گلرنگ نشان داد که کاربرد توأم گوگرد با عناصر روی و آهن سبب افزایش معنادار رشد، عملکرد و مقدار روغن دانه شد (راوی و همکاران، ۲۰۰۸). در بررسی اثر محلول‌پاشی کلسیم بر صفات مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی گیاه سورگوم نتایج نشان داد که کلسیم، وزن خشک گیاه و میزان کلروفیل در گیاه را نسبت به تیمار شاهد افزایش داد (صادقی‌لطف آبادی و همکاران، ۱۳۸۹). با توجه به مشاهدات احمدی و همکاران (۱۳۹۱)، محلول‌پاشی کلسیم و روی بیشترین تأثیر را بر میزان روغن تولیدی در گیاه کنجد داشت و میزان آن را ۴۸ درصد افزایش داد. بر اساس نتایج می‌توان چنین استنباط کرد که کلسیم و روی از طریق تأثیر مثبت بر تولیدات فتوسنتزی موجب افزایش عملکرد دانه و روغن تولیدی در گیاه می‌شود.

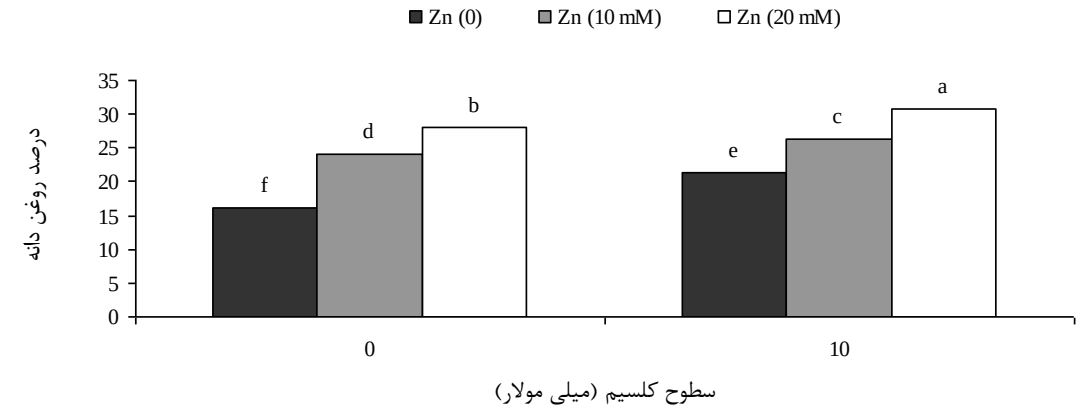
جدول ۴-۱۲- مقایسه میانگین اثرهای ساده محلول‌پاشی کلسیم بر عملکرد روغن گیاه گلرنگ (آزمایش مزرعه‌ای)

تیمار	عملکرد روغن (کیلوگرم در هکتار)
کلسیم (میلی‌مولار)	
صفر	۵۵۴/۶۵ b
۱۰	۶۱۹/۹۴ a

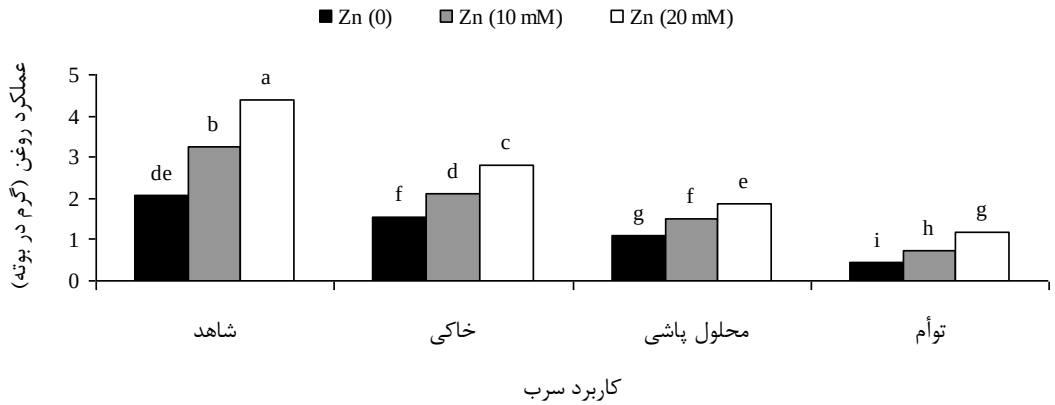
میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک در هر ستون و هر تیمار بر اساس آزمون LSD اختلاف معنی‌داری در سطح ۵ درصد ندارند.



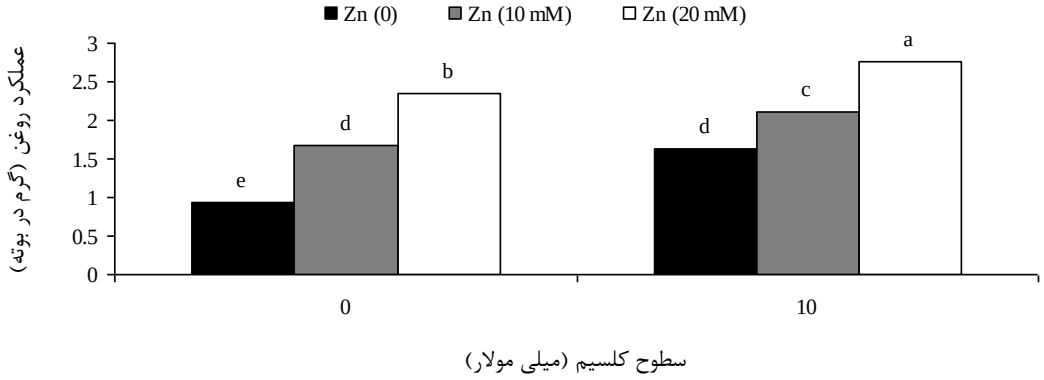
شکل ۴-۴۷- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی در شرایط تنش سرب بر درصد روغن گیاه گلرنگ. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD است. (آزمایش گلدانی)



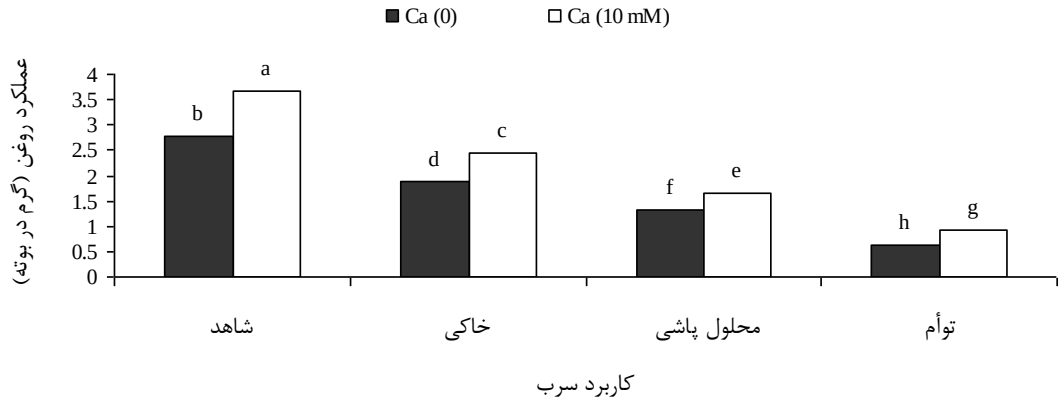
شکل ۴-۴۸- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی کلسیم و روی بر درصد روغن گیاه گلرنگ. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD است. (آزمایش گلدانی)



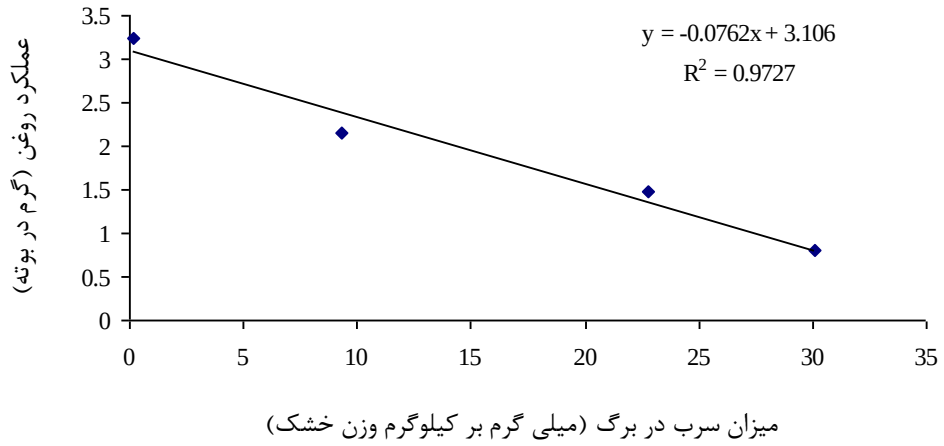
شکل ۴-۴۹- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی در شرایط تنش سرب بر عملکرد روغن گیاه گلرنگ. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD است. (آزمایش گلدانی)



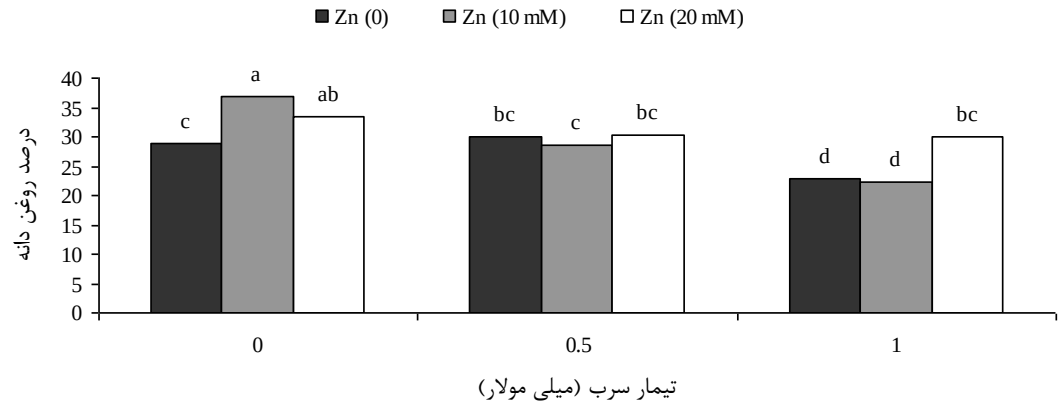
شکل ۴-۵۰- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی کلسیم و روی بر عملکرد روغن گیاه گلرنگ. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD است. (آزمایش گلدانی)



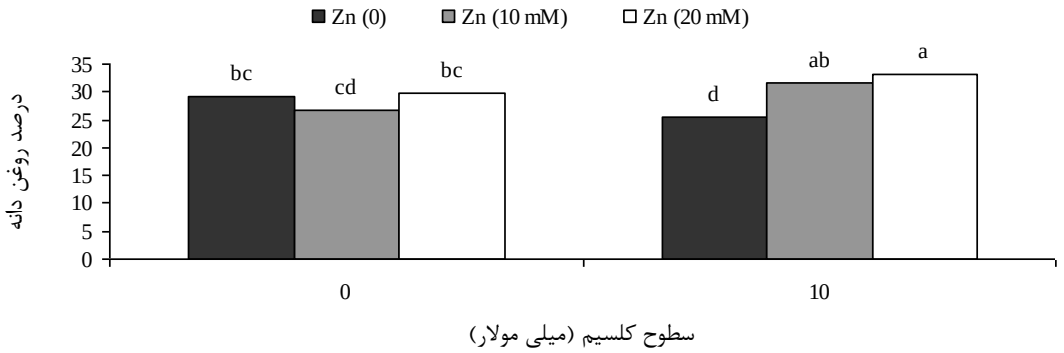
شکل ۴-۵۱- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی کلسیم در شرایط تنش سرب بر عملکرد روغن گیاه گلرنگ. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD است. (آزمایش گلدانی)



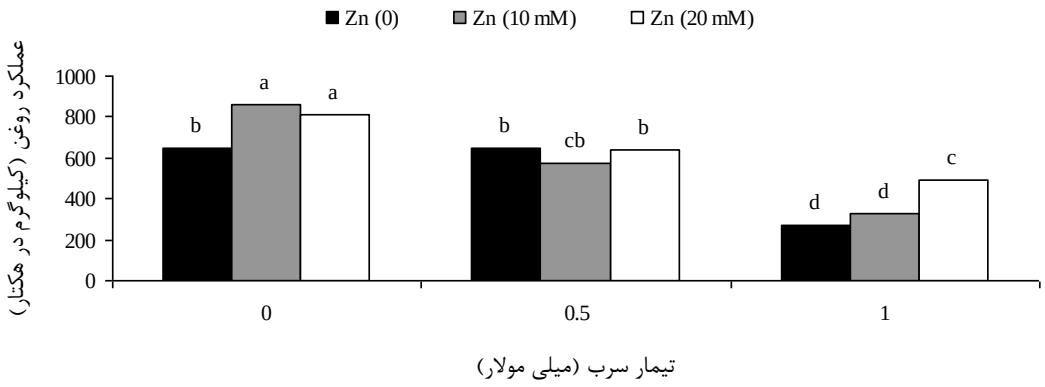
شکل ۴-۵۲- رابطه بین تجمع سرب در برگ و عملکرد روغن (آزمایش گلدانی)



شکل ۴-۵۳- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی در شرایط تنش سرب بر درصد روغن گیاه گلرنگ. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD است. (آزمایش مزرعه‌ای)



شکل ۴-۵۴- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی کلسیم و روی بر درصد روغن گیاه گلرنگ. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD است. (آزمایش مزرعه‌ای)



شکل ۴-۵۵- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی در شرایط تنش سرب بر عملکرد روغن گیاه گلرنگ. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD است. (آزمایش مزرعه‌ای)

۴-۷-۲- پروتئین دانه

در هر دو آزمایش گلدانی و مزرعه‌ای از بین منابع تغییر اثر اصلی سرب و روی بر صفت درصد پروتئین دانه و اثر اصلی سرب، کلسیم و روی بر عملکرد پروتئین دانه معنی‌دار بود و در بین اثرات متقابل، اثر سرب و روی بر صفت عملکرد پروتئین دانه معنی‌دار گردید (جدول پیوست ۷ و ۸). در آزمایش گلدانی، نتایج مقایسه میانگین (جدول ۴-۱۳) نشان داد که تنش سرب موجب افزایش درصد پروتئین دانه شد و بیشترین و کمترین مقدار به ترتیب مربوط به تیمار کاربرد توأم سرب و تیمار شاهد بود. در تیمار جذب برگی روی با غلظت‌های ۱۰ و ۲۰ میلی‌مولار، درصد پروتئین دانه به‌ترتیب ۲۰/۵ و ۲۱/۶ درصد بود به‌طوری که بیشترین مقدار در کاربرد روی با غلظت ۲۰ میلی‌مولار به‌دست آمد (جدول ۴-۱۳).

در شکل ۴-۵۶ اثر محلول‌پاشی روی در سطوح مختلف سرب بر عملکرد پروتئین دانه نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود که کمترین میزان عملکرد پروتئین دانه در شرایط کاربرد توأم سرب و عدم کاربرد کود روی به‌دست آمد. در هر چهار سطح تیمار سرب محلول‌پاشی روی در غلظت ۲۰ میلی‌مولار موجب افزایش معنی‌دار در این صفت شد و در کاربرد توأم سرب با محلول‌پاشی روی در

غلظت ۲۰ میلی‌مولار میزان عملکرد پروتئین دانه ۶۷ درصد افزایش نشان داد. همانطورکه نتایج جدول ۴-۱۳ نشان می‌دهد محلول‌پاشی کلسیم اثر افزایشی بر میزان عملکرد پروتئین دانه داشت به‌طوری که مقدار آن از ۱/۳ به ۱/۵۶ گرم در بوته رسید. در بررسی روابط رگرسیونی بین درصد پروتئین دانه و عملکرد روغن رابطه منفی و معنی‌داری (R^2=۰/۹۷) وجود دارد، به‌طوری که با هر واحد افزایش درصد پروتئین، عملکرد روغن ۰/۴۲۸ گرم در بوته کاهش یافت (شکل ۴-۵۷).

در آزمایش مزرعه‌ای نیز نتایج نشان داد که بر اثر تنش سرب میزان پروتئین دانه به‌طور معنی‌داری نسبت به شاهد افزایش یافته است؛ به نحوی که درصد پروتئین دانه در تیمار شاهد ۱۴/۵۵و در غلظت ۱ میلی‌مولار ۱۸/۲۰ بود. کاربرد کود سولفات روی به‌صورت محلول‌پاشی تأثیر مثبتی در افزایش درصد پروتئین دانه داشت و در غلظت ۲۰ میلی‌مولار روی میزان این صفت ۱۷/۶۴ درصد بود (جدول ۴-۱۴). همانطور که نتایج مقایسه میانگین (شکل ۴-۵۸) نشان می‌دهد در شدیدترین سطح تنش سرب (۱ میلی‌مولار) کاربرد کود روی موجب بهبود اثرات نامطلوب سرب گردید و میزان عملکرد پروتئین دانه گیاه در غلظت ۲۰ میلی‌مولار روی ۴۹ درصد نسبت به شرایط عدم مصرف کود افزایش نشان داد. همانطور که نتایج جدول ۴-۱۴ نشان می‌دهد در تیمار جذب برگی کلسیم، عملکرد پروتئین دانه ۵ درصد نسبت به تیمار شاهد افزایش نشان داد.

نتایج این تحقیق نشان داد که با کاهش محتوای روغن، مقدار پروتئین دانه افزایش می‌یابد که مطابق با نتایج سایر محققین است مبنی بر اینکه همبستگی منفی بین میزان پروتئین و میزان روغن دانه ناشی از رقابت آنها در اشغال فضای دانه وجود دارد (ناصری و همکاران، ۱۳۸۹). محققین بیان کردند که در شرایط تنش میزان ذخیره‌سازی هیدروکربن‌ها و پروتئین‌ها کاهش می‌یابد و میزان کاهش هیدروکربن‌ها بیشتر از پروتئین در دانه می‌باشد، لذا درصد پروتئین دانه افزایش می‌یابد (قطاوی و همکاران، ۱۳۹۱). تغذیه مناسب تحت شرایط تنش می تواند تا حدی به گیاه در تحمل تنش های مختلف کمک کند. روی از عناصر کم مصرف ضروری است که برای رشد طبیعی و تولیدمثل گیاهان زراعی ضروری است (آلووی، ۲۰۰۴). محققین بیان کرده‌اند که عنصر روی به دلیل تأثیر

مثبتی که در سنتز و تولید کلروفیل و جذب بهتر بعضی عناصر مانند نیتروژن دارد، با افزایش فتوسنتز و تولید مواد غذایی بیشتر، موجب تحریک رشد و تجمع پروتئین در دانه می‌شود (قطاوی و همکـاران، ۱۳۹۱).

جدول ۴-۱۳- مقایسه میانگین اثرهای ساده سطوح مختلف تنش سرب و محلول‌پاشی روی و کلسیم بر درصد و عملکرد پروتئین دانه گیاه گلرنگ (آزمایش گلدانی)

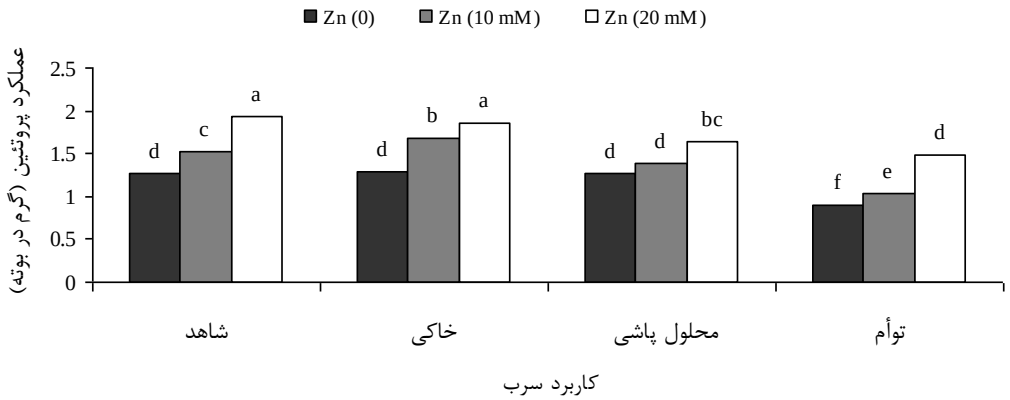
تیمار	درصد پروتئین دانه	عملکرد پروتئین (گرم در بوته)
سرب (میلی‌مولار)		
شاهد	۱۷/۳۴ d	۱/۵۸ a
کاربرد خاکی	۲۰/۲۴ c	۱/۶۱ a
محلول‌پاشی	۲۰/۸۵ b	۱/۴۳ b
کاربرد خاکی و محلول‌پاشی	۲۳/۱۳ a	۱/۱۴ c
روی (میلی‌مولار)		
صفر	۱۹/۰۰ c	۱/۱۸ c
۱۰	۲۰/۵۰ b	۱/۴۰ b
۲۰	۲۱/۶۰ a	۱/۷۳ a
کلسیم (میلی‌مولار)		
صفر	۲۰/۲۲ a	۱/۳۲ b
۱۰	۲۰/۵۶ a	۱/۵۶ a

میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک در هر ستون و هر تیمار بر اساس آزمون LSD اختلاف معنی‌داری در سطح ۵ درصد ندارند.

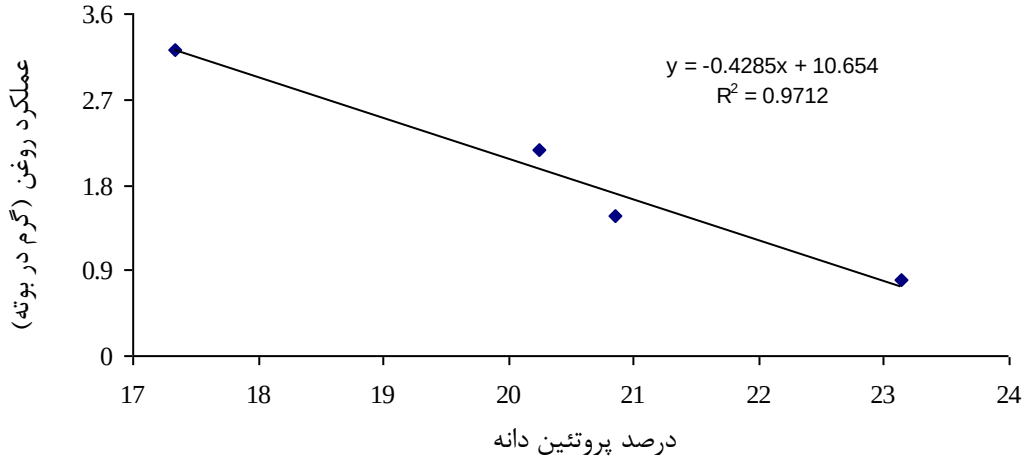
جدول ۴-۱۴- مقایسه میانگین اثرهای ساده سطوح مختلف تنش سرب و محلول‌پاشی روی و کلسیم بر درصد و عملکرد پروتئین دانه گیاه گلرنگ (آزمایش مزرعه‌ای)

تیمار	درصد پروتئین دانه	عملکرد پروتئین دانه (کیلوگرم در هکتار)
سرب (میلی‌مولار)		
صفر	۱۴/۵۵ c	۴۰۰/۹۲ b
۰/۵	۱۷/۳۳ b	۴۳۱/۵۸ a
۱	۱۸/۲۰ a	۳۱۲/۱۰ c
روی (میلی‌مولار)		
صفر	۱۵/۵۱ c	۳۳۲/۳۳ c
۱۰	۱۶/۹۴ b	۳۸۷/۲۹ b
۲۰	۱۷/۶۴ a	۴۲۴/۹۸ a
کلسیم (میلی‌مولار)		
صفر	۱۶/۵۹ a	۳۷۱/۳۰ b
۱۰	۱۶/۸۰ a	۳۹۱/۷۶ a

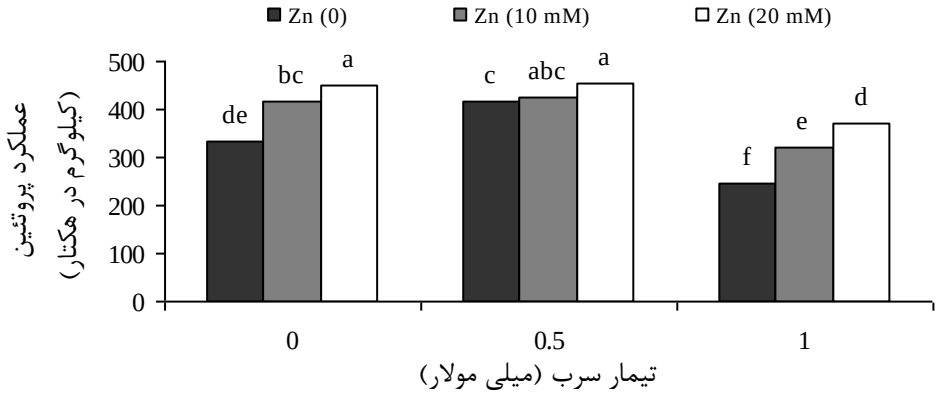
میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک در هر ستون و هر تیمار بر اساس آزمون LSD اختلاف معنی‌داری در سطح ۵ درصد ندارند.



شکل ۴-۵۶- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی در شرایط تنش سرب بر عملکرد پروتئین دانه گیاه گلرنگ. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD است. (آزمایش گلدانی)



شکل ۴-۵۷- رابطه بین درصد پروتئین دانه و عملکرد روغن (آزمایش گلدانی)



شکل ۴-۵۸- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی در شرایط تنش سرب بر عملکرد پروتئین دانه گیاه گلرنگ. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD است. (آزمایش مزرعه‌ای)

۴-۸- صفات فیزیولوژیکی

۴-۸-۱- کربوهیدرات محلول در برگ

میزان کربوهیدرات محلول در برگ در هر دو آزمایش گلدانی و مزرعه‌ای از تیمارهای محلول‌پاشی سرب، روی، اثر متقابل آنها و محلول‌پاشی کلسیم تأثیر پذیرفت (جدول پیوست ۷ و ۸). در بررسی ترکیبات تیماری حاصل از سرب و روی نتایج نشان داد که در تمام سطوح تیمار سرب، استفاده از روی به‌صورت محلول‌پاشی اثرات افزایشی قابل توجهی بر میزان کربوهیدرات محلول داشت. در تیمار محلول‌پاشی و کاربرد توأم سرب میزان تغییرات کربوهیدرات محلول در سطح ۲۰ میلی‌مولار روی مشابه بود و در تیمار کاربرد توأم سرب تفاوت معنی‌داری بین دو غلظت کاربردی روی مشاهده نشد (شکل ۴-۵۹). نتایج مقایسه میانگین (جدول ۴-۱۵) نشان داد که مقدار قند محلول گیاهانی که

توسط کلسیم محلول‌پاشی شده بودند، ۹ درصد بیشتر از گیاهان شاهد بود که این اختلاف بـه لحـاظ آماری معنی‌دار بود.

در آزمایش مزرعه‌ای، تنش سرب موجب افزایش مقدار قند محلول گردید به‌طوری که میزان آن در تیمار شاهد به‌طور متوسط ۴۸/۸۹ و در غلظت ۱ میلی‌مولار سرب به‌طور متوسط ۱۱۶/۳۷ میلـی‌گـرم در گرم وزن خشک بود در این شرایط نیز جذب برگی عنصر روی میزان تجمع قندهای محلـول را در برگ گیاه افزایش داد و در شدیدترین میزان آلودگی سرب (غلظت ۱ میلی‌مولار) همراه با کاربرد روی (غلظت ۲۰ میلی‌مولار) ۲۴ درصد نسبت به تیمار عدم کاربرد کود افـزایش نشـان داد (شـکل ۴-۶۰). کاربرد کلسیم بر میزان تغییرات این صفت تا اندازه‌ای تأثیرگذار بود و مقدار آن را ۳ درصد نسـبت بـه سطح صفر کلسیم افزایش داد (جدول ۴-۱۶).

افزایش میزان کربوهیدرات محلول می‌تواند در سازگاری گیاه به تنش سرب در گیـاه مـؤثر باشـد. تجمع یون‌های سمی در گیاه همراه با کاهش آب سلول‌ها، سبب تجمع قندهای محلول در انـدام‌هـای هوایی و ریشه گیاه می‌شود (نورانی آزاد و همکاران، ۱۳۹۰). نتایج این مطالعـه بـا گـزارش‌هـای سـایر محققین مبنی بر اینکه تنش فلز سنگین در گیاه منجر به افزایش کربوهیدرات محلول می‌شود، همسو است (ضیایی و همکاران، ۲۰۱۴؛ رئیسی ساداتی و جهان‌بخش گده کهریـز، ۱۳۹۳). مطالعـات انجـام شده توسط ساتو و همکاران (۲۰۰۴) نشان داد که تجمـع قنـدهای محلـول نقـش مهمـی در تنظـیم اسمزی در شرایط تنش دارد. همچنین قندهای محلول می‌توانند با حفظ سیالیت غشاء از اتصال بـین غشاهای مجاور هم در طول دوره تنش ممانعت کند (هو و همکاران، ۲۰۰۱). بنابراین به نظر مـی‌رسـد که تجمع آن در سلول‌های گیاه گلرنگ سبب حفظ متابولیسم گیاه در شرایط تـنش سـرب شـود. بـر اساس نتایج این تحقیق، تغذیه گیاه با روی می‌تواند در افزایش غلظت کربوهیدرات محلول در سلول-های گیاهی نقش داشته باشد. محققـین گـزارش کردنـد کـه روی جـزء عناصـر ضـروری در تشـکیل کلروفیل و کربوهیدرات در گیاه می‌باشد (یاداو، ۲۰۱۰) و نیز این عنصـر در هـر شـش کـلاس آنـزیم موجود در گیاهان شرکت دارد، بنابراین می‌تواند در سنتز و تولید کربوهیدرات‌ها و سایر واکـنش‌هـای

فیزیولوژیکی گیاه در جهت سازگاری گیاهان به تنش‌ها نقش مؤثری داشته باشد (مارشنر، ۱۹۹۵). در بررسی اثر محلول‌پاشی روی بر تنش خشکی گیاه گلرنگ نیز نتایج نشان داده است که کاربرد روی، میزان کربوهیدرات محلول را در شرایط تنش و عدم تنش به‌طور معنی‌داری افزایش می‌دهد (عابدی باباعربی و همکاران، ۱۳۹۰). نتایج این تحقیق نشان داد که تأثیر کلسیم بر تولید کربوهیدرات‌ها در شرایط تنش سرب معنی‌دار نبود. در مطالعه اثر کلسیم در تنش شوری نیز نتایج نشان داد که محلول-پاشی کلسیم تأثیر معنی‌داری بر میزان کربوهیدرات محلول نداشت (عطارزاده و همکاران، ۱۳۹۴).

جدول ۴-۱۵- مقایسه میانگین اثرهای ساده سطوح مختلف محلول‌پاشی کلسیم بر کربوهیدرات محلول در برگ گیاه گلرنگ (آزمایش گلدانی)

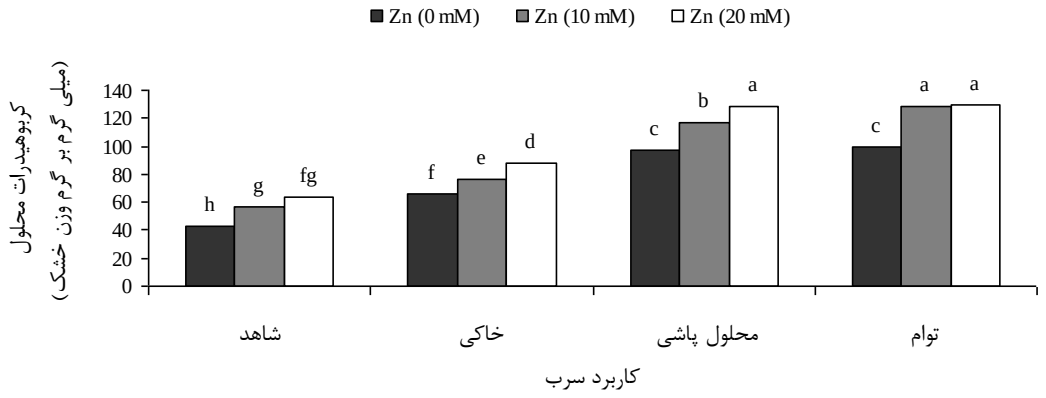
تیمارها	کربوهیدرات محلول (میلی‌گرم در گرم وزن خشک)
کلسیم (میلی‌مولار)	
صفر	۸۷/۶۳ b
۱۰	۹۵/۰۰ a

میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک در هر ستون و هر تیمار بر اساس آزمون LSD اختلاف معنی‌داری در سطح ۵ درصد ندارند.

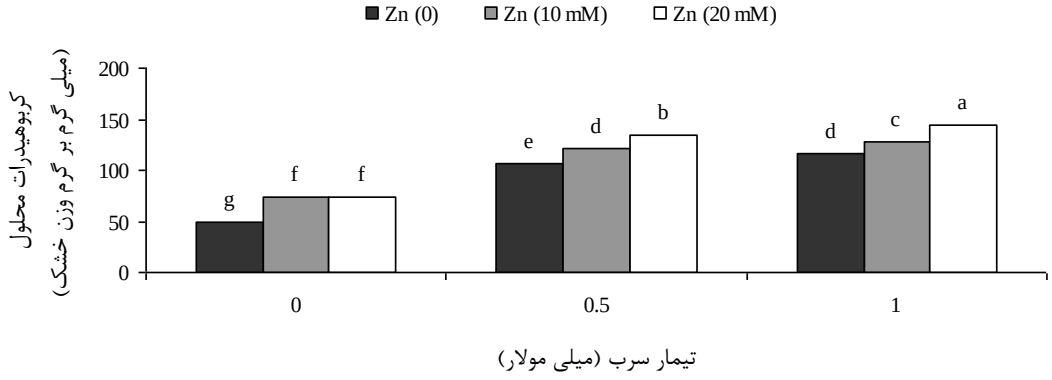
جدول ۴-۱۶- مقایسه میانگین اثرهای ساده سطوح مختلف محلول‌پاشی کلسیم بر کربوهیدرات محلول در برگ گیاه گلرنگ (آزمایش مزرعه‌ای)

تیمارها	کربوهیدرات محلول در برگ (میلی‌گرم در گرم وزن خشک)
کلسیم (میلی‌مولار)	
صفر	۱۰۳/۷۷ b
۱۰	۱۰۶/۹۲ a

میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک در هر ستون و هر تیمار بر اساس آزمون LSD اختلاف معنی‌داری در سطح ۵ درصد ندارند.



شکل ۴-۵۹- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی در شرایط تنش سرب بر کربوهیدرات محلول گیاه گلرنگ. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD است. (آزمایش گلدانی)



شکل ۴-۶۰- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی در شرایط تنش سرب بر کربوهیدرات محلول گیاه گلرنگ. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD است. (آزمایش مزرعه‌ای)

۴-۸-۲- پراکسیداسیون لیپیدهای غشاء (مالون دی آلدهید)

در آزمایش گلدانی، میزان مالون دی آلدهید در برگ که نشانگر پراکسیداسیون لیپید است، از کلیه منابع تغییر در سطح احتمال یک درصد تأثیر پذیرفت (جدول پیوست ۹). بررسی اثر متقابل سرب و کلسیم نشان داد که در همه سطوح سرب میزان مالون دی آلدهید در اثر کاربرد کود کلسیم با غلظت ۱۰ میلی‌مولار از ۲۴ درصد تا ۳۵ درصد کاهش یافت (شکل ۴-۶۱). همچنین نتایج مقایسه

میانگین (شکل ۴-۶۲) نشان داد که در تیمار توأم سرب غلظت بالاتر روی (۲۰ میلی‌مولار) تأثیر معنی‌داری بر کاهش میزان مالون دی آلدهید در برگ گیاه داشت و در تیمار کاربرد خاکی هر دو غلظت کاربردی روی تقریباً به یک اندازه موجب کاهش این صفت گردید. شایان ذکر است تأثیر محلول‌پاشی روی و کلسیم بر پراکسیداسیون لیپیدهای غشاء تنها محدود به گیاهانی بود که در معرض سرب قرار داشتند و میزان مالون دی آلدهید در برگ گیاهان شاهد هیچ واکنشی به محلول-پاشی این عناصر نشان نداد. بر اساس نتایج این تحقیق، کاربرد توأم کلسیم با هر دو غلظت روی تأثیر بر حفاظت غشاءهای زیستی در شرایط تنش و عدم تنش سرب داشت و میزان تجمع مالون‌دی آلدهید در گیاه را کاهش داد (شکل ۴-۶۳ و ۴-۶۴). به‌طور مشخص میزان این صفت در سطح صفر کلسیم و روی ۶/۳۳ نانومول بر گرم وزن تر بود که در اثر محلول‌پاشی کلسیم ۱۰ میلی‌مولار و روی ۲۰ میلی‌مولار با ۴۹ درصد کاهش به ۳/۲۱ نانومول بر گرم وزن تر رسید (شکل ۴-۶۳). در شرایط تنش سرب، محلول‌پاشی روی همراه با کاربرد کلسیم سبب کاهش تجمع مالون‌دی آلدهید در گیاه گردید به‌طوری که کمترین مقادیر در شرایط کاربرد توأم کلسیم و روی مشاهده گردید (شکل ۴-۶۴).

در آزمایش مزرعه‌ای، نتایج تجزیه واریانس (جدول پیوست ۱۰) بیانگر آن است که جذب برگی سرب، روی و کلسیم و برهمکنش روی و سرب بر میزان مالون دی آلدهید معنی‌دار بود. همان‌طور که نتایج مقایسه میانگین جدول ۴-۱۷ نشان می‌دهد؛ کود کلسیم میزان مالون دی آلدهید را به‌طور معنی‌داری به میزان ۵/۳ درصد کاهش داد. کاربرد کود روی سبب حفظ پایداری غشاء و کاهش میزان مالون دی آلدهید شد و در همه سطوح تنش سرب تنها غلظت ۲۰ میلی‌مولار روی تأثیر معنی‌داری بر کاهش میزان این صفت داشت (شکل ۴-۶۵). در شکل ۴-۶۶ رابطه رگرسیونی بین میزان مالون دی‌آلدهید و عملکرد دانه را نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که با افزایش تجمع مالون دی‌آلدهید میزان عملکرد دانه کاهش یافت که ۹۹ درصد تغییرات را توجیه کرد. در شرایط تنش با آسیب‌رسانی به غشاء و پراکسیداسیون لیپیدها میزان جذب انتقال عناصر غذایی مؤثر بر رشد و عملکرد گیاه کاهش می‌یابد.

به‌طورکلی به‌نظر می‌رسد تنش سرب اثرات تخریبی بر غشای لیپیدی داشته است. پراکسیداسیون لیپید یکی از نتایج خسارات اکسیداتیوی است، رادیکال‌های آزاد اکسیژن با تخریب پیوندهای دوگانه اسیدهای چرب غیر اشباع در غشا، موجب تجمع مالون دی‌آلدهید در گیاه می‌شوند (اسلام و همکاران، ۲۰۰۸). در شرایط تنش در اثر پراکسیداسیون لیپیدها ظرفیت کلروفیل و سنتز کلروفیل به دلیل برهم کنش فلزات سمی با گروه SH- آنزیم‌های ضروری و نیز تخریب این آنزیم‌ها کاهش می‌یابد. غلظت‌های فزاینده فلز سنگین از عوامل بروز تنش اکسیداتیو در گیاهان محسوب می‌شود و اسیدهای چرب اشباع نشده در غشاهای سلولی مستعد تخریب‌های اکسیداتیو می‌باشند که حاصل این فرآیندها تشکیل محصولات تجزیه‌ای مانند مالون دی آلدهید می‌باشد (پراساد و زیشان، ۲۰۰۵). گزارش ارائه شده توسط اسلام و همکاران (۲۰۱۱) نیز حاکی از آن است که تنش سرب سبب آسیب‌رسانی به غشاء و پراکسیداسیون لیپیدها می‌شود که میزان مالون‌دی آلدهید و فعالیت آنزیم کاتالاز را افزایش داد. ککمک (۲۰۰۰) بیان کرد که عنصر روی نقش مهمی در سمیت‌زدایی گونه‌های فعال اکسیژن و کاهش اکسیداسیون اجزای سلولی مهم از جمله لیپید و پروتئین‌های غشاء دارد و میزان مالون دی آلدهید در گیاه را که نشان از پراکسیداسیون لیپیدهای غشاء است، کاهش می‌دهد. عنصر روی به گروه‌های SH- پروتئین‌های غشاء متصل می‌شود و از فسفولیپیدها و پروتئین‌های غشاء در اثر اکسیداسیون تیول‌ها و تشکیل دی سولفید حفاظت می‌کند (کواپیل، ۱۹۷۳). کاربرد عنصر روی با تأثیر مثبتی که در فعال‌سازی واکنش‌های فیزیولوژیکی گیاه و کاهش جذب و انتقال یون‌های سمی سرب در گیاه دارد می‌تواند در حفظ ساختار غشا موثر باشد. نقش روی در افزایش مقاومت گیاه به تنش فلز سنگین و کاهش میزان پراکسیداسیون لیپید غشاء نیز قبلاً توسط کایا و هیگس (۲۰۰۲) گزارش شده است. عنصر روی می‌تواند با سمیت زدایی رادیکال‌های آزاد، میزان آسیب‌رسانی به غشاء-های زیستی را در شرایط تنش کاهش دهد (ویسانی و همکاران، ۲۰۱۲).

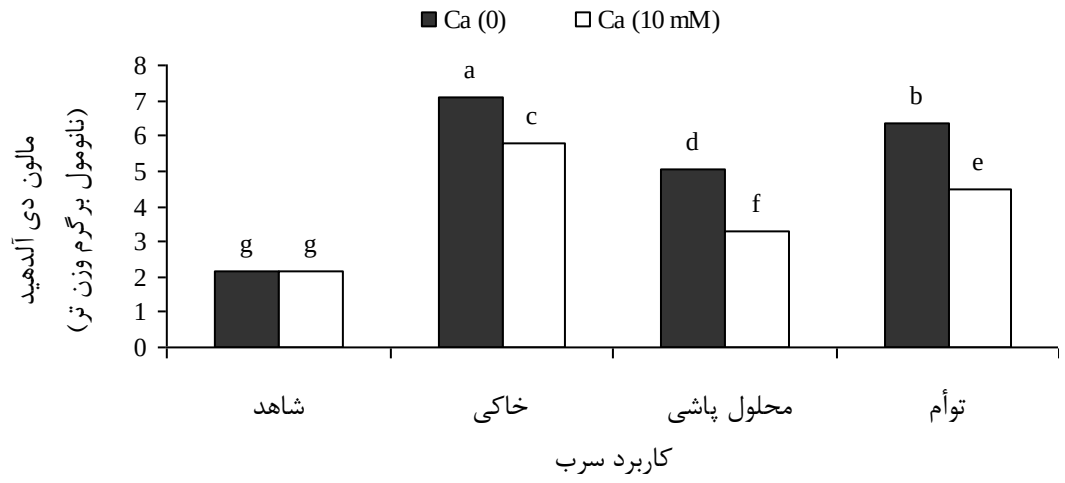
نتایج این تحقیق نشان داد که تغذیه برگی کلسیم در شرایط تنش در افزایش مقاومت گیاه و کاهش سطح مالون دی‌آلدهید نقش مثبتی داشته است. کلسیم از اجزای مهم غشاء سلولی بوده و با

اتصال به پروتئین و لیپیدهای غشاء، سبب حفظ پایداری غشاء در مقابله با تنش‌های مختلف محیطی می‌شود (هیرچی، ۲۰۰۴). صدیقی و همکاران (۲۰۱۲) نیز گزارش کردند که کاربرد خـارجی کلسـیم، غلظت این عنصر را اطراف کانال‌های کلسیم افزایش می‌دهد و نقش مؤثری در تغییر انتقال یـون‌هـای فلزی و پایداری غشاء دارد. بر اساس نتایج به نظر می‌رسد تغذیه گیاه با کلسیم و روی در شرایط تنش سرب سبب فعال‌تر شدن سیستم دفاعی گیاه و کاهش اثرات یون‌های سمی در گیاه می‌شود.

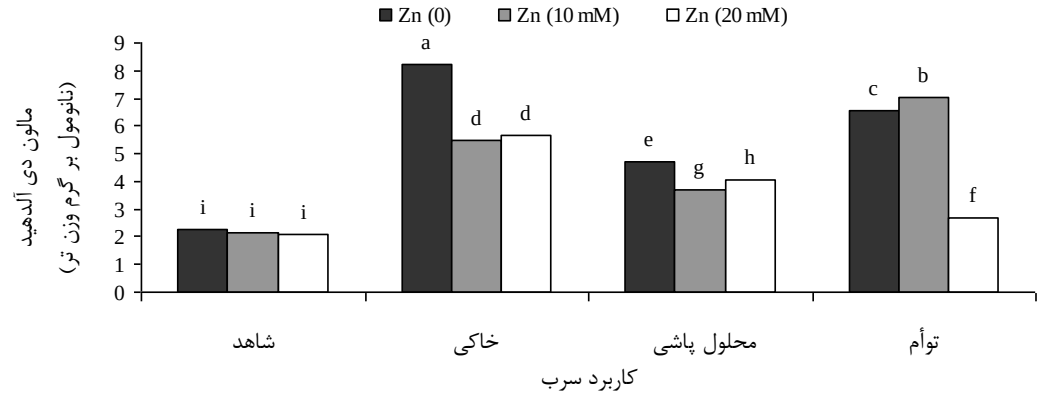
جدول ۴-۱۷- مقایسه میانگین اثرهای ساده سطوح مختلف محلول‌پاشی کلسیم بر میزان مالون دی آلدهید گیاه گلرنگ (آزمایش گلدانی)

تیمار	مالون دی آلدهید (نانومول برگرم وزن تر)
کلسیم (میلی‌مولار)	
صفر	۶/۷۸ a
۱۰	۶/۴۲ b

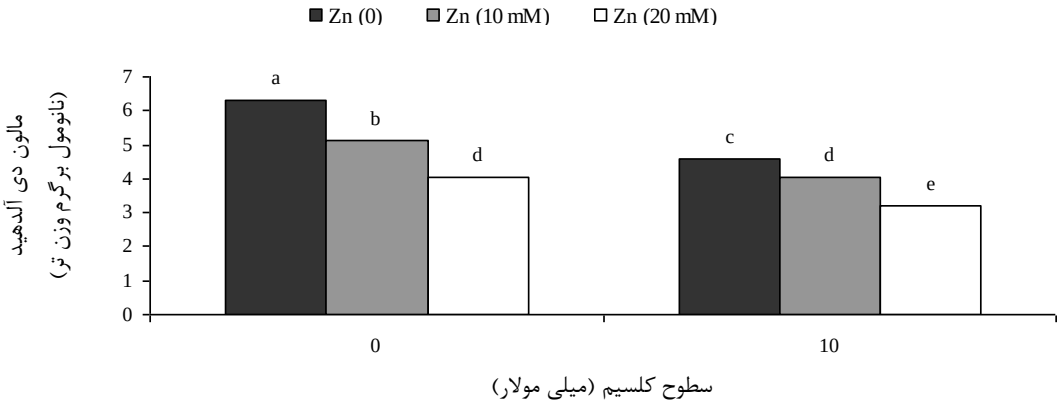
میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک در هر ستون و هر تیمار بر اساس آزمون LSD اختلاف معنی‌داری در سطح ۵ درصد ندارند.



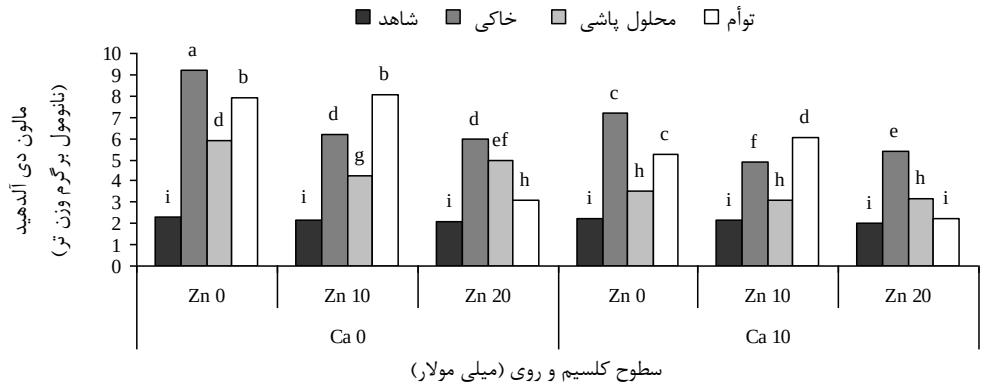
شکل ۴-۶۱- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی کلسیم در شرایط تنش سرب بر میزان مالون دی آلدهید در گیاه گلرنگ. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD است. (آزمایش گلدانی)



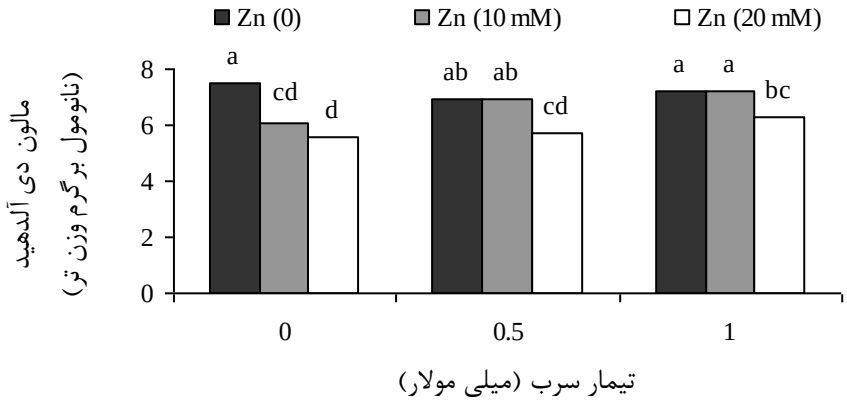
شکل ۴-۶۲- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی در شرایط تنش سرب بر میزان مالون دی آلدهید در گیاه گلرنگ. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD است. (آزمایش گلدانی)



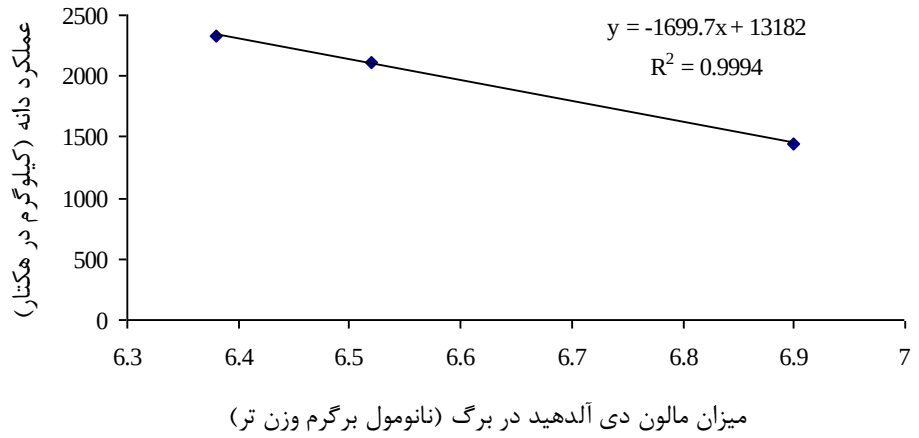
شکل ۴-۶۳- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی و کلسیم بر میزان مالون دی آلدهید در گیاه گلرنگ. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD است. (آزمایش گلدانی)



شکل ۴-۶۴- مقایسه اثر برهمکنش سه‌جانبه روی، کلسیم و سرب بر میزان مالون دی آلدهید در گیاه گلرنگ. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD است (آزمایش گلدانی)



شکل ۴-۶۵- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی در شرایط تنش سرب بر میزان مالون دی آلدهید در گیاه گلرنگ. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح (P≤ ۰/۰۵) بر اساس آزمون LSD است (آزمایش مزرعه‌ای)



شکل ۴-۶۶- رابطه بین میزان مالون دی آلدهید و عملکرد دانه گیاه گلرنگ (آزمایش مزرعه‌ای)

۴-۸-۳- آنزیم گلوتاتیون اس ترانسفراز

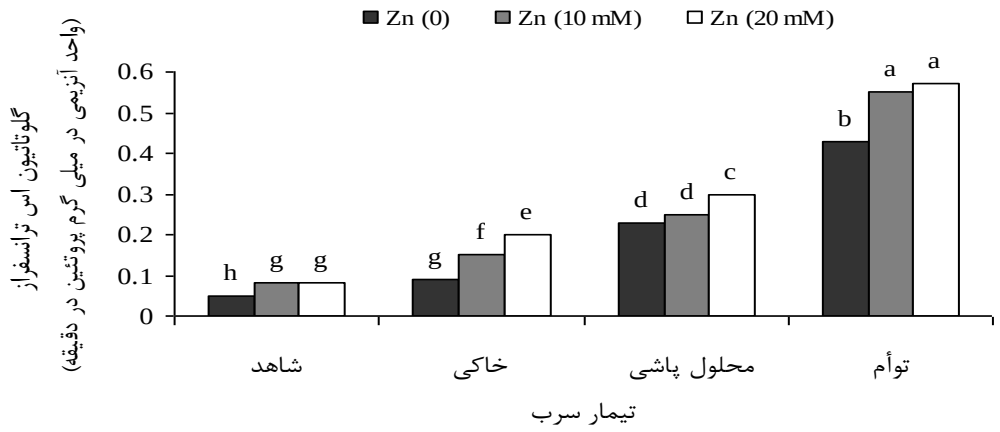
در آزمایش گلدانی تأثیر سرب، روی و اثر متقابل آن‌ها بر فعالیت این آنـزیم معنـی‌دار ($P\leq$ ۰/۰۱) شد (جدول پیوست ۹). نتایج نشان داد که محلول‌پاشی روی به‌ویژه در غلظت ۲۰ میلـی‌مـولار سـبب افزایش فعالیت سیستم دفاعی آنتی اکسیدانی در تیمارهای تنش سرب گردید. در کاربرد تـوأم سـرب میزان فعالیت این آنزیم در اثر محلول‌پاشی روی با هر دو غلظت حدود ۳۲ درصد نسبت به سطح صفر روی افزایش نشان داد. بیشترین فعالیت آنزیم گلوتاتیون اس ترانسفراز در این ترکیب تیماری مشاهده شد (شکل ۴-۶۷). نتایج روابط رگرسیونی بین میزان فعالیت آنزیم گلوتاتیون اس ترانسـفراز و کاتـالاز در آزمایش گلدانی نشان داد که با افزایش فعالیت آنزیم کاتالاز، آنزیم گلوتاتیون اس ترانسفراز افزایش نشان داد در شرایط تنش سرب، گیاه با فعال‌سازی سیستم دفاعی آنتی‌اکسیدانی در سلول گیاهی بـه مقابله با تنش می‌پردازد (شکل ۴-۶۸).

در آزمایش مزرعه‌ای نیز فعالیت آنزیم گلوتاتیون اس ترانسفراز از اثـر متقابـل روی و سـرب تـأثیر پذیرفت. بر اساس نتایج (شکل ۴-۶۹)، محلول‌پاشی روی تنها در تیمار ۰/۵ میلـی‌مـولار سـرب تـأثیر معنی‌داری بر فعالیت آنزیم گلوتاتیون اس- ترانسفراز داشت و بیشترین میزان فعالیـت آنـزیم در ایـن

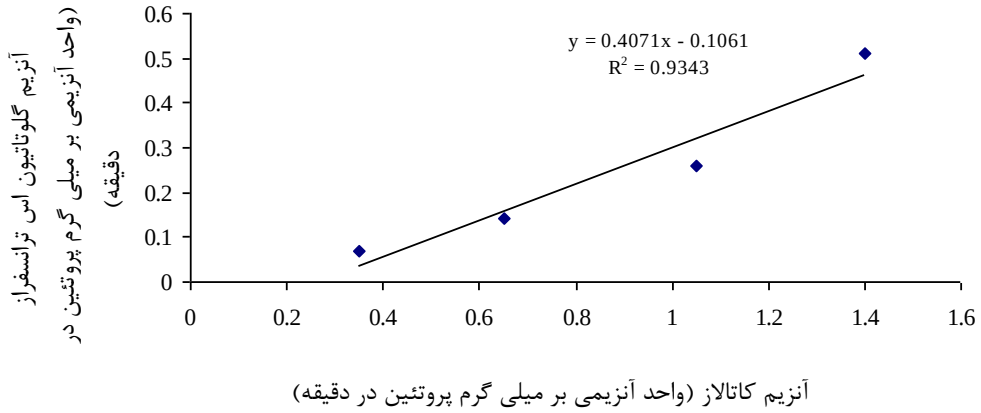
سطح تنش در غلظت ۱۰ میلی‌مولار روی مشاهده گردید. تأثیر میزان تجمع روی در برگ و فعالیت آنزیم گلوتاتیون اس ترانسفراز از طریق آنالیز رگرسیونی مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۴-۷۰). نتایج نشان داد که با افزایش تجمع روی در برگ، فعالیت آنزیم گلوتاتیون اس ترانسفراز کاهش یافت که بر اساس نتایج می‌توان چنین بیان کرد که در شرایط تنش سرب میزان جذب عناصر غذایی در گیاه کاهش می‌یابد و سیستم دفاعی آنتی اکسیدانی در گیاه برای مقابله با تنش فعال می‌شود.

اثرات سمی فلزات سنگین به دلیل تولید گونه‌های فعال اکسیژن است. در چنین شرایطی گیاهان با استفاده از مکانیسم‌های دفاعی آنتی اکسیدانی به مقابله با گونه‌های مخرب اکسیژن می‌پردازند (آگاروال و پاندی، ۲۰۰۴). ثبت مقادیر بالای آنزیم‌های آنتی اکسیدان در تیمارهای اعمال شده سرب این امر را تأیید می‌کند که گیاه گلرنگ با فعال‌سازی آنزیم‌های آنتی اکسیدان به مقابله با گونه‌های فعال اکسیژن تولید شده در شرایط تنش سرب پرداخت. گیاهان مکانیزم‌های حفاظتی مختلفی را برای دفع یا کا هش اثرات تنش دارند. سیستم‌های آنزیمی آنتی اکسیدان یکی از این مکانیزم‌های حفاظتی است. گیاهانی که از سطوح بالاتری از آنتی‌اکسیدان‌ها برخوردار هستند، مقاومت بیشتری به آسیب‌های اکسیداتیو نشان می‌دهند (یانگ و همکاران، ۲۰۰۸). ازاکی و همکاران (۲۰۰۰) گزارش کردند که گلوتاتیون اس- ترانسفراز سبب سمیت زدایی ترکیبات سمی به وجود آمده از طریق تنش اکسیداتیو در گیاه می‌شود و نیز عمل ترکیب گلوتاتیون با دیگر مشتقات سمّی حاصل از اکسیداسیون مولکول های زیستی نظیر نوکلئیک اسیدها را کاتالیز می‌کند. همچنین نتایج مطالعات نشان داد که فعالیت آنزیم گلوتاتیون اس- ترانسفراز و افزایش بیان ژن این آنزیم سبب افزایش تحمل این گیاه به سمّیت آلومینیوم گردید (ازاکی و همکاران، ۲۰۰۰). در بین اثرات متقابل این تحقیق، اثر متقابل تنش سرب و محلول‌پاشی روی بر فعالیت گلوتاتیون اس ترانسفراز معنی‌دار بود. تغذیه گیاه با روی موجب تقویت سیستم دفاعی گیاه گردید و فعالیت این آنزیم‌های آنتی اکسیدانی را در برگ گیاه گلرنگ افزایش داد. یافته‌های اسلام و همکاران (۲۰۱۱) نشان داد که روی با تجمع سرب در گیاه اثر آنتاگونیستی دارد و کاربرد روی تحت شرایط تنش سرب، سبب افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان و بهبود رشد گیاه

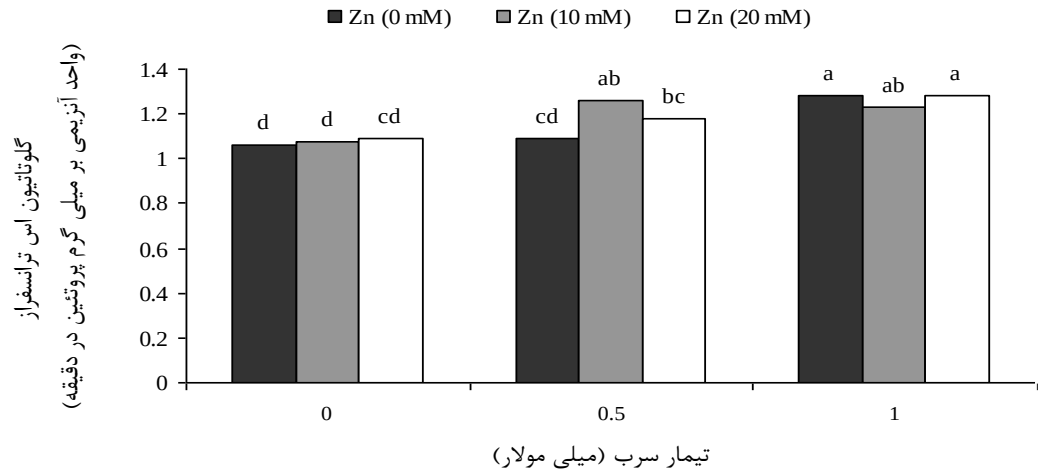
می‌شود. افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدان ممکن است به این علت باشد که عنصر روی کوفاکتور بسیاری از آنزیم‌ها در گیاه است (ککمک، ۲۰۰۰). نتایج حاصل در این پژوهش با گزارش‌های ویسانی و همکاران (۲۰۱۲) مبنی بر این که عنصر روی موجب تقویت سیستم دفاعی آنتی اکسیدان در شرایط تنش می‌شود، همسو است.



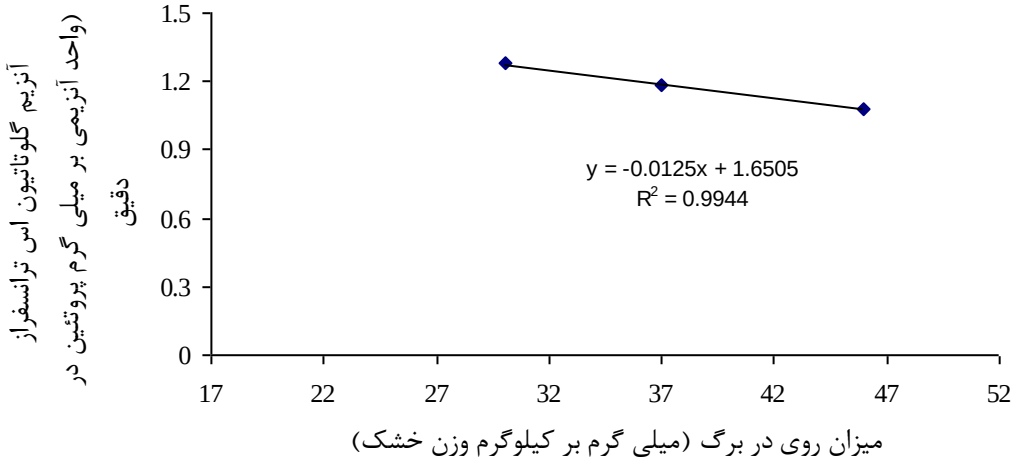
شکل ۴-۶۷- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی در شرایط تنش سرب بر میزان فعالیت آنزیم گلوتاتیون اس- ترانسفراز گیاه گلرنگ. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD است. (آزمایش گلدانی)



شکل ۴-۶۸- رابطه بین میزان فعالیت آنزیم کاتالاز و آنزیم گلوتاتیون اس- ترانسفراز در گیاه گلرنگ (آزمایش گلدانی)



شکل ۴-۶۹- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی در شرایط تنش سرب بر میزان فعالیت آنزیم گلوتاتیون اس- ترانسفراز گیاه گلرنگ. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD است. (آزمایش مزرعه‌ای)



شکل ۴-۷۰- رابطه بین میزان روی در برگ و فعالیت آنزیم گلوتاتیون اس- ترانسفراز در گیاه گلرنگ (آزمایش مزرعه‌ای)

۴-۸-۴- آنزیم کاتالاز

در آزمایش گلدانی، محلول‌پاشی سرب و روی و اثر متقابل آنها، همچنین کلسیم و اثر متقابل آن با روی اثر معنی‌داری بر میزان فعالیت آنزیم کاتالاز در برگ گیاه گلرنگ داشت (جدول پیوست ۹)، در بررسی ترکیبات تیماری حاصل از سرب و روی کمترین فعالیت آنزیم کاتالاز در برگ گیاهانی مشاهده شد که تنش سرب و عنصر روی را دریافت نکرده بودند (شاهد). فعالیت آنزیم در سایر ترکیبات تیماری به‌طور معنی‌داری بیشتر بود. به‌عنوان مثال، محلول‌پاشی روی در غلظت ۲۰ میلی‌مولار میزان فعالیت آنزیم کاتالاز را در تیمار کاربرد خاکی سرب ۴۵، محلول‌پاشی سرب ۴۱ و در کاربرد توأم سرب ۲۱ درصد افزایش داد (شکل ۴-۷۱). کاربرد توأم عناصر کلسیم و روی بر فعالیت آنزیم کاتالاز اثر معنی‌داری داشت و میزان آن نسبت به گیاهان شاهد افزایش یافت، در گیاهان تیمار شده با کلسیم بین دو غلظت ۱۰ و ۲۰ میلی‌مولار روی در فعالیت این آنزیم تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد (شکل ۴-۷۲).

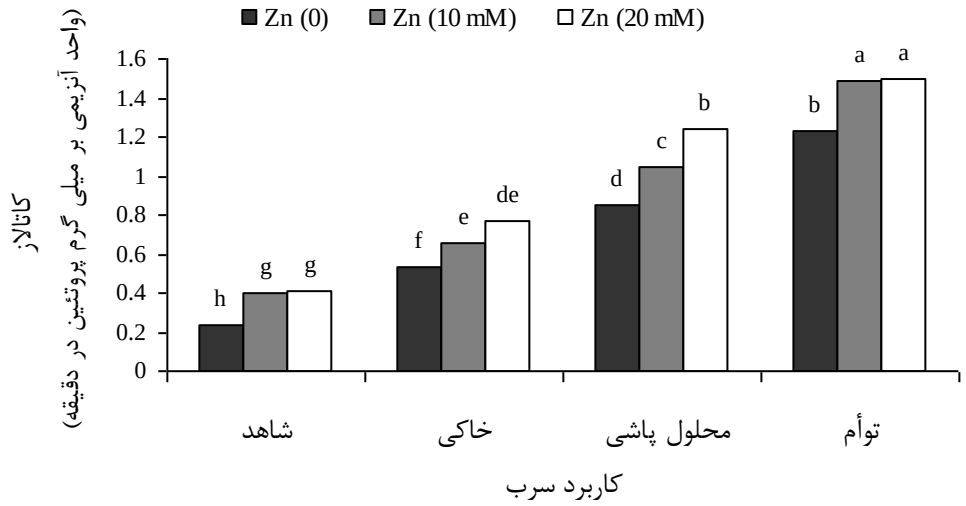
در بررسی روابط رگرسیونی بین مقدار فعالیت آنزیم کاتالاز و آنزیم پراکسیداز رابطه خطی و مثبتی وجود داشت که ۹۷ درصد تغییرات را توجیه نمود و با هر واحد افزایش فعالیت آنزیم پراکسیداز، مقدار

فعالیت آنزیم کاتالاز ۰/۹ واحد افزایش یافت (شکل ۴-۷۳). تأثیر میزان تجمع سرب در برگ و فعالیت آنزیم کاتالاز از طریق آنالیز رگرسیونی مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۴-۷۴). نتایج نشان داد که رابطه مثبت و خطی بین میزان تجمع سرب در برگ و فعالیت آنزیم کاتالاز وجود دارد و مؤید این مطلب است که با افزایش تجمع سرب در برگ، فعالیت آنزیم کاتالاز به میزان ۰/۰۳ واحد افزایش یافت.

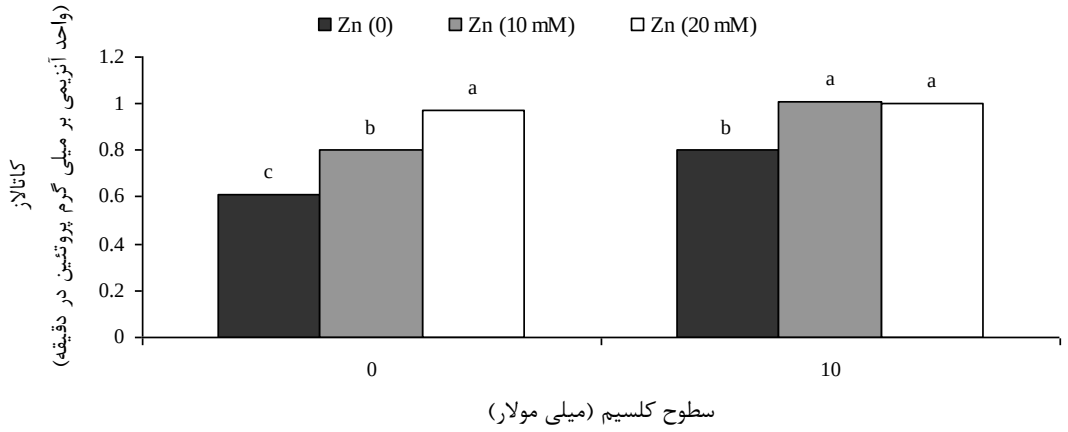
در آزمایش مزرعه‌ای نیز در گیاهان تیمار شده با سرب میزان فعالیت آنزیم کاتالاز به‌طور معنی-داری بیشتر بود؛ به‌طوری که در شدیدترین سطح تنش سرب (۱ میلی‌مولار) مقدار آنزیم کاتالاز ۲/۲ و در تیمار شاهد ۱/۲۴ (واحد آنزیمی بر میلی‌گرم پروتئین در دقیقه) بود. محلول‌پاشی سولفات روی هم در شرایط تنش و هم عدم تنش سبب تغییرات افزایشی در فعالیت این آنزیم گردید، به‌طوری‌که به-ترتیب در سطح صفر، ۰/۵ و ۱ میلی‌مولار سرب به‌طورمشخص محلول‌پاشی با غلظت ۲۰ میلی‌مولار عنصر روی سبب افزایش ۱۲، ۱۴ و ۲۵ درصدی در فعالیت این آنزیم نسبت به عدم کاربرد روی گردید (شکل ۴-۷۵). اثر اصلی کلسیم تأثیر معنی‌داری بر فعالیت آنزیم کاتالاز داشت و در تیمار کلسیم با غلظت ۱۰ میلی‌مولار مقدار این آنزیم افزایش ۴ درصدی نشان داد (جدول ۴-۱۸). در بررسی روابط رگرسیونی بین مقدار فعالیت آنزیم کاتالاز و عملکرد بیولوژیک نتایج نشان داد که با افزایش فعالیت آنزیم کاتالاز ، عملکرد بیولوژیک گیاه کاهش یافت که ۹۹ درصد تغییرات را توجیه نمود (شکل ۴-۷۶).

سرب به عنوان یک فلز سنگین به ویژه در غلظت‌های بالا موجب بروز تنش اکسیداتیو می شود. اما سلول‌های گیاهی برای حفاظت در مقابله با این شرایط مجهز به یک سیستم جاروب کننده رادیکال-های آزاد می‌باشند؛ این سیستم شامل آنزیم‌های آنتی اکسیدان مانند کاتالاز و گایاکول پراکسیداز و نیز سیستم آنتی اکسیدان غیرآنزیمی می‌باشد (چو و پارک، ۲۰۰۰). از مکانیسم‌های گیاه گلرنگ در شرایط تنش سرب، سیستم دفاعی آنتی اکسیدانی آن است و افزایش فعالیت کاتالاز در تنش سرب، موجب سمیت‌زدایی رادیکال‌های آزاد و افزایش مقاومت گیاه می‌شود. با توجه به اینکه کاتالاز یکی از مهمترین آنزیم‌ها در مقابله با تنش اکسیداتیو است (اسلام و همکاران، ۲۰۰۸)، به نظر می‌رسد که

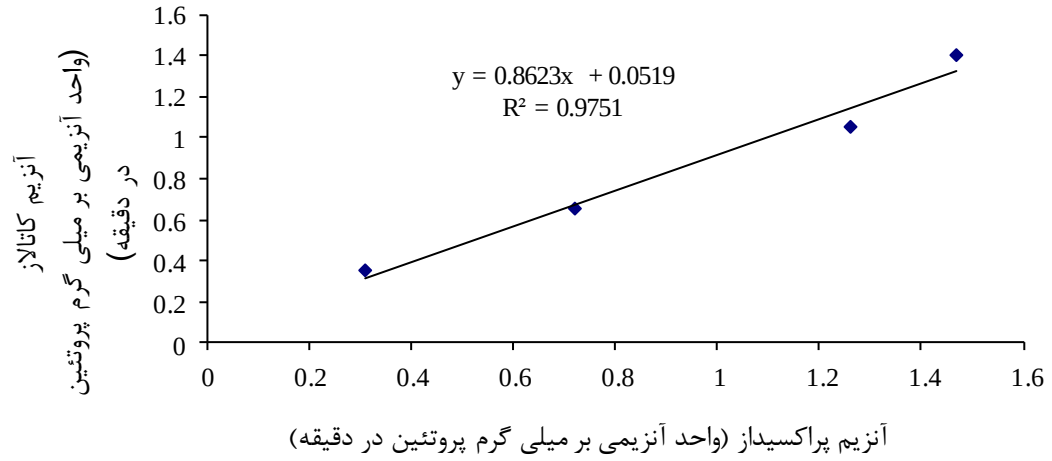
نقش مهمی در گیاه برای پاک سازی رادیکال‌های آزاد داشته باشد. بر اساس نتـایج مـی‌تـوان چنـین نتیجه گرفت که کاربرد کود روی موجب افزایش فعالیت آنزیم آنتی‌اکسیدان کاتالاز می‌گردد کـه ایـن موضوع با یافته‌های اسلام و همکاران (۲۰۱۱) مبنی بر این که روی سبب سمیت‌زدایی سرب در گیـاه می‌شود و ظرفیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان و رشد گیاه را بهبود می‌بخشد، همسو است.



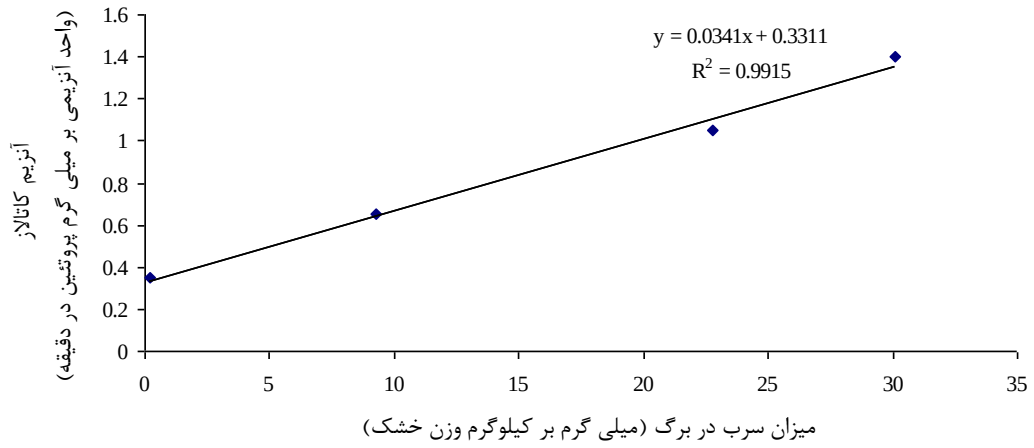
شکل ۴-۷۱- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی در شرایط تنش سرب بر فعالیت آنزیم کاتالاز در گیاه گلرنگ. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD است. (آزمایش گلدانی)



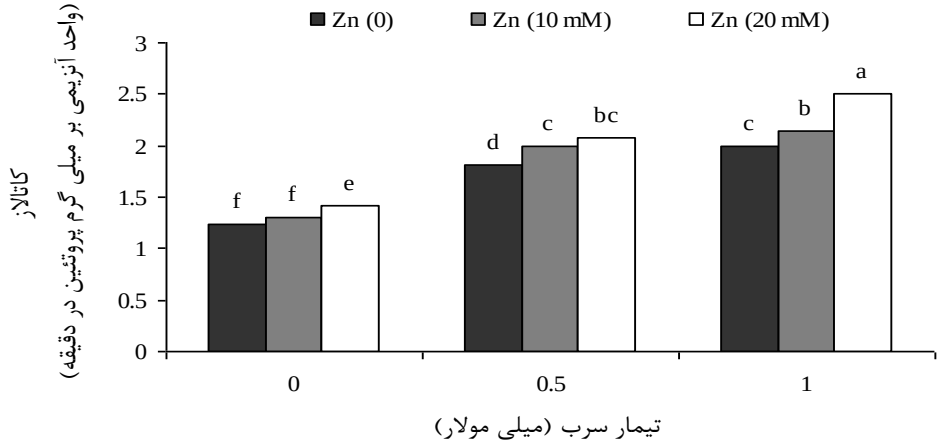
شکل ۴-۷۲- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی کلسیم و روی بر فعالیت آنزیم کاتالاز در گیاه گلرنگ. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD است. (آزمایش گلدانی)



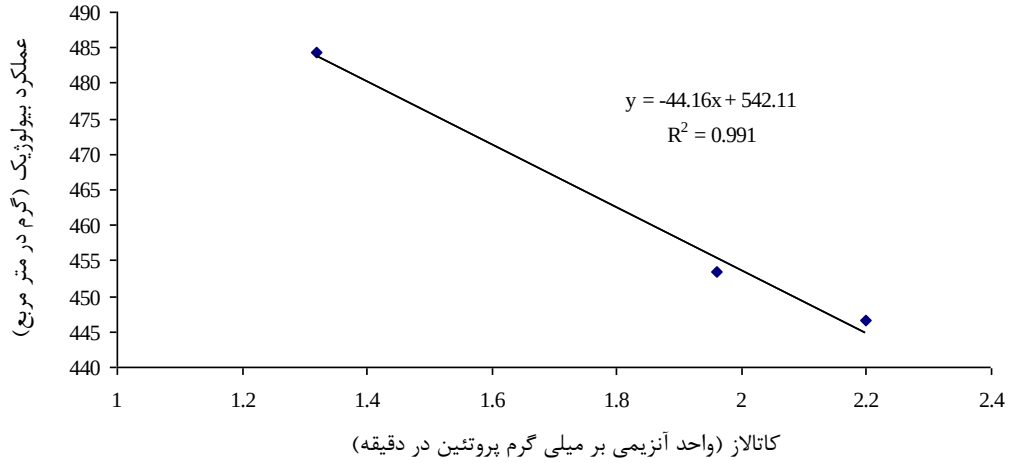
شکل ۴-۷۳- رابطه بین فعالیت آنزیم پراکسیداز و آنزیم کاتالاز در گیاه گلرنگ (آزمایش گلدانی)



شکل ۴-۷۴- رابطه بین میزان سرب در برگ و آنزیم کاتالاز در گیاه گلرنگ (آزمایش گلدانی)



شکل ۴-۷۵- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی در شرایط تنش سرب بر فعالیت آنزیم کاتالاز گیاه گلرنگ. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح (P≤۰/۰۵) بر اساس آزمون LSD است. (آزمایش مزرعه‌ای)



شکل ۴-۷۶- رابطه بین میزان فعالیت آنزیم کاتالاز و عملکرد بیولوژیک در گیاه گلرنگ (آزمایش مزرعه-ای)

جدول ۴-۱۸- مقایسه میانگین اثر ساده محلول‌پاشی کلسیم بر میزان فعالیت آنزیم آنتی اکسیدان کاتالاز (آزمایش مزرعه‌ای)

تیمار	کاتالاز (واحد آنزیمی بر میلی‌گرم پروتئین در دقیقه)
کلسیم (میلی‌مولار)	
صفر	۱/۷۹ b
۱۰	۱/۸۷ a

میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک در هر ستون و هر تیمار بر اساس آزمون LSD اختلاف معنی‌داری در سطح ۵ درصد ندارند.

۴-۸-۵- آنزیم آسکوربات پراکسیداز

در آزمایش گلدانی همه منابع تغییر به جز اثر سه جانبه تأثیر معنی‌داری بر فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز داشتند (جدول پیوست ۹). جذب برگی کلسیم هم در حضور و هم در عدم حضور سرب موجب تقویت سیستم دفاعی گیاه و افزایش فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز شد؛ کلسیم فعالیت این آنزیم را از ۳۳ تا ۱۰ درصد به‌ترتیب در شرایط بدون سرب و کاربرد توأم سرب

بهبود بخشید و در نهایت بیشترین میزان فعالیت این آنزیم در تیمار محلول‌پاشی کلسیم (۱۰ میلی-مولار) و در شرایط کاربرد توأم سرب به‌دست آمد (شکل ۴-۷۷). در بررسی ترکیبات تیماری حاصل از سرب و روی کمترین فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز در برگ گیاهانی مشاهده شد که تنش سرب و عنصر روی را دریافت نکرده بودند (شاهد). فعالیت آنزیم در سایر ترکیبات تیماری به‌طور معنی‌داری بیشتر بود. به‌عنوان مثال، محلول‌پاشی روی در غلظت ۲۰ میلی‌مولار میزان فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز را در گیاهان شاهد ۷۴، کاربرد خاکی سرب ۵۵، محلول‌پاشی سرب ۲۱ و در کاربرد توأم سرب ۲۹ درصد افزایش داد (شکل ۴-۷۸). کاربرد توأم عناصر کلسیم و روی بر فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز اثر معنی‌داری داشت و بیشترین مقدار در استفاده از کلسیم (۱۰ میلی‌مولار) و روی (۲۰ میلی‌مولار) به دست آمد (شکل ۴-۷۹).

براساس روابط رگرسیونی (شکل ۴-۸۰)، رابطه خطی و مثبتی بین میزان فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز و آنتوسیانین مشاهده شد که بیانگر این است که با افزایش فعالیت آنزیم موجب افزایش آنتوسیانین گیاه گلرنگ گردید که ۹۵ درصد تغییرات را توجیه نمود و با هر واحد افزایش فعالیت آنزیم، مقدار تجمع آنتوسیانین ۱/۹ میکرومول بر گرم وزن تر افزایش یافت که ممکن است به این دلیل باشد که در شرایط تنش فلز سنگین سرب سیستم دفاعی آنتی اکسیدانی آنزیمی و غیر آنزیمی در جهت کاهش گونه‌های فعال اکسیژن تولید شده در گیاه فعال می‌شود. نتایج روابط رگرسیونی (شکل ۴-۸۱) نشان داد که رابطه خطی و منفی بین میزان فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز و عملکرد دانه مشاهده شد که بیانگر این است که با افزایش فعالیت آنزیم در جهت مقابله با تنش سرب موجب کاهش عملکرد دانه گیاه گلرنگ گردید که این کاهش عملکرد ممکن است ناشی از مصرف انرژی در جهت فعال‌سازی مکانیسم‌های دفاعی گیاه باشد.

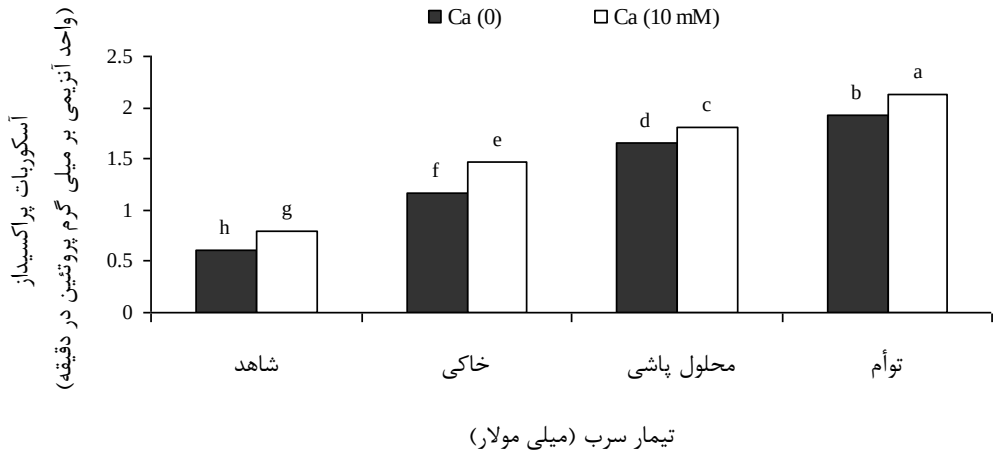
در آزمایش مزرعه‌ای، علاوه بر اثرات اصلی، برهمکنش روی و کلسیم نیز تأثیر معنی‌داری بر فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز داشت (جدول پیوست ۱۰). فعالیت این آنزیم در غلظت پایین سرب تغییر معنی‌داری نداشت ولی در شدیدترین سطح تنش سرب (۱ میلی‌مولار) فعالیت آن با ۵۰

درصد افزایش به ۲/۷۳ (واحد آنزیمی بر میلی‌گرم پروتئین در دقیقه) بود (جدول ۴-۱۹). تغذیه گیاه با کود روی و کلسیم توانست فعالیت این آنزیم آنتی‌اکسیدانی را در گیاه گلرنگ بهبود بخشد. در شرایط مصرف و عدم مصرف کلسیم، کاربرد روی موجب افزایش فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز گردید و در شرایط مصرف کلسیم، بیشترین میزان فعالیت این آنزیم در غلظت ۲۰ میلی‌مولار روی مشاهده گردید (شکل ۴-۸۲).

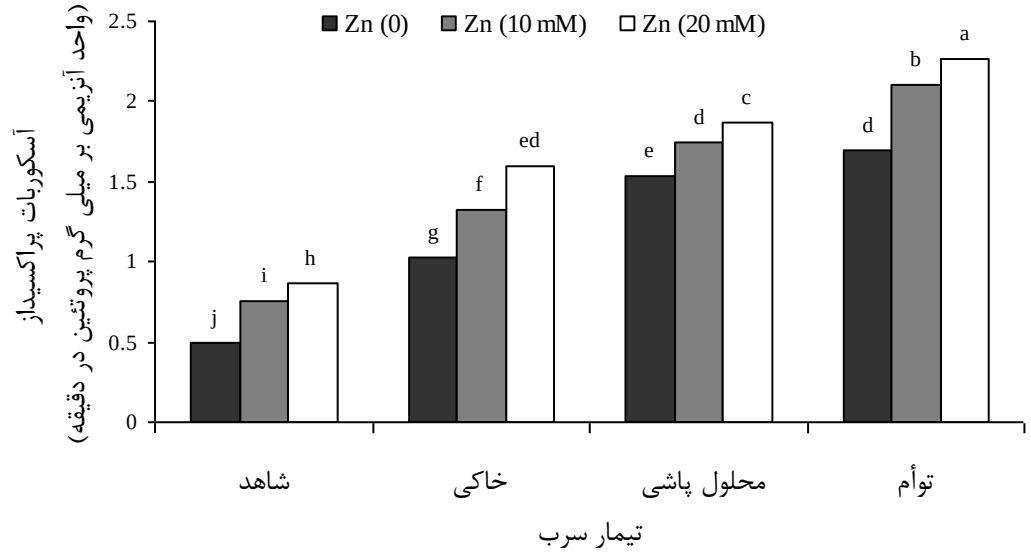
آنزیم آسکوربات پراکسیداز و کاتالاز از مهمترین آنزیم‌ها در مقابله با تنش اکسیداتیو است و نقش مهمی در گیاه برای پاکسازی رادیکال‌های آزاد دارد (اسلام و همکاران، ۲۰۰۸). نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده از کلسیم موجب تقویت سیستم دفاعی گیاه و افزایش فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز نسبت به تیمار عدم کاربرد کود گردید. خان و همکاران (۲۰۱۰) گزارش کردند که کلسیم نقش مؤثری در افزایش تحمل گیاه به تنش‌های محیطی از طریق بهبود سیستم‌های آنتی اکسیدان در گیاه دارد. صدیقی و همکاران (۲۰۱۱) بیان کردند که کلسیم با حفظ فعالیت سیستم آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان می‌تواند آسیب‌های وارده از طریق تنش فلز نیکل را در گیاه گندم بکاهد. بنابراین کاربرد کلسیم می‌تواند سطح فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدان را در گیاه در شرایط تنش افزایش دهد. گارلند و ویلکینز (۱۹۸۱) گزارش کردند که تغذیه گیاه با کلسیم در شرایط تنش فلز سنگین سرب سبب القا پاسخ های فیزیولوژیکی و سمیت‌زدائی فلز سنگین در سلول گیاهی می‌شود. همچنین نتایج تحقیقات نشان داد که تغذیه گیاه با کلسیم در شرایط تنش فلز سنگین سرب (گارلند و ویلکینز، ۱۹۸۱) و کادمیوم (صدیقی و همکاران، ۲۰۱۲)، نقش مهمی در واکنش‌های فیزیولوژیکی و سمیت‌زدائی فلز سنگین در سلول گیاهی داشته است. گوو و همکاران (۲۰۰۶) دریافتند که بهبود سمیت فلز سنگین آلومینیوم از طریق تغذیه گیاه با کلسیم می‌تواند مرتبط با نقش کلسیم در کاهش جذب آلومینیوم و افزایش فعالیت سیستم‌های آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در سلول گیاهی باشد.

بر اساس نتایج این تحقیق، کاربرد کود روی در شرایط تنش سرب اثرات افزایشی بر میزان فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز داشت. نتایج مطالعات نشان داده است که عنصر روی در بیوسنتز آنزیم-

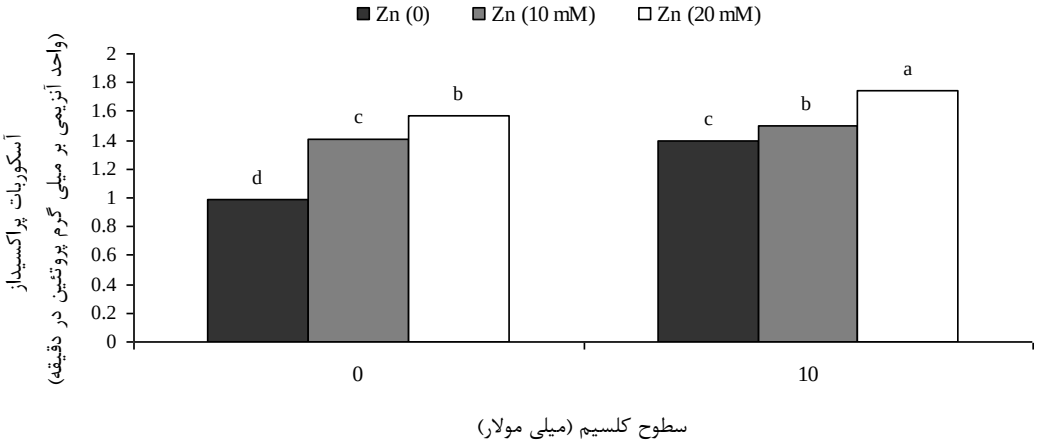
های آنتـی اکسـیدان در گیـاه نقـش مـؤثری دارد (ککمـک، ۲۰۰۰). تغذیـه گیـاه بـا عنصـر روی از اکسیداسیون NADPH و تولید گونه‌های فعال اکسیژن در اثر تنش فلز سـنگین ممانعـت مـی‌کنـد و موجب افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان در گیاه می‌شود (آراویند و پراسـاد، ۲۰۰۵). همچنـین مشخص شده است که در سیستم‌های بیولوژیکی مختلف رابطه‌ای بین افزایش تحمل نسبی گیـاه بـه تنش اکسیداتیو و فعالیت سیستم‌های آنزیمی آنتی اکسیدان در گیاه وجـود دارد (ازاکـی و همکـاران، ۲۰۰۰). عنصر روی با تقویت سیستم دفاعی گیاه نقش مثبتی در جهت کاهش آسـیب‌هـای وارده بـه گیاه در شرایط تنش فلز سنگین سرب داشت (اسلام و همکاران، ۲۰۱۱).



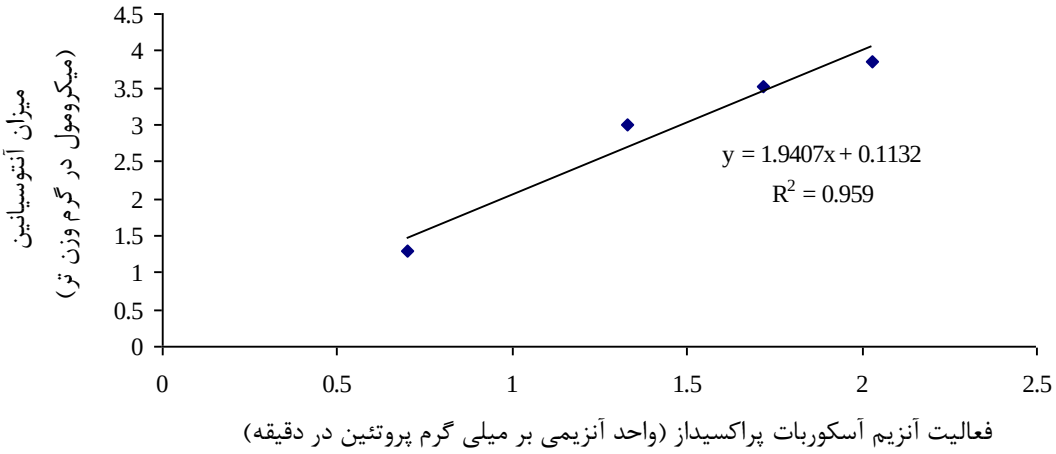
شکل ۴-۷۷- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی کلسیم در شرایط تنش سرب بر فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز در گیاه گلرنگ. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD است. (آزمایش گلدانی)



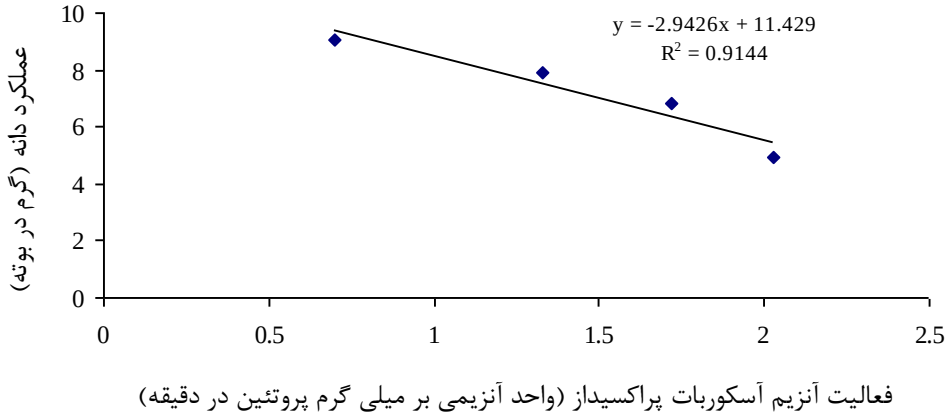
شکل ۴-۷۸- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی در شرایط تنش سرب بر فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز در گیاه گلرنگ. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD است. (آزمایش گلدانی)



شکل ۴-۷۹- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی و کلسیم بر فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز در گیاه گلرنگ. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD است. (آزمایش گلدانی)



شکل ۴-۸۰- رابطه بین فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز و میزان آنتوسیانین (آزمایش گلدانی)

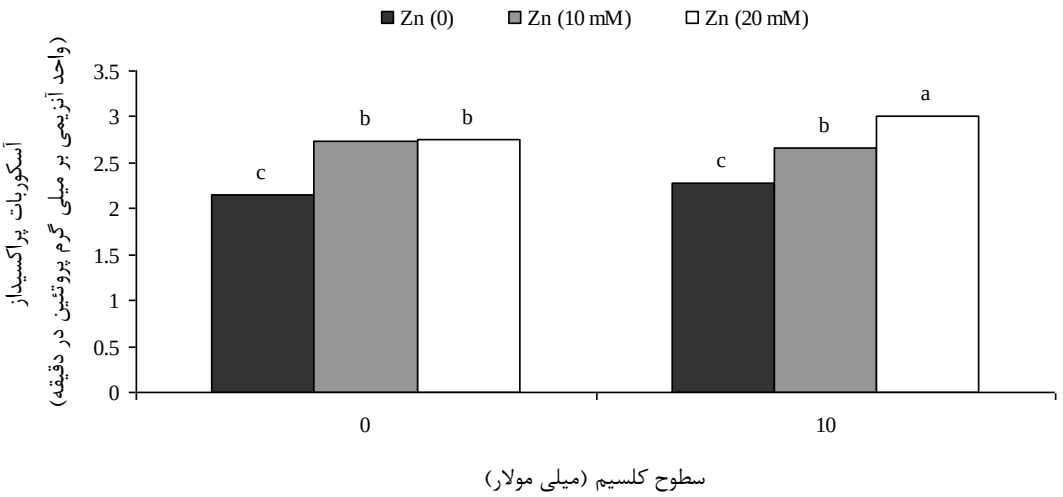


شکل ۴-۸۱- رابطه بین میزان فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز و عملکرد دانه گلرنگ (آزمایش گلدانی)

جدول ۴-۱۹- مقایسه میانگین اثرهای ساده سطوح سرب بر میزان فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز (آزمایش مزرعه‌ای)

تیمار	آسکوربات پراکسیداز (واحد آنزیمی بر میلی‌گرم پروتئین در دقیقه)
سرب (میلی‌مولار)	
صفر	۲/۵۶ b
۰/۵	۲/۵۰ b
۱	۲/۷۳ a

میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک در هر ستون و هر تیمار بر اساس آزمون LSD اختلاف معنی‌داری در سطح ۵ درصد ندارند.



شکل ۴-۸۲- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی و کلسیم بر فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز در گیاه گلرنگ. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح (P≤ ۰/۰۵) بر اساس آزمون LSD است. (آزمایش مزرعه‌ای)

۴-۸-۶- فعالیت آنزیم پراکسیداز

در آزمایش گلدانی، نتایج تجزیه واریانس (جدول پیوست ۹) بیانگر آن است که جذب برگی سرب و روی و برهمکنش آنها تأثیر معنی‌داری در فعالیت آنزیم پراکسیداز داشت. در شرایط عدم مصرف روی، میزان فعالیت این آنزیم به طور متوسط در جذب خاکی سرب ۰/۵۳، در جذب برگی سرب ۱/۰۹ و در جذب توأم خاکی و برگی سرب ۱/۴ (واحد آنزیمی بر میلی‌گرم پروتئین در دقیقه) بود. جذب برگی روی در همه سطوح سرب به‌طور معنی‌داری سبب افزایش فعالیت آنزیم پراکسیداز شد، به‌طوری که بیشترین فعالیت آنزیم در کاربرد توأم سرب همراه با جذب برگی روی با غلظت ۲۰ میلی‌مولار و کمترین آن در شرایط عدم تنش و بدون کاربرد کود مشاهده گردید (شکل ۴-۸۳).

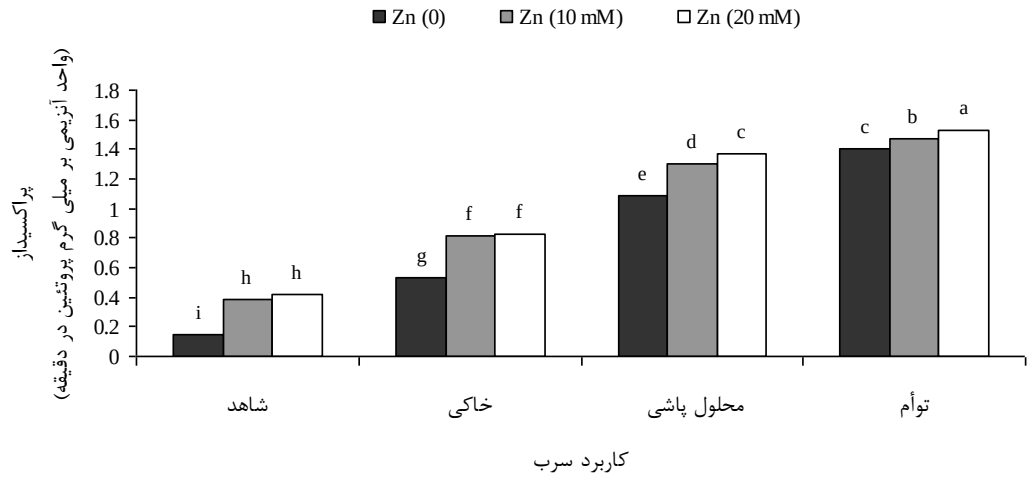
براساس روابط رگرسیونی (شکل ۴-۸۴)، رابطه خطی و مثبتی بین میزان فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز و آنزیم پراکسیداز مشاهده شد که ۹۰ درصد تغییرات را توجیه نمود که نشان از تقویت

سیستم دفاعی گیاه در مقابله با تنش سرب و کاهش گونه‌های فعال اکسیژن تولید شده در گیاه می‌باشد. نتایج روابط رگرسیونی بین غلظت سرب در برگ و میزان فعالیت آنزیم پراکسیداز نشان داد که با افزایش تجمع سرب در برگ، میزان فعالیت آنزیم پراکسیداز ۰/۰۴ واحد آنزیمی بر میلی‌گرم پروتئین در دقیقه کاهش یافت (شکل ۴-۸۵).

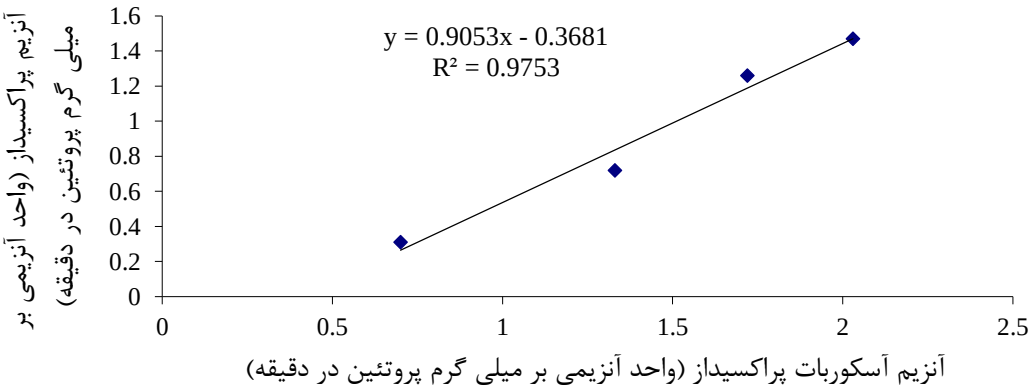
در مزرعه تنش ناشی از سرب، کاربرد کلسیم و روی در گیاه گلرنگ اثر معنی‌داری بر فعالیت آنزیم پراکسیداز داشت، در حالی که اثرات متقابل آنها از لحاظ آماری معنی‌دار نبود (جدول پیوست ۱۰). همان‌طور که نتایج مقایسه میانگین جدول ۴-۲۰ نشان می‌دهد، در اثر آلودگی سرب فعالیت آنزیم پراکسیداز افزایش یافت، البته بین دو غلظت ۰/۵ و ۱ میلی‌مولار سرب از لحاظ آماری تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد. جذب برگی کلسیم و روی موجب افزایش فعالیت آنزیم پراکسیداز در مقایسه با تیمار شاهد گردید، به‌طوری‌که فعالیت آنزیم در تیمار محلول‌پاشی روی با غلظت ۲۰ میلی‌مولار و کلسیم با غلظت ۱۰ میلی‌مولار به ترتیب ۲۶ و ۲۷ درصد نسبت به تیمار شاهد افزایش یافت (جدول ۴-۲۰).

به‌طورکلی، بررسی مقدار فعالیت آنزیم پراکسیداز در شرایط تنش نشان داد که گلرنگ با فعال کردن سیستم دفاعی سعی در به حداقل رساندن آسیب‌های ناشی از افزایش میزان تولید گونه‌های فعال اکسیژن و حفظ بقاء گیاه دارد. از میان آنزیم های آنتی اکسیدان، آنزیم پراکسیداز نقش مهمی در از بین بردن رادیکال‌های آزاد اکسیژن به‌ویژه پراکسید هیدروژن دارد. افزایش غلظت آنزیم‌های آنتی اکسیدانی در شرایط تنش فلزات سنگین توسط محققین دیگر (بهبویان و همکاران، ۲۰۰۷) نیز گزارش شده است. براساس نتایج این تحقیق به نظر می‌رسد که عنصر روی می‌تواند با فعال‌سازی آنزیم پراکسیداز سبب بهبود سمیت سرب در گیاه شود. یافته‌های ککمک و همکاران (۲۰۰۰) نشان داد که کمبود روی، مانع از فعالیت برخی از آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در گیاه می‌شود. یون‌های فلزی از جمله روی، مس، منیزیم و منگنز از عناصر غذایی کم مصرفی هستند که کوفاکتور بسیاری آنزیم‌های آنتی-اکسیدانی به‌شمار می‌روند (رحیمی‌زاده و همکاران، ۲۰۰۷). نتایج حاصل در این پژوهش با گزارش‌های

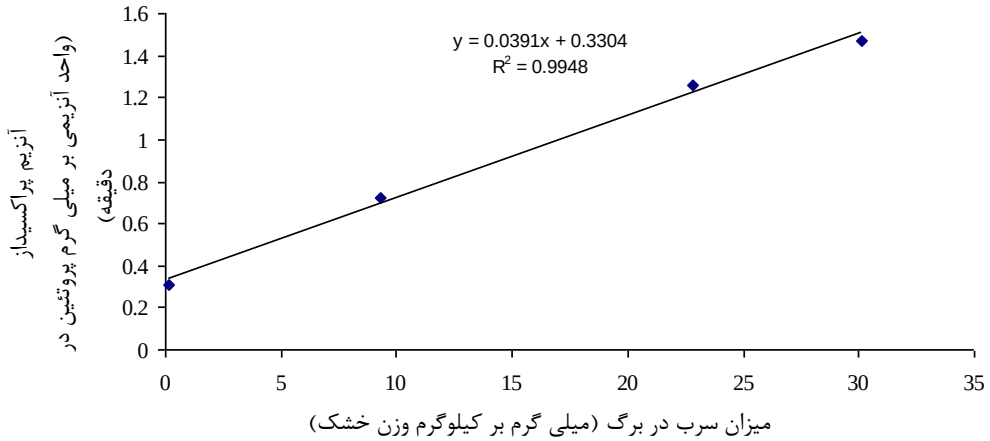
ظفر و همکاران (۲۰۱۴) مبنی بر این که عنصر روی موجب افزایش فعالیت آنتی اکسیدان در شرایط تنش می‌شود، همسو است.



شکل ۴-۸۳- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی در شرایط تنش سرب بر میزان فعالیت آنزیم پراکسیداز در گیاه گلرنگ. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD است. (آزمایش گلدانی)



شکل ۴-۸۴- رابطه بین فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز و پراکسیداز (آزمایش گلدانی)



شکل ۴-۸۵- رابطه بین فعالیت آنزیم پراکسیداز و میزان سرب در برگ (آزمایش گلدانی)

جدول ۴-۲۰- مقایسه میانگین اثرهای ساده سطوح مختلف تنش سرب و محلول‌پاشی روی و کلسیم بر میزان فعالیت آنزیم پراکسیداز (آزمایش مزرعه‌ای)

تیمار	پراکسیداز (واحد آنزیمی بر میلی‌گرم پروتئین در دقیقه)
سرب (میلی‌مولار)	
صفر	۰/۵۹ b
۰/۵	۱/۴۳ a
۱	۱/۴۵ a
روی (میلی‌مولار)	
صفر	۱/۰۲ c
۱۰	۱/۱۶ b
۲۰	۱/۲۹ a
کلسیم (میلی‌مولار)	
صفر	۱/۰۲ b
۱۰	۱/۳۰ a

میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک در هر ستون و هر تیمار بر اساس آزمون LSD اختلاف معنی‌داری در سطح ۵ درصد ندارند.

۴-۸-۷- محتوای آب نسبی برگ (RWC)

در آزمایش گلدانی، تنش ناشی از سرب، کاربرد کلسیم و روی در گیاه گلرنگ اثر معنی‌داری ($P \leq ۰/۰۱$) بر محتوای آب نسبی برگ داشتند، درحالی‌که اثرات متقابل آنها از لحاظ آماری معنی‌دار نبود (جدول پیوست ۹). همان‌طور که نتایج مقایسه میانگین (جدول ۴-۲۱) نشان می‌دهد با افزایش میزان آلودگی سرب، محتوای آب نسبی برگ کاهش یافت و میزان آن در جذب خاکی ۷۱/۰۲، در جذب برگی سرب ۵۷/۵۷ و در جذب توأم خاکی و برگی سرب ۵۳/۵۴ درصد بود. جذب برگی کلسیم و روی موجب افزایش معنی‌دار محتوای آب نسبی برگ در مقایسه با تیمار شاهد گردید، به‌طوری که میزان این صفت در تیمار محلول‌پاشی روی (غلظت ۲۰ میلی‌مولار) ۶۹ درصد و در تیمار شاهد ۶۰/۸۳ درصد بود (جدول ۴-۲۱). همان‌طور که نتایج جدول ۴-۲۱ نشان می‌دهد در تیمار کود

کلسیم (غلظت ۱۰ میلی‌مولار) محتوای آب نسبی برگ ۷۱ درصد بود که در مقایسه با تیمار شاهد افزایش نشان داد.

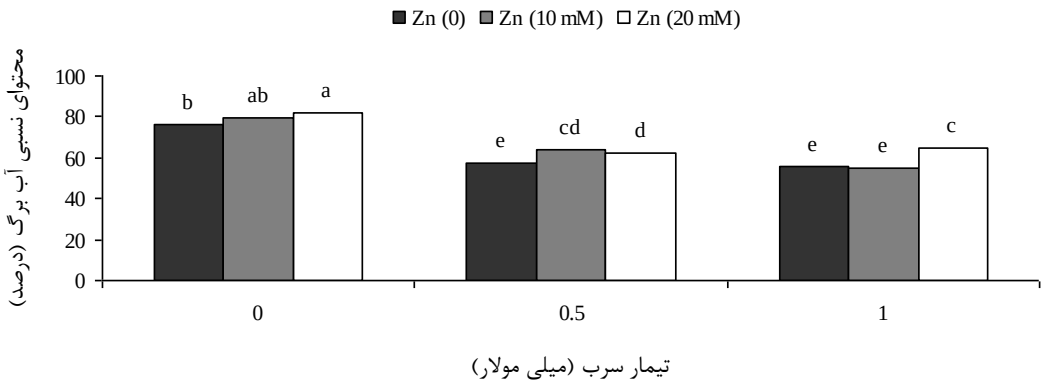
در آزمایش مزرعه‌ای، علاوه بر معنی‌داری هر سه اثر اصلی، اثرات متقابل سرب با روی و کلسیم نیز معنی‌دار شد (جدول پیوست ۱۰). در شکل ۴-۸۶ مشاهده می‌شود که محلول‌پاشی کود سولفات روی سبب بهبود آب برگ و افزایش تدریجی این صفت در شرایط تنش سرب گردید به‌طوری که غلظت ۲۰ میلی‌مولار روی بیشترین تأثیر را بر محتوای نسبی آب برگ در شدیدترین سطح تیمار سرب (۱ میلی‌مولار) داشت و این صفت را از ۵۵/۹ به ۶۵ درصد رساند. در هر سطح سرب مصرف کلسیم موجب افزایش معنی‌دار در محتوای نسبی آب برگ شد با این وجود بیشترین افزایش در سطح ۰/۵ میلی‌مولار سرب (۷۵ درصد) مشاهده شد (شکل ۴-۸۷).

آکینچی و همکاران (۲۰۱۰) بیان کردند که با افزایش غلظت سرب جذبی توسط گیاه محتوای نسبی آب برگ کاهش یافت. به دلیل شباهت یون‌های سرب با کلسیم در باند شدن با محل‌های پیوند کلسیم این یون سمی با کلسیم رقابت می‌کند (وایت، ۲۰۰۰). بنابراین ممکن است که سرب با تأثیر منفی بر ساختار غشاء و انعطاف‌پذیری دیوار سلولی و کاهش رشد و سطح جذب ریشه سبب اختلال در جذب عناصر غذایی و آب در گیاه شود. تنش سرب با کاهش مقدار ترکیبات نگهدارندهٔ تورژسانس سلولی و اختلال در تنفس و فسفولارسیون اکسیداتیو به اختلال در وضعیت آب در گیاه منجر شود (سرگین و ایوانو، ۲۰۰۱). کلسیم از اجزاء مهم غشاء است و در حفظ ساختار و کارکرد غشاء تأثیر به‌سزایی دارد و میزان نگهداری آب سلول‌ها را افزایش می‌دهد (تنا و همکاران، ۲۰۰۷). در تحقیقی بر روی گیاه گوجه فرنگی، کاربرد کلسیم سبب افزایش محتوای نسبی آب در بافت گیاهی گردید (طباطبائیان، ۱۳۹۳).

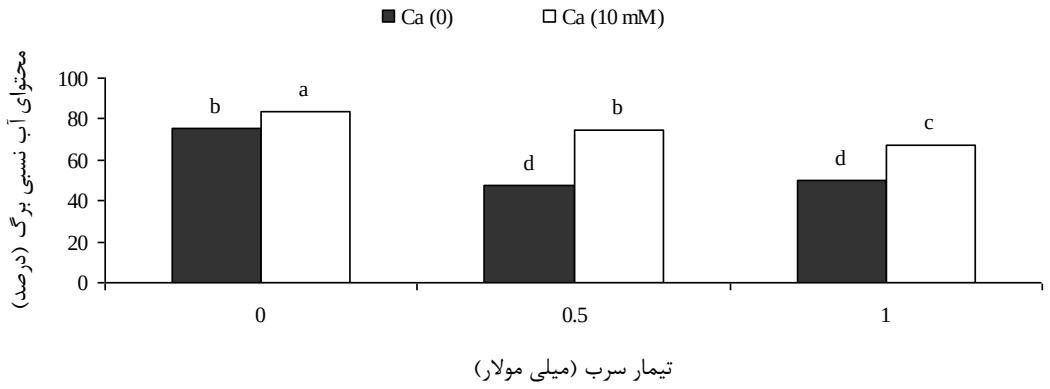
جدول ۴-۲۱- مقایسه میانگین اثرهای ساده سطوح مختلف تنش سرب و محلول‌پاشی روی و کلسیم بر محتوای نسبی آب برگ گیاه گلرنگ (آزمایش گلدانی)

تیمار	محتوای نسبی آب برگ (درصد)
سرب (میلی‌مولار)	
صفر	۸۳/۳۲ a
کاربرد خاکی	۷۱/۰۲ b
محلول‌پاشی	۵۷/۵۷ c
کاربرد خاکی و محلول‌پاشی	۵۳/۵۴ d
روی (میلی‌مولار)	
صفر	۶۰/۸۳ b
۱۰	۶۶/۶۳ a
۲۰	۶۹/۰ a
کلسیم (میلی‌مولار)	
صفر	۶۰/۷۹ b
۱۰	۷۱/۹۳ a

میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک در هر ستون و هر تیمار بر اساس آزمون LSD اختلاف معنی‌داری در سطح ۵ درصد ندارند.



شکل ۴-۸۶- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی در شرایط تنش سرب بر محتوای نسبی آب برگ گیاه گلرنگ. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD است. (آزمایش مزرعه‌ای)



شکل ۴-۸۷- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی کلسیم در شرایط تنش سرب بر محتوای نسبی آب برگ گیاه گلرنگ. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD است. (آزمایش مزرعه‌ای)

۴-۸-۸- آنتوسیانین

در هر دو آزمایش گلدانی و مزرعه‌ای، میزان آنتوسیانین برگ به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر سرب، روی، اثر متقابل آنها و کلسیم قرار گرفت (جدول پیوست ۹ و ۱۰). در آزمایش گلدانی تیمار کاربرد توأم خاکی و محلول‌پاشی سرب به‌ویژه زمانی‌که همراه با روی بود، مقادیر بیشتری از آنتوسیانین را نشان داد. محلول‌پاشی روی در همه سطوح سرب اثر افزایشی بر غلظت آنتوسیانین تولیدی در برگ گیاه گلرنگ داشت. جذب برگی روی با غلظت ۲۰ میلی‌مولار میزان آنتوسیانین برگ را در گیاهان شاهد ۲۵ درصد، در کاربرد خاکی سرب ۱۹ درصد، در جذب برگی سرب ۶ درصد و در کاربرد توأم سرب ۲۴ درصد نسبت به عدم مصرف روی افزایش داد (شکل ۴-۸۸). استفاده از کلسیم نیز تا اندازه‌ای سبب افزایش میزان آنتوسیانین برگ گردید، محلول‌پاشی کلسیم در غلظت ۱۰ میلی‌مولار مقدار آن را ۵ درصد افزایش داد (جدول۴-۲۲).

در آزمایش مزرعه‌ای نیز تنش سرب و افزایش شدت آن باعث افزایش میزان آنتوسیانین گردید، عنصر روی چه در حضور و چه در عدم حضور سرب به‌طور معنی‌داری این صفت را بهبود بخشید. البته همواره تأثیر غلظت بالای روی بیشتر بود. لذا بر اساس نتایج مقایسه میانگین، در شدیدترین سطح

تنش سرب (۱ میلی‌مولار)، میزان آنتوسیانین برگ با محلول‌پاشی روی در هر دو غلظت (۱۰ و ۲۰ میلی‌مولار) تقریباً به‌طور یکسان حدود ۲۹ درصد افزایش یافت (شکل ۴-۸۹). محلول‌پاشی کلسیم مقدار آنتوسیانین برگ را به‌طور معنی‌داری افزایش داد و مقدار آن نسبت به تیمار صفر کلسیم ۵ درصد افزایش نشان داد (جدول ۴-۲۳).

کومار و همکاران (۲۰۱۲) گزارش کردند که سنتز آنتوسیانین یک راهکار موثر بر مقابله با گونه-های فعال اکسیژن تولید شده در شرایط تنش سرب می‌باشد، اما در غلظت‌های پایین سرب بیشتر از غلظت‌های بالای این فلز در تحریک سنتز آنتوسیانین نقش دارد. افزایش میزان آنتوسیانین در شرایط تنش سرب توسط نارشکومار و همکاران (۲۰۱۴) نیز گزارش شده است. نتایج این تحقیق نشان داد که کاربرد کود روی در شرایط تنش موجب افزایش آنتوسیانین در گیاه گردید که نشان از تقویت سیستم دفاعی گیاه در مقابله با تنش و کاهش گونه‌های فعال اکسیژن توسط عنصر روی می‌باشد. تحقیقات نشان داده است که کاربرد کود روی به‌صورت محلول‌پاشی میزان آنتوسیانین را در گیاه نسبت به تیمارهای شاهد افزایش داد (سانگ و همکاران، ۲۰۱۵).

جدول ۴-۲۲- مقایسه میانگین اثرهای ساده محلول‌پاشی کلسیم بر میزان آنتوسیانین گیاه گلرنگ (آزمایش گلدانی)

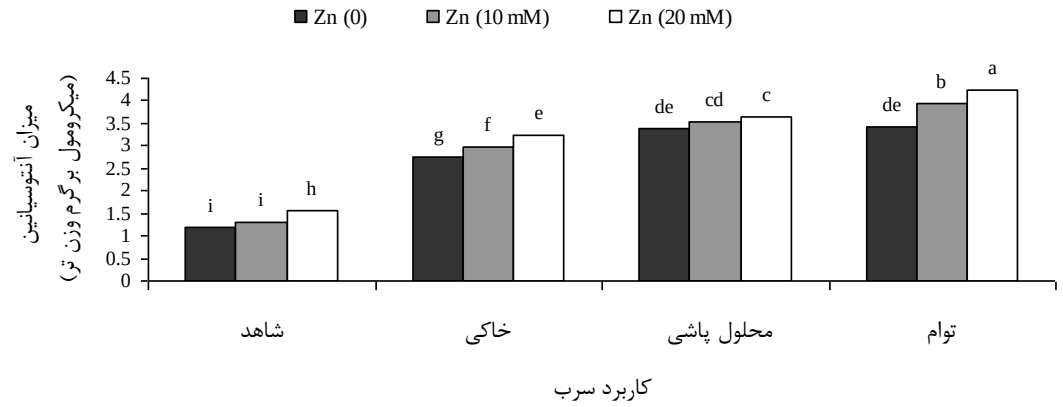
تیمار	آنتوسیانین (میکرومول بر گرم وزن تر)
کلسیم (میلی‌مولار)	
صفر	۲/۸۵ b
۱۰	۳/۰ a

میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک در هر ستون و هر تیمار بر اساس آزمون LSD اختلاف معنی‌داری در سطح ۵ درصد ندارند.

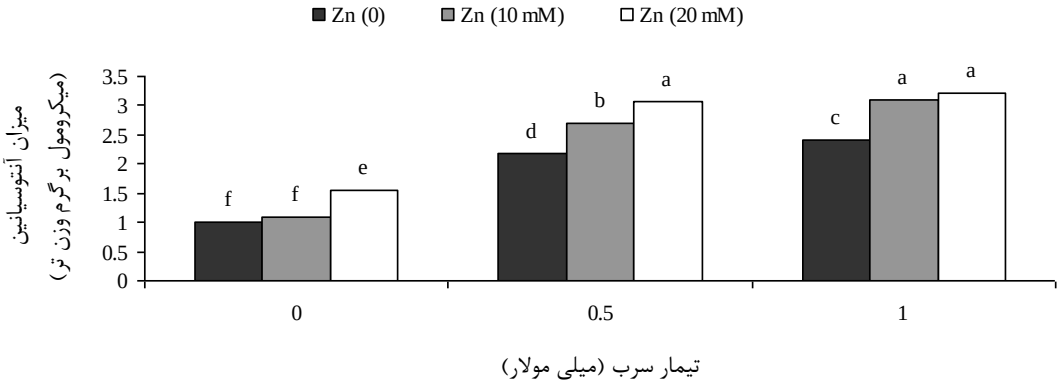
جدول ۴-۲۳- مقایسه میانگین اثرهای ساده محلول‌پاشی کلسیم بر میزان آنتوسیانین برگ گیاه گلرنگ (آزمایش مزرعه‌ای)

تیمار	آنتوسیانین (میکرومول بر گرم وزن تر)
کلسیم (میلی‌مولار)	
صفر	۲/۲۴ b
۱۰	۲/۳۲ a

میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک در هر ستون و هر تیمار بر اساس آزمون LSD اختلاف معنی‌داری در سطح ۵ درصد ندارند.



شکل ۴-۸۸- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی در شرایط تنش سرب بر میزان آنتوسیانین گیاه گلرنگ. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD است. (آزمایش گلدانی)



شکل ۴-۸۹- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی در شرایط تنش سرب بر میزان آنتوسیانین گیاه گلرنگ. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD است. (آزمایش مزرعه‌ای)

۴-۸-۹- رنگیزه‌های فتوسنتزی

در آزمایش گلدانی، نتایج جدول تجزیه واریانس (جدول پیوست ۱۱) نشان داد که تأثیر تیمارهای اصلی روی، سرب و کلسیم بر میزان کلروفیل a و b، کلروفیل کل و نیز اثر اصلی روی و سرب بر میزان کاروتنوئید و نسبت کلروفیل a/b از لحاظ آماری معنی‌دار بود و در بین تیمارهای مورد آزمایش، اثرات

متقابل سرب و روی بر میزان کلروفیل a و b، نسبت کلروفیل a/b، کلروفیل کل معنی‌دار بود. محلول-پاشی روی تأثیر معنی‌داری بر کاهش اثرات نامطلوب سرب داشت. جذب برگی روی سبب حفاظت از کلروفیل a و b و افزایش مقدار آنها هم در گیاهان شاهد و هم در شرایط تنش سرب گردید، به‌طوری-که در تیمار جذب خاکی سرب در اثر محلول‌پاشی روی میزان کلروفیل a و b حتی بیشتر از گیاهان شاهد شد و در تیمار کاربرد توأم سرب، جذب برگی روی (۲۰ میلی‌مولار) میزان کلروفیل a را ۵۶ درصد و میزان کلروفیل b را ۹۲ درصد نسبت به سطح صفر روی افزایش داد. شایان ذکر است که تنها در گیاهانی که آلوده به سرب نبودند (شاهد) اختلاف معنی‌داری بین دو غلظت ۱۰ و ۲۰ میلی‌مولار روی وجود داشت و در نهایت از بین ۱۲ ترکیب تیماری مورد مطالعه بیشترین مقدار کلروفیل a و b در شرایط عدم تنش سرب و در اثر محلول‌پاشی روی با غلظت ۲۰ میلی‌مولار ثبت گردید (شکل ۴-۹۰ و ۴-۹۱). همانطورکه نتایج مقایسه میانگین شکل ۴-۹۲ نشان می‌دهد اثر محلول‌پاشی روی تنها در تیمار کاربرد توأم سرب بر نسبت کلروفیل a/b معنی‌دار بود. بیشترین نسبت کلروفیل a/b در کاربرد توأم سرب که هیچ عنصر روی دریافت نکرده بودند مشاهد گردید و با محلول‌پاشی روی در همین سطح تنش میزان آن کاهش یافت. اثر محلول‌پاشی روی نیز در شرایط تنش سرب بر میزان کلروفیل کل معنی‌دار بود و در همه سطوح تنش موجب افزایش میزان کلروفیل کل گردید. در تیمار محلول‌پاشی سرب و تیمار خاکی بین دو غلظت کاربردی روی تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد و در کاربرد توأم سرب با محلول‌پاشی روی در غلظت ۲۰ میلی‌مولار میزان کلروفیل کل ۱۰۳ درصد نسبت به تیمار عدم مصرف روی افزایش نشان داد (شکل ۴-۹۳). تغذیه گیاه با کلسیم نیز تأثیر معنی‌داری بر میزان کلروفیل داشت و مقدار کلروفیل a و b و کلروفیل کل را به ترتیب ۷، ۱۲ و ۹ درصد نسبت به سطح صفر کلسیم افزایش داد (جدول ۴-۲۴). مقدار کاروتنوئید در جذب خاکی و جذب برگی سرب به ترتیب ۳۲ و ۴۱ درصد کاهش یافت و کاربرد توأم سرب تفاوت معنی‌داری از لحاظ آماری با تیمار جذب برگی سرب نداشت. در مقابل محلول‌پاشی روی با غلظت‌های ۱۰ و ۲۰ میلی‌مولار این صفت را به‌ترتیب ۲۱ و ۴۳ درصد بهبود بخشید (جدول ۴-۲۴).

نتایج روابط رگرسیونی بین غلظت سرب در برگ و میزان کلروفیل a در آزمایش گلدانی نشـان داد که با افزایش تجمع سرب در برگ، میزان کلروفیل a ۰/۱۳ میلی‌گرم بـر گـرم وزن تـر کـاهش یافـت (شکل ۴-۹۴).

در آزمایش مزرعه‌ای، نتایج جدول تجزیه واریانس(جدول پیوست ۱۲) نشان داد که تأثیر تیمارهای اصلی روی، سرب و کلسیم بر میزان کلروفیل b، کاروتنوئید و نیز اثر اصـلی روی و سـرب بـر میـزان کلروفیل a، نسبت کلروفیل a/b و کلروفیل کل از لحاظ آماری معنی‌دار بود و در بین تیمارهای مـورد آزمایش، اثرات متقابل سرب و روی بر میزان کلروفیل b ، نسـبت کلروفیـل a/b، کلروفیـل کـل و اثـر متقابل کلسیم و سرب و اثر سه جانبه بر میزان کلروفیل a و کلروفیل کل معنی‌دار بـود. تـنش سـرب مقدار کاروتنوئید را نسبت به شاهد کاهش داد و بیشترین میزان کاهش در غلظت ۱ میلی‌مولار سرب مشاهده گردید (جدول ۴-۲۵). تغذیه گیاه با کلسیم نتوانست اثرات سمی سرب را بر مقدار کلروفیل a کاهش دهد و همان‌طور که در شکل ۴-۹۵ مشاهده می‌شود، کلسیم تنهـا در گیاهـان شـاهد (بـدون سرب) مؤثر واقع شد و بیشترین مقدار کلروفیل a در کاربرد کود کلسیم در شرایط عدم تنش به‌دست آمد. بر اساس نتایج مقایسه میانگین شکل ۴-۹۶، اثر محلول‌پاشی کلسیم بر میزان کلروفیل کل تنهـا در شرایط عدم تنش سرب معنی‌دار بود و میزان آن را ۱۲ درصد نسبت به تیمـار عـدم مصـرف کـود افزایش داد.

جذب برگی روی در غلظت پایین سرب مفید نبود ولی تأثیر معنی‌داری بـر میـزان کلروفیـل b در غلظت بالای سرب (۱ میلی‌مولار) و سطح صفر سرب داشت، به‌طوری که مقدار کلروفیل b در برگ در تنش شدید سرب (۱ میلی‌مولار) در اثر محلول‌پاشی روی حدود ۲ برابر شد و با گیاهان شاهد در یک گروه آماری قرار گرفت. همچنین محلول‌پاشی روی در گیاهانی که آلوده به سرب نبود موجب افزایش معنی‌دار این صفت شد و بیشترین مقدار کلروفیل b را به نمایش گذاشت. تفاوتی بین دو غلظت عنصر روی از لحاظ تأثیرگذاری روی کلروفیل‌ها در شرایط مزرعه‌ای مشاهده نشد (شکل ۴-۹۷). نتایج بـه-دست آمده از این پـژوهش نشـان داد کـه اثـر محلـول‌پاشـی روی بـر نسـبت کلروفیـل a/b تنهـا در

شدیدترین سطح تنش سرب (۱ میلی‌مولار) معنی‌دار بود و هر دو غلظت ۱۰ و ۲۰ میلی‌مولار روی به یک اندازه این صفت را کاهش داد (شکل ۴-۹۸). نتایج شکل ۴-۹۹ تأثیر ترکیبات تیماری حاصل از سرب و کود روی را بر میزان کلروفیل کل برگ گیاه نشان می‌دهد. محلول‌پاشی روی نیز موجب کاهش اثرات نامطلوب سرب بر میزان کلروفیل کل گردید. با توجه به این شکل بیشترین میزان مربوط به گیاهانی بود که تحت تنش سرب نبوده و عنصر روی دریافت کردند و کمترین مقدار در گیاهانی دیده شد که محلول سرب را با غلظت ۱ میلی‌مولار دریافت کرده ولی با روی تیمار نشده بودند.

در بررسی آثار سه جانبه تیمارها نیز مشخص گردید که کاربرد توأم کلسیم با هر دو غلظت روی در شرایط عدم تنش سرب تفاوت معنی‌داری بر میزان کلروفیل a نداشت و در سطح تنش ۰/۵ و ۱ میلی‌مولار سرب استفاده از کلسیم و روی تا اندازه‌ای سبب افزایش میزان کلروفیل گردید (شکل ۴-۱۰۰). نتایج مقایسه میانگین اثر بهم‌کنش سه جانبه سرب، روی و کلسیم بر میزان کلروفیل کل نشان داد (شکل ۴-۱۰۱)، در شرایط عدم تنش سرب، کاربرد توأم کلسیم و روی نقش مؤثری بر افزایش میزان کلروفیل کل داشت و با غلظت ۲۰ میلی‌مولار روی در شرایط عدم مصرف کلسیم در یک گروه آماری قرار گرفت. در تنش سرب، کاربرد کلسیم و روی موجب کاهش اثرات نامطلوب سرب و افزایش میزان کلروفیل کل نسبت به تیمار عدم مصرف کود گردید و در تنش ۰/۵ و ۱ میلی‌مولار سرب، بین دو غلظت کاربردی روی در گیاهان تیمار شده با کلسیم تفاوت معنی‌داری مشاهده نگردید.

همان‌طور که در جدول ۴-۲۴ مشاهده می‌شود، کلسیم تنها بر مقدار کلروفیل b معنی‌دار بود و میزان آن را ۱۲ درصد افزایش داد. کاربرد عنصر روی و دو برابر شدن غلظت آن مقدار کارتنوئید ۱/۵۵ میلی‌گرم در گرم وزن تر معادل ۴۵ درصد افزایش داد (جدول ۴-۲۴). کاربرد کلسیم با غلظت ۱۰ میلی‌مولار نیز تأثیر مثبتی در افزایش مقدار کارتنوئید داشت و در این تیمار میزان آن ۱/۳۳ و در تیمار شاهد (عدم کاربرد کود) ۱/۲۵ میلی‌گرم در گرم وزن تر بود (جدول ۴-۲۴).

فتوسنتز یکی از مهمترین فرآیندهای فیزیولوژیکی گیاه می‌باشد که تحت تأثیر تنش‌های محیطی مانند تنش فلزات سنگین قرار می‌گیرد. تجمع سرب در گیاه موجب تغییر در ساختار کلروپلاست و

ممانعت از سنتز کلروفیل و فعالیت آنزیم‌های چرخه کالوین می‌شود (شرما و دوبی، ۲۰۰۵). کاروتنوئیدها نقش حفاظتی در برابر گونه‌های فعال اکسیژن تولید شده در تنش اکسیداتیو را دارد (سانیتا دی تپی و گابریلا، ۱۹۹۹). بر اساس نتایج این تحقیق میزان کاروتنوئیدها در تنش سرب کاهش یافت. کاهش رنگیزه‌های کاروتنوئیدی می‌تواند به دلیل نقش آنها در سمیت‌زدایی کلروفیل و فرونشانی کلروفیل‌های برانگیخته و ممانعت از تشکیل گونه‌های فعال اکسیژن است که در نهایت سبب از هم پاشیدن ساختار کاروتنوئیدها می‌گردد (سانیتا دی تپی و گابریلا، ۱۹۹۹). محققین بیان کردند که فعالیت آنزیم کلیدی بیوسنتز کلروفیل یعنی اسید دلتا -آمینولوولینیک دهیدروژناز در حضور یون های سرب در محیط به شدت متوقف شده و از میزان کلروفیل و رشد گیاه کاسته می‌شود (پراساد و پراساد، ۱۹۸۷). لذا کاهش میزان رنگیزه‌های فتوسنتزی در گیاهان تحت تیمار سرب ممکن است به دلیل آسیب‌های اکسیداتیو باشد که باعث بازدارندگی مراحل مختلف سنتز کلروفیل و رنگیزه‌های دیگر می‌شود. محققین گزارش کردند که فلزات سنگین، در جذب و انتقال عناصر غذایی مؤثر بر ساخت کلروفیل اختلال ایجاد می‌کند که موجب بازدارندگی در سنتز کلروفیل و رنگیزه‌های دیگر می‌شود (مبین و خان، ۲۰۰۷). غلظت‌های بالای سرب در گیاه از طریق اختلال در فعالیت طبیعی ناقل‌های غشاء باعث کاهش جذب عناصر غذایی ضروری مانند کلسیم، منیزیم و آهن می شود و در نتیجه گیاهان تیمار شده با سرب علایم کمبود این عناصر ضروری را نشان می‌دهند (شرما و دوبی، ۲۰۰۵). نتایج آزمایش مزرعه‌ای نشان داد که کاربرد کلسیم و روی در شرایط تنش تأثیر مثبتی بر حفظ ساختار و سنتز کلروفیل دارد و بر اساس نتایج گلدانی، تأثیر تغذیه گیاه با روی بر افزایش مقاومت گیاه در جهت حفظ غلظت کلروفیل موثر بود. با توجه به نتایج محققین، تنش سرب بر جذب و انتقال عناصر غذایی ضروری از جمله کلسیم اثر منفی دارد، بنابراین گاهی حتی با وجود کلسیم در خاک مزرعه امکان جذب آن وجود نخواهد داشت، با افزایش غلظت آن در برگ‌ها از طریق محلول‌پاشی می-توان سبب حفظ و سنتز کلروفیل برگ و جلوگیری از کمبود آن در شرایط تنش سرب گردید. نتایج مطالعات نشان داده است که کمبود کلسیم سبب زرد شدن و پیری برگ‌ها می‌شود که ناشی از کاهش

بیوسنتز کلروفیل در گیاهان است (باین و همکاران، ۲۰۱۳). کلسیم یک ماده غذایی مهم است کـه در رشد و توسعه گیاه و سنتز کلروفیل نقش دارد (وایت، ۲۰۰۰). روی از عناصر غذایی کم مصرفی اسـت که در حفاظت از کلروپلاست و واکنش‌های فتوشیمیایی مـرتبط بـا آن، متابولیسـم سـلول و سـمیت زدایی رادیکال‌های آزاد در تنش‌ها نقش مهمی ایفا می‌کند (ککمـک، ۲۰۰۰). بـر اسـاس نتـایج ایـن تحقیق، کاربرد کود روی در شرایط تـنش سـبب افـزایش محتـوای کلروفیـل a و b و کـاهش اثـرات نامطلوب تنش سرب در گیاه گلرنگ گردید که نشان دهنده بقاء گیاه در شرایط تنش و انجام فتوسنتز می‌باشد. روی به‌طور مستقیم بر تشکیل کلروفیل مؤثر نیست، ولی می‌تواند بـر غلظـت عناصـر غـذایی مانند آهن و منیزیم درگیر در تشکیل کلروفیل یا عناصری که قسمتی از مولکول کلروفیل هستند مؤثر باشد (کایا و هیگس، ۲۰۰۲). نتایج محققین دیگر نیز نشان داد که کاربرد محلول‌پاشی سـولفات روی با غلظت ۵ در هزار اثر معنی‌داری بر افزایش میزان کلروفیل داشت (مرادی تلاوت وهمکـاران، ۱۳۹۴). گزارش شده است که محلول‌پاشی روی از طریق تأثیر بر رشد ریشه گیاه می‌تواند جذب عناصر غذایی مورد نیاز گیاه را در سنتز کلروفیل بهبود ببخشد (کایـا و هـیگس، ۲۰۰۲). همچنـین محققـین بیـان کردند که عنصر روی موجب افزایش میزان کلروفیل و در نتیجه افزایش وزن خشک در گیاه می‌شـود (صفیان و همکاران، ۱۳۸۹).

جدول ۴-۲۴- مقایسه میانگین اثرهای ساده سطوح مختلف تنش سرب و محلول‌پاشی روی و کلسیم بر میزان کلروفیل a، b، کلروفیل کل و کاروتنوئید گیاه گلرنگ (آزمایش گلدانی)

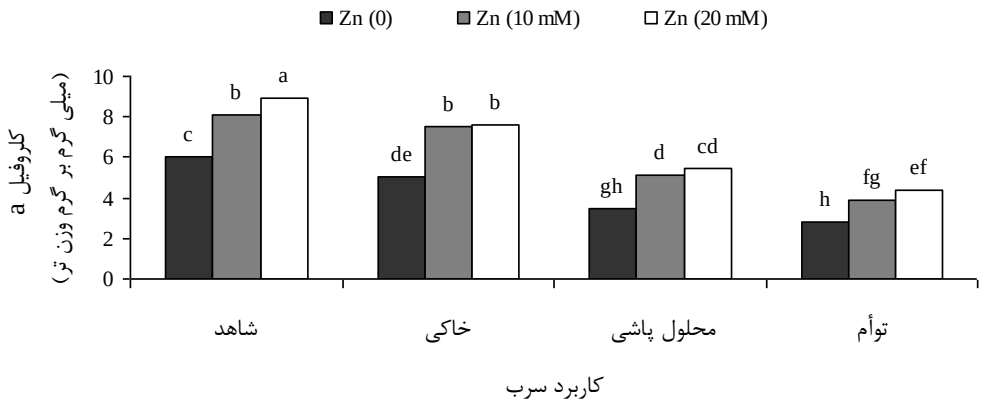
تیمار	کلروفیل a	کلروفیل b	کلروفیل کل	کاروتنوئید
	میلی‌گرم بر گرم وزن تر			
سرب (میلی‌مولار)				
صفر	۷/۶۸ a	۶/۵۸ a	۱۴/۲۶a	۲/۱۰ a
کاربرد خاکی	۶/۷۵ b	۵/۷۹ b	۱۲/۵۴ b	۱/۴۲ b
محلول‌پاشی	۴/۶۸ c	۳/۰۹ c	۷/۷۷ c	۱/۲۳ c
کاربرد خاکی و محلول‌پاشی	۳/۷۳ d	۱/۸۱ d	۵/۵۴ d	۱/۲۳ c
روی (میلی‌مولار)				
صفر	۴/۳۴ c	۲/۸۳ c	۷/۱۷ c	۱/۲۳ c
۱۰	۶/۱۵ b	۴/۶۹ b	۱۰/۸۵ b	۱/۵۰ b
۲۰	۶/۶۳ a	۵/۴۴ a	۱۲/۰۷ a	۱/۷۶ a
کلسیم (میلی‌مولار)				
صفر	۵/۵۰ b	۴/۰۸ b	۹/۵۸ b	۱/۵۱ a
۱۰	۵/۹۲ a	۴/۵۶ a	۱۰/۴۸ a	۱/۴۸ a

میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک در هر ستون و هر تیمار بر اساس آزمون LSD اختلاف معنی‌داری در سطح ۵ درصد ندارند.

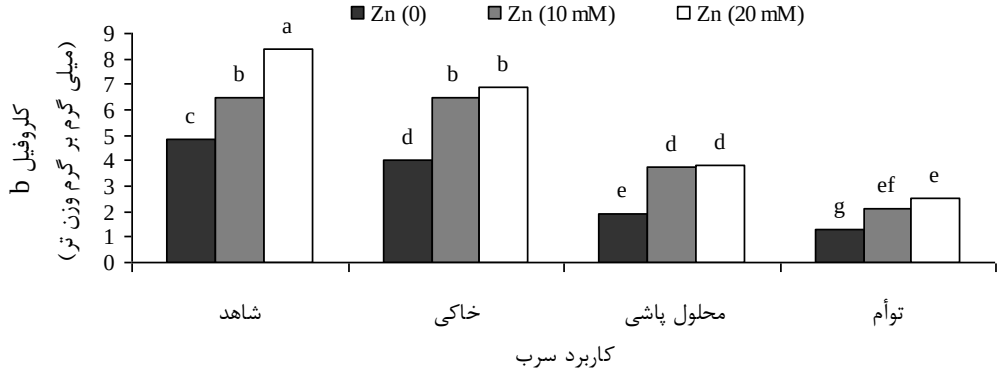
جدول ۴-۲۵- مقایسه میانگین اثرهای ساده سطوح مختلف تنش سرب و محلول‌پاشی روی و کلسیم بر میزان کلروفیل b و کاروتنوئید گیاه گلرنگ (آزمایش مزرعه‌ای)

تیمار	کلروفیل b	کاروتنوئید
	میلی‌گرم بر گرم وزن تر	
سرب (میلی‌مولار)		
صفر	۸/۱۸ a	۱/۵۴ a
۰/۵	۵/۴۶ b	۱/۲۹ b
۱	۵/۰۰ c	۱/۰۴ c
روی (میلی‌مولار)		
صفر	۵/۰۶ b	۱/۰۷ c
۱۰	۶/۵۹ a	۱/۲۶ b
۲۰	۶/۹۹ a	۱/۵۵ a
کلسیم (میلی‌مولار)		
صفر	۵/۸۸ b	۱/۲۵ b
۱۰	۶/۵۵ a	۱/۳۳ a

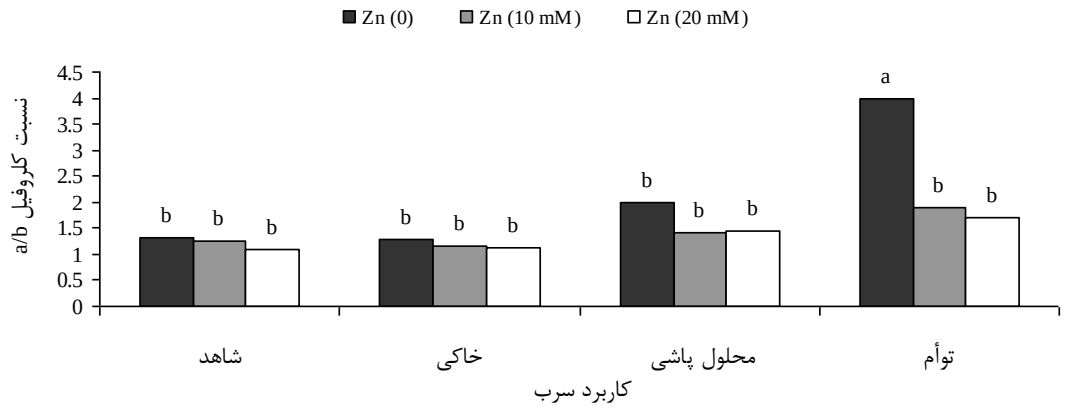
میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک در هر ستون و هر تیمار بر اساس آزمون LSD اختلاف معنی‌داری در سطح ۵ درصد ندارند.



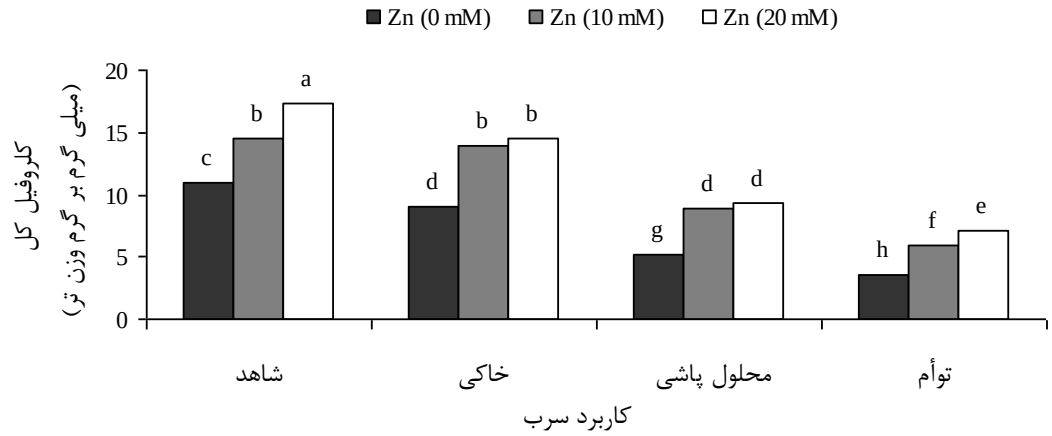
شکل ۴-۹۰- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی در شرایط تنش سرب بر میزان کلروفیل a گیاه گلرنگ. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD است. (آزمایش گلدانی)



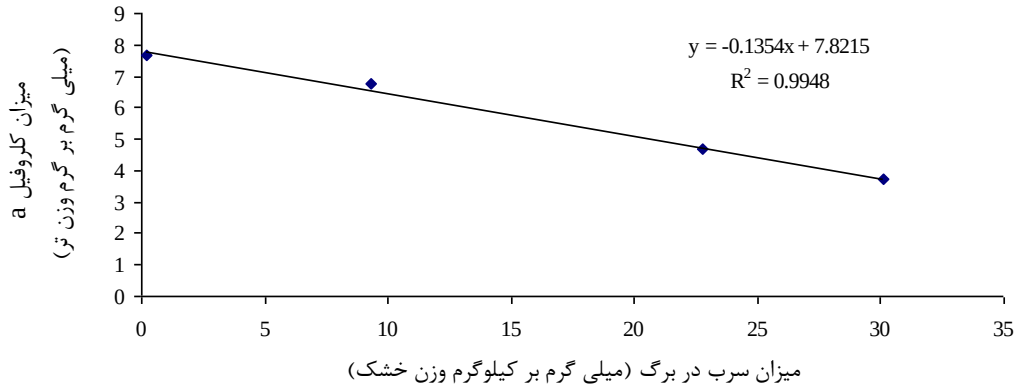
شکل ۴-۹۱- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی در شرایط تنش سرب بر میزان کلروفیل b گیاه گلرنگ. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD است. (آزمایش گلدانی)



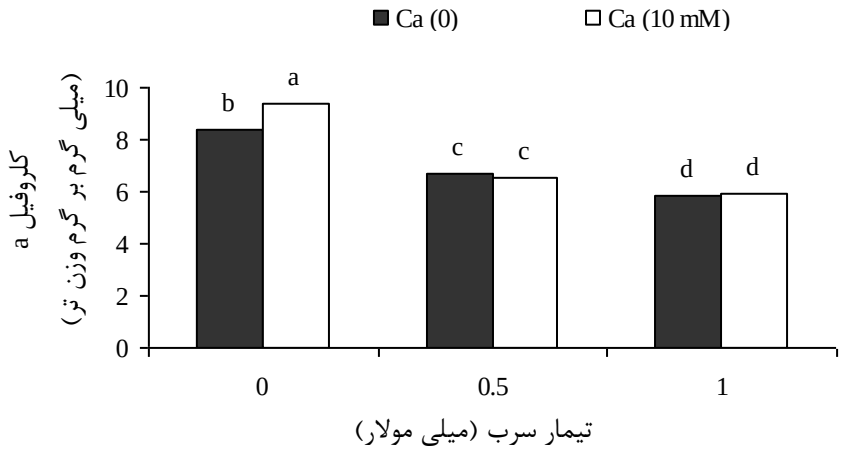
شکل ۴-۹۲- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی در شرایط تنش سرب بر نسبت کلروفیل a/b گیاه گلرنگ. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD است. (آزمایش گلدانی)



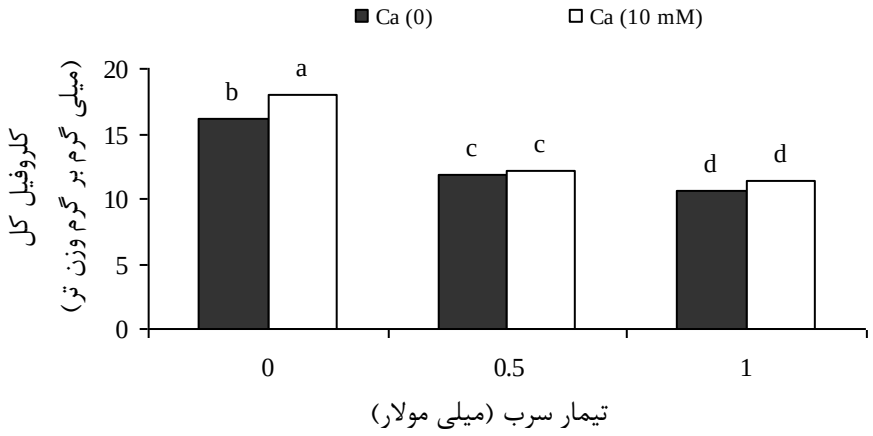
شکل ۴-۹۳- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی در شرایط تنش سرب بر میزان کلروفیل کل گیاه گلرنگ. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD است. (آزمایش گلدانی)



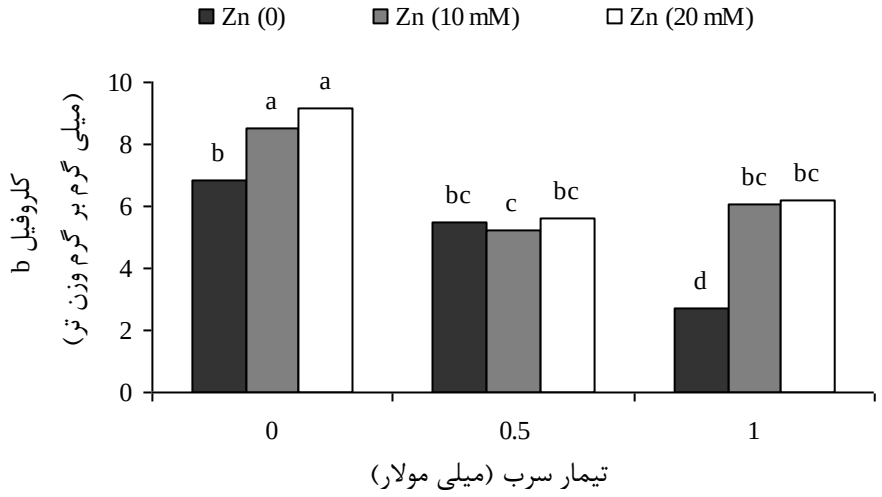
شکل ۴-۹۴- رابطه بین محتوای سرب در برگ و میزان کلروفیل a (آزمایش گلدانی)



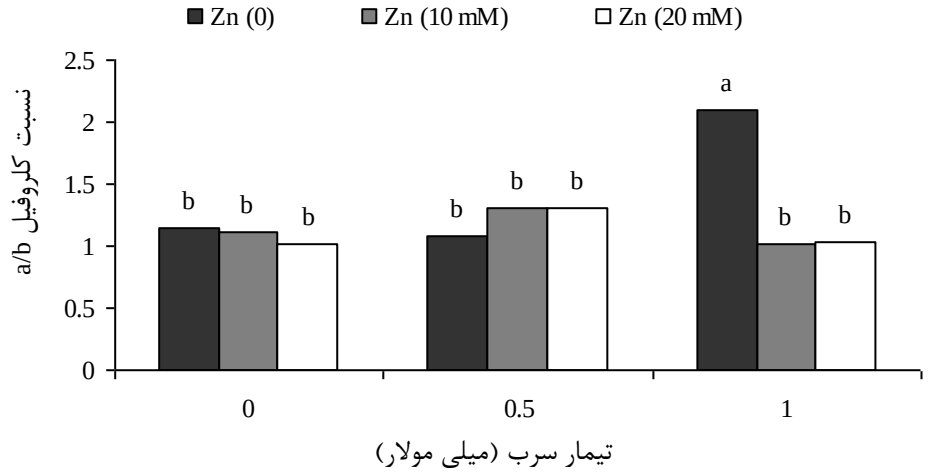
شکل ۴-۹۵- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی کلسیم در شرایط تنش سرب بر میزان کلروفیل a گیاه گلرنگ. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD است. (آزمایش مزرعه‌ای)



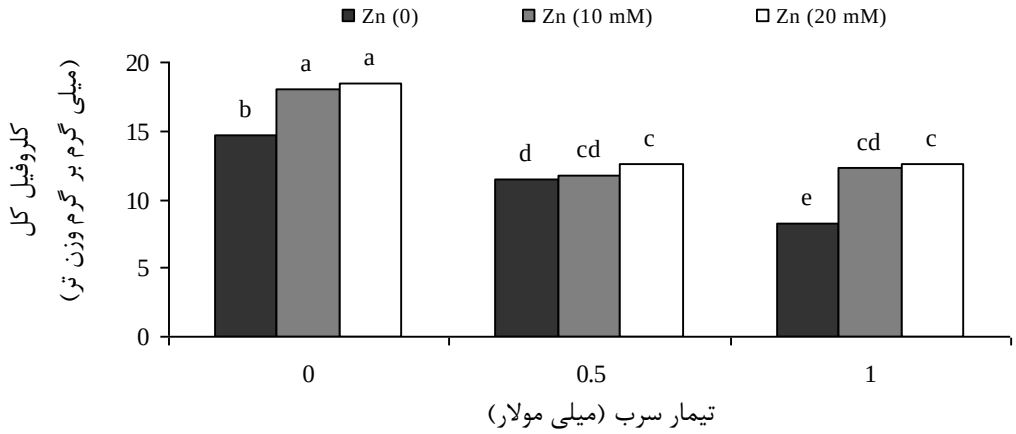
شکل ۴-۹۶- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی کلسیم در شرایط تنش سرب بر میزان کلروفیل کل گیاه گلرنگ. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD است. (آزمایش مزرعه‌ای)



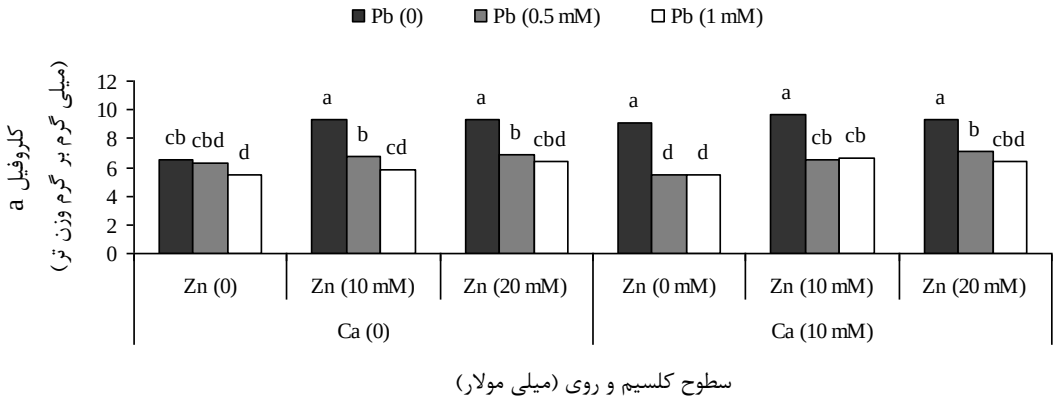
شکل ۴-۹۷- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی در شرایط تنش سرب بر میزان کلروفیل b گیاه گلرنگ. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD است. (آزمایش مزرعه‌ای)



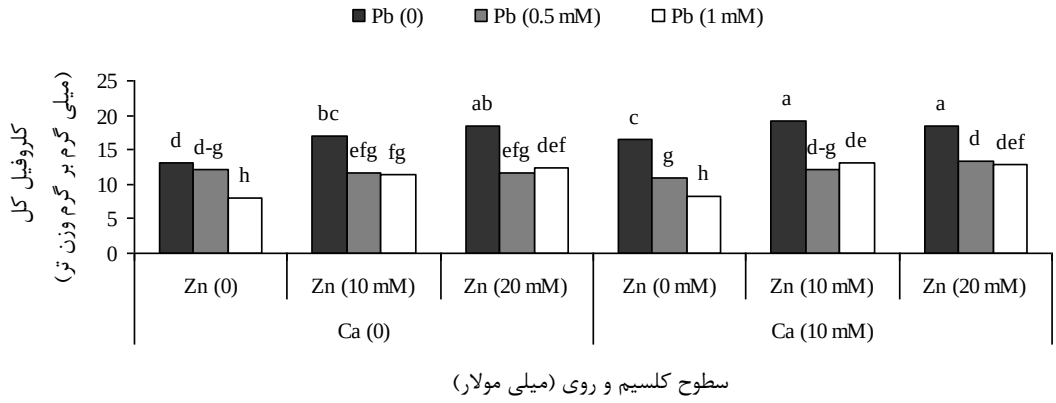
شکل ۴-۹۸- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی در شرایط تنش سرب بر نسبت کلروفیل a/b گیاه گلرنگ. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD است. (آزمایش مزرعه‌ای)



شکل ۴-۹۹- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی در شرایط تنش سرب بر میزان کلروفیل کل گیاه گلرنگ. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD است. (آزمایش مزرعه‌ای)



شکل ۴-۱۰۰- مقایسه اثر برهمکنش سه‌جانبه روی، کلسیم و سرب بر میزان کلروفیل a در گیاه گلرنگ. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD است. (آزمایش مزرعه‌ای)



شکل ۴-۱۰۱- مقایسه اثر برهمکنش سه‌جانبه روی، کلسیم و سرب بر میزان کلروفیل کل در گیاه گلرنگ. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD است. (آزمایش مزرعه‌ای)

۴-۸-۱۰- غلظت سرب در برگ، ریشه و دانه

در آزمایش گلدانی، علاوه بر اثرات اصلی، تأثیر محلول‌پاشی روی و کلسیم در شرایط تنش سرب و نیز برهمکنش روی و کلسیم بر محتوای سرب در برگ معنی‌دار بود (جدول پیوست ۱۳)، به‌طوری که

این صفت در گیاهانی که محلول روی را با غلظت ۲۰ میلی‌مولار دریافت کرده بودند، در جذب خاکی ۷۲ درصد، جذب برگی ۶۹ درصد و در کاربرد توأم سرب ۶۵ درصد نسبت به عدم محلول‌پاشی روی کمتر بود، البته تأثیر غلظت پایین‌تر روی (۱۰ میلی‌مولار) نیز به لحاظ کاهش میزان سرب در برگ معنی‌دار و قابل توجه بود (شکل ۴-۱۰۲). همچنین تغذیه گیاه با کود کلسیم میزان غلظت سرب در برگ را در هر سه سطح حضور سرب به‌طورمعنی‌داری کاهش داد. مقدار این کاهش در شدیدترین سطح تنش (کاربرد توأم سرب) ۲۲ درصد بود (شکل۴-۱۰۳). همان‌طورکه نتایج مقایسه میانگین شکل ۴-۱۰۴ نشان می‌دهد استفاده همزمان از روی ۲۰ میلی‌مولار و کلسیم ۱۰ میلی‌مولار میزان غلظت سرب در برگ ۶۷ درصد کمتر از گیاهان شاهد بود و در تیمار کلسیم، بین دو غلظت کاربردی روی تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد.

محتوای سرب در ریشه تحت تأثیر تیمارهای سرب و روی و اثر متقابل آنها در سطح احتمال ۱ درصد قرار گرفت (جدول پیوست ۱۳). جذب برگی روی با هر دو غلظت انباشت سرب در ریشه را نیز مانند برگ کاهش داد، به‌عنوان مثال محلول‌پاشی روی با غلظت ۲۰ میلی‌مولار در شدیدترین سطح تنش سرب (کاربرد توأم سرب)، میزان تجمع سرب در ریشه را ۳۹ درصد نسبت به عدم مصرف روی کاهش داد (شکل ۴-۱۰۵).

بر اساس نتایج جدول تجزیه واریانس، همه منابع تغییر بر محتوای سرب در دانه معنی‌دار بود (جدول پیوست ۱۳). دانه گیاهانی که در معرض سرب (به ویژه از طریق خاک و توأم) قرار گرفتند ولی عنصر روی را دریافت نکردند، بیشترین آلودگی به سرب را داشتند. استفاده از روی در همه سطوح تیمار سرب موجب کاهش معنی‌دار در میزان غلظت سرب در دانه گردید به‌طورمشخص در بالاترین غلظت سرب (کاربرد توأم سرب)، کاربرد کود روی با غلظت ۱۰ و ۲۰ میلی‌مولار میزان آن را به ترتیب ۳۹ و ۵۰ درصد کاهش داد (شکل ۴-۱۰۶). همچنین تغذیه گیاه با کود کلسیم میزان غلظت سرب در دانه را در کاربرد خاکی، محلول‌پاشی و کاربرد توأم سرب به ترتیب ۲۳، ۴۰ و ۴۲ درصد کمتر کرد (شکل۴-۱۰۷). نتایج مقایسه میانگین در شکل ۴-۱۰۸ نشان می‌دهد، کاربرد کلسیم

با هر دو غلظت روی (۱۰ و ۲۰ میلی‌مولار) به‌طور معنی‌داری میزان غلظت سرب در دانه را نسبت به تیمار شاهد کاهش داد. تأثیر مثبت کاربرد توأم کلسیم و روی در راستای کاهش میزان تجمع سرب در دانه گیاه هم در شرایط عدم تنش و هم در شرایط تنش سرب مشهود بود (شکل ۴-۱۰۹).

در آزمایش مزرعه‌ای، میزان تجمع سرب در برگ از اثرات اصلی و نیز محلول‌پاشی کلسیم و روی در شرایط تنش سرب در سطح احتمال ۱ درصد تأثیر پذیرفت (جدول پیوست ۱۴). در هر دو شکل ۴-۱۱۰ و ۴-۱۱۱ مشاهده می‌شود که محلول‌پاشی سرب و افزایش غلظت آن به شکل معنی‌دار میزان سرب در برگ را افزایش داد. بیشترین مقادیر سرب در برگ گیاهانی ثبت شد که روی و کلسیم دریافت نکرده بودند. در اثر جذب برگی کلسیم در شدیدترین میزان آلودگی سرب (۱ میلی‌مولار)، میزان تجمع سرب در برگ ۴۰ درصد کمتر بود (شکل ۴-۱۱۰). همچنین تغذیه گیاه با کود روی (غلظت ۲۰ میلی‌مولار)، در شرایط تنش سرب میزان غلظت سرب در برگ را در غلظت ۰/۵ میلی‌مولار سرب ۴۰ درصد و در غلظت ۱ میلی‌مولار سرب ۵۷ درصد نسبت به تیمار عدم مصرف روی کاهش داد (شکل ۴-۱۱۱).

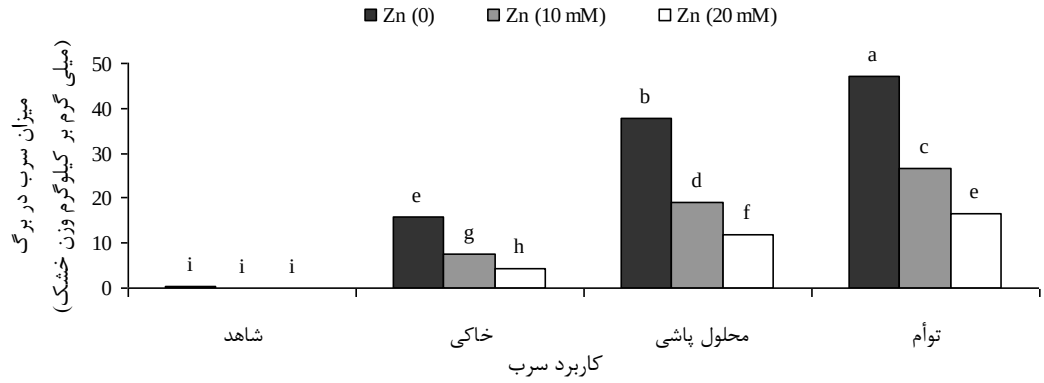
محلول‌پاشی روی تأثیر مثبتی بر کاهش انباشت سرب در دانه داشت و در غلظت ۰/۵ و ۱ میلی-مولار، کمترین مقدار در شرایط کاربرد کود روی (۲۰ میلی‌مولار) به‌دست آمد (شکل ۴-۱۱۲). همچنین در شرایط آلودگی سرب، مقدار تجمع سرب در دانه با جذب برگی کلسیم کاهش یافت و در غلظت ۱ میلی‌مولار سرب میزان این صفت در تیمار با کلسیم ۰/۹ و در شرایط عدم کاربرد کلسیم ۱/۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک بود (شکل ۴-۱۱۳). براساس نتایج مقایسه میانگین شکل ۴-۱۱۴، در هر سه سطح روی (صفر، ۱۰ و ۲۰ میلی‌مولار)، کاربرد کلسیم میزان سرب در دانه را به‌طور معنی‌داری کاهش داد، به‌طوری که کمترین مقدار آن در غلظت ۲۰ میلی‌مولار روی و در حضور کلسیم ثبت گردید. مقایسه برهمکنش سه‌جانبه اثر مثبت کاربرد توأم کلسیم و روی را در شرایط تنش سرب بر کاهش آلودگی دانه به سرب نشان داد که اگرچه کاربرد برگی عناصر روی و کلسیم به تنهایی موجب کاهش محتوای سرب در دانه در شرایط تنش سرب گردید ولی کاربرد توأم این دو

عنصر به مراتب مؤثرتر است و در شرایط مصرف کلسیم، کمترین میزان در غلظت ۲۰ میلی‌مولار روی مشاهده گردید (شکل ۴-۱۱۵).

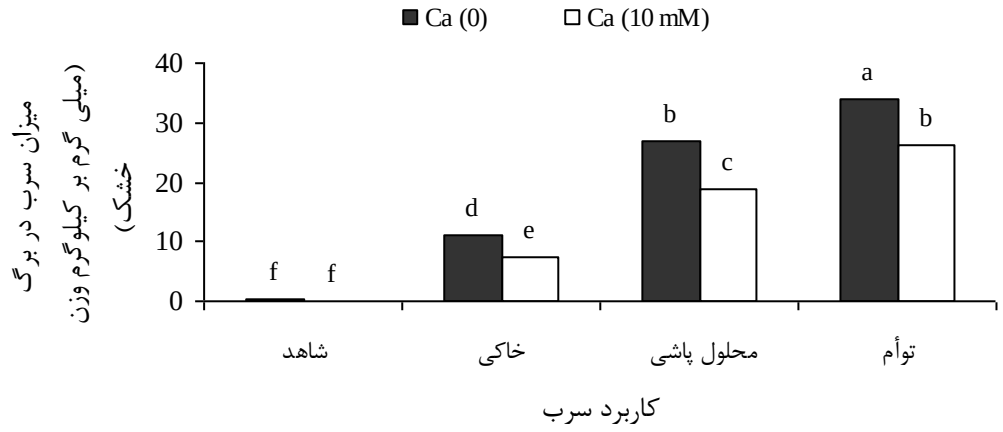
نتایج به دست آمده در این پژوهش نشان داد که غلظت بالای فلز سنگین سرب در محیط منجر به افزایش تجمع این یون سمی در بافت‌های گیاه گلرنگ گردید. گونه‌های مختلف گیاهی، عکس العمل‌ها و میزان حساسیت متفاوتی نسبت به آلاینده‌ها دارند، این تفاوت‌ها عمدتا به توانایی گیاه در محدود کردن جذب آلاینده و یا در صورت جذب آن، به سم‌زدایی و دفع سم مربوط می شود، دامنه طبیعی غلظت سرب در گیاهان ۰ تا ۲۰ میلی‌گرم در کیلوگرم و حد بحرانی آن از ۳۰ تا ۳۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم گزارش شده است (عباس‌پور، ۱۳۸۶). در مورد سرب بالاترین حد مجاز در مواد غذایی را ۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن ماده مرطوب گزارش کردند (فرایبرگ، ۲۰۱۴). تجمع بیشتر این یون سمی در ریشه، در تیمار خاکی سرب نسبت به تیمار محلول‌پاشی سرب ممکن است نتیجه سمیت زدایی سرب به دنبال تجمع اولیه در بافت ریشه و کاهش انتقال سرب به قسمت‌های هوایی گیاه باشد که با نتایج خودسار و همکاران (۲۰۰۱) همسو است. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد در تیمار محلول-پاشی سرب میزان تجمع سرب در ریشه نسبت به تیمار شاهد افزایش نشان داد که می‌توان چنین استنباط کرد که بخشی از سرب جذب شده در برگ به ریشه گیاه منتقل شده است که نشان از قابلیت انتقال‌پذیری سرب به قسمت‌های مختلف گیاه می‌باشد. بنابراین بر اساس نتایج به‌دست آمده به نظر می‌رسد در مناطق آلوده به سرب جذب این یون سمی هم از طریق برگ و هم از طریق خاک صورت می‌پذیرد که اثرات نامطلوبی بر رشد گیاه خواهد داشت. محققین دیگر نیز گزارش کرده‌اند که در تیمار کاربرد خاکی سرب، بخش زیادی از این عنصر در ریشه‌ها تجمع می‌یابد (نورانی آزاد و همکاران، ۱۳۹۰). در مطالعه‌ای مربوط به میزان غلظت سرب در رویشگاه‌های آلوده، نتایج نشان داد که میزان جذب سرب در ریشه درختان بیشتر از اندام‌های هوایی بود (خادمی و کرد، ۱۳۸۹).

نتایج این تحقیق نشان داد که تغذیه گیاهی با کود روی و کلسیم در شرایط حضور فلز سنگین سرب در کاهش تجمع سرب و انتقال‌پذیری آن به اندام‌های مختلف گیاه مؤثر است. شرما و دوبی

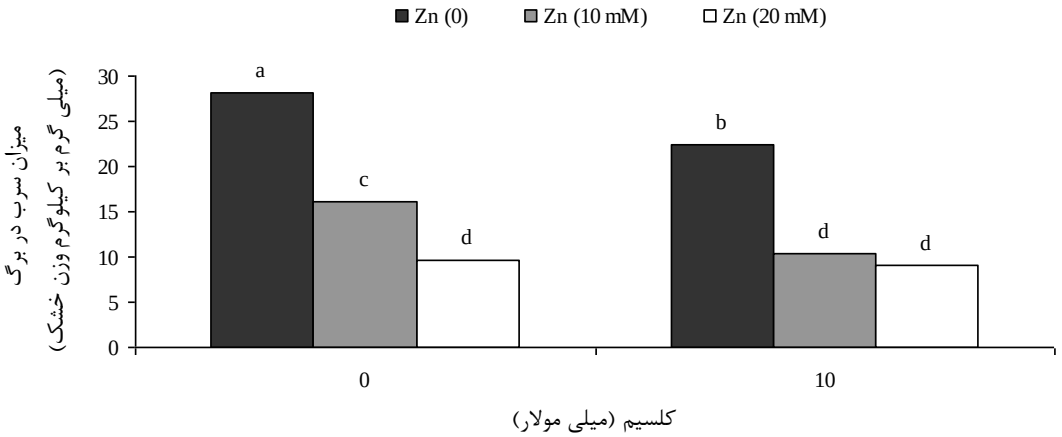
(۲۰۰۵) گزارش کردند که سرب به‌وسیله کانال‌های کلسیم در گیاه انتقال می‌یابد، لذا تغذیه گیاه با کلسیم، غلظت این عنصر را اطراف کانال‌های کلسیم افزایش می‌دهد و با انتقال یون‌های سمی سرب در گیاه رقابت می‌کند. همچنین محققین بیان کردند که کلسیم از طریق رقابت با جریان یون فلزی در گیاه جذب و انتقال فلزات سنگین سرب و نیکل را به‌طور معنی‌داری کاهش می‌دهد (گارلند و ویلکینز، ۱۹۸۱؛ صدیقی و همکاران، ۲۰۱۱). همچنین نتایج مطالعات نشان داده است که عنصر روی از طریق تأثیر بر واکنش‌های فیزیولوژیکی گیاه و اثرات آنتاگونیستی که با یون سرب در گیاه دارد؛ سبب حفظ بقاء گیاه در شرایط تنش می‌شود (هی و همکاران، ۲۰۰۴). بنابراین تغذیه مناسب گیاه می‌تواند تحمل آن به تنش سرب را به‌وسیله تأثیر بر واکنش‌های فیزیولوژیکی گیاه افزایش دهد.



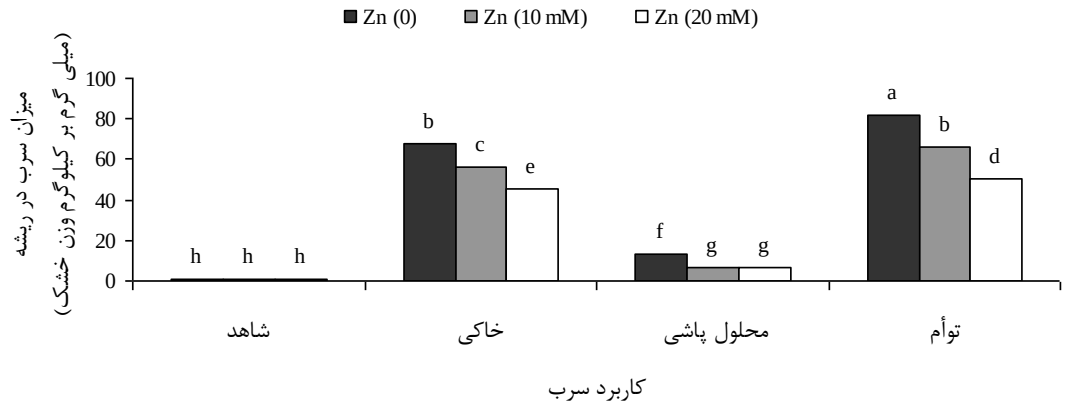
شکل ۴-۱۰۲- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی در شرایط تنش سرب بر محتوای سرب در برگ گلرنگ. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD است. (آزمایش گلدانی)



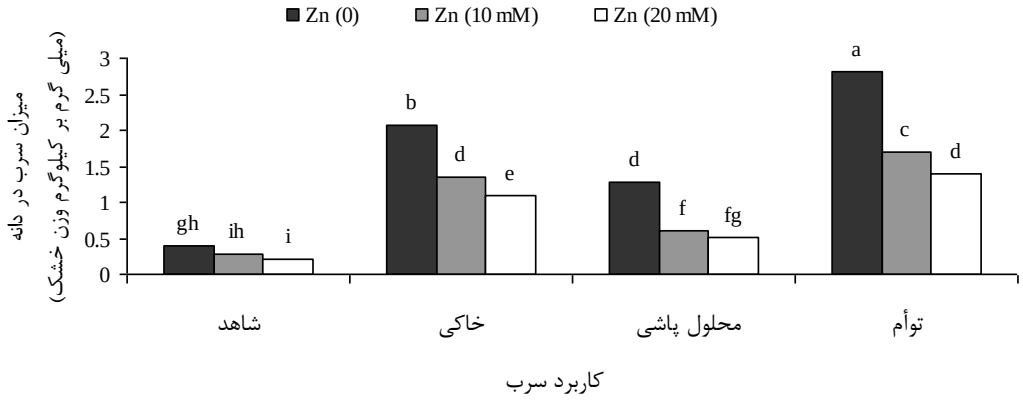
شکل ۴-۱۰۳- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی کلسیم در شرایط تنش سرب بر محتوای سرب در برگ گلرنگ. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD است. (آزمایش گلدانی)



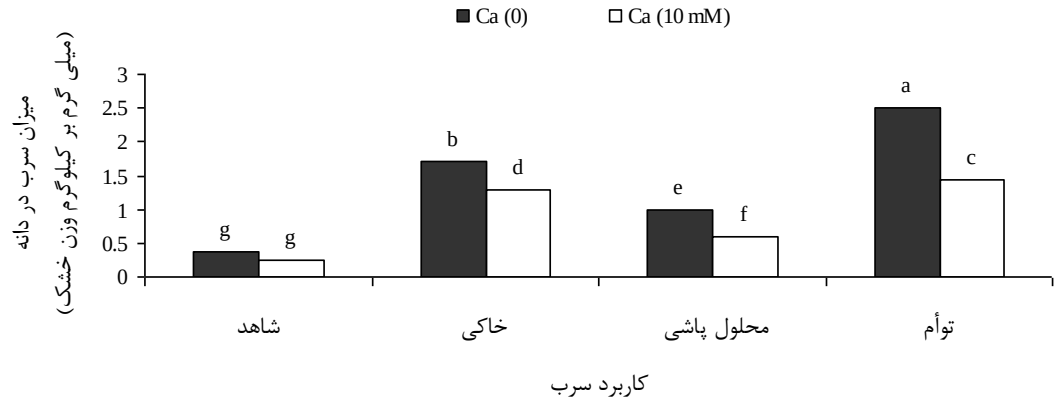
شکل ۴-۱۰۴- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی کلسیم و روی بر محتوای سرب در برگ گلرنگ. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD است. (آزمایش گلدانی)



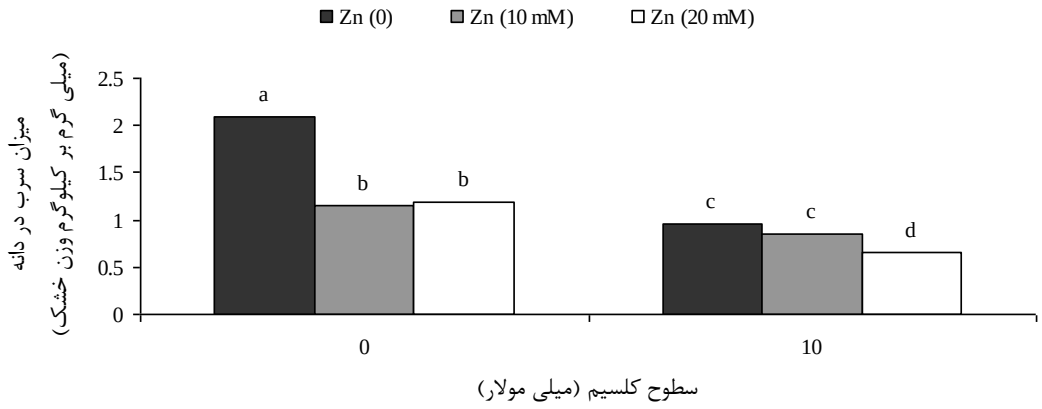
شکل ۴-۱۰۵ - مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی در شرایط تنش سرب بر محتوای سرب در ریشه گلرنگ. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD است. (آزمایش گلدانی)



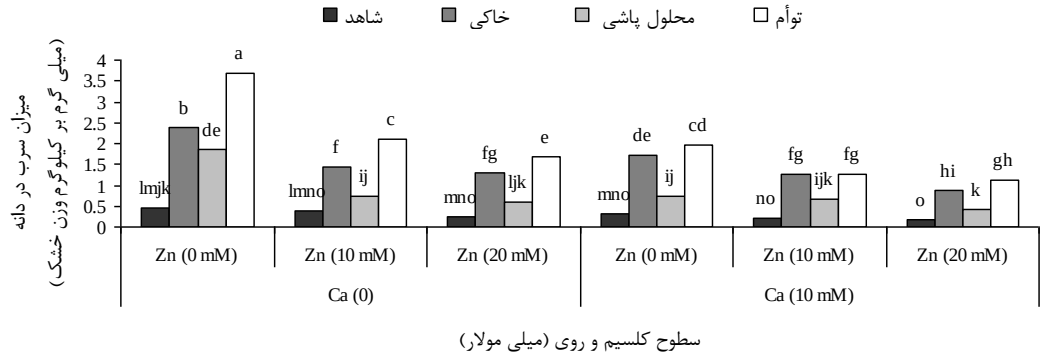
شکل ۴-۱۰۶- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی در شرایط تنش سرب بر محتوای سرب در دانه گلرنگ. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD است. (آزمایش گلدانی)



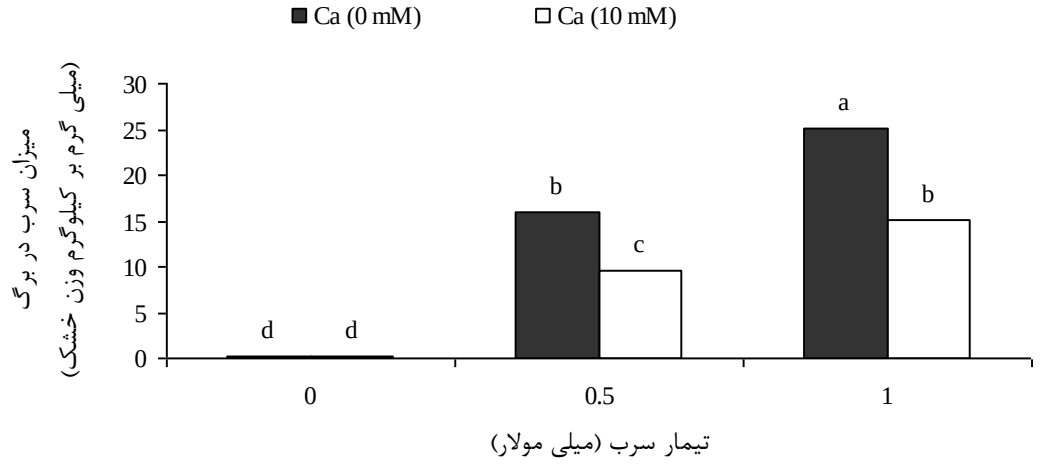
شکل ۴-۱۰۷- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی کلسیم در شرایط تنش سرب بر محتوای سرب در دانه گلرنگ. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD است. (آزمایش گلدانی)



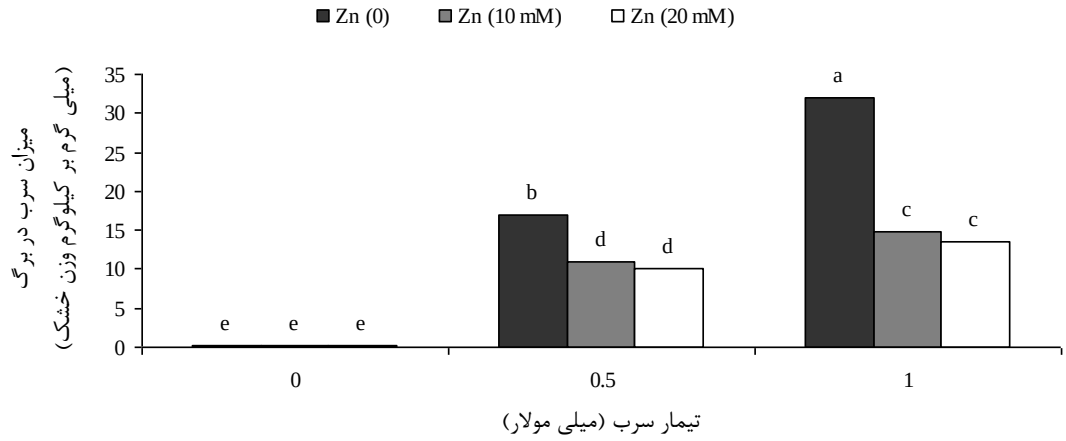
شکل ۴-۱۰۸- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی کلسیم و روی بر محتوای سرب در دانه گلرنگ. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD است. (آزمایش گلدانی)



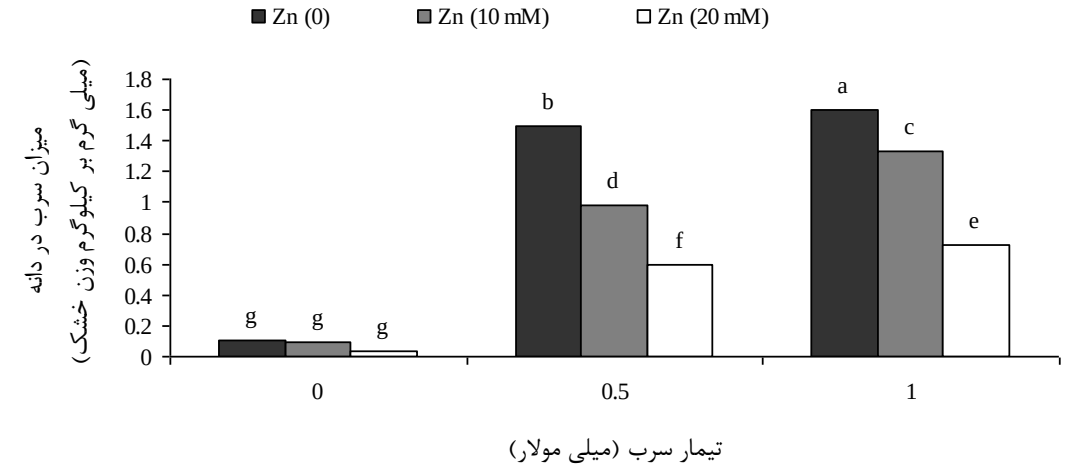
شکل ۴-۱۰۹- مقایسه اثر برهمکنش سه‌جانبه روی، کلسیم و سرب بر محتوای سرب در دانه گلرنگ. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD است. (آزمایش گلدانی)



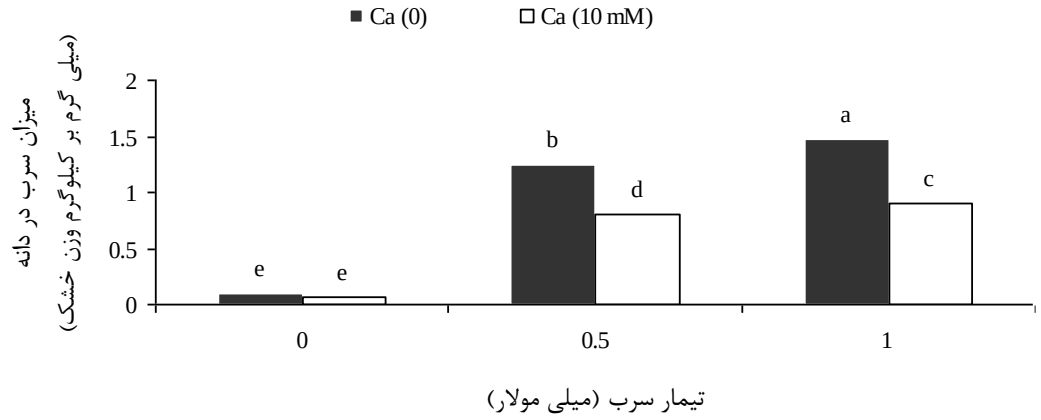
شکل ۴-۱۱۰- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی کلسیم در شرایط تنش سرب بر محتوای سرب در برگ گلرنگ. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD است. (آزمایش مزرعه‌ای)



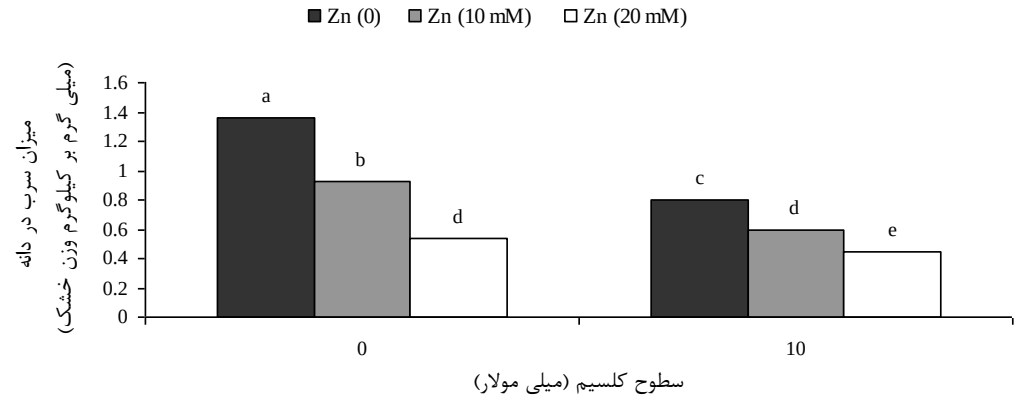
شکل ۴-۱۱۱- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی در شرایط تنش سرب بر محتوای سرب در برگ گلرنگ. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD است. (آزمایش مزرعه‌ای)



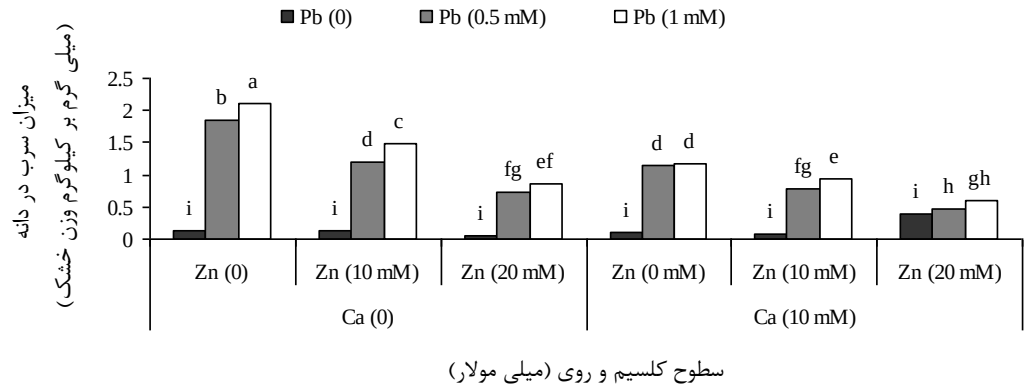
شکل ۴-۱۱۲- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی در شرایط تنش سرب بر محتوای سرب در دانه گلرنگ. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD است. (آزمایش مزرعه‌ای)



شکل ۴-۱۱۳- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی کلسیم در شرایط تنش سرب بر محتوای سرب در دانه گلرنگ. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD است. (آزمایش مزرعه‌ای)



شکل ۴-۱۱۴- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی کلسیم و روی بر محتوای سرب در دانه. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD است. (آزمایش مزرعه‌ای)



شکل ۴-۱۱۵- مقایسه اثر برهمکنش سه‌جانبه روی، کلسیم و سرب بر محتوای سرب در دانه. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD است. (آزمایش مزرعه‌ای)

۴-۸-۱۱- غلظت روی در برگ، دانه و ریشه

در آزمایش گلدانی، نتایج تجزیه واریانس بیانگر اثر معنی‌دار ($P\leq$ ۰/۰۱) سرب، روی بر محتوای روی در دانه، برگ و ریشه و اثر اصلی کلسیم بر محتوای سرب در برگ و ریشه بود. در بین اثر متقابل، اثر تنش سرب و محلول‌پاشی روی بر محتوای روی در دانه، برگ و ریشه و برهمکنش روی و کلسیم بر محتوای روی در ریشه از لحاظ آماری معنی‌دار بود (جدول پیوست ۱۶). براساس نتایج حاصل از آزمایش گلدانی، تنش ناشی از سرب در گیاه گلرنگ موجب کاهش محتوای روی در برگ، دانه و ریشه گردید. جذب برگی سرب در مقایسه با جذب خاکی تأثیر بیشتری بر کاهش میزان روی در برگ گیاه داشت، درحالی‌که اثر منفی کاربرد خاکی سرب بر محتوای روی در ریشه بیشتر از محلول‌پاشی سرب بود. این درحالی است که در همه اندام‌ها بیشترین تأثیر منفی بر این صفت مربوط به کاربرد توأم برگی و خاکی سرب بود. نتیجه قابل توجه دیگر این بود که در تیمارهای شاهد و کاربرد خاکی سرب میزان روی در برگ بیشتر از ریشه بود درحالی که در کاربرد برگی و توأم سرب مقدار روی در ریشه بیشتر از برگ بود (شکل ۴-۱۱۶ و ۴-۱۱۸).

در شکل ۴-۱۱۶ اثر محلول‌پاشی روی در سطوح مختلف سرب بر غلظت روی در برگ نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود که بیشترین میزان تجمع این عنصر در برگ در شرایط عدم تنش سرب

همراه با کاربرد کود روی (۲۰ میلی‌مولار) و کمترین میزان آن در شرایط کاربرد توأم سرب و عدم کاربرد کود روی به‌دست آمد. در هر چهار سطح تیمار سرب محلول‌پاشی روی و دو برابر شدن غلظت آن موجب افزایش معنی‌دار در این صفت شد و کاهش ایجاد شده در مقدار روی برگ را در اثر تنش سرب تا حد زیادی جبران نمود و حتی در مواردی بیشتر از گیاهان شاهد شد. همانطورکه نتایج جدول ۴-۲۶ نشان می‌دهد اثر اصلی کلسیم تأثیر معنی‌داری در مقدار روی برگ داشت و در تیمار کلسیم با غلظت ۱۰ میلی‌مولار مقدار آن افزایش ۶ درصدی نشان داد.

همچنین کاربرد کود روی هم در شرایط عادی و هم در تیمارهای تنش باعث کاهش اثرات نامطلوب سرب و افزایش معنی‌دار میزان تجمع روی در دانه گردید، به‌طوری‌که در اثر محلول‌پاشی روی با غلظت ۲۰ میلی‌مولار مقدار روی در دانه در تیمار محلول‌پاشی سرب با گیاهان شاهد تقریباً برابر بود (شکل ۴-۱۱۷).

محلول‌پاشی روی بر میزان عنصر روی در ریشه نیز به‌طور معنی‌داری تأثیرگذار بود. کمترین مقدار روی ثبت شده در ریشه مربوط به ترکیب تیماری کاربرد توأم سرب و عدم محلول‌پاشی روی معادل ۱۰/۵۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک بود که در اثر محلول‌پاشی روی با غلظت ۲۰ میلی‌مولار به ۲۷/۱۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک رسید. این تأثیر در سطوح دیگر سرب نیز مشهود بود. تا جایی‌که مقدار روی در ریشه در اثر محلول‌پاشی با روی ۲۰ میلی‌مولار در شرایط عدم آلودگی به سرب به بالاترین مقدار خود (۴۹/۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک) رسید (شکل ۴-۱۱۸). همان-طور که نتایج تجزیه واریانس نشان می‌دهد (جدول پیوست ۱۵)، کاربرد کلسیم همراه با روی تأثیر معنی‌داری بر میزان تجمع روی در ریشه گیاه گلرنگ داشت، به‌طوری که بیشترین مقدار در کاربرد کلسیم همراه با روی ۲۰ میلی‌مولار مشاهده گردید. نتایج نشان داد که حضور کلسیم بدون روی تأثیری بر این صفت ندارد ولی حضور روی بدون کلسیم می‌تواند این صفت را به‌طور معنی‌داری افزایش دهد (شکل ۴-۱۱۹).

در آزمایش مزرعه‌ای، نتایج تجزیه واریانس بیانگر اثر معنی‌دار ($P\leq$ ۰/۰۱) سرب، روی بر محتوای روی در دانه و برگ و اثر اصلی کلسیم بر محتوای روی در برگ بود و در بین اثر متقابل، اثر تنش سرب و محلول‌پاشی روی بر محتوای روی در دانه و برگ گلرنگ می‌باشد (جدول پیوست ۱۶). در مزرعه نیز حضور سرب در گیاه و افزایش غلظت آن موجودی روی در برگ و دانه را کاهش داد (شکل ۴-۱۲۰ و ۴-۱۲۱). نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که در شرایط بدون تنش (سطح صفر سرب) محلول‌پاشی با غلظت‌های ۱۰ و ۲۰ میلی‌مولار سولفات روی مقدار روی در برگ را به‌ترتیب ۱۹ و ۵۵ درصد بهبود بخشید که به لحاظ آماری معنی‌دار نیز بود. در شرایط تنش سرب، محلول‌پاشی روی در هر دو غلظت موجب کاهش اثرات تنش سرب گردید به‌عنوان مثال در بالاترین سطح تنش (۱ میلی‌مولار) با انجام محلول‌پاشی روی (۲۰ میلی‌مولار)، میزان روی در برگ به ۳۹/۹۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک رسید که تقریباً برابر با گیاهان شاهد بود. درحالی‌که این مقدار در شرایط عدم کاربرد روی در همین سطح از تنش معادل ۱۹/۴۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک بود (شکل ۴-۱۲۰). استفاده از کلسیم نیز تا اندازه‌ای سبب افزایش میزان روی در برگ گردید، محلول‌پاشی کلسیم در غلظت ۱۰ میلی‌مولار مقدار آن را ۳ درصد افزایش داد (جدول۴-۲۷).

در شکل ۴-۱۲۱ به وضوح نشان داد که تنها دانه حاصل از گیاهانی که آلوده به سرب بودند ولی توسط کود روی محلول‌پاشی نشدند، پایین‌ترین مقدار روی را داشتند. مقدار روی در دانه سایر گیاهان حتی آنهایی که تنش سرب را با غلظت بالا تجربه کردند به دلیل جذب برگی روی حتی به‌طور معنی-داری بیشتر از گیاهان شاهد بود.

گیاهان توانایی زیادی در جذب سرب از طریق ریشه‌ها دارند، در حالی که انتقال سرب به بخش‌های هوایی گیاهان بسیار محدود انجام می‌شود (لان و مارتین، ۱۹۷۷). از اثرات سمی سرب کاهش غلظت عناصر غذایی در گیاهان است، سرب از طریق اختلال در فعالیت طبیعی ناقل‌های غشاء سلول‌های ریشه باعث کاهش جذب عناصر ضروری مانند کلسیم، روی، منیزیم و آهن می‌شود و در نتیجه گیاهان تیمار شده با سرب علایم کمبود این عناصر ضروری را نشان می‌دهند (شرما و دوبی، ۲۰۰۵). یکی از

روش‌های تأمین سریع عناصر غذایی برای گیاه محلول‌پاشی آنها است. در این روش عناصر غذایی به‌طور مستقیم در اختیار اندام هوایی گیاه قرار می‌گیرند. عناصر غذایی کم مصرف تأثیر به‌سزایی در بهبود صفات کمی و کیفی محصولات زراعی دارند (شرما و همکاران، ۱۹۹۲). موحدی دهنوی و همکاران (۲۰۰۹) بیان نمودند که محلول‌پاشی سولفات روی منجر به افزایش غلظت روی در دانه گلرنگ شد که با نتایج حاضر مطابقت دارد. بر اساس نتایج محققین، ارتباط متقابل بین آوند چوب و آبکش می‌تواند در انتقال عنصر روی جذب شده به دانه‌های درحال رسیدگی مؤثر باشد، در این حال تبادل یون‌ها میان آوند چوب و آبکش در گل آذین می‌تواند سبب افزایش عنصر روی جذب شده در دانه‌ها شود (جیانگ و همکاران، ۲۰۰۸). جابه‌جایی درونی عنصر روی در گیاه برنج پس از محلول‌پاشی برگی سولفات روی توسط ایشیمارو و همکاران (۲۰۰۵) بررسی شد؛ ایشان دریافتند که روی پس از جذب از راه روزنه‌ها و انتقال به سلول‌های برگ، در آنها ذخیره شده و در ادامه مراحل رشد توسط ناقل‌های پروتئینی خاصی که همزمان در جابجایی آهن نیز نقش دارند، درون گیاه جابجا می‌شود. این موضوع باعث جابجایی عنصر روی از برگ‌های در حال پیرشدن در اواخر رشد از راه آوند آبکش به سوی دانه‌ها و در نتیجه افزایش میزان این عنصر در دانه‌ها می‌گردد.

جدول ۴-۲۶- مقایسه میانگین اثرهای ساده سطوح مختلف محلول‌پاشی کلسیم بر محتوای روی در برگ (آزمایش گلدانی)

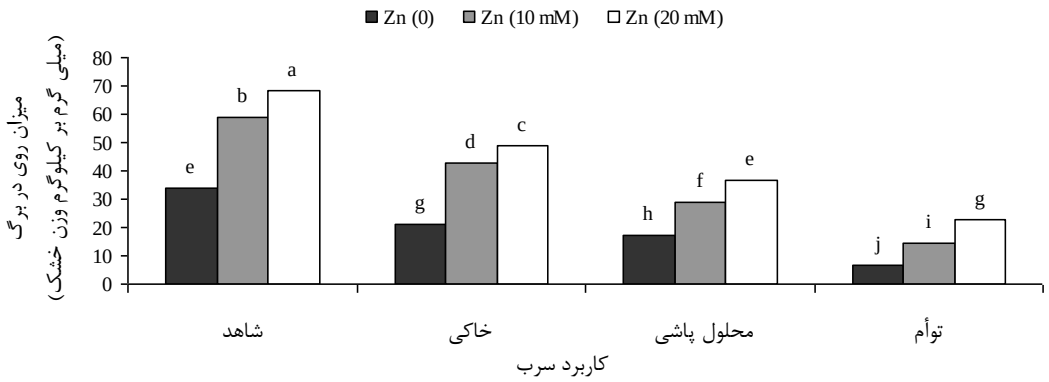
تیمار	روی در برگ (میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک)
کلسیم (میلی‌مولار)	
صفر	۳۲/۴۶ b
۱۰	۳۴/۴۴ a

میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک در هر ستون و هر تیمار بر اساس آزمون LSD اختلاف معنی‌داری در سطح ۵ درصد ندارند.

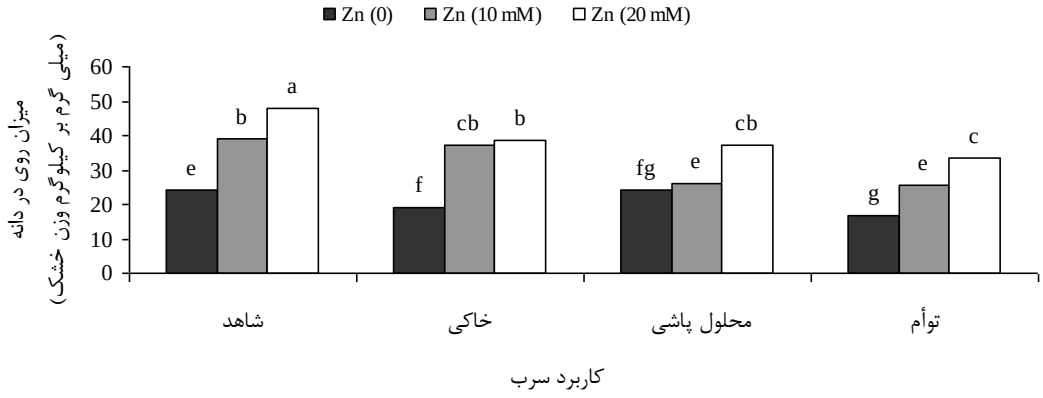
جدول ۴-۲۷- مقایسه میانگین اثرهای ساده سطوح مختلف محلول‌پاشی کلسیم بر محتوای روی در برگ (آزمایش مزرعه‌ای)

تیمار	روی در برگ (میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک)
کلسیم (میلی‌مولار)	
صفر	۳۷/۱۹ b
۱۰	۳۸/۳۲ a

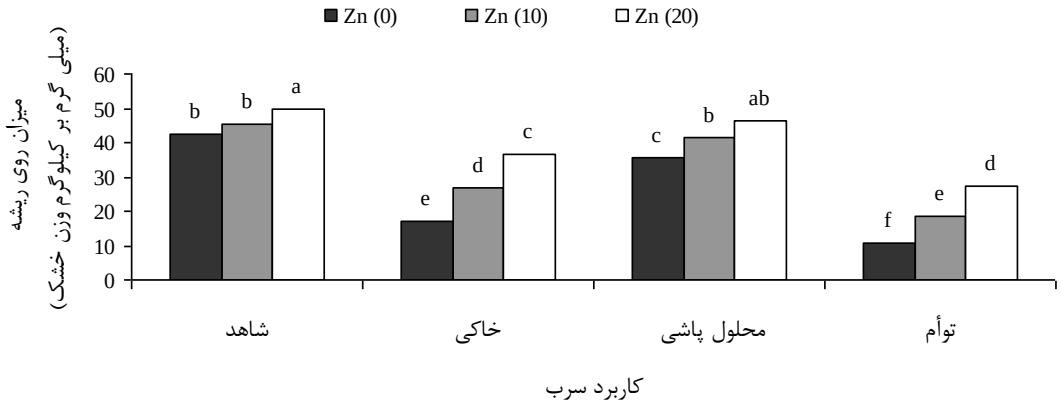
میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک در هر ستون و هر تیمار بر اساس آزمون LSD اختلاف معنی‌داری در سطح ۵ درصد ندارند.



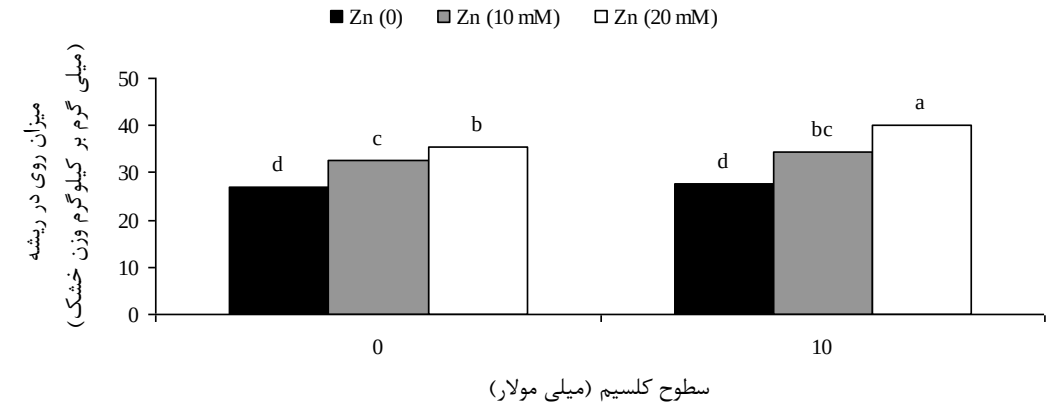
شکل ۴-۱۱۶- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی در شرایط تنش سرب بر محتوای روی در برگ گلرنگ. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD است. (آزمایش گلدانی)



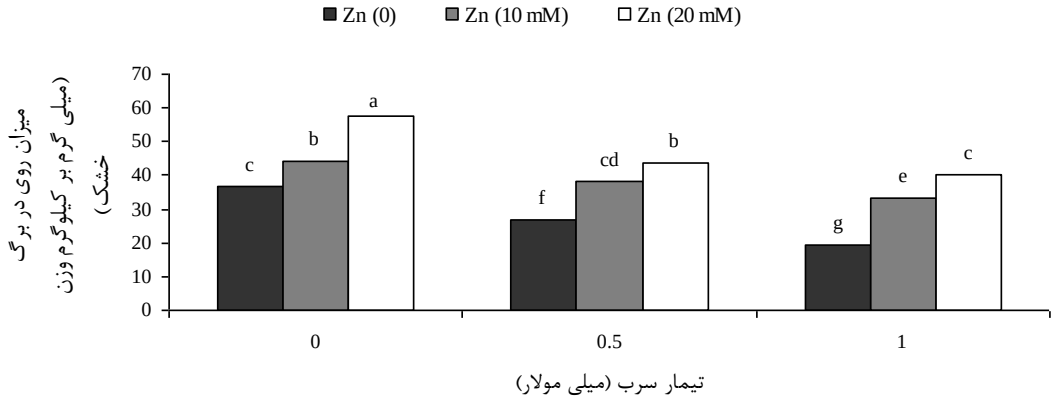
شکل ۴-۱۱۷- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی در شرایط تنش سرب بر محتوای روی در دانه گلرنگ. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD است. (آزمایش گلدانی)



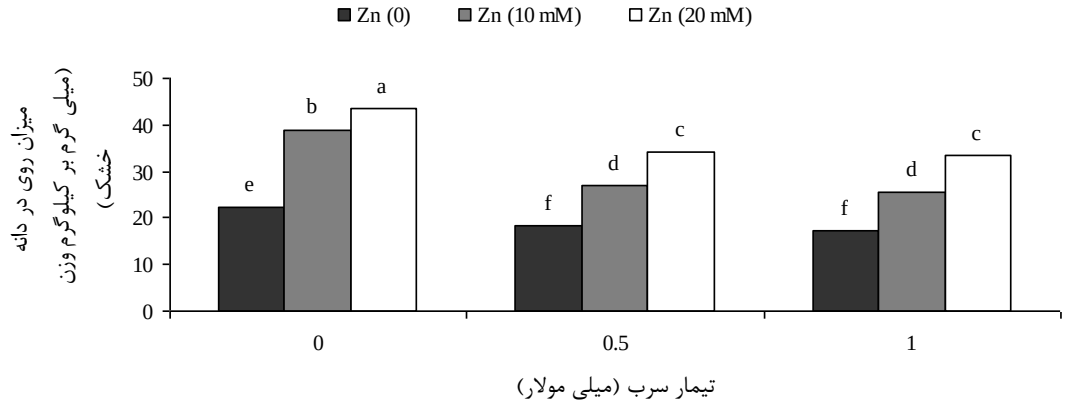
شکل ۴-۱۱۸- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی در شرایط تنش سرب بر محتوای روی در ریشه گلرنگ. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD است. (آزمایش گلدانی)



شکل ۴-۱۱۹- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی و کلسیم بر محتوای روی در ریشه گلرنگ. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD است. (آزمایش گلدانی)



شکل ۴-۱۲۰- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی در شرایط تنش سرب بر محتوای روی در برگ گلرنگ. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD است. (آزمایش مزرعه‌ای)



شکل ۴-۱۲۱- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی روی در شرایط تنش سرب بر محتوای روی در دانه گلرنگ. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD است. (آزمایش مزرعه‌ای)

۴-۸-۱۲- میزان کلسیم در برگ، دانه و ریشه

در آزمایش گلدانی، نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌های مربوط بـه محتـوای کلسـیم در انـدام هوایی و ریشه گلرنگ نشان داد که اثر تنش سرب، کلسیم و اثر متقابل سرب و محلول‌پاشی کلسیم بر این صفت معنی‌دار بود (جدول پیوست ۱۵). به‌طورکلی تنش سرب بر میزان تجمع عنصـر کلسـیم در اندام‌های مختلف گیاه اثرات منفی داشت. البته محلول‌پاشی کلسیم تا حـدی ایـن کـاهش را جبـران نمود به‌طوری‌که در همه سطوح تیمار سرب موجب افزایش میزان تجمع این عنصر در برگ در مقایسه با شرایط عدم کاربرد کود گردید، افزایش مشاهده شده در گیاهان شاهد ۷۶ درصـد، در تیمـار خـاکی سرب ۹۷ درصد، کاربرد محلول‌پاشی سرب ۱۲۰ درصد و در کاربرد توأم سرب ۱۶۲ درصد نسـبت بـه تیمار عدم مصرف روی بود (شکل ۴-۱۲۲).

اثر محلول‌پاشی کلسیم بر میزان تجمع کلسیم در دانه تحت شرایط تنش سرب نیز معنـی‌دار بـود. جذب برگی کلسیم در شرایط تنش سرب تنها در تیمار کاربرد خاکی به طور معنی‌داری سبب افزایش کلسیم دانه گردید. با این وجود در بین ترکیبات تیماری مورد مطالعه بیشترین میزان تجمـع کلسـیم

در دانه گیاهانی مشاهده شد که آلوده به سرب نبودند و توسط کود کلسیم (۱۰ میلی‌مولار) محلـول-پاشی شدند (شکل ۴-۱۲۳).

شکل ۴-۱۲۴ نشان می‌دهد، که محلول‌پاشی کلسیم میزان تجمع این عنصـر را در ریشـه بـه‌طـور معنی‌دار در تیمار خاکی سرب ۴۰ درصد، کاربرد محلول‌پاشی سرب ۶۴ درصد و کـاربرد تـوأم سـرب ۱۲۹ درصد نسبت به تیمار عدم مصرف کلسیم افزایش داد. مقایسه محتوای کلسیم در سه اندام برگ، دانه و ریشه در شکل ۴-۱۲۲، ۴-۱۲۳ و ۴-۱۲۴ نشان می‌دهد که به‌طورکلی مقدار کلسـیم در بـرگ گیاه گلرنگ بیشتر از ریشه و کلسیم ریشه بیشتر از دانه است.

نتایج به‌دست آمده در گلدان توسط آزمایش مزرعه‌ای تأیید شد. بر اساس نتایج مقایسه میـانگین (شکل ۴-۱۲۵)، بیشترین میزان تجمع کلسیم در برگ در شرایط عدم تـنش همـراه بـا کـاربرد کـود کلسیم (۱۰ میلی‌مولار) و کمترین میزان در تنش ۰/۵ و ۱ میلی‌مولار سرب که هیچ کـودی دریافـت نکرده بودند مشاهده گردید. همانطور که نتایج مقایسه میانگین شکل ۴-۱۲۶ نشان مـی‌دهـد تغذیـه گیاه با کلسیم تنها در تنش ۰/۵ میلی‌مولار سرب تأثیر معنی‌داری بر محتوای کلسیم در دانه داشت و میزان آن را ۱۶ درصد نسبت به سطح صفر کلسیم افزایش داد. تغذیه گیاه با روی بر میزان کلسیم در برگ معنی‌دار بود و میزان آن در گیاهانی که روی را با غلظت ۲۰ میلی‌مولار دریافت کرده بودند، ۱۰ درصد افزایش نشان داد و بین دو سطح صفر و ۱۰ میلی‌مولار روی از لحاظ آماری تفاوت معنـی‌داری مشاهد نشد (جدول ۴-۲۸).

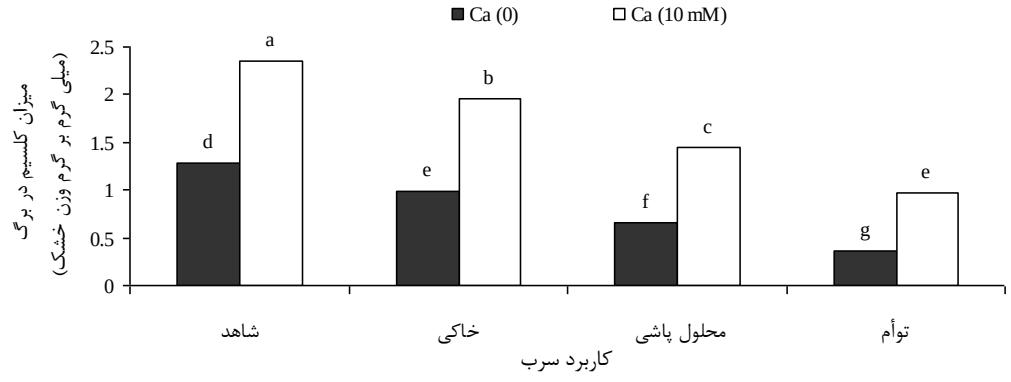
در این تحقیق، کاهش تجمع عنصر غذایی کلسیم همراه با افزایش میزان آلـودگی سـرب مشـاهده شد. محققین بیان کرده‌اند که سرب موجب اختلال در جذب و انتقـال عناصـر غـذایی در بافـت‌هـای گیاهی می‌شود (گادبولد و کتنر، ۱۹۹۱). نتایج مطالعات نشان داده است که حضور سـرب در محـیط، جذب عناصر غذایی نظیر پتاسیم، کلسیم، منیزیم، آهن و روی را از طریق ریشه گیاه کاهش مـی‌دهـد (شرما و دوبی، ۲۰۰۵). بر اساس نتایج به دست آمده در این تحقیق، اثر متقابل محلول‌پاشـی کلسـیم در تنش سرب بر تجمع عنصر کلسیم در ریشه ، برگ و دانه معنی‌دار بود و سبب افزایش تجمـع ایـن

عنصر نسبت به تیمار شاهد شد. بنابراین به نظر می‌رسد که تغذیه گیاه با کلسیم می‌تواند تا اندازه‌ای موجب تعادل عناصر غذایی درون بافت‌های گیاهی در تنش فلز سنگین سرب شود. تغذیه مناسب تحت شرایط تنش می‌تواند به وسیله تأثیرش بر واکنش‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی در گیاه سبب کاهش تجمع یون‌های فلز سنگین در گیاه شود (صدیقی و همکاران، ۲۰۱۱). همچنین گزارشات قبلی نشان داد که کلسیم از طریق رقابت با جریان یون فلز سرب درگیاه سبب تخفیف تنش اکسیداتیو ایجاد شده در گیاه می‌شود (شرما و دوبی، ۲۰۰۵). نتایج این تحقیق با گزارشات مطالعه دیگر مبنی بر کاهش تجمع و سمیت فلز سنگین سرب در گیاه گندم توسط کلسیم، همسو است (گارلند و ویلکینز، ۱۹۸۱).

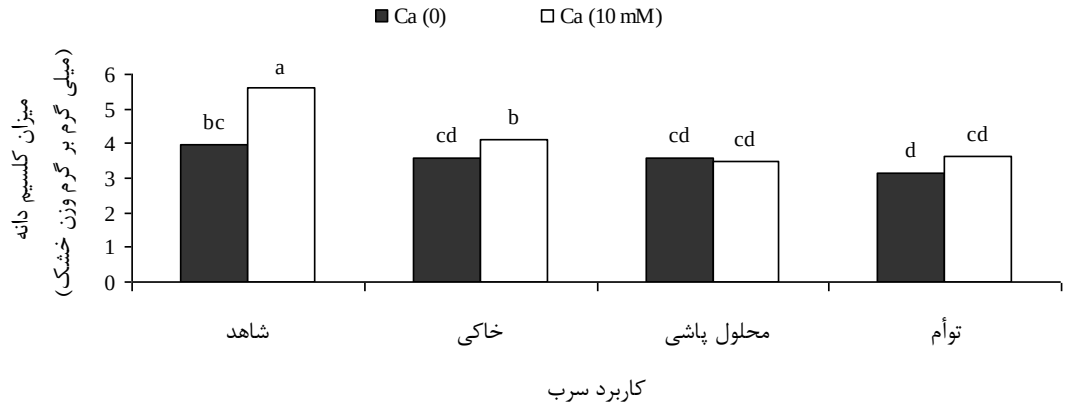
جدول ۴-۲۸- مقایسه میانگین اثرهای ساده سطوح مختلف محلول‌پاشی روی بر محتوای کلسیم در برگ (آزمایش مزرعه‌ای)

تیمار	کلسیم در برگ (میلی‌گرم بر گرم وزن خشک)
روی (میلی‌مولار)	
صفر	۱۵/۵۲ b
۱۰	۱۶/۰۷ b
۲۰	۱۷/۱۶ a

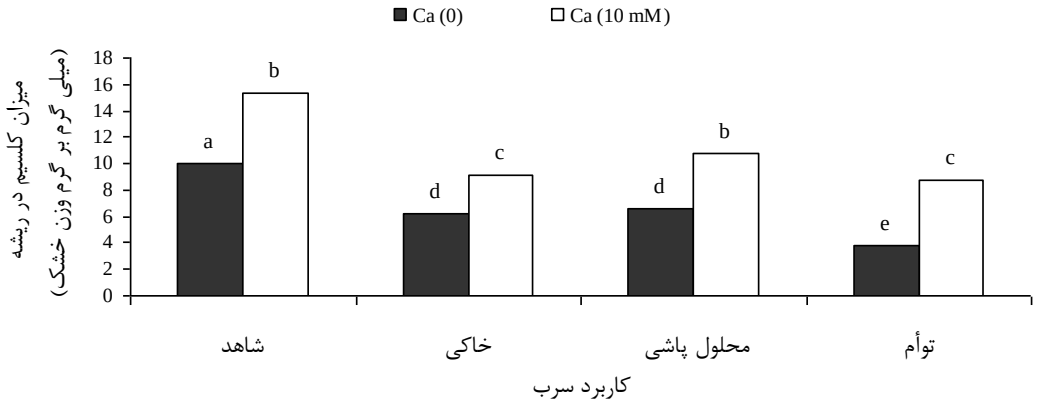
میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک در هر ستون و هر تیمار بر اساس آزمون LSD اختلاف معنی‌داری در سطح ۵ درصد ندارند.



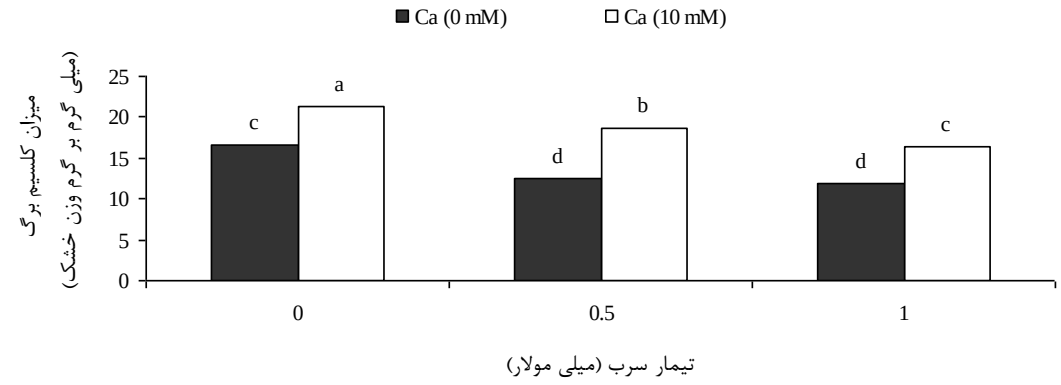
شکل ۴-۱۲۲- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی کلسیم در شرایط تنش سرب بر محتوای کلسیم در برگ گلرنگ. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD است. (آزمایش گلدانی)



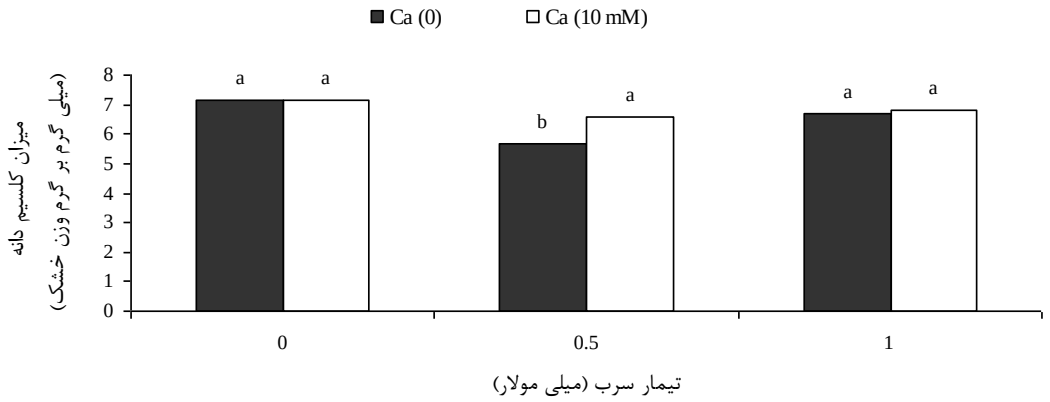
شکل ۴-۱۲۳- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی کلسیم در شرایط تنش سرب بر محتوای کلسیم در دانه گلرنگ. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD است. (آزمایش گلدانی)



شکل ۴-۱۲۴- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی کلسیم در شرایط تنش سرب بر محتوای کلسیم در ریشه گلرنگ. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD است. (آزمایش گلدانی)



شکل ۴-۱۲۵- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی کلسیم در شرایط تنش سرب بر محتوای کلسیم در برگ گلرنگ. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD است. (آزمایش مزرعه‌ای)



شکل ۴-۱۲۶- مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی کلسیم در شرایط تنش سرب بر محتوای کلسیم در دانه گلرنگ. حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ بر اساس آزمون LSD است. (آزمایش مزرعه‌ای)

نتیجه‌گیری

نتایج به‌دست آمده نشان داد که جذب برگی و خاکی سرب در ایجاد اثرات نامطلوب بر رشد، عملکرد، رفتارهای فیزیولوژیک، توان آنتی اکسیدانی و کیفیت گیاه گلرنگ تأثیر دارد. در آزمایش گلدانی، بیشترین اثرات سمی در جذب همزمان برگی و خاکی سرب مشاهده شد. در آزمایش مزرعه-ای نیز در گیاهانی که محلول سرب را با غلظت ۱ میلی‌مولار دریافت کرده بودند، میزان خسارت بر رشد و تولید گیاه در مقایسه با سایر تیمارها بیشتر بود. مسمومیت سرب منجر به پراکسیداسیون لیپیدهای غشاء، کاهش تجمع ماده خشک و سنتز کلروفیل در گیاه شد، در نهایت عملکرد دانه به میزان قابل توجهی کاهش یافت. گیاه گلرنگ در جهت افزایش مقاومت به تنش سرب، مکانیسم‌های متفاوتی را به‌کار می‌گیرد، آنزیم آسکوربات پراکسیداز، کاتالاز، گلوتاتیون اس- ترانسفراز از مهمترین آنزیم‌ها در مقابله با تنش اکسیداتیو است و مقادیر بالای این آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان در تیمارهای اعمال شده سرب این امر را تأیید می‌کند که این گیاه با فعال‌سازی سیستم آنزیمی گونه‌های فعال اکسیژن را از بین برده و شرایط ادامه حیات را فراهم می‌کند. در تیمار کاربرد خاکی سرب، بخش زیادی از این عنصر در ریشه‌ها تجمع یافت و سبب کاهش انتقال سرب به قسمت‌های هوایی گیاه گردید. در شرایط تنش سرب تغذیه گیاه گلرنگ با کود روی و کلسیم به‌صورت محلول‌پاشی توانست نقش مؤثری در حفاظت از رنگیزه‌ها، تجمع عناصر معدنی در گیاه، حفظ ساختار غشا سلولی داشته باشد که با توجه به برخی از ویژگی‌های فیزیولوژیکی مورد سنجش در این پژوهش، این تأثیرگذاری همراه با تخفیف اثرات تنش و کاهش جذب و انتقال یون‌های سمی بود که موجب افزایش مقاومت و بهبود عملکرد دانه، روغن و پروتئین تولیدی در گیاه گلرنگ گردید. جذب برگی روی و کلسیم توانست از طریق فعال‌سازی سیستم دفاعی گیاه، سبب بقای گیاه شود. بر اساس نتایج آزمون خاک، با وجود حضور کلسیم در حد مناسب در خاک مزرعه، محلول‌پاشی کلسیم تأثیر به‌سزایی در مقاومت گیاه به تنش سرب داشت که توانست به دلیل محدودیت‌های مختلف در خاک از جمله آبشویی عناصر

در خاک، بازدارنده های موجود در محیط خاک و بسیاری از فاکتورهای منفی دیگر باشد که میزان دسترسی گیاه به این عنصر را کاهش می‌دهد. همچنین سرب موجب کاهش تجمع عناصر کلسیم و روی در بافت‌های گیاه می‌شود. بنابراین فراهم کردن این عناصر غذایی برای گیاه در شرایط تنش فلزات سنگین سرب نقش موثری در کاهش اثرات منفی این یون سمی در واکنش‌های رشدی و فیزیولوژیکی گیاه دارد. در مقایسه نتایج گلدانی و مزرعه‌ای، نحوه تأثیرگذاری کلسیم و روی بر برخی از صفات مورد مطالعه متفاوت بود که ممکن است به این دلیل باشد که اعمال تیمار خاکی سرب در آزمایش گلدانی علاوه بر تیمار جذب برگی سرب منجر به تفاوت در مقدار تجمع جذب سرب در گیاه و در نهایت واکنش‌های متفاوت گیاه به کاربرد کلسیم و روی شده است. با توجه به نتایج هر دو آزمایش گلدانی و مزرعه‌ای که تأییدکننده یکدیگر بودند می‌توان اذعان داشت که به‌طورکلی، در مناطق آلوده به فلز سنگین سرب کاربرد کود روی و کلسیم می‌تواند آسیب‌های وارده به گیاه را کاهش دهد و به عنوان راهکاری برای حفظ رشد و تولید گیاه گلرنگ در نظر گرفته شود. با توجه به محدوده تیمارهای این آزمایش استفاده توأم از غلظت ۲۰ میلی‌مولار سولفات روی و غلظت ۱۰ میلی-مولار کلرید کلسیم به‌صورت محلول‌پاشی قابل توجیه است.

پیشنهادها

۱. تأثیرگذاری محلول‌پاشی عناصر کلسیم و روی در زمان‌های مختلف از رشد رویشی و زایشی ممکن است متفاوت باشد، لذا توصیه می‌شود که تأثیر این عناصر در مراحل مختلف رشد گلرنگ در شرایط تنش سرب بررسی شود.

۲. در این آزمایش تنها از یک غلظت کلسیم (۱۰ میلی‌مولار) استفاده گردید که مفید واقع شد، توصیه می‌شود غلظت‌های بالاتر مورد بررسی قرار گیرد.

۳. با توجه به تأثیرگذاری تیمارهای سرب از لحاظ غلظت و میزان جذب از طریق ریشه و اندام هوایی، مقایسات بیشتر در خصوص غلظت‌های پایین‌تر سرب قابل توصیه است.

۴. با توجه به مفید بودن غلظت‌های کاربردی روی و تأثیرگذاری بیشتر غلظت ۲۰ میلی‌مولار روی، می‌توان در مطالعات دیگر غلظت‌های بالاتر تهیه شود.

۵. در این تحقیق میزان تجمع سرب در ریشه نسبت به گیاهان شاهد بالا بود که توصیه می‌شود در مطالعات بعدی استفاده از گیاه گلرنگ برای پالایش خاک‌های آلوده به فلزات سنگین مورد سنجش قرار گیرد.

پیوست

جدول پیوست ۱- میانگین مربعات اثر سرب، روی و کلسیم بر حجم ریشه، طول ریشه، ارتفاع ساقه و قطر ساقه گلرنگ (آزمایش گلدانی)

منابع تغییر	درجه آزادی	حجم ریشه	طول ریشه	ارتفاع ساقه	قطر ساقه
تکرار	۲	۰/۱۲ ns	۰/۰۹ ns	۱۲۸/۷۱ ns	۰/۰۲ ns
سرب (A)	۳	۴۹/۲۸ **	۱۳۸/۸۱**	۱۶۴۸/۶۶ **	۷/۸۶ **
روی (B)	۲	۱۰/۶۷ **	۱۵۲/۳۵ **	۲۴۰۱/۶۳ **	۳/۴۴ **
کلسیم (C)	۱	۱۲/۵۰ **	۹۲/۰۳ **	۱۱۱۶/۲۸ **	۱/۴۱ **
A*B	۶	۰/۳۹ ns	۳/۰۹*	۸۶/۴۹ *	۰/۰۹ ns
A*C	۳	۱/۲۰ *	۲/۱۴ ns	۳۲/۳۵ ns	۰/۰۱ ns
B*C	۲	۲/۶۷ **	۳/۰۸ ns	۱۳۱/۴۲ *	۰/۹۵ **
A*B*C	۶	۰/۴۲ ns	۲/۸۰ ns	۶۳/۵۹ ns	۰/۰۳ ns
خطا	۴۶	۰/۳	۱/۳۳	۳۵/۹۶	۰/۰۶
ضریب تغییرات (درصد)	-	۱۲/۸۶	۷/۳۶	۱۲/۶۰	۶/۰۰

ns، * و ** به ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد

جدول پیوست ۲- میانگین مربعات اثر سرب، روی و کلسیم بر ارتفاع و قطر ساقه گلرنگ (آزمایش مزرعه‌ای)

منابع تغییر	درجه آزادی	ارتفاع ساقه	قطر ساقه
تکرار	۲	۲۱/۱۲ ns	۰/۱۰ ns
سرب (A)	۲	۱۱۴۵/۷۸ **	۰/۲۹ *
روی (B)	۲	۲۴۵۵/۹۱ **	۱۳/۰۴ **
کلسیم (C)	۱	۱۰۸۶/۳۱ **	۳/۷۸ **
A*B	۴	۷۹/۸۳ *	۰/۰۵ ns
A*C	۲	۱۴/۶۹ ns	۰/۰۱ ns
B*C	۲	۱۱۹/۱۷ *	۴/۱۷ **
A*B*C	۴	۲۸/۶۹ ns	۰/۰۴ ns
خطا	۳۴	۲۶/۹۶	۰/۰۹
ضریب تغییرات (درصد)	-	۷/۸۳	۳/۸

ns، * و ** به ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد

جدول پیوست ۳- میانگین مربعات اثر سرب، روی و کلسیم بر وزن خشک ریشه، برگ و ساقه، نسبت وزن خشک ریشه به ساقه، سطح برگ، عملکرد بیولوژیک و وزن طبق در بوته (آزمایش گلدانی)

منابع تغییر	درجه آزادی	وزن خشک ریشه	نسبت وزن خشک ریشه به ساقه	وزن خشک برگ	وزن خشک ساقه	سطح برگ	عملکرد بیولوژیک	وزن طبق در بوته
تکرار	۲	۰/۰۱ ns	۰/۰۰ ns	۰/۱۰ ns	۰/۲۸ ns	۲۷۳/۲۹ ns	۰/۴۶ ns	۰/۰۴ ns
سرب (A)	۳	۲/۶۵ **	۰/۰۱ **	۱۵/۲۵ **	۶۵/۳۴ **	۲۸۴۰۷/۴۲ **	۱۳۹/۸۸ **	۵/۸۶ **
روی (B)	۲	۲/۶۸ **	۰/۰۲ **	۹/۴۷ **	۱۲/۰۰ **	۱۸۰۹۱/۲۹ **	۴۲/۴۸ **	۴/۳۳ **
کلسیم (C)	۱	۳/۶۳ **	۰/۰۲ **	۱۰/۸۰ **	۱۴/۵۹ **	۱۵۰۸۰/۰۵ **	۵۰/۵۲ **	۵/۴۴ *
A*B	۶	۰/۰۳ *	۰/۰۰۰۲ ns	۰/۰۹ ns	۰/۸۷ **	۱۴۵۸/۶۶ **	۱/۳۸ **	۰/۰۸ ns
A*C	۳	۰/۰۵ **	۰/۰۰۰۴ *	۰/۲۴ *	۰/۷۴ **	۴۰۳/۲۰ *	۱/۵۰ **	۰/۲۵ ns
B*C	۲	۰/۴۸ **	۰/۰۰۵ **	۱/۶۹ **	۲/۰۰ **	۲۶۲/۶۰ ns	۷/۲۷ **	۰/۰۵ ns
A*B*C	۶	۰/۰۲ ns	۰/۰۰۰۳ ns	۰/۲۳ *	۰/۵۰ **	۲۳۲/۷۴ ns	۱/۲۷ **	۰/۲۷ ns
خطا	۴۶	۰/۰۱	۰/۰۰۴	۰/۰۸	۰/۲۰	۱۴۱/۱۹	۰/۲۹	۰/۱۲
ضریب تغییرات (درصد)	-	۸/۲۲	۱۰/۳۳	۷/۰۹	۴/۴۳	۷/۹۰	۴/۰۰	۵/۸۹

ns، * و ** به ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد

جدول پیوست ۴- میانگین مربعات اثر سرب، روی و کلسیم بر وزن خشک برگ و ساقه، شاخص سطح برگ، عملکرد بیولوژیک و وزن طبق در بوته (آزمایش مزرعه‌ای)

منابع تغییر	درجه آزادی	وزن خشک برگ	وزن خشک ساقه	شاخص سطح برگ	عملکرد بیولوژیک	وزن طبق در بوته
تکرار	۲	۳/۹۹ ns	۷۲۹/۳۹ ns	۰/۰۱ ns	۸۰۶/۳۳ ns	۰/۴۶ ns
سرب (A)	۲	۱۸۹۴/۴۰ **	۱۸۰۹/۶۳ ns	۳/۵۰ **	۷۳۱۹/۶۸ **	۷/۵ **
روی (B)	۲	۲۳۴۵/۲۹ **	۶۳۴۵/۹۵ **	۲/۳۷ **	۱۶۱۵۴/۹۵ **	۱/۴ *
کلسیم (C)	۱	۱۴۲۷/۰۷ *	۱۹۴۴/۰ ns	۴/۶۰ **	۶۷۰۲/۲۷ *	۰/۶ ns
A*B	۴	۲۵۱/۹۸ ns	۲۲۲/۱۰ ns	۰/۰۷ ns	۳۸۹/۸۷ ns	۰/۱ ns
A*C	۲	۱۵/۲۶ ns	۱۹۴/۲۰ ns	۰/۸۹ **	۲۳۱/۲۰ ns	۰/۱ ns
B*C	۲	۲۲/۴۱ ns	۲۱/۸۴ ns	۰/۰۱ ns	۸۸/۰۴ ns	۰/۰۳ ns
A*B*C	۴	۲۵/۲۹ ns	۱۰۳/۹۸ ns	۰/۱۰ ns	۲۱۳/۴۵ ns	۰/۰۱ ns
خطا	۳۴	۳۰۶/۰۴	۷۲۴/۸۸	۰/۰۴	۳۰۶۹/۲۶	۰/۳۴
ضریب تغییرات (درصد)	-	۱۰/۳	۹/۲	۹/۹۵	۷/۱۸	۵/۵۳

ns، * و ** به ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد

جدول پیوست ۵- میانگین مربعات اثر سرب، روی و کلسیم بر عملکرد دانه، وزن هزار دانه، تعداد دانه در طبق، تعداد طبق در بوته و شاخص برداشت (آزمایش گلدانی)

منابع تغییر	درجه آزادی	عملکرد دانه	وزن هزار دانه	تعداد دانه در طبق	تعداد طبق در بوته	شاخص برداشت
تکرار	۲	۰/۰۵ ns	۱۱/۶۹ ns	۸/۶۷ ns	۰/۱۸ ns	۲۱/۲۹ ns
سرب (A)	۳	۵۵/۹۵ **	۲۷۰/۲۰ **	۳۹۵/۶۷ **	۵۶/۱۸ **	۶۸۱/۰۳ **
روی (B)	۲	۲۱/۶۲ **	۹۸/۴۲ **	۶۶۱/۶۲ **	۱۰/۸۹ **	۲۵۳/۸۲ **
کلسیم (C)	۱	۲۱/۰۴ **	۳۳/۲۸ ns	۳۲۹/۳۹ **	۲/۰ **	۵۱/۴۰ ns
A*B	۶	۰/۹۹ **	۳۸/۸۰ ns	۱۲/۳۵ *	۰/۷۴ **	۵۲/۳۸ **
A*C	۳	۰/۴۸ ns	۱۸/۱۰ ns	۱/۹۴ ns	۰/۲۶ ns	۱۳/۳۹ ns
B*C	۲	۰/۹۰ *	۱۴/۴۷ ns	۳۱/۶۰ **	۰/۱۷ ns	۶/۲۲ ns
A*B*C	۶	۰/۴۱ ns	۱۳/۱۴ ns	۱۰/۴۳ *	۰/۴۲ ns	۲۲/۸۱ ns
خطا	۴۶	۰/۲۶	۱۶/۹۷	۴/۳۸	۰/۲۲	۱۶/۰۲
ضریب تغییرات (درصد)	-	۷/۰۵	۱۱/۸۲	۷/۶۵	۸/۰۴	۷/۹۷

ns، * و ** به ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد

جدول پیوست ۶- میانگین مربعات اثر سرب، روی و کلسیم بر عملکرد دانه، وزن هزار دانه، تعداد دانه در طبق، تعداد طبق در بوته و شاخص برداشت (آزمایش مزرعه‌ای)

منابع تغییر	درجه آزادی	عملکرد دانه	وزن هزاردانه	تعداد دانه در طبق	تعداد طبق در بوته	شاخص برداشت
تکرار	۲	۳۳۳۶۳/۳ ns	۸/۲۶ ns	۱۷/۳۵ ns	۰/۵۷ ns	۲۸/۷۵ ns
سرب (A)	۲	۳۷۶۷۲۸۴/۸ **	۲۷۹/۸ **	۱۸۰/۸ **	۳/۶۳ **	۱۳۶۸/۷۱ **
روی (B)	۲	۱۸۹۴۲۳/۰ **	۴۵/۴۱ *	۲۱/۶۳ ns	۱۱/۸ **	۱۸/۴۴ ns
کلسیم (C)	۱	۹۷۰۲۸/۱ *	۰/۹۸ ns	۶۰/۱۷ *	۱۲/۵۲ **	۰/۰۲ ns
A*B	۴	۱۰۷۱۲۳/۸ **	۲۲/۲ ns	۱۷/۲۴ ns	۲/۱۸ *	۵۳/۹۸ **
A*C	۲	۲۱۰۴۰/۳ ns	۰/۹۶ ns	۱۴/۳۹ ns	۲/۳۰ *	۷/۲۸ ns
B*C	۲	۴۳۹۹۳/۰ ns	۱/۱۷ ns	۰/۸۸ ns	۰/۶۸ ns	۲۰/۴۴ ns
A*B*C	۴	۲۰۶۹۷/۱ ns	۵/۸۶ ns	۸/۱۱ ns	۰/۶۳ ns	۱۴/۳۳ ns
خطا	۳۴	۱۹۲۱۰/۳۹	۱۱/۰۴	۱۱/۰۸	۰/۶۷	۱۲/۹۷
ضریب تغییرات (درصد)	-	۷/۱	۹/۲	۶/۷	۱۲/۳۷	۸/۴۸

ns، * و ** به ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد

جدول پیوست ۷- میانگین مربعات اثر سرب، روی و کلسیم بر درصد و عملکرد روغن، درصد و عملکرد پروتئین و کربوهیدرات محلول (آزمایش گلدانی)

منابع تغییر	درجه آزادی	درصد روغن	عملکرد روغن	درصد پروتئین دانه	عملکرد پروتئین دانه	کربوهیدرات محلول
تکرار	۲	۵/۱۰ ns	۰/۰۱ ns	۰/۷۳ ns	۰/۰۰۶ ns	۰/۷۷ ns
سرب (A)	۳	۱۲۰۷/۲۴ **	۱۹/۴۵ **	۱۰۲/۰۱ **	۰/۸۲ **	۱۷۳۸۸/۳۸ **
روی (B)	۲	۶۸۳/۸۲ **	۹/۶۹ **	۳۸/۷۸ **	۱/۸۸ **	۴۳۵۸/۹۶ **
کلسیم (C)	۱	۲۰۲/۸۸ **	۴/۷۰ **	۲/۰۰ ns	۰/۹۷ **	۹۷۵/۵۸ **
A*B	۶	۲۲/۹۱ **	۰/۸۳ **	۰/۹۹ ns	۰/۰۴ **	۱۱۷/۹۷ **
A*C	۳	۴/۴۳ ns	۰/۳۲ **	۰/۲۸ ns	۰/۰۰۷ ns	۳۳/۶۹ ns
B*C	۲	۱۶/۰ *	۰/۱۳ *	۰/۳۶ ns	۰/۰۲ ns	۶/۱۸ ns
A*B*C	۶	۵/۷۹ ns	۰/۰۷ ns	۰/۹۵ ns	۰/۰۱ ns	۳۷/۸۵ ns
خطا	۴۶	۳/۵۵	۰/۰۴	۰/۵۲	۰/۰۱	۲۴/۴۷
ضریب تغییرات (درصد)	-	۷/۷	۱۰/۴۵	۳/۵۵	۷/۴۸	۵/۴۲

ns، * و ** به ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد

جدول پیوست ۸- میانگین مربعات اثر سرب، روی و کلسیم بر درصد و عملکرد روغن، درصد و عملکرد پروتئین و کربوهیدرات محلول (آزمایش مزرعه‌ای)

منابع تغییر	درجه آزادی	درصد روغن	عملکرد روغن	درصد پروتئین دانه	عملکرد پروتئین دانه	کربوهیدرات محلول
تکرار	۲	۴/۶۶ ns	۱۲۵۹۷/۸۴ ns	۰/۶۱ ns	۰/۲۵ ns	۳۴/۵۲ ns
سرب (A)	۲	۱۶۰/۸۲ **	۷۶۷۶۵۵/۹۰ **	۶۵/۳۰ **	۶۹۳۱۳/۱۷ **	۲۱۲۸۸/۱۱ **
روی (B)	۲	۶۷۳/۸۸ **	۷۳۷۲۶/۱۵ **	۲۱/۳۲ **	۳۹۰۷۰/۱۸ **	۳۴۲۲/۲۲ **
کلسیم (C)	۱	۳۵۳/۰۸ ns	۵۷۵۴۹/۷۵ *	۰/۵۸ ns	۵۶۵۱/۸۷ *	۱۳۳/۴۰ *
A*B	۴	۱۸/۵۸ **	۴۲۳۷۰/۴۶ **	۱/۵۴ ns	۳۹۴۳/۲۲ **	۱۵۵/۲۵ **
A*C	۲	۴/۶۷ ns	۷۴۹۵/۶۷ ns	۰/۰۱ ns	۸۶۶/۷۸ ns	۳۶/۹۴ ns
B*C	۲	۱۳/۲۸ *	۲۱۹۴۴/۳۵ ns	۰/۰۴ ns	۱۴۵۱/۹۹ ns	۲۷/۱۰ ns
A*B*C	۴	۷/۴۱ ns	۱۴۲۲۸/۱۱ ns	۰/۳۱ ns	۱۳۳۲/۰۶ ns	۱۳/۰۲ ns
خطا	۳۴	۳/۴۰	۸۳۲۷/۸۶۷	۱/۰۲	۹۲۱/۸۰	۲۴/۷۰
ضریب تغییرات (درصد)	-	۷/۷۶	۱۵/۵۴	۶/۰۶	۸/۰۰	۵/۰

ns، * و ** به ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد

جدول پیوست ۹- میانگین مربعات اثر سرب، روی و کلسیم بر میزان مالون دی آلدهید، فعالیت آنزیم‌های گلوتاتیون اس ترانسفراز، کاتالاز، آسکوربات پراکسیداز و پراکسیداز، محتوای نسبی آب برگ و آنتوسیانین (آزمایش گلدانی)

منابع تغییر	درجه آزادی	مالون دی آلدهید	گلوتاتیون اس- ترانسفراز	کاتالاز	آسکوربات پراکسیداز	پراکسید از	محتوای نسبی آب برگ	آنتوسیانین
تکرار	۲	۰/۱۳ ns	۰/۰۰۰۳ ns	۰/۰۱ ns	۰/۰۰۱ ns	۰/۰۰۲ ns	۳۰/۳۴ ns	۰/۰۲ ns
سرب (A)	۳	۳۶/۶۱ **	۰/۷۰ **	۳/۷۴ **	۵/۸۹ **	۴/۹۱ **	۳۳۰۶/۸۶ **	۲۳/۲۶ **
روی (B)	۲	۱/۲۵ **	۰/۰۴ **	۰/۴۳ **	۱/۳۴ **	۰/۴۱ **	۱۳۸/۷۵ **	۱/۹۳ **
کلسیم (C)	۱	۱/۸۵ **	۰/۰۰۰۴ ns	۰/۴۸ **	۰/۹۹ **	۰/۰۰۱ ns	۲۲۲۹/۸۹ **	۰/۳۷ **
A*B	۶	۰/۶۵ **	۰/۰۰۴ **	۰/۰۲ *	۰/۰۳ *	۰/۰۲ **	۱۱/۸۵ ns	۰/۱۰ *
A*C	۳	۱/۳۷ **	۰/۰۰۰۱ ns	۰/۰۰۴ ns	۰/۰۳ *	۰/۰۰۱ ns	۱۴/۰۳ ns	۰/۰۳ ns
B*C	۲	۱/۳۷ **	۰/۰۰۰۴ ns	۰/۰۴۸ **	۰/۱۱ **	۰/۰۰۰۲ ns	۲/۴۲ ns	۰/۰۲ ns
A*B*C	۶	۱/۲ **	۰/۰۰۰۵ ns	۰/۰۱ ns	۰/۰۲ ns	۰/۰۰۰۵ ns	۹/۴۲ ns	۰/۰۳ ns
خطا	۴۶	۰/۱۲	۰/۰۰۰۳	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۰۲	۱۴/۴۶	۰/۰۳
ضریب تغییرات (درصد)	-	۸/۵۶	۶/۵۸	۹/۵۶	۷/۳۲	۴/۶۷	۵/۷۳	۶/۳۵

ns، * و ** به ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد

جدول پیوست ۱۰- میانگین مربعات اثر سرب، روی و کلسیم بر میزان مالون دی آلدهید، فعالیت آنزیم‌های گلوتاتیون اس ترانسفراز، کاتالاز، آسکوربات پراکسیداز و پراکسیداز، محتوای نسبی آب برگ و آنتوسیانین (آزمایش مزرعه‌ای)

منابع تغییر	درجه آزادی	مالون دی آلدهید	گلوتاتیون اس ترانسفراز	کاتالاز	آسکوربات پراکسیداز	پراکسیداز	محتوای نسبی آب برگ	آنتوسیانین
تکرار	۲	۰/۱۳	۰/۰۰۳ ns	۰/۰۱ ns	۰/۰۵ ns	۰/۰۳ ns	۲/۴۳ ns	۰/۰۱ ns
سرب (A)	۲	۱/۳ **	۰/۱۶ *	۳/۸۰ *	۰/۲ **	۴/۳۸ **	۲۲۲۲/۵۹ **	۱۴/۵۲ **
روی (B)	۲	۸/۷ **	۰/۰۱ ns	۰/۴۶ **	۲/۱ **	۰/۳۴ **	۲۴۰/۷۶ **	۲/۶۰ **
کلسیم(C)	۱	۱/۷ *	۰/۰۱ ns	۰/۰۹ **	۰/۱۷ *	۱/۰۵ **	۴۴۵۱/۳۸ **	۰/۰۹ *
A*B	۴	۱/۲۲ *	۰/۰۲ *	۰/۰۵ **	۰/۰۳ ns	۱/۰۲ ns	۷۶/۶۷ **	۰/۱۱ **
A*C	۲	۰/۰۱ ns	۰/۰۰۲ ns	۰/۰۰۴ ns	۰/۰۳ ns	۰/۰۱ ns	۴۲۸/۸۱ **	۰/۰۳ ns
B*C	۲	۰/۰۲ ns	۰/۰۰۶ ns	۰/۰۰۲ ns	۰/۱ *	۰/۰۱ ns	۱۷/۵۳ ns	۰/۰۰۱ ns
A*B*C	۴	۰/۰۴ ns	۰/۰۱ ns	۰/۰۰۳ ns	۰/۰۶ ns	۰/۰۱ ns	۱۰/۲۴ ns	۰/۰۱ ns
خطا	۳۴	۰/۳۷	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۰۲	۱۰/۴۳	۰/۰۱
ضریب تغییرات (درصد)	-	۷/۱	۷/۰۶	۶/۵	۶/۷	۱۳/۷	۴/۸۹	۵/۴۵

ns، * و ** به ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد

جدول پیوست ۱۱- میانگین مربعات اثر سرب، روی و کلسیم بر رنگیزه‌های فتوسنتزی (آزمایش گلدانی)

منابع تغییر	درجه آزادی	کلروفیل a	کلروفیل b	نسبت کلروفیل a/b	کلروفیل کل (a+b)	کاروتنوئید
تکرار	۲	۰/۴۵ ns	۱/۰۴ ns	۲/۳۴ ns	۰/۱۴ ns	۰/۰۱ ns
سرب (A)	۳	۵۹/۶۶ **	۹۰/۳۴ **	۱۱/۱۶ **	۲۹۶/۴۸ **	۳/۰۴ **
روی (B)	۲	۳۴/۹۷ **	۴۳/۳۴ **	۸/۷۲ **	۱۵۵/۹۳ **	۱/۶۹ **
کلسیم (C)	۱	۳/۱۳ **	۴/۱۸ **	۰/۲۸ ns	۱۴/۵۵ **	۰/۰۱ ns
A*B	۶	۰/۷۴ *	۱/۴۱ **	۴/۱۰ *	۳/۸۱ *	۰/۰۳ ns
A*C	۳	۰/۰۸ ns	۰/۶۶ ns	۰/۷۷ ns	۰/۳۸ ns	۰/۰۵ ns
B*C	۲	۰/۰۷ ns	۰/۰۳ ns	۰/۱۵ ns	۰/۱۰ ns	۰/۰۶ ns
A*B*C	۶	۰/۲۰ ns	۰/۱۱ ns	۰/۱۳ ns	۰/۲۷ ns	۰/۰۶ ns
خطا	۴۶	۰/۳۰	۰/۳۶	۱/۴۳	۰/۴۲	۰/۰۴
ضریب تغییرات (درصد)	-	۹/۵۷	۱۱/۳	۶/۶۷	۶/۴۹	۱۲/۰۳

ns، * و ** به ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد

جدول پیوست ۱۲- میانگین مربعات اثر سرب، روی و کلسیم بر رنگیزه‌های فتوسنتزی (آزمایش مزرعه‌ای)

منابع تغییر	درجه آزادی	کلروفیل a	کلروفیل b	نسبت کلروفیل a/b	کلروفیل کل (a+b)	کاروتنوئید
تکرار	۲	۰/۰۸ ns	۰/۳۵ ns	۰/۱۳ ns	۰/۴۶ ns	۰/۰۰۲ ns
سرب (A)	۲	۴۲/۲۵ **	۵۳/۱۷ **	۰/۴۵ *	۱۹۰/۱۶ *	۱/۱۳ **
روی (B)	۲	۷/۲۴ **	۱۸/۷۵ **	۰/۶۸ **	۴۹/۱۰ **	۱/۰۷ **
کلسیم (C)	۱	۱/۴۷ ns	۶/۰۹ **	۰/۰۵ ns	۱۳/۵۴ ns	۰/۰۹ **
A*B	۴	۰/۴۱ ns	۶/۵ **	۰/۰۴ **	۶/۸۲ **	۰/۰۳ ns
A*C	۲	۱/۷۵ *	۰/۲۸ ns	۰/۰۸ ns	۳/۱۱ *	۰/۰۴ ns
B*C	۲	۰/۳۱ ns	۰/۸۶ ns	۰/۰۷ ns	۰/۷۰ ns	۰/۰۲ ns
A*B*C	۴	۱/۶۱ **	۱/۰۱ ns	۰/۰۱ ns	۳/۹۴ **	۰/۰۵ ns
خطا	۳۴	۰/۳۷	۰/۴۲	۰/۱۲ ns	۰/۸۴ ns	۰/۰۲
ضریب تغییرات (درصد)	-	۸/۵	۱۰/۴	۲۷	۶/۸۷	۱۰/۹۸

ns، * و ** به ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد

جدول پیوست ۱۳- میانگین مربعات اثر سرب، روی و کلسیم بر میزان سرب در برگ، ریشه و دانه (آزمایش گلدانی)

منابع تغییر	درجه آزادی	میزان سرب در برگ	میزان سرب در ریشه	میزان سرب در دانه
تکرار	۲	۰/۲۳ ns	۱۰/۰۱ ns	۰/۰۰۶ ns
سرب (A)	۳	۳۲۳۹/۷ **	۱۹۶۹۶/۴۲ **	۹/۷۴ **
روی (B)	۲	۱۸۴۱/۶ **	۱۳۹۹/۷۱ **	۴/۵۴ **
کلسیم (C)	۱	۴۳۱/۵۵ **	۰/۹۹ ns	۴/۶۳ **
A*B	۶	۳۰۳/۰۸ **	۳۱۴/۹۰ **	۰/۴۴ **
A*C	۳	۶۳/۵۴ **	۰/۲۵ ns	۰/۶۷ **
B*C	۲	۱۵/۱۱ *	۰/۰۵ ns	۰/۷۳ **
A*B*C	۶	۴/۶۰ ns	۰/۰۴ ns	۰/۱۴ **
خطا	۴۶	۳/۷۲	۱۲/۲۰	۰/۰۲
ضریب تغییرات (درصد)	-	۱۲/۳۶	۱۰/۵۸	۱۲/۹۷

ns، * و ** به ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد

جدول پیوست ۱۴- میانگین مربعات اثر سرب، روی و کلسیم بر میزان سرب در برگ و دانه (آزمایش مزرعه‌ای)

منابع تغییر	درجه آزادی	میزان سرب در برگ	میزان سرب در دانه
تکرار	۲	۴/۲۲ ns	۰/۰۲ ns
سرب (A)	۲	۱۸۱۸/۲۶ **	۶/۴۱ **
روی (B)	۲	۳۹۴/۳۵ **	۱/۷۴ **
کلسیم (C)	۱	۴۰۶/۶۰ **	۱/۶۶ **
A*B	۴	۱۶۲/۱۷ **	۰/۳۴ **
A*C	۲	۱۱۳/۶۸ **	۰/۳۷ **
B*C	۲	۳/۳۲ ns	۰/۱۷ **
A*B*C	۴	۲/۰۵ ns	۰/۰۴ **
خطا	۳۴	۱/۳۱	۰/۰۱
ضریب تغییرات (درصد)	-	۱۰/۴۳	۱۲/۵۶

ns، * و ** به ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد

جدول پیوست ۱۵- میانگین مربعات اثر سرب، روی و کلسیم بر محتوای روی و کلسیم در برگ، دانه و ریشه (آزمایش گلدانی)

منابع تغییر	درجه آزادی	میزان روی در برگ	میزان روی در دانه	میزان روی در ریشه	میزان کلسیم در برگ	میزان کلسیم در دانه	میزان کلسیم در ریشه
تکرار	۲	۳/۴۷ ns	۳/۱۹ ns	۱۶/۵۷ ns	۳/۱۷ ns	۱/۰۷ *	۰/۱۴ ns
سرب (A)	۳	۴۸۹۷/۴۶ **	۵۲۸/۴۵ **	۲۸۲۷/۳۸ **	۴۴۷/۶۸ **	۷/۱۷ **	۱۳۶/۹۱ **
روی (B)	۲	۳۶۷۵/۱۴ **	۲۴۵۶/۶۴ **	۱۰۹۶/۷۱ **	۲/۹۸ ns	۰/۰۷ ns	۰/۰۸ ns
کلسیم(C)	۱	۷۰/۶۷ **	۱۳/۵۶ ns	۱۷۳/۳۹ **	۱۳۲۱/۴۱ **	۷/۸۱ **	۳۳۹/۹۵ **
A*B	۶	۱۳۹/۱۱ **	۳۶/۷۲ **	۴۴/۲۹ *	۱/۶۴ ns	۰/۱۰ ns	۱/۲۵ ns
A*C	۳	۱/۹۵ ns	۰/۴۵ ns	۹/۵۳ ns	۱۹/۸۳ **	۲/۲۳ **	۴/۷۷ **
B*C	۲	۷/۵۴ ns	۰/۶۸ ns	۱۰۰/۵۶ **	۳/۲۵ ns	۰/۰۸ ns	۰/۲۹ ns
A*B*C	۶	۸/۴۶ ns	۱/۲۰ ns	۹/۰۸ ns	۱/۱۵ ns	۰/۶۸ ns	۰/۴۹ ns
خطا	۴۶	۶/۸۳	۵/۱۲	۱۵/۴۹	۲/۳۴ ns	۰/۲۹	۰/۴۸
ضریب تغییرات (درصد)	-	۷/۸۱	۷/۵۲	۱۱/۸۶	۱۲/۲۰	۱۳/۸۶	۷/۸۴

ns، * و ** به ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد

جدول پیوست ۱۶- میانگین مربعات اثر سرب، روی و کلسیم بر محتوای روی و کلسیم در برگ و دانه (آزمایش مزرعه‌ای)

منابع تغییر	درجه آزادی	میزان روی در برگ	میزان روی در دانه	میزان کلسیم در برگ	میزان کلسیم در دانه
تکرار	۲	۴/۲۵ ns	۰/۶۴ ns	۳/۵۳ ns	۰/۴ ns
سرب (A)	۲	۱۰۹۰/۵۹ **	۵۰۱/۰۱ **	۱۰۹/۴۵ **	۴/۱۱ **
روی (B)	۲	۱۶۷۴/۹۳ **	۱۲۸۵/۸۱ **	۱۲/۴۸ **	۰/۴۴ ns
کلسیم (C)	۱	۱۶/۸۸ *	۴/۵۶ ns	۳۵۲/۵۱ **	۱/۵۹ *
A*B	۴	۳۴/۰۱ **	۱۱۹/۳۶ **	۰/۶۸ ns	۰/۷۳ ns
A*C	۲	۲/۴۸ ns	۶/۹۹ ns	۴/۵۲ *	۱/۲۶ *
B*C	۲	۱/۹۷ ns	۰/۲۵ ns	۱/۶۰ ns	۰/۵۴ ns
A*B*C	۴	۷/۸۸ ns	۲/۳۶ ns	۱/۲۹ ns	۰/۳۸ ns
خطا	۳۴	۳/۶۸	۳/۸۴	۱/۱۷	۰/۳۱
ضریب تغییرات (درصد)	-	۵/۰۸	۶/۷۶	۶/۶۷	۸/۳۴

ns، * و ** به ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد

منابع

احمدی ج.، سیفی م.م . و دهقی م.ا.، (۱۳۹۱) "تأثیر محلول‌پاشی ریزمغذی‌های آهن، روی و کلسیم بر عملکرد دانه و روغن ارقام کنجد" **مجله الکترونیک تولید گیاهان زراعی**، شماره ۳، دوره ۵: ص ۱۳۰-۱۱۵.

امام ی.، (۱۳۷۴) "**فیزیولوژی تولید گیاهان زراعی گرمسیری**" (ترجمه) جلد اول، انتشارات دانشگاه شیراز، شیراز، ۲۳۱ صفحه.

امیدبیگی ر.، (۱۳۷۹) "**رهیافت‌های تولید و فراوری گیاهان دارویی**" جلد اول، چاپ دوم، انتشارات فکر روز، تهران، ۲۸۶ صفحه.

باقری م.، (۱۳۷۴)، پایان نامه ارشد: "اثرات تاریخ کاشت بر عملکرد و اجزای عملکرد ارقام گلرنگ"، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان،

بای‌بوردی ع. و ملکوتی م.ج.، (۱۳۸۲) "تأثیر آهن، منگنز، روی و مس بر کیفیت و کمیت گندم تحت استرس شوری" **مجله علوم آب و خاک**، شماره ۲، دوره ۱۷: ص۱۴۰-۱۵۰.

پاسبان اسلام، ب.، (۱۳۸۳) "ارزیابی عملکرد و اجزای عملکرد در ژنوتیپ‌های بی‌خار جدید گلرنگ" **مجله علوم کشاورزی ایران**، شماره ۴، دوره ۳۵: ص ۸۷۴-۸۶۹.

پورخباز ح.ر. و جوانمردی س.، (۱۳۹۳) "تعیین غلظت و منبع انتشار فلزات سمی در هوای نواحی شهری (مطالعه موردی: شهر مشهد)" **جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی**، شماره ۳، دوره ۲۵: ص ۲۱۶-۲۰۷.

ثواقبی فیروز آبادی غ.م.، ملکوتی م.ج. و اردلان م.م.، (۱۳۸۲) "اثر سولفات روی و غلظت روی بذر بر پاسخ‌های گیاه گندم در خاک آهکی" **مجله علوم کشاورزی ایران**، شماره ۲، دوره ۳۴: ص ۴۷۱-۴۸۲.

چاکر الحسینی م.د.، (۱۳۷۸)، پایان نامه ارشد: "تأثیر فسفر و آهن بر رشد و ترکیب شیمیایی ذرت و سویا"، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز،

حق‌پرست م.ر.، (۱۳۷۱) "**تغذیه و متابولیسم گیاهان**" ترجمه، انتشارات دانشگاه آزاد اسلامی، رشت، ص ۵۲۷.

حیدری س. و آساد م.ت.، (۱۳۷۷) "تأثیر رژیم‌های آبیاری، کود نیتروژنه و تراکم بوته بر عملکرد گلرنگ رقم زرقان ۲۷۹ در منطقه ارسنجان"، پنجمین کنگره زراعت و اصلاح نباتات ایران، ص ۴۸۵، مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، کرج.

خادمی ا. و کرد ب.، (۱۳۸۹) "نقش گونه‌های درختی پهن برگ (چنار و زبان گنجشک) در کاهش آلودگی ناشی از سرب" **فصلنامه علوم و فنون منابع طبیعی**، شماره ۱، دوره ۵: ص ۱-۱۲.

خلیلی محله ج . و رشدی م.، (۱۳۸۷) "اثر محلول پاشی عناصر کم مصرف بر خصوصیات کمی و کیفی ذرت سیلویی ۷۰۴ در خوی" **مجله نهال و بذر**، شماره ۲، دوره ۲۴: ص ۲۸۱-۲۹۲.

خواجه‌پور م.م.، (۱۳۸۴) " **گیاهان صنعتی**" جلد اول، چاپ سوم، انتشارات دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ۵۸۲ صفحه.

خوش گفتارمنش ا.ح.، (۱۳۸۶) "**مبانی تغذیه گیاه**" جلد اول، چاپ دوم، انتشارات دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ۴۷۴ صفحه.

دنورز ن.، (۱۳۸۰) "**مهندسی کنترل آلودگی هوا**" جلد دوم، مترجم ایوب ترکیان و کتایون نعمت-پور، چاپ اول، انتشارات دانشگاه صنایع و معادن ایران، تهران، ۳۰۴ صفحه.

رمرودی م.، کیخاژاله م.، گلوی م.، ثقه‌الاسلامی م.ج. و برادران ر.، (۱۳۹۰) "اثر محلول‌پاشی عناصر ریزمغذی و رژیم‌های آبیاری بر عملکرد کمی و کیفی گیاه دارویی اسفرزه (*Plantago ovata Forsk.*)" **نشریه بوم شناسی کشاورزی**، شماره ۲، دوره ۳: ص ۲۱۹-۲۲۶.

رنجبر م.، لاری یزدی ح. و برومند جزی ش.، (۱۳۹۰) "تأثیر سالیسیلیک اسید بر رنگیزه‌های فتوسنتزی، محتوای قند و آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در گیاه کلزا تحت تنش سرب" **مجله زیست-شناسی گیاهی**، شماره ۹، دوره ۳: ص ۳۹-۵۲.

رئیسی ساداتی س. ی.، جهان‌بخش گده کهریز س.، (۱۳۹۳) "تأثیر عناصر سنگین بر میزان قند محلول، پروتئین کل و فعالیت برخی آنزیم‌های آنتی اکسیدان در گندم" **پژوهش در اکوسیستم های زراعی**، شماره ۴، دوره ۱: ص ۱۱۷-۱۲۸.

زند ب.، سروش زاده ع.، قناتی ف. و مرادی ف.، (۱۳۸۸) "اثر محلول‌پاشی عنصر روی و تنظیم کننده رشد اکسین بر عملکرد و اجزای عملکرد دانه ذرت دانه ای در شرایط کمبود آب" **مجله به زراعی نهال و بذر**، شماره ۴، دوره ۲۵: ص ۴۳۱-۴۴۸.

سیادت س. ع.، هاشمی دزفولی س.ا.، رادمهر م. و لطف‌علی آینه غ.ع.، (۱۳۷۸)، "تأثیر عناصر کم مصرف بر عملکرد و روند جذب ازت، فسفر و پتاسیم توسط گندم"، ششمین کنگره علوم خاک ایران، ص ۵۰۹، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد.

سیاوشی ک.، سلیمانی ر. و ملکوتی م. ج.، (۱۳۸۳) "تاثیر زمانهای مختلف مصرف سولفات روی و تاریخ کاشت بر عملکرد و درصد پروتیین نخود دیم" **مجله علوم خاک و آب**، شماره ۱، دوره ۱۸: ص ۳۷-۴۳.

شمس ه.، نقدی بادی ح.ع.، امیدی ح.، رضازاده ش. ع.، سروش زاده ع. و سیف سهندی م.، (۱۳۸۸) "تغییرات کمی و کیفی اندام هوایی گیاه گاو زبان در اثر محلول‌پاشی نیترات کلسیم" **فصلنامه گیاهان دارویی**، شماره ۸، دوره ۴: ص ۱۳۸-۱۴۴.

صادری س. ز.، زرین کمر ف. و زینلی ح.، (۱۳۹۰) "بررسی جذب و تجمع سرب در مراحل مختلف رشد و نمو بابونه آلمانی" **مجله زیست شناسی گیاهی**، شماره ۹، دوره ۳: ص ۵۳-۶۲.

صادقی لطف آبادی س.، کافی م. و خزاعی ح.ر.، (۱۳۸۹) "بررسی اثرات تعدیل کنندگی کاربرد خاکی و محلول‌پاشی کلرید پتاسیم و کلرید کلسیم بر صفات مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی گیاه سورگوم (*Sorghum bicolor* L.) در شرایط تنش شوری" **نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)**، شماره ۲، دوره ۲۴: ص ۳۸۵-۳۹۳.

صراف‌پور ر.، محمدی محمود آبادی ش.، ولی‌پور ف. و روزبهانی ف.، (۱۳۸۸) "مطالعه غلظت سرب موجود در هوای منطقه یک تهران در سال ۱۳۸۶" **علوم و تکنولوژی محیط زیست**، شماره ۳، دوره ۱۱: ص ۹۳-۱۰۵.

صفاری ح.، (۱۳۷۵)، پایان نامه ارشد: "بررسی توازن پتاسیم در تعدادی از مزارع گندم خیز استان فارس"، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس تهران،

صفیان ن.، نادری م.ر.، دارخال ه. و شمس م.، (۱۳۸۹)، "تأثیر تغذیه برگی عناصر میکرو بر رشد و عملکرد ذرت دانه ای رقم سینگل کراس ۳۰۲ در منطقه اصفهان، پنجمین همایش ملی مباحث نوین در کشاورزی، ص۵، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خوراسگان

طباطبائیان ج.، (۱۳۹۳) "بررسی تأثیر کلسیم در بهبود آسیب‌های ناشی از تنش شوری در گیاه گوجه فرنگی" **نشریه پژوهش‌های تولید گیاهی**، شماره ۲، دوره ۲۱: ص ۱۲۵-۱۳۷.

عابدی باباعربی س.، موحدی دهنوی م.، یدوی ع. و ادهمی ا.، (۱۳۹۰) "تأثیر محلول‌پاشی روی و پتاسیم بر صفات فیزیولوژیک و عملکرد گلرنگ در شرایط تنش خشکی" **مجله الکترونیک تولید گیاهان زراعی**، شماره ۱، دوره: ۴ ص ۷۵-۹۵.

عباس‌پور ع.، (۱۳۸۶)، رساله دکتری: "اثرات پودر یونجه، شوری و رداکس بر توزیع گونه‌ها و شکل‌های کادمیوم و سرب در تعدادی خاک‌های آلوده"، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان.

عطارزاده م.، رحیمی ا.، ترابی ب. و دشتی ح.، (۱۳۹۴) "تأثیر محلو ل‌پاشی نیترا ت کلسیم، پتاسیم دی هیدروژن فسفات و سولفات منگنز بر تجمع یونی و ویژگی‌های فیزیولوژیک گلرنگ در شرایط تنش شوری" **نشریه** پژوهش‌های کاربردی زراعی، شماره ۱۰۷، دوره ۲۸: ص ۱۳۳-۱۴۲.

علی‌زاده ا.، (۱۳۹۲) "رابطه آب و خاک و گیاه" جلد اول، چاپ چهاردهم، انتشارات دانشگاه امام رضا، مشهد، ۴۷۲ صفحه.

فروزان ک.، (۱۳۷۸) " **گلرنگ**" جلد اول، چاپ اول، انتشارات شرکت دانه‌های روغنی، تهران، ۱۵۰ صفحه.

قطاوی ح.، معافپوریان غ. و بحرانی ع.، (۱۳۹۱) "تاثیر محلول‌پاشی سولفات روی و دور آبیاری برعملکرد، اجزای عملکرد و میزان پروتئین ذرت دانه‌ای" **مجله اکوفیزیولوژی گیاهی**، شماره ۱، دوره ۴: ص ۳۷-۴۸.

کاظمی ن.، (۱۳۸۲)، پایان نامه ارشد: "تأثیر برهمکنش سرب و کلسیم بر رشد و برخی پارامترهای فیزیولوژیکی گیاه گوجه فرنگی *Lycopersicon esculentum* "، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت معلم تهران.

کریمی ن.، خان احمدی م. و مرادی ب.، (۱۳۹۲) "اثر غلظت‌های مختلف سرب بر برخی پارامترهای فیزیولوژیکی گیاه کنگرفرنگی" **مجله پژوهش‌های تولید گیاهی**، شماره ۱، دوره ۲۰: ص ۴۹-۶۲.

کمانی ح.، حسینی م.، صفری غ.، محوی ا.ح. و زارعی ح.، (۱۳۹۴) "عوامل موثر بر غلظت فلزات سنگین در نزولات جوی شهر تهران به روش تحلیل عاملی" مجله **سلامت و محیط زیست، فصلنامه‌ی علمی پژوهشی انجمن علمی بهداشت محیط ایران**، شماره ۴، دوره ۸: ص ۴۰۱-۴۱۰.

کوه نورد پ.، جلیلیان ج. و پیرزاد ع.، (**۱۳۹۰**) "اثر محلول‌پاشی عناصر کم مصرف بر برخی صفات زراعی گلرنگ در نظام‌های زراعی رایج و اکولوژیک" **مجله دانش زراعت**، شماره ۶، دوره ۴: ص ۱۵-۲۵.

مرادی تلاوت م.ر.، روشن ف. و سیادت س.ع.، (۱۳۹۴) "اثر محلول‌پاشی سولفات روی بر محتوای عناصر معدنی، عملکرد دانه و روغن دو رقم گلرنگ (*Carthamus tinctorius* L.)" **مجله علوم زراعی ایران**، شماره ۲، دوره ۱۷: ص ۱۵۳-۱۶۴.

مردانی نافچی ح.، (۱۳۹۵) "بررسی میزان آلودگی به سرب و کادمیوم در گیاهان کلزا و گلرنگ مزارع اطراف کارخانه ذوب آهن و مقایسه این آلودگی با روغن استخراج شده از آنها" **مجلـه** دانشـگاه علـوم پزشکی شهرکرد، شماره ۵، دوره ۱۸: ص ۹۴-۱۰۲.

مرشدی آ.، (۱۳۷۹) "تاثیر محلول‌پاشی آهن و روی بر عملکرد، خواص کیفی و غنی سـازی دانـه‌هـای کلزا در بردسیر کرمان" **مجله خاک و آب، ویژه نامه کلزا**، شماره ۳، دوره ۲۰/۱: ص ۵۸-۶۸.

ملکوتی م.ج . و سپهر ا.، (۱۳۸۳) **"تغذیه بهینه دانه‌های روغنی گامی موثر در نیل به خودکفایی روغن در کشور (مجموعه مقالات)"** جلد اول، چاپ اول، انتشارات خانیران، تهران، ۴۶۴ صفحه.

ملکوتی م.ج. و طهرانـی م.م.، (۱۳۷۹) "**نقش ریز مغذی‌ها در افزایش عملکرد و بهبـود کیفیـت محصولات کشاورزی عناصر خرد با تأثیر کلان**" جلد اول، چـاپ دوم، انتشـارات دانشـگاه تربیـت مدرس، تهران، ۳۲۸ صفحه.

ملکوتی م.ج. و همایی م.، (۱۳۸۳) "**حاصلخیزی مناطق خشک و نیمه خشک (مشـکلات و راه حل‌ها)**" جلد اول، چاپ دوم، انتشارات تربیت مدرس، تهران، ۵۱۸ صفحه.

موسوی م.، باقی‌زاده ا.، آقایاری ف.، افضلی د. و محمدی ن.، (۱۳۹۱) "بررسی تجمع سرب در قسمت-های مختلف گیاه سیر و واکنش گیاه به تنش اکسیداتیو سرب" **مجله زارعت و اصلاح نباتات**، شماره ۲، دوره ۸: ص ۱۱۱-۱۱۸.

ناصری ر.، فصیحی خ.، حاتمی ع. و پورسیاه بیدی م.م.، (۱۳۸۹) "اثر آرایش کاشت بـر عملکـرد دانـه، اجزای عملکرد، میزان روغن و پروتئین گلرنگ پاییزه رقم سینا در شرایط دیم" **مجله علـوم زراعـی ایران**، شماره ۳، دوره ۱۲: ص ۲۲۷-۲۳۸.

نورانی آزاد ح.، حاجی باقری م.ر.، کفیل زاده ف. و نجفیان م.، (۱۳۹۰) "مطالعـه برخـی ویژگـی‌هـای فیزیولوژیکی و بیوشیمیائی یک رقم گلرنگ (*Carthamus tinctorius*) به سـمیت سـرب" **فصـلنامه علمی- پژوهشی گیاه و زیست بوم**، شماره ۲۷، دوره ۷: ص ۶۳-۷۴.

هوشمندفر ع. و طهرانی م.م.، (۱۳۸۷) "بررسی پتانسیل استخراج سرب و روی خاک بـه وسـیله گیـاه گلرنگ" **مجله علمی پژوهشی گیاه و زیست بوم**، شماره ۱۴، دوره ۴: ص ۷۷-۸۶.

یونس سینکی ن.، (۱۳۸۷) "بررسی وضعیت کمی و کیفی روغن موجود در ارقام مختلف گلرنگ تولید شده در سال ۸۷" **مجله آفتابگردان**، شماره ۲۷، دوره ۹: ص ۱۱.

Adriano D.C. (**1986**), "**Trace element in the terrestrial environment**", Vol. 2, Springer, New York, pp. 867.

Agarwal S. and Pandey V. (**2004**) "Antioxidant enzyme resposes to NaCl stress in Cassia angustifolia" **Plant Biol**., **48, 4,** pp **555-560.**

Agrawal H.P. (**1992**) "Assessing the micronutrient requirement of winter wheat" **Commun. Soil Sci. Plant Anal**., **23, (17-20),** pp **2555-2568.**

Akinci I.E., Akinci S. and Yilmaz K. (**2010**) "Response of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) to lead toxicity: Growth, element uptake, chlorophyll and water content" **Afr. J. Agric. Res**., **5, 6,** pp **416-423.**

Alloway B.J. (**2004**), "**Zinc in Soils and Crop Nutrition**", Vol. 1, IZA and IFA Brussels, Belgium and Paris, France, pp. 135.

Alloway B.J. (**2013**), "**Heavy metals in soils: Lead**", Vol. 22, Springer Netherlands, London, PP. 614.

Almeida A-AF., Valle R.R., Mielke M.S. and Gomes F.P. (**2007**) "Tolerance and prospection of phytoremediator woody species of Cd, Pb, Cu and Cr" **Braz. J. Plant Physiol**., **19, 2,** pp **83-98.**

Amini M., Afyuni M., Khademi H., Abbaspour K.C. and Schulin R. (**2005**) "Mapping risk of cadmium and lead contamination to human health in soils of central Iran" **Sci. Total Environ**., **347, (1-3),** pp **64-77.**

Amini M., Afyuni M., Khademi H., Abbaspour K.C. and Schulin R. (**2005**) "Mapping risk of cadmium and lead contamination to human health in soils of central Iran" **Sci. Total Environ**., **347, (1-3),** pp **64-77.**

Amirmoradi Sh., Rezvani Moghadam P., Koocheki A., Danesh Sh. and Fotovat A. (**2012**) "Effect of Cadmium and Lead on Quantitative and Essential Oil Traits of Peppermint (*Mentha piperita* L.)" **Not. Sci. Biol**., **4, 4,** pp **101-109.**

Anjum N.A., Umar S., Ahmad A., Iqbal M. and Khan N.A. (**2008**) "Sulphur protects mustard (*Brassica campestris* L.) from cadmium toxicity by improving leaf ascorbate and glutathione" **Plant Growth Regul., 54, 3,** pp **271-279.**

Aravind P. and Prasad M.N.V. (**2004**) "Zinc protects chloroplasts and associated photochemical functions in cadmium exposed *Ceratophyllum demersum* L., a freshwater macrophyte" **Plant Sci**., **166, 5,** pp **1321–1327.**

Aravind P. and Prasad M.N.V. (**2005**) "Cadmium–Zinc interactions in a hydroponic system using *Ceratophyllum demersum* L. adaptive ecophysiology, biochemistry and molecular toxicology" **Braz. J. Plant Physiol**., **17, 1,** pp **3-20.**

Barcelo L. and Poschenriedr Ch. (**1990**) "Plant water relations as affected by heavy metal stress: A reaview" **J. Plant Nutr**., **13, 1,** pp **1-37.**

Beers RF. J.R. and Sizer I.W. (**1952**) "A spectrophotometric method for measuring the breakdown of hydrogen peroxide by catalase" **J. Biol. Chem., 195, 1,** pp **133-140.**

Bhuiyan N.H., Liu W., Liu G., Selvaraj G., Wei Y. and King J. (**2007**) "Transcriptional regulation of genes involved in the pathways of biosynthesis and supply of methyl units in response to powdery mildew attack and abiotic stresses in wheat" **J. Plant Mol. Biol., 64, 3,** pp **305-318.**

Bian M., Zhou M., Sun D. and Li Ch. (**2013**) "Molecular approaches unravel the mechanism of acid soil tolerance in plants" **Crop J**., **1, 2,** pp **91–104.**

Bor M., Özdemir F. and Turkan I. (**2003**) "The effect of salt stress on lipid peroxidation and antioxidants in leaves of sugar beet *Beta vulgaris* L. and wild beet (*Beta maritima* L.)" **Plant Sci., 164, 1,** pp **77-84.**

Brennan R.F. (**2001**) "Residual value of zinc fertilizer for production of wheat" **Aust. J. Exp. Agric**., **41,** pp **451-547.**

Burton K.W. Morgan E. and Roig A. (**1984**) "The influence of heavy metal upon the growth of sitka- spruce in south wales forests. II greenhouse experiment" **Plant Soil**., **78, 3,** pp **271-282.**

Cakmak I. (**2000**) "Possible role of zinc in protecting plant cells from damage by reactive oxygen species" **New Phytol**., **146, 2,** pp **185–205.**

Cariny T. (**1995**), "**The re-use of contaminated land**", Vol. 1, Chichester, New York, pp. 228.

Carmagnol F., Sinet P.M., Rapin J. and Jerome H. (**1981**) "Glutathione S-transferase of human red blood cells assay, values in normal subjects and in two pathological

circumstances: Hiperbilirubinemia and impaired renal function" **Clin. Chim. Acta**., **117, 2,** pp **209-217.**

Chengbin X., Xuemei L. and Lihong Z.h. (2013) "The Effect of Calcium Chloride on Growth, Photosynthesis, and Antioxidant Responses of Zoysia japonica under Drought Conditions" Plos one., 8, 7, pp 1-10.

Cho, U.H. and Park J.O. (**2000**) "Mercury- induced oxidative stress in tomato seedlings" **Plant Sci**., **156, 1,** pp **1-9.**

Chvapil M. (**1973**) "New aspects in the biological role of zinc: a stabilizer of macromolecules and biological membranes" **Life Sci**., **13, 8,** pp **1041-1049.**

Dalla vecchia F., La Rocca N., Moro I., De Faveri S., Andreoli C. and Rascio N. (**2005**) "Morphogenetic, ultrastructural and physiological damages suffered by submerged leaves of Elodea Canadensis exposed to cadmium" **Plant Sci**., **168, 2,** pp **329-338.**

Das, P., Samantaray, S. and Rout, G. R. (**1997**) "Studies on cadmium toxicity in plants a review" **Environ Pollut**., **98, 1,** pp **29–36.**

Dauda M.K., Variatha M.K., Shafaqat A., Najeeba U., Jamilb M., Hayat Y., Dawooda M., Khand M.I., Zaffar M., Cheemad S.A., Tonga X.H. and Zhua S. (**2009**) "Cadmium induced ultramorphological and physiological changes in leaves of two transgenic cotton cultivars and their wild relative" **J. Hazard. Mater**., **168, 2-3,** pp **614-625.**

Dayod M., Tyerman S.D., Leigh R.A. and Gilliham M. (**2010**) "Calcium storage in plants and the implications for calcium biofortification" **Protoplasma**., **247, 3-4,** pp **215–231.**

Dordas D. (**2009**) "Foliar application of calcium and magnesium improves growth, yield, and essential oil yield of oregano (*Origanum vulgare* ssp. *hirtum*)" **Ind. Crops Prod**., **29, 2-3,** pp **599 – 608.**

El-Beltagi H.S., Mohamed A.A. and Rashed M.M. (**2010**) "Response of antioxidative enzymes to cadmium stress in leaves and roots of Radish" **Not. Sci. Biol**., **2, 4,** pp **76-82.**

EL-Kader A. and Mona G. (**2013**) "Effect of sulfur application and foliar spraying with zinc and boron on yield, yield components, and seed quality of Peanut (*Arachis hypogaea* L.)" **Res. J. Agric. Biol. Sci**., **9, 4,** pp **127-135.**

Erdal I., Kepenek K. and Kizilgos I. (**2004**) "Effect of foliar iron applications at different growth stages on iron and some nutrient concentrations in strawberry cultivars" **Turk. J. Agric. For**., **28, 1,** pp **421-427.**

Ezaki B., Gardner R., Ezaki Y. and Matsumoto H. (**2000**) "Expression of aluminum-induced genes in transgenic Arabidobsis plant can ameliorate aluminum stress and/or oxidative stress" **Plant Physiol**., **122, 3,** pp **657-665.**

Friberg. L. (**2014**), "Handbook on the toxicology of metals", amesterdam. Elsevier, vol. 4, **pp. 158-345.**

Gangadhara G.A., Manijunathaiah H.M. and Stayanarayana, T. (**1990**) "Effect of sulphur on yield, oil content of sunflower and uptake of micro-nutrient by plants" **J. Indian Soc. Soil. Sci., 38, 4,** pp **693-695.**

Gardner F., Valle R. and Mccloud D.E. (**1990**) "Yield characteristics of ancientraces of maize compared to a modern hybrid" **Agron J**., **82, 5,** pp **864-868.**

Garland C.J. and Wilkins D.A. (**1981**) "Effect of calcium on the uptake and toxicity of lead in *hordeum vulgare* l. and *festuca ovina* l" **New Phytol**., **87, 3,** pp **581-593.**

Gecgel U., Demirci M., Esended E. and Tasan M. (**2007**) "Fattg Acid Composition of the oil from Developing seeds of Different Varieties of safflower (*Carthamus tictorius l.*)" **J. Am. Oil Chem. Soc**., **84, 1,** pp **47-54.**

Geebelen W., Vangronsveld J., Adriano D.C., Van Poucke L.C. and Clijsters H. (**2002**) "Effects of Pb-EDTA and EDTA on oxidative stress reactions and mineral uptake in *Phaseolus vulgaris*" **Physiol. Plant**., **115, 3,** pp **377-384.**

Godbold D.L. and Kettner C. (**1991**) "Use of root elongation studies to determine aluminium and lead toxicity in *Picea abies* seedlings" **J. Plant Physiol**., **138, 2,** pp **231–235.**

Grill E., Winnacker E.L. and Zenk M.H. (**1985**) "Phytochelatins: the principal heavymetal complexing peptides of higher plants" **Sci**., **230, 4726,** pp **674-676.**

Guo T.R., Chen Y., Zhang Y.H. and Jin Y.F. (**2006**) "Alleviation of Al toxicity in barley by addition of calcium" **Agric. Sci. China**., **5, 11,** pp **828-833.**

Hall, J.L. (**2002**) "Cellular mechanisms for heavy metal detoxification and tolerance" **J. Exp. Bot**., **53, 366,** pp **1–11.**

Han Y., Huang S., GU J., Qiu S. and Chen J. (**2008**) "Tolerance and accumulation of lead by species of *Iris* L. " **Ecotoxicology**., **17, 8,** pp **853-859.**

Han Y., Huang S.Z., Gu J.G., Qiu S. and Chen J.M. (**2008**) "Tolerance and accumulation of lead by species of *Iris* L." **Ecotoxicology**., **17, 8,** pp **853-859.**

Harrison R.M. and Laxen D.P.H. (**1977**) "A comparative study on methods for soil analysis of total lead in soil" **Water Air Soil Pollut**., **8, 4,** pp **387-392.**

He P.P., Lv X.Z. and Wang G.Y. (**2004**) "Effects of Se and Zn supplementation on the antagonism against Pb and Cd in vegetables" **Environ. Int**., **30, 2,** pp **167-172.**

Heath R.L. and Packer L. **(1968)** "Photoperoxidation in isolated chloroplast. I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation" **Arch. Biochem. Biophys**., **125, 1,** pp **189-198.**

Hirschi K.D. (**2004**) "The calcium conundrum. both versatile nutrient and specific signal" **Plant Physiol**., **136, 1,** pp **2438–2442.**

Ho S., Chao Y., Tong W. and Yu S. (**2001**) "Sugar coordinately and differentially regulates growth-and stress-related gene expression via a complex signal transduction network and multiple control mechanisms" **Plant Physiol**., **125, 2,** pp **877-890.**

Hu J.Z., Shi G.X., Xu Q.S., Wang X., Yuan Q.H. and Du K.H. (**2007**) "Effect of Pb^{+2} on the active oxygen scavenging enzyme activities and ultra structure in *Potamogeton crispus* leaves" **Russ. J. Plant Physiol**., **54, 3,** pp **414-419.**

Ibrahim N.M., Eweis E.A., El-Beltagi H.S. and Abdel-MobdyY.E. (**2012**) "The effect of lead acetate toxicity on experimental male albino rat" **Asian Pac. J. Trop Biomed**., **2, 1,** pp **41-46.**

Ishimaru Y., Suzuki M., Kobayashi T., Takahashi M., Nakanishi H., Mori S. and Nishizawa N. K. (**2005**) "OsZIP-4, a novel zinc-regulated zinc transporter in rice" **J. Exp. Bot**., **56, 422,** pp **3207-3214.**

Islam E., Liu D., Li T, Yang X., Jin X., Khan M.A., Mahmood Q., Hayat Y. and Imtiaz M. (**2011**) "Effect of Pb toxicity on the growth and physiology of two ecotypes of *Elsholtzia argyi* and its alleviation by Zn" **Environ. Toxicol**., **26, 4,** pp **403–416.**

Islam E., Liu D., Li T., Yang X., Jin X., Mahmood Q., Tian Sh. and Li J. (**2008**) "Effect of Pb toxicity on leaf growth, physiology and ultrastructure in the two ecotypes of *Elsholtzia argyi*" **J. Hazard. Mater**., **154, 1-3,** pp **914–926.**

Islam E., Yang X., Li T., Liu D., Jin X. and Meng F. (**2007**) "Effect of Pb toxicity on root morphology, physiology and ultrastructure in the two ecotypes of *Elsholtzia argyi*" **J. Hazard. Mater**., **147, 3,** pp **806–816.**

Jiang W., Struik P.C., van Keulen H, Zhao M, Jin L.N. and Stomph T. J. (**2008**) "Does increased zinc uptake enhance grain zinc mass concentration in rice?" **Ann. Appl. Biol**., **153, 1,** pp **135-147.**

John R., Ahmad P., Gadgil K. and Sharma S. (**2009**) "Heavy metal toxicity: Effect on plant growth, biochemical parameters and metal accumulation by *Brassica juncea* L" **Int. J. Plant Pro**., **3, 3,** pp **65-76.**

Kabata-pendias A. (**2000**), "**Trace Element in Soils and Plants**", VOL 1, 4ed, CRC Press, United states, pp. 548.

Kaffka S.R. and Kearney T.E. (**1998**), "Safflower production in California", Vol. 1, University of California Agriculture and Natural Resources Publication, California, pp. **125**.

Kanase N., Jadhao S.M., Konde N.M. and Patil J.D. (**2008**) "Response of soybean to zinc application" **Agric. Sci. Digest**., **28, 1,** pp **63 – 64.**

Kastrup V., Steiger S., Luttge U. and Fischer-Schliebs E. (**1996**) "Regulatory effects of zinc on corn root plasma membrane H^+-ATPase" **New Phytol**., **134, 1,** pp **61-73.**

Kaszuba M. and Hunt G.R. (**1990**) "Protection against membrane damage: a "H-NMR investigation of the effect of Zn and Ca on the permeability of phospholipid vesicles" **J. Inorg. Biochem**., **40, 3,** pp **217-225.**

Kaya C. and Higgs D. (**2002**) "Response of tomato (*Lycopersicon esculentum* L.) cultivars to foliar application of zinc when grown in sand culture at low zinc" **Sci. Hortic**., **93, 1,** pp **53–64.**

Khan M.N., Siddiqui M.H., Mohammad F., Naeem M. and Khan M.M.A. (**2010**) "Calcium chloride and gibberellic acid protect linseed (*Linum usitatissimum* L.) from NaCl stress by inducing antioxidative defence system and osmoprotectant accumulation" **Acta Physiol. Plant**., **32, 1,** pp **121–132.**

Khudsar T., Mahmooduzzafar Na., Soh W.Y. and Iqbal M. (**2001**) "Morphological and anatomical variations of *Cajanus cajan* (Linn.) Huth raised in cadmium-rich soil" **J. Plantarum Biol**., **41, 1,** pp **59-64.**

Kim Y.Y., Yang Y.Y. and Lee Y. (**2002**) "Pb and Cd uptake in rice roots" **Physiol. Plant**., **116, 3,** pp **368-372.**

Knight H., Trewavas A.J. and Knight M.R. (**1997**) "Calcium signalling in *Arabidopsis thaliana* responding to drought and salinity" **Plant J**., **12, 5,** pp **1067- 1078.**

Kochert G. (1978). Carbohydrate determination by the phenol sulfuric acid method, PP. 96 – 97, In: "Hand book of physiological Methods", Helebust, J.A., Craigie J.S. Cambridge Unir. press, Cambridge

Kumar A., Prasad M.N.V. and Sytar O. (**2012**) "Lead toxicity, defense strategies and associated indicative biomarkers in *Talinum triangulare* grown hydroponically" **Chemosphere, 89, 9,** pp **1056-1065**.

Lane S.D. and Martin E.S. (**1977**) "A histochemical investigation of lead uptake in *Raphanus sativus*" **New Phytol**., **79, 2,** pp **281-286.**

Li H., Sun Y.L., Yu X.H., Guo H.P., Lian H.F., Sun X.D., Shi Q.H. and Liu S.Q. (**2015**) "Effects of exogenous calcium on the growth and physiological traits of garlic seedlings under cadmium stress" **J. Anim. Plant Sci**., **25, 3,** pp **107-113.**

Lichtenthaler H.K. and Wellburn A.R. (**1983**) "Determination of total carotenoids and chlorophyll a and b of leaf extract in different solvents" **Biochem. Soc. Trans**., **11, 5,** pp **591–592.**

Liu D., Li T.Q., Yang X.E., Islam E., Jin X.F. and Mahmood Q. (**2008**) "Effect of Pb on leaf antioxidant enzyme activities and ultrastructure of the two ecotypes of *sedum alfredii Hance*" **Russ. J. Plant Physiol**., **55,** pp **68–76.**

Liu D., Zou J., Meng Q., Zou J. and Jiang W. (**2009**) "Uptake and accumulation and oxidative stress in garlic (*Allium sativum* L.) under lead phytotoxicity" **Ecotoxicology**., **18, 1,** pp **134-143.**

Marschner H. **(1995)**, "**Mineral nutrition of higer plants**", 2th ed, Academic Press, London, pp. 889.

Misra A. (**1992**) "Effect of zinc stress in Japanese mint as related to growth, photosynthesis, chlorophyll contents and secondary plant products - the monoterpenes" **Photosynthetica**., **26, 2,** pp **225-234.**

Misra A. and Sharma S. (**1991**) "Critical Zn concentration for essential oil yield and menthol concentration of *Japanese mint*" **Fert. Res**., **29, 3,** pp **261-265.**

Miszalski Z., Slesak I., Niewiadomska E., Baczek-Kwinta R., Luttge U. and Ratajczak R. (**1998**) "Subcellular localization and stress responses of superoxide dismutase isoforms from leaves in the C_3-CAM intermediate halophyte *Mesembryanthum crystallinum* L" **Plant Cell Environ**., **21, 2,** pp **169-179.**

Mobin M. and Khan N.A. (**2007**) "Photosynthetic activity pigment composition and antioxidative response of two mustard cultivars differing in photosynthetic capacity subjected to cadmium stress" **J. plant Physiol**., **164, 5,** pp **601-610.**

Mohamad W., Iqbal M.M. and Shah S.M. (**1990**) "Effect of mode of application of zinc and iron on yield of wheat" **Sarhad J. Agric**., **6, 6,** pp **615-618.**

Molassiotis A., Tanou G., Diamantidis G., Patakas A. and Therios I. (**2006**) "Effects of 4-month Fe deficiency exposure on Fe reduction mechanism. Photosynthetic gas exchange chlorophyll fluorecence and antioxidant defense in two peach rootstock different in Fe deficiency tolerance" **J. Plant Physiol**., **163, 2,** pp **175-185.**

Movahhedy-dehnavy M., Modarres-Sanavy S.A.M. and Mokhtassi-Bidgoli A. (**2009**) "Foliar application of zinc and manganese improves seed yield and quality of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) grown under water deficit stress" **Ind. Crops Prod**., **30, 1,** pp **82-92.**

Mozafari H., Asrar Z., Rezanejad F., Pourseyedi Sh. and Yaghoobi M.M. (2013) "Calcium and L-histidine interaction on growth improvement of three tomato cultivars under nickel stress" **Acta. Biol. Szeged**., **57, 2,** pp **131-144.**

Mudrik V., Kosobrukhov A., Knyazeva I. and Pigulevskaya T. (**2003**) "Changes in the photosynthetic characteristics of *Plantago major* plants caused by soil drought stress" **Plant Growth Regul**., **40, 1,** pp **1–6.**

Munns R. (**1988**) "Why measure osmotic adjustment?" **Aust. J. Plant Physiol**., **15, 6,** pp **717-726.**

Nakano Y. and Asada K. (**1981**) "Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate–specific peroxidases in spinach chloroplasts" **Plant Cell Physiol**., **22, 5,** pp **867–880.**

Nareshkumar A., Krishnappa B.V., Kirankumar T.V., Kiranmai K., Lokesh U., Sudhakarbabu O. and Sudhakar C.H. (**2014**) "Effect of Pb-stress on growth and mineral status of two groundnut (*Arachis hypogaea* L.) cultivars" **J. Plant Sci., 2, 6,** pp **304-310.**

Nazar R., Iqbal N., Masood A., Khan M.I.R., Syeed Sh. and Khan N.A. (**2012**) "Cadmium toxicity in plants and role of mineral nutrients in its alleviation" **Am. J. Plant Sci**., **3,** pp **1476-1489.**

Nedjimi B. and Daoud Y. (**2009**) "Ameliorative effect of $CaCl_2$ on growth, membrane permeability and nutrient uptake in *Atriplex halimus* subsp. schweinfurthii grown at high (NaCl) salinity" **Desalination**., **249, 1,** pp **163-166.**

Netonda G.W., Onyango J.C. and Beck E. (**2004**) "Sorghum and salinity: II. Gas exchange and chlorophyll fluorescence of sorghum under salt stress" **Crop Sci**., **44,** pp **806- 811.**

Ondo J.A., Prudent P., Menye Biyogo R., Domeizel M., Vassalo L. and Eba F. (**2012**) "Effects of Cu and Zn supplementation on metal uptake by *Hibiscus sabdariffa*" **Res. J. Chem. Sci**., **2, 11,** pp **45-50.**

Pais I. and Benton Jones J. (**1997**), "**The Handbook of Trace elements**", Vol. 1, **St Lucie Press, Boca Raton, pp. 240.**

Pendias A.K. and Pendias H. (**2001**), "**Trace Elements in Soils and Plants**", Vol. 1, CRC Press, London, pp. 548.

Piri I., Moussavi Nik M., Tavassoli A. and Rastegaripour F. (**2011**) "Effect of irrigation intervals and sulphur fertilizer on growth analyses and yield of *Brassica juncea*" **Afr. J. Microbiol Res**., **5, 22,** pp **3640-3646.**

Polle A., Eiblmeier M., Sheppard L. and Murray M. (**1997**) "Responses of Antioxidative Enzymes to Elevated Co2 in Leaves of Beech (*Fagus Sylvatica* L.) Seedlings Grown Under a Range of Nutrient Regimes" **Plant Cell Environ**., **20,** pp **1317–21.**

Potarzycki J. and Grzebisz W. (**2009**) "Effect of zinc foliar application on grain yield of maize and its yielding components" **Plant Soil Environ**., **55, 12,** pp **519-527.**

Potters G., Pasternak T.P., Guisez Y., Palme K.J. and Jansen M.A. (**2007**) "Stress-induced morphogenic responses: growing out of trouble?" **Plant Sci**., **12, 3,** pp **98-105.**

Prasad S.M. and Zeeshan M. (**2005**) "UV-B Radiation and cadmium induced changes in growth, photosynthesis and antioxidant enzymes of *cyanobacterium Plectonema Boryanum*" **Biol. Plantarum**., **49, 2,** pp **229-236.**

Prasad, M.N.V. (**1997**), "Plant ecophysiology", VOL. 1, John Wiley and Sons Inc, New York, PP. 542.

Prassad, D.D.K. and Prassad A.R.K. (**1987**) "Altered aminolaevulinic acid metabolism by lead and mercury in germinating seedling of Bajra" **J. Plant Physiol**., **127, 3-4,** pp **241-249.**

Rahimizadeh M., Habibi D., Madani H., Mohammadi G.N., Mehraban A. and Sabet A. M. (**2007**) "The effect of micronutrients on antioxidant enzymes metabolism in sunflower (*Helianthus annuus* L.) under drought stress" **Helia**., **30, 633,** pp **167-174.**

Ranade-Malvi U. (**2011**) "Interaction of micronutrients with major nutrients with special reference to potassium" **Karnataka J. Agric. Sci**., **24, 1,** pp **106-109.**

Ravi S., Channal H.T., Hebsur N.S., Patil B.N. and Dharmatti P.R. (**2008**) "Effect of sulphur, zinc and iron nutrition on growth, yield, nutrient uptake and quality of Safflower (*Carthamus tinctorius* L.)" **Karnataka J. Agric. Sci**., **21, 3,** pp **382-385.**

Rengel Z. (**1992)** "The role of calcium in salt toxicity" **Plant Cell Environ.**, **15, 6,** pp **625-632.**

Ruiz J. M., Rivero R.M., Lo´pez-Cantarero I. and Romero L. (**2003**) "Role of Ca in the metabolism of phenolic compounds in tobacco leaves (*Nicotiana tabacum* L.)" **Plant Growth Regul**., **41, 2,** pp **173 –177.**

Ruiz J.M., Garcia P.C., Rivero R.M. and Romero L. (**1999**) "Response of phenolic metabolism to the application to the carbendazim plus boron in tobacco leaves" **Physiol. Plant**., **106, 2,** pp **151 – 157.**

Sadasivam S. and Manickam A. (**2005**) **Biochemical methods**, Vol. 1, 2rd Edition, New Age International(P) Ltd, Publishers New Delhi, pp 37.

Sangale P.B., Palil G.D. and Daftardar S.Y. (**1998)** "Effect of foliar application of zinc, iron and boron on yield of safflower" **J. Maharashtra Agric. Univ., 6, 1,** pp **65-66.**

Sanita di toppi L. and Gabbriella R. (**1999**) "Response to cadmium in higher plant" **Environ. Exper. Bot**., **41, 2,** pp **105 – 130.**

Sato F., Yoshioka H., Fujiwara T., Higashio H., Uragami A. and Tokuda S. (**2004**) "Physiologycal responses of cabbage plug seedlings to water stress during low-temperature storage in darkness" **Sci. Hort**., **101, 4,** pp **349-357.**

Scherer H.W., Pacyna S., Spoth K.R. and Schulz M. (**2008**) "Low levels of ferredoxin, ATP, and leghemoglobin contribute to limited N_2 -fixation of peas (*Pisum sativum* L.) and alfalfa (*Medicago sativa* L.) under S deficiency conditions" **Biol. Fert. Soils**., **44, 7,** pp **909-916.**

Seregin I.V. and Ivanov V.B. (**2001**) "Physiological aspects of cadmium and lead toxic effects on higher plants" **Russ. J. Plant Physiol**., **48, 4,** pp **523-544**.

Sharma A.K., Srivastava P.C., Johri B.N. and Rathore V.S. (**1992**) "Kinetics of zinc uptake by mycorrhizal (VAM) and nonmycorrhizal corn roots" **Biol. Fert. Soils**., **13, 4,** pp **206-210.**

Sharma P. and Dubey R.S. (**2005**) "Lead toxicity in plants" **Braz. J. Plant Physiol**., **17, 1,** pp **35-52.**

Shen Z.G., Li X.D., Wang C.C., Chen H.M. and Chua H. (**2002**) "Lead phytoextraction from contaminated soils with high-biomass plant species" **J. Environ. Qual**., **31, 6,** pp **1893-1900.**

Siddiqui M.H., Al-Whaibi M.H. and Basalah M.O. (**2011**) "Interactive effect of calcium and gibberellin on nickel tolerance in relation to antioxidant systems in *Triticum aestivum* L" **Protoplasma**., **248, 3,** pp **503-11.**

Siddiqui M.H., Al-Whaibi M.H., Sakran A.M., Basalah M.O. and Ali H.M. (**2012**) "Effect of calcium and potassium on antioxidant system of *Vicia faba* L. under cadmium stress" **Int. J. Mol. Sci**., **13, 6,** pp **6604–6619.**

Sinha P., Dube B., Srivastava P. and Chatterjee C. (**2006**) "Alteration in uptake and translocation of essential nutrients in cabbage by excess lead" **Chemosphere**., **65, 4,** pp **651–656.**

Song C.Z., Liu M.Y., Meng J.F., Chi M., Xi Z.M. and Zhang Z.W. (**2015**) "Promoting effect of foliage sprayed zinc sulfate on accumulation of sugar and phenolics in berries of *Vitis vinifera* cv. merlot growing on zinc deficient soil" **Molecules 20, 2,** pp **2536-2554.**

Suzuki N. (**2005**) "Alleviation by calcium of cadmium-induced root growth inhibition in Arabidopsis seedlings" **Plant Biotech**. **J**., **22, 1,** pp **19–25.**

Tsuji N., Hirayanagi N., Okada M., Miyasaka H., Hirata K., Zenk M.H. and Miyamoto K. (**2002**) "Enhancement of tolerance to heavy metals and oxidative stress in *Dunaliella tertiolecta* by Zn-induced phytochelatin synthesis" **Biochem. Biophys. Res. Commun**., **293, 1,** pp **653–659.**

Tuna A.L., Kaya C., Ashraf M., Altunlu H., Yokas I. and Yagmur B. (**2007**) "The effects of calcium sulphate on growth, membrane stability and nutrient uptake of tomato plants grown under salt stress" **Environ. Exp. Bot**., **59, 2,** pp **173–178.**

Wagner G.J. (**1979**) "Content and vacuole/ extra vacuole distribution of neutral sugars, free amino acids, and anthocyanins in protoplast" **Plant Physiol**., **64,** pp **88-93.**

Wahbeh M.I. (**1984**) "Levels of zinc, manganese, magnesium, iron and cadmium in three species of seagrass from Aqaba (Jordan)" **Aquat. Bot**., **20, 1-2,** pp **179-183.**

Wang C.Q. and Song H. (**2009**) "Calcium protects *Trifolium repens* L. seedlings against cadmium stress" **Plant Cell Rep**., **28, 9,** pp **1341-1349.**

Wang C.Q. and Wang B.S. (**2007**) "Ca^{2+} Calmodulin is involved in betacyanin accumulation induced by dark in C_3 halophyte *Suaeda salsa*" **J. Integr. Plant Biol**., **49, 9,** pp **1378-1385.**

Wang N. and Duan J.K. **(2006)** "Effects of variety and crude protein content on nutrients and anti-nutrients in lentil" **Food Chem**., **95, 3,** pp **493-502.**

Weisany W., Sohrabi Y., Heidari G., Siosemardeh A. and Ghassemi-olezani K. (**2012**) "Changes in antioxidant enzymes activity and plant performance by salinity stress and zinc application in soybean (*Glycine max* L.)" **Plant Omics J**., **5, 2,** pp **60-67.**

Welch R.M. and Shuman R. (**1995**) "Micronutrient nutrition of plants" **Rev. Plant Sci**., **14, 1,** pp **49-82.**

White P.J. (**2000**) "Calcium channels in higher plants" **BBA- Biomembranes**., **1465, 1-2,** pp **171-189**.

Woodies T.C., Hunter G.B. and Johnson F.J. (**1977**) "Statistical studies of matrix effects on the determination of Cd and Pb in fertilizer and material and plant tissue by Flame atomic absorption spectrophotometry**" Anal Chim Acta**. 90:127– 136.

Wu J., Zhao F.J., Ghandilyan A., Logoteta B., Guzman M.O., Schat H., Wang X. and Aarts M.G.M. (**2009**) "Identification and functional analysis of two ZIP metal transporters of the hyperaccumulato *Thlaspi caerulescens*" **Plant Soil**., **325, 1-2,** pp **79–95.**

Yadav S.K. (**2010**) "Heavy metals toxicity in plants: An overview on the role of glutathione and phytochelatins in heavy metal stress tolerance of plants" **S. Afr. J. Bot**., **76, 2,** pp **167-179.**

Yong Z., Hao-Ru T. and Ya L. (**2008**) "Variation in antioxidant enzyme activities of two strawbreey cultivars with short-term low temperature stress" **J. Agric. Sci., 4,4,** pp **456-462.**

Zafar S., Nasri M., Tohidi Moghadam H.R. and Zahedi H. (**2014**) "Effect of zinc and sulfur foliar applications on physiological characteristics of sunflower (*Helianthus annuus* L.) under water deficit stress" **Int. J. Biosci., 5, 12,** pp **87-96.**

Zago M.P. and Oteiza P.I. (**2001**) "The antioxidant properties of zinc: interactions with iron and antioxidants" **Free Rad. Biol. Med**., **31, 2,** pp **266- 274.**

Ziaei N., Rezaiatmand Z. and ranjbar M. (**2014**) "Study of aluminum toxicity on photosynthetic pigment, soluble sugars and proline contents in two sunflower varieties" **Res. Crop Eco**., **9/1, 2,** pp **105- 113.**

Abstract

Lead (Pb) in environment poses a major threat to plant growth and can be absorbed through the leaves and roots of plants. In such conditions plant nutrition can be effective in the tolerance of plant to Pb stress. So in this study the effects of calcium and zinc foliar were evaluated on agronomic and physiological traits in safflower under lead stress. The experiment was laid out in a factorial based on randomized complete block design with three replications at the greenhouse and farm of Agricultural Research Center of Kerman. The first factor was the treatment of lead. In the pot experiment, the lead treatments were control, soil application of lead, foliar application of lead and combined soil and foliar application of lead and in the farm experiment lead foliar in applied three concentrations (0, 0.5 and 1 mM as acetate lead). The second factor was zinc foliar in three concentrations (0, 10, 20 mM as sulphate zinc) and the third factor was calcium foliar in two levels (0 and 10 mM chloride calcium) were applied in both pot and farm experiments. Foliar was done in the pot and field experiments 65 and 130 day after planting, respectively. 15 days after was sampled and measured traits. In field and pot experiments, zinc foliar spraying had the positive impact on the reduction of lead accumulation in different parts of the plant, maintaining chlorophyll, increasing soluble carbohydrate and anthocyanins, reducing lipid peroxidation of membranes, yield and growth improvement and oil seed content and increased the activity of antioxidant enzymes under lead stress. In pot experiment, zinc (20 mM) foliar in combined Pb application was increased lead accumulation in leaf, seed and root 65, 50 and 39 percentage compared to zero zinc level respectively. In pot experiment, zinc (20 mM) foliar in combined Pb application was decreased lead accumulation in leaf, seed and root 65, 50 and 39 percentage compared to zero zinc level respectively. In field experiment, zinc application (20 mM) in lead stress (1mM) was decreased lead accumulation in leaf and seed 57 and 50 percentage compared to zero zinc level respectively. In pot experiment, calcium application was increased biological yield, oil yield, calcium concentration in different parts of the plant, increasing the root volume, leaf area, plant dry weight and the activity of ascorbate peroxidase, reducing the amount of lead and malondialdehyde in leaves in lead stress. For example, in the combined application of lead, biological yield, oil yield, leaf area increased 11, 45, 20% compared to zero calcium level. In farm experiment, plant nutrition with calcium increased calcium content in leaves and seeds, head number per plant, leaf area index and relative

water content in leaf and chlorophyll concentration under lead stress (1mM) and the least of lead concentration in both leaves and seeds was observed in calcium application. Pb accumulation in leaf and seed decreased 40 and 45 percentage respectively. Combined Ca and Zn application had the most alleviating effect on seed number per head, biological yield, leaf and stem dry weight, biological yield, reducing lead content in seed and the concentration of malondialdehyde in combined application of lead at pot experiment and lead accumulation in seed, chlorophyll concentration at farm experiment under lead stress with a concentration of 1 mM. In the range of lead stress treatments in pot and field experiments, the use of 20 mM concentration of zinc sulfate and 10 mM concentration of calcium chloride as foliar were significant. So it seems that application of calcium and zinc caused against the toxicity of lead by improvement in physiological and growth processes leading to the tolerance of the plant to lead stress.

Key words: Heavy metal, Enzyme activity, Yeild, Mineral elements, Seed oil

Shahrood University of Technology

Faculty of Agriculture

Department of Agronomy

Ph.D. Thesis

Role of foliar application of calcium and zinc on agronomic and physiological traits in safflower *(Carthamus tinctorious*) under lead stress

Parisa Jamshidi

Supervisor

Dr. Mehdi Baradaran Firoozabadi

Advisor

Dr. Hakimeh Oloumi

Dr. Hormazd Naghavi

July 2017