Iranian Journal of Field Crop Science
Vol 54, No 1, Spring 2023 (151-168)
DOI: 10.22059/ijfcs.2022.346622.654931

علوم گیاهان زراعی ایران
دورهٔ ۵۴، شمارهٔ ۱، بهار ۱۴۰۲ (۱۶۸-۱۵۱)

Effects of foliar application of salicylic acid and nanosilicon on the yield and physiological traits of maize (*Zea mays.*) in heavy metal contaminated fields

Seyed komeil Torabi[1], Iraj Alahdadi[*2], Gholam Abbas Akbari[3], Majid Ghorbani Javid[4], Reza Fotovat[5]
1,2,3,4. Department of Agricultural Sciences and Plant Breeding, College of Aburaihan, University of Tehran - Tehran Iran, 5. Department of Agriculture and Plant Breeding, Zanjan University, Zanjan, Iran.
(Received: August 24, 2022 - Accepted: October 14, 2022)

ABSTRACT

Industrialization and destructive human activities have led to a rapid spread of heavy elements contamination in soil. The purpose of this study was to investigate the effect of silicon and salicylic acid on yield and physiological traits of corn in Rahimi and Molavi farms (contaminated with heavy metals and located near lead and zinc factors in Zanjan) in 2020, by using a factorial design based on randomized complete blocks. Factors included spraying salicylic acid at zero, 600, 1200, and 1800 µM, and spraying nanosilicon at zero, 600, 1200 and 1800 mM. Based on the results of soil analysis, lead, zinc, and cadmium concentrations in both fields were higher than the allowable limit and this heavy metal contamination was more severe in Rahimi field. Heavy metal contamination reduced plant height, grain yield and yield components, biological yield, chlorophyll content, and proline levels. The highest grain yield and grain weight were obtained with 1800 µM salicylic acid and 1200 mM nanosilicon treatments, and the lowest with the control treatment (without salicylic acid or nanosilicon). The highest chlorophyll content was obtained from 1800 µM salicylic acid treatment on Molavi's farm and the maximum amount of chlorophyll was observed in 1800 mM nanosilicon treatment. Overall, the treatments improved the yield, chlorophyll content, and relative water content of corn leaves. It is recommended to spray 1800 µM salicylic acid and 1200 mM nanosilicon on the corn fields in this area to increase the stress tolerance under heavy metal conditions.
Keywords: Cadmium, growth regulators, lead, toxicity of heavy metals, zinc.

اثر محلول‌پاشی اسیدسالیسیلیک و نانوسیلیکون بر عملکرد و صفات فیزیولوژیک ذرت (*Zea mays* L.) در مناطق زراعی آلوده به فلزات سنگین

سیدکمیل ترابی[۱]، ایرج اله دادی[۲*]، غلامعباس اکبری[۳]، مجید قربانی جاوید[۴] و رضا فتوت[۵]
۱و۲و۳و۴- به‌ترتیب دانشجوی دکتری، استاد، دانشیار و استادیار، گروه علوم زراعی و اصلاح نباتات، دانشکدگان ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ۵- دانشیار، گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران.
(تاریخ دریافت:۱۴۰۱/۶/۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۷/۲۲)

چکیده

به‌دلیل صنعتی‌شدن و فعالیت‌های مخرب انسانی، آلودگی خاک به عناصر سنگین به شدت در حال گسترش است. این تحقیق با هدف بررسی تأثیر استفاده از سیلیکون و اسیدسالیسیلیک بر عملکرد و برخی صفات فیزیولوژیک ذرت در دو مزرعه خصوصی رحیمی و مولوی (که آلوده به فلزات سنگین بود و در مجاورت کارخانه‌های سرب و روی شهر زنجان واقع شده بودند) در سال ۱۳۹۹ به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار اجرا شد. فاکتورهای آزمایش شامل محلول‌پاشی سالیسلیک‌اسید در چهار سطح صفر، ۶۰۰، ۱۲۰۰ و ۱۸۰۰ میکرومولار و محلول‌پاشی نانوسیلیکون در چهار سطح صفر، ۶۰۰، ۱۲۰۰ و ۱۸۰۰ میلی‌مولار بود. نتایج آنالیز خاک نشان داد که غلظت عناصر سرب، روی و کادمیوم در هر دو مزرعه از حد مجاز بالاتر بوده و این آلودگی فلزات سنگین در مزرعه رحیمی شدت بیشتری داشت. آلودگی فلزات سنگین سبب کاهش ارتفاع بوته، عملکرد دانه و اجزای آن، عملکرد زیستی، محتوای کلروفیل و افزایش پرولین شد. بیشترین عملکرد دانه و وزن هزاردانه از تیمار ۱۸۰۰ میلی‌مولار اسیدسالیسیلیک و ۱۲۰۰ میلی‌مولار نانوسیلیکون و کمترین آن از تیمار شاهد (عدم مصرف اسیدسالیسیلیک و نانوسیلیکون) به دست آمد. بیشترین محتوای کلروفیل از تیمار ۱۸۰۰ میلی‌مولار اسیدسالیسیلیک در مزرعه مولوی به‌دست آمد و در تیمار ۱۸۰۰ میلی‌مولار نانوسیلیکون حداکثر مقدار کلروفیل نیز در مزرعه مولوی مشاهده شد. در مجموع تیمارهای به‌کاررفته تأثیر مثبت بر بهبود عملکرد و اجزای عملکرد کمی، محتوای کلروفیل و محتوای نسبی آب برگ ذرت علوفه‌ای داشت. از بین سطوح به‌کاررفته تیمارها، محلول‌پاشی ۱۸۰۰ میلی‌مولار سالیسیلیک‌اسید و ۱۲۰۰ میلی‌مولار نانوسیلیکون برای بهبود تحمل تنش فلزات سنگین در این منطقه قابل مطالعه و بررسی بیشتر است.
واژه‌های کلیدی: **تنظیم‌کننده رشد، روی، سرب، سمیت فلزات سنگین، عناصر ریزمغذی، کادمیوم.**

* Corresponding author E-mail: alahdadi@ut.ac.ir

مقدمه

ذرت (*Zea mays* L.) به‌عنوان منبع اصلی تأمین‌کننده انرژی در تغذیه دام و طیور از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. به‌همین‌دلیل افزایش سطح زیر کشت و بهبود عملکرد این محصول از اولویت خاصی برخوردار می‌باشد (Tardieu, 2012). طبق گزارش فائو باوجودی‌که گندم سطح زیر کشت بالاتری نسبت به سایر غلات دارد، اما تولید و عملکرد در واحد سطح ذرت از گندم و برنج بالاتر است (FAOSTAT, 2021). علاوه‌براین، سیلوکردن آن به‌آسانی انجام می‌شود و یک علوفه خوش‌خوراک با کیفیت پایدار برای دام می‌باشد و انرژی بالاتری نسبت به سایر علوفه‌ها دارا است (Curran & Posch, 2000). این گیاه در استان زنجان به‌صورت کاملا مکانیزه کشت می‌شود و با سطح زیر کشت ۱۵۰۰ هکتار، کشت متداولی بین زارعین این منطقه می‌باشد. اما آلودگی خاک یکی از تنش‌های محیطی غالب در این استان است که تأثیر نامطلوبی بر عملکرد کمی و کیفی محصولات کشاورزی داشته است. به‌دلیل فعالیت‌های انسان، آلودگی خاک به عناصر سنگین به‌شدت در حال گسترش است. اصطلاح فلزات سنگین به عناصر فلزی با چگالی نسبتا بالا (بالاتر از ۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب) اطلاق می‌شود که حتی در غلظت‌های کم نیز سمی هستند (Hawkes, 1997). فلزات سنگین شامل کادمیوم، سرب، روی، آلومینیوم، آرسنیک، نیکل، کبالت، آهن، کروم، نقره و پلاتین هستند (Bhat *et al.*, 2019) که اخیرا آلودگی در حال گسترش خاک با این عناصر نگرانی جدی در تولید محصولات کشاورزی به وجود آورده است (Feng *et al.*, 2021). آلودگی خاک با فلزات سنگین منجر به اختلالات فیزیولوژیکی عمده در گیاه، کاهش زیست‌توده، کاهش رشد، کاهش کیفیت محصول، ممانعت از فتوسنتز یا اختلال در جذب مواد غذایی می‌شود (Guntzer *et al.*, 2012).

استفاده از عناصر تغذیه‌ای یا هورمون‌های گیاهی از روش‌های مؤثر بر کاهش اثرات منفی تنش فلزات سنگین است.

سیلیکون دومین عنصر فراوان در خاک است که در محلول خاک به‌صورت سیلیس حل‌شده اسیدمونوسیلیسیک (H_4SiO_4) با غلظت ۰/۱ تا ۰/۶ میلی‌مولار وجود دارد و با همین فرم توسط گیاهان جذب می‌شود (Chen *et al.*, 2018).

اگرچه سیلیکون جزء عناصر ضروری برای رشد گیاه دسته‌بندی نشده است، اما اثرات مثبت آن بر بسیاری از گونه‌های گیاهی تک‌لپه‌ای و دولپه‌ای گزارش شده است (Ma & Yamaji, 2015). سیلیکون اثرات منفی تنش‌های مختلف از جمله خشکی، شوری، گرما، سرما، سمیت فلزات سنگین، عدم تعادل عناصر غذایی، پاتوژن‌های گیاهی و آفات را کاهش می‌دهد (Guntzer *et al.*, 2012; Zhang *et al.*, 2014) و سبب افزایش رشد، عملکرد، کیفیت محصول، فتوسنتز، تثبیت نیتروژن نیز می‌شود (Cooke & Leishman 2011; Van Bockaven *et al.*, 2013). اخیرا موسسه بین‌المللی تغذیه گیاهان[1] (IPNI) سیلیکون را به‌عنوان عنصر تغذیه‌ای معرفی کرده است. (http://www.ipni.net/nutrifacts-northamerican).

علاوه‌برآن انجمن کنترل غذاهای گیاهی آمریکا[2] (AAPFCO) به‌طور رسمی سیلیکون را یک عنصر مفید اعلام کرده است (http://www.aapfco.org/). سازوکارهای سم‌زدایی فلزات سنگین توسط سیلیکون عبارتند از: تثبیت فلز سمی در خاک یا محیط رشد از

[1] International Plant Nutrition Institute

[2] Association of American Plant Food Control Officials

طریق تغییر اسیدیته خاک، رسوب فلزات سمی همزمان با سیلیکون، تحریک فعالیت پاداکسیدانهای آنزیمی و غیر آنزیمی، کلاته‌کردن، کده‌بندی فلزات سنگین در بخش هایی از گیاه که به‌لحاظ متابولیکی غیر فعال هستند، اصلاح بیان ژن و تغییرات ساختاری در قسمت‌های مختلف گیاه (Jia-Wen *et al*. 2013; Zargar *et al*., 2019). نقش مثبت سیلیکون در کاهش اثرات سمی فلزات سنگین در بسیاری از گونه‌های گیاهی مانند نخود، خیار، سویا، لوبیا، جو، برنج، گوجه‌فرنگی، کدو تنبل و سورگوم گزارش شده است (Sahebi *et al*., 2015). همچنین مطالعات نشان داد که در تنش فلزات سنگین، سیلیکون از طریق تولید فیتوهورمون های گیاهی در تحمل تنش ایفای نقش می‌کند. سیلیکون تولید جاسمونیک‌اسید، اکسین و سالیسیلیک‌اسید را افزایش می‌دهد و از این طریق باعث تقویت غشای سلولی، کاهش نشت یونی و پراکسیداسیون لیپیدهای غشایی و بهبود تحمل تنش‌های غیر زنده می‌شود (Jing *et al*., 2021; Tripathi *et al*., 2020).

اسیدسالیسیلیک یا اسیدارتوهیدروکسی‌بنزوئیک که از مشتقات فنولی است به‌عنوان تنظیم‌کننده چندین فرایند فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی، پیغام‌رسان گیاهی، رشد و نمو گیاه، سیستم دفاعی گیاه و پاسخ به تنش‌های زنده و غیر زنده در نظر گرفته می‌شود (Wani *et al*., 2017). مطالعات اخیر نشان داده است که اسیدسالیسیلیک در محافظت از گیاه در برابر تنش عناصر سنگین از طریق جذب و یا تجمع این عناصر در اندامک‌های گیاه، تقویت سیستم دفاعی آنتی‌اکسیدانی و حذف گونه‌های فعال اکسیژن، نقش محوری ایفا می‌کند (Wang *et al*., 2019; Dalvi & Bhalerao, 2013).

از آنجایی‌که استان زنجان جزء استان‌های صنعتی کشور به شمار می‌رود و دارای معادن مختلف از جمله معدن و کارخانه سرب و روی انگوران می‌باشد، رهاسازی پساب‌های این کارخانه‌ها، بخار ناشی از این مراکز صنعتی و آلاینده‌های موجود در جو ناشی از فعالیت این معادن و کارخانه‌ها توسط فرونشست‌های اتمسفری در خاک مزارع تجمع و تثبیت می‌شوند. به‌همین‌علت غلظت فلزات سنگین در خاک مزارع این مناطق به حد آلودگی یا بالاتر از آستانه آلودگی رسیده است (این اطلاعات به صورت محرمانه و شفاهاً از مسئولان سازمان جهادکشاورزی و سازمان محیط زیست استان زنجان گرفته شده است) باتوجه‌به نقش مؤثر تنظیم‌کننده‌های رشد و تغذیه عناصر غذایی نظیر سیلیکون بر بهبود تحمل تنش فلزات سنگین، هدف از اجرای این تحقیق بررسی تأثیر استفاده از سیلیکون و اسیدسالیسیلیک بر عملکرد و صفات فیزیولوژیک ذرت در دو مزرعه آلوده به فلزات سنگین (مجاور کارخانه‌های مذکور) بود.

مواد و روش‌ها

این آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در سال ۱۳۹۹ در دو مزرعه واقع در استان زنجان که از نظر موقعیت جغرافیایی متفاوت بودند اجرا شد. مزارع شامل ۱- مزرعه رحیمی واقع در جاده بیجار در جنوب شهر زنجان و در مجاورت محل استقرار اکثر کارخانه‌های سرب و روی استان (در مختصات ۳۶٫۳۷ درجه شمالی و ۴۸٫۲۵ درجه شرقی) و ۲- مزرعه مولوی واقع در جاده دندی در جنوب غربی شهر زنجان و در مجاورت جاده معدن سرب و روی انگوران (در مختصات ۳۶٫۶۲ درجه شمالی و ۴۸٫۴۰ درجه شرقی) بود. فاکتورهای آزمایش شامل محلول‌پاشی اسیدسالیسیلیک (ساخت مرک آلمان با خلوص ۹۲ درصد) در چهار سطح

صفر، ۶۰۰، ۱۲۰۰ و ۱۸۰۰ میکرومولار و محلول‌پاشی نانوسیلیکون (ساخت هیستون آمریکا با خلوص ۹۸ درصد) در چهار سطح صفر، ۶۰۰، ۱۲۰۰و ۱۸۰۰ میلی‌مولار بود. محلول‌پاشی تیمارها در دو مرحله ۱) هشت تا ده برگی و ۲) ظهور ابریشم توسط سم‌پاش دستی انجام شد. به‌منظور جذب بیشتر، محلول‌پاشی در ساعات صبح یا عصر و با افزودن سورفاکتانت (توئین۲۰ با کد ۹۰۰۵-۶۴-۵- ساخت شرکت مرک آلمان با غلظت ۰/۰۱ درصد) انجام شد. رقم ذرت مورد استفاده رقم ماکسیما بود. قبل از اجرای آزمایش نیز نمونه خاک به‌صورت تصادفی از عمق ۰-۳۰ سانتی‌متر زمین محل اجرای آزمایش در هر دو مکان، برداشت و جهت تعیین خصوصیات خاک به آزمایشگاه منتقل شد که نتایج آن در جدول ۱ آمده است. طبق مرور منابع انجام‌شده حد مجاز عناصر سرب، روی و کادمیوم در خاک به‌ترتیب ۵۵، ۱۶ و ۰/۷۶ میلی گرم در کیلوگرم گزارش شده است (Crommentuijn & Polder, 1997; Vodyanitskii, 2016). بنابراین جدول ۱ نشان می‌دهد که غلظت عناصر مورد نظر در دو مکان مورد مطالعه از حد مجاز بالاتر بوده و این آلودگی فلزات سنگین در مزرعه رحیمی (اول) شدت بیشتری داشته است.

هر کرت شامل شش ردیف کاشت به طول شش متر، فواصل بین ردیف ۷۵ سانتی‌متر، فاصله روی ردیف ۲۰ سانتی‌متر، فاصله بین بلوک‌ها سه متر و عمق کاشت بذر ۵-۳ سانتی‌متر بود. مقدار کود مورد نیاز بر اساس آزمایش خاک در هر مزرعه تعیین شد. بلافاصله بعد از کاشت عملیات آبیاری انجام شد، باتوجه‌به شرایط آب و هوایی منطقه و شرایط خاک مزرعه، آبیاری دوم به فاصله پنج روز از آبیاری اول انجام شد تا مرحله جوانه‌زنی، سبزشدن و استقرار گیاهچه به‌خوبی انجام شود. پس از آن هفته‌ای یک‌بار عملیات آبیاری انجام شد و تا پایان مرحله برداشت عمل آبیاری ادامه پیدا کرد.

محاسبه محتوی رطوبت نسبی برگ (RWC) از طریق ۱۵ دیسک برگی که توسط پانچ از برگ‌های گیاه در ساعت ۱۰ صبح انتخاب شدند انجام شد. به‌طوری‌که بعد از توزین وزن تر، دیسک‌های برگی در پتری آب مقطر به‌مدت ۱۲ ساعت، اشباع و سپس توزین شدند. نمونه‌های توزین‌شده در آون ۸۵ درجه سلسیوس به‌مدت ۲۴ ساعت قرار گرفته و وزن خشک آنها تعیین شد. محتوی رطوبت نسبی برگ با استفاده از معادله زیر به‌دست آمد که که در آن،F_w: وزن تر، D_w: وزن خشک و T_w: وزن تر اشباع می‌باشد.

$$RWC= \frac{(F_w-D_w)}{(T_w-D_w)} \times 100$$

میزان کلروفیل و کاروتنوئید با استفاده از روش Lichtenthaler (1987) اندازه‌گیری شد. نتایج حاصل از اندازه‌گیری مقدار رنگیزه‌های فتوسنتزی بر حسب میلی‌گرم بر گرم وزن تر برگ محاسبه و گزارش شد. برای اندازه‌گیری پرولین آزاد برگ از روش Bates *et al.* (1973) استفاده شد. در این روش جذب نمونه‌ها در طول موج ۵۲۰ نانومتر قرائت و غلظت پرولین بر حسب میلی‌گرم بر گرم وزن تر برگ با استفاده از منحنی استاندارد تعیین شد.

برای محاسبه عملکرد نهایی دانه از ردیف‌های میانی پس از حذف نیم‌متر از هر دو سوی خطوط کاشت به‌عنوان اثر حاشیه استفاده شد. در نهایت، گیاهان برداشت‌شده از هر کرت آزمایشی در کیسه‌های جداگانه قرار گرفته و وزن آن‌ها به‌عنوان عملکرد زیستی بر حسب گرم در متر مربع گزارش شد. از هر کرت به‌طور تصادفی چهار بوته ذرت انتخاب و ارتفاع بوته، تعداد دانه در بلال، تعداد ردیف بلال و تعداد دانه در ردیف اندازه‌گیری شد. سپس دانه‌ها را از چوب بلال جدا کرده و در دمای ۷۰ درجه سلسیوس

داخل آون به‌مدت ۷۲ ساعت قرار داده تا رطوبت دانه‌ها به صفر درصد برسد و پس از آن بر مبنای ۱۴ درصد رطوبت عملکرد دانه و وزن هزاردانه (به‌وسیله دستگاه شمارش‌گر بذر) محاسبه شد. تجزیه واریانس و مقایسه میانگین داده‌ها به‌وسیله آزمون چنددامنه‌ای دانکن با نرم‌افزار SAS 9.4 انجام و نمودارها به‌وسیله Excel رسم شد. قبل از انجام تجزیه واریانس مرکب، همگنی واریانس خطاهای آزمایشی با استفاده از آزمون بارتلت مورد آزمون قرار گرفت.

جدول ۱- نتیجه آنالیز خاک محل‌های اجرای آزمایش در سال زراعی ۱۳۹۹.

Table 2. Result of soil analysis of the experimental sites during 2020 growing season.

Analysis	N (%)	P (ppm)	K (ppm)	Fe (ppm)	Cu (ppm)	OC (%)	Zn (ppm)	Cd (ppm)	Pb (ppm)	Soil texture		
										Clay (%)	Silt (%)	Sand (%)
Rahimi (1)	0.42	112	210	1.45	13.08	4.2	321.6	9.9	60	4.5	7.8	87.7
Molavi (2)	0.399	27.2	230	5.5	5.1	3.9	122.8	2.8	49	5.7	7.6	86.7

نتایج و بحث

ارتفاع بوته

نتایج تجزیه واریانس نشان داد اثرات ساده مکان، سطوح اسیدسالیسیلیک و اثر متقابل مکان و اسیدسالیسیلیک و نیز اثر متقابل سه‌گانه مکان، سطوح اسید سالیسیلیک و نانوسیلیکون بر ارتفاع بوته معنی‌دار بود (جدول ۲). مقایسه میانگین اثر متقابل سه‌گانه مکان، سطوح اسیدسالیسیلیک و نانوسیلیکون بر ارتفاع بوته در شکل ۱ نشان داد که بیشترین ارتفاع بوته (۲۶۳ سانتی‌متر) از تیمار ۶۰۰ میکرومولار اسیدسالیسیلیک و ۱۸۰۰ میلی‌مولار نانوسیلیکون از مزرعه مولوی و کمترین ارتفاع بوته (۱۹۷ سانتی‌متر) از تیمار عدم مصرف اسیدسالیسیلیک و مصرف ۱۸۰۰ میلی‌مولار نانوسیلیکون از مزرعه رحیمی به دست آمد. به‌طور کلی افزایش غلظت اسید سالیسیلیک در هر دو مزرعه سبب افزایش ارتفاع بوته شد، اما پاسخ به افزایش سطوح نانوسیلیکون در دو مزرعه متفاوت بود. به‌طوری که در مزرعه مولوی، محلول‌پاشی نانوسیلیکون تفاوت معنی‌داری در ارتفاع بوته ایجاد نکرد، اما در مزرعه رحیمی افزایش غلظت نانو سیلیکون تا ۱۲۰۰ میلی‌مولار سبب افزایش و غلظت ۱۸۰۰ میلی‌مولار سبب کاهش ارتفاع بوته شد (شکل ۱). ازآنجایی‌که غلظت فلزات سنگین در مزرعه رحیمی بالاتر بود، میانگین ارتفاع بوته در این مزرعه در مقایسه با مزرعه مولوی پایین‌تر بود. تحقیقات دیگر نیز کاهش ارتفاع بوته ذرت را در شرایط آلودگی فلزات کادمیوم و روی (Wang *et al.*, 2004)، مس و کادمیوم (Ma & Yamaji, 2006) و کادمیوم و روی (Hosseini *et al.*, 2019) گزارش کردند.

اثر مثبت اسیدسالیسیلیک بر ارتفاع ذرت تحت تنش فلزات سنگین توسط Moravcová *et al.* (2018) نیز گزارش شد. Kumaraswamy *et al.* (2021) افزایش ارتفاع ذرت را با کاربرد با نانوکود سیلیکونی گزارش کردند. Torabi *et al.* (2015) تأثیر سیلیکون بر برخی ویژگی‌های آناتومیکی و فیزیولوژیکی گیاه گاوزبان دارویی را مورد بررسی قرار دادند و مشاهده کردند که اگرچه تیمار با سیلیکون تأثیرات مثبتی بر وزن تر اندام هوایی و ارتفاع

نشان داد، اما غلظت‌های بالای سیلیکون تأثیر منفی در ارتفاع، رشد و صفات آناتومیکی گیاه داشت. در واقع سیلیکون از طریق بهبود توانایی مکانیکی ساقه و برگ‌ها در جذب نور و افزایش ظرفیت فتوسنتزی گیاه باعث افزایش رشد و افزایش ارتفاع گیاه می‌شود (Raj & Thakral, 2008).

جدول ۲- تجزیه واریانس صفات مختلف ذرت تحت تیمارهای آزمایش

Table 2. Analysis of variance for different traits of maize under different treatments

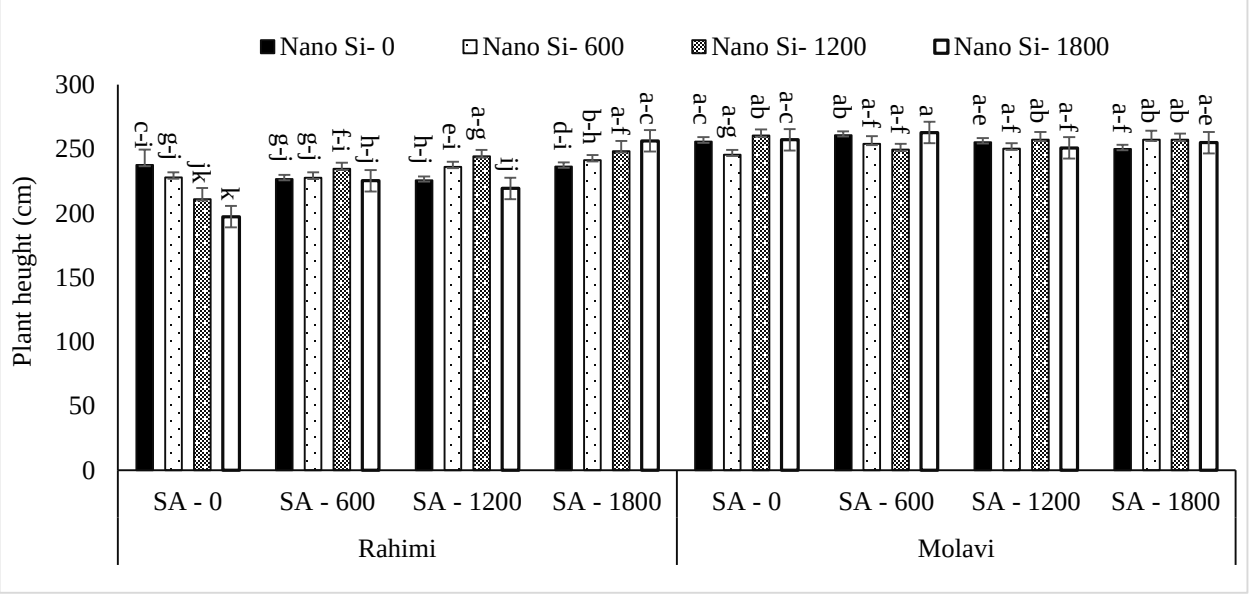
Source of variation	df	Plant height	1000-seed weight	Number of seeds per ear	Number of ear per plant	Number of row per ear	Number of seed per row
Location (L)	1	13812**	882.09	253427.8*	0.0128	3.128	93.38
Rep (L)	4	403.16	1391.99	32489.8	0.0766	15.373	13.51
Salicylic acid (A)	3	751.75**	9407.2**	142808.4**	0.0069	36.173**	93.37**
Nanosilicon (B)	3	98.66	402.62**	7136.2*	0.0213	3.868*	14.15**
A × B	9	242.29	111.22*	2085.8	0.0001	0.808	8.43*
A × L	3	770.36**	7.45	6639.4*	0.0031	0.013	0.03
B × L	3	195.3	30.65	2913.7	0.0001	0.055	0.02
A × B × L	9	298.54*	41.27	1628.3	0.0001	0.078	0.05
Error	60	143.01	49.91	2254.7	0.0081	1.17	1.38
CV (%)		4.92	5.09	7.47	8	6.5	3.8

ادامه جدول ۲- Rest of the Table 2.

Source of variation	df	Seed yield	Biological yield	Relative water content of leaf	Total chlorophyll (a+b)	Carotenoid content	Proline content
Location (L)	1	215585.5*	1309771.8**	0.35	0.18*	0.005	3.617**
Rep (L)	4	23386.3	39997	4.8	0.033	0.008	0.026
Salicylic acid(A)	3	187798.7**	77766.3**	1317.59**	0.364**	0.368**	0.971**
Nanosilicon (B)	3	10964.4**	50506.9*	37.84**	0.182*	0.044**	0.532*
A× B	9	4281.8**	28023.2	1.98	0.033	0.002	0.057
A × L	3	302.5	74473.1**	0.15	0.567**	0.006	0.307
B× L	3	608.8	27392.7	0.12	0.032	0.0001	0.031
A × B × L	9	557.1	11136.2	0.1	0.038	0.0002	0.114
Error	60	1110.5	13885.4	6.36	0.052	0.004	0.15
CV (%)		6.1	7.9	3.32	8.47	13.51	18.9

**و * به‌ترتیب معنی‌دار در سطوح احتمال یک و پنج درصد می‌باشند.

* and ** represent significant at 5% and 1% level.



شکل ۱- مقایسه میانگین اثر متقابل مکان، سطوح سالیسلیک‌اسید و نانوکود سیلیکون بر ارتفاع بوته ذرت.

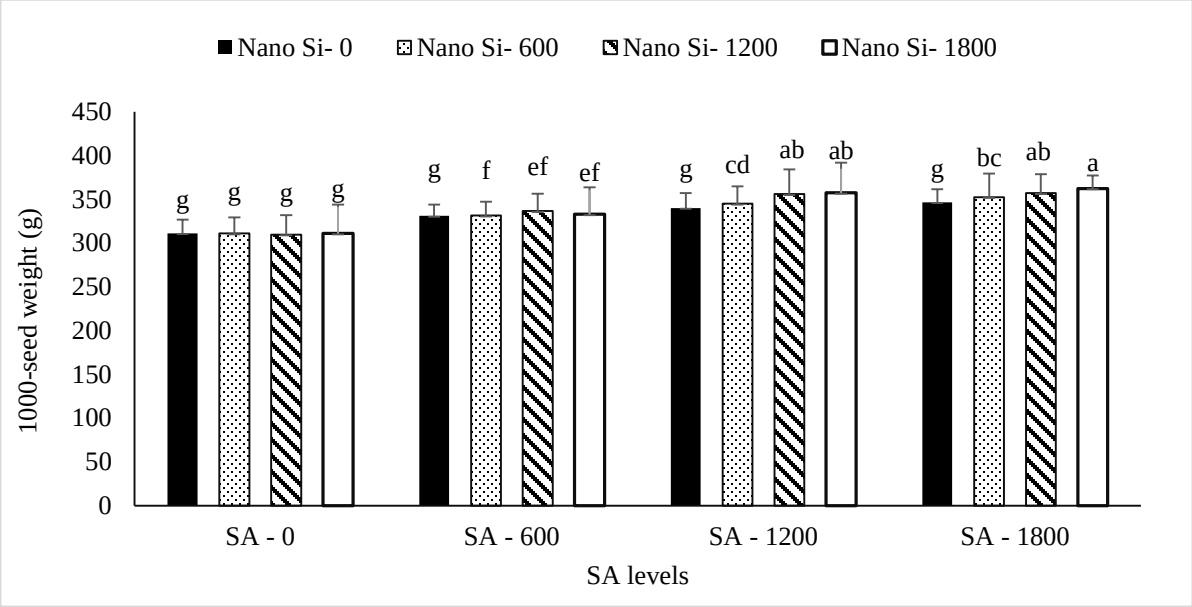
Figure 1. Mean comparison of interaction of location, SA application and nanosilicon on plant height of maize.

وزن هزاردانه و تعداد دانه در بلال

نتایج تجزیه واریانس نشان داد اثرات ساده سطوح اسیدسالیسیلیک و نانوسیلیکون و نیز اثر متقابل سطوح اسیدسالیسیلیک و نانوسیلیکون بر وزن هزاردانه معنی‌دار بود (جدول ۲). مقایسه میانگین اثر متقابل سطوح اسیدسالیسیلیک و نانوسیلیکون بر وزن هزاردانه در شکل ۲ نشان داد که با افزایش غلظت ترکیبات به‌کاررفته میانگین وزن هزاردانه افزایش یافت. بیشترین وزن هزاردانه از تیمار ۱۸۰۰ میلی‌مولار اسیدسالیسیلیک و نانو سیلیکون و کمترین آن از تیمار شاهد (عدم مصرف اسیدسالیسیلیک و نانوسیلیکون) به دست آمد (شکل ۲). نتایج تجزیه واریانس نشان داد اثرات ساده مکان، سطوح سالیسیلیک‌اسید و نانوسیلیکون و نیز اثر متقابل مکان و اسیدسالیسیلیک بر تعداد دانه در بلال معنی‌دار بود (جدول ۲). مقایسه میانگین اثر متقابل مکان و اسیدسالیسیلیک بر تعداد دانه در بلال نشان داد که افزایش غلظت اسیدسالیسیلیک افزایش تعداد دانه در بلال را سبب شد؛ اما میزان افزایش در دو مزرعه مشابه نبود. بیشترین تعداد دانه در بلال از تیمار ۱۸۰۰ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک در مزرعه مولوی و کمترین آن از تیمار شاهد (عدم مصرف اسیدسالیسیلیک و نانوسیلیکون) به دست آمد (شکل ۳). در این آزمایش تعداد واحدهای زایشی در تیمار با اسیدسالیسیلیک افزایش داشت که با نتایج Salarpour Ghorba & Farahbakhs (2013) مطابقت داشت. Krantev *et al.* (2008) نیز گزارش کردند با کاربرد اسید سالیسیلیک در غلظت نیم میلی‌مولار تعداد دانه در بوته ذرت افزایش یافت. در این تحقیق نیز افزایش تعداد دانه در بلال در اثر مصرف اسید سالیسیلیک مشاهده شد. این افزایش می‌تواند به دلیل نقش اسید سالیسیلیک بر القای گلدهی باشد (Blázquez & León, 2008). همچنین بوته‌های قوی‌تر بر اثر محلول‌پاشی اسیدسالیسیلیک بلال‌های

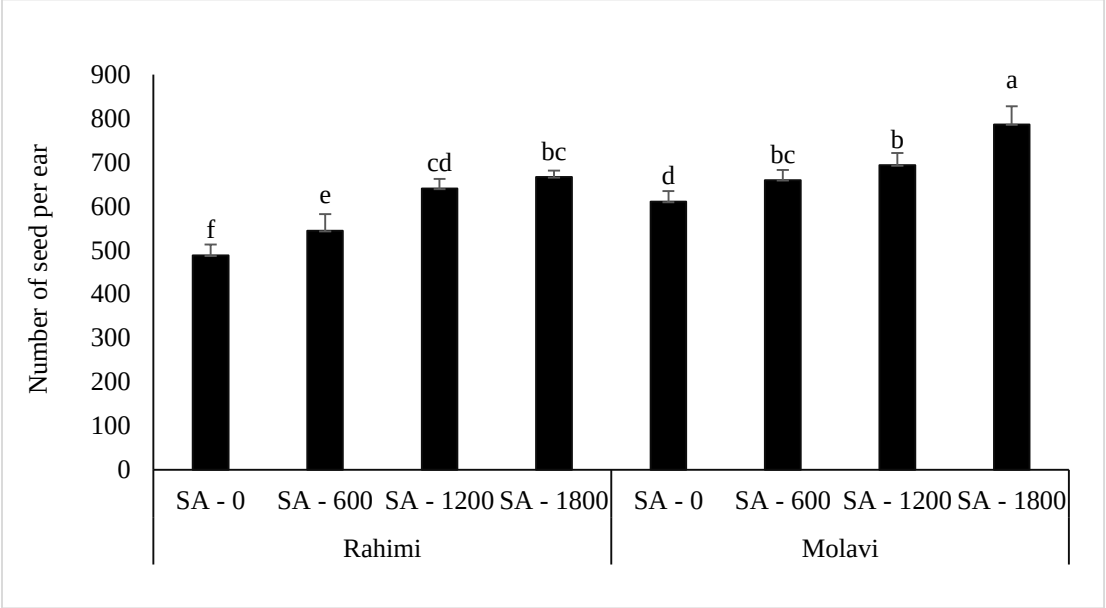
بزرگتری را به‌وجود می‌آورند که دارای تعداد دانه‌ی بیشتری هستند.

به عقیده Eraslan *et al.* (2007) اثرات مفید اسید سالیسیلیک روی عملکرد دانه نیز احتمالاً در رابطه با انتقال بیشتر مواد آسیمیلات فتوسنتزی به دانه‌ها در طول دوره پرشدن دانه بوده که در نتیجه باعث افزایش وزن دانه و به تبع آن عملکرد دانه شده است.



شکل ۲- مقایسه میانگین اثر متقابل سطوح سالیسلیک‌اسید و نانوسیلیکون بر وزن هزاردانه ذرت.

Figure 2. Mean comparison of interaction of SA and nanosilicon levels on 1000-seed weight of maize.



شکل ۳- مقایسه میانگین اثر متقابل مکان و سطوح سالیسلیک‌اسید بر تعداد دانه در بلال ذرت.

Figure 3. Mean comparison of interaction of location and SA application on seed number per ear.

تعداد ردیف بلال و تعداد دانه در ردیف

نتایج تجزیه واریانس نشان داد اثرات ساده سطوح اسیدسالیسیلیک و نانوسیلیکون بر تعداد ردیف در هر بلال معنی‌دار بود (جدول ۲). با مقایسه بین سطوح اسیدسالیسیلیک بیشترین تعداد ردیف بلال از تیمار ۱۸۰۰ میلی‌مولار اسیدسالیسیلیک به دست آمد (جدول ۳). طبق مقایسه میانگین اثر ساده سطوح نانوسیلیکون بیشترین تعداد ردیف بلال از تیمار۱۸۰۰ میلی‌مولار نانوسیلیکون به دست آمد و تیمار عدم مصرف ترکیبات فوق (شاهد)، کمترین تعداد ردیف بلال را داشت (جدول ۳).

نتایج تجزیه واریانس نشان داد اثرات ساده سطوح اسیدسالیسیلیک و نانوسیلیکون و اثر متقابل سطوح اسیدسالیسیلیک و نانوسیلیکون بر تعداد دانه در هر ردیف بلال معنی‌دار بود (جدول ۲). مقایسه میانگین اثر متقابل سطوح اسیدسالیسیلیک و نانوسیلیکون بر تعداد دانه در ردیف در شکل ۴ نشان داد که به طور کلی با افزایش غلظت نانوسیلیکون میانگین شاخص برداشت افزایش یافت، اما روند افزایش در سطوح مختلف اسیدسالیسیلیک مشابه نبود. بیشترین تعداد دانه در ردیف از تیمار ۱۸۰۰ و ۱۲۰۰ میلی‌مولار اسیدسالیسیلیک و ۱۲۰۰ میلی‌مولار نانوسیلیکون و کمترین آن از تمامی تیمارهای عدم مصرف اسیدسالیسیلیک به دست آمد (شکل ۴). اسیدسالیسیلیک به‌عنوان یک ماده شبه هورمونی شناخته شده است، بنابراین به‌نظر می‌رسد این ماده با تأثیر بر مریستم‌های رویشی و زایشی موجب افزایش تعداد ردیف بلال و تعداد دانه در ردیف می‌شود. Khan *et al*. (2010) در محلول‌پاشی اسیدسالیسیلیک روی ماش تحت تنش شوری افزایش تعداد غلاف در بوته را گزارش کردند. اسیدسالیسیلیک تعداد واحدهای زایشی و پر شدن دانه در بوته را افزایش می‌دهد (Zamaninejad *et al*., 2013).

جدول ۳- مقایسه میانگین اثرات مکان، سطوح اسیدسالیسیلیک ونانوکود سیلیکون بر برخی صفات مورد مطالعه.

Table 3- Mean comparison of location, SA and nanosilicon levels on some studied traits.

	Number of rows per ear	Number of seeds per ear	Seed yield (g/m^2)	Relative water content (%)	Total chlorophyll (a+b) (mg/g)	Carotenoid content (mg/g)	Proline content (µmol/g)
Rahimi		584.6^{b}	1035.4^{b}		2.51^{b}		2.24a
Molavii		687.3^{a}	1130.2^{a}		2.74^{a}		1.85^{b}
SA – 0 (Control)	15.4^{b}	549.1^{d}	973.4^{d}	67.56^{d}	2.68^{b}	0.31^{c}	2.31^{a}
SA - 600	15.8^{b}	601.6^{c}	1054^{c}	72.25^{c}	2.60^{b}	0.39^{b}	2.00^{b}
SA - 1200	17.5^{a}	666.8^{b}	1128.5^{b}	79.98^{b}	2.63^{b}	0.54^{a}	2.06^{b}
SA - 1800	17.8^{a}	726.3^{a}	1175.4^{a}	83.97^{a}	2.87^{a}	0.55^{a}	1.83^{b}
Nano Si- 0 (Control)	16.1^{b}	614.5^{b}	1057.9^{c}	74.14^{b}	2.63^{b}	0.46^{a}	2.09^{ab}
Nano Si- 600	16.6^{ab}	629.6^{ab}	1086.2^{b}	76.08^{a}	2.70^{ab}	0.49^{a}	2.24^{a}
Nano Si- 1200	17.0^{a}	651.6^{a}	1109.5^{a}	76.57^{a}	2.63^{b}	0.39^{b}	1.99^{b}
Nano Si- 1800	16.8^{a}	648.1^{a}	1077.7^{b}	76.97^{a}	2.82^{a}	0.42^{b}	1.89^{b}

میانگین‌های دارای حرف مشترک، اختلاف معنی‌داری بر اساس آزمون دانکن ندارند (در سطح احتمال ۵ درصد).

Means that have a common letter in each column, are not significantly different (at the 5% probability level).

عملکرد دانه

نتایج تجزیه واریانس نشان داد اثرات ساده مکان، سطوح اسیدسالیسیلیک و نانوسیلیکون و نیز اثر متقابل سطوح اسیدسالیسیلیک و نانوسیلیکون بر عملکرد دانه ذرت معنی‌دار بود (جدول ۲). مقایسه میانگین اثر متقابل سطوح اسیدسالیسیلیک و نانوسیلیکون بر عملکرد دانه در شکل ۵ نشان داد که با افزایش غلظت نانوسیلیکون میانگین عملکرد دانه افزایش یافت، اما میزان افزایش در سطوح مختلف اسیدسالیسیلیک مشابه نبود. بیشترین عملکرد دانه از تیمار ۱۸۰۰ میلی‌مولار اسیدسالیسیلیک و ۱۲۰۰ میلی‌مولار نانوسیلیکون و کمترین آن از تیمار شاهد (عدم مصرف اسیدسالیسیلیک و نانوسیلیکون) به دست آمد (شکل ۵). مقایسه میانگین اثر ساده مکان نشان داد عملکرد دانه در مزرعه مولوی بالاتر از مزرعه رحیمی بود (جدول ۲).

به گزارش Kumaraswamy *et al.* (2021) عملکرد دانه ذرت با کاربرد نانوسیلیکون هم در آزمایش مزرعه‌ای و هم در آزمایش گلخانه‌ای افزایش یافت. بهبود بازده فتوسنتزی، کارآیی مصرف آب، تأخیر پیری و بهبود مقاومت در برابر تنش‌های محیطی، با کاربرد نانوسیلیکون از دلایل افزایش عملکرد عنوان شده است (Deshmukh *et al.*, 2017; Manivannan & Ahn, 2017). علاوه بر این Guntzer *et al.* (2012) گزارش کردند که سیلیکون نقش مهمی در دسترسی عناصر غذایی و تنظیم جذب نیتروژن، فسفر، پتاسیم و کلسیم ایفا می‌کند و از این طریق در بهبود وضعیت تغذیه‌ای گیاه و عملکرد نقش دارد.

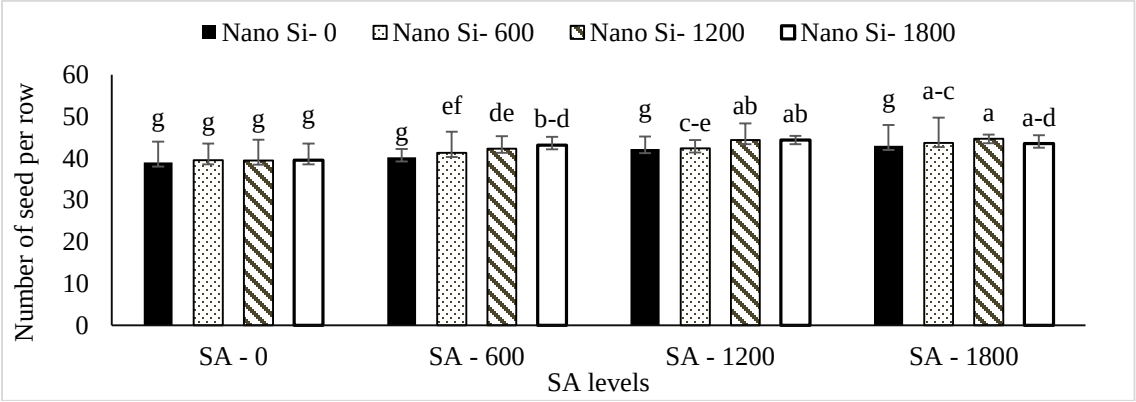
به گزارش محققان کاربرد برگی اسید سالیسیلیک به عنوان محرک رشد علاوه بر افزایش جذب عناصر غذایی، افزایش میزان فتوسنتز و کربن تثبیت شده، از طریق تقویت سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی آنزیمی و غیرآنزیمی، پایداری غشای سلولی و فرآیندهای بیوشیمیایی دیگر سبب کاهش اثرات منفی ناشی از تنش فلزات سنگین شده و افزایش عملکرد را موجب می‌شود (Hayat *et al.*, 2010). افزایش عملکرد دانه در تنش با محلول‌پاشی اسیدسالیسیلیک روی ذرت *Brassica campestris* L. (Bijanzadeh *et al.*, 2019)، *Brassica juncea* (Hasanuzzaman *et al.*, 2019) و (Ahmad *et al.*, 2011) گزارش شده است.

عملکرد زیستی

نتایج تجزیه واریانس نشان داد اثرات ساده مکان، سطوح اسیدسالیسیلیک و نانوسیلیکون و اثر متقابل مکان و سالیسیلیک‌اسید بر عملکرد بیولوژیکی ذرت معنی‌دار بود (جدول ۲). مقایسه میانگین اثر متقابل مکان و سطوح سالیسیلیک‌اسید بر عملکرد زیستی در شکل(۶) نشان داد که با افزایش غلظت اسیدسالیسیلیک میانگین عملکرد بیولوژیکی افزایش یافت، اما میزان افزایش در دو مزرعه مشابه نبود. بیشترین عملکرد زیستی از تیمار ۶۰۰ میلی‌مولار سالیسیلیک‌اسید در مزرعه مولوی و کمترین آن از تیمار شاهد (عدم مصرف اسیدسالیسیلیک) در مزرعه رحیمی به دست آمد (شکل ۶). ضمن اینکه در مزرعه آلوده‌تر (رحیمی) میانگین عمکرد زیست‌توده پایین‌تر بود. مقایسه میانگین اثر ساده نانوسیلیکون نشان داد عملکردزیستی با مصرف نانوسیلیکون افزایش یافت و کمترین عملکرد بیولوژیکی از تیمار شاهد (عدم مصرف نانو سیلیکون) و مصرف ۶۰۰ میلی‌مولار نانو سیلیکون به دست آمد (جدول ۲).

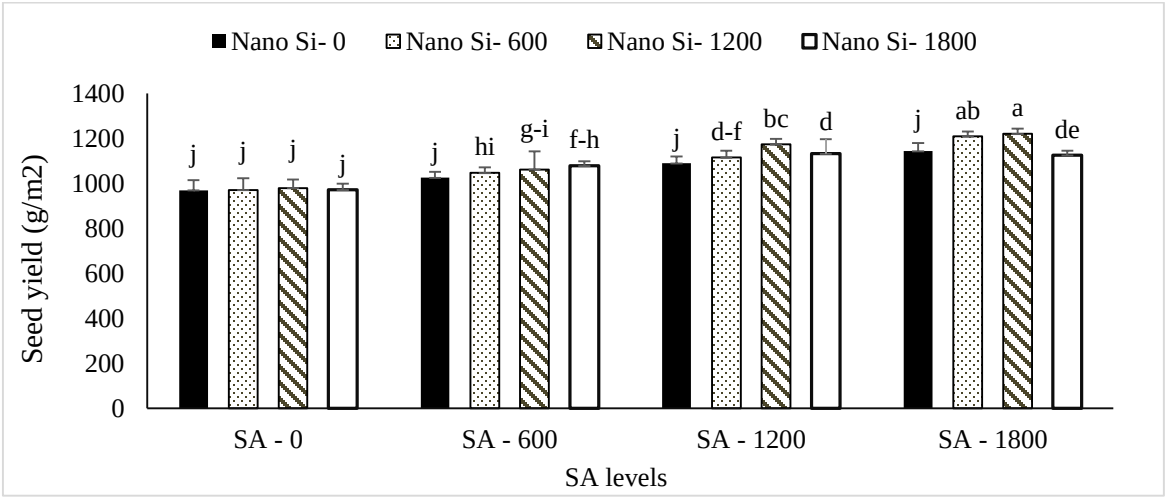
درتحقیقات متعددی کاهش بیوماس گونه‌های گیاهی مختلف در تنش عناصر سنگین، به دلیل کاهش رشد، فتوسنتز، محدودیت و عدم تعادل در جذب عناصر غذایی

گزارش شده است (Bhat *et al*., 2019). همچنین نقش مثبت کودهای سیلیکونی بر تولید بیوماس گیاهی تحت شرایط نامطلوب محیطی در تحقیقات پیشین نیز گزارش شده است (Khan *et al*., 2021). دلیل این امر بهبود شرایط تغذیه‌ای گیاه، بهبود مقاومت به تنش‌های محیطی و نیز افزایش تجمع سلولز، همی‌سلولز و لیگنین در دیواره سلولی عنوان شده است (Zhang *et al*., 2015). کاربرد اسیدسالیسیلیک در شرایط تنش فلزات سنگین نیز تأثیر مثبتی بر رشد و تولید بیوماس گونه‌های: *Brassica juncea* L. (Ahmad *et al*., 2011)، *Brassica napus* L. (Gill *et al*., 2016)، *Oryza sativa* L. (Huda *et al*., 2016) و ذرت (Moravcová *et al*., 2018) داشته است که با نتایج این تحقیق مطابقت دارد.



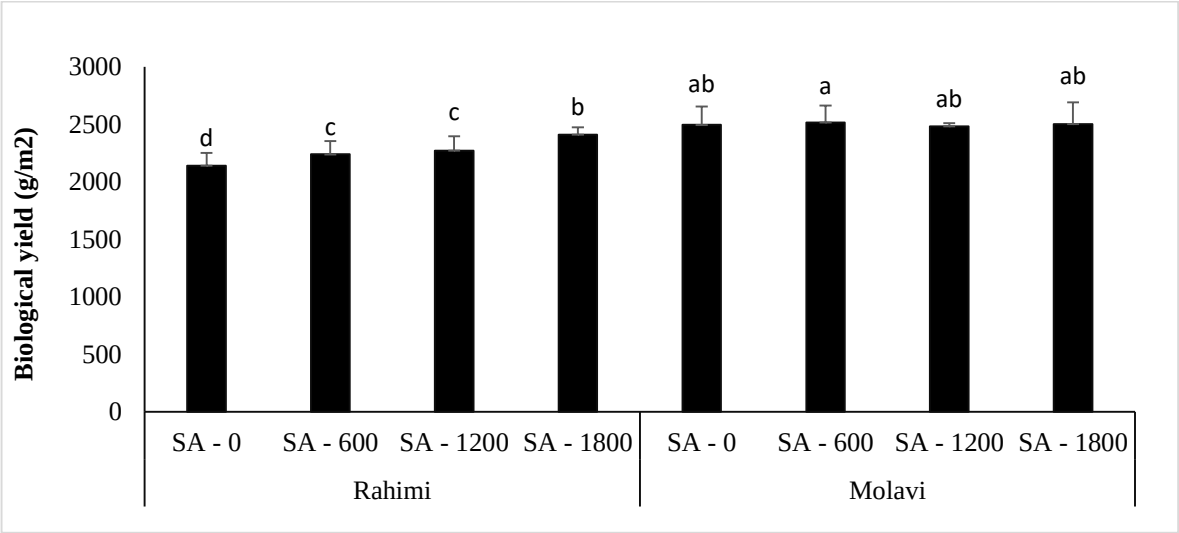
شکل ۴- مقایسه میانگین اثر متقابل سطوح اسیدسالیسیلیک و نانوسیلیکون بر تعداد دانه در ردیف ذرت

Figure 4. Mean comparison of interaction of SA and nanosilicon levels on number of seed per row



شکل ۵- مقایسه میانگین اثر متقابل سطوح اسیدسالیسیلیک و نانوسیلیکون بر عملکرد دانه ذرت.

Figure 5. Mean comparison of interaction of SA and nanosilicon levels on seed yield.



شکل ۶- مقایسه میانگین اثر متقابل مکان و سطوح اسیدسالیسیلیک بر عملکرد زیستی ذرت.

Figure 6. Mean comparison of interaction of location and SA application on biological yield of maize.

محتوای نسبی آب برگ

طبق نتایج تجزیه واریانس اثرات ساده سطوح اسید سالیسیلیک و نانو سیلیکون بر محتوای نسبی آب برگ معنی‌دار بود (جدول ۲). مقایسه میانگین سطوح مختلف اسیدسالیسیلیک نشان داد که بیشترین محتوای نسبی آب برگ از تیمار ۱۸۰۰ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک به دست آمد و از بین سطوح مختلف نانوسیلیکون، تیمار عدم مصرف نانوسیلیکون کمترین محتوای نسبی آب برگ را داشت و در سطوح دیگر نانوسیلیکون محتوای نسبی آب برگ افزایش یافت (جدول ۳).

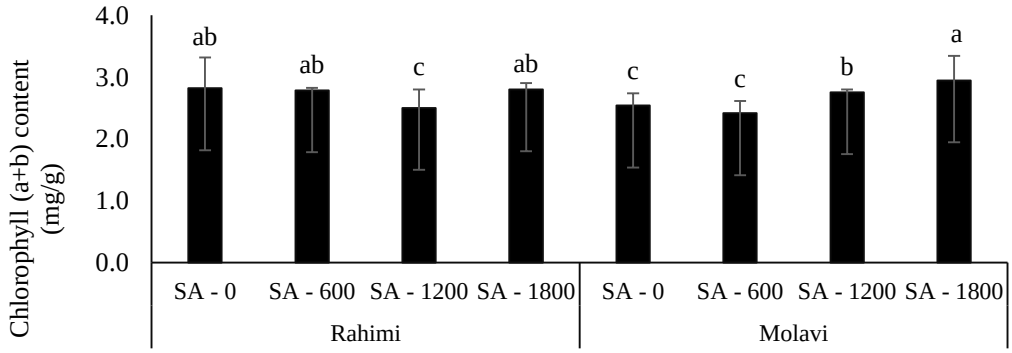
بهبود وضعیت آبی گیاه بعد از کاربرد سیلیکون در مطالعات دیگر نیز نشان داده شده است (Sacała, 2009; Abu-Muriefah, 2015; Liu *et al*., 2014). محققان علت این امر را نقش مثبت سیلیکون در فراهمی عناصر مغذی به‌ویژه پتاسیم، تنظیم باز شدن روزنه‌ها، کاهش تعرق، افزایش ظرفیت تنظیم اسمزی و جذب بیشتر آب عنوان کرده‌اند (Liang *et al*., 2007; Sacała, 2009; Zhu & Rizwan *et al*., 2015;Gong, 2014). سیلیکون با رسوب در دیواره خارجی سلول‌های اپیدرم برگ، میزان کاهش آب از طریق روزنه‌ها را پایین می‌آورد (Gong *et al*., 2005). افزایش محتوای نسبی آب برگ با کاربرد اسیدسالیسیلیک در تنش بیش‌بود کادمیوم در سیب‌زمینی (Li *et al*., 2019) و در تنش بیش‌بود سرب در کلزا (Kohli *et al*., 2018) گزارش شد و علت آن نقش اسیدسالیسیلیک در تنظیم باز و بسته‌شدن روزنه‌ها و کاهش هدایت روزنه‌ای و تعرق عنوان شد.

محتوای کلروفیل (a+b)

نتایج تجزیه واریانس نشان داد اثرات ساده مکان، سطوح اسیدسالیسیلیک و نانوسیلیکون و نیز اثر متقابل مکان و سطوح اسیدسالیسیلیک شکل ۷ نشان داد که به طور کلی محتوای کلروفیل در مزرعه مولوی (کمتر آلوده) بالاتر بود. کاهش محتوای کلروفیل‌های a و b با افزایش غلظت فلزات سنگین در خاک در مطالعه روی گندم (Nagajyoti *et al*., 2010)، جو (Fauteux *et al*., 2006)، سورگوم (Ali *et al*., 2011) و

لوبیا (Greger *et al*., 2018) نیز گزارش شده است. با افزایش غلظت اسیدسالیسیلیک در مزرعه مولوی محتوای کلروفیل افزایش یافت، اما در مزرعه رحیمی روند خاصی از نظر محتوای کلروفیل مشاهده نشد. بیشترین محتوای کلروفیل از تیمار ۱۸۰۰ میکرومولار اسیدسالیسیلیک در مزرعه مولوی به‌دست آمد (شکل ۷). مقایسه میانگین اثر ساده نانوسیلیکون نشان داد محتوای کلروفیل با مصرف نانوسیلیکون افزایش یافت و در تیمار ۱۸۰۰ میلی‌مولار نانوسیلیکون به حداکثر مقدار خود رسید (جدول ۳). در مجموع تیمارهای به‌کار رفته سبب بهبود غلظت کلروفیل شد. Kumaraswamy *et al.* (2021)، Suriyaprabha *et al.* (2012) و Li *et al.* (2007) افزایش محتوای کلروفیل کل و بازده فتوسنتزی را با کاربرد نانوکود سیلیکون روی گیاه ذرت گزارش کردند و علت آن‌را نقش مثبت سیلیکون در حفاظت از ساختارهای غشای پلاسمایی و بافت‌های فتوسنتزی گیاه در برابر اثرات مضر رادیکال‌های آزاد با تحریک فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان و تحریک فعالیت H^+-ATPase عنوان کردند. کاربرد سیلیکون، عدد SPAD، نرخ فتوسنتز خالص، کارآیی مصرف آب، هدایت روزنه‌ای و راندمان کلروفیل فلورسنس گیاه جو را تحت تنش کروم (Ali *et al*., 2013) و گیاه ذرت را تحت تنش بیش‌بود روی (Paula *et al*., 2015) افزایش داد. Doncheva *et al.* (۲۰۰۹) گزارش کردند که در شرایط آلودگی فلزات سنگین کاربرد سیلیکون سبب افزایش ضخامت لایه اپیدرمی برگ و محتوای کلروفیل برگ ذرت شد.

به گزارش محققان اسید سالیسیلیک خارجی به‌کاررفته غلظت کلروفیل و نرخ تثبیت کربن را در تنش فلزات سنگین در سبزمینی (Li *et al*., 2019)، آفتابگردان(Saidi *et al*., 2017) و *Eleusine coracana* (Kotapati *et al*., 2017) افزایش داد. اسیدسالیسیلیک با تحریک فعالیت آنتی‌اکسیدانی از تخریب رنگدانه‌های فتوسنتزی در شرایط تنش جلوگیری می‌کند (Shi *et al*., 2009).



شکل ۷- مقایسه میانگین اثر متقابل مکان و سطوح اسیدسالیسیلیک بر محتوای کلروفیل کل (a+b).

Figure 7. Mean comparison of interaction of location and SA application on chlorophyll (a+b) content.

محتوای کاروتنوئید

طبق نتایج تجزیه واریانس اثرات ساده سطوح اسید سالیسیلیک و نانو سیلیکون بر محتوای کاروتنوئید معنی‌دار بود (جدول ۲). مقایسه میانگین سطوح مختلف اسیدسالیسیلیک نشان داد که بیشترین محتوای کاروتنوئید از تیمارهای ۱۲۰۰ و ۱۸۰۰ میلی‌مولار

اسید سالیسیلیک به دست آمد و از بین سطوح مختلف نانوسیلیکون تیمار عدم مصرف نانوسیلیکون و ۶۰۰ میلی‌مولار نانوسیلیکون بیشترین محتوای کاروتنوئید را داشت (جدول ۳). در این تحقیق هر دو مزرعه مورد مطالعه آلودگی نسبی فلزات سنگین را داشتند و بین دو مزرعه از نظر میزان کاروتنوئید ها اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد، اما برخی گزارش‌ها حاکی از کاهش محتوای کاروتنوئید در جو (Fauteux *et al*., 2006)، پنبه (Shi *et al*., 2005) و *Brassica juncea* (Shi *et al*., 2010) در تنش فلزات سنگین بود. مشابه نتایج این تحقیق، میزان کاروتنوئید با مصرف اسیدسالیسیلیک در گونه *Melissa officinalis* L. (Soltani Maivan *et al*., 2017)و گونه *Alyssum inflatum* (Ghasempour, 2019 Karimi&) نیز بهبود یافت.

پرولین

طبق نتایج تجزیه واریانس اثرات ساده مکان، سطوح اسیدسالیسیلیک و نانوسیلیکون بر محتوای پرولین برگ معنی‌دار بود (جدول ۲). در گیاهان مزرعه رحیمی در مقایسه با مزرعه مولوی میزان پرولین احتمالا به دلیل غلظت بالاتر فلزات سنگین بیشتر بود (جدول ۳). مقایسه میانگین سطوح مختلف اسیدسالیسیلیک نشان داد که بیشترین محتوای پرولین از تیمار عدم مصرف اسیدسالیسیلیک به دست آمد و از بین سطوح مختلف نانوسیلیکون تیمار ۶۰۰ میلی‌مولار نانوسیلیکون بیشترین محتوای پرولین را داشت (جدول ۳). درمجموع با افزایش غلظت اسیدسالیسیلیک و نانوسیلیکون میزان پرولین کاهش یافت (جدول ۳). پرولین به عنوان یک محافظت-کننده اسمزی و حذف‌کننده رادیکال‌های آزاد در تثبیت ساختار سلول در شرایط تنش ایفای نقش می‌کند (Sharma *et al*., 2020). تحریک آنزیم‌های مسئول سنتز پرولین در تنش فلزات سنگین هنوز کاملا ثابت نشده است. به‌همین‌دلیل میزان پرولین در پاسخ به تنش فلزات سنگین در مطالعات مختلف متناقض گزارش شده است. برخی مطالعات افزایش پرولین (Cunha *et al*., 2008) و برخی دیگر کاهش پرولین (Liang *et al*., 2007) در پاسخ به تنش فلزات سنگین را گزارش کرده‌اند. احتمالا این تفاوت‌ها به دلیل تنوع در مکانیسم‌های فیزیولوژیکی پاسخ به تنش توسط گیاه یا تفاوت در غلظت فلزات سنگین و شرایط آزمایش‌های مختلف است. از نظر پاسخ به مصرف اسیدسالیسیلیک در تنش عناصر سنگین نیز هم افزایش پرولین (Li *et al*., 2019; Alamri *et al*., 2018) و هم کاهش پرولین (Zanganeh *et al*., 2018; Kotapati *et al*., 2017; Karimi & Ghasempour, 2019) در آزمایش‌های مختلف گزارش شده است. به‌عقیده Sharma *et al*. (2020) الگوی افزایش یا کاهش پرولین در تنش عناصر سنگین می‌تواند خاص یک گونه یا فلز و یا وابسته به غلظت فلز مورد نظر باشد. به نظر می‌رسد وقتی که هدایت روزنه‌ای به منظور کاهش جذب فلزات سنگین کاهش می‌یابد، افزایش تجمع پرولین تعادل آبی گیاه را حفظ می‌کند و نقش پرولین در حذف رادیکال‌های آزاد اکسیژن در تحمل تنش عناصر سنگین قابل توجه است (Zengin & Munzuroglu, 2005). مشابه نتایج حاصل از این تحقیق، گزارش‌های دیگری از افزایش تجمع پرولین در گندم (Liang *et al*., 2007) و ذرت (Cunha *et al*., 2008) با کاربرد سیلیکون در تنش وجود دارد. پرولین به عنوان یک اسمولیت نه تنها سبب تعدیل اسمزی در شرایط تنش‌های غیر زنده می‌شود بلکه در سم‌زدایی رادیکال‌های آزاد اکسیژن، حفظ یکپارچگی

غشای سلولی و تثبیت پروتئین و آنزیم‌ها نیز نقش دارد (Gunes *et al*., 2008, 2007).

نتیجه‌گیری کلی

در مجموع طبق نتایج این تحقیق آلودگی فلزات سنگین در دو مزرعه سبب کاهش عملکرد و اجزای آن و نیز کاهش رنگیزه‌های فتوسنتزی و محتوای نسبی آب برگ شد. اما کاربرد نانوکود سیلیکون و سالیسیلیک‌اسید توانست اثرات منفی ناشی از بیش‌بود عناصر سرب، روی و کادمیوم را تا حدودی بهبود بخشد. از بین سطوح مختلف کاربرد اسیدسالیسیلیک غلظت ۱۸۰۰ میکرومولار و از بین سطوح مختلف سیلیکون به‌صورت نانوکود به‌دلیل اثربخشی بیشتر در مقادیر کم (غلظت ۱۲۰۰ میلی‌مولار) توانست سبب افزایش عملکرد دانه و بهبود تحمل تنش فلزات سنگین شود. در مجموع کاربرد این ترکیبات در منطقه مورد آزمایش برای ثبات عملکرد و بهبود کیفیت در ذرت علوفه‌ای قابل توصیه است.

REFERENCES

1. Abu-Muriefah, S. S. (2015). Effects of silicon on faba bean (*Vicia faba* L.) plants grown under heavy metal stress conditions. *Afr. J. Agric. Sci. Technol.*, 3, 255-268.
2. Ahmad, P., Nabi, G., & Ashraf, M. (2011). Cadmium-induced oxidative damage in mustard [*Brassica juncea* (L.) Czern. & Coss.] plants can be alleviated by salicylic acid. *South African Journal of Botany*, 77(1), 36-44.
3. Alamri, S. A. D., Siddiqui, M. H., Al-Khaishany, M. Y., Ali, H. M., Al-Amri, A., & AlRabiah, H. K. (2018). Exogenous application of salicylic acid improves tolerance of wheat plants to lead stress. *Adv. Agric. Sci.*, 6(2).
4. Ali, S., Bai, P., Zeng, F., Cai, S., Shamsi, I. H., Qiu, B., ..., & Zhang, G. (2011). The ecotoxicological and interactive effects of chromium and aluminum on growth, oxidative damage and antioxidant enzymes on two barley genotypes differing in Al tolerance. *Environmental and Experimental Botany*, 70(2-3), 185-191.
5. Ali, S., Farooq, M. A., Yasmeen, T., Hussain, S., Arif, M. S., Abbas, F., ... & Zhang, G. (2013). The influence of silicon on barley growth, photosynthesis and ultra-structure under chromium stress. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 89, 66-72.
6. Bates, L. S., Waldren, R. P., & Teare, I. D. (1973). Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant and Soil*, 39(1), 205-207.
7. Bhat, J. A., Shivaraj, S. M., Singh, P., Navadagi, D. B., Tripathi, D. K., Dash, P. K., ... & Deshmukh, R. (2019). Role of silicon in mitigation of heavy metal stresses in crop plants. *Plants*, 8(3), 71.
8. Bijanzadeh, E., Naderi, R., & Egan, T. P. (2019). Exogenous application of humic acid and salicylic acid to alleviate seedling drought stress in two corn (*Zea mays* L.) hybrids. *Journal of Plant Nutrition*, 42(13), 1483-1495.
9. Blázquez, M. A., & León, J. (2008). Reproductive development. *Annual Plant Reviews, Plant Hormone Signaling*, 293.
10. Chen, D., Wang, S., Yin, L., & Deng, X. (2018). How does silicon mediate plant water uptake and loss under water deficiency? *Frontiers in Plant Science*, *9*, 281.
11. Cooke, J., & Leishman, M. R. (2011). Is plant ecology more siliceous than we realise? *Trends in Plant Science*, 16(2), 61-68.
12. Crommentuijn, T., & Polder, M. D. (1997). Maximum permissible concentrations and negligible concentrations for metals, taking background concentrations into account.
13. Cunha, K., Nascimento, C., & Silva, A. (2008). Silicon alleviates the toxicity of cadmium and zinc for maize (*Zea mays* L.) grown on a contaminated soil. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 171(6), 849-853.
14. Curran, B., & Posch, J. (2000). Agronomic management of silage for yield and quality: Silage cutting height.
15. Dalvi, A. A., & Bhalerao, S. A. (2013). Response of plants towards heavy metal toxicity: An overview of avoidance, tolerance and uptake mechanism. *Ann. Plant Sci.*, 2(9), 362-368.
16. Deshmukh, R. K., Ma, J. F., & Bélanger, R. R. (2017). Role of silicon in plants. *Frontiers in Plant Science*, 8, 1858.
17. Doncheva, S. N., Poschenrieder, C., Stoyanova, Z., Georgieva, K., Velichkova, M., & Barceló, J. (2009). Silicon amelioration of manganese toxicity in Mn-sensitive and Mn-tolerant maize varieties. *Environmental and Experimental Botany*, 65(2-3), 189-197.
18. Eraslan, F., Inal, A., Gunes, A., & Alpaslan, M. (2007). Impact of exogenous salicylic acid on the growth, antioxidant activity and physiology of carrot plants subjected to combined salinity and boron toxicity. *Scientia Horticulturae*, 113(2), 120-128.

19. Fauteux, F., Chain, F., Belzile, F., Menzies, J. G., & Bélanger, R. R. (2006). The protective role of silicon in the arabidopsis–powdery mildew pathosystem. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103(46), 17554-17559.
20. Feng, R., Zhao, P., Zhu, Y., Yang, J., Wei, X., Yang, L., ... & Ding, Y. (2021). Application of inorganic selenium to reduce accumulation and toxicity of heavy metals (metalloids) in plants: The main mechanisms, concerns, and risks. *Science of the Total Environment*, 771, 144776.
21. Gill, R. A., Zhang, N., Ali, B., Farooq, M. A., Xu, J., Gill, M. B., ... & Zhou, W. (2016). Role of exogenous salicylic acid in regulating physio-morphic and molecular changes under chromium toxicity in black-and yellow-seeded *Brassica napus* L. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(20), 20483-20496.
22. Gong, H., Zhu, X., Chen, K., Wang, S., & Zhang, C. (2005). Silicon alleviates oxidative damage of wheat plants in pots under drought. *Plant Science*, 169(2), 313-321.
23. Greger, M., Landberg, T., & Vaculík, M. (2018). Silicon influences soil availability and accumulation of mineral nutrients in various plant species. *Plants*, 7(2), 41.
24. Gunes, A., Pilbeam, D. J., Inal, A., & Coban, S. (2008). Influence of silicon on sunflower cultivars under drought stress, I: Growth, antioxidant mechanisms, and lipid peroxidation. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 39(13-14), 1885-1903.
25. Guntzer, F., Keller, C., & Meunier, J. D. (2012). Benefits of plant silicon for crops: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 32(1), 201-213.
26. Hasanuzzaman, M., Matin, M. A., Fardus, J., Hasanuzzaman, M., Hossain, M. S., & Parvin, K. (2019). Foliar application of salicylic acid improves growth and yield attributes by upregulating the antioxidant defense system in *Brassica campestris* plants grown in lead-amended soils. *Acta Agrobotanica*, 72(2).
27. Hawkes, S. J. (1997). What is a" heavy metal"? *Journal of Chemical Education*, 74(11), 1374.
28. Hayat, Q., Hayat, S., Irfan, M., & Ahmad, A. (2010). Effect of exogenous salicylic acid under changing environment: A review. *Environmental and Experimental Botany*, 68(1), 14-25.
29. Hosseini, S. A., Naseri Rad, S., Ali, N., & Yvin, J. C. (2019). The ameliorative effect of silicon on maize plants grown in Mg-deficient conditions. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(4), 969.
30. Huda, A. K. M., Swaraz, A. M., Reza, M. A., Haque, M. A., & Kabir, A. H. (2016). Remediation of chromium toxicity through exogenous salicylic acid in rice (*Oryza sativa* L.). *Water, Air, & Soil Pollution*, 227(8), 1-11.
31. Jia-Wen, W. U., Yu, S. H. I., Yong-Xing, Z. H. U., Yi-Chao, W. A. N. G., & Hai-Jun, G. O. N. G. (2013). Mechanisms of enhanced heavy metal tolerance in plants by silicon: A review. *Pedosphere*, 23(6), 815-825.
32. Jing, T., Du, W., Gao, T., Wu, Y., Zhang, N., Zhao, M., ... & Song, C. (2021). Herbivore-induced DMNT catalyzed by CYP82D47 plays an important role in the induction of JA-dependent herbivore resistance of neighboring tea plants. *Plant, Cell & Environment*, 44(4), 1178-1191.
33. Karimi, N., & Ghasempour, H. R. (2019). Salicylic acid and jasmonic acid restrains nickel toxicity by ameliorating antioxidant defense system in shoots of metallicolous and non-metallicolous *Alyssum inflatum* Náyr. Populations. *Plant Physiology and Biochemistry*, 135, 450-459.
34. Khan, I., Awan, S. A., Rizwan, M., Ali, S., Hassan, M. J., Brestic, M., ... & Huang, L. (2021). Effects of silicon on heavy metal uptake at the soil-plant interphase: A review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 222, 112510.
35. Khan, N. A., Syeed, S., Masood, A., Nazar, R., & Iqbal, N. (2010). Application of salicylic acid increases contents of nutrients and antioxidative metabolism in mungbean and alleviates adverse effects of salinity stress. *International Journal of Plant Biology*, 1(1), e1.
36. Kohli, S. K., Handa, N., Sharma, A., Gautam, V., Arora, S., Bhardwaj, R., ... & Ahmad, P. (2018). Combined effect of 24-epibrassinolide and salicylic acid mitigates lead (Pb) toxicity by modulating various metabolites in *Brassica juncea* L. seedlings. *Protoplasma*, 255(1), 11-24.
37. Kotapati, K. V., Palaka, B. K., & Ampasala, D. R. (2017). Alleviation of nickel toxicity in finger millet (*Eleusine coracana* L.) germinating seedlings by exogenous application of salicylic acid and nitric oxide. *The Crop Journal*, 5(3), 240-250.
38. Krantev, A., Yordanova, R., Janda, T., Szalai, G., & Popova, L. (2008). Treatment with salicylic acid decreases the effect of cadmium on photosynthesis in maize plants. *Journal of Plant Physiology*, 165(9), 920-931.
39. Kumaraswamy, R. V., Saharan, V., Kumari, S., Choudhary, R. C., Pal, A., Sharma, S. S., ... & Biswas, P. (2021). Chitosan-silicon nanofertilizer to enhance plant growth and yield in maize (*Zea mays* L.). *Plant Physiology and Biochemistry*, 159, 53-66.
40. Li, Q. F., Ma, C. C., & Shang, Q. L. (2007). Effects of silicon on photosynthesis and antioxidative enzymes of maize under drought stress. *The Journal of Applied Ecology*, 18(3), 531-536.

41. Li, Q., Wang, G., Wang, Y., Yang, D., Guan, C., & Ji, J. (2019). Foliar application of salicylic acid alleviate the cadmium toxicity by modulation the reactive oxygen species in potato. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 172, 317-325.
42. Liang, Y., Sun, W., Zhu, Y. G., & Christie, P. (2007). Mechanisms of silicon-mediated alleviation of abiotic stresses in higher plants: A review. *Environmental Pollution*, 147(2), 422-428
43. Lichtenthaler, H. K. (1987). Chlorophylls and carotenoids: Pigments of photosynthetic biomembranes. In *Methods in Enzymology* (Vol. 148, pp. 350-382). Academic Press.
44. Liu, P., Yin, L., Deng, X., Wang, S., Tanaka, K., & Zhang, S. (2014). Aquaporin-mediated increase in root hydraulic conductance is involved in silicon-induced improved root water uptake under osmotic stress in *Sorghum bicolor* L. *Journal of Experimental Botany*, 65(17), 4747-4756.
45. Ma, J. F., & Yamaji, N. (2006). Silicon uptake and accumulation in higher plants. *Trends in Plant Science*, 11(8), 392-397.
46. Ma, J. F., & Yamaji, N. (2015). A cooperative system of silicon transport in plants. *Trends in Plant Science*, 20(7), 435-442.
47. Manivannan, A., & Ahn, Y. K. (2017). Silicon regulates potential genes involved in major physiological processes in plants to combat stress. *Frontiers in Plant Science*, 8, 1346.
48. Moravcová, Š., Tůma, J., Dučaiová, Z. K., Waligórski, P., Kula, M., Saja, D., ... & Libik-Konieczny, M. (2018). Influence of salicylic acid pretreatment on seeds germination and some defence mechanisms of *Zea mays* plants under copper stress. *Plant Physiology and Biochemistry*, 122, 19-30.
49. Nagajyoti, P. C., Lee, K. D., & Sreekanth, T. V. M. (2010). Heavy metals, occurrence and toxicity for plants: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 8(3), 199-216.
50. Paula, D. S., L., do Carmo Silva, B., de Pinho, W. C. S., Barbosa, M. A. M., Silva Guedes-Lobato, E. M., Segura, F. R., ... & da Silva Lobato, A. K. (2015). Silicon (Si) ameliorates the gas exchange and reduces negative impacts on photosynthetic pigments in maize plants under Zinc (Zn) toxicity. *Australian Journal of Crop Science*, 9(10), 901-908.
51. Raj, H., & Thakral, K. K. (2008). Effect of chemical fertilizers on growth, yield of funnel. *J. Spices and Aromatic Crops*, 17(2), 134-9.
52. Rizwan, M., Ali, S., Ibrahim, M., Farid, M., Adrees, M., Bharwana, S. A., ... & Abbas, F. (2015). Mechanisms of silicon-mediated alleviation of drought and salt stress in plants: A review. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(20), 15416-15431.
53. Sacala, E. (2009). Role of silicon in plant resistance to water stress. *Journal of Elementology*, 14(3), 619-630.
54. Sahebi, M., Hanafi, M. M., Siti Nor Akmar, A., Rafii, M. Y., Azizi, P., Tengoua, F. F., ... & Shabanimofrad, M. (2015). Importance of silicon and mechanisms of biosilica formation in plants. *BioMed Research International*, 2015.
55. Saidi, I., Yousfi, N., & Borgi, M. A. (2017). Salicylic acid improves the antioxidant ability against arsenic-induced oxidative stress in sunflower (*Helianthus annuus*) seedling. *Journal of Plant Nutrition*, 40(16), 2326-2335.
56. Salarpour Ghorba., F., & Farahbakhsh., H. (2013). The effect of foliar application of salicylic acid on morphological characteristics and biological performance of *Foeniculum vulgare* Mill. *12th National Conference on Irrigation and Evaporation Reduction, Kerman, Shahid Bahonar University*.
57. Sharma, A., Sidhu, G. P. S., Araniti, F., Bali, A. S., Shahzad, B., Tripathi, D. K., ... & Landi, M. (2020). The role of salicylic acid in plants exposed to heavy metals. *Molecules*, 25(3), 540.
58. Shi, G. R., Cai, Q. S., Liu, Q. Q., & Wu, L. (2009). Salicylic acid-mediated alleviation of cadmium toxicity in hemp plants in relation to cadmium uptake, photosynthesis, and antioxidant enzymes. *Acta Physiologiae Plantarum*, 31(5), 969-977.
59. Shi, G., Cai, Q., Liu, C., & Wu, L. (2010). Silicon alleviates cadmium toxicity in peanut plants in relation to cadmium distribution and stimulation of antioxidative enzymes. *Plant Growth Regulation*, 61(1), 45-52.
60. Shi, Q., Bao, Z., Zhu, Z., He, Y., Qian, Q., & Yu, J. (2005). Silicon-mediated alleviation of Mn toxicity in Cucumis sativus in relation to activities of superoxide dismutase and ascorbate peroxidase. *Phytochemistry*, 66(13), 1551-1559.
61. Soltani Maivan, E., Radjabian, T., Abrishamchi, P., & Talei, D. (2017). Physiological and biochemical responses of *Melissa officinalis* L. to nickel stress and the protective role of salicylic acid. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 63(3), 330-343.
62. Suriyaprabha, R., Karunakaran, G., Yuvakkumar, R., Prabu, P., Rajendran, V., & Kannan, N. (2012). Growth and physiological responses of maize (*Zea mays* L.) to porous silica nanoparticles in soil. *Journal of Nanoparticle Research*, 14(12), 1-14.
63. Tardieu, F. (2012). Any trait or trait-related allele can confer drought tolerance: Just design the right drought scenario. *Journal of Experimental Botany*, 63(1), 25-31.

64. Torabi, F., Majd, A., & Enteshari, S. (2015). The effect of silicon on alleviation of salt stress in borage (*Borago officinalis* L.). *Soil Science and Plant Nutrition*, 61(5), 788-798.
65. Tripathi, D. K., Singh, V. P., Prasad, S. M., Chauhan, D. K., & Dubey, N. K. (2015). Silicon nanoparticles (SiNp) alleviate chromium (VI) phytotoxicity in *Pisum sativum* (L.) seedlings. *Plant Physiology and Biochemistry*, 96, 189-198.
66. Van Bockhaven, J., De Vleesschauwer, D., & Höfte, M. (2013). Towards establishing broad-spectrum disease resistance in plants: Silicon leads the way. *Journal of Experimental Botany*, 64(5), 1281-1293.
67. Vodyanitskii, Y. N. (2016). Standards for the contents of heavy metals in soils of some states. *Annals of Agrarian Science*, 14(3), 257-263.
68. Wang, Y. Y., Wang, Y., Li, G. Z., & Hao, L. (2019). Salicylic acid-altering arabidopsis plant response to cadmium exposure: Underlying mechanisms affecting antioxidation and photosynthesis-related processes. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 169, 645-653.
69. Wang, Y., Stass, A., & Horst, W. J. (2004). Apoplastic binding of aluminum is involved in silicon-induced amelioration of aluminum toxicity in maize. *Plant Physiology*, 136(3), 3762-3770.
70. Wani, A. B., Chadar, H., Wani, A. H., Singh, S., & Upadhyay, N. (2017). Salicylic acid to decrease plant stress. *Environmental Chemistry Letters*, 15(1), 101-123.
71. Zamaninejad, M., Khorasani, S. K., Moeini, M. J., & Heidarian, A. R. (2013). Effect of salicylic acid on morphological characteristics, yield and yield components of corn (*Zea mays* L.) under drought condition. *European Journal of Experimental Biology*, 3(2), 153-161.
72. Zanganeh, R., Jamei, R., & Rahmani, F. (2018). Impacts of seed priming with salicylic acid and sodium hydrosulfide on possible metabolic pathway of two amino acids in maize plant under lead stress. *Molecular Biology Research Communications*, 7(2), 83.
73. Zargar, S. M., Mahajan, R., Bhat, J. A., Nazir, M., & Deshmukh, R. (2019). Role of silicon in plant stress tolerance: Opportunities to achieve a sustainable cropping system. 3 *Biotech*, 9(3), 1-16.
74. Zengin, F. K., & Munzuroglu, O. (2005). Effects of some heavy metals on content of chlorophyll, proline and some antioxidant chemicals in bean (*Phaseolus vulgaris* L.) seedlings. *Acta Biologica Cracoviensia Series Botanica*, 47(2), 157-164.
75. Zhang, J., Zou, W., Li, Y., Feng, Y., Zhang, H., Wu, Z., ... & Peng, L. (2015). Silica distinctively affects cell wall features and lignocellulosic saccharification with large enhancement on biomass production in rice. *Plant Science*, 239, 84-91.
76. Zhang, Q., Yan, C., Liu, J., Lu, H., Duan, H., Du, J., & Wang, W. (2014). Silicon alleviation of cadmium toxicity in mangrove (*Avicennia marina*) in relation to cadmium compartmentation. *Journal of Plant Growth Regulation*, 33(2), 233-242.
77. Zhu, Y., & Gong, H. (2014). Beneficial effects of silicon on salt and drought tolerance in plants. Agron Sustain Dev 34: 455–472. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 17.