University of Guilan
Faculty of Agricultural Sciences

Cereal Research
Vol. 15, No. 1, Spring 2025 (49-63)
doi: 10.22124/CR.2025.29458.1849
pISSN: 2252-0163 eISSN: 2538-6115

RESEARCH PAPER OPEN ACCESS

Analysis of some agronomic traits of maize under nanosilicon treatment in saline soil conditions

Masoud Golestani[1*] and Seyyed Rasoul Sahhafi[2]

1. Assistant Professor, Department of Agriculture, Payame Noor University (PNU), Tehran, Iran
([*] Corresponding author: ma_golestani@pnu.ac.ir)
2. Associate Professor, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran

Comprehensive abstract

Introduction

Salinity is a major threat to food security, specially in arid and semi-arid regions. Soil salinity is mainly caused by the low rainfall, excessive application of chemical fertilizers, irrigation with saline groundwater, industrial wastewater and deforestation. Agriculture in saline soils has always been a major challenge due to the multiple effects of salinity on soil and plants. Silicon (Si), the second most abundant mineral element in the earth's crust, mitigates the effects of salinity by improving the plant's adaptive mechanism against biotic and abiotic stresses. Recently, nanoparticles of different minerals ranging from 1 to 100 nm have been extensively used in sustainable agriculture. Stress modulators such as nanosilicon are used to enhance plant growth and grain yield as well as increase resistance to abiotic stresses. Maize (*Zea mays* L.) contributes one-third of grain production worldwide and is the main source of nutrition for humans and livestock. Moreover, maize is more sensitive to salinity stress compared to other abiotic stresses. The objectives of the present study were to evaluate the effects of nanosilicon application on agronomic and morphological traits of different maize cultivars, determine effective traits on grain yield and select high-yielding cultivars for cultivation in saline soils.

Materials and methods

This experiment was carried out in split plot based on a randomized complete blocks design with three replications in Abarkouh county, Yazd province, Iran. Nanosilicon at two levels including no application of nanosilicon (control) and application of nanosilicon (50 mg/l equivalent to 165 ml of nanosilicon solution) was considered as the main factor and corn cultivars at eight levels including KSC670, KSC647, KSC500, KSC705, KSC400, KSC704, KSC604 and KSC700 as sub-factor. Nanosilicon was applies as foliar spray on the leaves at two growth stages, 8-10 leaves and silk emergence. Each experimental unit consisted of five rows with a length of 5 m, with a spacing of 75 cm between rows and 20 cm between plants on the rows. The studied traits included the number of rows per ear, number of grains per row, number of grains per ear, ear length and diameter, plant height, 1000-grain weight and grain yield.

Research findings

The results revealed that the effect of nonosilicon and cultivar on all studied traits were significant, while the interaction of nanosilicon × cultivar was only significant on ear length, plant height and 1000-grain weight. All studied traits increased with the application of nanosilicon. According to the results of the comparison of mean, KSC704 and KSC705 cultivars had the highest grain yield and yield components under both treatments of no-application and application of nanosilicon. Correlation analysis between traits showed that grain yield in both treatments of no-application and application of

nanosilicon had a positive and significant correlation with the number of rows per ear, number of grains per row, number of grains per ear, and ear length and diameter. Based on the results of stepwise regression analysis, the number of rows per ear in no-application of nanosilicon treatment (control), and the number of rows per ear and 1000-grain weight in nanosilicon application treatment had a significant effect on grain yield. The result of path analysis showed that the number of rows per ear was the most important trait affecting grain yield of the studied maize cultivars under both no-application and application of nanosilicon conditions. Based on the results of cluster analysis, the studied cultivars under both no-application and application of nanosilicon conditions were classified into three groups.

Conclusion

The results of this study showed that the number of rows per ear can be used to achieve high yield in maize in both no-application and application of nanosilicon treatments. According to the results of cluster analysis, three cultivars KSC 700, KSC704 and KSC705 were superior to other cultivars for most of the studied traits under both treatments, and can be recommended for achieving higher grain yield in saline soil under both no-application and application of nanosilicon conditions.

Keywords: Cluster analysis, Grain yield, Path analysis, Stepwise regression

Received: January 1, 2025 Accepted: March 3, 2025

Cite this article:

Golestani, M., & Sahhafi, S. R. (2025). Analysis of some agronomic traits of maize under nano silicon treatment in saline soil conditions. *Cereal Research*, *15*(1), 49-63. doi: 10.22124/CR.2025.29458.1849.

تحقیقات غلات
دوره پانزدهم، شماره اول، بهار ۱۴۰۴ (۶۳-۴۹)
doi: 10.22124/CR.2025.29458.1849

مقاله پژوهشی
دسترسی آزاد

تجزیه و تحلیل برخی صفات زراعی ذرت تحت تیمار نانوسیلیکون در شرایط خاک شور

مسعود گلستانی[1*] و سید رسول صحافی[2]

۱- استادیار، گروه کشاورزی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران (* نویسنده مسئول: ma_golestani@pnu.ac.ir)
۲- دانشیار، گروه ژنتیک و تولید گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ولیعصر رفسنجان، رفسنجان، ایران

چکیده جامع

مقدمه: شوری یک تهدید مهم برای امنیت غذایی به‌ویژه در نواحی خشک و نیمه‌خشک محسوب می‌شود. شوری خاک عمدتاً در اثر بارش کم، مصرف بیش از حد کودهای شیمیایی، آبیاری با آب‌های شور زیرزمینی، فاضلاب‌های صنعتی و جنگل‌زدایی اتفاق می‌افت. کشاورزی در خاک‌های شور، به‌علت اثرات چندگانه شوری بر خاک و گیاه، همواره به‌عنوان یک چالش مهم بوده است. سیلیکون (Si)، دومین عنصر معدنی فراوان در پوسته زمین، در اثر بهبود سازوکارهای سازگار کننده در برابر تنش‌های زیستی و غیرزیستی، اثرات شوری را کاهش می‌دهد. اخیراً، نانوذرات مواد معدنی مختلف با اندازه یک تا ۱۰۰ نانومتر به‌طور گسترده‌ای در کشاورزی پایدار استفاده شده است. کاهش‌دهنده‌های تنش مانند نانوسیلیکون، به‌منظور افزایش رشد و عملکرد گیاه و همچنین افزایش مقاومت به تنش‌های غیرزیستی استفاده می‌شوند. ذرت یک‌سوم تولید جهانی را به‌خود اختصاص داده است و به‌عنوان منبع اصلی تغذیه انسان و دام می‌باشد. این گیاه حساسیت بیش‌تری به تنش شوری در مقایسه با سایر تنش‌های غیرزیستی دارد. تحقیق حاضر با هدف بررسی اثر کاربرد نانوسیلیکون بر صفات زراعی و مورفولوژیک رقم‌های مختلف ذرت، تعیین صفات مؤثر بر عملکرد دانه و گزینش رقم‌های پرمحصول برای کشت در خاک‌های شور انجام شد.

مواد و روش‌ها: آزمایش به‌صورت کرت‌های خرد شده بر پایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در شهرستان ابرکوه در استان یزد اجرا شد. نانوسیلیکون در دو سطح شامل عدم کاربرد نانوسیلیکون (شاهد) و کاربرد نانوسیلیکون (۵۰ میلی‌گرم در لیتر معادل ۱۶۵ میلی‌لیتر محلول حاوی نانوسیلیکون) به‌عنوان فاکتور اصلی و رقم ذرت در هشت سطح شامل KSC670، KSC647، KSC500، KSC705، KSC400، KSC704، KSC604 و KSC700 به‌عنوان فاکتور فرعی آزمایش در نظر گرفته شدند. نانوسیلیکون به‌صورت محلول‌پاشی روی برگ‌ها در دو نوبت در مراحل هشت تا ده برگی و ظهور ابریشم استفاده شد. هر واحد آزمایشی شامل پنج ردیف به‌طول پنج متر بود و فاصله بین ردیف‌های کاشت ۷۵ سانتی‌متر و فاصله بین بوته‌ها روی ردیف‌ها ۲۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. صفات مورد مطالعه شامل تعداد ردیف در بلال، تعداد دانه در ردیف، تعداد دانه در بلال، طول و قطر بلال، ارتفاع بوته، وزن هزار دانه و عملکرد دانه بودند.

یافته‌های تحقیق: نتایج نشان داد که اثر نانوسیلیکون و رقم بر تمامی صفات مورد مطالعه معنی‌دار بود، در حالی‌که برهمکنش نانوسیلیکون × رقم بر صفات طول بلال، ارتفاع بوته و وزن هزار دانه معنی‌دار شد. با کاربرد نانوسیلیکون تمامی صفات مورد مطالعه افزایش یافتند. بر اساس نتایج مقایسه میانگین‌ها، دو رقم KSC704 و KSC705 دارای بیش‌ترین مقدار عملکرد و اجزای عملکرد دانه در هر دو تیمار کاربرد و عدم کاربرد نانوسیلیکون بودند. بررسی همبستگی بین صفات نشان داد

که عملکرد دانه در هر دو تیمار عدم کاربرد و کاربرد نانوسیلیکون همبستگی مثبت و معنی‌داری با صفات تعداد ردیف در بلال، تعداد دانه در ردیف، تعداد دانه در بلال و طول و قطر بلال داشت. بر اساس نتایج تجزیه رگرسیون گام به گام، در تیمار عدم کاربرد نانوسیلیکون، تعداد ردیف در بلال و در تیمار کاربرد نانوسیلیکون، تعداد ردیف در بلال و وزن هزار دانه دارای اثر معنی‌دار بر عملکرد دانه بودند. نتایج تجزیه علیت نیز نشان داد که تعداد ردیف در بلال، مهم‌ترین صفت مؤثر بر عملکرد دانه رقم‌های مورد مطالعه ذرت در هر دو شرایط عدم کاربرد و کاربرد نانوسیلیکون بود. بر اساس نتایج تجزیه خوشه‌ای، رقم‌های مورد مطالعه در هر دو تیمار عدم کاربرد و کاربرد نانوسیلیکون در سه گروه دسته‌بندی شدند.

نتیجه‌گیری: نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که برای دستیابی به عملکرد بالا در هر دو تیمار عدم کاربرد و کاربرد نانوسیلیکون می‌توان از صفت تعداد ردیف دانه در بلال استفاده کرد. بر اساس نتایج تجزیه خوشه‌ای، سه رقم KSC705، KSC704 و KSC700 از نظر بیش‌تر صفات مورد مطالعه در هر دو تیمار آزمایشی برتر از سایر رقم‌ها بودند و بنابراین به‌منظور دستیابی به عملکرد بالاتر در خاک شور در هر دو شرایط عدم کاربرد و کاربرد نانوسیلیکون توصیه می‌شوند.

واژه‌های کلیدی: تجزیه خوشه‌ای، تجزیه علیت، رگرسیون گام‌به‌گام، عملکرد دانه

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۱۳

نحوه استناد به این مقاله:

گلستانی، مسعود، و صحافی، سید رسول. (۱۴۰۴). تجزیه و تحلیل برخی صفات زراعی ذرت تحت تیمار نانوسیلیکون در شرایط خاک شور. *تحقیقات غلات*، *۱۵*(۱)، ۶۳-۴۹. doi: 10.22124/CR.2025.29458.1849

مقدمه

ذرت (*Zea mays* L.) یکی از مهم‌ترین گیاهان زراعی است که اهمیت بالایی در تغذیه انسان، تعلیف دام، تغذیه طیور و صنعت دارد (Soleimanifard *et al*., 2011) و به‌عنوان یکی از منابع اصلی تأمین کننده انرژی، افزایش سطح زیر کشت و بهبود عملکرد آن دارای اولویت ویژه‌ای است (Tardieu, 2012). و به‌لحاظ سازگاری با شرایط محیطی در اکثر نقاط دنیا کشت می‌شود (Khalili *et al*., 2013). شوری یک تهدید مهم برای امنیت غذایی به‌ویژه در نواحی خشک و نیمه‌خشک محسوب می‌شود. کشاورزی در خاک‌های شور به‌علت اثرات چندگانه شوری بر خاک و گیاه همیشه به‌عنوان یک چالش مهم مطرح بوده است. شوری، یکی از شایع‌ترین تنش‌هایی است که تولید محصولات زراعی را در اراضی خشک و نیمه‌خشک تهدید می‌کند. تنش شوری، ابتدا با کاهش جذب آب ناشی از منفی‌تر شدن پتانسیل اسمزی خاک، موجب کاهش رشد می‌شود، ولی پس از آن سمیت عناصر سدیم و کلر غالب می‌شود (Gupta & Huang, 2014). این تنش علاوه بر کاهش عملکرد گیاهان زراعی، به‌عنوان خطری جدی در تولید پایدار گیاهان زراعی در مناطق خشک و نیمه‌خشک به‌شمار می‌رود و همچنین با ایجاد تنش اکسیداتیو و برهم زدن تعادل یونی و هورمونی، رشد و فتوسنتز، روابط آبی گیاه، فعالیت‌های آنزیمی، جذب عناصر غذایی و عملکرد را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Seleiman *et al*., 2021).

سیلیکون دومین عنصر فراوان در پوسته زمین و از عناصر غیر ضروری در چرخه زندگی اکثر گیاهان عالی است، با این وجود در رشد و نمو بهینه برخی از گونه‌ها مانند گیاهان تیره گندمیان از جمله ذرت نقش مهمی دارد (Zarooshan *et al*., 2020). سیلیکون اثرات منفی تنش‌های مختلف از جمله خشکی، شوری، گرما، سرما، سمیت فلزات سنگین، عدم تعادل عناصر غذایی و آفات بیماری‌های گیاهی را کاهش می‌دهد (Zhang *et al*., 2014). سیلیکون با تنظیم پاسخ‌های فیزیولوژیکی، بیوشیمیایی و مولکولی، موجب بهبود مقاومت گیاه در برابر تنش‌های زیستی و غیرزیستی می‌شود و در بسیاری از فرآیندهای گیاهی از جمله واکنش‌های اسمزی، فرآیندهای متابولیکی، فیزیولوژی روزنه، فیتوهورمون‌ها و روابط مبدأ و مقصد دخیل می‌باشد (Ahire *et al*., 2021). در حال حاضر با پیشرفت فناوری نانو، نانوذرات سیلیکون تهیه شده و استفاده از آن‌ها به صورت کودهای نانوسیلیکون (nano-SiO_2) به‌علت انتشار کنترل شده و آرام مورد توجه زیادی قرار گرفته است (Zarooshan *et al*., 2020). در واقع استفاده از نانو ذرات سیلیکون برای تحریک رشد و نمو گیاه و همچنین کاهش آسیب‌های ناشی از تنش‌های محیطی در گیاهان شناخته شده است (Roychoudhury, 2020). بهبود عملکرد گیاهان زراعی در شرایط تنش با استفاده از نانوسیلیکون با رسوب این نانوذره در بافت‌های گیاهی و تقویت ضخامت دیواره‌های سلولی و محتوای لیگنین در کورتکس و آوندهای چوبی، تسهیل نقل و انتقال آب و عناصر غذایی، تنظیم شدت فتوسنتز و تنفس (Xu *et al*., 2023)، افزایش در فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدان و افزایش محتوای اسمولیت‌ها (Amiri *et al*., 2014) ممکن می‌شود. همچنین این ماده از طریق بهبود فرآیندهای فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاهان نظیر افزایش محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی، جذب دی‌اکسیدکرین، بهبود فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و فرآیندهای فتوسنتزی گیاه، عملکرد دانه را افزایش می‌دهد (Okeke *et al*., 2023). کاربرد برگی عناصر غذایی میکرو و ماکرو به‌عنوان روشی مؤثر برای بهبود جذب و افزایش سرعت جذب این عناصر توسط برگ‌ها و اندام‌های هوایی ثابت شده است، زیرا این عناصر بدون این که تحت تأثیر عوامل محدود کننده خاک در محدوده ریشه قرار گیرند، به‌راحتی توسط برگ‌ها و از طریق کوتیکول و روزنه‌ها جذب و با طی کوتاه‌ترین مسافت ممکن وارد دستجات آوندی، سلول‌های مزوفیل و آپوپلاست می‌شوند (Emadi, 2011).

کاربرد کودهای سیلیکونی در تعدیل انواع تنش‌های غیرزیستی در گیاه ذرت نظیر تنش آلومینیوم (Hodson & Evans, 1995)، منگنز (Sahebi *et al*., 2015) و شوری (Xie *et al*., 2015) نقش دارد. کاربرد سیلیکون و نانوسیلیکون در گیاه ذرت موجب بهبود رشد و عملکرد گیاه تحت شرایط تنش شوری از طریق کاهش پراکسیداسیون لیپیدها (Zare *et al*., 2015) و افزایش میزان رنگدانه‌های فتوسنتزی و وزن تر و خشک ریشه و برگ (Zarooshan *et al*., 2020) شد. در بررسی تأثیر محلول‌پاشی کودهای نانو و معمولی سیلیس بر عملکرد و اجزای عملکرد ذرت دانه‌ای مشخص شد که کاربرد نانواکسید سیلیس رشد و عملکرد ذرت را به‌نحو مؤثرتری افزایش داد و علاوه بر این، کارایی بیش‌تری در مقایسه با

کودهای معمولی سیلیس در بهبود عملکرد دانه ذرت داشت (Akbari *et al*., 2017). همچنین، محلول‌پاشی نانو ذرات سیلیکون در گیاه تریتیکاله باعث افزایش میزان کلروفیل، وزن ریشه، سرعت و طول دوره پرشدن دانه و عملکرد دانه تحت تنش شوری شد (Mohammadzadeh *et al*., 2023). در آزمایشی که احمدی نورالدین‌وند و همکاران (Ahmadi Nouraldinvand *et al*., 2021) برای بررسی اثر نانوسیلیکون و کودهای زیستی بر عملکرد و مولفه‌های پر شدن دانه گندم تحت رژیم‌های مختلف آبیاری انجام دادند، اظهار داشتند که محلول‌پاشی نانوسیلیکون از طریق بهبود وزن و حجم ریشه و محتوای کلروفیل و افزایش طول دوره پرشدن دانه موجب بهبود عملکرد گندم تحت شرایط تنش شد.

تنش شوری یکی از مشکلات اساسی برای دستیابی به عملکرد بهینه در مناطق خشک و نیمه‌خشک است که با محدودیت در جذب آب و تجمع یون‌های سمی در سلول‌های گیاهی، آثار مخربی بر فتوسنتز و عملکرد دارد. با توجه به قرار گرفتن کشور ما در منطقه خشک و نیمه‌خشک جهان، تولید محصولات زراعی در این شرایط بسیار مهم است. یکی از راه‌کارها تعدیل اثر تنش شوری استفاده از محلول‌پاشی نانوسیلیکون است. با وجود گزارشات متعدد در مورد اثرات مثبت کاربرد نانوسیلیکون در گیاهان تحت تنش شوری، گزارش‌های اندکی در گیاه ذرت وجود دارد، به‌طوری که تا کنون اثر نانوسیلیکون بر صفات مورفولوژیک ذرت به‌ویژه تحت تنش شوری در رقم‌های مختلف بررسی نشده است. هدف از انجام این تحقیق بررسی کاربرد نانوسیلیکون بر صفات زراعی و مورفولوژیک رقم‌های مختلف ذرت و همچنین تعیین صفات مؤثر بر عملکرد دانه و گزینش رقم‌های پرمحصول برای کشت در خاک‌های شور بود.

مواد و روش‌ها

این تحقیق در سال ۱۴۰۳ در مزرعه‌ای واقع در شهرستان ابرکوه در استان یزد با طول جغرافیایی ۵۳ درجه و ۱۶ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۱ درجه و ۷ دقیقه شمالی و با ارتفاع ۱۵۵۰ متر از سطح دریا انجام شد. قبل از اجرای آزمایش، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری خاک تعیین و مشخص شد که زمین آزمایشی دارای خاک شور است (جدول ۱). پارامترهای اقلیمی محل اجرای آزمایش نیز در جدول ۲ ارائه شده است. آزمایش به‌صورت کرت‌های خرد شده بر پایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد. تیمار نانوسیلیکون در دو سطح شامل عدم کاربرد (کنترل) و کاربرد نانوسیلیکون (۵۰ میلی‌گرم در لیتر معادل ۱۶۵ میلی‌لیتر محلول حاوی نانوسیلیکون) به‌عنوان فاکتور اصلی و رقم در هشت سطح شامل KSC670، KSC647، KSC500، KSC705، KSC400، KSC704، KSC604 و KSC700 به‌عنوان فاکتور فرعی بود. محلول حاوی نانوسیلیکون مورد استفاده در این پژوهش از شرکت صنایع نانوسیلیس ایساتیس تهیه شد. این محلول بدون رنگ درای ۲۹ تا ۳۱ درصد نانوسیلیکون با اندازه ذرات بین ۱۰ تا ۲۵ نانومتر و سطح ویژه‌ای بین ۱۳۰ تا ۱۶۰ مترمربع بر گرم بود. کاربرد نانوسیلیکون در دو نوبت به‌صورت محلول‌پاشی روی برگ‌ها در مراحل هشت تا ده برگی و ظهور رشته‌های ابریشمی با استفاده از سمپاش دستی انجام شد (Torabi *et al*., 2023).

جدول ۱- ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خاک مزرعه آزمایشی

Table 1. Physico-chemical characteristics of the experimental soil

pH	EC ($dS.m^{-1}$)	K ($mg.kg^{-1}$)	P	N	Organic carbon	Sand (%)	Silt	Clay
7.9	5.2	165	9.3	0.08	0.49	23	41	36

جدول ۲- ویژگی‌های آب و هوایی محل اجرای آزمایش

Table 2. Meteorological characteristics of the experimental site

Month	Rainfall (mm)	Temperature (°C)		
		Maximum	Minimum	Mean
Jul	0.1	24.3	38.1	32.1
Aug	0	25.6	41.3	33.5
Sep	0	17.2	35.7	26.5
Oct	0	37.8	10.7	23.4
Nov	2	30	4.1	16.7

جهت آماده‌سازی زمین، ابتدا از شخم عمیق و سپس دو بار دیسک عمود بر هم استفاده و جوی و پشته‌ها و نهرهای آبیاری در زمین ایجاد شد. کود مورد استفاده بر اساس آزمون خاک شامل فسفات آمونیوم، سولفات پتاسیم و اوره بود که کل کودهای فسفاته و سولفاته و ۴۰ درصد از کود اوره قبل از کاشت و ۶۰ درصد کود اوره نیز به‌صورت سرک در مرحله شش تا هشت برگی مصرف شد. هر واحد آزمایشی شامل پنج ردیف به‌طول پنج متر، فاصله بین ردیف‌ها ۷۵ سانتی‌متر و فاصله بین بوته‌ها روی ردیف‌ها ۲۰ سانتی‌متر بود. بذر ذرت در تاریخ ۱۴ تیرماه به‌صورت دستی کشت شد. برای اطمینان از سبز شدن بذرها، سه بذر در هر کپه کشت شد و پس از تنک کردن در مرحله سه تا چهار برگی، فقط یک بوته مناسب نگهداری شد. آبیاری با آب چاه با شوری ۳/۹ دسی‌زیمنس بر متر انجام شد. وجین علف‌های هرز نیز به‌صورت دستی در زمان مناسب انجام شد. برای اندازه‌گیری ارتفاع بوته، ۱۰ بوته تصادفی از هر کرت پس از حذف ردیف‌های حاشیه انتخاب و ارتفاع آن‌ها اندازه‌گیری شد. صفات تعداد ردیف در بلال، تعداد دانه در ردیف، تعداد دانه در بلال، طول بلال، قطر بلال و وزن هزار دانه با انتخاب ۱۰ بلال تصادفی از هر کرت اندازه‌گیری شدند. برداشت نهایی در زمان رسیدگی فیزیولوژیک دانه‌ها، همزمان با تشکیل لایه سیاه در قاعده دانه‌ها و مشاهده علایم ظاهری رسیدگی شامل زردی و خشکی برگ‌ها، صورت گرفت. برداشت از ردیف‌های میانی هر کرت، پس از حذف دو ردیف کناری و نیم متر از ابتدا و انتهای هر ردیف به‌عنوان اثر حاشیه‌ای، انجام شد. پس از برداشت، بلال‌ها از بوته جدا و پس از خشک شدن و رسیدن به رطوبت ۱۴ درصد با ترازوی آزمایشگاهی به‌دقت توزین و عملکرد دانه در واحد سطح اندازه‌گیری شد. برای انجام تجزیه واریانس از نرم‌افزار SAS و برای مقایسه میانگین داده‌ها از آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد استفاده شد. برای بررسی ضرایب همبستگی و تجزیه خوشه‌ای از نرم‌افزار Minitab و برای انجام رگرسیون گام‌به‌گام از نرم‌افزار SPSS استفاده شد.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس صفات مورد مطالعه نشان داد که اثر نانوسیلیکون و رقم بر تمامی صفات مورد بررسی معنی‌دار بود، اما برهمکنش نانوسیلیکون × رقم فقط بر صفات طول بلال، ارتفاع بوته و وزن هزار دانه معنی‌دار شد (جدول ۳). نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نیز نشان داد که کاربرد نانوسیلیکون موجب افزایش تمامی صفات در رقم‌های ذرت مورد مطالعه در خاک شور شد و بیش‌ترین میزان افزایش در صفات تعداد دانه در بلال (۴۴/۸۱ درصد)، قطر بلال (۳۸/۹ درصد) و تعداد ردیف بلال (۲۷/۶۵ درصد) مشاهده شد (جدول ۴)، اگرچه واکنش رقم‌های ذرت به کاربرد نانوسیلیکون و بنابراین میزان تغییرات صفات به‌طور معنی‌داری در بین رقم‌ها متفاوت بود (جدول‌های ۵ و ۶).

زارع و همکاران (Zare *et al*., 2015) نشان دادند که کاربرد نانوسیلیکون، کاهش وزن تر و خشک اندام هوایی را در گیاهان ذرت تحت شرایط تنش شوری جبران کرد. نتایج آزمایش دیگری نشان داد که کاربرد نانوسیلیکون موجب افزایش ارتفاع بوته و عملکرد دانه در گیاه ذرت شد (Kumaraswamy *et al*., 2021). ترابی و همکاران (Torabi *et al*., 2023) در بررسی تأثیر محلول‌پاشی نانوسیلیکون در گیاه ذرت نشان دادند که با کاربرد نانوسیلیکون صفات عملکرد دانه و اجزای آن و ارتفاع بوته افزایش معنی‌داری داشتند. نتایج یک مطالعه در گیاه گلرنگ نشان داد که کاربرد ۹۰ کیلوگرم در هکتار کود NPK همراه با ۲۰ میلی‌مولار نانوسیلیکون، بیش‌ترین عملکرد دانه را تولید کرد، در حالی‌که استفاده از ۳۰ تن در هکتار کود آلی همراه با ۲۰ میلی‌مولار نانوسیلیکون باعث بهبود اجزای عملکرد شد (Sabaghnia & Janmohammadi, 2024). در واقع سیلیکون از طریق بهبود توانایی مکانیکی ساقه و برگ‌ها در جذب نور و افزایش ظرفیت فتوسنتزی گیاه، باعث افزایش رشد و ارتفاع گیاه می‌شود (Raj & Thakral, 2008). همچنین مشخص شده است که سیلیکون نقش مهمی در دسترسی عناصر غذایی و تنظیم جذب نیتروژن، فسفر، پتاسیم و کلسیم ایفا می‌کند و از این طریق موجب بهبود وضعیت تغذیه‌ای و عملکرد گیاه می‌شود (Guntzer *et al*., 2012). علاوه بر این، افزایش عملکرد با کاربرد نانوسیلیکون می‌تواند به‌علت بهبود بازده فتوسنتزی، کارآیی مصرف آب، تأخیر پیری و بهبود مقاومت در برابر تنش‌های محیطی باشد (Deshmukh *et al*., 2017; Manivannan & Ahn, 2017).

جدول ۳- تجزیه واریانس صفات مورد بررسی در رقم‌های ذرت

Table 3. Analysis of variance for the studied traits in maize cultivars Source of variation Mean square

		Rows per ear	Grains per row	Grains per ear	Ear length	Ear diameter	Plant height	1000-grain weight	Grain yield
Replication	2	3.2**	0.25 ^{ns}	2633.2*	3.4**	0.04 ^{ns}	19.4*	33.6*	0.63**
Nano silicon (N)	1	143.2**	181.3**	285704.5**	113.7**	26.2**	2122.4**	3462.3**	8.6**
Error (a)	2	0.55	2.08	711.8	0.18	0.61	4.06	6.9	0.04
Cultivar (C)	7	10.2**	55.3**	38600.9**	67.4**	2.4**	539.01**	226.2**	1.8**
N × C	7	0.08 ^{ns}	1.8 ^{ns}	408.9 ^{ns}	3.6**	0.3 ^{ns}	52.9*	484.6**	0.03 ^{ns}
Error (b)	28	0.4	0.8	577.1	0.6	0.24	19.7	54.6	0.1
CV (%)	-	4.51	3.1	5.69	4.43	10.9	2.47	2.85	4.7

^{ns}, * and ** Not-significant and significant at 5% and 1% probability levels, respectively.

جدول ۴- مقایسه میانگین اثر نانوسیلیکون بر صفات مورد بررسی ذرت

Table 4. Comparison of means of the effect of nanosilicon on the studied traits of maize

Nano silicon treatment	Rows per ear	Grains per row	Grains per ear	Ear length (cm)	Ear diameter (cm)	Plant height (cm)	1000 grain weight (gr)	Grain yield (t/ha)
Control	12.51b	27.21b	344.37b	15.58b	3.77b	172.66b	249.23b	6.49b
Nano silicon	15.97a	31.05a	498.67a	18.66a	5.24a	187.28a	269.22a	7.34a

Means with the similar letter in each column are not significantly different by Duncan's test at 5% probability level.

مقایسه میانگین بین رقم‌ها برای صفات تعداد ردیف در بلال، تعداد دانه در ردیف، تعداد دانه در بلال، قطر بلال و عملکرد دانه در جدول ۵ ارائه شده است. نتایج نشان داد که بیش‌ترین تعداد ردیف در بلال متعلق به رقم‌های KSC704 و KSC705 و کم‌ترین مقدار آن متعلق به رقم‌های KSC500 و KSC647 بود. رقم KSC704 بیش‌ترین و رقم KSC500 کم‌ترین تعداد دانه در ردیف و دانه در بلال را داشتند. بیش‌ترین میزان قطر بلال در رقم KSC704 مشاهده شد که تفاوت معنی‌داری با رقم‌های KSC700، KSC705 و KSC670 نداشت. دو رقم KSC704 و KSC705 نیز بیش‌ترین مقدار عملکرد دانه را به‌خود اختصاص دادند (جدول ۵). در واقع این رقم‌ها با تولید تعداد ردیف در بلال، تعداد دانه در ردیف و تعداد دانه در بلال بیش‌تر، عملکرد دانه بیش‌تری را تولید کردند.

نتایج مقایسه میانگین برهمکنش نانوسیلیکون × رقم نشان داد که در تیمار کنترل، رقم KSC704 دارای بیش‌ترین مقدار طول بلال و در تیمار کاربرد نانوسیلیکون، رقم‌های KSC705 و KSC704 دارای بیش‌ترین مقدار طول بلال بودند (جدول ۶). بیش‌ترین مقدار ارتفاع بوته در تیمار کنترل در رقم KSC604 و در تیمار کاربرد نانوسیلیکون در رقم KSC400 مشاهده شد (جدول ۶). از نظر وزن هزار دانه نیز در تیمار کنترل رقم KSC400 دارای بیش‌ترین مقدار و دو رقم KSC705 و KSC604 دارای کم‌ترین مقدار بودند، در حالی‌که در تیمار کاربرد نانوسیلیکون، ارقام KSC704 و KSC705 بیش‌ترین و رقم KSC500 کم‌ترین مقدار وزن هزار دانه را داشتند (جدول ۶). بر اساس نتایج مقایسه میانگین، دو رقم KSC704 و KSC705 بیش‌ترین مقدار عملکرد دانه و اجزای آن را در هر دو تیمار کنترل و کاربرد نانوسیلیکون در شرایط خاک شور مورد مطالعه داشتند و بنابراین به‌عنوان رقم‌های برتر برای کشت در هر دو شرایط معرفی کرد. نتایج به‌دست آمده بیانگر آن است که با توجه به عملکرد بالاتر این دو رقم در اراضی شور مورد مطالعه، احتمالاً امکان توسعه کشت این رقم‌ها در اراضی شور دیگر با شرایط اقلیمی مشابه فراهم می‌باشد.

برای بررسی میزان ارتباط بین صفات اندازه‌گیری شده در رقم‌های ذرت در هر یک از شرایط عدم کاربرد و کاربرد نانوسیلیکون، ضریب همبستگی بین صفات محاسبه شد (جدول ۷). نتایج نشان داد که عملکرد دانه بالاترین همبستگی را با صفت تعداد ردیف در بلال در هر دو تیمار آزمایش داشت. در تیمار کنترل، عملکرد دانه با صفات تعداد دانه در ردیف، تعداد دانه در بلال، طول و قطر بلال، همبستگی مثبت و معنی‌دار داشت، اما با صفات وزن هزار دانه و ارتفاع بوته همبستگی معنی‌دار نداشت (جدول ۷). در تیمار کاربرد نانوسیلیکون نیز عملکرد دانه همبستگی مثبت و معنی‌دار با صفات تعداد دانه در ردیف، تعداد دانه در بلال، طول و قطر بلال و وزن هزار دانه داشت، اما همبستگی آن با ارتفاع بوته معنی‌دار نبود (جدول ۷). نتایج مطالعه‌ای نشان داد که عملکرد دانه با صفات تعداد دانه در بلال و تعداد دانه در ردیف در شرایط بدون تنش و

صفات تعداد ردیف دانه، تعداد دانه در ردیف، وزن هزار دانه و قطر بلال در شرایط تنش گرما همبستگی مثبت و معنی‌دار داشت (Khodarahmpour *et al*., 2012). در مطالعه دیگری، همبستگی بین عملکرد دانه با صفات ارتفاع بوته، وزن صد دانه، طول بلال و تعداد دانه در ردیف مثبت و معنی‌دار گزارش شد (Nasrollahzade Asl *et al*., 2017). قبادی و همکاران (Ghobadi *et al*., 2019) نیز با مطالعه سطوح مختلف نیتروژن در ذرت همبستگی بین عملکرد دانه با صفات قطر و طول بلال، تعداد دانه در ردیف، تعداد دانه در بلال و وزن صد دانه را مثبت و معنی‌دار گزارش کردند. این نتایج تا حدودی با نتایج مطالعه حاضر مطابقت داشت.

جدول ۵- مقایسه میانگین رقم‌های ذرت مورد مطالعه از نظر برخی از صفات اندازه‌گیری شده

Table 5. Comparison of means of the studied maize cultivars for some measured traits

Maize cultivar	Rows per ear	Grains per row	Grains per ear	Ear diameter (cm)	Grain yield (t/ha)
KSC670	13.98de	28.87c	407.13c	4.84ab	6.86d
KSC647	12.91fg	26.26d	344.8d	3.92cd	6.46d
KSC500	12.42g	25.04e	315.3e	3.6d	6.02e
KSC705	15.48ab	32.03b	498.6b	5.08a	7.5ab
KSC400	13.46ef	26.62d	361.46d	3.91cd	6.67d
KSC704	16.23a	33.15a	540.87a	5.14a	7.67a
KSC604	14.41cd	29.03c	420.28c	4.42bc	6.88cd
KSC700	15.03bc	32.06b	487.72b	5.17a	7.26bc

Means with the similar letter in each column are not significantly different by Duncan's test at 5% probability level.

جدول ۶- مقایسه میانگین برهمکنش نانوسیلیکون × رقم برای برخی از صفات مورد مطالعه

Table 6. Comparison of means of nanosilicon × cultivar interaction for some studied traits

Silicon treatment	Maize cultivar	Ear length (cm)	Plant height (cm)	1000 grain weight (gr)
Control	KSC670	15.34c	157.4g	260.1b
	KSC647	11.6e	161.2f	255.42c
	KSC500	12.04e	169.4e	248.6d
	KSC705	18.24b	176.7c	233.25f
	KSC400	14.18d	182.5b	265.32a
	KSC704	19.5a	171.6de	242.51e
	KSC604	16.12c	188.2a	237.4f
	KSC700	17.64b	174.3cd	251.23cd
Nanosilicon application	KSC670	18.31c	180.2de	276.31bc
	KSC647	14.53e	175.2f	258.24e
	KSC500	13.22e	188.4c	253.1f
	KSC705	24.35a	193.5b	280.22ab
	KSC400	16.18d	202.4a	263.71d
	KSC704	23.17a	178.6ef	283.32a
	KSC604	20.11b	196.8b	266.5d
	KSC700	19.42bc	183.1d	272.4c

Means with the similar letter in each column are not significantly different by Duncan's test at 5% probability level.

جدول ۷- ضرایب همبستگی بین صفات مورد بررسی در رقم‌های ذرت تحت شرایط کنترل (بالای قطر) و کاربرد نانوسیلیکون (پایین قطر)

Table 7. Correlation coefficients among the studied traits in maize cultivars under control (up diameter) and nanosilicon application (down diameter)

Trait	Grain yield	Rows per ear	Grains per row	Grains per ear	Ear length	Ear diameter	Plant height	1000-grain weight
Grain yield	1	0.96**	0.94**	0.95**	0.93**	0.89**	0.25	-0.46
Rows per ear	0.98**	1	0.98**	0.99**	0.99**	0.94**	0.28	-0.56
Grains per row	0.97**	0.96**	1	0.99**	0.98**	0.93**	0.27	-0.54
Grains per ear	0.98**	0.99**	0.99**	1	0.99**	0.93**	0.27	-0.56
Ear length	0.95**	0.94**	0.91**	0.93**	1	0.94**	0.32	-0.53
Ear diameter	0.82**	0.80**	0.88**	0.83**	0.67	1	0.13	-0.57
Plant height	-0.12	-0.12	-0.31	-0.23	0.06	-0.42	1	-0.39
1000-grain weight	0.96**	0.91**	0.93**	0.92**	0.91**	0.82**	-0.16	1

* and ** significant at 5% and 1% probability levels, respectively.

برای شناسایی صفات موثر بر عملکرد دانه و دستیابی به بهترین رابطه رگرسیونی بین عملکرد و سایر صفات مورد مطالعه از رگرسیون گام‌به‌گام استفاده شد. بدین منظور صفات مربوط به اجزای عملکرد به‌عنوان متغیرهای مستقل و عملکرد دانه به‌عنوان متغیر وابسته در نظر گرفته شد. قبل از تجزیه رگرسیون، ابتدا وجود هم‌خطی بین متغیرهای مستقل با استفاده از دو شاخص تحمل (TOL; Tolerance) و عامل تورم واریانس (VIF; Variance Inflation Factor) بررسی شد. مقدار TOL که بین صفر تا یک متغیر است، بیانگر درصدی از واریانس یک متغیر مستقل است که توسط متغیرهای مستقل دیگر توجیه نمی‌شود. بنابراین، مقادیر کم‌تر TOL بیانگر رابطه قوی‌تر و وجود هم‌خطی با متغیرهای مستقل دیگر است. شاخص VIF نیز عکس مقدار TOL است. معمولاً متغیرهایی با مقدار TOL کم‌تر از ۰/۱ و مقدار VIF بیش‌تر از ۱۰ به‌دلیل داشتن هم‌خطی بالا با سایر متغیرهای مستقل از رابطه رگرسیونی حذف می‌شوند. نتایج این مطالعه نشان داد که متغیرهای وارد شده به مدل رگرسیونی، مقادیر TOL و VIF قابل قبولی داشتند (جدول ۸). بر اساس نتایج رگرسیون گام‌به‌گام در تیمار عدم کاربرد نانوسیکلون (کنترل)، فقط صفت تعداد ردیف در بلال وارد مدل رگرسیونی شد و این صفت ۹۰/۸ درصد از کل تغییرات عملکرد دانه را توجیه کرد (جدول ۸). بنابراین می‌توان بیان کرد که در تیمار کنترل، تعداد ردیف در بلال بیش‌ترین نقش را در تغییرات عملکرد دانه داشت و انتخاب بر اساس آن می‌تواند مفید باشد. در تیمار کاربرد نانوسیلیکون نیز تعداد ردیف در بلال به‌همراه وزن هزار دانه وارد مدل نهایی رگرسیون گام‌به‌گام شدند و ۹۹/۴ درصد از تغییرات عملکرد دانه را تبیین کردند (جدول ۸). بنابراین به‌نظر می‌رسد در این تیمار صفات تعداد ردیف در بلال و وزن هزار دانه برای انتخاب رقم‌های با عملکرد بالاتر مناسب باشند. این نتایج با نتایج همبستگی (جدول ۷)، که در آن این دو صفت همبستگی بالایی با عملکرد دانه داشتند، مطابقت داشت. در مطالعه‌ای که با استفاده از رگرسیون گام‌به‌گام روی لاین‌های اینبرد ذرت انجام شد، دوره پرشدن دانه و تعداد ردیف دانه به‌عنوان صفات موثر بر عملکرد دانه مشخص شدند (Khodarahmpour, 2010). در پژوهش دیگری در گیاه ذرت دانه‌ای با استفاده از رگرسیون گام‌به‌گام، صفات تعداد دانه در ردیف، وزن ۳۰۰ دانه، تعداد ردیف دانه در بلال و ارتفاع بوته بیش از ۹۰ درصد از تغییرات عملکرد دانه را تحت شرایط تنش شدید خشکی توجیه کردند (Zarabi *et al*., 2011). در مطالعه دیگری، صفات تعداد دانه در بلال، وزن هکتولیتر و وزن هزار دانه به‌ترتیب به‌عنوان صفات موثر بر عملکرد دانه وارد مدل رگرسیون گام‌به‌گام شدند (Khodarahmpour *et al*., 2012). محرم‌نژاد و همکاران (Moharramnejad *et al*., 2022) صفات تعداد ردیف دانه در بلال و قطر بلال را به‌عنوان مهم‌ترین صفات موثر بر عملکرد دانه در هیبریدهای ذرت شناسایی کردند.

پس از شناسایی صفات مؤثر بر عملکرد دانه به‌وسیله رگرسیون گام‌به‌گام، میزان اثرات مستقیم و غیرمستقیم هر صفت با استفاده از تجزیه علیت تعیین شد. نتایج تجزیه علیت نشان داد که در تیمار کاربرد نانوسیلیکون تعداد ردیف در بلال بیش‌ترین اثر مستقیم و مثبت (۰/۶۳) را بر عملکرد دانه داشت و اثر غیرمستقیم آن از طریق وزن هزار دانه برابر با ۰/۳۵ بود (جدول ۹). وزن هزار دانه نیز اثر مستقیم و مثبت (۰/۳۹) بر عملکرد دانه داشت و اثر غیرمستقیم آن از طریق تعداد ردیف در بلال ۰/۵۷ بود (جدول ۹). به این ترتیب، به‌علت اثر مستقیم بالای تعداد ردیف در بلال و نیز اثر غیرمستقیم بالای وزن هزار دانه از طریق تعداد ردیف در بلال، می‌توان صفت تعداد ردیف در بلال را به‌عنوان مهم‌ترین شاخص انتخاب در رقم‌های ذرت در تیمار کاربرد نانوسیلیکون پیشنهاد کرد. از طرف دیگر در تیمار کنترل تنها صفت تعداد ردیف در بلال وارد مدل رگرسیون شد که این صفت دارای اثر مستقیم و مثبت ۰/۹۶ بر عملکرد دانه بود. بنابراین با توجه به نتایج تجزیه علیت در هر دو تیمار آزمایش، می‌توان صفت تعداد ردیف در بلال را به‌عنوان مهم‌ترین معیار برای انتخاب رقم‌های ذرت با عملکرد دانه بالا در هر دو تیمار آزمایش معرفی کرد. اهمیت اثرات مستقیم و غیرمستقیم صفات تعداد ردیف دانه در بلال و وزن هزار دانه بر عملکرد دانه ذرت در مطالعات متعددی گزارش شده است (Rafiq *et al*., 2010; Peng *et al*., 2011). خدارحم‌پور (Khodarahmpour, 2010) با مطالعه اینبرد لاین‌های ذرت نشان دادند که صفات دوره پر شدن دانه و تعداد ردیف دانه دارای اثر مستقیم مثبت و معنی‌دار بر عملکرد دانه بودند. صادقی و رتبه (Sadeghi & Rotbeh, 2016) نیز نشان دادند که صفات تعداد ردیف دانه و تعداد دانه در ردیف دارای بیش‌ترین اثر مستقیم مثبت و معنی‌دار بر عملکرد دانه بودند.

جدول ۸- نتایج تجزیه رگرسیون گام‌به‌گام عملکرد دانه رقم‌های ذرت تحت شرایط عدم کاربرد (کنترل) و کاربرد نانوسیلیکون

Table 8. Results of stepwise regression analysis for grain yield of maize cultivars under no-applicaion (control) and application of nanosilicon

Treatment	Collinearity	Constant	Added variables to model		Adjusted R^2	F-value
Control			Rows per ear			
		1.53*	0.39**		90.8	70.01**
	TOL	-	1		-	-
	VIF	-	1		-	-
Nanosilicon application			Rows per ear	1000-grain weight		
		-2.23**	0.27**	0.02**	99.4	606.21**
	TOL	-	0.16	0.16	-	-
	VIF	-	6.08	6.08	-	-

* and ** significant at 5% and 1% probability levels, respectively.

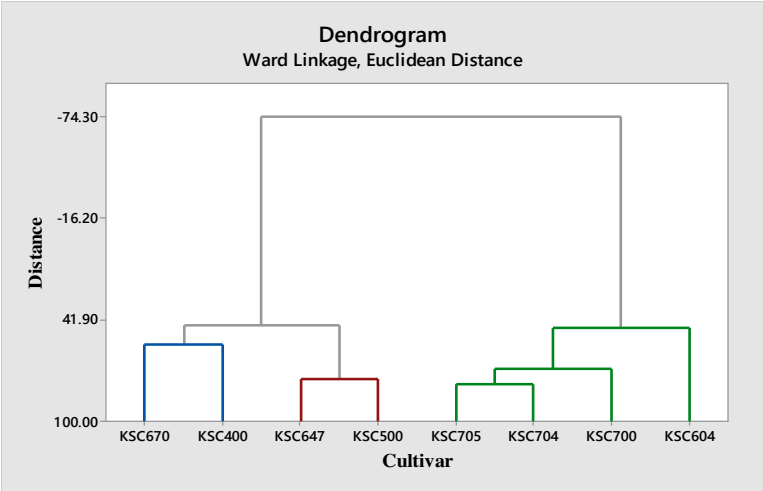
جدول ۹- تجزیه علیت عملکرد دانه رقم‌های ذرت مورد مطالعه در تیمار کاربرد نانوسیلیکون

Table 9. Path analysis of grain yield of the studied maize cultivars under nanosilicon application

Trait	Direct effect	Indirect effect via		Correlation with grain yield
		Rows per ear	1000-grain weight	
Rows per ear	0.63	-	0.35	0.98
1000-grain weight	0.39	0.57	-	0.96

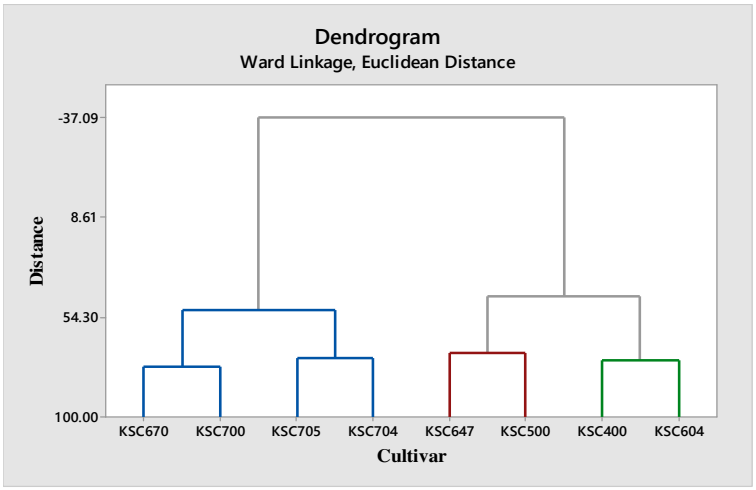
به‌منظور گروه‌بندی رقم‌های ذرت مورد مطالعه بر مبنای کلیه صفات اندازه‌گیری شده در هر یک از شرایط عدم کاربرد (کنترل) و کاربرد نانوسیلیکون، از تجزیه خوشه‌ای به‌روش وارد استفاده و دندروگرام حاصل در شکل‌های ۱ و ۲ ارائه شد. نتایج نشان داد که رقم‌های ذرت مورد مطالعه را می‌توان در هر دو شرایط در سه گروه مجزا گروه‌بندی کرد، اما رقم‌های موجود در گروه‌ها در دو شرایط متفاوت بودند. تحت شرایط کنترل (عدم کاربرد نانوسیلیکون، دو رقم KSC670 و KSC400 در گروه اول و دو رقم KSC647 و KSC500 در گروه دوم قرار گرفتند (شکل ۱). رقم‌های این گروه از نظر تمامی صفات مورد بررسی به‌جز ارتفاع بوته دارای میانگین کم‌تری از میانگین کل و میانگین دو گروه دیگر بودند (جدول ۱۰). رقم‌های KSC705، KSC704، KSC604 و KSC700 نیز در گروه سوم قرار گرفتند و از نظر بیش‌تر صفات مورد بررسی، میانگین بالاتری از میانگین کل و میانگین دو گروه دیگر داشتند (جدول ۱۰). بنابراین می‌توان از رقم‌های این گروه برای دستیابی به عملکرد بالا در تیمار کنترل استفاده کرد.

در تیمار کاربرد نانوسیلیکون رقم‌های مورد مطالعه با استفاده از تجزیه خوشه‌ای در سه خوشه مجزا گروه‌بندی شدند (شکل ۲). بر این اساس، در گروه اول رقم‌های KSC670، KSC705، KSC704 و KSC700 قرار گرفتند. مقادیر صفات در رقم‌های این گروه از نظر بیش‌تر صفات مورد بررسی بالاتر از میانگین کل و میانگین دو گروه دیگر بود (جدول ۱۰). بنابراین از رقم‌های این گروه می‌توان برای دستیابی به عملکرد بالا در تیمار کاربرد نانوسیلیکون استفاده کرد. دو رقم KSC647 و KSC500 در گروه دوم قرار گرفتند. رقم‌های این گروه در مقایسه با دو گروه دیگر و همچنین میانگین کل جامعه دارای مقادیر کم‌تری از نظر تمامی صفات مورد بررسی بودند (جدول ۱۰). در گروه سوم نیز رقم‌های KSC400 و KSC604 قرار گرفتند. با بررسی نتایج تجزیه خوشه‌ای می‌توان نتیجه‌گیری کرد که رقم‌های KSC705، KSC704 و KSC700 در هر دو تیمار آزمایش از نظر بیش‌تر صفات مورد مطالعه برتر بودند (جدول ۱۰)، و بنابراین این رقم‌ها برای کشت به‌منظور دستیابی به عملکرد بالا در هر دو تیمار آزمایش در شرایط خاک شور قابل توصیه می‌باشند. صادقی و رتبه (Sadeghi & Rotbeh, 2016) عملکرد و اجزای عملکرد دانه را در ۲۱ ژنوتیپ ذرت مورد مطالعه قرار دادند و بر اساس تجزیه خوشه‌ای به‌روش وارد ژنوتیپ‌ها را در چهار گروه مجزا دسته‌بندی کردند. ارژنگ و همکاران (Arzangh *et al*., 2021) نیز در بررسی صفات مرتبط با عملکرد در لاین‌های ذرت از تجزیه خوشه‌ای به‌روش حداقل واریانس وارد استفاده و لاین‌های مورد مطالعه را در هر دو شرایط نرمال و تنش شوری در سه خوشه گروه‌بندی کردند.



شکل ۱- دندروگرام تجزیه خوشه‌ای رقم‌های ذرت در تیمار عدم کاربرد نانوسیلیکون (کنترل)

Figure 1. Dendrogram of cluster analysis of maize cultivars in no-application of nanosilicon (control) treatment



شکل ۲- دندروگرام تجزیه خوشه‌ای رقم‌های ذرت در تیمار کاربرد نانوسیلیکون

Figure 2. Dendrogram of cluster analysis of maize cultivars in nanosilicon application treatment

جدول ۱۰- میانگین گروه‌های حاصل از تجزیه خوشه‌ای در تیمارهای عدم کاربرد (کنترل) و کاربرد نانوسیلیکون

Table 10. Average of groupes from cluster analysis under no-application (control) and nanosilicon application treatments

Treatment	Group	Rows per ear	Grains per row	Grains per ear	Ear length (cm)	Ear diameter (cm)	Plant height (cm)	1000-grain weight (g)	Grain yield (t/ha)
Control	1	12.01b	25.65b	307.98b	14.76b	3.61ab	169.9a	262.71a	6.31ab
	2	10.78b	22.96b	247.4b	11.82c	2.96b	165.3a	252.01ab	5.8b
	3	13.63a	30.12a	411.07a	17.88a	4.24a	177.7a	241.1b	6.92a
	Mean	12.51	27.21	344.37	15.58	3.77	172.7	249.23	6.49
Nanosilicon application	1	16.84a	33.21a	560.7a	21.31a	5.8a	183.9ab	278.06a	7.76a
	2	14.54b	28.34b	412.75b	13.88b	4.52b	181.8b	255.67b	6.68b
	3	15.64ab	29.43b	460.6ab	18.15ab	4.86b	199.6a	265.11b	7.16ab
	Mean	15.97	31.05	498.67	18.66	5.24	187.3	269.22	7.34

Means with the similar letter in each column and each trait are not significantly different by Duncan's test at 5% probability level.

نتیجه‌گیری کلی

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر نانوسیلیکون و رقم بر تمام صفات مورد مطالعه معنی‌دار بود، اما برهمکنش نانوسیلیکون × رقم فقط برای صفات طول بلال، ارتفاع بوته و وزن هزار دانه معنی‌دار شد. همچنین، کاربرد نانوسیلیکون موجب افزایش تمامی صفات مورد مطالعه شد. دو رقم KSC704 و KSC705 از نظر عملکرد دانه و اجزای آن بیش‌ترین مقدار را در هر دو تیمار کنترل و کاربرد نانوسیلیکون داشتند و بنابراین می‌توان این دو رقم را به‌عنوان رقم‌های برتر برای کشت در هر دو تیمار آزمایش در شرایط خاک شور معرفی کرد. نتایج ضرایب همبستگی نشان داد که عملکرد دانه در تیمار کنترل با صفات تعداد ردیف در بلال، تعداد دانه در ردیف، تعداد دانه در بلال و طول و قطر بلال و در تیمار کاربرد نانوسیلیکون با صفات تعداد ردیف در بلال، تعداد دانه در ردیف، تعداد دانه در بلال، طول و قطر بلال و وزن هزار دانه همبستگی مثبت و معنی‌دار داشت. بر اساس نتایج رگرسیون گام‌به‌گام در تیمار کنترل، صفت تعداد ردیف در بلال و در تیمار کاربرد نانوسیلیکون، صفات تعداد ردیف در بلال و وزن هزار دانه وارد مدل نهایی رگرسیون شدند. نتایج تجزیه علیت نیز نشان داد که صفت تعداد ردیف در بلال در هر دو تیمار آزمایش دارای بیش‌ترین اثر مستقیم و مثبت بر عملکرد دانه بود و بنابراین می‌توان این صفت را به‌عنوان مؤثرترین صفت بر عملکرد دانه ذرت در این مطالعه معرفی کرد. بر اساس نتایج تجزیه خوشه‌ای نیز سه رقم KSC705، KSC704 و KSC700 از نظر بیش‌تر صفات مورد مطالعه در هر دو تیمار آزمایش برتر بودند و بنابراین این رقم‌ها برای کشت در خاک شور به‌منظور دستیابی به عملکرد بالا در هر دو تیمار آزمایش قابل توصیه هستند.

تضاد منافع

نویسندگان تایید می‌کنند که این تحقیق در غیاب هرگونه روابط تجاری یا مالی می‌تواند به عنوان تضاد منافع بالقوه تعبیر شود، انجام شده است.

رعایت اخلاق در نشر

نویسندگان اعلام می‌کنند که در نگارش این مقاله به‌طور کامل از اخلاق نشر از جمله سرقت ادبی، سوء رفتار، جعل داده‌ها و انتشار دوگانه، پیروی کرده‌اند. همچنین این مقاله حاصل یک کار تحقیقاتی اصیل بوده و تاکنون به‌طور کامل به هیچ زبانی و در هیچ نشریه یا همایشی چاپ و منتشر نشده است و هیچ اقدامی نیز برای انتشار آن در هیچ نشریه یا همایشی صورت نگرفته و نخواهد گرفت.

اجازه انتشار مقاله

نویسندگان با چاپ این مقاله به‌صورت دسترسی باز موافقت کرده و کلیه حقوق استفاده از محتوا، جدول‌ها، شکل‌ها، تصویرها و غیره را به ناشر واگذار می‌کنند.

References

Ahire, M. L., Mundada, P. S., Nikam, T. D., Bapat, V. A., & Penna, S. (2021). Multifaceted roles of silicon in mitigating environmental stresses in plants. *Plant Physiology and Biochemistry, 169*, 291-310. doi: 10.1016/j.plaphy.2021.11.010.

Ahmadi Nouraldinvand, F., Seyedsharifi, R., Siadat, S., & Khalilzadeh, R. (2021). Effects of nano silicon concentrations and bio-fertilizer on yield and grain filling components of wheat in different irrigation regimes. *Iranian Journal of Field Crops Research*, *19*(1), 91-105. [In Persian]. doi: 10.22067/JCESC.2021.67258.0.

Akbari, F., Mousavi, S. G., & Seghatol Eslami, M. J. (2017). The effect of nano and conventional zinc and silica fertilizers spraying on yield and yield components of maize. *Journal of Crop Production Research*, *9*(2), 153-167. [In Persian].

Amiri, A., Bagheri, A., khaje, M., Najafabadi Pour, F., & Yadollahi, P. (2014). Eeffect of silicon foliar application on yield and antioxidant enzymes activity of safflower under limited irrigation conditions. *Journal of Crop Production Research*, *5*(4), 361-373. [In Persian].

Arzangh, S., Darvishzadeh, R., & Alipour, H. (2021). Evaluation of genetic diversity of maize lines (*Zea mays* L.) under normal and salinity stress conditions. *Cereal Research*, *11*(3), 243-268. [In Persian]. doi: 10.22124/CR.2022.21075.1699.

Deshmukh, R. K., Ma, J. F., & Bélanger, R. R. (2017). Role of silicon in plants. *Frontiers in Plant Science*, *8*, 1858. doi: 10.3389/fpls.2017.01858.

Emadi, M. (2011). Effect of foliar application of polyamines and some essential nutrients on qualitative and quantitative characteristics of different varieties of wheat (*Triticum aestivum* L.) in Ahvaz. M. Sc. Dissertation, Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran. [In Persian].

Ghobadi, R., Ghobadi, M., Jalali Honarmand, S., Farhadi, B., & Mondani, F. (2019). Study the correlation and path analysis of yield and its related traits of maize under different water and nitrogen conditions. *Iranian Journal of Field Crops Research*, *17*(2), 275-289. [In Persian]. doi: 10.22067/gsc.v17i2.71772.

Guntzer, F., Keller, C., & Meunier, J. D. (2012). Benefits of plant silicon for crops: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, *32*(1), 201-213. doi: 10.1007/s13593-011-0039-8.

Gupta, B., & Huang, B. (2014). Review article mechanism of salinity tolerance in plants: Physiological, biochemical, and molecular characterization. *International Journal of Genomics*, *2014*, 701596. doi: 10.1155/2014/701596.

Hodson, M. J., & Evans, D. E. (1995). Aluminium/silicon interactions in higher plants. *Journal of Experimental Botany*, *46*(2), 161-171. doi: 10.1093/jxb/46.2.161.

Khalili, M., Naghavi, M. R., Pour Aboughadareh, A., & Naseri Rad, H. (2013). Effects of drought stress on yield and yield components in maize cultivars (*Zea mays* L.). *International Journal of Agronomy & Plant Production*, *4*(4), 809-812.

Khodarahmpour, Z. (2010). Study of correlation and causal relations quantitative traits in maize (*Zea mays* L.) in normal and heat stress conditions. *Journal of Crop Breeding*, *2*(6), 1-15. [In Persian]. dor: 20.1001.1.22286128.1389.2.6.1.8.

Khodarahmpour, Z., Choukan, R., & Hosseinpour, B. (2012). Multivariate analysis some quantitative traits in maize inbred lines under heat stress condition. *Crop Production*, *4*(2), 31-50. [In Persian]. dor: 20.1001.1.2008739.1390.4.2.3.7.

Kumaraswamy, R. V., Saharan, V., Kumari, S., Choudhary, R. C., Pal, A., Sharma, S. S., Rakshit, S., Raliya, R., & Biswas, P. (2021). Chitosan-silicon nanofertilizer to enhance plant growth and yield in maize (*Zea mays* L.). *Plant Physiology & Biochemistry*, *159*, 53-66. doi: 10.1016/j.plaphy.2020.11.054.

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. doi: 10.3389/fpls.2017.01346.

Mohammadzadeh, Z., Seyed Sharifi, R., & Farzaneh, S. (2023). Effects of nanoparticles (zinc and silicon) and plant growth promoting rhizobacteria on yield, photosynthetic pigments and grain filling components of *Triticale* under salinity stress. *Iranian Journal of Field Crops Research*, *21*(3), 347-361. [In Persian]. doi: 10.22067/jcesc.2023.81343.1231.

Moharramnejad, S., Shiri, M. R., & Parchami-Araghi, F. (2022). Evaluation of stability of FAO 600 corn hybrids by grain yield and its components. *Journal of Agricultural Science & Sustainable Production*, *32*(2), 299-312. [In Persian]. doi: 10.22034/saps.2022.49312.2786.

Nasrollahzade Asl, V., Moharramnejad, S., Yusefi, M., Bandehhagh, A., & Ibrahimi, L. (2017). Evaluation of grain yield of maize (*Zea mays* L.) hybrides under water limitation. *Journal of Agricultural Science & Sustainable Production*, *27*(2), 85-96. [In Persian].

Okeke, E. S., Nweze, E. J., Ezike, T. C., Nwuche, C. O., Ezeorba, T. P. C., & Nwankwo, C. E. I. (2023). Silicon-based nanoparticles for mitigating the effect of potentially toxic elements and plant stress in agro ecosystems: A sustainable pathway towards food security. *Science of the Total Environment*, *898*, 165446. doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.165446.

Peng, B., Li, Y., Wang, Y., Liu, C., Liu, Z., Tan, W., Zhang, Y., Wang, D., Shi, Y., Sun, B., Song, Y., Wang, T., & Li. Y. (2011). QTL analysis for yield components and kernel-related traits in maize across multi-environments. *Theoretical & Applied Genetics*, *122*, 1305-1320. doi: 10.1007/s00122-011-1532-9.

Rafiq, C. M., Rafique, M., Hussain, A., & Altaf, M. M. (2010). Studies on the heritability, correlation and path analysis in maize (*Zea mays* L.). *Journal of Agricultural Research*, *48*(1), 35-38.

Raj, H., & Thakral, K. K. (2008). Effect of chemical fertilizers on growth, yield and quality of fennel (*Foeniculum vulgare* Miller). *Journal of Spices & Aromatic Crops*, *17*(2), 134-139.

Roychoudhury, A. (2020). Silicon-nanoparticles in crop improvement and agriculture. *International Journal on Recent Advancement in Biotechnology & Nanotechnology*, *3*(1), 54-65.

Sabaghnia, N., & Janmohammadi, M. (2024). *Carthamus tinctorius* L. response to nano-silicon foliar treatment under organic and inorganic fertilizer application. *Acta Agriculturae Slovenica*, *120*(4), 1-9. doi: 10.14720/aas.2024.120.4.18624.

Sadeghi, F., & Rotbeh, J. (2016). Evaluation of grain yield and yield components using descriptive and multivariate statistics. *Journal of Crop Breeding*, *8*(18), 212-221. [In Persian]. doi: 10.29252/jcb.8.18.212.

Sahebi, M., Hanafi, M. M., Nor Akmar, A. S., Rafii, M. Y., Azizi, P., Tengoua, F. F., Azwa, J. N. M., & Shabanimofrad, M. (2015). Importance of silicon and mechanisms of biosilica formation in plants. *BioMed Research International*, *2015*, 396010. doi: 10.1155/2015/396010.

Seleiman, M. F., Aslam, M. T., Alhammad, B. A., Hassan, M. U., Maqbool, R., Chattha, M. U., Khan, I., Gitari, O. S., Uslu, R., Roy, T., & Battaglia, M. L. (2021). Salinity stress in wheat: Effects, mechanisms and management strategies. *Phyton-International Journal of Experimental Botany*, *91*(4), 667-694. doi: 10.32604/phyton.2022.017365.

Soleimanifard, A., Naseri, R., Emami, T., Mirzaei, A., Koshkhabar, H., & Soleimani, R. (2011). The effects of irrigation regimes and the planting patterns on yield and yield components of maize (SC 704). *American-Eurasian Journal of Agricultural & Environmental Science*, *10*(2), 278-282.

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. doi: 10.1093/jxb/err269.

Torabi, S. K., Alahdadi, I., Akbari, G. A., Ghorbani Javid, M., & Fotovat, R. (2023). Effects of foliar application of salicylic acid and nanosilicon on the yield and physiological traits of maize (*Zea mays*) in heavy metal contaminated fields. *Iranian Journal of Field Crop Science*, *54*(1), 151-168. [In Persian]. doi: 10.22059/ijfcs.2022.346622.654931.

Xie, Zh., Song, R., Shao, H., Song, F., Xu, H., & Lu, Y. (2015). Silicon improves maize photosynthesis in saline-alkaline soils. *The Scientific World Journal*, *2015*, 245072. doi: 10.1155/2015/245072.

Xu, R., Huang, J., Guo, H., Wang, C., & Zhan, H. (2023). Functions of silicon and phytolith in higher plants. *Plant Signaling & Behavior*, *18*(1), e2198848. doi: 10.1080/15592324.2023.2198848.

Zarabi, M., Alahdadi, I., Akbari, G. A., Irannejad, H., & Akbari, G. A. (2011). Studying correlation and regression equations between traits of grain corn under different fertilizer combinations and drought stress condition. *Journal of Agroecology*, *3*(1), 50-64. [In Persian]. doi: 10.22067/jag.v3i1.9970.

Zare, H., Ghanbarzadeh, Z., Behdad, A., & Mohsenzadeh, S. (2015). Effect of silicon and nanosilicon on reduction of damage caused by salt stress in maize (*Zea mays*) seedlings. *Journal of Plant Biological Sciences*, *7*(26), 59-74. [In Persian]. dor: 20.1001.1.20088264.1394.7.26.6.8.

Zarooshan, M., Abdilzade, A., Sadeghipour, H.R., & Mehrabanjoubani, P. (2020). Comparison of the effect of silicon and nano-silicon on some biochemical and photosynthetic traits of *Zea mays* L. under salinity stress. *Journal of Plant Environmental Physiology,* 15(57), 23-38. [In Persian]. dor: 20.1001.1.76712423.1399.15.57.3.6.

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. doi: 10.1007/s00344-013-9366-0.