University of Guilan
Faculty of Agricultural Sciences

Cereal Research
Vol. 12, No. 3, Autumn 2022 (297-314)
doi: 10.22124/CR.2023.24021.1759
pISSN: 2252-0163 eISSN: 2538-6115

RESEARCH PAPER OPEN ACCESS

# Improving the quality of mother seeds of corn (*Zea mays* L.) cultivars grown in saline soil using combination of biochar, mycorrhizal fungus and silicon foliar application

**Sajad Ghaedi Kachouei[1], Mehdi Madandoust[2*], Mahmood Dejam[3] and Farhad Mohajeri[3]**

1. Ph.D. Student, Fasa Branch, Islamic Azad University, Fasa, Iran
2. Associate Professor, Fasa Branch, Islamic Azad University, Fasa, Iran (*Corresponding author: mehdi.madandoust@iau.ac.ir)
3. Assistant Professor, Fasa Branch, Islamic Azad University, Fasa, Iran

## Comprehensive abstract

### Introduction

The seed is the most important input of the agricultural section, which provides the reproduction, survival and extension of the plant. Therefore, identifying the factors affecting seed production and its quality at the production and harvesting stages is very important. Previous reports show that the use of soil modifier compounds such as biochar, arbuscular mycorrhizal fungus (AMF), and silicon foliar application can improve the germination indices of produced seeds under environmental stressess conditions, especially salinity stress. So far, the experiments conducted to investigate the effect of biochar, mycorrhizal fungus and silicon foliar application on plant growth and salinity stress tolerance have mostly been about the individual applications of each of these soil modifiers, and there is little evidence of their synergistic effects, especially for plants grown under saline soil conditions. The objective of this experiment was to investigate the synergistic effects of biochar, arbuscular mycorrhizal fungus and silicon foliar application on improving the quality of mother class seeds of maize variety under saline soil conditions.

### Materials and methods

This study was conducted as a factorial experiment in a randomized complete block design with three replications in a research field with an electrical conductivity of 6.01 $dS.m^{-1}$, in Fasa city, Fars province, in 2020. The first factor was three varieties of maize, including early- maturity variety 370, mid-maturity variety 604, and late-maturity variety 704, and the second factor was soil modifier compounds in eight levels, including no-application of modifier compounds as control, biochar, AMF, silicon foliar application, biochar + AMF, biochar + silicon, AMF + silicon and biochar + AMF + silicon. The measured traits included the concentration of sodium and potassium, activity of alpha and beta amylase enzymes, and seed germination and seedling growth indices. Statistical analyzes including analysis of variance and comparison of means were performed with Duncan's multiple range test at the 5% probability level using SAS software ver. 9.1.

### Research findings

The results of this experiment showed that sodium concentration of seedling in cultivar 704 was reduced by 31% in the combined treatment of biochar + mycorrhizal fungus + silicon foliar application compared to the control treatment. The use of soil modifier treatments alone and in combination caused a decrease in the ratio of sodium to potassium, electrical conductivity of seeds as well as an increase in potassium concentration. An increase of 57% and 25% of alpha and beta amylase enzymes was observed in the combined treatment of biochar + mycorrhizal fungus + silicon foliar application compared to the control treatment. Also, application of soil modifier resources alone at a lower level

could cause a significant increase in germination percentage. Seedling dry weight in the combined treatment of biochar + mycorrhizal fungus + silicon foliar application showed an increase of 15% and 10% in varieties 604 and 370, respectively. On the other hand, the highest seed germination and 1000-grain weight in the studied corn varieties were also observed in the combined treatments of biochar + mycorrhizal fungus + silicon foliar application.

**Conclusion**

In total, the results of this experiment showed the positive effect of soil modifier sources in improving of germination characteristics and seedling growth indices of corn varieties. Based on these results, the combined application of biochar + mycorrhizal fungus + silicon foliar application is recommended to improve the quality of seed production in corn varieties under salt stress conditions.

**Keyword:** Electrical conductivity, Germination percentage, Seed vigor, Soil modifier resources

Received: June 10, 2022 Accepted: December 04, 2022

**Cite this article:**

**Ghaedi Kachouei, S., Madandoust, M., Dejam, M. and Mohajeri, F. 2023.** Improving the quality of mother seeds of corn (*Zea mays* L.) cultivars grown in saline soil using combination of biochar, mycorrhizal fungus and silicon foliar application. *Cereal Research*, 12(3), pp. 297-314.

تحقیقات غلات
دوره دوازدهم، شماره سوم، پاییز ۱۴۰۱ (۳۱۴-۲۹۷)
doi: 10.22124/CR.2023.24021.1759
دانشگاه گیلان
دانشکده علوم کشاورزی
مقاله پژوهشی
دسترسی آزاد

# بهبود کیفیت بذرهای طبقه مادری حاصل از ارقام ذرت (*Zea mays* L.) رشد یافته در خاک شور با تلفیق بیوچار، قارچ مایکوریزا و محلول‌پاشی سیلیسیم

**سجاد قائدی کچوئی[۱]، مهدی مدن‌دوست[۲*]، محمود دژم [۳] و فرهاد مهاجری [۳]**

۱- دانشجوی دکتری، گروه زراعت، واحد فسا، دانشگاه آزاد اسلامی، فسا، ایران
۲- دانشیار، گروه زراعت، واحد فسا، دانشگاه آزاد اسلامی، فسا، ایران (* نویسنده مسئول: mehdi.madandoust@iau.ac.ir )
۳- استادیار، گروه زراعت، واحد فسا، دانشگاه آزاد اسلامی، فسا، ایران

## چکیده جامع

**مقدمه:** بذر مهم‌ترین نهاده بخش کشاورزی است که زمینه ازدیاد، بقا و گسترش گیاه را فراهم می‌کند. بنابراین شناخت عوامل تاثیرگذار بر تولید بذر و کیفیت آن در مراحل تولید و برداشت دارای اهمیت زیادی است. گزارش‌های قبلی نشان می‌دهند که کاربرد ترکیب‌های اصلاح‌کننده خاک مانند بیوچار، قارچ مایکوریزا آربوسکولار و محلول‌پاشی سیلیسیم، می‌توانند سبب بهبود شاخص‌های جوانه‌زنی در بذرهای تولید شده تحت شرایط تنش‌های محیطی به‌ویژه تنش شوری شوند. آزمایش‌هایی که تا کنون به‌منظور بررسی اثر بیوچار، قارچ مایکوریزا و محلول‌پاشی سیلیسیم بر رشد گیاه و تحمل به تنش شوری انجام شده است، بیش‌تر در مورد کاربردهای منفرد هر یک از این اصلاح‌کننده‌های خاک بوده است و شواهد کمی از اثرات هم‌افزایی آنها به‌ویژه برای گیاهان رشد یافته تحت شرایط خاک شور وجود دارد. هدف از این آزمایش، بررسی اثرات هم‌افزایی بیوچار، قارچ مایکوریزا آربوسکولار و محلول‌پاشی سیلیسیم بر بهبود کیفیت بذرهای طبقه مادری ارقام ذرت تحت شرایط خاک شور بود.

**مواد و روش‌ها:** این آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در شهرستان فسا، استان فارس، در سال ۱۳۹۹ در یک مزرعه تحقیقاتی با هدایت الکتریکی ۶/۰۱ دسی‌زیمنس بر متر انجام شد. عامل اول سه رقم ذرت شامل رقم زودرس ۳۷۰، رقم میان‌رس ۶۰۴ و رقم دیررس ۷۰۴ و عامل دوم منابع اصلاح کننده خاک در هشت سطح شامل بدون کاربرد مواد اصلاح کننده به‌عنوان شاهد، بیوچار، قارچ مایکوریزا آربوسکولار، محلول‌پاشی سیلیسیم، بیوچار+ قارچ مایکوریزا آربوسکولار، بیوچار+ محلول‌پاشی سیلیسیم، قارچ مایکوریزا آربوسکولار+ محلول‌پاشی سیلیسیم و بیوچار+ قارچ مایکوریزا آربوسکولار+ محلول‌پاشی سیلیسیم) بود. صفات اندازه‌گیری شده نیز شامل غلظت عناصر سدیم و پتاسیم، میزان فعالیت آنزیم آلفا و بتا آمیلاز و شاخص‌های جوانه‌زنی بذر و رشد گیاهچه بودند. تجزیه‌های آماری شامل تجزیه واریانس و مقایسه میانگین‌ها با آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد با استفاده از نرم‌افزار SAS نسخه ۹/۱ انجام شد.

**یافته‌های تحقیق:** نتایج این آزمایش نشان داد که غلظت سدیم گیاهچه در رقم ۷۰۴ در تیمار تلفیق بیوچار+قارچ مایکوریزا +محلول‌پاشی سیلیسیم در مقایسه با شاهد کاهش ۳۱ درصدی نشان داد. کاربرد تیمارهای اصلاح کننده خاک به‌تنهایی و تلفیق آنها با هم سبب کاهش نسبت سدیم به پتاسیم، هدایت الکتریکی بذر و افزایش غلظت پتاسیم شد. به‌ترتیب افزایش ۵۷ و ۲۵ درصدی آنزیم‌های آلفا و بتا آمیلاز در تیمار تلفیق بیوچار+قارچ مایکوریزا+سیلیسیم در مقایسه با شاهد مشاهده شد. همچنین کاربرد تیمارهای اصلاح کننده خاک به‌تنهایی در سطح پایین‌تر توانست سبب افزایش معنی‌دار درصد جوانه‌زنی شود.

وزن خشک گیاهچه نیز در تیمار تلفیق بیوچار+قارچ مایکوریزا+سیلیسیم در رقم‌های ۶۰۴ و ۳۷۰ به‌ترتیب افزایش ۱۵ و ۱۰ درصدی نشان داد. از سوی دیگر بیش‌ترین بنیه بذر و وزن هزار دانه در ارقام ذرت مورد مطالعه نیز در تیمارهای تلفیق بیوچار+ قارچ مایکوریزا+محلول‌پاشی سیلیسیم مشاهده شد.

**نتیجه‌گیری:** در مجموع نتایج این آزمایش تأثیر مثبت منابع اصلاح کننده خاک را در بهبود صفات و شاخص‌های مختلف جوانه‌زنی و رشد گیاهچه ارقام ذرت نشان داد. بر اساس این نتایج، کاربرد تلفیقی بیوچار+قارچ مایکوریزا+محلول‌پاشی سیلیسیم به‌منظور بهبود کیفیت بذر تولیدی در ارقام ذرت تحت شرایط تنش شوری توصیه می‌شود.

**واژه‌های کلیدی**: بنیه بذر، درصد جوانه‌زنی، منابع اصلاح کننده خاک، هدایت الکتریکی

---

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۳/۲۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۱۳

**نحوه استناد به این مقاله:**

**قائدی کچوئی، سجاد، مدن‌دوست، مهدی، دژم، محمود و مهاجری، فرهاد. ۱۴۰۲.** بهبود کیفیت بذرهای طبقه مادری حاصل از ارقام ذرت (*Zea mays* L.) رشد یافته در خاک شور با تلفیق بیوچار، قارچ مایکوریزا و محلول‌پاشی سیلیسیم. *تحقیقات غلات*، ۱۲(۳)، ۳۱۴-۲۹۷.

**مقدمه**

ذرت (*Zea mays* L.) یکی از مهم‌ترین گیاهان زراعی است که در اکثر کشورهای جهان کشت می‌شود. ذرت، یکی از پرمصرف‌ترین غلات به‌شمار می‌رود و از لحاظ مقدار تولید بعد از گندم و برنج سومین محصول غله جهان است (FAO, 2009). پیش‌بینی می‌شود جمعیت رو به رشد و نه میلیاردی جهان در سال ۲۰۵۰ با محدودیت تولید مواد غذایی مواجه شود. در بین گیاهان زراعی، ذرت پتانسیل مناسبی جهت تامین تقاضای مواد غذایی بخش عمده‌ای از کشورهای در حال توسعه دارد (Riccetto *et al*., 2020). ذرت به‌عنوان یکی از محصولات غذایی ارشمند، علاوه بر دارا بودن عملکرد دانه و عملکرد زیستی بالا، اهمیت ویژه‌ای در تأمین کربوهیدرات، روغن خوراکی و انرژی تجدیدپذیر دارد و در طیف وسیعی از شرایط آب و هوایی کشت می‌شود، اما به شوری نسبتاً حساس است (Arzangh *et al*., 2021).

برای دستیابی به عملکرد مناسب در گیاهان زراعی، استفاده از بذرهای با کیفیت بالا ضروری است، زیرا جوانه‌زنی بذر از مهم‌ترین مراحل رشدی گیاهان زراعی است و در صورتی با موفقیت پشت سرگذاشته می‌شود که از بذرهای با کیفیت بالا استفاده شود (Rifna *et al*., 2019). بذر مهم‌ترین نهاده بخش کشاورزی است که زمینه ازدیاد، بقا و گسترش گیاه را فراهم می‌کند. بنابراین شناخت عوامل اثرگذار بر تولید بذر و کیفیت آن در مراحل تولید و برداشت دارای اهمیت فوق‌العاده‌ای است. کیفیت بذر نشان دهنده تأثیر شرایط محیطی در تولید آن است (Moncaleano-Escandon *et al*., 2013). ارزیابی ارقام مختلف ذرت و تعیین پایداری عملکرد دانه آنها نسبت به شرایط متفاوت محیطی جهت پاسخ به تقاضای روزافزون جهان از طریق کشاورزی پایدار امری اجتناب‌ناپذیر است (Joekar *et al*., 2019). ژنوتیپ‌های مختلف ذرت تحت تنش شوری پاسخ متفاوتی از خود نشان می‌دهند. بنابراین شناسایی ارقام متحمل و سازگار با شرایط هر زیست‌بوم اهمیت خاصی دارد (Islam *et al*., 2022). از سوی دیگر بر طبق گزارش‌های محققان به‌دلیل گسترش زمین‌های شور در آینده نزدیک، اهمیت تولید بذر با کیفیت در طبقه‌های مختلف در شرایط تنش‌های محیطی برای تحقق امنیت غذایی بیش از پیش مشخص می‌شود (McGuire and Sperling, 2013). هر چند که تولید بذر در شرایط خاک‌های شور و نیمه‌شور به‌دلیل کاهش کمیت و کیفیت بذر تولیدی یک راهبرد محتاطانه برای تولید بذر است، اما تحقیقات متمرکز روی ادغام گزینه‌های مدیریتی مختلف می‌تواند منجر به تولید پایدار بذر در مناطق شور شود. این راهکار ممکن است به‌طور قابل توجهی به امنیت غذایی جهانی در آینده کمک کند (Hussain *et al*., 2018). بر طبق گزارش‌های محققان در حال حاضر وضعیت فعلی تولید بذر در شرایط مطلوب بررسی می‌شود، اگرچه پژوهش‌های آینده باید تولید بذر را در شرایط تنش‌های مختلف محیطی پیشنهاد کنند که قطعا از نظر منابع با کشاورزی در شرایط مطلوب رقابت نخواهد کرد (Dornbos, 2020). در نتیجه موفقیت در توسعه محصولات سازگار با تنش خشکی و شوری به استفاده کارآمد و ترکیبی از مهندسی ژنتیک و منابع اصلاح کننده بستگی دارد (Fita *et al*., 2015).

تنش‌های محیطی از جمله شوری طی دوره رشد گیاه مادری بر کمیت و کیفیت بذر تولیدی موثر است (Attarzadeh *et al*., 2019; Nguyen *et al*., 2021). عوامل تنش‌زای محیطی قابلیت تغییر در درصد جوانه‌زنی و بنیه بذرهای حاصل و کاهش عملکرد محصول قابل برداشت در هر زمان از رشد بذر تا استقرار گیاه مادری را دارند. بنابراین، تمام این عوامل محیطی و ژنتیکی در ارزیابی عملکرد بذر اهمیت دارند (Reed *et al*., 2022). به‌دلیل آنکه ممکن است تنش شوری خاک، رشد گیاه و فرآیندهای نموی را مختل کند، بذرهای تولید شده گیاهان روغنی تحت تنش شوری در مقایسه با شرایط شاهد متفاوت است (Bassil and Kaffka, 2002). گزارش شده است که تنش شوری بیش از حد تحمل گیاه مادری، سبب کاهش جوانه‌زنی بذر تولید شده می‌شود (Dehshiri and Modares Sanavy, 2015).

چندین رویکرد برای اصلاح خاک شور و بازیابی بهره‌وری گیاهان در حال ارزیابی است. بنابراین پیشرفت‌ها و چشم‌اندازهای اخیر برای بهبود تنش شوری در گیاهان مورد تاکید قرار گرفته‌اند (Mishra *et al*., 2021). سیلیسیم همراه با اکسیژن، دومین عنصر اصلی پوسته زمین است و استفاده از سیلیسیم برای بهبود آثار منفی تنش‌های غیرزیستی از جمله تنش‌های شوری و خشکی روی گیاهان گزارش شده است (Alzahrani *et al*., 2018). سیلیسیم ممکن است با بهبود پایداری جذب پتاسیم در مقایسه با سدیم، به جذب عناصر غذایی، فعالیت آنزیم‌های مهارکننده آنتی‌اکسیدانی و بهبود کارایی

فتوسنتزی کمک کند و در نهایت منجر به افزایش تحمل شوری در گیاه شود (Garg and Bhandari, 2016; Rios *et al*., 2017; Al-Garni *et al*., 2019). به‌طور کلی، سیلیسیم می‌تواند رشد گیاه را تحت تنش شوری با تنظیم اسمزی و تعادل جذب و توزیع عناصر غذایی بهبود بخشد (Rahmani *et al*., 2023). از سوی دیگر شواهد قابل توجهی نشان می‌دهد که قارچ مایکوریزا آربوسکولار سبب افزایش تحمل گیاهان میزبان در شرایط تنش خشکی و یا شوری می‌شود (Ben Laouane *et al*., 2019). همزیستی قارچ‌های میکوریزا آربوسکولار با گیاهان ممکن است سبب شود که اثرات مضر ناشی از تنش شوری را از طریق افزایش کارایی فتوسنتزی و اجتناب از جذب سدیم بیش از حد توسط گیاه کاهش دهد (Parvin *et al*., 2020). همچنین، در سال‌های اخیر نقش مثبت بیوچار نیز در کاهش اثرات بازدارندگی تنش شوری نشان داده شده و ممکن است به‌عنوان یک اصلاح کننده در خاک‌های شور برای بهبود رشد گیاه مفید باشد (Zhang *et al*., 2019). گزارش شده است که بیوچار با کاهش غلظت سدیم، بهبود جذب عناصر غذایی و تنظیم هورمون‌های رشد اثرات منفی تنش شوری را کاهش داده است (Farhangi-Abriz and Torabian, 2018).

شوری خاک یکی از چالش‌های گسترده و عمده عصر اخیر است که می‌تواند مانع امنیت غذایی جهانی و پایداری زیست‌محیطی شود. همچنین گسترش زمین‌های شور در آینده نزدیک سبب کاهش بهره‌وری کشاورزی در سراسر جهان خواهد شد. استفاده از فن‌آوری‌های جدید کشاورزی برای بهبود کمیت و کیفیت بذرهای تولیدی در خاک‌های متاثر از تنش شوری فرضیه اصلی این پژوهش بود. منابع اصلاح کننده خاک از جمله بیوچار، قارچ مایکوریزا و سیلیسیم احتمالاً سبب بهبود رشد گیاه تحت تنش شوری می‌شوند و در نتیجه روی کیفیت بذر تولیدی موثر هستند. بنابراین، هدف از اجرای این تحقیق بررسی کیفیت بذرهای حاصل از ارقام ذرت با استفاده از بیوچار، قارچ مایکوریزا و محلول‌پاشی سیلیسیم در شرایط خاک شور بود.

## مواد و روش‌ها

### تیمارها و اجرای آزمایش

آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در سال ۱۳۹۹ در مزرعه تحقیقاتی در شهرستان فسا، استان فارس، با طول جغرافیایی ′۱۵ °۵۴ شرقی و عرض جغرافیایی ′۲۴ °۲۹ شمالی با ارتفاع ۱۳۷۰ متر از سطح دریا انجام شد. خاک مزرعه پژوهشی با هدایت الکتریکی ۶/۰۱ دسی‌زیمنس بر متر در دسته خاک‌های شور قرار می‌گیرد. عامل‌های آزمایشی، سه رقم ذرت شامل رقم دیررس ۷۰۴، میان‌رس ۶۰۴ و زودرس ۳۷۰ و منابع اصلاح کننده خاک در هشت سطح شامل شاهد، بیوچار، قارچ مایکوریزا آربوسکولار، محلول‌پاشی سیلیسیم، بیوچار+ قارچ مایکوریزا، بیوچار+ محلول‌پاشی سیلیسیم، قارچ مایکوریزا + محلول‌پاشی سیلیسیم و بیوچار +قارچ مایکوریزا +محلول‌پاشی سیلیسیم بود. برای تیمار بیوچار از بیوچار کلزا به‌میزان چهار تن در هکتار، برای مایکوریزا، مقدار ۵ گرم خاک حاوی ۱۲۰ عدد قارچ در هر گرم خاک به‌ازای هر بوته و برای سیلیسیم محلول ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر مورد استفاده قرار گرفت.

### نحوه اجرای آزمایش و کاربرد تیمارها

پیش از اجرای آزمایش، نمونه‌برداری خاک از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری انجام و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک اندازه‌گیری شد (جدول ۱). قبل از کاشت، عملیات خاک‌ورزی اولیه شامل شخم، دیسک و آماده‌سازی بستر کشت انجام شد. سپس کرت‌هایی با چهار خط کاشت به طول سه متر با فاصله ردیف‌های ۵۰ سانتی‌متری و فاصله بین بوته‌ها روی ردیف ۱۵ سانتی‌متری تهیه و کشت بذرها با تراکم توصیه شده ۱۳۰ هزار بوته در هکتار (Niknam and Faraji, 2014) انجام شد. فاصله بین کرت‌ها از یکدیگر یک متر و فاصله بین بلوک‌ها از یکدیگر دو متر در نظر گرفته شد. کوددهی بر اساس نتایج آزمون خاک انجام شد. فسفر از منبع سوپر فسفات تریپل و پتاسیم از منبع سولفات پتاسیم هر یک به‌میزان ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار پیش از کشت به زمین داده شد. کود نیتروژن نیز از منبع اوره به‌میزان ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار (۴۶ درصد نیتروژن) در سه مرحله (یک سوم قبل از کاشت، یک سوم قبل از ساقه‌دهی و یک سوم قبل از گل‌دهی) به زمین داده شد. آبیاری به صورت جوی و پشته‌ای پس از ۲۵ درصد تخلیه رطوبتی انجام شد. وجین علف‌های هرز در طول فصل رشد به‌صورت دستی و در چند نوبت انجام گرفت.

جدول ۱- نتایج تجزیه و تحلیل فیزیکی و شیمیایی خاک محل اجرای آزمایش.

Table 1. The results of the chemical and physical analysis of the soil at the experiment location.

| Texture | EC ($dS.m^{-1}$) | pH | Cu | Fe | Zn | Mn | K | P | N (%) | Organic carbon (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | ($mg.kg^{-1}$) | | | | | | | |
| loam | 6.01 | 7.92 | 0.22 | 0.95 | 0.83 | 1.0 | 215 | 6.0 | 0.1 | 0.56 |

کاربرد تیمارهای مورد بررسی پس از آماده‌سازی زمین برای کاشت انجام شد. در تیمارهای با ترکیب آلی، بیوچار کلزا به‌میزان ۴ تن در هکتار با خاک مخلوط شد. گونه‌های مایکوریزا آربوسکولار (*Glomus intraradices*) استفاده شده در این پژوهش از طریق کاشت با گیاه سورگوم و با اسپورهای قارچ مایکوریزا بخش تحقیقات بیولوژی خاک مؤسسه تحقیقات خاک و آب کشور تهیه شد. زادمایه مایکوریزایی به صورت مخلوطی از اسپور، هیف، ریشه‌های تلقیح شده گیاه سورگوم و ماسه بادی بود و در هر گرم خاک تعداد ۱۲۰ اسپور برای قارچ مایکوریزا وجود داشت. هنگام کاشت جهت اعمال تیمار مربوط به مایکوریزا، مقدار ۵ گرم از خاک حاوی مایکوریزا به‌ازای هر بوته استفاده شد (Attarzadeh *et al*., 2019). محلول‌پاشی سیلیسیم با استفاده از سورفکتانت غیر یونی دامون (Volta-80) با شناسه محصول Gp-24905 تهیه شده از شرکت نوتریکا به‌میزان ۰/۰۵ درصد انجام شد (Kumar *et al*., 2018; Shahzad *et al*., 2022). محلول‌پاشی سیلیسیم در سه مرحله شروع سه تا چهار برگی، شروع گلدهی و شکل‌گیری بلال با استفاده از سمپاش دستی شرکت توان موتور با فشار ۲۰ کیلو پاسکال انجام شد.

بذرهای استفاده شده در این آزمایش، بذرهای طبقه مادری بودند که برای تولید بذرهای گواهی‌شده در مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس تهیه شدند. بذرهای ذرت در خردادماه به‌صورت هیرم‌کاری با دست کشت شدند. ابتدا به‌منظور اطمینان از تراکم مطلوب مزرعه، سه عدد بذر در هر کپه به‌صورت دستی کشت شد و پس از مرحله دو برگی در مزرعه، یک بوته در هر کپه باقی گذاشته شد. برای انجام بهتر گرده‌افشانی و تولید بذر بیش‌تر، پایه‌های پدری در دو ردیف حاشیه و پایه‌های مادری در دو ردیف وسط کشت شدند. برای محافظت از گرده‌های غریبه و گرده‌افشانی ناخواسته، بلال‌های پایه مادری بلافاصله بعد از ظهور با پاکت پوشانده شد. برای انجام تلاقی‌ها، گل‌های نر پایه‌های پدری همزمان با شروع گرده‌افشانی، پاکت‌گذاری شدند و سپس پاکت‌های حاوی گرده‌ها روی بلال‌های پایه‌های مادری قرار گرفتند تا لقاح به‌طور کامل صورت گیرد. برای حفاظت بلال‌ها، پاکت‌ها تا پایان دوره گرده‌افشانی روی پایه‌های مادری حفظ شدند (Rahbari *et al*., 2022). در پایان پس از رسیدگی کامل، بذرها جهت اندازه‌گیری صفات لازم برداشت شدند.

### نمونه‌برداری و اندازه‌گیری صفات

برای اندازه‌گیری صفات مورد مطالعه، تعداد ۲۵ عدد بذر سالم به‌طور تصادفی از هر تیمار انتخاب شد. بذرها با محلول هیپوکلریت سدیم پنج درصد به‌مدت ۳۰ ثانیه ضدعفونی و سپس درون پتری‌دیش‌های ۹۰ میلی‌متری استریل شده با کاغذ صافی قرار گرفتند. به هر پتری‌دیش، پنج میلی‌لیتر آب مقطر استریل اضافه شد. بر اساس قوانین انجمن بین‌المللی آزمون بذر، پتری‌ها به‌مدت ۱۰ روز در داخل ژرمیناتور با شرایط دمایی ۲۵ درجه سلسیوس قرار گرفتند (Rahbari *et al*., 2022).

### غلظت سدیم، پتاسیم و نسبت سدیم به پتاسیم

برای اندازه‌گیری این عناصر، ابتدا گیاهچه‌های به‌دست آمده از بذرها با آب مقطر کاملاً شسته و به‌مدت ۴۸ ساعت در آون در دمای ۷۰ درجه سلسیوس خشک شدند. سپس ۰/۵ گرم از گیاهچه‌های خشک شده، در کوره در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس تبدیل به خاکستر شد. خاکستر حاصل عصاره‌گیری و میزان غلظت عناصر سدیم و پتاسیم توسط دستگاه فلیم‌فتومتر (مدل Jenway 7, German) قرائت و سپس اعداد به‌دست آمده با استفاده از نمودار حاصل از نمونه‌های استاندارد، متعادل‌سازی شدند. از تقسیم سدیم اندام هوایی به پتاسیم، نسبت سدیم به پتاسیم به‌دست آمد (Patterson *et al*., 1984).

### هدایت الکتریکی بذرها

برای اندازه‌گیری هدایت الکتریکی، سه نمونه تصادفی هر یک با ۱۰۰ بذر از هر تیمار انتخاب شد. ابتدا وزن نمونه‌ها اندازه‌گیری و نمونه‌ها به‌طور جداگانه در داخل ظرف‌های سربسته با فویل آلومینیومی حاوی ۱۰۰

میلی‌لیتر آب دوبار تقطیر به‌مدت ۲۴ ساعت غوطه‌ور شدند. ظرف دیگری حاوی آب دو بار تقطیر نیز به‌عنوان شاهد در نظر گرفته شد. بعد از مدت ۲۴ ساعت، هدایت الکتریکی محلول با واحد میکروزیمنس بر سانتی‌متر بر گرم با استفاده از دستگاه EC متر مدل Con110 ساخت شرکت Lovibond آلمان قرائت و سپس از تقسیم عدد EC متر بر وزن خشک ۱۰۰ عدد بذر میزان هدایت الکتریکی هر نمونه بذر محاسبه شد (ISTA. 2003).

**فعالیت آنزیم آلفا و بتا آمیلاز**

جهت اندازه‌گیری فعالیت آنزیم آلفا و بتا آمیلاز بذر جوانه زده شده، نمونه‌های بذری جوانه‌زده در بافر سدیم فسفات ۰/۰۲ مولار، اسیدیته ۶/۹ و ۰/۰۰۶ مولار برای آلفا آمیلاز و بافر سدیم استات ۰/۰۱۶ مولار، اسیدیته ۴/۸ برای بتا آمیلاز در هاون چینی ساییده و پس از آن با ۱۲۰۰۰ دور در دمای ۴-۲ درجه سلسیوس به مدت ۱۵ دقیقه سانتریفیوژ (مدل یونیور شرکت Hettich آلمان با ۴۰۰۰ دور در دقیقه) شدند. سپس از کاغذ صافی عبور داده شدند و محلول حاصل برای اندازه‌گیری آنزیم آلفا و بتا آمیلاز استفاده شد. مقدار ۰/۵ میلی‌لیتر عصاره آنزیمی در هر لوله آزمایش ریخته شده و پس از آن به هر لوله آزمایش ۰/۵ میلی‌لیتر نشاسته یک درصد افزوده شد. پس از سه دقیقه به میزان یک میلی‌لیتر شناساگر دی نیتروسالیسیلیک اسید (Dinitrosalicylic acid) با شناسه محصول ۴-۹۹-۶۰۹ که از شرکت مرک آلمان تهیه شده بود، به هر لوله آزمایش اضافه شد. همچنین برای تهیه نمونه شاهد عصاره آنزیمی حذف شد. لوله‌های آزمایش به مدت پنج دقیقه در دستگاه حمام آب گرم یا بن‌ماری (مدل WNB14 شرکت MEMMERT آلمان) قرار داده شدند. پس از سرد شدن در دمای اتاق، ۱۰ میلی‌لیتر آب مقطر به لوله‌های آزمایش افزوده شد. در نهایت میزان جذب با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر (مدل Vis 2100 شرکت UNICO آمریکا) در ۵۴۰ نانومتر اندازه‌گیری شد (Bernfeld, 1955).

**شاخص‌های جوانه‌زنی و رشد**

تعداد بذرهای جوانه‌زده هر روز شمارش شد. بذری جوانه‌زده تلقی شد که ریشه‌چه آن دو میلی‌متر از پوسته بذر خارج شده بود. طول ریشه‌چه و ساقه‌چه با خط‌کش بر حسب میلی‌متر اندازه‌گیری شد. وزن خشک گیاهچه شامل وزن خشک ریشه‌چه و ساقه‌چه، پس از قرارگیری در آون با دمای ۷۵ درجه سلسیوس به‌مدت ۲۴ ساعت تعیین شد. در پایان درصد و سرعت جوانه‌زنی به‌ترتیب با استفاده از روابط (۱) و (۲) محاسبه شدند (Maguire, 1962; Nichols and Heydecker, 1968):

$$GP=\frac{NG}{NT}\times 100 \qquad (۱)$$

$$RS=\sum_{i=1}^{n}\frac{S_i}{D_i} \qquad (۲)$$

در این روابط، GP درصد جوانه‌زنی، NG تعداد کل بذرهای جوانه‌زده، NT تعداد کل بذرهای مورد مطالعه، RS سرعت جوانه‌زنی، $S_i$ تعداد بذرهای جوانه‌زده در روز iام، $D_i$ روز iام، و n تعداد کل روزهای مورد مطالعه است.

شاخص بنیه بذر (SV) نیز بر اساس درصد جوانه‌زنی (GP) و طول گیاهچه (SL) با استفاده از رابطه (۳) محاسبه شد (Copeland and McDonald, 2001):

$$SV=\frac{GP\times SL}{100} \qquad (۳)$$

برای تعیین وزن هزار دانه ۱۰۰۰ بذر به‌طور تصادفی از هر کرت جدا و وزن آن بر حسب گرم اندازه‌گیری شد.

**تجزیه و تحلیل آماری**

تجزیه واریانس داده‌ها با نرم‌افزار آماری SAS نسخه ۹/۱ انجام شد. مقایسه میانگین داده‌ها نیز بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد انجام شد. در صورت معنی‌دار بودن برهم‌کنش بین عامل‌ها، برش‌دهی عامل‌ها با دستور Slice انجام و سپس مقایسه میانگین بین سطوح هر فاکتور در هر سطح فاکتور دیگر با استفاده از رویه LSmeans نرم‌افزار SAS انجام شد.

## نتایج و بحث

**غلظت سدیم، پتاسیم و نسبت سدیم به پتاسیم گیاهچه**

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر رقم و منابع اصلاح کننده بر غلظت پتاسیم و برهم‌کنش رقم × منابع اصلاح کننده بر غلظت سدیم و نسبت سدیم به پتاسیم معنی‌دار بود (جدول ۲). در رقم ۷۰۴، غلظت سدیم گیاهچه در تیمار تلفیق بیوچار+ مایکوریزا+ سیلیسیم در مقایسه با شاهد کاهش ۳۱ درصدی نشان داد (جدول ۳). همچنین تلفیق بیوچار+ مایکوریزا، بیوچار+ سیلیسیم و

مایکوریزا+ سیلیسیم سبب کاهش معنی‌دار سدیم در مقایسه با استفاده جداگانه این ترکیبات شد. در رقم ۶۰۴، تیمارهای منابع اصلاح کننده به‌تنهایی و تلفیق آنها با هم سبب کاهش غلظت سدیم گیاهچه در مقایسه با شاهد شد. در رقم ۳۷۰، تلفیق بیوچار+ مایکوریزا+ سیلیسیم سبب کاهش ۳۴ درصدی سدیم گیاهچه در مقایسه با شاهد شد، اما استفاده از مایکوریزا نسبت به شاهد تفاوت معنی‌داری نداشت (جدول ۳). همچنین تلفیق بیوچار+ مایکوریزا، بیوچار+ سیلیسیم و مایکوریزا+ سیلیسیم و مصرف جداگانه بیوچار و سیلیسیم در سطح پایین‌تر توانست سبب کاهش سدیم گیاهچه ذرت شود.

محتوی پتاسیم گیاهچه در رقم ۷۰۴ در مقایسه با رقم ۶۰۴ افزایش معنی‌داری نشان داد، اما نسبت به رقم ۳۷۰ تفاوت معنی‌داری نداشت (جدول ۴). از سوی دیگر غلظت پتاسیم گیاهچه در تیمار تلفیق بیوچار+ مایکوریزا+ سیلیسیم در مقایسه با شاهد افزایش ۲۹ درصدی نشان داد (جدول ۵). همچنین در سطح پایین‌تر تلفیق بیوچار+ مایکوریزا، بیوچار+ سیلیسیم و مایکوریزا+ سیلیسیم سبب افزایش معنی‌دار پتاسیم اندام هوایی نسبت به شاهد شد. علاوه بر این، تیمار تلفیق بیوچار+ مایکوریزا+ سیلیسیم سبب کاهش نسبت سدیم به پتاسیم در ارقام مختلف شد، اگرچه در رقم ۷۰۴ نسبت سدیم به پتاسیم در تیمار تلفیق بیوچار+ مایکوریزا+ سیلیسیم با بیوچار+ مایکوریزا، بیوچار+سیلیسیم و مایکوریزا+سیلیسیم تفاوت معنی‌داری نشان نداد (جدول ۳). همچنین، تیمار تلفیق سه‌گانه بیوچار+مایکوریزا+سیلیسیم در مقایسه با مصرف جداگانه و یا مصرف دو گانه آنها، سبب کاهش بیش‌تر نسبت سدیم به پتاسیم ارقام ۶۰۴ و ۳۷۰ شد (جدول ۳).

از میان سازوکارهای تحمل به شوری در گیاهان، قابلیت جذب کم‌تر سدیم توسط اندام‌های گیاه در سطوح گیاه، سلول و مولکول بررسی شده است (Kordrostami and Rabiei, 2019). شوری خاک به‌دلیل دخالت در دسترسی به عناصر غذایی و رقابت برای جذب آن، منجر به عدم تعادل تغذیه‌ای می‌شود (Wu *et al*., 2018). یون‌های سدیم موجود در خاک شور با افزایش فشار اسمزی محلول خاک روی دسترسی و جذب عناصر غذایی توسط ریشه تأثیر می‌گذارند (Ndiate *et al*., 2021). نتایج آزمایش حاضر نشان داد که کم‌ترین تجمع یون سدیم و نسبت سدیم/پتاسیم در تلفیق بیوچار+ مایکوریزا+ سیلیسیم و یا مصرف دوگانه آنها مشاهده شد. وجود بیوچار به گیاه کمک می‌کند تا با جذب پتاسیم بیش‌تر، جذب سدیم را محدود کند (Moradi *et al*., 2019). کاهش نسبت سدیم به پتاسیم با محلول‌پاشی سیلیسیم احتمالاً مرتبط با افزایش فعالیت پمپ‌های $H\text{-}ATP_{ase}$ غشای پلاسمایی ریشه باشد (Dos Santos Sarah *et al*., 2021). سیلیسیم با تنظیم بیان ژن‌های دخیل در جذب پتاسیم باعث افزایش انتقال پتاسیم و کاهش انتقال سدیم به قسمت‌های مختلف گیاه مثل برگ و بذر شد که با یافته‌های قبلی محققان (Shen *et al*., 2022) مطابقت دارد. بنابراین وجود منابع اصلاح کننده مثل سیلیسیم، همراه با تلقیح گیاه با مایکوریزا می‌تواند تا حدودی جذب پتاسیم، تنظیم اسمزی و هموستازی یونی تحت تنش شوری را افزایش دهد (Pan *et al*., 2020; Etesami and Alikhani, 2022). استفاده از منابع اصلاح کننده مانند بیوچار و مایکوریزا، دسترسی به عناصر غذایی خاک و رشد را بهبود می‌بخشند (Kazemi *et al*., 2019).

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس اثر رقم و منابع اصلاح کننده خاک بر بر صفات مورد مطالعه ذرت در مراحل جوانه‌زنی و رشد گیاهچه

Table 2. Analysis of variance for the effects of variety and modifier sources on the studied traits of maize at germination and seedling stages

| Source of variation | df | Mean squares | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Sodium | Potassium | Sodium to potassium | Electrical conductivity | Alpha-amylase | Beta-amylase |
| Replication | 2 | 20.52$^{**}$ | 0.164$^{ns}$ | 0.100$^{ns}$ | 37.82$^{**}$ | 0.006$^{**}$ | 0.0006$^{ns}$ |
| Variety (V) | 2 | 6.73$^{ns}$ | 2.503$^{*}$ | 0.076$^{ns}$ | 56.06$^{**}$ | 0.003$^{**}$ | 0.011$^{**}$ |
| Modifier sources (M) | 7 | 86.67$^{**}$ | 8.678$^{**}$ | 1.674$^{**}$ | 82.58$^{**}$ | 0.020$^{**}$ | 0.011$^{**}$ |
| V × M | 14 | 18.30$^{*}$ | 0.367$^{ns}$ | 1.031$^{**}$ | 37.31$^{**}$ | 0.0004$^{ns}$ | 0.0002$^{ns}$ |
| Error | 46 | 2.88 | 0.734 | 0.043 | 6.42 | 0.0005 | 0.0008 |
| CV (%) | _ | 7.0 | 7.1 | 10.1 | 9.6 | 6.4 | 9.7 |

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

جدول ۳- مقایسه میانگین برهم‌کنش رقم و منابع اصلاح کننده خاک بر صفات مورد مطالعه ذرت در مراحل جوانه‌زنی و رشد گیاهچه

Table 3. Mean comparison of interaction of variety and soil modifier sources on the studied traits of maize at germination and seedling stages

| Variety | Modifier sources | Sodium ($mg.g^{-1}$ dw) | Sodium to potassium ratio | Electrical conductivity ($dS.m^{-1}$) | Germination percentage | Seedling dry weight (g) | Seed vigor |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 704 | Control | 29.56 a | 2.82 a | 38.83 a | 67.10 d | 4.69 d | 3.71 e |
| | B | 24.73 c | 1.90 cd | 36.83 a | 72.96 c | 4.90 cd | 4.28 d |
| | M | 27.16 b | 2.45 ab | 37.06 a | 72.56 c | 4.86 cd | 4.25 d |
| | S | 26.56 b | 2.21 bc | 35.00 ab | 73.46 c | 5.07 abc | 4.33 cd |
| | B + M | 22.53 d | 1.74 cd | 34.93 ab | 76.36 bc | 4.98 bc | 4.62 bc |
| | B + S | 22.56 d | 1.76 d | 31.63 bc | 79.10 ab | 5.18 ab | 4.87 b |
| | M + S | 24.23 cd | 1.86 cd | 31.83 bc | 79.53 ab | 5.16 ab | 4.95 b |
| | B + M + S | 20.36 e | 1.50 d | 29.13 c | 83.00 a | 5.25 a | 5.31 a |
| 604 | Control | 29.63 a | 2.95 a | 37.96 a | 74.66 d | 4.40 d | 3.96 c |
| | B | 24.73 bcd | 2.24 bc | 35.80 ab | 78.56 c | 4.60 cd | 4.36 b |
| | M | 27.16 ab | 2.53 b | 35.96 ab | 77.70 cd | 4.61 cd | 4.36 b |
| | S | 25.36 bc | 2.14 bcd | 34.80 abc | 77.30 cd | 4.66 bc | 4.41 b |
| | B + M | 23.56 cd | 2.04 cd | 34.16 bc | 80.30 bc | 4.66 bc | 4.59 b |
| | B + S | 21.96 d | 1.75 de | 31.96 cd | 82.30 ab | 4.90 a | 5.05 a |
| | M + S | 23.33 cd | 1.87 cd | 30.50 de | 84.16 a | 4.86 ab | 5.07 a |
| | B + M + S | 18.06 e | 1.36 e | 27.60 e | 84.43 a | 5.05 a | 5.11 a |
| 370 | Control | 28.33 a | 2.68 a | 36.53 a | 68.23 d | 4.45 e | 3.68 d |
| | B | 24.43 bc | 2.06 b | 32.10 ab | 75.43 c | 4.55 de | 4.27 c |
| | M | 25.93 ab | 2.32 b | 31.60 ab | 77.30 c | 4.62 cd | 4.46 bc |
| | S | 25.20 b | 2.08 b | 32.63 ab | 80.30 bc | 4.60 d | 4.52 bc |
| | B + M | 23.30 bc | 2.08 b | 31.06 ab | 80.50 bc | 4.69 bcd | 4.64 b |
| | B + S | 21.83 c | 1.74 c | 30.46 ab | 85.46 ab | 4.77 abc | 5.22 a |
| | M + S | 21.60 c | 1.65 c | 30.45 ab | 85.76 ab | 4.81 ab | 5.21 a |
| | B + M + S | 18.60 d | 1.38 d | 27.02 b | 87.36 a | 4.89 a | 5.45 a |

Means followed by similar letter in each column are not significantly different by Duncan's test at 5% probability level.
B, biochar; M, Mycorrhiza; S, Silicon.

جدول ۴- مقایسه میانگین اثر رقم بر صفات مورد مطالعه ذرت در مراحل جوانه‌زنی و رشد گیاهچه

Table 4. Mean comparison of the effect of variety on the studied traits of maize at germination and seedling stages

| Variety | Potassium ($mg.g^{-1}$ dw) | Alpha- amylase ($\mu mol.ml^{-1}.min^{-1}$) | Beta- amylase ($\mu mol.ml^{-1}.min^{-1}$) | Germination rate (per day) | Root length (cm) | Stem length (cm) | 1000-grain weight (g) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 704 | 12.32 a | 0.365 a | 0.503 b | 0.431 a | 6.19 a | 5.83 a | 255.0 a |
| 604 | 11.67 b | 0.354 a | 0.524 a | 0.400 b | 5.81 b | 5.71 b | 252.9 a |
| 370 | 12.01 ab | 0.340 b | 0.480 c | 0.379 c | 5.93 b | 5.73 ab | 241.0 b |

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

**هدایت الکتریکی بذر**

نتایج این آزمایش نشان داد که اثر رقم و منابع اصلاح کننده خاک و نیز برهم‌کنش بین آنها بر هدایت الکتریکی بذر ذرت معنی‌دار بود (جدول ۲). در رقم ۷۰۴، هدایت الکتریکی بذر در تیمار تلفیق بیوچار+مایکوریزا+سیلیسیم نسبت به شاهد کاهش ۲۵ درصدی نشان داد (جدول ۳). همچنین تلفیق بیوچار+ سیلیسیم و مایکوریزا+ سیلیسیم سبب کاهش ۱۸ درصدی هدایت الکتریکی بذر نسبت به تیمار شاهد شد. در رقم ۶۰۴، کاربرد جداگانه منابع اصلاح کننده نتوانست سبب کاهش معنی‌دار هدایت الکتریکی بذر شود، اما تلفیق آنها سبب کاهش هدایت الکتریکی بذر در مقایسه با شاهد شد. در رقم ۳۷۰، تلفیق بیوچار+ مایکوریزا+ سیلیسیم سبب کاهش ۲۶ درصدی هدایت الکتریکی بذر در مقایسه با شاهد شد، اما بقیه تیمارها نسبت به شاهد تفاوت معنی‌داری نداشتند (جدول ۳).

به‌طور کلی، استفاده از منابع اصلاح کننده به‌تنهایی تاثیری روی هدایت الکتریکی بذر ذرت نداشت، به‌طوری که عمدتاً نسبت به شاهد و یا ترکیب دو منبع اصلاح کننده یک گروه بهتر از شاهد بود، اما ترکیب هر سه منبع اصلاح کننده تاثیر مثبت و معنی‌داری بر کیفیت بذر ذرت

نشان داد. بالا بودن نشت‌پذیری غشای سلولی به‌دلیل افزایش پراکسیداسیون لیپیدها با تولید رادیکال‌های آزاد اکسیژن انجام می‌گیرد (Mangal *et al*., 2023). تنش‌های محیطی از جمله تنش شوری سبب تغییر پیوندهای هیدروژنی و دی‌سولفیدی در پروتئین‌ها و چربی‌ها شده و ساختار غشای سلولی بذر را تحت تاثیر قرار می‌دهد. در نتیجه موجب تخریب ساختار غشای بذر و افزایش هدایت الکتریکی می‌شود (Bakhshandeh and Jamali, 2020). استفاده از سیلیسیم همراه با قارچ مایکوریزا با کاهش نسبت سدیم به پتاسیم و تنظیم فرآیندهای فیزیولوژیک بذر سبب بهبود رشد گیاه و کاهش اثرات منفی تنش شوری می‌شود (Garg *et al*., 2020). از سوی دیگر، استفاده از بیوچار در جذب مواد مغذی و آب توسط گیاه تاثیر دارد و بنابراین سبب افزایش کمیت و کیفیت بذرهای تولیدی تحت شرایط تنش شوری می‌شود (Soothar *et al*., 2021; Ghassemi-Golezani and Abdoli, 2023). گزارش شده است که بیوچار و قارچ مایکوریزا با القای بیان برخی ژن‌های خاص و تعادل در هورمون‌های گیاهی سبب بهبود جذب آب و در نتیجه بهبود بذرهای تولیدی می‌شود (Yang *et al*., 2021; Romero-Muñoz *et al*., 2022).

## فعالیت آنزیم‌های آلفا و بتا آمیلاز

اثر رقم و منابع اصلاح کننده بر فعالیت آنزیم‌های آلفا و بتا آمیلاز بذر ذرت معنی‌دار بود، اما برهم‌کنش آنها بر این آنزیم‌ها معنی‌دار نبود (جدول ۲). آنزیم آلفا آمیلاز در دو رقم ۷۰۴ و ۶۰۴ نسبت به رقم ۳۷۰ افزایش معنی‌داری نشان داد (جدول ۴). بیش‌ترین مقدار بتا آمیلاز در رقم ۶۰۴ مشاهده شد. تلفیق بیوچار+ مایکوریزا+ سیلیسیم موجب افزایش ۵۷ و ۲۵ درصدی آنزیم‌های آلفا و بتا آمیلاز در مقایسه با شاهد شد. همچنین تلفیق بیوچار+ سیلیسیم و مایکوریزا+سیلیسیم سبب افزایش معنی‌دار هر دو آنزیم نسبت به کاربرد جداگانه آنها شد (جدول ۵).

آنزیم‌های موثر در جوانه‌زنی بذر از جمله آنزیم‌های آلفا و بتا آمیلاز تحت تاثیر رقم و منابع اصلاح کننده قرار گرفت. در شرایط تنش شوری، افزایش نشت‌پذیری غشای یاخته بر سوخت و ساز یاخته آثار مخربی دارد و سبب تغییر ماهیت و فعالیت آنزیم‌ها می‌شود (Morales-Cedillo *et al*., 2015). بنابراین افزایش این آنزیم‌ها در این آزمایش، احتمالاً به‌دلیل کاهش هدایت الکتریکی و کاهش تخریب ساختار یاخته‌ای به‌دلیل تاثیر منابع اصلاح کننده باشد. گزارش‌های قبلی نشان می‌دهند که بخش زیادی از واکنش‌های متابولیک سلولی بذر گیاهان تحت تأثیر تلفیق بیوچار، مایکوریزا و سیلیسیم قرار گرفته و در نهایت روی کیفیت بذر تولیدی تحت شرایط تنش‌های غیر زنده موثر است (Seleiman *et al*., 2019; Alam *et al*., 2020). همچنین تنظیم پیام‌های هورمونی با استفاده از منابع اصلاح کننده مانند بیوچار ممکن است بر کارکرد فعالیت متابولیکی بذر گیاه نقش داشته باشد (Soothar *et al*., 2021). فعالیت آنزیم‌های آلفا و بتا آمیلاز بخشی از فعالیت متابولیکی در فرایند جوانه‌زنی هستند و کاهش آنها می‌تواند باعث کاهش درصد و سرعت جوانه‌زنی بذر شود (Gimbi and Kitabatake, 2002).

جدول ۵- مقایسه میانگین اثر منابع اصلاح کننده بر صفات مورد مطالعه ذرت در مراحل جوانه‌زنی و رشد گیاهچه

Table 5. Mean comparison of the effect of modifier sources on the studied traits of maize at germination and seedling stages

| Modifier sources | Potassium ($mg.g^{-1}$ dw) | Alpha- amylase ($\mu mol.ml^{-1}.min^{-1}$) | Beta- amylase ($\mu mol.ml^{-1}.min^{-1}$) | Germination rate (per day) | Root length (cm) | Stem length (cm) | 1000-grain weight (g) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Control | 10.41 e | 0.268 f | 0.446 e | 0.326 f | 5.37 c | 5.44 c | 241.6 c |
| B | 11.96 bc | 0.324 e | 0.483 cd | 0.368 e | 5.75 b | 5.63 b | 250.0 b |
| M | 11.04 de | 0.327 de | 0.471 de | 0.378 de | 5.84 b | 5.66 b | 244.3 c |
| S | 12.00 bc | 0.347 cd | 0.495 cd | 0.412 bc | 5.91 b | 5.59 bc | 244.2 c |
| B + M | 11.68 cd | 0.360 c | 0.506 bc | 0.403 cd | 5.96 b | 5.72 b | 255.3 b |
| B + S | 12.64 ab | 0.385 b | 0.526 b | 0.438 ab | 6.25 a | 5.96 a | 250.1 b |
| M + S | 12.84 ab | 0.390 b | 0.534 ab | 0.437 ab | 6.28 a | 5.94 a | 252.3 b |
| B + M + S | 13.44 a | 0.422 a | 0.556 a | 0.462 a | 6.46 a | 6.10 a | 262.6 a |

Means followed by similar letter in each column are not significantly different by Duncan's test at 5% probability level.
B, biochar; M, Mycorrhiza; S, Silicon.

**درصد و سرعت جوانه‌زنی**

درصد و سرعت جوانه‌زنی تحت تاثیر اثر رقم و منابع اصلاح کننده قرار گرفت. همچنین اثر برهم‌کنش رقم و منابع اصلاح کننده درصد جوانه‌زنی را به‌طور معنی‌داری تحت تاثیر قرار داد، اما روی سرعت جوانه‌زنی معنی‌دار نبود (جدول ۶). تیمارهای تلفیق بیوچار+ مایکوریزا+ سیلیسیم، بیوچار+ سیلیسیم و مایکوریزا+ سیلیسیم سبب افزایش معنی‌دار درصد جوانه‌زنی در هر سه رقم ذرت شد (جدول ۳). در ارقام ۷۰۴ و ۳۷۰، کاربرد جداگانه منابع اصلاح کننده در سطوح پایین‌تر سبب افزایش معنی‌دار درصد جوانه‌زنی شد، اما مصرف جداگانه مایکوریزا و سیلیسیم تاثیر معنی‌داری روی درصد جوانه‌زنی رقم ۶۰۴ نسبت به شاهد نداشت (جدول ۳). سرعت جوانه‌زنی بذرهای ذرت در ارقام ۳۷۰ و ۶۰۴ در مقایسه با رقم ۷۰۴ افزایش معنی‌داری یافت (جدول ۴). از سوی دیگر تیمارهای تلفیق بیوچار+ مایکوریزا+ سیلیسیم، بیوچار+ سیلیسیم و مایکوریزا+ سیلیسیم سبب افزایش معنی‌دار سرعت جوانه‌زنی در مقایسه با شاهد شد (جدول ۵). همچنین مصرف جداگانه منابع اصلاح کننده در سطح پایین‌تر توانست سبب افزایش سرعت جوانه‌زنی بذرهای ذرت شود.

کیفیت بذر و قدرت جوانه‌زنی توسط ویژگی‌های توارثی و محیط گیاه مادری که بذر در آن توسعه یافته است، تعیین می‌شود (Rajjou *et al*., 2012). شرایط نامطلوب محیطی منجر به کاهش قدرت جنین و در نهایت کاهش درصد و سرعت جوانه‌زنی بذر در ارقام مختلف می‌شود (Dornbos, 2020). همچنین اختلاف در تحمل ارقام متفاوت در مواجه شدن با شرایط نامساعد محیطی از جمله دلایلی است که گزارش شده است (Kheybari *et al*., 2019). گزارش شده است که واکنش متفاوت بذر گیاهان در شرایط تنش‌های مختلف محیطی مثل شوری بستگی به عوامل مختلفی از جمله تغییر در ویژگی‌های فیزیولوژیک دارد (Li *et al*., 2010). بنابراین از جمله دلایل اثرگذار در کاهش شاخص‌های جوانه‌زنی، کاهش سنتز هورمون‌ها و اختلال در آنزیم‌های موثر در جوانه‌زنی است (Miransari and Smith, 2014). سیلیسیم و بیوچار برای فعال کردن سیستم دفاعی گیاه در برابر تنش‌های محیطی اهمیت به‌سزایی دارند (Seleiman *et al*., 2019)، از سوی دیگر هدایت روزنه‌ای، حرکت آب از ریشه به اندام هوایی و جذب عناصر غذایی تحت تاثیر مثبت بیوچار قرار می‌گیرد (Liu *et al*., 2021). همچنین گزارش شده است که استفاده از مایکوریزا به‌طور قابل توجهی باعث افزایش بهبود رشد گیاه و شاخص جوانه‌زنی بذر تولیدی می‌شود (Attarzadeh *et al*., 2019).

**شاخص‌های رشدی، بنیه بذر و وزن هزار دانه**

طول ریشه‌چه، ساقه‌چه، وزن خشک گیاهچه تحت تاثیر رقم و منابع اصلاح کننده قرار گرفت (جدول ۶). همچنین اثر برهم‌کنش رقم و منابع اصلاح کننده وزن خشک گیاهچه را به‌طور معنی‌داری تحت تاثیر قرار داد، اما روی طول ریشه‌چه و ساقه‌چه معنی‌دار نبود (جدول ۶). بیش‌ترین طول ریشه‌چه و ساقه‌چه بذر ذرت در رقم ۷۰۴ مشاهده شد (جدول ۴). تلفیق بیوچار+ مایکوریزا+ سیلیسیم، سبب افزایش معنی‌دار طول ریشه‌چه و ساقه‌چه بذر ذرت در مقایسه با شاهد شد، اما اختلاف معنی‌داری با تلفیق بیوچار+ سیلیسیم و مایکوریزا+ سیلیسیم نشان نداد (جدول ۵). همچنین مصرف جداگانه منابع اصلاح کننده در سطح پایین‌تر توانست سبب افزایش طول ریشه‌چه و ساقه‌چه بذر ذرت شود.

در رقم ۷۰۴، تیمارهای تلفیق بیوچار+ مایکوریزا+ سیلیسیم سبب افزایش وزن خشک گیاهچه در مقایسه با شاهد شد. همچنین مصرف جداگانه این تیمارها در سطح پایین‌تر توانست سبب افزایش وزن خشک گیاهچه در بذرهای حاصل از گیاه مادری ذرت تحت تنش شوری شود (جدول ۳). از سوی دیگر وزن خشک گیاهچه در رقم‌های ۶۰۴ و ۳۷۰ در تلفیق بیوچار+ مایکوریزا+ سیلیسیم در مقایسه با شاهد به‌ترتیب افزایش ۱۵ و ۱۰ درصدی نشان داد (جدول ۳). همچنین در این ارقام تیمارهای تلفیق بیوچار+ مایکوریزا+ سیلیسیم با تلفیق بیوچار+ سیلیسیم و مایکوریزا+سیلیسیم اختلاف معنی‌داری نشان نداد.

اثر رقم و منابع اصلاح کننده و برهم‌کنش آنها روی بنیه بذر نیز معنی‌دار بود (جدول ۶). در رقم ۷۰۴، تیمارهای تلفیق بیوچار+مایکوریزا+سیلیسیم سبب افزایش ۴۳ درصدی بنیه بذر در مقایسه با شاهد شد. همچنین مصرف جداگانه این تیمارها در سطح پایین‌تر سبب افزایش بنیه بذر ذرت شد (جدول ۳). در رقم ۶۰۴ و ۳۷۰، بیش‌ترین بنیه بذر در تیمارهای تلفیق بیوچار+مایکوریزا+ سیلیسیم، بیوچار+ سیلیسیم و مایکوریزا+ سیلیسیم مشاهده شد. سایر نتایج بیانگر آن است که مصرف به تنهایی این تیمارها بنیه بیش‌تری در بذرهای حاصل از

گیاه مادری ذرت تحت تنش شوری نسبت به شرایط شاهد نشان دادند.

وزن هزار دانه نیز تحت تاثیر رقم و منابع اصلاح کننده قرار گرفت، اما برهم‌کنش آنها بر وزن هزار دانه معنی‌دار نبود (جدول ۶). وزن هزار دانه در رقم ۷۰۴ نسبت به رقم ۳۷۰ افزایش ۶ درصدی نشان داد، اما نسبت به رقم ۶۰۴ تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد (جدول ۴). تلفیق بیوچار+ مایکوریزا+ سیلیسیم، سبب افزایش ۹ درصدی وزن هزار دانه در مقایسه با شاهد شد (جدول ۵). همچنین مصرف جداگانه بیوچار و مصرف دو گانه منابع اصلاح کننده در توانست سبب افزایش وزن هزار دانه ذرت در مقایسه با شاهد شود. کاهش صفات مرتبط با کیفیت بذر و کاهش وزن گیاهچه تحت تنش‌های محیطی، به‌دلیل کاهش انتقال مواد غذایی به جنین به‌دلیل خسارت به بخش‌های مختلف بذر و افزایش نفوذپذیری غشای سلولی است که منجر به ضعیف‌تر شدن گیاهچه‌ها می‌شود (Nikobin *et al*., 2009). تفاوت ژنتیکی ارقام مختلف در شرایط نامساعد محیطی در گیاه مادری باعث تغییر هدایت الکتریکی و فعالیت آنزیم‌های موثر در جوانه‌زنی بذر می‌شود که قابلیت تاثیرگذاری بر رشد گیاهچه را دارند (Sadeghi *et a*l., 2017). از سوی دیگر استفاده از سیلیسیم و بیوچار تحت تنش‌های محیطی به‌دلیل حفظ ظرفیت‌های سوخت و ساز و فعالیت‌های فیزیولوژیک تا حدودی نقش حفاظتی دارد (Raza *et al*., 2021; Shahzad *et al*., 2022). گزارش شده است که سیلیسیم می‌تواند از زوال ساختاری بذر و غشای سلولی در گونه‌های گیاهی که در معرض تنش شوری قرار گرفتند، جلوگیری کند (Haghighi *et al*., 2012). همزیستی با ترکیبات زیستی مثل قارچ مایکوریزا به‌همراه بیوچار می‌تواند به‌دلیل تاثیر روی تنظیم کننده‌های رشد نقش به‌سزایی در میزان فعالیت آنزیمی داشته باشد و بنابراین بنیه و کیفیت بذر را تحت تنش شوری تا حدودی بهبود می‌بخشد (Jabborova *et al*., 2021). همچنین تلفیق منابع اصلاح کننده با بهبود وضعیت جذب عناصر غذایی و توانایی بیش‌تر در افزایش تولید مواد فتوسنتزی سبب بهبود وزن هزار دانه می‌شود (Raza *et al*., 2021).

جدول ۶- نتایج تجزیه واریانس اثر رقم و منابع اصلاح کننده بر شاخص‌های جوانه‌زنی و رشد گیاهچه ذرت

Table 6. Analysis of variance for the effects of variety and modifier sources on germination indices and seedling growth of maize

| Source of variation | df | Germination percentage | Germination rate | Root length | Stem length | Seedling dry weight | Seed vigor | 1000-gGrain weight |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Replication | 2 | 97 $^{**}$ | 0.001 $^{ns}$ | 0.081 $^{ns}$ | 0.11 $^{*}$ | 0.018 $^{ns}$ | 0.03 $^{ns}$ | 364 $^{**}$ |
| Variety (V) | 2 | 169 $^{**}$ | 0.016 $^{**}$ | 0.90 $^{**}$ | 0.09 $^{*}$ | 0.805 $^{**}$ | 0.11 $^{**}$ | 1132 $^{**}$ |
| Modifier sources (M) | 7 | 207 $^{**}$ | 0.017 $^{**}$ | 1.08 $^{**}$ | 0.44 $^{**}$ | 0.283 $^{**}$ | 0.24 $^{**}$ | 423 $^{**}$ |
| V × M | 14 | 163 $^{**}$ | 0.0002 $^{ns}$ | 0.01 $^{ns}$ | 0.01 $^{ns}$ | 0.097 $^{*}$ | 0.13 $^{**}$ | 17 $^{ns}$ |
| Error | 46 | 19 | 0.001 | 0.05 | 0.03 | 0.013 | 0.069 | 51 |
| CV (%) | _ | 12.5 | 11.9 | 8.9 | 13.1 | 12.4 | 11.7 | 10.2 |

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

## نتیجه‌گیری کلی

با توجه به وجود تنش‌های مختلف محیطی، هنوز در دانش تولید بذر در زمین‌های نسبتا شور در مقایسه با شرایط طبیعی، تحقیقات زیادی انجام نشده است. تنش شوری روی گیاه مادری می‌تواند سبب ایجاد اختلال در ساختار غشای سلول بذر شود. از سوی دیگر، استفاده از منابع اصلاح کننده می‌تواند سبب بهبود کمیت و کیفیت بذر تولیدی شود. تلفیق بیوچار+ مایکوریزا+ سیلیسیم احتمالاً با تأثیر بر ساختار غشا و کاهش جذب سدیم سبب افزایش کیفیت جوانه‌زنی بذرهای تولیدی شده است. نتایج نشان داد که رقم‌های ۷۰۴ و ۶۰۴ سرعت جوانه‌زنی و وزن هزار دانه بیش‌تری داشتند و کم‌ترین میزان این صفات در رقم ۳۷۰ مشاهده شد. افزایش فعالیت آنزیم‌های آلفا و بتا آمیلاز با استفاده از منابع اصلاح کننده بیوچار، مایکوریزا و سیلیسیم سبب بهبود درصد و بنیه بذرهای ذرت شد. کاربرد جداگانه منابع اصلاح‌کننده تاثیر کمی روی بذرهای تولیدی گیاه مادری ذرت داشت و عمدتاً تاثیر یکسانی با شاهد داشت. مصرف دو گانه منابع اصلاح کننده نیز یک گروه بهتر از شاهد بود، ولی تلفیق سه منبع اصلاح کننده تاثیر مثبت و معنی‌داری روی کیفیت بذر نشان داد. در مجموع با توجه به تأثیر مثبت تلفیق بیوچار+ مایکوریزا+ سیلیسیم روی کیفیت بذر ارقام ذرت، می‌توان به تولید

بذر تحت شرایط نسبتاً شور امیدوار بود. همچنین راهبرد مدیریتی با استفاده از منابع اصلاح کننده برای درک پاسخ منابع مختلف ژنی در شرایط تنش‌های محیطی به سختی در پژوهش‌های علمی گزارش شده است و ممکن است قسمت جدید از پژوهش‌های آینده باشد.

## سپاسگزاری

بدین وسیله از دانشگاه آزاد اسلامی واحد فسا که صمیمانه ما را در انجام این تحقیق یاری کردند، سپاسگزاری می‌شود.

## تضاد منافع

نویسنده (گان) تایید می‌کنند که این تحقیق در غیاب هر گونه روابط تجاری یا مالی که می‌تواند به‌عنوان تضاد منافع بالقوه تعبیر شود، انجام شده است.

## رعایت اخلاق در نشر

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

## اجازه انتشار مقاله

نویسنده (گان) با چاپ این مقاله به صورت دسترسی باز موافقت کرده و کلیه حقوق استفاده از محتوا، جدول‌ها، شکل‌ها، تصویرها و غیره را به ناشر واگذار می‌کنند.

## References

**Alam, M.Z., Hoque, M.A., Ahammed, G.J. and Carpenter-Boggs, L. 2020.** Effects of arbuscular mycorrhizal fungi, biochar, selenium, silica gel, and sulfur on arsenic uptake and biomass growth in *Pisum sativum* L. *Emerging Contaminants*, 6, pp. 312-322. https://doi.org/10.1016/j.emcon.2020.08.001.

**Al-Garni, S.M.S., Khan, M.M.A. and Bahieldin A. 2019.** Plant growth-promoting bacteria and silicon fertilizer enhance plant growth and salinity tolerance in *Coriandrum sativum*. *Journal of Plant Interactions*, 14, pp. 386-396. https://doi.org/10.1080/17429145.2019.1641635.

**Alzahrani, Y., Kuşvuran, A., Alharby, H.F., Kuşvuran, S. and Rady, M.M. 2018.** The defensive role of silicon in wheat against stress conditions induced by drought, salinity or cadmium. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 154, pp. 187-196. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.02.057.

**Arzangh, S., Darvishzadeh, R. and Alipour, H. 2021.** Evaluation of genetic diversity of maize lines (*Zea mays* L.) under normal and salinity stress conditions. *Cereal Research*, 11(3), pp. 243-266. [In Persian]. https://doi.org/10.22124/CR.2022.21075.1699.

**Attarzadeh, M., Balouchi, H., Dehnavi, M., Salehi, A. and Rajaie, M. 2019.** Response of germination and electrical conductivity of seeds produced by *Echinacea purpurea*'s mother plants under the influence of biological fertilizers and drought stress. *Iranian Journal of Seed Science and Technology*, 8(1), pp. 185-200. [In Persian]. https://doi.org/10.22034/IJSST.2019.115796.1141.

**Bakhshandeh, E. and Jamali, M. 2020.** Population-based threshold models: A reliable tool for describing aged seeds response of rapeseed under salinity and water stress. *Environmental and Experimental Botany*, 176, 104077. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2020.104077.

**Bassil, E.S. and Kaffka, S.R. 2002.** Response of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) to saline soils and irrigation: I. Consumptive water use. *Agricultural Water Management*, 54(1), pp. 67-80. https://doi.org/10.1016/S0378-3774(01)00148-2.

**Ben Laouane, R., Meddich, A., Bechtaoui, N., Oufdou, K. and Wahbi, S. 2019.** Effects of arbuscular mycorrhizal fungi and rhizobia symbiosis on the tolerance of *Medicago sativa* to salt stress. *Gesunde Pflanzen*, 71, pp. 135-146. https://doi.org/10.1007/s10343-019-00461-x.

**Bernfeld, P. 1955.** Amylase α and β. *Methods in Enzymology*, 1, pp. 149-158. http://dx.doi.org/10.1016/0076-6879(55)01021-5.

**Copeland, L.O. and McDonald, M.B. 2001.** Seed Vigor and Vigor Tests. In: Copeland L.O. and McDonald, M.B. (Eds.). Principles of Seed Science and Technology. Springer, Boston, MA. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-1619-4_8. pp. 165-191.

**Dehshiri, A. and Modares Sanavy, A. 2015.** Assessment of seed germination and seedling early growth characteristics of canola (*Brassica napus* L.) produced from original plants under salinity stress. *Iranian Journal of Seed Science and Technology*, 4(2), pp. 97-106. [In Persian].

**Dornbos, D.L. 2020.** Production Environment and Seed Quality. In: Gough, R.E. (Ed.). Seed Quality. Basic Mechanisms and Agricultural Implications. CRC Press. pp. 119-152. https://doi.org/10.1201/9781003075226.

**Dos Santos Sarah, M.M., de Mello Prado, R., de Souza Júnior, J.P., Teixeira, G.C.M., dos Santos Duarte, J.C. and de Medeiros, R.L.S. 2021.** Silicon supplied via foliar application and root to attenuate potassium deficiency in common bean plants. *Scientific Reports*, 11, pp. 19690. https://doi.org/10.1038/s41598-021-99194-z.

**Etesami, H. and Alikhani, H.A. 2022.** Silicon improves the effect of phosphate-solubilizing bacterium and arbuscular mycorrhizal fungus on phosphorus concentration of salinity-stressed alfalfa (*Medicago sativa* L.). *Rhizosphere*, 24, 100619. https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2022.100619.

**FAO. 2009.** Food security statistics. Available at http://www.fao.org/eco-nomic/ess/food-security-statistics/en (verii ed 6 Dec. 2010). Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.

**Farhangi-Abriz, S. and Torabian, S. 2018.** Biochar increased plant growth-promoting hormones and helped to alleviates salt stress in common bean seedlings. *Journal of Plant Growth Regulation*, 37, pp. 591-601. https://doi.org/10.1007/s00344-017-9756-9.

**Fita, A., Rodríguez-Burruezo, A., Boscaiu, M., Prohens, J. and Vicente, O. 2015.** Breeding and domesticating crops adapted to drought and salinity: a new paradigm for increasing food production. *Frontiers in Plant Science*, 6, 978. https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00978.

**Garg, N. and Bhandari, P. 2016.** Silicon nutrition and mycorrhizal inoculations improve growth, nutrient status. $K^+$ /$Na^+$ ratio and yield of *Cicer arietinum* L. genotypes under salinity stress. *Journal of Plant Growth Regulation*, 78, pp. 371-387. https://doi.org/10.1007/s10725-015-0099-x.

**Garg, N., Bhandari, P., Kashyap, L. and Singh, S. 2020.** Silicon Nutrition and Arbuscular Mycorrhizal Fungi: Promising Strategies for Abiotic Stress Management in Crop Plants. In: Deshmukh, R., Tripathi, A.K. and Guerriero, G. (Eds.). Metalloids in Plants: Advances and Future Prospects. pp. 315-354. https://doi.org/10.1002/9781119487210.ch16.

**Ghassemi-Golezani, K. and Abdoli, S. 2023.** Alleviation of salt stress in rapeseed (*Brassica napus* L.) plants by biochar-based rhizobacteria: New insights into the mechanisms regulating nutrient uptake, antioxidant activity, root growth and productivity. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 69(9), pp. 1548-1565. https://doi.org/10.1080/03650340.2022.2103547.

**Gimbi, D.M. and Kitabatake, N. 2002.** Changes in alpha-and beta-amylase activities during seed germination of African finger millet. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 53(6), pp. 481-488. https://doi.org/10.1080/09637480220164361.

**Haghighi, M., Afifipour, Z. and Mozafarian, M. 2012.** The alleviation effect of silicon on seed germination and seedling growth of tomato under salinity stress. *Vegetable Crops Research Bulletin*, 76, pp. 119-126. https://doi.org/10.2478/v10032-012-0008-z.

**Hussain, M., Ahmad, S., Hussain, S., Lal, R., Ul-Allah, S. and Nawaz, A. 2018.** Rice in saline soils: physiology, biochemistry, genetics, and management. *Advances in agronomy*, 148, pp. 231-287. https://doi.org/10.1016/bs.agron.2017.11.002.

**Islam, A.T., Ullah, H., Himanshu, S.K., Tisarum, R., Cha-um, S. and Datta, A. 2022.** Effect of salicylic acid seed priming on morpho-physiological responses and yield of baby corn under salt stress. *Scientia Horticulturae*, 304, 111304. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111304.

**ISTA. 2003.** Handbook for Seedling Evaluation. Third Edition. International Seed Testing Association. Zurich, Switzerland. 223 p.

**Jabborova, D., Annapurna, K., Paul, S., Kumar, S., Saad, H.A., Desouky, S., Ibrahim, M.F. and Elkelish, A. 2021.** Beneficial features of biochar and arbuscular mycorrhiza for improving spinach plant growth, root morphological traits, physiological properties, and soil enzymatic activities. *Journal of Fungi*, 7(7), 571. https://doi.org/10.3390/jof7070571.

**Joekar, M., Shiri, M., Khademian, R. and Aminian, R., 2019.** Grain yield stability of promising grain maize (*Zea mays* L.) hybrids in different regions of Iran. *Cereal Research*, 9(3), pp. 249-259. https://doi.org/10.22124/CR.2020.14791.1529.

**Kazemi, R., Ronaghi, A., Yasrebi, J., Ghasemi-Fasaei, R. and Zarei, M., 2019.** Effect of shrimp waste–derived biochar and arbuscular mycorrhizal fungus on yield, antioxidant enzymes, and chemical composition of corn under salinity stress. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 19, 758-770. https://doi.org/10.1007/s42729-019-00075-2.

**Kheybari, M., Shirani Rad, A.H., Seyfzadeh, S., Hahidi, I. and Zakerin, H.R. 2019.** Investigation of sowing date of mother plant effect on germination indices of autumn rapeseed cultivars and lines. *Iranian Journal of Seed Science and Technology*, 7(2), pp. 237-246. [n Persian]. https://doi.org/10.22034/IJSST.2019.111045.1106.

**Kordrostami, M. and Rabiei, B. 2019.** Salinity Stress Tolerance in Plants: Physiological, Molecular, and Biotechnological Approaches. In: Hasanuzzaman, M., Hakeem, K., Nahar, K. and Alharby, H. (Eds.). Plant Abiotic Stress Tolerance. Springer, Cham. pp. 101-127. https://doi.org/10.1007/978-3-030-06118-0_4.

**Kumar, O., Singh, S.K., Latare, A.M. and Yadav, S.N. 2018.** Foliar fertilization of nickel affects growth, yield component and micronutrient status of barley (*Hordeum vulgare* L.) grown on low nickel soil. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 64(10), pp. 1407-1418. https://doi.org/10.1080/03650340.2018.1438600.

**Li, G., Wan, S., Zhou, J., Yang, Z. and Qin, P. 2010.** Leaf chlorophyll fluorescence, hyperspectral reflectance, pigments content, malondialdehyde and proline accumulation responses of castor bean (*Ricinus communis* L.) seedlings to salt stress levels. *Industrial Crops and Products*, 31, pp. 13-19. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2009.07.015.

**Liu, X., Wei, Z., Manevski, K., Liu, J., Ma, Y., Andersen, M.N. and Liu, F. 2021.** Partial root-zone drying irrigation increases water use efficiency of tobacco plants amended with biochar. *Industrial Crops and Products*, 166, 113487. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113487.

**Maguire, J.D. 1962.** Speed of germination - Aid selection and evaluation for seedling emergence and vigor. *Crop Science*, 2, pp. 176-177. http://dx.doi.org/10.2135/cropsci1962.0011183X000200020033x.

**Mangal, V., Lal, M.K., Tiwari, R.K., Altaf, M.A., Sood, S., Kumar, D., Bharadwaj, V., Singh, B., Singh, R.K. and Aftab, T. 2023.** Molecular insights into the role of reactive oxygen, nitrogen and sulphur species in conferring salinity stress tolerance in plants. *Journal of Plant Growth Regulation*, 42, pp. 554-574. https://doi.org/10.1007/s00344-022-10591-8.

**McGuire, S., Sperling, L. 2013.** Making seed systems more resilient to stress. *Global Environmental Change*, 23(3), pp. 644-653. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2013.02.001.

**Miransari, M. and Smith, D. 2014.** Plant hormones and seed germination. *Environmental and Experimental Botany*, 99, pp. 110-121. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2013.11.005.

**Mishra, P., Mishra, J. and Arora, N.K. 2021.** Plant growth promoting bacteria for combating salinity stress in plants - Recent developments and prospects: A review. *Microbiological Research*, 252, 126861. https://doi.org/10.1016/j.micres.2021.126861.

**Moncaleano-Escandon, J., Silva, B.C., Silva, S.R., Granja, J.A., Alves, M.C.J. and Pompelli, M.F. 2013.** Germination responses of *Jatropha curcas* L. seeds to storage and aging. *Industrial Crops and Products*, 44, pp. 684-690. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.08.035.

**Moradi, S., Rasouli-Sadaghiani, M.H., Sepehr, E., Khodaverdiloo, H. and Barin, M. 2019.** Soil nutrients status affected by simple and enriched biochar application under salinity conditions. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191, 257. https://doi.org/10.1007/s10661-019-7393-4.

**Morales-Cedillo, F., Gonzalez-Solis, A., Gutiérrez-Angoa, L., Cano-Ramírez, D.L. and Gavilanes-Ruiz, M. 2015.** Plant lipid environment and membrane enzymes: the case of the plasma membrane $H^+$-ATPase. *Plant Cell Reports*, 34, 617-629. https://doi.org/10.1007/s00299-014-1735-z.

**Ndiate, N.I., Saeed, Q., Haider, F.U., Liqun, C., Nkoh, J.N. and Mustafa, A. 2021.** Co-application of biochar and arbuscular mycorrhizal fungi improves salinity tolerance, growth and lipid metabolism of maize (*Zea mays* L.) in an alkaline soil. *Plants*, 10(11), 2490. https://doi.org/10.3390/plants10112490.

**Nguyen, C.D., Chen, J., Clark, D., Perez, H. and Huo, H. 2021.** Effects of maternal environment on seed germination and seedling vigor of *Petunia× hybrida* under different abiotic stresses. *Plants*, 10(3), 581. https://doi.org/10.3390/plants10030581.

**Nichols, M.A. and Heydecker, W. 1968.** Two approaches to the study of germination data. *Proceedings of the International Seed Testing Association*, 33, pp. 531-540.

**Niknam, N. and Faraji, H. 2014.** Effect of plant density and nitrogen on yield and yield components of maize var. 704. *Applied Field Crops Research*, 27(102), pp. 54-60. [In Persian]. https://doi.org/10.22092/AJ.2014.100929.

**Nikobin, M., Soltani, A., Faraji, A. and Mirdavar, D.F. 2009.** Effect of sowing date at seed filling period on canola (*Brassica napus*) seed vigor. *Journal of Plant Production*, 16, pp. 87-100. https://dorl.net/dor/20.1001.1.23222050.1388.16.1.7.2.

**Pan, J., Peng, F., Tedeschi, A., Xue, X., Wang, T., Liao, J., Zhang, W. and Huang, C. 2020.** Do halophytes and glycophytes differ in their interactions with arbuscular mycorrhizal fungi under salt stress? A meta analysis. *Botanical Studies*, 61, pp. 1-13. https://doi.org/10.1186/s40529-020-00290-6.

**Parvin, S., Van Geel, M., Yeasmin, T., Verbruggen, E. and Honnay, O. 2020.** Effects of single and multiple species inocula of arbuscular mycorrhizal fungi on the salinity tolerance of a Bangladeshi rice (*Oryza sativa* L.) cultivar. *Mycorrhiza*, 30, pp. 431-444. https://doi.org/10.1007/s00572-020-00957-9.

**Patterson, B., Macrae, E. and Ferguson, I. 1984.** Estimation of hydrogen peroxide in plant extracts using titanium (IV). *Analytical Biochemistry*, 139(2), pp. 487-492. https://doi.org/10.1016/0003-2697(84)90039-3.

**Rahbari, K., Madandoust, M., Mohajeri, F. and Owji, M.R. 2022.** Investigating different seed moisture at harvesting time on germination indices of corn varieties based on the standard and aging acceleration test conditions. *Iranian Journal of Seed Science and Technology*, 11(1), pp. 73-84. [In Persian]. https://doi.org/10.22092/IJSST.2021.353200.1380.

**Rahmani, V., Movahhedi Dehnavi, M., Balouchi, H.R., Yadavi, A.R. and Hamidian, M. 2023.** Silicon can improve nutrient uptake and performance of black cumin under drought and salinity stresses. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 54(3), pp. 297-310. https://doi.org/10.1080/00103624.2022.2112590.

**Rajjou, L., Duval, M., Gallardo, K., Catusse, J., Bally, J., Job, C. and Job, D. 2012.** Seed germination and vigor. *Annual Review of Plant Biology*, 63, pp. 507-533. https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042811-105550.

**Raza, M.A.S., Haider, I., Farrukh Saleem, M., Iqbal, R., Usman Aslam, M., Ahmad, S. and Abbasi, S.H. 2021.** Integrating biochar, rhizobacteria and silicon for strenuous productivity of drought stressed wheat. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 52(4), pp. 338-352. https://doi.org/10.1080/00103624.2020.1853149.

**Reed, R.C., Bradford, K.J. and Khanday, I. 2022.** Seed germination and vigor: Ensuring crop sustainability in a changing climate. *Heredity*, 128, pp. 450-459. https://doi.org/10.1038/s41437-022-00497-2.

**Riccetto, S., Davis, A.S., Guan, K. and Pittelkow, C.M. 2020.** Integrated assessment of crop production and resource use efficiency indicators for the US Corn Belt. *Global Food Security*, 24, 100339. https://doi.org/10.1016/j.gfs.2019.100339.

**Rifna, E., Ramanan, K.R. and Mahendran, R. 2019.** Emerging technology applications for improving seed germination. *Trends in Food Science and Technology*, 86, pp. 95-108. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.02.029.

**Rios, J.J., Martínez-Ballesta, M.C., Ruiz, J.M., Blasco, B. and Carvajal, M. 2017.** Silicon-mediated improvement in plant salinity tolerance: the role of aquaporins. *Frontiers in Plant Science*, 8, 948. https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00948.

**Romero-Muñoz, M., Gálvez, A., Martínez-Melgarejo, P.A., Piñero, M.C., Del Amor, F.M., Albacete, A. and López-Marín, J. 2022.** The interaction between hydromulching and arbuscular mycorrhiza improves escarole growth and productivity by regulating nutrient uptake and hormonal balance. *Plants*, 11(20), 2795. https://doi.org/10.3390/plants11202795.

**Sadeghi, H., Sharifabad, H.H., Hamidi, A., Nourmohammadi, G. and Madani, H. 2017.** Evaluation of the effects of mother plant planting date and density on germination and vigor of soybean seed. *Iranian Journal of Seed Science and Technology*, 6(1), pp. 219-233. [In Persian]. https://doi.org/10.22034/IJSST.2017.113941.

**Seleiman, M.F., Refay, Y., Al-Suhaibani, N., Al-Ashkar, I., El-Hendawy, S. and Hafez, E.M. 2019.** Integrative effects of rice-straw biochar and silicon on oil and seed quality, yield and physiological traits of *Helianthus annuus* L. grown under water deficit stress. *Agronomy*, 9(10), 637. https://doi.org/10.3390/agronomy9100637.

**Shahzad, S., Ali, S., Ahmad, R., Ercisli, S. and Anjum, M.A. 2022.** Foliar application of silicon enhances growth, flower yield, quality and postharvest life of tuberose (*Polianthes tuberosa* L.) under saline conditions by improving antioxidant defense mechanism. *Silicon*, 14, pp. 1511-1518. https://doi.org/10.1007/s12633-021-00974-z.

**Shen, Z., Pu, X., Wang, S., Dong, X., Cheng, X. and Cheng, M. 2022.** Silicon improves ion homeostasis and growth of liquorice under salt stress by reducing plant $Na^+$ uptake. *Scientific Reports*, 12, 5089. https://doi.org/10.1038/s41598-022-09061-8.

**Soothar, M.K., Mounkaila Hamani, A.K., Kumar Sootahar, M., Sun, J., Yang, G., Bhatti, S.M. and Traore, A. 2021.** Assessment of acidic biochar on the growth, physiology and nutrients uptake of maize (*Zea mays* L.) seedlings under salinity stress. *Sustainability*, 13(6), 3150. https://doi.org/10.3390/su13063150.

**Wu, H., Zhang, X., Giraldo, J.P. and Shabala, S. 2018.** It is not all about sodium: Revealing tissue specificity and signalling roles of potassium in plant responses to salt stress. *Plant and Soil*, 431, pp. 1-17. https://doi.org/10.1007/s11104-018-3770-y.

**Yang, F., Wang, C. and Sun, H. 2021.** A comprehensive review of biochar-derived dissolved matters in biochar application: Production, characteristics, and potential environmental effects and mechanisms. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(3), 105258. https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105258.

**Zhang, J., Bai, Z., Huang, J., Hussain, S., Zhao, F., Zhu, C., Zhu, L., Cao, X. and Jin, Q. 2019.** Biochar alleviated the salt stress of induced saline paddy soil and improved the biochemical characteristics of rice seedlings differing in salt tolerance. *Soil and Tillage Research*, 195, 104372. https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104372.