[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1394.19.72.20.0]

[DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.19.72.20]

تأثیر مصرف سیلیسیوم بر رشد، ترکیب شیمیایی و برخی ویژگی‌های فیزیولوژیکی برنج (*Oryza sativa* L.) در شرایط شور

جهانشاه صالح*، نصرت اله نجفی و شاهین اوستان[۱]

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۷/۲۸ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۳/۵)

چکیده

پژوهش حاضر با هدف بررسی اثر سیلیسیوم و شوری بر رشد، ترکیب شیمیایی و ویژگی‌های فیزیولوژیکی برنج رقم هاشمی، در گلخانه دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز در سال ۱۳۹۰ انجام شد. این پژوهش در قالب طرح کاملاً تصادفی و به‌صورت فاکتوریل، با سه فاکتور شامل سیلیسیوم در چهار سطح (شاهد، ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ میلی‌گرم برکیلوگرم خاک)، شوری در چهار سطح (شاهد، ۲، ۴ و ۸ دسی‌زیمنس برمتر) و منبع شوری در دو سطح (کلرید سدیم و ترکیب نمک‌های مختلف) در سه تکرار اجرا گردید. نتایج نشان داد که افزایش شوری خاک باعث کاهش وزن خشک بخش هوایی، افت فعالیت کاتالاز و کم شدن غلظت فسفر، پتاسیم و قندهای احیاءکننده در گیاه شد، در حالی‌که مقدار گلیسین بتائین را افزایش داد. با مقایسه دو منبع مختلف شوری نیز مشخص شد گیاهانی که تحت تنش ناشی از ترکیب نمک‌های مختلف قرار گرفتند، کاهش کمتری در وزن خشک و غلظت پتاسیم و قندهای احیاءکننده نشان دادند، ضمن اینکه میزان افزایش گلیسین بتائین نیز در این گیاهان کمتر بود. از این‌رو می‌توان نتیجه گرفت که شوری حاصل از ترکیب نمک‌ها نسبت به شوری کلرید سدیم آسیب کمتری به گیاه وارد کرده است. از سوی دیگر، کاربرد سیلیسیوم باعث افزایش وزن خشک، فعالیت کاتالاز و غلظت فسفر، پتاسیم، گلیسین بتائین و قندهای احیاءکننده شد. بنابراین، تغذیه سیلیسیومی موجب تعدیل عوارض سوء ناشی از حضور نمک‌ها در خاک و به عبارت دیگر افزایش تحمل برنج به شوری شده است.

واژه‌های کلیدی: برنج، سیلیسیوم، شوری، کاتالاز، گلیسین بتائین

۱. گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: jsaleh11@yahoo.com

مقدمه

برنج یکی از گیاهان خانواده غلات است که سهم عمده‌ای در برنامه غذایی مردم آسیا و به‌ویژه کشور ما ایران دارد و شوری‌های بالاتر از ۳ دسی‌زیمنس برمتر باعث کاهش عملکرد آن می‌شود (۱۰). سطح زیر کشت برنج در آذربایجان شرقی معادل ۲۱۱۷ هکتار می‌باشد که از این مساحت ۸۹۲۷ تن شلتوک برداشت می‌شود (۳). افزایش شوری خاک به‌دلیل افت پتانسیل اسمزی محلول خاک و در نتیجه کاهش جذب آب توسط گیاه و تأثیر نامطلوب برخی عناصر نظیر سدیم، کلرید، بور و غیره سبب مختل شدن رشد گیاه می گردد (۲۶) و بر عرضه عناصر غذایی به سطح ریشه گیاه و انتقال آنها از ریشه به بخش‌های هوایی نیز تأثیر سوء می گذارد (۱۷). با توجه به نقش ممتاز برنج در تأمین غذای انسان از یک سو و مواجه بودن سطح وسیعی از اراضی کشور با مشکل شوری خاک و آب (۹) از سوی دیگر، ارائه راهکارهایی که منجر به افزایش تولید این محصول در واحد سطح به‌ویژه در اراضی با شوری بالا شود از اهمیت زیادی برخوردار است. یکی از روش‌های تعدیل تنش شوری در گیاه استفاده از عناصر غذایی است و در این راستا تاکنون نقش مؤثر عناصری نظیر منگنز، فسفر، نیتروژن، پتاسیم، کلسیم، روی، سیلیسیوم و آهن به اثبات رسیده است (۱۱، ۲۳، ۲۵، ۵۱ و ۵۲).

سیلیسیوم با عدد اتمی ۱۴، بعد از اکسیژن فراوان‌ترین عنصر در پوسته کره زمین است (۵۴) و غلظت آن در محلول خاک از ۰/۰۱ تا ۱/۹۹ میلی‌مولار نوسان می‌کند (۳۷). مقدار این عنصر در گیاه نیز از ۰/۲ تا ۱۰۰ میلی‌گرم در هر گرم وزن خشک گزارش شده است (۴۰). در خاک‌های با بافت درشت که در مناطق زیادی از ایران به‌ویژه در نواحی ساحلی یافت می‌شود، سیلیسیوم قابل‌استفاده از محلول خاک شسته شده و از دسترس گیاه خارج می‌شود. علاوه بر این، میزان برداشت گیاه از سیلیسیوم خاک معمولاً بسیار زیاد است، به‌طوری‌که با کشت برنج بین ۲۳۰ تا ۴۷۰ کیلوگرم سیلیسیوم در هر هکتار از خاک خارج می‌شود (۳۴). نقش مهم سیلیسیوم در افزایش عملکرد و بهبود کیفیت بسیاری از گیاهان، به‌ویژه در مواقعی که گیاه با یک تنش زیستی یا غیرزیستی روبه‌رو باشد، گزارش شده است (۲۲). پژوهش‌های انجام شده در مورد اثر متقابل سیلیسیوم و شوری بر رشد و ترکیب شیمیایی گیاهان نشان می‌دهد که در اکثر موارد، مصرف سیلیسیوم در شرایط تنش شوری توانسته است تا حد زیادی اثرهای نامطلوب شوری را تعدیل کند (۱۲، ۲۷، ۳۶ و ۴۹). سیلیسیوم با افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدان، بافت‌های گیاهی را در مقابل سمیت نمک حفظ می‌کند و با افزایش غلظت کلروفیل، سطح برگ و فتوسنتز، رشد و عملکرد گیاه را در شرایط شور افزایش می‌دهد (۲۰ و۲۷). با اینکه بررسی‌های زیادی در مورد نقش سیلیسیوم در کاهش اثر تنش شوری بر گیاهان در کشورهای مختلف انجام شده است، تاکنون هیچ پژوهشی در مورد نقش سیلیسیوم در تعدیل اثرهای تنش شوری در برنج در ایران صورت نگرفته است. البته در ایران پژوهش در مورد اثر سیلیسیوم بر ویژگی‌های کمی و کیفی گیاه تحت تنش شوری بر روی کاهو (۴)، نوعی علف گندمی به نام سیاه ناوفشان (۲)، توت فرنگی (۶)، خرفه (۵) و کلزا (۳۰) انجام شده است. با وجود این که اطلاعات محدودی در این زمینه وجود دارد، اما انتظار این است که مصرف سیلیسیوم در گیاه برنج رشد کرده در خاک شور، سبب جبران بخشی از کاهش عملکرد و افت کیفیت شود. هدف از اجرای این پژوهش، بررسی اثر مقادیر مختلف سیلیسیوم بر رشد، ترکیب شیمیایی و ویژگی‌های فیزیولوژیکی برنج کشت شده در شوری‌های مختلف می‌باشد.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش از برنج (*Oryza sativa* L.) رقم هاشمی استفاده شد که دلیل آن عملکرد بالا و سازگاری این رقم با آب و هوای مناطق شمالی کشور بود. پیش از شروع آزمایش، ویژگی‌های فیزیکی وشیمیایی خاک مورد نظر به شرح زیر تعیین گردید: قابلیت هدایت الکتریکی عصاره اشباع با استفاده از دستگاه هدایت‌سنج (Inolab-720, WTW, Germany)، pH گل اشباع

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.24763594.1394.19.72.20.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.19.72.20]

جدول ۱. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد آزمایش

بافت خاک	لوم شنی
قابلیت هدایت الکتریکی عصاره اشباع (دسی‌زیمنس بر متر)	۰/۴۶
سیلیسیوم قابل استخراج با اسید استیک ۰/۵ مولار (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	۸
درصد ماده آلی	۰/۹۳
pH گل اشباع	۷/۲
درصد کربنات کلسیم معادل	۳۳/۶
فسفر قابل استخراج با بیکربنات سدیم ۰/۵ مولار (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	۱۳/۷
غلظت آهن قابل‌استخراج با DTPA (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	۹/۴۸
غلظت منگنز قابل‌استخراج با DTPA (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	۷/۲۴
غلظت مس قابل‌استخراج با DTPA (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	۱/۸۴
غلظت روی قابل‌استخراج با DTPA (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	۰/۸۳

به‌وسیله دستگاه pH متر (Inolab-730, WTW, Germany)، بافت خاک به‌روش هیدرومتری (۲۸)، سیلیسیوم قابل استخراج با اسید استیک ۰/۵ مولار (۳۱ و ۵۷)، درصد ماده آلی به‌روش نلسون و سامرس (۴۴)، میزان کربنات کلسیم معادل از روش خنثی کردن با اسید و تیتر نمودن اسید باقیمانده با سود (۱۳)، فسفر قابل استخراج با بیکربنات سدیم ۰/۵ مولار (۴۶) و غلظت آهن، منگنز، مس و روی قابل‌استخراج با DTPA (۳۸). مقدار عددی ویژگی‌های مذکور در جدول ۱ ارائه شده است. شش کیلوگرم از خاک مذکور در گلدان‌های پلاستیکی ریخته شد و قبل از کشت، به همه گلدان‌ها نیتروژن، پتاسیم، آهن، منگنز، مس و روی به مقدار ۱۵۰، ۱۰۰، ۵، ۵، ۲/۵ و ۵ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک به‌ترتیب به‌صورت اوره، سولفات پتاسیم، FeEDDHA، سولفات منگنز، سولفات مس و سولفات روی اضافه گردید. آزمایش در سال ۱۳۹۰ در گلخانه دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز و در قالب طرح کاملاً تصادفی به‌صورت فاکتوریل و با سه فاکتور شامل سیلیسیوم در چهار سطح (شاهد، ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ میلی‌گرم سیلیسیوم در کیلوگرم خاک از منبع اسید سیلیسیک)، شوری در چهار سطح (شاهد، ۲، ۴ و ۸ دسی‌زیمنس بر متر در عصاره اشباع) و منبع شوری در دو سطح (کلرید سدیم و ترکیب کلرید سدیم، سولفات سدیم، کلرید کلسیم و سولفات منیزیم با نسبت مولی ۴:۲:۲:۱)، با سه تکرار اجرا شد. انتخاب ترکیب نمک‌ها و نسبت مولی آنها بر اساس اطلاعات گرفته شده از آزمایشگاه خاک و آب مرکز تحقیقات کشاورزی آذربایجان شرقی و مشابه با ترکیب نمکی خاک‌های شور و شور- سدیمی دشت تبریز انجام شد.

در هر گلدان ۱۰ عدد بذر برنج کاشته و پس از یک تا دو هفته تعداد گیاهان در هر گلدان به چهار گیاه تنک شد. در طول دوره رشد، گیاه با آب مقطر آبیاری شد و ارتفاع آب غرقاب بین سه تا پنج سانتی‌متر حفظ گردید. قبل از برداشت گیاه، میزان فعالیت آنزیم کاتالاز (۱۹) در برگ تعیین شد. پس از پایان رشد رویشی یعنی حدود هشت هفته پس از کشت نیز گیاه از ناحیه طوقه قطع و بخش هوایی پس از شسته شدن با آب مقطر، در آون تهویه‌دار با دمای ۷۰ درجه سلسیوس به‌مدت ۴۸ ساعت خشک شد. ابتدا وزن خشک بخش هوایی اندازه‌گیری شد و سپس غلظت قندهای احیاءکننده به روش نلسون- سوموگی (۴۳) و گلیسین بتائین به روش گریو و گراتان (۲۹) تعیین گردید. همچنین پس از خاکستر کردن گیاه به روش خشک‌سوزانی و تهیه عصاره گیاهی (۴۸)، غلظت فسفر به روش آبی اسید آسکوربیک (۴۷) و میزان پتاسیم به‌روش شعله‌سنجی (۱) اندازه‌گیری شد. در پایان، داده‌های

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.24763594.1394.19.72.20.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.19.72.20]

جدول ۲. تجزیه واریانس وزن خشک بخش هوایی، فعالیت کاتالاز، غلظت قندهای احیاءکننده، گلیسین بتائین، فسفر و پتاسیم

منبع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات					
		وزن خشک	فعالیت کاتالاز	قندهای احیاءکننده	گلیسین بتائین	فسفر	پتاسیم
A	۱	۸۷/۴۶**	۰/۰۲۰ ^{ns}	۳۶۵/۰*	۲۹۹۳*	۱۵۵۸۱ ^{ns}	۹۸۲۸۴۸۰*
B	۳	۸۱۸/۰۶**	۰/۷۸۵**	۱۲۳۴۰/۳**	۲۳۹۲۶۵**	۳۸۳۶۸۲۵**	۱۱۰۰۰۴۷۴۱۸**
A × B	۳	۲/۰۸^{ns}	۰/۰۰۳ ^{ns}	۵۱/۴ ^{ns}	۴۳۳۲**	۱۶۳۶۴ ^{ns}	۳۴۴۹۳۶۸ ^{ns}
C	۳	۶۷۲/۲۲**	۰/۷۶۵**	۴۴۱۳/۴**	۲۵۲۵۱۷**	۳۲۵۸۷۸**	۷۹۹۶۴۰۹۱**
A × C	۳	۰/۰۱ ^{ns}	۰/۰۰۱ ^{ns}	۳۷/۹^{ns}	۳۰۳۴**	۴۰۵ ^{ns}	۹۰۹۵۱۰ ^{ns}
B × C	۹	۰/۷۳ ^{ns}	۰/۰۰۴ ^{ns}	۱۰/۹ ^{ns}	۱۵۶۷۹**	۱۹۲۲ ^{ns}	۲۳۱۶۰۰۳ ^{ns}
A × B × C	۹	۰/۰۳ ^{ns}	۰/۰۰۱ ^{ns}	۱۱/۳ ^{ns}	۹۲۳ ^{ns}	۹۰۰ ^{ns}	۵۱۲۲۷۵ ^{ns}
خطا	۶۴	۱/۴۱	۰/۰۱۱	۵۳/۳	۶۹۷	۵۷۰۳۹	۱۸۳۶۴۱۵
ضریب تغییرات (CV)		۴/۴۲	۶/۰۵	۱۰/۰۰	۱۷/۲۱	۹/۰۵	۶/۹۴

ns ، * و **: به‌ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد

A: منبع شوری؛ B: سطح شوری؛ C: سطح سیلیسیوم

به‌دست آمده با استفاده از نرم‌افزار MSTATC تجزیه آماری شده و نتایج تفسیر گردید.

نتایج و بحث

افزایش شوری چه از منبع کلرید سدیم و چه به‌صورت ترکیب نمک‌ها منجر به کاهش معنی‌دار وزن خشک بخش هوایی شد. این در حالی بود که مصرف سیلیسیوم وزن خشک بخش هوایی را افزایش داد. کاهش رشد بخش هوایی در تیمارهای کلرید سدیم شدیدتر از تیمارهای ترکیب نمک‌ها بود. به‌عنوان مثال، در تیمار ۱۰۰ میلی‌گرم سیلیسیوم بر کیلوگرم خاک، شوری ۸ دسی‌زیمنس برمتر از منبع کلرید سدیم باعث شد وزن خشک بخش هوایی ۹۰ درصد کاهش یابد اما همین سطح شوری به‌صورت ترکیبی از نمک‌های مختلف تنها ۶۹ درصد کاهش در وزن خشک ایجاد کرد (جدول‌های ۲ و ۳). حضور یون‌های سولفات در تیمار ترکیب نمک‌ها موجب تشکیل زوج‌های یونی و در نتیجه کاهش تأثیر شوری بر رشد گیاه می‌گردد (۱۸)، ضمن اینکه کاتیون‌های Ca^{2+} و Mg^{2+} رقبای جدی سدیم برای جذب توسط گیاه به شمار می‌آیند که باعث می‌شوند مقدار کمتری سدیم وارد گیاه شود. از سوی دیگر، حضور کلسیم می‌تواند بسیار تأثیرگذار باشد زیرا بررسی‌ها نشان داده است که در شرایط شور، Ca^{2+} قادر به تنظیم نسبت $K^+:Na^+$ در گیاه برنج می‌باشد (۱۵ و ۵۹). اثر تنش شوری بر کاهش وزن خشک بخش هوایی برنج توسط سایر پژوهشگران نیز گزارش شده است (۵۱). کاهش رشد گیاه بر اثر شوری ناشی از کاهش قدرت سلول‌ها برای جذب آب (۴۱)، افزایش انرژی سوخت‌وسازی و کاهش جذب کربن، کاهش فتوسنتز در واحد سطح برگ، اختلال در سوخت‌وساز کربوهیدرات و پروتئین (۴۵) و یا ترکیبی از این فرآیندها می‌باشد.

بررسی‌ها نشان می‌دهند که تغذیه گیاه با سیلیسیوم، هم در شرایط تنش شوری و هم در شرایط بدون تنش موجب بهبود رشد بخش هوایی می‌شود (۱۲). در پژوهش حاضر نیز افزودن سیلیسیوم به خاک باعث شد رشد برنج در تیمارهای شور و غیرشور افزایش یابد که علت آن می‌تواند پایین بودن غلظت سیلیسیوم قابل‌استفاده در خاک (۸ میلی‌گرم در کیلوگرم) و در

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.24763594.1394.19.72.20.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.19.72.20]

جدول ۳. تأثیر سطوح سیلیسیوم و سطوح و منابع شوری بر وزن خشک و غلظت قندهای احیاءکننده در بخش هوایی برنج

منبع شوری	سطوح شوری (dS/m)	سطوح سیلیسیوم (mg/kg soil)				میانگین
		شاهد	۱۰۰	۲۰۰	۳۰۰	
		وزن خشک بخش هوایی (g/pot)				
سدیم کلرید	شاهد (۰/۴۶)	۲۶/۱±۱/۲ hi*	۲۸/۳±۱/۵ fg	۳۴/۲±۱/۰ c	۳۷/۸±۰/۸ a	۳۱/۶A
	۲	۲۳/۹±۰/۷ j	۲۶/۱±۰/۶ hi	۳۲/۰±۰/۶ de	۳۵/۲±۰/۷ bc	۲۹/۳B
	۴	۱۹/۳±۰/۶ mn	۲۱/۸±۰/۵ jkl	۲۸/۰±۰/۶ f-i	۳۱/۶±۱/۰ e	۲۵/۲C
	۸	۱۲/۶±۰/۲ p	۱۴/۹±۰/۴ o	۱۹/۸±۱/۰ lm	۲۳/۶±۰/۶ j	۱۷/۷D
	میانگین	۲۰/۵D	۲۲/۸C	۲۸/۵B	۳۲/۱A	
ترکیب نمک‌ها	شاهد (۰/۴۶)	۲۷/۱±۰/۵ ghi	۲۹/۴±۰/۸ f	۳۵/۵±۱/۲ bc	۳۸/۷±۰/۳ a	۳۲/۷A
	۲	۲۵/۹±۰/۶ i	۲۸/۲±۰/۵ fgh	۳۳/۷±۰/۵ cd	۳۷/۲±۰/۴ ab	۳۱/۳B
	۴	۲۱/۴±۰/۴ kl	۲۴/۰±۰/۴ j	۳۰/۱±۰/۴ ef	۳۳/۹±۰/۶ cd	۲۷/۳C
	۸	۱۵/۰±۰/۶ o	۱۷/۴±۰/۶ n	۲۲/۳±۰/۵ jk	۲۶/۰±۰/۴ hi	۲۰/۲D
	میانگین	۲۲/۳D	۲۴/۷C	۳۰/۴B	۳۴/۰A	
		غلظت قندهای احیاءکننده (mg/g dw)				
کلرید سدیم	شاهد (۰/۴۶)	۸۱/۱±۴/۴ fgh	۸۷/۱±۴/۵ d-h	۹۸/۲±۴/۰ b-e	۱۱۰/۷±۳/۹ ab	۹۴/۳A
	۲	۷۴/۵±۳/۸ hi	۷۹/۷±۴/۶ fgh	۸۵/۵±۷/۱ e-h	۱۰۱/۸±۳/۱ abc	۸۵/۴B
	۴	۴۹/۵±۴/۵ kl	۵۲/۶±۴/۲ kl	۶۲/۵±۳/۹ ijk	۷۹/۵±۳/۸ fgh	۶۱/۰C
	۸	۳۳/۸±۲/۹ m	۳۴/۱±۴/۲ m	۴۵/۲±۳/۴ lm	۶۱/۲±۴/۰ jk	۴۳/۶D
	میانگین	۵۹/۸C	۶۳/۳C	۷۲/۸B	۸۸/۳A	
ترکیب نمک‌ها	شاهد (۰/۴۶)	۸۲/۶±۴/۴ fgh	۸۶/۳±۴/۲ e-h	۱۰۰/۲±۳/۸ bcd	۱۱۴/۳±۴/۰ a	۹۵/۸A
	۲	۷۸/۶±۳/۹ fgh	۷۶/۲±۴/۲ gh	۹۱/۷±۳/۹ c-f	۱۰۸/۸±۴/۳ ab	۸۸/۸B
	۴	۵۵/۱±۳/۶ kl	۵۹/۱±۳/۸ k	۷۱/۹±۳/۷ hij	۸۹/۱±۴/۲ c-g	۶۹/۱C
	۸	۳۳/۹±۴/۱ m	۳۵/۷±۲/۹ m	۵۳/۴±۴/۲ kl	۶۱/۱±۶/۲ jk	۴۶/۰D
	میانگین	۶۲/۶C	۶۴/۳C	۷۹/۶B	۹۳/۳A	

*: اعدادی که در یک حرف کوچک یا بزرگ مشترک هستند، طبق آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد اختلاف معنی‌دار ندارند

نتیجه واکنش مثبت گیاه به کاربرد این عنصر باشد. بررسی وزن خشک بخش هوایی در تیمارهای شوری نشان داد که اثر مثبت استفاده از سیلیسیوم در شوری‌های بالا بیشتر بوده، به‌طوری‌که مصرف ۳۰۰ میلی‌گرم سیلیسیوم بر کیلوگرم خاک در شوری‌های ۲، ۴ و ۸ دسی‌زیمنس بر متر (از منبع کلرید سدیم) به‌ترتیب منجر به افزایش ۴۷، ۶۴ و ۸۷ درصدی رشد بخش هوایی برنج شد و در تیمارهای شوری حاصل از ترکیب نمک‌ها نیز این افزایش به‌ترتیب برابر با ۴۴، ۵۸ و ۷۳ درصد بود (جدول ۳). سیلیسیوم می‌تواند از طریق بهبود وضعیت آب بافت‌های گیاهی، افزایش فعالیت فتوسنتزی، تحریک فعالیت سیستم خنثی کننده گونه‌های اکسیژن فعال، کاهش جذب سدیم به‌وسیله گیاه، افزایش فعالیت آنزیم H^+-ATPase مسئول جذب

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.24763594.1394.19.72.20.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.19.72.20]

پتاسیم، افزایش انتخاب‌پذیری جذب پتاسیم نسبت به سدیم و افزایش پتانسیل آب برگ ناشی از تشکیل لایه مضاعف سیلیکا-کوتیکول بر روی بافت اپیدرمی برگ سبب افزایش تحمل گیاه به شوری شود (۴۹ و ۵۸).

نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها حاکی از آن است که سطوح و منبع شوری و همچنین میزان مصرف سیلیسیوم تأثیر معنی‌داری ($P\leq ۰/۰۱$) بر غلظت قندهای احیاءکننده در بخش هوایی برنج داشته است (جدول ۲). مقایسه میانگین‌ها نشان داد که در هر یک از سطوح سیلیسیوم، شوری ۲ دسی زیمنس بر متر نتوانست تغییری در غلظت این قندها ایجاد کند، در حالی که با افزایش قابلیت هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک به ۴ و ۸ دسی زیمنس بر متر، میزان قندها کاهش معنی‌داری پیدا کرد (جدول ۳). نتایج سایر پژوهشگران نیز نشان‌دهنده تأثیر شوری خاک بر کاهش غلظت قندهای احیاءکننده در برنج (۵۱) و گندم (۱۶) می‌باشد. این در حالی است که در برخی از پژوهش‌ها نتایج متناقضی به دست آمده است، به‌طوری که شوری باعث افزایش غلظت قندهای احیاءکننده شده است (۱۴). کاهش غلظت قندهای احیاءکننده بر اثر افزایش شوری می‌تواند ناشی از تأثیر غلظت زیاد یون‌های سدیم و کلرید بر فتوسنتز و متابولیسم قندها و افزایش میزان تنفس (۲۱) باشد. پایین‌تر بودن غلظت قندها در تیمارهای کلرید سدیم نسبت به گیاهان تیمار شده با ترکیب نمک‌های مختلف می‌تواند به‌دلیل غلظت بالاتر یون سدیم و تأثیر نامطلوب تجمع این عنصر در گیاه باشد. جدول ۳ نشان می‌دهد که سطوح ۲۰۰ و ۳۰۰ میلی‌گرم سیلیسیوم بر کیلوگرم خاک در مقایسه با تیمار شاهد باعث افزایش معنی‌دار غلظت قندهای احیاءکننده شده است. نتایج دیگر بررسی‌ها بیانگر آن است که مصرف سیلیسیوم در بسیاری از گیاهان منجر به افزایش مقدار قند در گیاه می‌شود (۳۶). سیلیسیوم جذب سدیم توسط گیاه را کاهش داده و از این طریق مقاومت گیاه به شوری را افزایش می‌دهد، ضمن اینکه باعث کاهش تنفس و افزایش میزان فتوسنتز می‌گردد (۲۷ و ۳۶). بنابراین در شرایط شور، گیاهان تغذیه شده با سیلیسیوم معمولاً حاوی مقادیر بیشتری قند نسبت به گیاهان بدون مصرف سیلیسیوم خواهند بود.

افزایش شوری از هر یک از دو منبع، افزایش غلظت گلیسین بتائین در برگ برنج را به دنبال داشت، ضمن اینکه مصرف سیلیسیوم نیز منجر به افزایش مقدار این اسید آمینه در گیاه شد (جدول ۴). این نتایج با یافته‌های ساکاماتو و موراتا (۵۰) و طالع‌احمد و حداد (۵۵) مطابقت داشت. تجمع گلیسین بتائین در برگ می‌تواند از طریق کاهش پتانسیل اسمزی و پتانسیل آب سلول، امکان ادامه جذب آب توسط سلول را فراهم کند. گلیسین بتائین یک ترکیب آمفوتری است که از لحاظ الکتریکی خنثی است و در دامنه وسیعی از pH های فیزیولوژیکی فعال است. این اسید آمینه قادر است با بخش‌های آب‌گریز و آب‌دوست مولکول‌های پروتئین و آنزیم‌ها برهمکنش نشان داده و در هنگام بروز تنش با احاطه کردن پروتئین‌ها به‌واسطه یک لایه آبی مانع از ایجاد آسیب‌های اکسایشی به پروتئین‌ها شود (۵۰). با توجه به این نقش محافظتی گلیسین بتائین و رابطه مستقیمی که بین مصرف سیلیسیوم و غلظت این ترکیب در گیاه مشاهده می‌شود می‌توان تأثیر سیلیسیوم بر افزایش تحمل گیاه به تنش شوری را توضیح داد.

با افزایش شوری خاک تا سطح ۴ دسی‌زیمنس بر متر، میزان فعالیت آنزیم کاتالاز به‌طور معنی‌داری کاهش یافت و در این خصوص تأثیر هر دو منبع شوری یکسان بود. این در حالی است که شوری‌های ۴ و ۸ دسی‌زیمنس برمتر از لحاظ تأثیر بر فعالیت آنزیم مذکور تفاوتی نشان ندادند. از سوی دیگر، نتایج نشان می‌دهد که کاربرد سیلیسیوم فعالیت آنزیم کاتالاز را افزایش داده است (جدول‌های ۲ و ۴). وانگ و همکاران (۵۸) نیز با مطالعه گیاه یونجه مشاهده کردند که میزان فعالیت آنزیم کاتالاز با افزایش شوری کاهش و با مصرف سیلیسیوم افزایش یافت. سانگ و همکاران (۵۳) نیز نشان دادند که کاربرد سیلیسیوم موجب افزایش فعالیت آنزیم کاتالاز در گیاه برنج گردید. این آنزیم می‌تواند بدون نیاز به عامل احیاءکننده،

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.24763594.1394.19.72.20.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.19.72.20]

جدول ۴. تأثیر سطوح سیلیسیوم و سطوح و منابع شوری بر غلظت گلیسین بتائین و فعالیت آنزیم کاتالاز در برگ برنج

منبع شوری	سطوح شوری (dS/m)	سطوح سیلیسیوم (mg/kg soil) ۸	۱۰۰	۲۰۰	۳۰۰	میانگین
		غلظت گلیسین بتائین (µg/g dw)				
کلرید سدیم	شاهد (۰/۴۶)	۱۳±۲ ^{n*}	۲۱±۳ ^{mn}	۷۳±۴ ^{jkl}	۱۲۶±۷ $^{f-i}$	۵۸^{D}
	۲	۲۸±۴ ^{lmn}	۲۷±۵ ^{lmn}	۱۲۲±۱۰ $^{f-j}$	۱۹۲±۷ ^{de}	۹۲^{C}
	۴	۸۷±۶ $^{h-k}$	۹۷±۹ $^{g-k}$	۳۲۷±۲۲ ^{c}	۳۸۸±۲۲ ^{b}	۲۲۵^{B}
	۸	۱۳۱±۱۲ ^{fgh}	۱۱۹±۱۳ $^{f-j}$	۳۵۴±۲۶ ^{bc}	۴۳۹±۳۶ ^{a}	۲۶۱^{A}
	میانگین	۶۵^{C}	۶۶^{C}	۲۱۹^{B}	۲۸۶^{A}	
ترکیب نمک‌ها	شاهد (۰/۴۶)	۱۹±۲ ^{mn}	۲۲±۳ ^{mn}	۶۷±۷ ^{klm}	۱۴۵±۶ ^{fg}	۶۳^{C}
	۲	۲۲±۳ ^{mn}	۳۱±۴ ^{lmn}	۸۰±۹ ^{ijk}	۱۳۸±۱۱ ^{fg}	۶۸^{C}
	۴	۹۷±۱۰ $^{g-k}$	۸۶±۸ $^{h-k}$	۲۳۲±۲۷ ^{d}	۳۱۷±۲۸ ^{c}	۱۸۳^{B}
	۸	۱۴۲±۹ ^{fg}	۱۶۰±۱۷ ^{ef}	۳۴۱±۳۱ ^{c}	۴۶۷±۲۲ ^{a}	۲۷۸^{A}
	میانگین	۷۰ ^{C}	۷۵ ^{C}	۱۸۰^{B}	۲۶۷ ^{A}	
		فعالیت آنزیم کاتالاز (ΔA240/min/gfw)				
کلرید سدیم	شاهد (۰/۴۶)	۱/۸۲±۰/۰۲ $^{d-h}$	۱/۸۷±۰/۰۳ $^{d-h}$	۲/۰۲±۰/۰۷ ^{cd}	۲/۲۴±۰/۰۳ ^{ab}	۱/۹۹^{A}
	۲	۱/۶۸±۰/۰۳ $^{h-k}$	۱/۷۱±۰/۰۳ $^{f-j}$	۱/۸۵±۰/۰۵ $^{d-h}$	۲/۰۱±۰/۰۴ ^{cd}	۱/۸۱^{B}
	۴	۱/۵۰±۰/۰۶ ^{lm}	۱/۴۶±۰/۰۴ ^{m}	۱/۷۰±۰/۰۸ $^{g-k}$	۱/۸۷±۰/۰۶ $^{d-h}$	۱/۶۳^{C}
	۸	۱/۴۱±۰/۰۶ ^{m}	۱/۴۷±۰/۰۶ ^{m}	۱/۶۱±۰/۰۷ $^{i-m}$	۱/۷۹±۰/۰۸ $^{e-i}$	۱/۵۷^{C}
	میانگین	۱/۶۰^{C}	۱/۶۳^{C}	۱/۸۰^{B}	۱/۹۸^{A}	
ترکیب نمک‌ها	شاهد (۰/۴۶)	۱/۸۴±۰/۰۵ $^{d-h}$	۱/۸۵±۰/۱۰ $^{d-h}$	۱/۹۸±۰/۱۰ ^{cde}	۲/۲۷±۰/۰۸ ^{a}	۱/۹۹^{A}
	۲	۱/۷۱±۰/۱۰ $^{f-j}$	۱/۷۳±۰/۰۴ $^{f-j}$	۱/۹۱±۰/۰۴ $^{c-f}$	۲/۰۸±۰/۰۶ ^{bc}	۱/۸۶^{B}
	۴	۱/۵۴±۰/۰۴ $^{j-m}$	۱/۵۱±۰/۰۵ ^{klm}	۱/۷۶±۰/۰۵ $^{f-i}$	۱/۸۹±۰/۰۷ $^{c-g}$	۱/۶۸^{C}
	۸	۱/۴۴±۰/۰۶ ^{m}	۱/۴۶±۰/۰۴ ^{m}	۱/۶۸±۰/۰۹ $^{h-l}$	۱/۸۳±۰/۰۸ $^{d-h}$	۱/۶۰^{C}
	میانگین	۱/۶۳^{C}	۱/۶۴^{C}	۱/۸۳^{B}	۲/۰۲^{A}	

*: اعدادی که در یک حرف کوچک یا بزرگ مشترک هستند، طبق آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد اختلاف معنی‌دار ندارند.

پراکسید هیدروژن موجود در سلول را به آب و اکسیژن تبدیل کرده و به این ترتیب از بروز صدمات اکسایشی ناشی از تنش شوری در گیاه ممانعت به‌عمل آورد. با کاهش فعالیت آنزیم‌های ضد اکسنده مانند کاتالاز، میزان رادیکال‌های سوپراکسید و پراکسید هیدروژن افزایش یافته و از ترکیب این دو، رادیکال هیدروکسیل تشکیل می‌شود. این رادیکال می‌تواند به تمام مولکول‌های زنده حمله کرده و سوخت‌وساز سلول را مختل نماید (۲۴). کافی و همکاران (۸) نیز نشان دادند که افزایش شوری باعث کاهش معنی‌دار فعالیت آنزیم کاتالاز در گیاه گردید.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.24763594.1394.19.72.20.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.19.72.20]

جدول ۵. تأثیر سطوح سیلیسیوم و سطوح و منابع شوری بر غلظت فسفر و پتاسیم در بخش هوایی برنج

منبع شوری	سطوح شوری (dS/m)	سطوح سیلیسیوم (mg/kg soil) ۸	۱۰۰	۲۰۰	۳۰۰	میانگین
		غلظت فسفر (mg/kg dw)				
کلرید سدیم	شاهد (۰/۴۶)	۲۹۱۱±۴۲۳ abc*	۲۹۳۶±۱۳۳ abc	۲۹۹۴±۱۵۹ ab	۳۱۷۷±۱۲۴ a	۳۰۰۵A
	۲	۲۸۴۰±۱۱۱ a-e	۲۸۶۱±۱۲۱ a-d	۲۹۲۲±۱۲۶ abc	۳۱۲۰±۱۱۰ a	۲۹۳۵A
	۴	۲۳۱۲±۱۳۴ fgh	۲۳۶۳±۱۳۸ fgh	۲۴۴۹±۱۳۲ d-h	۲۵۷۰±۱۰۱ b-g	۲۴۲۳B
	۸	۲۰۲۹±۹۹ h	۲۰۷۰±۱۱۵ h	۲۱۵۳±۱۱۶ gh	۲۳۰۹±۱۳۴ fgh	۲۱۴۰C
	میانگین	۲۵۲۲B	۲۵۵۸B	۲۶۳۰AB	۲۷۹۴A	
ترکیب نمک‌ها	شاهد (۰/۴۶)	۲۸۸۰±۱۳۲ a-d	۲۹۰۹±۱۱۷ abc	۲۹۲۷±۱۲۱ abc	۳۰۹۱±۱۱۵ a	۲۹۲۵A
	۲	۲۹۰۳±۱۰۶ abc	۲۹۲۹±۱۳۲ abc	۲۹۸۷±۱۰۵ ab	۳۱۳۵±۱۰۹ a	۲۹۸۹A
	۴	۲۳۷۹±۱۳۱ fgh	۲۴۰۴±۱۳۳ e-h	۲۴۹۴±۱۱۱ c-h	۲۶۲۰±۹۹ b-f	۲۴۷۴B
	۸	۲۰۶۰±۸۲ h	۲۱۰۵±۸۴ gh	۲۲۱۲±۱۰۵ fgh	۲۳۸۶±۷۹ fgh	۲۱۹۱C
	میانگین	۲۵۵۶ B	۲۵۸۷ B	۲۶۵۵AB	۲۸۰۸ A	
		غلظت پتاسیم (mg/kg dw)				
کلرید سدیم	شاهد (۰/۴۶)	۲۴۶۲۵±۸۸۱ b-f	۲۵۱۱۷±۸۹۳ a-e	۲۶۳۴۲±۹۰۴ abc	۲۶۹۵۹±۸۹۹ abc	۲۵۷۶۱A
	۲	۲۲۳۱۲±۸۹۰ f	۲۳۷۵۰±۹۰۶ def	۲۴۸۵۷±۸۷۸ a-f	۲۵۴۵۳±۸۸۲ a-e	۲۴۰۹۳B
	۴	۱۳۸۵۶±۵۹۹ jk	۱۵۲۵۰±۵۸۶ ij	۱۶۸۴۲±۵۳۵ hi	۱۷۵۲۳±۶۱۷ ghi	۱۵۸۶۸C
	۸	۸۱۲۲±۵۰۹ n	۱۰۸۶۶±۶۱۹ lm	۱۲۶۷۸±۶۳۳ kl	۱۴۱۵۰±۶۷۹ jk	۱۱۴۵۴D
	میانگین	۱۷۲۲۹C	۱۸۷۴۶B	۲۰۱۸۰A	۲۱۰۲۱A	
ترکیب نمک‌ها	شاهد (۰/۴۶)	۲۴۵۳۳±۸۶۰ c-f	۲۳۷۱۶±۱۲۲۹ def	۲۶۷۵۴±۹۰۳ abc	۲۷۳۵۱±۹۰۹ a	۲۵۵۸۹A
	۲	۲۳۱۲۸±۸۸۳ ef	۲۴۸۵۵±۸۷۰ a-f	۲۶۱۱۸±۸۷۷ a-d	۲۷۲۳۵±۹۱۶ ab	۲۵۳۳۴A
	۴	۱۴۲۵۳±۷۸۹ jk	۱۶۷۵۵±۵۹۷ hi	۱۸۰۳۶±۷۵۱ gh	۱۹۷۴۴±۷۴۵ g	۱۷۱۹۷B
	۸	۸۸۲۲±۴۷۵ mn	۱۰۵۶۱±۵۳۸ lm	۱۲۸۱۹±۵۶۷ jkl	۱۴۲۶۱±۶۲۲ jk	۱۱۶۱۶C
	میانگین	۱۷۶۸۴ D	۱۸۹۷۲ C	۲۰۹۳۲B	۲۲۱۴۸ A	

* اعدادی که در یک حرف کوچک یا بزرگ مشترک هستند، طبق آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد اختلاف معنی دار ندارند.

مقایسه میانگین‌ها حاکی از آن است که شوری ۲ دسی‌زیمنس بر متر نتوانست تغییری در غلظت فسفر بخش هوایی برنج ایجاد کند، در حالی‌که در گیاهان رشد کرده در شوری‌های ۴ و ۸ دسی‌زیمنس بر متر، کاهش معنی‌دار غلظت فسفر مشاهده شد (جدول ۵). همچنین منبع شوری هیچ تغییری در غلظت فسفر بخش هوایی گیاه ایجاد نکرد (جدول ۲).

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.24763594.1394.19.72.20.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.19.72.20]

کاهش غلظت فسفر در برنج تحت تنش شوری توسط جانداران و رائو (۳۵) نیز گزارش شده است. در پژوهش حاضر، کاربرد سیلیسیوم در سطح ۳۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک منجر به افزایش غلظت فسفر بخش هوایی برنج شد که با توجه به اثر آنتاگونیستی عنصر روی بر جذب فسفر توسط گیاهان می‌توان آن را به کاهش مقدار روی قابل عصاره‌گیری در خاک در حضور سیلیسیوم (۴۲) نسبت داد، زیرا اسید سیلیسیک قادر است با روی واکنش داده و سیلیکات‌های کم‌محلول نظیر $ZnSiO_3$ و Zn_2SiO_4 تشکیل دهد (۵۶). شهدی و کاوسی (۷) نیز مشاهده کردند که با مصرف سیلیسیوم، غلظت فسفر در بخش هوایی برنج افزایش پیدا می‌کند.

افزایش شوری از هر یک از دو منبع باعث کاهش غلظت پتاسیم در بخش هوایی برنج شد، با این توضیح که شدت این کاهش در تیمارهای کلرید سدیم بیشتر بود (جدول‌های ۲ و ۵). صالح و همکاران (۵۱) نیز مشاهده کردند که با افزایش شوری، غلظت پتاسیم در بخش هوایی برنج کاهش می‌یابد. هو و همکاران (۳۳) معتقدند که کاهش غلظت پتاسیم گیاه بر اثر شوری، ناشی از رابطه آنتاگونیستی بین جذب سدیم و پتاسیم توسط گیاه می‌باشد. این اثر آنتاگونیستی می‌تواند حاصل رقابت بین یون‌های سدیم و پتاسیم برای جذب توسط مکان‌های جذبی غشای پلاسمایی سلول‌ها باشد، ضمن اینکه حضور سدیم ممکن است منجر به مختل شدن نفوذپذیری غشاء و در نتیجه خروج پتاسیم از سلول‌های ریشه شود (۳۹). بدیهی است که کاهش بیشتر غلظت پتاسیم در گیاهان تیمار شده با کلرید سدیم به‌دلیل بالاتر بودن غلظت سدیم در این تیمارها می‌باشد.

با کاربرد سیلیسیوم در محیط رشد گیاهان برنج تحت تنش شوری، غلظت پتاسیم بخش هوایی افزایش معنی‌داری نشان داد (جدول ۵). یکی از سازوکارهای احتمالی تأثیر سیلیسیوم بر افزایش جذب یون پتاسیم در گیاهان تحت تنش شوری، افزایش فعالیت آنزیم H^+-ATPase غشاهای سلولی در حضور سیلیسیوم می‌باشد (۳۹). همچنین برخی پژوهشگران تأثیر استفاده از سیلیسیوم بر افزایش غلظت پتاسیم گیاه را به نقش سیلیسیوم در کاهش جذب سدیم نسبت می‌دهند، زیرا بررسی‌ها نشان داده که مصرف سیلیسیوم از طریق سازوکارهایی نظیر کاهش نفوذپذیری غشای سلول‌های برگ و ریشه نسبت به سدیم و افزایش خروج سدیم از سلول‌های گیاه موجب کاهش جذب سدیم در برنج، گندم، جو و گیاهان دیگر می‌گردد (۵۲). بدیهی است با کاهش جذب سدیم، فرصت برای جذب مقادیر بیشتر پتاسیم توسط گیاه فراهم خواهد شد.

نتیجه‌گیری

یافته‌های این پژوهش حاکی از آن است که شوری خاک باعث می‌شود وزن خشک بخش هوایی، فعالیت آنزیم ضد اکسنده کاتالاز و همچنین غلظت قندها در برنج کاهش یافته و مقادیر کمتری از دو عنصر غذایی فسفر و پتاسیم جذب گیاه شود. این در حالی است که در گیاهان تیمار شده با سیلیسیوم، فعالیت کاتالاز و نیز غلظت فسفر، پتاسیم و قندهای احیاءکننده افزایش معنی‌داری پیدا کرده است. از سوی دیگر با بررسی داده‌ها مشخص شد که در اغلب موارد، شوری حاصل از ترکیب نمک‌های مختلف نسبت به شوری کلرید سدیم صدمات کمتری به گیاه وارد کرده است. در مجموع می‌توان نتیجه‌گیری کرد که یکی از راههای مؤثر غلبه بر پیامدهای منفی شوری خاک در کشت برنج، استفاده از کودهای سیلیسیومی است زیرا قادر است این اثرهای نامطلوب را به میزان چشمگیری کاهش دهد.

سپاسگزاری

بدین‌وسیله از معاونت محترم پژوهش و فناوری دانشگاه تبریز به خاطر حمایت مالی در اجرای طرح پژوهشی شماره ۲۷/۱۷۳۸-۸/ص که این مقاله حاوی قسمتی از نتایج آن است، تشکر و قدردانی به عمل می‌آید.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.24763594.1394.19.72.20.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.19.72.20]

منابع مورد استفاده

۱. امامی، ع. ۱۳۷۵. *روش‌های تجزیه گیاه*. جلد اول. نشریه شماره ۹۸۲، مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات و آموزش کشاورزی، وزارت کشاورزی، تهران.

۲. بندانی، م. و ا. عبدل زاده. ۱۳۸۶. اثر تغذیه سیلیکون در تحمل به شوری گیاه *پوکسینلیا دیستنس*. مجله‌ی علوم کشاورزی و منابع طبیعی ۴(۳): ۳۹-۲۹.

۳. بی نام. ۱۳۹۰. آمارنامه‌ی کشاورزی. جلد اول: محصولات زراعی، سال زراعی ۸۶-۱۳۸۵. دفتر آمار و فناوری اطلاعات، وزارت جهاد کشاورزی، تهران.

۴. پیوست، غ.، م. زارع و ح. سمیع‌زاده. ۱۳۸۷. اثر متقابل سطوح مختلف سیلیسیوم وتنش شوری بر رشد کاهوپیچ تحت شرایط کشت در سیستم لایه نازک محلول غذایی (NFT). مجله علوم و صنایع کشاورزی، ویژه علوم باغبانی ۲۲(۱): ۸۸-۷۹.

۵. رحیمی، ز.، م. کافی، ا. نظامی و ح. خزاعی. ۱۳۹۰. تأثیر سطوح شوری و سیلیسیوم بر برخی ویژگی‌های مورفوفیزیولوژیک گیاه دارویی خرفه (*Portulaca oleracea* L.). تحقیقات گیاهان دارویی و معطر ایران ۲۷(۳): ۳۷۴-۳۵۹.

۶. سیدلر فاطمی، ل.، س. ج. طباطبایی و ا. فلاحی. ۱۳۸۸. اثر سیلیسیوم بر رشد و عملکرد گیاه توت فرنگی در شرایط تنش شوری. مجله‌ی علوم باغبانی (علوم و صنایع کشاورزی) ۲۳(۱): ۹۵-۸۸.

۷. شهدی کومله، ع. و م. کاوسی. ۱۳۸۳. بررسی اثر متقابل سیلیسیوم و فسفر بر رشد و عملکرد برنج (*Oryza sativa* L.). مجله علوم کشاورزی ایران ۳۵(۳): ۵۸۶-۵۸۱.

۸. کافی، م.، ب. کامکار و ع. مهدوی دامغانی. ۱۳۸۲. *واکنش‌های گیاهان زراعی به محیط رشد*. انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد.

۹. کوچکی، ع. ۱۳۷۲. *رابطه آب و خاک در گیاهان زراعی*. انتشارات جهاد دانشگاهی مشهد.

۱۰. همایی، م. ۱۳۸۱. *واکنش گیاهان به شوری*. انتشارات کمیته ملی آبیاری و زهکشی، تهران.

11. Akram, M. S., H. R. Athar and M. Ashraf. 2007. Improving growth and yield of sunflower (*Helianthus annuus* L.) by foliar application of potassium hydroxide (KOH) under salt stress. Pak. J. Bot. 39(3): 769-776.
12. Ali, A., S. M. Basra, I. Iqbal, S. Hussain, M. N. Subhani, M. Sarwar and M. Ahmed. 2012. Augmenting the salt tolerance in wheat (*Triticum aestivum*) through exogenously applied silicon. Afr. J. Biotechnol. 11(3): 642-649.
13. Allison, L. E. and C. D. Moodie. 1965. Carbonate. PP. 1379-1396. *In*: Black, C. A. et al. (Eds.), Methods of Soil Analysis. Part II, American Society of Agronomy, Madison, WI.
14. Amirjani, M. R. 2010. Effect of NaCl on some physiological parameters of rice. J. Biol. Sci. 3(1): 6-16.
15. Awada, S., W. F. Campbell, L. M. Dudley, J. J. Jurinak and M. A. Khan. 1995. Interactive effects of sodium chloride, sodium sulfate, calcium sulfate, and calcium chloride on snap bean growth, photosynthesis, and ion uptake. J. Plant Nutr. 18: 889-900.
16. Barakat, N. A .M. 2011. Oxidative stress markers and antioxidant potential of wheat treated with phytohormones under salinity stress. J. Stress Physiol. Biochem. 7(4): 250-267.
17. Bernstein, L., L. E. Francois and R. A. Clark. 1974. Interactive effects of salinity and fertility on yield of grains and vegetables. Agron. J. 66: 412-421.
18. Bohn, H. L., B. L. McNeal and G. A. O'Connor. 2001. Soil Chemistry. 3rd ed. John Wiley and Sons, New York, USA.
19. Cakmak, I., D. Strbac and H. Marschner. 1993. Activities of hydrogen peroxide-scavenging enzymes in germinated wheat seeds. J. Exp. Bot. 44: 127-132.
20. Chen, W., X. Yao, K. Cai and L. Chen. 2011. Silicon alleviates drought stress of rice plants by improving plant water status, photosynthesis and mineral nutrient absorption. Biol. Trace Elem. Res. 142(1): 67-76.
21. Curtis, P. S., H. L. Zhong, A. Lauchli and R. W. Pearcy. 1988. Carbohydrate Availability, Respiration and Ggrowth of Knef (Hibiscus cannabinus) Under Moderate Salt Stress. Am. J. Bot. 75: 1293-1297.
22. Datnoff, L. E., G. H. Snyder and G. H. Korndörfer. 2001. Silicon in Agriculture. Studies in Plant Science 8. Elsevier. Amsterdam, The Netherlands.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.24763594.1394.19.72.20.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.19.72.20]

23. El-Fouly, M. M., Z. M. Mobarak and Z. A. Salama. 2011. Micronutriens (Fe, Mn, Zn) foliar spray for increasing salinity tolerance in wheat Triticum aestivum L. Afr. J. Plant Sci. 5(5): 314-322.
24. Esfandiari, E., F. Shekari, F. Shekari and M. Esfandiari. 2007. The effect of salt stress on antioxidant enzymes' activity and lipid peroxidation on the wheat seedling. Not. Bot. Hort. Agrobot. Cluj. 35(1): 48-56.
25. Esmaili, E., S. A. Kapourchal, M. J. Malakouti and M. Homaee. 2008. Interactive effect of salinity and two nitrogen fertilizers on growth and composition of sorghum. Plant Soil Environ. 54(12): 537-546.
26. Evdokimov, V. M. 1969. Tolerance of some crops during ontogenesis to Cl salts. Sb. Trud. Aspir. Molod. Narch. Sotr. Vses. Inst. Rasteniev 10: 164-168.
27. Gao, X., C. Zou, L. Wang and F. Zhang. 2006. Silicon decreases transpiration rate and conductance from stomata of maize plants. J. Plant Nutr. 29: 1637-1647.
28. Gee, G. W. and J. W. Bauder. 1986. Particle Size Analysis. *In:* Klute, A. (Ed.), Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Methods. ASA, SSSA, Madison, WI, USA.
29. Grieve, C. M. and R. Grattan. 1983. Rapid assay for determination of water soluble quaternary-amino compounds. Plant Soil 70: 303-307.
30. Hashemi, A., A. Abdolzadeh and H. R. Sadeghipour. 2010. Beneficial effects of silicon nutrition in alleviating salinity stress in hydroponically grown canola, *Brassica napus* L., plants. Soil Sci. Plant Nutr. 56: 244-253.
31. Heckman, J. R. and A. Wolf. 2009. Recommended Soil and Plant Tests for Silicon. *In:* Sims, J. T. and A. Wlolf (Eds.), 3rd edition of recommended soil testing procedures for the Northeastern United States. Northeastern Regional Publication No. 493. University of Delaware Press, USA.
32. Hodson, M. J. and A. G. Sangster. 2002. Silicon and Abiotic Stress. PP. 99-104. *In:* Matoh, T. (Eds.), Second Silicon in Agriculture Conference, Press-Net, Kyoto, Japan.
33. Hu, Y., J. J. Oertli and U. Schmidhalter. 1997. Interactive Effects of Salinity and Macronutrient Level on Wheat. II. Composition. J. Plant Nutr. 20: 1168-1182.
34. IFA. 1992. World Fertilizer Use Manual. International Fertilizer Industry Association, Paris. 632 p.
35. Janardhan, K. V. and C. N. Rao. 1970. Effect of soil salinity on the uptake of fertilizer phosphorus by rice. Oryza 7(1): 93-94.
36. Kafi, M., J. Nabati, A. Masoumi and M. Zare Mehrgerdi. 2011. Effect of salinity and silicon application on oxidative damage of sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench.]. Pak. J. Bot. 43(5): 2457-2462.
37. Karathanasis, A. D. 2002. Mineral Equilibria in Environmental Soil System. PP. 109-151. *In:* Dixon, J. B. and S.B. Weed (Eds.), Soil mineralogy with environmental applications. Soil Science Society of America. Madison, WI.
38. Lindsay, W. L. and W. A. Norvell. 1978. Development of a DTPA test for zinc, iron, manganese and copper. Soil Sci. Soc. Am. J. 42: 421-428.
39. Marschner, H. 1995. Mineral Nutrition of Higher Plants. Academic Press, London, United Kingdom.
40. Mengel, K. and E. Kirkby. 1978. Principles of Plant Nutrition. 3rd edition, International Potash Institute, Bern, Switzerland.
41. Munns, R. 2002. Comparative physiology of salt and water stress. Plant Cell Environ. 25:239-250.
42. Nascimento, C. W. A., P. K. V. Cunha and A. J. Silva. 2008. Silicon alleviates the toxicity of cadmium and zinc in maize (*Zea mays* L.) grown on a contaminated soil. J. Plant Nutr. Soil Sci. 171: 849-853.
43. Nelson, N. 1944. A photometeric adaption of the somogyi method for the determination of glucose. J. Biol. Chem. 153: 375-380.
44. Nelson, D. W. and L. E. Sommers. 1996. Total Carbon, Organic Carbon and Organic Matter. PP. 967-1010. *In:* Sparks, D. L.,A. L. Page, P. A. Helmke, R. H. Loeppert, P. N. Soltanpour, M. A. Tabatabaei, C. T. Johnson and M. E. Sumner (Eds.). Methods of soil analysis. Part 3, Chemical Methods. Soil Science Society of America Book Series 5. SSSA, Madison, WI, USA.
45. Netondo, G. W., J. C. Onyango and E. Beck. 2004. Sorghum and salinity: II. Gas exchange and chlorophyll fluorescence of sorghum under salt stress. Crop Sci. 44:806-811.
46. Olsen, S. R., C. V. Cole, F. S. Watanabe and L. A. Dean. 1954. Estimation of available phosphorus in soil by extraction with sodium bicarbonate. USDA Circular 939, US Government Printing Office, Washington DC.
47. Olsen, S. R. and L. E. Sommers. 1982. Phosphorus. PP. 403-430. *In:* Page, A. L. et al. (Eds.), Methods of Soil Analysis. Part II. 2nd ed. ASA, SSSA, Madison, WI, USA.
48. Plank, C. O. 1992. Plant Analysis Reference Procedures for the South Region of the United States. Southern Cooperative Series Bulletin, No. 368. USA.
49. Romero-Aranda, M. R., O. Jurado and J. Cuartero. 2006. Silicon alleviates the deleterious salt effect on tomato plant growth by improving plant water status. J. Plant Physiol. 163: 847-855.
50. Sakamoto, A. and N. Murata. 2002. The role of glycine betaine in the protection of plants from stress. Plant Cell Environ. 25: 163-171.
51. Saleh, J. and M. Maftoun. 2008. Interactive effects of NaCl levels and zinc sources and levels on the growth and

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.24763594.1394.19.72.20.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.19.72.20]

chemical composition of rice. J. Agric. Sci. Technol. 10(4): 325-336.
52. Saqib, M., C. Zorb and S. Schubert. 2008. Silicon-mediated improvement in the salt resistance of wheat (*Triticum aestivum* L.) results from increased sodium exclusion and resistance to oxidative stress. Func. Plant Biol. 35: 633-639.
53. Song, A. L., P. Li, Z. J. Li., F. L. Fan, M. Nikolic and Y. C. Liang. 2011. The alleviation of zinc toxicity by silicon is related to zinc transport and antioxidative reactions in rice. 5th International Conference on Silicon in Agriculture, 13-18 September, Beijing, China.
54. Sposito, G. 1989. The Chemistry of Soils. New York. Oxford University Press.
55. Tale Ahmad, S. and R. Haddad. 2011. Study of Silicon Effects on Antioxidant Enzyme Activities and Osmotic Adjustment of Wheat under Drought Stress. Czech J. Genet. Plant Breed 47(1): 17-27.
56. Tiller, K. G. and J. G. Pickering. 1974. The synthesis of zinc silicates at 20°C and atmospheric pressure. Clays Clay Miner. 22: 409- 416.
57. Wang, J. J., S. K. Dodla and R. E. Henderson. 2004. Soil silicon extractability with seven selected extractants in relation to colorimetric and ICP determination. Soil Sci. 169: 861-870.
58. Wang, X., Z. Wei, D. Liu and G. Zhao. 2011. Effects of NaCl and silicon on activities and antioxidative enzymes in roots, shoots and leaves of alfalfa. Afr. J. Biotech. 10(4): 545-549.
59. Wu, G. Q. and S. M. Wang. 2012. Calcium regulates K^+/Na^+ homeostasis in rice (*Oryza sativa* L.) under saline conditions. Plant Soil Environ. 58(3): 121-127.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.24763594.1394.19.72.20.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.19.72.20]