



نشریه مدیریت خاک و تولید پایدار

جلد یازدهم، شماره سوم، ۱۴۰۰

۵۳-۷۵

<http://ejms.gau.ac.ir>

DOI: 10.22069/ejms.2021.17970.1947



(مقاله کامل علمی - پژوهشی)

تأثیر سطوح مختلف منابع سیلیسیم و رژیم‌های آبیاری بر پارامترهای فتوسنتزی برنج (رقم طارم هاشمی)

یلدا حسینیان رستمی^{۱*}، محمدعلی بهمنیار^۲، فردین صادق‌زاده^۳، سید مصطفی عمادی^۳

و پوریا بی‌پروا^۴

^۱دانش‌آموخته دکتری گروه علوم خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، آستاد گروه علوم خاک،

^۲دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ^۳دانشیار گروه علوم خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری،

^۴دانشیار گروه علوم پایه، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۲/۱۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۰۸

چکیده

سابقه و هدف: پارامترهای فتوسنتزی حساس‌ترین فرایند در متابولیسم فیزیولوژیکی گیاهان هستند؛ که تحت‌تأثیر رژیم آبیاری و کوددهی سیلیسیم قرار می‌گیرند. به‌طوری‌که، سیلیسیم یکی از عناصر تأثیرگذار بر افزایش نرخ خالص فتوسنتز برگ، کارایی مصرف آب، هدایت روزنه‌ای و دی اکسید کربن بین سلولی می‌باشد. هدف از این پژوهش بررسی اثرات سطوح مختلف منابع سیلیسیم و رژیم‌های متفاوت آبیاری بر پارامترهای فتوسنتزی و وزن خشک کاه برنج بود.

مواد و روش‌ها: به‌منظور ارزیابی تأثیر سطوح مختلف منابع سیلیسیم و رژیم‌های متفاوت آبیاری بر پارامترهای فتوسنتزی گیاه برنج (*Oryza sativa* L.) رقم طارم هاشمی، آزمایشی گلدانی در دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری در سال ۱۳۹۷ صورت پذیرفت. آزمایش به‌صورت اسپلینت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی و با سه تکرار انجام شد. در این طرح، بافت خاک در دو نوع مختلف لومی‌شنی (S_1) و رسی‌سیلتی (S_2) به عنوان فاکتور اصلی و رژیم آبیاری در دو نوع غرقاب دائم (W_1) و آبیاری متناوب تری-خشکی (W_2) و منابع مختلف سیلیسیم مانند سیلیکات پتاسیم (PS)، سیلیکات سدیم (SS)، سیلیکات کلسیم (CS) و بایوچار پوسته برنج (Bi) در دو سطح ۶۰ و ۱۲۰ میلی‌گرم سیلیسیم بر کیلوگرم به عنوان فاکتورهای فرعی طرح در نظر گرفته شده بود. پس از رشد گیاه تحت تیمار سطوح مختلف منابع سیلیسیم و رژیم‌های متفاوت آبیاری، ماده خشک توده گیاهی و پارامترهای فتوسنتزی مانند محتوای رطوبت نسبی برگ، شدت تعرق، هدایت روزنه‌ای، شاخص کلروفیل و میزان فتوسنتز گیاهان برنج اندازه‌گیری شدند.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که در میان منابع سیلیسیم، بیش‌ترین افزایش میزان رطوبت نسبی برگ ($63/80$ درصد)، شدت تعرق ($12/03 \text{ mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)، هدایت روزنه‌ای ($384/79 \text{ mmolm}^{-2}\text{s}^{-1}$)، شاخص کلروفیل ($55/00$)، میزان فتوسنتز ($24/33 \text{ } \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$) و وزن ماده خشک کاه ($33/3$ گرم در گلدان) در گیاهان تحت تیمار سیلیکات پتاسیم با سطح ۱۲۰ میلی‌گرم سیلیسیم بر کیلوگرم از خاک رسی‌سیلتی با آبیاری غرقاب دائم مشاهده شده بود؛ و کم‌ترین پارامترهای فتوسنتزی و وزن ماده خشک کاه در تیمار بدون اعمال منابع سیلیسیم خاک لومی‌شنی با آبیاری

* مسئول مکاتبه: ya.hoseinian@gmail.com

متناوب تری-خشکی مشاهده شد. علاوه بر این، در میان تیمارهای خاک لومی‌شنی، گیاهان تحت تیمار بایوچار با سطح ۱۲۰ میلی‌گرم سیلیسیم بر کیلوگرم با آبیاری غرقاب دائم، بیش‌ترین محتوای رطوبت نسبی برگ (۵۸/۹۵ درصد)، شدت تعرق ($11/20 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)، هدایت روزنه‌ای ($340/32 \text{ mmolm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)، شاخص کلروفیل (۵۱/۸۰)، میزان فتوستتز ($19/55 \mu\text{molm}^{-2} \text{ s}^{-1}$) و وزن ماده خشک توده گیاهی (۱۸/۶ گرم در گلدان) را نشان دادند. قابل ذکر است که در خاک لومی‌شنی با آبیاری متناوب، گیاهان تحت تیمار سیلیکات پتاسیم و سیلیکات سدیم در سطح ۱۲۰ میلی‌گرم سیلیسیم بر کیلوگرم، کاهشی را در پارامترهای فتوستتزی و وزن ماده خشک کاه نشان دادند؛ که می‌تواند نشان‌دهنده اثر ممانعتی غلظت‌های بالای این عنصر بر کارکرد فتوستتز باشد.

نتیجه‌گیری: پارامترهای فتوستتزی گیاهان و وزن ماده خشک کاه در رژیم آبیاری متناوب تری-خشکی نسبت به آبیاری غرقاب دائم تا حدودی کاهش داشته است. با این‌حال، اعمال منابع سیلیسیم به هر دو بافت خاک در هر دو رژیم آبیاری موجب بهبود میزان رطوبت نسبی برگ، شدت تعرق، هدایت روزنه‌ای، میزان کلروفیل، میزان فتوستتز و وزن ماده خشک کاه نسبت به تیمارهای شاهد گردید. این امر بیانگر اثر حفاظتی سیلیسیم بر گیاه در رژیم کم‌آبیاری می‌باشد. بنابراین به نظر می‌رسد در محدوده این آزمایش، استفاده از سیلیسیم جهت بهبود شرایط فتوستتز برنج در رژیم آبیاری متناوب رضایت‌بخش بوده است؛ اما میزان مصرف این عنصر جهت حفظ تعادل خصوصیات خاک و گیاه بسیار مهم است.

واژه‌های کلیدی: برنج، پارامترهای فتوستتزی، رژیم آبیاری، سیلیسیم

مقدمه

سیلیسیم دومین عنصر فراوان در پوسته زمین و یکی از عناصر غذایی مفید در رشد و سلامت گیاه است. ترکیبات حاوی سیلیسیم در خاک شامل سیلیس آمورف، مواد معدنی ثانویه، مواد معدنی غنی از سیلیسیم و کوارتز می‌باشد؛ که سیلیسیم این ترکیبات برای گیاهان غیر قابل دسترس است (۳۶). بنابراین، شیوه‌های کشت مکرر و تک محصولی ارقام پرمصرف می‌تواند منجر به کمبود سیلیسیم در خاک شود (۲۱). پژوهشگران عنوان کردند که کمبود سیلیسیم می‌تواند منجر به کاهش مقدار کلروفیل برگ و به دنبال آن میزان فتوستتز برنج گردد. آنان دلیل این امر را به نقش سیلیسیم در زنجیره فتوستتزی و ممانعت از تخریب کلروفیل دانستند (۲۱). هم‌چنین، سیلیسیم در بافت‌های اپیدرمی به‌صورت یک غشای نازک سیلیسیم-سلولز تجمع یافته و با پکتین و یون‌های کلسیم همراه می‌باشد. تشکیل لایه دوگانه کوتیکولی

سیلیسیم‌دار می‌تواند گیاه را در برابر از دست رفتن آب در اثر تعرق کوتیکولی و برخی تنش‌های مکانیکی محافظت کند (۱۶). پژوهشگران در زمینه کاهش شدت تعرق برنج تیمار شده با سیلیسیم در رژیم کم‌آبیاری نسبت به رژیم آبیاری غرقاب گزارش دادند که این اثر می‌تواند ناشی از رسوبات سیلیسیم باشد؛ که به نوبه خود منجر به کاهش میزان تعرق از طریق لایه‌های کوتیکول ضخیم‌شده، افزایش استحکام برگ‌ها و افزایش غلظت کلروفیل در واحد سطح برگ می‌گردد (۵۷).

برنج (*Oryza sativa* L.) یکی از اصلی‌ترین ماده غذایی آسیا و یک انباشتگر فعال سیلیسیم است (۱۴). به‌طوری‌که، جذب بالای سیلیسیم توسط برنج منجر به افزایش وزن ماده خشک گیاه می‌گردد. بر این اساس، فلاح (۲۰۲۰) گزارش کرد که مصرف کود سیلیکاته در مقایسه با عدم مصرف باعث افزایش وزن خشک کل در یک کپه شد. میزان این افزایش در مقایسه با شاهد (عدم مصرف کود سیلیکاته) بین ۵ تا ۲۰ درصد متغیر بود (۱۷).

درحالی‌که، تغییری در عملکرد برنج مشاهده نشده بود (۵). از این رو، با توجه به افزایش درجه حرارت کره زمین، توزیع نامنظم بارندگی و تشدید خشکسالی در مناطق خشک و نیمه خشک، دستیابی به افزایش تولید مستلزم استفاده از نهاده‌های کشاورزی مانند بذر و کود با کیفیت و مدیریت آب آبیاری به همراه سایر فعالیت‌های مناسب کشاورزی است (۲۹). با توجه به مطالب فوق این آزمایش جهت بررسی اثر رژیم آبیاری و مقادیر مصرف منابع مختلف سیلیسیم بر پارامترهای فتوسنتزی گیاه برنج برای شناخت و به‌کارگیری سازوکار مناسب در مدیریت آبیاری و تغذیه‌ای برنج به اجرا گذاشته شد.

مواد و روش‌ها

به منظور بررسی اثرات سطوح مختلف منابع سیلیسیم و رژیم‌های آبیاری بر پارامترهای فتوسنتزی و وزن ماده خشک کاه برنج، آزمایشی گلدانی در دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری در سال ۱۳۹۷ اجرا شد. نمونه‌های خاک مورد مطالعه با بافت سبک از روستای تجن لته سفلی استان مازندران (خط عرضی ۳۶ درجه، ۴۸ دقیقه، ۳۷/۹۱ ثانیه شمالی و خط طولی ۵۳ درجه، ۱۰ دقیقه، ۱۴/۴۵ ثانیه شرقی) و نمونه‌های خاک با بافت سنگین نیز از مزارع تحقیقاتی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری (خط عرضی ۳۶ درجه، ۳۹ دقیقه، ۳۷/۷۰ ثانیه شمالی و خط طولی ۵۳ درجه، ۴ دقیقه، ۱۶/۷۳ ثانیه شرقی) در فواصل مختلف از عمق سطحی به‌طور تصادفی تهیه و به آزمایشگاه انتقال داده شد. پس از هواخشک و عبور از الک ۲ میلی‌متری خاک‌ها، برخی از خصوصیات آن‌ها مانند بافت خاک به روش هیدرومتری (۳۵)، pH (نسبت خاک به آب ۲/۵:۱) با استفاده از الکتروود شیشه‌ای (۵۲)، هدایت الکتریکی (نسبت ۱:۵ آب:خاک) با استفاده از دستگاه هدایت‌سنج (۵۲)، کربن آلی به روش والکی و بلک (۶۱)، نیتروژن کل

برنج یک گیاه غیر آبری است؛ بنابراین مانند هر محصول زراعی دیگر می‌تواند در شرایط غیرغرقاب (هوازی) رشد کند؛ در نتیجه صرفه‌جویی قابل توجهی در مصرف آب صورت می‌پذیرد. با این حال، آبیاری شالیزار از مهم‌ترین عملیاتی است که در زراعت برنج باید به دقت انجام گیرد. در کشت هوازی برنج، مزارع به‌طور متناوب تحت آبیاری غرقاب قرار می‌گیرند. جایی‌که، پس از غرقاب اجازه داده می‌شود که رطوبت خاک تا سطح مشخصی کاهش یابد؛ سپس زمین مجدداً غرقاب می‌گردد (۵). با این حال، بررسی‌ها نشان می‌دهند که عملکرد برنج در شرایط غرقاب عموماً نسبت به شرایط غیرغرقاب به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای بیش‌تر است (۳۱). زیرا با این روش آبیاری نه تنها آب و عناصر غذایی کافی در اختیار گیاه قرار خواهد گرفت؛ بلکه از نظر کنترل علف‌های هرز نیز خیلی مؤثر است. اما این روش آبیاری زمانی امکان‌پذیر است که آب کافی، مناسب، مطمئن و ارزان فراهم باشد (۱). عباسی و همکاران (۲۰۱۲) در بررسی تأثیر شرایط‌های مختلف آب‌خاک (غرقاب دائم، غرقاب-متناوب و اشباع-متناوب) در کشت برنج عنوان کردند که شاخص سطح برگ و وزن خشک بخش هوایی و ریشه در شرایط غرقاب دائم و غرقاب-متناوب بیش‌تر از اشباع-متناوب بود (۱). همچنین، تقی‌زاده و همکاران (۲۰۰۸) در بررسی تأثیر دور آبیاری بر اجزای عملکرد برنج طارم هاشمی، اختلاف معنی‌داری را در تعداد کل پنجه، تعداد خوشه در واحد سطح و تعداد دانه پر در خوشه در بین آبیاری غرقاب دائم و ۱۰ روز یک بار آبیاری مشاهده نکردند (۶۰). آویلا و همکاران (۲۰۱۵) بیان داشتند که با آبیاری متناوب (کاهش ارتفاع آب غرقاب تا ۱۰ سانتی‌متر زیر سطح خاک) می‌توان آب مصرفی برنج غرقاب را کاهش داد. آنان مشاهده کردند که میزان آب مصرفی در شرایط آبیاری متناوب نسبت به غرقاب دائم به‌طور میانگین بین ۲۲ تا ۷۶ درصد کاهش داشته است.

برنج مانند pH در نسبت یک به ده بایوچار به آب (۳۷)، هدایت الکتریکی در نسبت یک به ده بایوچار به آب (۳۷)، کربن آلی (۴۶)، نیتروژن کل به روش کج‌دال (۱۰) و عناصر کم‌مصرف و پرمصرف (فسفر، پتاسیم، سیلیسیم، آهن، کلسیم و منیزیم) به روش هضم با اسید (۵۰) اندازه‌گیری شد. این نتایج تجزیه بایوچار در جدول ۲ آمده است.

به روش کج‌دال (۳۰)، فسفر قابل دسترس به روش اولسن (۴۷)، پتاسیم قابل دسترس به روش استات آمونیوم (۷)، میزان روی، آهن و منگنز قابل دسترس به روش DTPA (۴۰)، ظرفیت تبادل کاتیونی به روش استات آمونیوم (۸) و سیلیسیم قابل دسترس به روش استیک اسید ۰/۵ مولار (۶) اندازه‌گیری شد. نتایج تجزیه خاک‌های مورد مطالعه در جدول ۱ آمده است. هم‌چنین، برخی از خصوصیات بایوچار پوسته

جدول ۱- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد استفاده قبل از اعمال تیمارها.

Table 1. Some physico-chemical properties of soils before applying the treatments.

مقدار Value		ویژگی‌های خاک Soil properties
لومی شنی Sandy Loam	رسی سیلانی Silty Clay	بافت Texture
52	10	شن (درصد) Sand (%)
38	46	سیلت (درصد) Silt (%)
10	44	درصد رس Clay (%)
7.60	7.20	پ‌هاس pH
0.31	0.50	هدایت الکتریکی (دسی‌زیمنس بر متر) Electrical conductivity (dS m ⁻¹)
0.038	0.240	نیتروژن (درصد) Nitrogen (%)
0.35	2.00	کربن آلی (درصد) Organic C (%)
10.50	22.50	ظرفیت تبادل کاتیونی (میلی‌اکی‌والان بر صد گرم) Cations Exchange Capacity (meq/100 gr)
6.38	13.86	فسفر قابل دسترس (میلی‌گرم بر کیلوگرم) Available P (mg kg ⁻¹)
85	297	پتاسیم قابل دسترس (میلی‌گرم بر کیلوگرم) Available K (mg kg ⁻¹)
56.0	112.5	سیلیسیم قابل دسترس (میلی‌گرم بر کیلوگرم) Available Si (mg kg ⁻¹)
3.21	15.22	آهن قابل دسترس (میلی‌گرم بر کیلوگرم) Available Fe (mg kg ⁻¹)
1.09	3.67	منگنز قابل دسترس (میلی‌گرم بر کیلوگرم) Available Mn (mg kg ⁻¹)
0.25	1.21	روی قابل دسترس (میلی‌گرم بر کیلوگرم) Available Zn (mg kg ⁻¹)

جدول ۲- برخی ویژگی‌های شیمیایی بایوچار.

Table 2. Some chemical properties of biochar.

مقدار Value	ویژگی های بایوچار Biochar properties
7.4	پ هاش pH
1.4	هدایت الکتریکی (دسی زیمنس بر متر) Electrical conductivity (dS m^{-1})
1.9	نیتروژن کل (درصد) Total Nitrogen (%)
43.5	کربن آلی (درصد) Organic C (%)
198.0	آهن کل (میلی گرم بر کیلوگرم) Total Fe (mg kg^{-1})
993.0	کلسیم کل (میلی گرم بر کیلوگرم) Total Ca (mg kg^{-1})
959.0	منیزیم کل (میلی گرم بر کیلوگرم) Total Mg (mg kg^{-1})
1564.0	فسفر کل (میلی گرم بر کیلوگرم) Total P (mg kg^{-1})
7731.0	پتاسیم کل (میلی گرم بر کیلوگرم) Total K (mg kg^{-1})
140.0	سیلیسیم کل (میلی گرم بر کیلوگرم) Total Si (mg kg^{-1})

سیلیسیم بر کیلوگرم خاک؛ Ps_2 : ۱۲۰ میلی گرم سیلیسیم بر کیلوگرم خاک)، سیلیکات سدیم (Ss_1 : ۶۰ میلی گرم سیلیسیم بر کیلوگرم خاک؛ Ss_2 : ۱۲۰ میلی گرم سیلیسیم بر کیلوگرم خاک)، سیلیکات کلسیم (Cs_1 : ۶۰ میلی گرم سیلیسیم بر کیلوگرم خاک؛ Cs_2 : ۱۲۰ میلی گرم سیلیسیم بر کیلوگرم خاک)، بایوچار پوسته برنج (Bi_1 : ۶۰ میلی گرم سیلیسیم بر کیلوگرم خاک؛ Bi_2 : ۱۲۰ میلی گرم سیلیسیم بر کیلوگرم خاک) و شاهد (Co : بدون اعمال منابع مختلف سیلیسیم) بود. هم چنین، رژیم های آبیاری غرقاب دائم شامل غرقاب گلدان ها از زمان نشاء تا زمان زهکشی قبل از برداشت و آبیاری متناوب تری-خشکی شامل تکرار و تناوب غرقاب سازی پس از کاهش رطوبت خاک به ۷۰ درصد ظرفیت زراعی (۱۱) بوده است.

تعیین رطوبت ۷۰ درصد ظرفیت زراعی به روش وزنی انجام گردید. در این روش پس از اشباع سازی نمونه

این آزمایش به صورت اسپلنت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار انجام شد. در این طرح، بافت خاک به عنوان عامل اصلی و رژیم آبیاری و سطوح مختلف منابع سیلیسیم به عنوان عامل فرعی در نظر گرفته شد. بافت خاک شامل ۱. لومی شنی (S_1) ۲. رسی سیلتی (S_2)؛ رژیم آبیاری شامل ۱. آبیاری غرقاب دائم (W_1) ۲. آبیاری متناوب تری-خشکی (W_2) و منابع مختلف سیلیسیم شامل ۱. سیلیکات پتاسیم (K_2SiO_3) ۲. سیلیکات سدیم (Na_2SiO_3) ۳. سیلیکات کلسیم (Ca_2SiO_4) ۴. بایوچار پوسته برنج بود. مواد شیمیایی سیلیکات پتاسیم، سیلیکات سدیم و سیلیکات کلسیم از شرکت مرک آلمان بوده است. هر کدام از منابع سیلیسیم در دو سطح ۶۰ و ۱۲۰ میلی گرم سیلیسیم بر کیلوگرم خاک در نظر گرفته شد. بنابراین، تیمارهای منابع سیلیسیم شامل سیلیکات پتاسیم (Ps_1 : ۶۰ میلی گرم

خاک‌ها و خروج آب ثقلی، با استفاده از رابطه درصد ظرفیت زراعی $(\frac{100 * (\text{خاک وزن خشک} - \text{وزن خاک مرطوب})}{\text{وزن خاک خشک}})$

درصد ظرفیت زراعی، میزان رطوبت در نقطه ظرفیت زراعی تعیین گردید. سپس، ۷۰ درصد میزان رطوبت اندازه‌گیری شده در نقطه ظرفیت زراعی محاسبه و به‌میزان خاک گلدان تعمیم داده شد.

با توجه به ویژگی‌های شیمیایی هر دو بافت خاک (جدول ۱)، توصیه کودی خاک‌ها به شرح زیر بوده است:

۱) خاک لومی‌شنی: در مجموع ۲۰۰ کیلوگرم کود اوره در هکتار، ۲۰۰ کیلوگرم کود سولفات پتاسیم در هکتار و ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار سوپر فسفات تریپل توصیه شده بود که کود اوره در سه مرحله (۱/۳ قبل از نشاء، ۱/۳ در اواسط پنجه‌زنی و ۱/۳ در شروع خوشه‌دهی)، کود سولفات پتاسیم در هکتار که در دو مرحله (۱/۲ قبل از نشاء و ۱/۲ سی روز پس از نشاء) و کود سوپر فسفات تریپل در یک مرحله به عنوان کود پایه اعمال گردید.

۲) خاک رسی‌سیلتی: در مجموع ۵۰ کیلوگرم کود اوره در هکتار توصیه شده بود که در سه مرحله (۱/۳ قبل از نشاء، ۱/۳ در اواسط پنجه‌زنی و ۱/۳ در شروع خوشه‌دهی) اعمال گردید.

جهت اجرای عملیات کشت گلدانی برنج از گلدان‌های پلاستیکی با اندازه طول، عرض و ارتفاع ۲۵ سانتی‌متری استفاده گردید. هر دو بافت خاک به‌طور جداگانه هواخشک و غربال شدند. برای هر تیمار گلدانی، ۱۰ کیلوگرم خاک وزن و سطوح مختلف منابع سیلیسیم (۶۰ و ۱۲۰ میلی‌گرم سیلیسیم بر کیلوگرم خاک) به‌صورت پایه با آن‌ها کاملاً مخلوط گردید.

بذرهای برنج رقم طارم هاشمی توسط محلول ۵ در هزار ویتاواکس تیرام ضدعفونی شدند و در محیط

مناسب جوانه‌دار گردید. زمانی که ارتفاع نشاء به ۲۵ سانتی‌متر رسید، ۳ بوته به هر گلدان انتقال داده شد. تمام گلدان‌ها به مدت ۲ هفته پس از نشاء، در حالت غرقاب نگهداری شدند؛ تا گیاهچه‌ها استقرار یابند. پس از آن، گلدان‌های تحت آبیاری غرقاب دائم تا دو هفته قبل از زمان پیش‌بینی برداشت برنج، از آب غرقاب ماندند (ارتفاع آب در سطح خاک در شرایط غرقاب ۲-۳ سانتی‌متر بود). اما، در گلدان‌های تحت آبیاری متناوب تری-خشکی، هر زمانی که میزان رطوبت خاک به ۷۰ درصد ظرفیت زراعی کاهش یافت، غرقاب‌سازی صورت پذیرفت. گیاهان تقریباً ۶۰-۷۰ روز پس از نشاء، رشد رویشی خود را تا مرحله گلدهی کامل کردند. سپس، جهت اندازه‌گیری پارامترهای فتوسنتزی در مرحله گلدهی برنج، سه برگ پرچم در هر گلدان از هر تکرار انتخاب و علامت‌گذاری شدند. اندازه‌گیری‌ها از ساعت ۱۰:۰۰ تا ۱۰:۳۵ قبل از ظهر انجام پذیرفت. قرائت‌ها در طی ۳۵ دقیقه انجام گردید تا خطاهای حاصل از الگوی روزانه فتوسنتز به حداقل رسد. در حین اندازه‌گیری‌ها، محدوده تابش محیط در حدود ۱۷۰۰-۱۴۰۰ میکرومول بر مترمربع بر ثانیه، رطوبت نسبی در حدود ۶۰-۴۰ درصد و درجه حرارت محیط بین ۳۲-۲۹ درجه سانتی‌گراد بوده است. پارامترهای رطوبت نسبی برگ، شدت تعرق، رسانایی روزنه و میزان فتوسنتز با استفاده از دستگاه فتوسنتز متر (GFS 3000-Germani) (۱۵) و کلروفیل برگ توسط دستگاه کلروفیل متر (SPAD 502 PLUS-Minolta, Japan) (۱۵) اندازه‌گیری شدند. هم‌چنین، پس از اتمام دوره رشد رویشی و زایشی برنج، کاه گیاهان هر گلدان از طوقه جدا شده و جهت تعیین وزن ماده خشک، زیست توده‌های هر گلدان در دمای ۶۵ درجه سانتی‌گراد

به مدت ۷۲ ساعت خشک و توزین شدند. جدول ۳ نتایج تجزیه واریانس اثر تیمارها بر پارامترهای فتوسنتزی و وزن خشک کاه را نشان می‌دهد؛ که بر اساس آن اثرات ساده بافت خاک، منابع مختلف سیلیسیم، رژیم آبیاری و اثرات متقابل بین آن‌ها بر پارامترهای فتوسنتزی و وزن خشک کاه در سطح یک درصد معنی‌دار بود.

نتایج و بحث

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس بافت خاک، رژیم آبیاری، منابع مختلف سیلیسیم و اثر متقابل آن‌ها بر پارامترهای فتوسنتزی و وزن خشک کاه برنج رقم طارم هاشمی.

Table 3. Results of analysis of variance for soil texture, irrigation regime, different sources of silicon and their interaction on photosynthetic parameters and dry weight of Tarom Hashemi rice variety.

میانگین مربعات Average of squares							منابع تغییرات Sources of variations
وزن خشک کاه (گرم در گلدان) Dry weight of straw (gr/pot)	فتوسنتز (میکرومول بر مترمربع بر ثانیه) Photosynthetic rate ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	میزان کلروفیل Chlorophyll content	هدایت روزنه‌ای (میلی مول بر مترمربع بر ثانیه) Stomatal conductance ($\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	شدت تعرق (میلی مول بر مترمربع بر ثانیه) Transpiration rate ($\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	رطوبت نسبی برگ (درصد) Leaf relative water (%)	درجه آزادی Degree of freedom	
73.79**	8.94**	10.97**	2505.80**	2.27**	18.14**	1	خاک Soil
2.08	0.43	1.35	0.23	0.29	0.45	2	خطا a Error a
136.03**	66.97**	80.79**	18910.68**	32.15**	243.78**	8	کود Fertilizer
870.97**	194.40**	239.59**	59323.45**	53.62**	327.39**	1	رژیم آبیاری Irrigation regime
222.95**	9.48**	9.89**	3213.76**	2.43**	25.40**	8	خاک × کود Soil × Fertilizer
61.50**	10.59**	5.57**	1935.24**	0.41**	9.50**	1	خاک × رژیم آبیاری Soil × Irrigation regime
28.22**	7.14**	5.59**	2567.18**	1.61**	10.69**	8	کود × رژیم آبیاری Fertilizer × irrigation regime
36.40**	3.45**	0.89**	841.67**	0.25**	5.60**	8	خاک × رژیم آبیاری × کود Fertilizer × Irrigation regime × Soil
0.26	0.14	0.15	0.23	0.12	0.15	70	خطا b Error b
2.90	2.32	0.81	0.18	3.88	0.74	-	ضریب تغییرات (درصد) Coefficient of variation (%)

**، * و ns به ترتیب معنی‌دار در سطح ۱ درصد، ۵ درصد و عدم معنی‌داری

**، * and ns are significant at the 1% and 5% level and non-significant respectively

رطوبت نسبی برگ: مقایسه میانگین اثرات متقابل بافت خاک، رژیم آبیاری و منابع مختلف سیلیسیم

(S₁W₂Co) بود (جدول‌های ۴ و ۵). با این حال، در گیاهان تحت تیمار سطوح مختلف منابع سیلیسیم در خاک لومی‌شنی، بیش‌ترین (۵۸/۹ درصد) میزان رطوبت نسبی برگ، در تیمار بایوچار با سطح ۱۲۰ میلی‌گرم سیلیسیم بر کیلوگرم تحت آبیاری غرقاب دائم (S₁W₁Bi₁) مشاهده گردید (جدول ۵).

بیش‌تر از آبیاری متناوب بود. بر اساس نتایج، در میان تمام تیمارهای تحت آزمایش، بیش‌ترین (۶۳/۸ درصد) و کم‌ترین (۳۵/۴۵ درصد) میزان رطوبت نسبی برگ به ترتیب مربوط به تیمار سیلیکات پتاسیم با سطح ۱۲۰ میلی‌گرم سیلیسیم بر کیلوگرم خاک تحت آبیاری غرقاب از خاک رسی سیلتی (S₂W₁Ps₁) و تیمار شاهد خاک لومی‌شنی تحت آبیاری متناوب

جدول ۴- مقایسه میانگین اثر متقابل بافت خاک، رژیم آبیاری و منابع مختلف سیلیسیم بر پارامترهای فتوسنتزی برنج (رقم طارم هاشمی).

Table 4. Comparison of means for interaction effect of soil texture, irrigation regime and different sources of silicon on photosynthetic parameters of rice (Tarom Hashemi variety).

تیمارها Treatments	رطوبت نسبی برگ (درصد) Leaf relative water (%)	شدت تعرق (میلی‌مول بر مترمربع بر ثانیه) Transpiration rate (mmol m ⁻² s ⁻¹)	هدایت روزنه‌ای (میلی‌مول بر مترمربع بر ثانیه) Stomatal conductance (mmol m ⁻² s ⁻¹)	میزان کلروفیل Chlorophyll content	فتوسنتز (میکرومول بر مترمربع بر ثانیه) Photosynthetic rate (μmol m ⁻² s ⁻¹)
S ₂ W ₁ Co	46.21 ^u	6.28 ^q	192.91 ^v	45.10 ^u	12.31 ^f
S ₂ W ₂ Co	43.65 ^v	5.00 ^f	186.86 ^w	42.93 ^v	11.22 ^s
S ₂ W ₁ CS ₁	59.97 ^b	11.48 ^{bc}	350.15 ^c	53.90 ^b	19.57 ^c
S ₂ W ₂ CS ₁	55.87 ^{de}	10.27 ^{de}	315.84 ^f	51.20 ^{cde}	18.83 ^{cd}
S ₂ W ₁ CS ₂	54.04 ^{hi}	9.23 ^{hij}	272.00 ^l	49.20 ^{hij}	16.35 ^{hij}
S ₂ W ₂ CS ₂	51.92 ^{qs}	8.45 ^{lmn}	242.59 ^{ts}	46.60 ^{qr}	14.64 ^{mno}
S ₂ W ₁ Ps ₁	63.80 ^a	12.03 ^a	384.79 ^a	55.00 ^a	24.33 ^a
S ₂ W ₂ Ps ₁	53.39 ^{j-m}	8.96 ^{kl}	261.05 ^o	48.60 ^{ijkl}	15.99 ^j
S ₂ W ₁ Ps ₂	55.37 ^{ef}	9.99 ^{d-g}	312.64 ^g	50.70 ^{ef}	18.78 ^{cd}
S ₂ W ₂ Ps ₂	52.45 ^{nop}	8.72 ^{j-n}	252.37 ^p	47.80 ^{no}	15.11 ^{klm}
S ₂ W ₁ SS ₁	60.40 ^b	11/88 ^{ab}	378.03 ^b	54.80 ^a	21.47 ^b
S ₂ W ₂ SS ₁	52.65 ^{nop}	8.75 ^{j-n}	252.94 ^p	47.87 ^{no}	15.17 ^{klm}
S ₂ W ₁ SS ₂	55.35 ^{ef}	9.94 ^{efg}	305.23 ^h	50.40 ^f	18.54 ^c
S ₂ W ₂ SS ₂	52.88 ^{k-n}	8.87 ^{j-m}	253.73 ^p	47.90 ^{mno}	15.19 ^{kl}
S ₂ W ₁ Bi ₁	55.81 ^c	10.77 ^{def}	312.71 ^g	51.10 ^{de}	18.79 ^{cd}
S ₂ W ₂ Bi ₁	53.55 ^{h-l}	9.06 ^{ijk}	262.31 ^{no}	48.60 ^{ijkl}	16.00 ^j
S ₂ W ₁ Bi ₂	54.07 ^{hi}	9.49 ^{ghi}	272.78 ^l	49.50 ^{ghi}	16.62 ^{ghi}
S ₂ W ₂ Bi ₂	51.99 ^{qrs}	8.61 ^{k-n}	243.39 ^t	47.30 ^{op}	14.82 ^{h-o}

S₂: خاک رسی سیلتی، W₁: رژیم آبیاری غرقاب دائم، W₂: رژیم آبیاری متناوب تری-خشکی، CS₁: سیلیکات کلسیم در سطح ۱۲۰ میلی‌گرم سیلیسیم بر کیلوگرم خاک، CS₂: سیلیکات کلسیم در سطح ۶۰ میلی‌گرم سیلیسیم بر کیلوگرم خاک، PS₁: سیلیکات پتاسیم در سطح ۱۲۰ میلی‌گرم سیلیسیم بر کیلوگرم خاک، PS₂: سیلیکات پتاسیم در سطح ۶۰ میلی‌گرم سیلیسیم بر کیلوگرم خاک، SS₁: سیلیکات سدیم در سطح ۱۲۰ میلی‌گرم سیلیسیم بر کیلوگرم خاک، SS₂: سیلیکات سدیم در سطح ۶۰ میلی‌گرم سیلیسیم بر کیلوگرم خاک، Bi₁: بایوچار در سطح ۱۲۰ میلی‌گرم سیلیسیم بر کیلوگرم خاک، Bi₂: بایوچار در سطح ۶۰ میلی‌گرم سیلیسیم بر کیلوگرم خاک، Co: شاهد (بدون اعمال کود سیلیسیم).

S₁: Silty Clay soil; S₂: Silty clay soil; W₁: Continuous flooding; W₂: Periodic wetting-drying; CS₁: (calcium silicate - 60 mg Si kg⁻¹); CS₂: (calcium silicate - 120 mg Si kg⁻¹); PS₁: (potassium Silicate - 60 mg Si kg⁻¹); PS₂: (potassium Silicate - 120 mg Si kg⁻¹); SS₁: (sodium silicate - 120 mg Si kg⁻¹); SS₂: (sodium silicate - 120 mg Si kg⁻¹); Bi₁ (rice husk biochar - 60 mg Si kg⁻¹); Bi₂ (rice husk biochar - 120 mg Si kg⁻¹); Co: Control (No application of silicon fertilizer)

جدول ۵- مقایسه میانگین اثر متقابل بافت خاک، رژیم آبیاری و سطوح مختلف منابع سیلیسیم، بر پارامترهای فتوسنتزی برنج (رقم طارم هاشمی).

Table 5. Comparison of means for interaction effect of soil texture, irrigation regime, different levels of silicon sources on photosynthetic parameters of rice (Tarom Hashemi variety).

تیمارها Treatments	رطوبت نسبی برگ (درصد) Leaf relative water (%)	شدت تعرق (میلی مول بر مترمربع بر ثانیه) Transpiration rate (mmol m ⁻² s ⁻¹)	هدایت روزنه‌ای (میلی مول بر مترمربع بر ثانیه) Stomatal conductance (mmol m ⁻² s ⁻¹)	میزان کلروفیل Chlorophyll content	فتوسنتز (میکرومول بر مترمربع بر ثانیه) Photosynthetic rate (μmol m ⁻² s ⁻¹)
S ₁ W ₁ Co	40.69 ^w	4.89 ^f	178.53 ^x	41.78 ^w	10.10 ^t
S ₁ W ₂ Co	35.45 ^x	3.00 ^s	150.53 ^y	39.40 ^x	8.46 ^u
S ₁ W ₁ Cs ₁	56.41 ^d	10.48 ^d	325.52 ^c	51.60 ^{cd}	19.23 ^{cd}
S ₁ W ₂ Cs ₁	53.72 ^{ji}	9.20 ^{hij}	266.30 ^m	49.00 ^{ijk}	16.29 ^{ji}
S ₁ W ₁ Cs ₂	53.00 ^{l-o}	8.92 ^{ikl}	254.32 ^p	48.20 ^{lmn}	15.39 ^k
S ₁ W ₂ Cs ₂	51.78 ^{rs}	8.35 ^{mn}	239.76 ^s	46.60 ^{qr}	14.47 ^{no}
S ₁ W ₁ Ps ₁	54.74 ^g	9.88 ^{efg}	283.39 ^j	49.70 ^{gh}	16.99 ^g
S ₁ W ₂ Ps ₁	50.77 ^l	7.63 ^p	217.26 ^u	45.36 ^{tu}	13.66 ^q
S ₁ W ₁ Ps ₂	53.64 ^{ijk}	9.07 ^{ijk}	264.75 ^{mn}	48.70 ^{kl}	16.13 ^{ji}
S ₁ W ₂ Ps ₂	51.96 ^{qrs}	8.50 ^{lmn}	242.95 ^f	46.90 ^{pq}	14.76 ^{l-o}
S ₁ W ₁ Ss ₁	54.69 ^g	9.80 ^{efg}	282.53 ^j	49.70 ^{gh}	16.93 ^g
S ₁ W ₂ Ss ₁	50.87 ^l	7.77 ^{op}	219.41 ^u	45.90 st	13.92 ^{pq}
S ₁ W ₁ Ss ₂	53.07 ^{k-n}	8.96 ^{kl}	260.32 ^o	48.50 ^{klm}	15.97 ^j
S ₁ W ₂ Ss ₂	51.57 ^s	8.29 ^{no}	236.23 ^t	46.10 ^{rs}	14.30 ^{op}
S ₁ W ₁ Bi ₁	58.95 ^c	11.20 ^c	340.32 ^d	51.80 ^c	19.55 ^c
S ₁ W ₂ Bi ₁	54.94 ^{fg}	9.92 ^{efg}	301.51 ⁱ	50.10 ^{fg}	17.76 ^f
S ₁ W ₁ Bi ₂	54.24 ^{gh}	9.69 ^{efg}	278.08 ^k	49.70 ^{gh}	16.83 ^{gh}
S ₁ W ₂ Bi ₂	52.37 ^{pqr}	8.62 ^{k-n}	248.06 ^q	47.60 ^{no}	14.96 ^{l-n}

S₁: خاک لومی شنی، W₁: رژیم آبیاری غرقاب دائم، W₂: رژیم آبیاری متناوب تری-خشکی، CS₁: سیلیکات کلسیم در سطح ۱۲۰ میلی‌گرم سیلیسیم بر کیلوگرم خاک، CS₂: سیلیکات کلسیم در سطح ۶۰ میلی‌گرم سیلیسیم بر کیلوگرم خاک، PS₁: سیلیکات پتاسیم در سطح ۱۲۰ میلی‌گرم سیلیسیم بر کیلوگرم خاک، PS₂: سیلیکات پتاسیم در سطح ۶۰ میلی‌گرم سیلیسیم بر کیلوگرم خاک، SS₁: سیلیکات سدیم در سطح ۱۲۰ میلی‌گرم سیلیسیم بر کیلوگرم خاک، SS₂: سیلیکات سدیم در سطح ۶۰ میلی‌گرم سیلیسیم بر کیلوگرم خاک، Bi₁: بایوچار در سطح ۱۲۰ میلی‌گرم سیلیسیم بر کیلوگرم خاک، Bi₂: بایوچار در سطح ۶۰ میلی‌گرم سیلیسیم بر کیلوگرم خاک، Co: شاهد (بدون اعمال کود سیلیسیم)

S₁: Sandy loam soil; W₁: Continuous flooding; W₂: Periodic wetting-drying; Cs₁: (calcium silicate - 60 mg Si kg⁻¹); Cs₂: (calcium silicate - 120 mg Si kg⁻¹); Ps₁: (potassium Silicate - 60 mg Si kg⁻¹); Ps₂: (potassium Silicate - 120 mg Si kg⁻¹); Ss₁: (sodium silicate - 60 mg Si kg⁻¹); Ss₂: (sodium silicate - 120 mg Si kg⁻¹); Bi₁: (rice husk biochar - 60 mg Si kg⁻¹); Bi₂: (rice husk biochar - 120 mg Si kg⁻¹); Co: Control (No application of silicon fertilizer)

معدنی خاک وجود دارد که مانع گسستگی و آزادسازی عناصر غذایی بایوچار می‌گردد (۵۸).

در خاک رسی سیلتی، میزان رطوبت نسبی برگ گیاهان تحت تیمار منابع مختلف سیلیسیم با سطح ۶۰ میلی‌گرم سیلیسیم بر کیلوگرم، در هر دو رژیم آبیاری غرقاب دائم و آبیاری متناوب تری-خشکی از لحاظ معنی‌داری به صورت "سیلیکات پتاسیم = سیلیکات سدیم < بایوچار = سیلیکات کلسیم" بود (جدول ۴). بر اساس این نتایج، تیمار سیلیکات پتاسیم اختلاف معنی‌داری با تیمار سیلیکات سدیم در افزایش رطوبت

با توجه به نتایج فوق، بهترین تیمارها جهت افزایش رطوبت نسبی برگ (S₁W₁Bi₁ و S₂W₁Ps₁) در دو بافت خاک متفاوت بوده است. پژوهشگران عنوان کردند یکی از اثرات مثبت بایوچار در خاک‌ها بهبود وضعیت آب گیاه است؛ بنابراین باعث افزایش مقادیر اسمزی برگ‌ها می‌شود (۲۳). اما، افزایش اثرات مثبت بایوچار در خاک‌هایی با بافت سبک ناشی از ناپایداری بیش‌تر بایوچار در این خاک‌ها نسبت به خاک با بافت سنگین می‌باشد. زیرا در خاک‌های رسی تعاملات قوی‌تری بین کربن آلی خاک، بایوچار و مواد

نسبی برگ نداشت. پژوهشگران علاوه بر نقش مفید پتاسیم بر پارامترهای فتوسنتزی عنوان کردند که ریزمغذی سدیم یک عنصر ضروری برای گیاهان محسوب نمی‌شود؛ اما در برخی از گیاهان، می‌تواند به‌عنوان جایگزین جزئی برای پتاسیم و کمک به باز و بسته شدن روزنه‌ها به کار رود. بنابراین، در تنظیم تعادل آب داخلی کمک می‌کند (۳۳).

هم‌چنین، در خاک لومی‌شنی با رژیم آبیاری غرقاب میزان رطوبت نسبی برگ به‌صورت "بایوچار" سیلیکات پتاسیم = سیلیکات سدیم ≤ سیلیکات کلسیم" و در رژیم آبیاری متناوب تری-خشکی بصورت "بایوچار = سیلیکات پتاسیم = سیلیکات کلسیم ≤ سیلیکات سدیم" مشاهده شد (جدول ۵). به نظر می‌رسد که افزایش در میزان رطوبت نسبی برگ در گیاهان تحت رژیم آبیاری متناوب تری-خشکی و اعمال سیلیسیم نسبت به شاهد (تیمارهای بدون اعمال منابع کودی سیلیسیم) ناشی از اثر مستقیم سیلیسیم در کنترل روزنه‌ای و بهبود هدایت هیدرولیک ریشه، افزایش سرعت رشد ریشه در ابتدای زندگی گیاه و تنظیم جذب آب باشد (۶۷). هم‌چنین، اختلاف در میزان رطوبت نسبی برگ تیمارها ممکن است نشان‌دهنده حفظ تورژانسس بافت و افزایش فعالیت‌های فیزیولوژیکی تحت منابع مختلف سیلیسیم (۴۱) و کاتیون‌های همراه منابع سیلیسیم (۲۱) باشد. به‌طوری‌که، پتاسیم دارای نقش کلیدی در تنظیم حرکت روزنه‌ها به‌عنوان سازوکار عمده در مهار آب گیاهان و هم‌چنین به‌عنوان ماده اسمزی در واکنش برای نگهداری آب کافی در بافت‌ها در شرایط خشکی می‌باشد (۴۵). هم‌چنین، کلسیم نیز در استحکام دیواره سلول‌ها و حفظ ساختار و کارکرد غشاء نقش کلیدی دارد و قابلیت نگهداری آب سلول‌ها را افزایش می‌دهد (۵۴). خسروی و چشمه‌سرپور (۲۰۱۵) در مطالعه تأثیر محلول‌پاشی کلسیم و پتاسیم بر

پارامترهای فتوسنتزی دو رقم طالبی به این نتایج دست یافتند که تیمارهای تحت اعمال کلسیم، پتاسیم و مخلوط کلسیم+پتاسیم در مقایسه با شاهد باعث افزایش معنی‌دار محتوی رطوبت نسبی برگ در هر دو رقم گردید و تأثیر کلسیم بیش از پتاسیم بود (۳۴). مقصودی و همکاران (۲۰۱۶) در بررسی اثر کم‌آبیاری (۴۰٪، ۶۰٪ و ۱۰۰٪ ظرفیت زراعی) بر پارامترهای فتوسنتزی گیاه گندم به این نتایج رسیدند که کاربرد سیلیسیم باعث افزایش محتوای نسبی رطوبت برگ، میزان کلروفیل، شاخص پایداری کلروفیل و شاخص پایداری غشاء در تمام شرایط آبیاری در گندم شد (۴۲).

شدت تعرق: با توجه به جدول ۴، تیمار $S_2W_1Ps_1$ بیش‌ترین میزان تعرق ($12/03 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) را در میان تمام تیمارهای هر دو بافت خاک به خود اختصاص داده بود؛ که اختلاف معنی‌داری با شدت تعرق در تیمار $S_2W_1Ss_1$ ($11/88 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) نداشت. هم‌چنین، کم‌ترین میزان تعرق ($mmol m^{-2} \text{ s}^{-1}$) بود (۳/۰۰) نیز متعلق به تیمار شاهد (S_2W_1Co) بود (جدول ۴). در خاک لومی‌شنی نیز بیش‌ترین میزان تعرق در گیاهان تحت تیمار بایوچار با سطح ۱۲۰ میلی‌گرم سیلیسیم بر کیلوگرم با آبیاری غرقاب دائم ($11/20 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) مشاهده شد (جدول ۵). در این خاک، شدت تعرق در تیمارهای با سطح ۶۰ میلی‌گرم سیلیسیم بر کیلوگرم از منابع مختلف سیلیسیم با آبیاری غرقاب به‌صورت بایوچار ($9/69 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) ≤ سیلیکات پتاسیم ($9/07 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) = سیلیکات سدیم ($8/96 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) و در آبیاری متناوب تری-خشکی اختلاف معنی‌داری در شدت تعرق گیاهان تحت تیمار منابع مختلف سیلیسیم مشاهده نشد.

در خاک رسی‌سilty تحت رژیم آبیاری غرقاب

(۲۵). اگرچه اکثر پژوهشگران بر این باورند که اعمال سیلیسیم موجب کاهش تعرق گیاه می‌گردد و علت این امر را کاهش تعرق از طریق لایه‌های کوتیکولی ضخیم‌شده توسط سیلیسیم می‌دانند (۱۶)؛ اما این باور بر اساس اندازه‌گیری مستقیم تعرق لایه‌های کوتیکولی برگ‌های منفرد نیست. بلکه، بر اساس مشاهدات هیستوشیمیایی سیلیس رسوب‌کرده و اندازه‌گیری تعرق کل گیاه در شرایط مزرعه است (۶۴).

هدایت روزنه‌ای: نتایج مقایسه میانگین نشان می‌دهد که بیش‌ترین هدایت روزنه‌ای ($\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) $384/79$ و کم‌ترین هدایت روزنه‌ای ($\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) $150/53$ به ترتیب مربوط به رژیم آبیاری غرقاب در گیاهان تحت تیمار سیلیکات پتاسیم در سطح 120 میلی‌گرم سیلیسیم بر کیلوگرم خاک رسی‌سیتی و تیمار شاهد خاک لومی‌شنی با آبیاری متناوب مشاهده شد؛ که اختلاف معنی‌داری ($P < 0/001$) با سایر تیمارها داشتند (جدول‌های ۴ و ۵). در تأیید این نتایج، پژوهشگران علاوه بر نقش مفید سیلیسیم بر هدایت روزنه‌ای (۶۷)، به نقش پتاسیم بر پارامترهای فتوسنتزی نیز اشاره داشتند. آن‌ها عنوان کردند که پتاسیم در تنظیم اسمزی و حفظ فشار آماس سلول‌های زنده گیاهی، باز و بسته شدن روزنه‌ها، نمو سلول، حرکت برگ‌گی و کنترل تعرق و فتوسنتز و فعالیت‌های آنزیمی نقش کلیدی دارد (۳۳).

روند تغییرات هدایت روزنه‌ای در خاک لومی‌شنی در آبیاری غرقاب دائم و سطح 60 میلی‌گرم سیلیسیم بر کیلوگرم خاک به‌صورت بایوچار < سیلیکات پتاسیم < سیلیکات سدیم < سیلیکات کلسیم بود. این روند در خاک رسی‌سیتی بصورت سیلیکات پتاسیم < سیلیکات سدیم < بایوچار < سیلیکات کلسیم بود. در تأیید تأثیر سیلیکات پتاسیم بر هدایت روزنه‌ای، فرازی و همکاران (۲۰۱۸) در بررسی اثر محلول‌پاشی سیلیسیم و پتاسیم بر عملکرد کمی و کیفی چغندر قند

دائم، روند شدت تعرق برگ در تیمارها با سطح 60 میلی‌گرم سیلیسیم بر کیلوگرم به‌صورت سیلیکات پتاسیم ($9/99 \text{ mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) = سیلیکات سدیم ($9/49 \text{ mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) = بایوچار $9/49 \text{ mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ سیلیکات کلسیم ($8/96 \text{ mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) بوده است. با توجه به جدول‌های ۴ و ۵، اگرچه میزان تعرق گیاهان در آبیاری متناوب نسبت به آبیاری غرقاب کم‌تر بود. با این‌حال، میزان تعرق آن‌ها بیش‌تر از تیمارهای بدون اعمال منابع سیلیسیم بودند. این امر ممکن است به دلیل مصرف خاکی کود سیلیسیم و افزایش ظرفیت جذب آب ریشه و به دنبال آن افزایش تعرق نسبت به شاهد باشد (۴۲). این نتایج با گزارشات یاوا و یونای (۲۰۱۷) مطابقت داشت (۶۳). آن‌ها عنوان کردند که گندم‌های تحت تیمار کودهای سیلیسیم که در شرایط کم‌آبی رشد کرده‌اند، دارای هدایت روزنه‌ای، محتوای نسبی رطوبت و پتانسیل آب بیش‌تری نسبت به گندم‌های بدون تیمار سیلیسیم بودند (۶۳). در این شرایط، پژوهشگران عنوان کردند که گیاهان تحت تیمار کود سیلیسیم با شرایط کم‌آبی دارای پهنای منافذ روزنه‌ای کم‌تری نسبت به گیاهان بدون اعمال کود سیلیسیم دارند (۴۳). همچنین، حبیبی (۲۰۱۴) در پژوهشی نشان داد که در کلزا تحت تنش خشکی در مقایسه با آبیاری معمولی سرعت تعرق کاهش می‌یابد؛ که در حالت عدم محلول‌پاشی سیلیسیم این کاهش $50/75$ درصد و در حالت محلول‌پاشی سیلیسیم به صورت سیلیکات سدیم، این کاهش $29/77$ درصد بود (۲۴). همچنین، نتایج این مطالعه مطابق با یافته‌های پیشین در گندم (۳) بوده است.

نتایج گروهی از پژوهشگران با نتایج این مطالعه همخوانی نداشت. در آزمایش این گروه از پژوهشگران، افزودن سیلیسیم و نانوسیلیسیم تأثیر معنی‌داری بر میزان تعرق گیاه گوجه‌فرنگی نداشت

روزنه‌ای، سرعت تعرق و فتوستتز کاهش می‌یابد (۲۸).

پژوهشگران گزارش کردند که کاربرد سیلیسیم تحت شرایط کمبود آب نسبت به شاهد موجب افزایش هدایت روزنه‌ای و سرعت تعرق در گندم شده بود (۶۲). با این وجود پاسخ‌های متفاوت در برنج، گندم و ذرت مشاهده شد. طبق مطالعات انجام‌شده، کاربرد سیلیسیم در این گیاهان باعث کاهش اندازه روزنه و هدایت روزنه شد (۶۷). بنابراین به نظر می‌رسد که شرایط کشت و ژنوتیپ گیاه نقش مهمی در پاسخ گیاهان به سیلیسیم داشته باشد.

شاخص کلروفیل (شاخص سبزینه): نتایج نشان داد که برگ برنج کشت‌شده در خاک رسی سیلتی با آبیاری غرقاب که تحت تیمارهای سیلیکات پتاسیم و سیلیکات سدیم با غلظت ۱۲۰ میلی‌گرم سیلیسیم بر کیلوگرم قرار داشتند؛ به‌طور معنی‌داری عدد کلروفیل‌متر بیشتری را نسبت به سایر تیمارهای تحت آزمایش نشان داد. افزایش قابل‌توجه در محتوای کلروفیل تیمارهای نامبرده، ممکن است به دلیل بهبود وضعیت تغذیه‌ای خاک ناشی از کاتیون‌های همراه و سیلیسیم باشد (۱۲). تأثیر سیلیسیم بر افزایش مقدار کلروفیل برگ از طریق تأثیر بر فعالیت آنزیم ریبولوز بی‌فسفات کربوکسیلاز (۱) و جلوگیری از تخریب کلروفیل توسط سیلیسیم می‌باشد (۲۱). نتایج پژوهش‌های گرامی و همکاران (۲۰۱۲) در بررسی اثر سیلیکات پتاسیم و سیلیکات سدیم (در سه غلظت ۰، ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر) بر گیاه برنج نشان داد که با افزایش سطوح سیلیسیم، مقدار کلروفیل کل، کلروفیل a و کلروفیل b افزایش یافت (۲۱).

بر اساس نتایج، کم‌ترین عدد کلروفیل‌متر (۳۹/۴) مربوط به تیمار شاهد خاک لومی‌شنی تحت رژیم آبیاری متناوب بود (جدول ۵). پژوهشگران عنوان کردند که کاهش غلظت کلروفیل در شرایط کم‌آبی را

در شرایط تنش رطوبتی (۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد نیاز آبی) گزارش کردند که بیش‌ترین هدایت روزنه‌ای در سطح آبیاری کامل (۱۰۰ درصد نیاز آبی) و در تیمار کودی سیلیسیم به‌دست آمد؛ که نسبت به شاهد ۵۷ درصد افزایش داشت. همچنین، اعمال سیلیسیم + پتاسیم سبب بهبود هدایت روزنه‌ای در تیمار ۷۵ درصد نیاز آبی گردید. آن‌ها دلیل این امر را به نقش عناصر سیلیسیم و پتاسیم در کاهش تعرق کوتیکولی و افزایش فشار اسمزی سلول‌های نگهبان نسبت دادند (۱۹).

در میان تمام تیمارهای کودی خاک رسی سیلتی، کم‌ترین میزان هدایت روزنه‌ای برگ ($\text{mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) (۲۴۲/۵۹) در تیمار سیلیکات کلسیم در سطح ۶۰ میلی‌گرم سیلیسیم بر کیلوگرم با شرایط آبیاری متناوب مشاهده شد. اما، در خاک لومی‌شنی تیمارهای سیلیکات پتاسیم و سیلیکات سدیم در سطح ۱۲۰ میلی‌گرم سیلیسیم بر کیلوگرم با آبیاری متناوب کم‌ترین میزان هدایت روزنه‌ای برگ را نشان داد. همچنین بر اساس نتایج، اگرچه در خاک رسی سیلتی با آبیاری غرقاب تیمارهای سیلیکات پتاسیم و سدیم در سطح ۱۲۰ میلی‌گرم سیلیسیم بر کیلوگرم، بهترین تیمارها از لحاظ هدایت روزنه‌ای و پارامترهای فتوستتزی بودند. اما تحت شرایط آبیاری متناوب، گیاهان تحت تیمار سیلیکات کلسیم با سطح ۱۲۰ میلی‌گرم سیلیسیم بر کیلوگرم خاک دارای بیش‌ترین هدایت روزنه‌ای بودند. این امر ممکن است به دلیل نقش کلسیم در تنظیم روابط آبی، فعالیت سیستم‌های آنتی‌اکسیدانی، انباشت اسمولیت‌ها و تعادل تغذیه‌ای تحت تنش آبی باشد (۱۵). پژوهشگران عنوان کردند که بسته شدن روزنه اولین دلیل کم شدن سرعت فتوستتز در شرایط کم‌آبی متوسط است (۴۹). زمانی که گیاه با دوره کم آبی از رژیم آبیاری متناوب مواجه می‌شود؛ در نتیجه بسته شدن روزنه‌ها و کاهش هدایت

تیمار شده با سطح ۶۰ میلی گرم سیلیسیم بر کیلوگرم خاک، تیمار سیلیکات پتاسیم و سیلیکات سدیم بدون اختلاف معنی دار نسبت به هم، بیشترین میزان کلروفیل را به خود اختصاص دادند (جدول ۴).
خواجه و همکاران (۲۰۱۵) در بررسی اثر تنش کم آبی (۵۰، ۷۵ و ۹۰ درصد ظرفیت زراعی) و محلول پاشی سیلیسیم (۱ و ۱/۵ میلی مولار) بر عملکرد و رنگیزه‌های فتوسنتزی گندم به این نتایج دست یافتند که تنش خشکی شدید (۲۵ درصد) و متوسط (۷۵ درصد) به ترتیب باعث کاهش ۲۷/۷۳ و ۱۸/۸۶ درصدی در میزان کلروفیل a شده بود. در صورتی که، کاربرد سیلیسیم مانع از کاهش محتوای کلروفیل در شرایط تنش گردید (۳۲).

با توجه به نتایج، گیاهانی که با منابع سیلیسیم تیمار شدند، تغییراتی را با درجات مختلف نشان می‌دهند که بستگی به میزان اعمال سیلیسیم دارد. بر خلاف خاک رسی سیتی که همواره سطوح بالای سیلیسیم در تیمارها تحت آبیاری متناوب منجر به افزایش پارامتر محتوای کلروفیل گردید، اما در خاک لومی شنی با رژیم آبیاری متناوب، در بالاترین سطح غلظت سیلیسیم در تیمار سیلیکات پتاسیم و سیلیکات سدیم، میزان کلروفیل برگ کاهش یافت. در این تیمارها، سطح ۶۰ میلی گرم سیلیسیم بر کیلوگرم از منابع سیلیسیم مذکور، افزایش بیشتری را در میزان کلروفیل نسبت به سطح ۱۲۰ میلی گرم سیلیسیم بر کیلوگرم نشان دادند. این افزایش در تیمارهای سیلیکات پتاسیم و سیلیکات سدیم به ترتیب در حدود ۳/۲۸ و ۰/۴۳ درصد بود. پژوهشگران گزارش دادند دلیل این امر ممکن است ناشی از افزایش مقدار EC و pH خاک به دلیل سطوح بالای سیلیسیم (۲۷) و یا غلظت‌های بالای سدیم باشد؛ که به طور مستقیم می‌تواند باعث تخریب کلروفیل و رنگ پدیدگی و کلروزه شدن برگ‌ها شود (۱۸). روند تغییرات میزان

می‌توان به افزایش فعالیت آنزیم تجزیه‌کننده کلروفیل به نام کلروفیلاز نسبت داد (۵۶).

بیشترین عدد کلروفیل متر (۵۱/۲) در رژیم آبیاری متناوب خاک رسی سیتی در تیمار سیلیکات کلسیم در سطح ۱۲۰ میلی گرم سیلیسیم بر کیلوگرم خاک مشاهده شد. تأثیر مثبت سیلیسیم بر میزان کلروفیل تحت شرایط کم آبی به اثبات رسیده است (۴۱).
همچنین، عناصر غذایی همراه منابع سیلیسیم نیز می‌توانند نقش مهمی را در افزایش کلروفیل برگ بازی کنند. به طوری که، پژوهشگران عنوان کردند که کلسیم در شرایط تنش آبی موجب بهبود محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی می‌گردد (۱۵). صالح و همکاران (۲۰۱۹) در بررسی اثر سیلیسیم (۸، ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ میلی گرم سیلیسیم بر کیلوگرم خاک) بر رشد برنج و غلظت کلروفیل تحت شرایط تنش شوری (۰/۴۶، ۰/۲، ۰/۴ و ۰/۸ دسی‌سیمنز بر متر) گزارش کردند که غلظت کلروفیل با افزایش شوری کاهش یافت؛ با این حال، اعمال سیلیسیم منجر به افزایش کلروفیل در گیاهان تحت تنش شده بود (۵۵). ژو و همکاران (۲۰۱۵) نیز گزارش کردند که افزودن سیلیسیم منجر به افزایش کلروفیل و فعالیت آنزیم ریبولوز بی‌فسفات کربوکسیلاز در گیاه دارویی لنینکرا جاپنیکا شده بود (۶۶).

اگرچه تیمارهای خاک رسی سیتی نسبت به خاک لومی شنی در هر دو رژیم آبیاری بیشترین محتوای کلروفیل را نشان دادند؛ اما تأثیر اعمال سیلیسیم بر میزان کلروفیل تیمارهای خاک لومی شنی نیز نسبت به تیمارهای شاهد چشمگیر بود. به طوری که، تیمار بایوچار این خاک، در سطح ۱۲۰ میلی گرم سیلیسیم بر کیلوگرم در هر دو رژیم آبیاری، بیشترین محتوای کلروفیل را نسبت به تیمارهای شاهد به خود اختصاص داد (جدول ۵). قابل ذکر است که در خاک رسی سیتی تحت رژیم آبیاری غرقاب، در میان گیاهان

سطح ۶۰ میلی گرم سیلیسیم بر کیلوگرم، روند افزایشی میزان فتوستتزر برنج تحت تیمار به صورت $S_2W_2SS_2$ ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) $S_2W_2Ps_2 = (15/19)$ $S_2W_2Bi_2 = (15/11)$ $S_2W_2Co_2 < (14/82)$ $S_2W_2Cs_2 < (14/64)$ $S_2W_2Co_2 < (14/64)$ $S_2W_2Cs_2$ احتمالاً (جدول ۴). افزایش فتوستتزر ناشی از اعمال سیلیسیم تحت شرایط کم آبی به دلیل افزایش فعالیت آنزیم‌های فتوستتزی و محتوای کلروفیل است (۵۷). در مطالعه حاضر، بین هدایت روزنه‌ای و سرعت فتوستتزر در واحد سطح برگ تیمارها در هر دو رژیم آبیاری روند کاهشی و/یا افزایشی مشابهی وجود داشت. رابطه مثبت فتوستتزر و هدایت روزنه‌ای می‌تواند به دلیل افزایش هدایت روزنه‌ای و ورود بیش‌تر دی‌اکسیدکربن جهت مصرف در فتوستتزر باشد (۹).

در بین تیمارهای خاک لومی‌شنی با رژیم آبیاری غرقاب، بایوچار در سطح ۱۲۰ میلی گرم سیلیسیم بر کیلوگرم به عنوان بهترین تیمار در سرعت فتوستتزر گیاهان، اختلاف معنی‌داری را با سیلیکات کلسیم در سطح ۱۲۰ میلی گرم سیلیسیم بر کیلوگرم، نشان نداد (جدول ۵). در خاک لومی‌شنی تحت آبیاری متناوب، گیاهان تیمار شده با سیلیکات پتاسیم و سیلیکات سدیم در سطح ۱۲۰ میلی گرم سیلیسیم بر کیلوگرم سرعت فتوستتزی کم‌تری را نسبت به غلظت ۶۰ میلی گرم سیلیسیم بر کیلوگرم دارا بودند. به نظر می‌رسد مقادیر بالای سیلیسیم دارای اثرات بازدارنده‌ای بر کارکرد دستگاه فتوستتزر داشته باشد (۹). سونوب و همکاران (۲۰۱۱) تغییرات روزانه مبادله گاز در سورگوم را بررسی کردند و دریافتند که گیاهان تحت تیمار سیلیسیم نسبت به گیاهان تیمار نشده، دارای تعرق، فتوستتزر و هدایت روزنه‌ای بالاتری بودند (۵۹). افزایش میزان فتوستتزر در تیمارهای تحت رژیم آبیاری غرقاب در هر دو بافت خاک نسبت به آبیاری

کلروفیل تیمارها، با روند تغییرات میزان فتوستتزر مطابقت داشت (جدول ۳). پژوهشگران بیان نمودند که کلروفیل‌ها نه تنها در ظرفیت بلکه در کارایی فتوستتزر گیاهان نیز نقش دارند. به طوری که، مقادیر بالاتر کلروفیل می‌تواند نشانگر عملکرد (۴۸) و سرعت فتوستتزر بالاتر (۲) باشد. همچنین با افزایش رنگدانه‌های کلروفیل، آسیمیلسیون فرآیندهای فتوستتزی افزایش یافته و در پی آن سهم انتقال مواد فتوستتزی به ریشه‌ها افزایش می‌یابد (۶۵).

فتوستتزر: نتایج آزمایش نشان داد که بیش‌ترین ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) $(24/3)$ و کم‌ترین ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) $(8/66)$ میزان فتوستتزر به ترتیب مربوط به گیاهان تحت تیمار سیلیکات پتاسیم با غلظت ۱۲۰ میلی گرم سیلیسیم بر کیلوگرم در خاک رسی‌سilty با آبیاری غرقاب و تیمار شاهد خاک لومی‌شنی تحت رژیم آبیاری متناوب بود (جدول‌های ۴ و ۵). ژو و همکاران (۲۰۱۵) نیز در آزمایش‌های خود مشاهده کردند که شرایط کم‌آبی در طی دوره پر شدگی دانه برنج موجب کاهش میزان فتوستتزر خالص و هدایت روزنه‌ای شد (۶۶). در خاک رسی‌سilty با رژیم آبیاری غرقاب، میزان فتوستتزر برگ در تیمار سیلیکات پتاسیم در سطح ۶۰ میلی گرم سیلیسیم بر کیلوگرم با تیمار سیلیکات سدیم اختلاف معنی‌داری نداشت. اسمر و همکاران (۲۰۱۳) به نتایج مشابهی دست یافتند. آن‌ها گزارش کردند که تیمار سیلیکات سدیم موجب افزایش فتوستتزر برگ گیاهچه‌های موز شد (۴). هم‌چنین، سعادتیان و همکاران (۲۰۱۵) در ارزیابی اثر محلول‌پاشی ذرات نانو و میکرو سیلیکات سدیم بر خصوصیات فتوستتزی برگ گیاهچه سیب‌زمینی گزارش کردند که سیلیسیم بر صفات شاخص کلروفیل، حداکثر فلورسانس کلروفیل، عملکرد کوانتومی فتوسیستم II و فتوستتزر اثر مثبت داشت (۵۳). در آبیاری متناوب خاک رسی‌سilty در

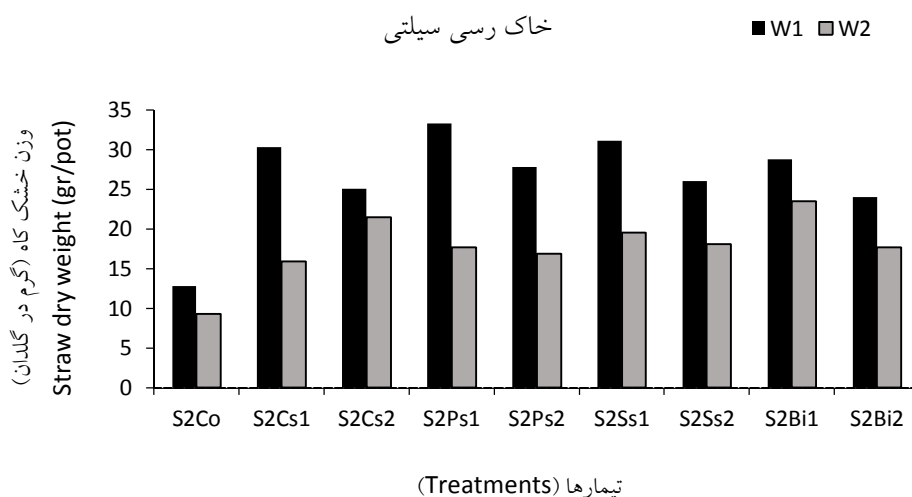
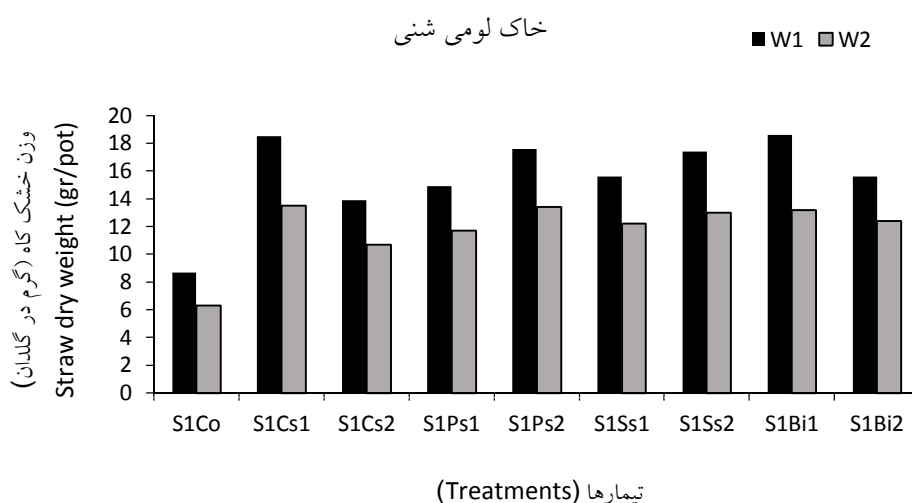
کمپوست و سنگ آهک منیزیم) بر رشد و عملکرد برنج گزارش کردند که کمپوست و به دنبال آن تیمار بایوچار، بهترین اصلاح‌کننده‌ها جهت افزایش فتوسنتز و وزن خشک برنج بوده است (۲۶). هم‌چنین در نتیجه کاربرد سیلیکات پتاسیم، پژوهشگران علاوه بر نقش سیلیسیم بر افزایش وزن خشک کاه، به نقش پتاسیم در انتقال مواد حاصل از فتوسنتز نیز اشاره داشتند. آن‌ها عنوان کردند که پتاسیم احتمالاً منجر به افزایش تولید آدنوزین تری فسفات می‌شود؛ که خود در بارگیری آوندهای آبکشی با مواد ساخته‌شده فتوسنتزی (مواد هیدروکربن) ضروری است (۳۸). عباسی و همکاران (۲۰۱۲) در بررسی اثر رژیم آبیاری (غرقاب دائم، غرقاب متناوب و اشباع متناوب) و اعمال کودهای آلی و شیمیایی مختلف (کود شیمیایی، لجن فاضلاب و کود مرغی) بر وزن خشک بخش هوایی برنج عنوان کردند که بیش‌ترین وزن خشک کاه در تیمار آبیاری غرقاب دائم بود که اختلاف معنی‌داری با تیمارهای تحت آبیاری غرقاب متناوب نداشتند (۱).

تحت شرایط آبیاری غرقاب دائم، وزن خشک کاه (گرم در هر کپه) تیمارها در هر دو خاک از لحاظ معنی‌داری به‌صورت زیر بود:

$$\begin{aligned} \text{خاک لومی‌شنی: } & \text{Cs}_1 (18/5) = \text{Bi}_1 (18/6) \\ & \text{Cs}_1 (18/5) = \text{Ss}_1 (15/6) \leq \text{Ss}_2 (17/4) = \text{Ps}_2 (17/6) \\ & \text{Co (8/7)} < \text{Cs}_2 (13/9) \leq \text{Ps}_1 (14/9) = \text{Bi}_2 \\ \text{خاک رسی‌سilty: } & \text{Ss}_1 (33/1) < \text{Ps}_1 (33/3) \\ & \text{Ps}_2 (27/8) = \text{Bi}_1 (28/8) \leq \text{Cs}_1 (30/3) \\ & \text{Co (12/8)} < \text{Bi}_2 (24/0) \leq \text{Cs}_2 (25/1) = \text{Ss}_2 \end{aligned}$$

متناوب تری-خشکی، علاوه بر افزایش هدایت روزنه‌ای، ناشی از افزایش هدایت مزوفیلی نیز می‌باشد. در شرایط کم‌آبیاری، سیلیسیم باعث افزایش محدودیت مزوفیلی در مقایسه با محدودیت روزنه‌ای می‌شود (۲۰). بنابراین، تیمارهای تحت اعمال سیلیسیم نسبت به تیمارهای شاهد که با هر دو محدودیت مزوفیلی و روزنه‌ای مواجه هستند، دارای اسیمپلاسیون بیش‌تر دی اکسید کربن جهت انجام فرایند فتوسنتز می‌باشند (۲۰). شن و همکاران (۲۰۱۰) در مطالعه‌ای مبنی بر تأثیر سیلیسیم (۱/۷ میلی‌مولار) بر پارامترهای فتوسنتز و آنتی‌اکسیدان‌های گیاه سویا تحت شرایط خشکی به این نتایج دست یافتند که فتوسنتز برگ سویا در نتیجه شرایط خشکی کاهش و در اثر مصرف سیلیسیم تحت شرایط تنش، این پارامتر بهبود یافت. آن‌ها دلیل این امر را افزایش فعالیت آنزیم‌های فتوسنتز، مقدار کلروفیل و محتوای آنتوسیانین در شرایط تنش دانستند (۵۷).

وزن خشک کاه در گلدان: نتایج نشان داد که در خاک لومی‌شنی و رسی‌سilty بیش‌ترین وزن خشک کاه به ترتیب مربوط به تیمار بایوچار (۱۸/۶ گرم در هر کپه) و سیلیکات پتاسیم (۳۳/۳ گرم در هر کپه) در شرایط آبیاری غرقاب دائم با سطح ۱۲۰ میلی‌گرم سیلیسیم بر کیلوگرم بود (شکل ۱). افزایش وزن ماده خشک به دلیل کاربرد سیلیسیم ممکن است به نقش مفید آن در ابقاء فعالیت فتوسنتزی، افزایش پروتئین محلول در برگ و میزان قند محلول در گیاه، انباشتگی ماده خشک و جذب N، P، K و Si توسط برنج مرتبط باشد (۱۳). هلم و همکاران (۲۰۱۸) در مطالعه اثرات اصلاح‌کننده‌های خاک (بایوچار، بازالت،



شکل ۱- اثر متقابل بافت خاک، رژیم آبیاری و منابع مختلف سیلیسیم بر وزن خشک کاه (کلمات مخفف در جدول ۳ توضیح داده شد).

Figure 1. Interaction effect of soil texture, irrigation regime and different sources of silicon on dry weight of straw (Abbreviations were described in Table 3).

به نظر می‌رسد که افزایش وزن خشک کاه در تیمارهای سیلیکات کلسیم و سیلیکات پتاسیم می‌تواند به عناصر همراه منابع سیلیکاته نیز مرتبط باشد. زیرا، پژوهشگران عنوان کردند که کلسیم (۲) و پتاسیم (۲۶) نقش مهمی در بسیاری از فرآیندهای فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی مورد نیاز برای تقویت و رشد و نمو رویشی از جمله تقسیم و طول‌شدگی سلول دارند؛ که می‌تواند به‌طور غیرمستقیم تعداد برگ

و در رژیم آبیاری متناوب تری-خشکی این ترتیب به‌صورت زیر بود:

خاک لومی‌شنی: $=Bi_1 (13/2) =Cs_1 (13/5)$
 $(12/2) =Bi_2 (12/4) =Ss_2 (13/0) =Ps_2 (13/4)$
 $Co (6/3) <Cs_2 (10/7) =Ps_1 (11/7) \leq Ss_1$
 خاک رسی سیلتی: $<Cs_2 (21/5) <Bi_1 (23/5)$
 $(17/7) =Ps_1 (17/7) \leq Ss_2 (18/1) =Ss_1 (19/5)$
 $Co (9/3) <Cs_1 (15/9) =Ps_2 (16/9) =Bi_2$

نتیجه گیری

نتایج نشان داد که پارامترهای فتوسنتزی تحت تأثیر نوع خاک، رژیم آبیاری و منابع مختلف سیلیسیم قرار گرفت. تیمار سیلیکات پتاسیم با سطح ۱۲۰ میلی گرم سیلیسیم بر کیلوگرم با آبیاری غرقاب دائم در خاک رسی سیلتی بیشترین اثر را در جهت بهبود پارامترهای فتوسنتزی داشت. قابل ذکر است که تیمار بایوچار با سطح ۱۲۰ میلی گرم سیلیسیم بر کیلوگرم بهترین تیمار در خاک لومی شنی در هر دو رژیم آبیاری جهت بهبود پارامترهای فتوسنتزی بود. هم‌چنین، تیمارهای نام‌برده بیشترین وزن خشک کاه را نشان دادند. بر اساس این مطالعه، اگرچه در اکثر منابع سیلیسیم، سطوح ۱۲۰ میلی گرم سیلیسیم بر کیلوگرم نسبت به سطوح ۶۰ میلی گرم سیلیسیم بر کیلوگرم بیشترین میزان فتوسنتز و وزن خشک کاه را نشان دادند. اما، در آبیاری متناوب تری-خشکی خاک لومی شنی، تیمارهای سیلیکات پتاسیم و سیلیکات سدیم در سطح ۵۰۰ کیلوگرم سیلیسیم کاهش معنی داری در میزان پارامترهای فتوسنتزی و وزن خشک کاه نسبت به سطح ۶۰ میلی گرم سیلیسیم بر کیلوگرم داشت. در محدوده این آزمایش، رژیم آبیاری غرقاب دائم نسبت به آبیاری متناوب شرایط بهتری برای برنج فراهم کرد. بنابراین، جهت استفاده از رژیم آبیاری متناوب تری-خشکی در کشت برنج پیشنهاد می‌گردد که شدت و مدت زمان آبیاری مناسب‌تری اعمال و پژوهش شود. با این حال، استفاده از سیلیسیم جهت بهبود شرایط فتوسنتز گیاه برنج در رژیم آبیاری متناوب رضایتبخش بود، اما میزان مصرف این عنصر جهت حفظ تعادل خصوصیات خاک و گیاه بسیار مهم است.

را افزایش دهد. هم‌چنین، کونگ و همکاران (۲۰۱۷) بیان کردند که بهبود عملکرد کاه پس از اعمال سیلیسیم ممکن است ناشی از افزایش رشد، اجزای عملکرد، بهبود جذب مواد مغذی، کاهش تنش زیستی و غیرزیستی، افزایش زیست‌پذیری دانه گرده و بهبود پشتیبانی ساختاری و زیست‌توده باشد (۱۴).

بر اساس نتایج، وزن خشک کاه در تیمارهای تحت آبیاری غرقاب دائم بیش‌تر از آبیاری متناوب بود. میرلوحی و همکاران (۲۰۰۴) نشان دادند که در شرایط غرقاب بعضی عناصر غذایی به شکل محلول و قابل جذب گیاه تبدیل می‌شود؛ در نتیجه، باعث رشد بهتر گیاه و افزایش وزن خشک آن می‌گردد (۴۴). اما، نتایج گروهی از پژوهشگران با نتایج این مطالعه مغایرت داشت. رضایی و نحوی (۲۰۰۷) گزارش نمودند که اثر تیمار آبیاری (غرقاب دائم، ۸، ۵ و ۱۱ روز آبیاری) بر صفات عملکرد و اجزای عملکرد برنج معنی‌دار نبود و این صفات بیش‌تر از آنچه که تحت تأثیر تیمارهای آبیاری اعمال شده باشد؛ تحت تأثیر شرایط جوی و تغییر عوامل هواشناسی می‌باشد (۵۱). هم‌چنین، گیلانی و آبسالان (۲۰۰۴) نیز در پژوهش‌های خود درباره مقایسه مدیریت‌های آبیاری بر عملکرد برنج، تغییر معنی‌داری در آبیاری‌های مختلف مشاهده نکردند (۲۲). لیموچی و همکاران (۲۰۱۸) در یک پژوهش مزرعه‌ای مبنی بر تأثیر رژیم‌های مختلف آبیاری (۱، ۳، ۵ و ۷ روز یکبار دور آبیاری) بر صفات رویشی و زایشی ژنوتیپ‌های برنج هوازی به این نتایج دست یافتند که وزن ماده خشک در شرایط آبیاری یک روزه (غرقاب) به دلیل افزایش شستشوی مواد غذایی و خارج از دسترس کردن آن‌ها توسط گیاه کاهش یافته بود (۳۹).

منابع

1. Abbasi, M., Najafi, N., Aliasgharzad, N., and Oustan, Sh. 2012. Effects of soil water conditions, sewage sludge, poultry manure and chemical fertilizers on the growth characteristics and water use efficiency of rice plant in a calcareous soil. Tabriz, Journal of Soil and Water Knowledge. 23: 1. 190-208. (In Persian)
2. Anjum, S.A., Xie, X.Y., Wang, L.C., Saleem, M.F., Man, C., and Lei, W. 2011. Morphological, physiological and biochemical responses of plants to drought stress. African Journal of Agricultural Research. 6: 9. 2026-2032.
3. Araya, A., Prasad, P.V.V., Gowda, P.H., Kisekka, I., and Foster, A.J. 2019. Yield and water productivity of winter wheat under various irrigation capacities. Journal of the American Water Resources Association. 55: 5. 24-37.
4. Asmar, S.A., Castro, E.M., Pasqual, M., Pereira, F.J., and Soares, J.D.R. 2013. Changes in leaf anatomy and photosynthesis of micro propagated banana plantlets under different silicon sources. Scientia Horticulturae. 161: 328-332.
5. Avila, L.A., Martini, L.F.D., Mezzomo, R.F., Refatti, J.P., Campos, R., Cezimbra, D.M., Machado, S.L.O., Massey, J.H., Carlesso, R., and Marchesan, E. 2015. Rice water use efficiency and yield under continuous and intermittent irrigation. Agronomy Journal. 107: 2. 442-448.
6. Barbosa, M.P., Snyder, G.H., Elliott, C.L., and Datnoff, L.E. 2001. Evaluation of soil test procedures for determining rice-available silicon. Communications in Soil Science and Plant Analysis. 32: 11. 1779-1792.
7. Barnes, R.B., Richardson, D., Berry, J.W., and Hood, R.L. 1945. Flame photometry a rapid analytical procedure. Industrial and engineering. 17: 10. 605-611.
8. Bigam, J.M. 1996. Chemical Methods. P 49-64. In: D.L. Sparks, A.L. Page, P.A. Helmke, R.H. Loeppert, P.N. Soltanpour, M.A. Tabatabai, C.T. Johnston and M.E. Sumner (eds), Method of soil analysis, The Soil Science Society of America, USA.
9. Blanco, I.A., Rajaram, S., Kronstad, W.E., and Reynolds, M.O. 2000. Physiological performance of synthetic hexaploid wheat-derived populations. Crop Science. 40: 5. 1257-1263.
10. Bremner, J.M., and Edwards, A.P. 1965. Determination and isotope-ratio analysis of different forms of nitrogen in soils: I. Apparatus and procedure for distillation and determination of ammonium. Soil Science Society of America. 29: 504-507.
11. Carrijo, D.R., Lundy, M.E., and Linquist, B.A. 2016. Rice yields and water use under alternate wetting and drying irrigation: A meta-analysis. Field Crops Research. 203: 173-180.
12. Chen, W., Yao, X., Cai, K., and Chen, J. 2011. Silicon alleviates drought stress of rice plants by improving plant water status, photosynthesis and mineral nutrient absorption. Biological Trace Element Research. 142: 1. 67-76.
13. Crooks, R., and Prentice, P. 2017. Extensive investigation into field based responses to a silica fertilizer. Silicon. 9: 2. 301-304.
14. Cuong, T.X., Ullah, H., Datta, A., and Hanh, T.C. 2017. Effects of silicon-based fertilizer on growth, yield and nutrient uptake of rice in tropical zone of Vietnam. Rice Science. 24: 5. 283-290.
15. Elkelish, A.A., Alnusaie, T.S., Soliman, M.H., Gowayed, S., Senousy, H.H., and Fahad, S. 2019. Calcium availability regulates antioxidant system, physio-biochemical activities and alleviates salinity stress mediated oxidative damage in soybean seedlings. Journal of Applied Botany and Food Quality. 92: 258-266.
16. Epstein, E. 1999. The anomaly of silicon in plant biology. Proceedings of the National Academy of Sciences. 91: 1. 11-17.
17. Faleh, A. 2020. The effect of granular silicate fertilizers on vegetative growth and rice yield. Paddy Extension Magazine. 1: 2. 22-26.

18. Fallah, A. 2011. Investigation of the application of silicate fertilizer on the prevalence of pests and important diseases of rice. National Rice Research Institute Press, 33p. (In Persian)
19. Farazi, M., Rezaei, J., Nezami, A., Nasiri Mahalati, M., and Goldani, M. 2018. Investigating the effect of silicon and potassium foliar spraying and additional soil application of potassium on quantitative and qualitative yield of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) under moisture stress conditions. Journal of Applied Agricultural Research. 31: 3. 1-19.
20. Flexas, J., Barbour, M.M., Brendel, O., Cabrera, H.M., Carriquí, M., Díaz-Espejo, A., Doutheç, C., Dreyer, E., Ferrio, J.P., and Gagoa, J. 2012. Mesophyll diffusion conductance to CO₂: An unappreciated central player in photosynthesis. Plant Science. 193: 3. 70-84.
21. Gerami, M., Fallah, A., and Moghadam, M.R.K. 2012. Study of potassium and sodium silicate on the morphological and chlorophyll content on the rice plant in pot experiment (*Oryza sativa* L.). International Journal of Agriculture and Crop Sciences. 4: 10. 658-661.
22. Gilani, A., and Absalan, Sh. 2004. The effect of surface irrigation regimes on yield and growth indices of three rice cultivars in Khuzestan province. Final report of the research project, National Rice Research Institute. (In Persian)
23. González, M.E., Cea, M., Medina, J., González, A., Diez, M.C., Cartes, P., Monreal, C., and Navia, R. 2015. Evaluation of biodegradable polymers as encapsulating agents for the development of a urea controlled-release fertilizer using biochar as support material. Science of the Total Environment. 505: 1. 446-453.
24. Habibi, G. 2014. Silicon supplementation improves drought tolerance in canola plants. Russian Journal of Plant Physiology. 61: 784-791.
25. Haghghi, M., and Muzaffarian, M. 2014. Investigation of vegetative, morphological and photosynthetic changes of tomatoes due to silicon and nanosilicon added to the nutrient solution. Isfahan, Science and Technology of Greenhouse Cultivation. 5: 19. 37-47. (In Persian)
26. Halim, N.S.A., Abdullah, R., Karsani, S.A., Osman, N., Panhwar, Q.A., and Ishak, C.F. 2018. Influence of soil amendments on the growth and yield of rice in acidic soil. Agronomy. 8: 9. 165-175.
27. Haynes, R.J., Belyaeva, O.N., and Kingston, G. 2013. Evaluation of industrial wastes as sources of fertilizer Si using chemical extractions and plant uptake. Journal of Plant Nutrition and Soil Science. 176: 2. 238-248.
28. Hirayama, M., Wada, Y., and Nemoto, H. 2006. Estimation of drought tolerance based on leaf temperature in upland rice breeding. Breeding Science. 56: 1. 47-54.
29. Islam, M., Latif, A.S., Islam, M., Hossain, B., Nessa, T., Ansari, M., and Ali, J. 2015. Rice vision for Bangladesh: 2050 and beyond. Bangladesh Rice Journal. 19: 2. 1-18.
30. Jackson, M.L. 1973. Soil chemical analysis. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, India. 498p.
31. Kato, Y., and Katsura, K. 2014. Rice adaptation to aerobic soils: physiological considerations and implications for agronomy. Plant Production Science. 17: 1. 1-12.
32. Khajeh, M., Sirousmehr, A., Yadalahi Dehcheshmeh, P., and Amiri, A. 2015. The effect of water stress and silicon foliar application on yield and photosynthetic pigments of wheat in Sistan region. Ahvaz, Journal of Crop Physiology. 7: 26. 5-19. (In Persian)
33. Khayyat, M., Tafazoli, E., Eshghi, S., Rahemi, M., and Rajaei, S. 2007. Salinity, supplementary calcium and potassium effects on fruit yield and quality of strawberry (*Fragaria ananassa* Duch.). Journal of Agriculture and Environmental Science. 2: 5. 539-544.
34. Khosravi Mashizi, M., and Sarcheshmehpour, M. 2015. The effect of calcium and potassium foliar application on plant growth, yield and

- post-harvest characteristics of two cantaloupe cultivars (*L. Cucumismelo*). Isfahan, Journal of Production and Processing of Crops and Horticultural Products. 5: 17. 295-310. (In Persian)
35. Kilmer, V.J., and Alexander, L.T. 1949. Methods of making mechanical analyses of soils. Soil Science. 68: 1. 15-24.
36. Korndörfer, G.H., Snyder, G.H., Ulloa, G.H., Powell, M., and Datnoff, L.E. 2001. Calibration of soil and plant silicon analysis for rice production. Journal of Plant Nutrition. 24: 7. 1071-1084.
37. Lee, Y., Park, J., Ryu, C., Gang, K.S., Yang, W., Park, Y.K., Jung, J., and Hyun, S. 2013. Comparison of biochar properties from biomass residues produced by slow pyrolysis at 500°C. Bioresource Technology. 148: 196-201.
38. Liesche, J. 2015. How regulation of phloem transport could link potassium fertilization to increased growth. Tree Physiology. 36: 1. 1-5.
39. Limouchi, K., Fateminick, F., Siyadat, A., Yarnia, M., Guilani, A., and Rashidi, V. 2018. Effect of different irrigation regimes on the vegetative and reproductive traits of aerobic rice genotypes in the north of Khuzestan. Isfahan, Journal of Crop Production and Processing. 8: 3. 63-78. (In Persian)
40. Lindsay, W.L., and Norvell, W.A. 1978. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. Journal of Soil Science Society American. 42: 421-428.
41. Ma, Q., Wang, W., Li, Y.H., Li, D.Q., and Zou, Q. 2006. Alleviation of photoinhibition in drought stressed wheat (*Triticum aestivum*) by foliar applied glycinebetaine. Journal of Plant Physiology. 163: 2. 165-175.
42. Maghsoudi, K., Emami, Y., and Ashraf, M. 2015. Influence of foliar application of silicon on chlorophyll fluorescence, photosynthetic pigments, and growth in water-stressed wheat cultivars differing in drought tolerance. Turkish Journal of Botany. 39: 4. 625-634.
43. Meena, V.D., Dotaniya, M.L., Coumar, V., Rajendiran, S., Kundu, S., and Subba Rao, A. 2014. A case for silicon fertilization to improve crop yields in tropical soils. Biological Sciences. 84: 3. 505-518.
44. Mirlouhi, A.F., Ehtemam, M.H., and Sabzalian, M. 2004. Investigating the factors of better appearance of rice in flooded conditions using Iranian cultivars. Isfahan, Journal of Agricultural Science and Technology and Natural Resources. 8: 2. 121-133. (In Persian)
45. Moez ardalan, M., and Savabeghi Firozabadi, G. 1997. Nutrition of fruit trees. Institution of Jahad Press, 259p. (In Persian)
46. Nelson, D.W., and Sommers, L.E. 1996. Total carbon, organic carbon and organic matter. P 303-450. In: A.L. Page (eds.), Methods of Soil Analysis, Madison, Wisconsin.
47. Olsen, S.R., Cole, C.V., Watanabe, F.S., and Dean, L.A. 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. Department of Agriculture, Washington. 19p.
48. Parthasarathi, T., and Vanitha, P. 2012. Lakshamanakumar and D. Kalaiyarasi. Aerobic rice-mitigating water stress for the future climate change. International journal of Agronomy and Plant Production. 3: 7. 241-254.
49. Pirasteh-Anosheh, H., Saed-Moucheshi, A., Pakniyat, H., and Pessarakli, M. 2016. Stomatal responses to drought stress. P 24-40. In: P. Ahmad (ed.), Water Stress and Crop Plants: A Sustainable Approach, Wiley Online Library, USA.
50. Prakongkep, N., Gilkes, R.J., Wiriyakitnatekul, W., Duangchan, A., and Darunsontaya, T. 2013. The effects of pyrolysis conditions on the chemical and physical properties of rice husk Biochar. International Journal of Material Science. 3: 3. 97-103.
51. Rezaei, M., and Nahvi, M. 2007. Investigation of the effect of irrigation cycle in clay soils on water use efficiency and some traits of two local rice cultivars in Guilan province. Guilan, Journal of Agricultural Sciences. 9: 16-24. (In Persian)

52. Rhoades, J.D. 1996. Salinity: Electrical conductivity and total dissolved solids. P 417-435. In: D.L. Sparks (eds.), *Methods of soil analysis*, Soil Science Society of America, USA.
53. Saadatian, B., Kafi, M., Banayan, M., and Nabati, J. 2016. Evaluation of the effect of foliar application of nanoparticles and sodium microsilicate on the photosynthetic properties of potato seedling leaves in the stolonization stage. *Isfahan, Journal of Greenhouse Crop Science and Technology*. 7: 27. 111-122. (In Persian)
54. Sadeghipour, O. 2017. Effect of calcium application on physiological characteristics and yield of soybean in lead-contaminated soil. *Ahvaz, Journal of Crop Physiology*. 9: 35. 89-104. (In Persian)
55. Saleh, J., Najafi, N., Oustan, Sh., Ghasemi-Golezani, K., and Aliasghrzad, N. 2019. Silicon affects rice growth, superoxide dismutase activity and concentrations of chlorophyll and proline under different levels and sources of soil salinity. *Silicon*. 11: 2659-2667.
56. Sharma, A., Kumar, V., Shahzad, B., Ramakrishnan, M., Sidhu, G.P.S., Bali, A.S., Handa, N., Kapoor, D., Yadav, P., Khanna, K., Bakshi, P., Rehman, A., Kohli, S.K., Khan, E.A., Parihar, R.D., Yuan, H., Thukral, A.K., Bhardwaj, R and Zheng, B. 2019. Photosynthetic Response of Plants under Different Abiotic Stresses: A Review. *Journal of Plant Growth Regulation*. 39: 509-531.
57. Shen, X., Zhou, Y., Duan, L., Li, Z., Eneji, A.E., and Li, J. 2010. Silicon effects on photosynthesis and antioxidant parameters of soybean seedlings under drought and ultraviolet-B radiation. *Journal of Plant Physiology*. 167: 15. 1248-1252.
58. Sissoko, A., and K. Kpombrekou-A. 2010. Carbon decomposition in broiler litter-amended soils. *Soil Biology and Biochemistry*. 42: 4. 543-550.
59. Sonobe, K., Hattori, T., An, P., Tsuji, W., Eneji, E., and Kobayashi, S. 2011. Effect of silicon application on sorghum root responses to weater stress. *Journal of Plant Nutrition*. 34: 1. 71-82.
60. Taghizadeh, M., Isfahani, M., Davatgar, N., and Madani, H. 2008. The effect of irrigation cycle and different amounts of nitrogen on yield and yield components of Tarom Hashemi rice in Rasht. *Arak, New Agricultural Findings*. 2: 4. 353-364. (In Persian)
61. Walkley, A.J., and Black, I.A. 1934. Estimation of soil organic carbon by the chromic acid titration method. *Soil Science*. 37: 4. 29-38.
62. Wang, X.B., Zheng, G.P., and Zhao, H.Y. 2008. Effect of rational ratio of silicon, potassium and magnesium fertilizers on photosynthetic characters and yield of rice. *Journal of Heilongjiang August First Land Reclamation University*. 20: 4. 19-22.
63. Yava, I., and Unay, Y. 2017. The role of silicon under biotic and abiotic stress conditions. *Turkish Journal Agriculture Research*. 4: 2. 204-209.
64. Yoshida, S., Ohinishi, Y., and Kitagishi, K. 1962. Chemical forms, mobility and deposition of silicon in the rice plant. *Soil Science and Plant Nutrition*. 8: 15-21.
65. Zhang, X.L., Liang, J.N., and Tan, Z.W. 2007. Effects of silicate on some photosynthetic characteristics of sugarcane leaves. *Journal of Huazhong Agricultural University*. 26: 3. 330-334.
66. Zhu, Y., Xu, X., Hu, Y., Han, W., Yin, J., and Li, H. 2015. Silicon improves salt tolerance by increasing root water uptake in *Cucumis sativus* L. *Plant Cell Reports*. 34: 9. 1629-1646.
67. Zuccarini, P. 2008. Eeffect of silicon on photosynthesis water relation and nutrition uptake of *phseolus vulgaris* under NaCl stress. *Biologia Plantarum*. 52: 1. 157-160.



The effect of different levels of silicon sources and irrigation regimes on photosynthetic parameters of rice (Tarom Hashemi cultivar)

Y. Hoseinian Rostami^{*1}, M.A. Bahmanyar², F. Sadeghzade³,
S.M. Emadi³ and P. Biparva⁴

¹Ph.D. Graduate, Dept. of Soil Science, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University,

²Professor, Dept. of Soil Science, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University,

³Associate Prof., Dept. of Soil Science, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University,

⁴Associate Prof., Dept. of Basic Science, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University

Received: 04.30.2020; Accepted: 05.29.2021

Abstract

Background and Objectives: Photosynthetic parameters are the most sensitive process in the physiological metabolism of plants that are affected by irrigation regime and silicon fertilization. Thus, silicon is one of the effective elements in increasing the net rate of leaf photosynthesis, water use efficiency, stomatal conductance and intercellular carbon dioxide. Therefore, the aim of this study was to determine the effects of different levels of silicon sources and irrigation regimes on rice.

Materials and Methods: A pot experiment was conducted to investigate the effect of different levels of silicon sources and irrigation regimes on rice photosynthetic parameters at Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University in 2018. The experiment was laid out in a split-factorial design with three replications. In this design, soil texture was considered as the main-plot factor, and irrigation regime and different levels of silicon sources as factorial-subplot factors. Factors included two Si doses of 60 and 120 mg Si Kg⁻¹ as potassium silicate (Ps), sodium silicate (Ss), calcium silicate (Cs) and biochar (Bi) sources under two irrigation regimes (continuous flooding (W₁) and periodic wetting-drying (W₂)) in two soil series with different textures (Sandy-loam (S₁) and Silty-clay (S₂)). After plant growth, dry matter weight of straw and photosynthetic parameters such as relative leaf moisture content, transpiration intensity, stomata conductance, chlorophyll index and photosynthesis were measured in flag leaf at the flowering stage of rice.

Results: The results showed that the highest leaf relative moisture content (63.80%), transpiration intensity (12.03 mmolm⁻²s⁻¹), stomata conductance (384.79 mmolm⁻²s⁻¹), chlorophyll content (55.00), photosynthesis rate (24.33 μmolm⁻²s⁻¹) and dry matter weight of straw (33.3 gr/pot) were observed in plants treated with potassium silicate at a concentration of 120 mg Si Kg⁻¹ of silty-clay soil under continuous flooding irrigation regime. The lowest dry matter weight of straw and photosynthetic parameters were observed in sandy-loam soil under periodic wetting-drying irrigation regime without using silicon fertilizer. Also, in sandy-loam soil, the leaf relative moisture content (58.95%), transpiration intensity (11.20 mmolm⁻²s⁻¹), stomata conductance (340.32 mmolm⁻²s⁻¹), chlorophyll content (51.80), photosynthesis rate (19.55 μmolm⁻²s⁻¹) and dry matter weight of straw (18.6 gr/pot) was the highest in biochar treatment at a concentration of 120 mg Si Kg⁻¹ under continuous flooding conditions. Also, a decrease in dry matter weight of straw and photosynthetic parameters was observed at the higher Si rates (120 mg Si Kg⁻¹ compared to 60 mg Si Kg⁻¹) in treatments of potassium silicate and sodium silicate in sandy-loam soil under periodic wetting-drying irrigation regime. This may be due to the inhibitory effect of high concentrations of silicon on photosynthetic function.

* Corresponding Author; Email: ya.hoseinian@gmail.com

Conclusion: Although most of the photosynthetic parameters of plants and dry matter weight of straw in periodic wetting and drying irrigation regime were somewhat reduced compared to continuous flooding irrigation regime, application of different sources of silicon to both soil textures under both irrigation regimes improved relative leaf moisture content, transpiration rate, stomata conductance, chlorophyll content, photosynthesis rate and dry matter weight of straw were compared to treatments without silicon fertilizer application. This reflects the protective effect of silicon against low irrigation conditions. Therefore, in the scope of this experiment, it seems that the use of silicon to improve the photosynthetic parameters of rice plant and dry matter weight of straw under low-irrigation regime was satisfactory. But, the amount of use of this element is very important to maintain the balance of soil and plant properties.

Keywords: Irrigation regime, Photosynthetic parameters, Rice, Silicon

