مقاله پژوهشی

رابطه بین مقدار فیتوکلات کل و فیتوکلات پیوند با Al^{+3} و Si^{+2} با توزیع یون Al^{+3} و Si^{+2} در ریشه و برگ‌های دو رقم برنج ایرانی (*Oryza sativa* L.)

حیدرعلی مالمیر[1]* و اللهیار فلاح[2]

[1]گروه زیست شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بوعلی سینا، [2]عضو هیئت علمی مرکز تحقیقات برنج آمل

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰٤/۱۱، تاریخ پذیرش نهایی: ۱۳۹۸/۱۰/۲۵)

چکیده

فیتوکلات‌ها ترکیبات بارداری هستند که با عناصر پیوند تشکیل می‌دهند. بدین منظور در سال ۱۳۹۱ در گلخانه دانشگاه بوعلی سینا اثر Si^{+2}، Al^{+3} روی مقدار فیتوکلات کل، فیتوکلات پیوند با Si^{+2} و Al^{+3} و توزیع یون Si^{+2}، Al^{+3} در دو رقم برنج با مقاومت‌های متفاوت نسبت به شوری بررسی شد. در این تحقیق گیاهچه‌های ۳۰ روزه برنج (شیرودی، آوس) در کشت شن با محلول‌های حاوی Si^{+2} و Al^{+3} در قالب طرح اسپلیت پلات در زمان تیمار شدند و هر سه روز نمونه‌برداری انجام گرفت. نتایج نشان داد بین دو رقم برنج از نظر توزیع یون Si^{+2} و Al^{+3} در ریشه و برگ‌ها اختلاف معنی‌داراست ($P<0/05$). با مقایسه غلظت Al^{+3} و Si^{+2} در ریشه وانواع برگ ملاحظه شد غلظت Al^{+3} در گیاه بخش‌بندی شده است. روند جذب Si^{+2} در ابتدا شیب غلظت از پایین به بالای گیاه سپس برعکس شد. در صورتی که در روند جذب Al^{+3} شیب غلظت از پایین به بالای گیاه تشدید شد. مقدار Al^{+3} با فیتوکلات بیش از Al^{+3} آزاد است. مقدار Si^{+2} با فیتوکلات کمتر از Si^{+2} آزاد است. لذا نتایج نشان داد فیتوکلات‌ها ترکیباتی هستند که ممکن است متحرک یا غیرمتحرک باشند و نقش مهمی در تعادل بار و انتقال کاتیون‌ها دارند و مقاومت بیشتر رقم آوس به Al^{+3} به‌دلیل افزایش فیتوکلات غیرمتحرک در ترکیب با Al^{+3} در ریشه بود.

واژه‌های کلیدی: توزیع یون Si^{+2} و Al^{+3}، حجره‌بندی، انواع فیتوکلات

مقدمه

گیاهان سازوکارهای متعددی جهت مقاومت نسبت به غلظت بالای عناصر به‌کار می‌گیرند. در بعضی از گونه‌ها مقاومت به جذب عناصر با جلوگیری از انتقال آنها به داخل سلول‌های ریشه است. این گیاهان پتانسیل بالایی جهت ممانعت از ورود عناصر به داخل سلول ریشه دارند (Brown *et al.*, 2004). گروه دیگری از گیاهان مانع از ورود عناصر به داخل ریشه نمی‌شوند، بلکه این گیاهان به میزان زیادی عناصر را در درون خود تجمع می‌دهند (Miyasaka and Hawes, 2001). گیاهان بومی یک ناحیه اغلب با مکانیزم‌های متفاوتی به خاک‌های آلوده مقاومت نشان می‌دهند و این مقاومت یک ویژگی کاملاً ضروری برای بقا آنها است.

بیشتر تحقیقات نشان داد که گیاهان دارای ترکیبات درشت مولکولی به نام فیتوکلات هستند که از واحدهای اسیدهای آمینه تشکیل شده است. این مولکول از نظر

*نویسنده مسؤل، نشانی پست الکترونیکی: Malmir1970@gmail.com

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1399.9.38.1.8]

ساختمان و تراکم گروه‌های عاملی باعث ایجاد تراکم فوق‌العاده بار بر روی مولکول می‌شود. ساختار مولکول با توجه به سطح ویژه آن خاصیت جذب‌کنندگی زیادی دارد و قادر است با انواع کاتیون‌ها پیوند تشکیل دهد. بعضی از گیاهان نسبت به غلظت بالای عناصر از جمله Al^{+3} در خاک مقاوم هستند. انواع متفاوتی از گونه‌های برنج وجود دارند که غلظت کم Al^{+3} را تحمل می‌کنند (Ma, 2004; Chaffai *et al*., 2009).

مقدار عنصر Si^{+2} در اغلب خاک‌ها بالا است. تحقیقات زیادی نشان داد که جذب Si^{+2} آسان صورت می‌گیرد (Epstein, 1999). Epstein در سال ۱۹۹۹ گزارش داد گیاهان مختلف در توانایی انباشت Si^{+2} در بافت‌های خود تفاوت دارند، و با افزایش غلظت Si^{+2} در محیط رشد، غلظت آن در بافت‌های گیاهی افزایش می‌یابد. از جمله آثار مثبت غلظت‌های زیاد Si^{+2} در گیاهان افزایش میزان کلروفیل و فتوسنتز است که به‌دنبال آن افزایش تولید محصول را در پی خواهد داشت. Si^{+2} یک کاتیون است و با توجه به غلظت آن در خاک‌ها به‌نظر می‌رسد جذب سایر کاتیون‌ها دچار مشکل شود، ولی چنین نیست. بنابراین فرم Si^{+2} در داخل خاک و یا فرم جذب آن چنین رقابتی را نشان نداده است. میزان Si^{+2} در برگ‌ها بین ۱۰۰ تا ۸۰۰ ppm و در ریشه بین ۲۰۰ تا ۱۰۰۰ ppm در شرایط طبیعی گزارش شده است (Epstein, 1999; Richmond and Sussman, 2003).

گزارش‌های زیادی نشان داده که یک رابطه مثبت بین افزایش غلظت عناصر تک‌ظرفیتی و دوظرفیتی در محیط‌کشت و مقدار فیتوکلات تولیدشده در ژنوتیپ‌های مختلف غلات وجود دارد (Juan and Charlotte, 2002). با این وجود تولید فیتوکلات‌های گیاهی توسط گیاهان رشدیافته در خاک غنی از Si^{+2} و نقش این فیتوکلات‌ها در انتقال و جذب این عنصر از خاک‌هایی که با افزایش Si^{+2} روبرو هستند هنوز به اثبات نرسیده است. این موضوع به‌خصوص از این جهت دارای اهمیت است که فیتوکلات‌های گیاهی میل ترکیبی بیشتری برای کلاته‌کردن عناصر دوظرفیتی به‌خصوص آهن در مقایسه با عناصر تک‌ظرفیتی دارند (Leopold *et al*., 1999). از طرفی جذب برخی از عناصر با انواع فیتوکلات آسان‌تر است.

با مقایسه کینتیکی منحنی‌های جذب Al^{+3} در گندم و عناصر دوظرفیتی نشان داده شد که جذب این عناصر به صورت دو مرحله‌ای است که دارای دو فاز پیک جذب است. فاز اولیه کوتاه و سریع و قابل‌اشباع و فاز بعدی کمی طولانی‌تر و خطی است. فاز سریع اولیه مربوط به تجمیع این عناصر در آپوپلاسم قابل تبادل است. با توجه به گزارش Juan و همکاران در سال ۲۰۰۲ بیشتر مقدار Al^{+3} بعد از ۶۰ دقیقه جذب ریشه‌ای در ترکیب با اسید سیتریکی است که از داخل ریشه به محیط خارج ترشح شده است. فاز خطی در جذب Al^{+3} ممکن است انتقال Al^{+3} در مسیر آپوپلاسم را براساس تفسیر داده‌هایی که کینتیک جذب را با جابجای Al^{+3} با عناصر دیگر در فضای آپوپلاسم که وابسته به متابولیسم است را توجیح می‌کند (Miyasaka and Hawes, 2001; Ma, 2000).

تحقیقات Chen و همکاران (۱۹۹۷) نشان داد که فیتوکلات در شرایط زیستی با وضعیت اکسیدآسیون / احیای بالا به مقدار زیاد با انواع عناصر آلومینیم، کادمیم، پیوند ایجاد می‌کند. لذا در این تحقیق با توجه به رفتار متفاوت Al^{+3} و Si^{+2} در گیاهان، همچنین با مقایسه دو رقم برنج با توجه به گزارش مرکز تحقیقات برنج کشور رقم آوس مقاوم به شوری است در حالی که رقم شیرودی به شوری حساسیت دارد. بنابراین این آزمایش به‌منظور تعیین روابط بین توزیع و سرعت انتقال دو عنصر Si^{+2} و Al^{+3}، میزان فیتوکلات در دو رقم برنج شیرودی و آوس به‌اجرا در آمد.

مواد و روش‌ها

آزمایش از اول خرداد تا اواخر مردادماه سال ۱۳۹۱

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1399.9.38.1.8]

به‌مدت ٤٨ روز قبل از گلدهی، هنگام طویل‌شدن ساقه‌های برنج در گلخانه دانشگاه بوعلی سینا انجام گرفت. طرح آزمایش در قالب طرح اسپلیت پلات در زمان در دو بلوک سیمانی با مساحت هر بلوک دو متر مربع به تعداد ۷۰ عدد گیاه برنج از دو رقم جداگانه در داخل هر بلوک کشت گردید. روش نمونه‌برداری به‌صورت تصادفی و منظم انجام گرفت. بذور ارقام برنج (*Oriza sativa* (L.) شیرودی و آوس که در آزمایش‌های قبلی به‌ترتیب با ویژگی‌های حساس و مقاوم به شوری در آنها مشخص شده بود از مرکز تحقیقات برنج کشور در شهر آمل تهیه گردید. آزمایش در محیط‌کشت شن انجام گرفت و گیاهان ۳۰ روز بعد از جوانه‌زنی با محلول هوگلند با غلظت ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر Si^{+2} از دی‌اکسید سیلیسیم (SiO_2) که در آب محلول و به فرم یونی محلول $Si(OH)_4$ قابل جذب گیاه است و ۳۰ میلی‌گرم در لیتر از Al^{+3} از ($AlCl_3$) آبیاری شدند (Ma, 2003). با ظهور اولین برگ، برگ‌ها براساس سن برگ از پیرترین تا جوان‌ترین برگ علامت‌زده شدند تا مطابق با هدف آزمایش برداشت شوند. برای تعیین مقدار توزیع، ضریب تجمیع و ضریب انتقال یون Al^{+3} و Si^{+2} در اندام‌های ارقام برنج و همچنین مقدار برداشت این عناصر از محیط‌کشت نمونه‌برداری هنگام رشد ساقه به‌ترتیب در ۳٦، ۳۳، ۳۹، ٤۲، ٤٥ و ٤٨ روز بعد از جوانه‌زنی انجام گرفت. پس از برداشت ابتدا وزن تر نمونه‌ها تعیین شد سپس نمونه‌ها در داخل آون خشک گردید و وزن خشک آنها تعیین گردید. برای تعیین ضریب تجمیع و ضریب انتقال از روش (Bonanno *et al.*, 2010) استفاده شد. غلظت عناصر در نمونه‌های زه‌آب و داخل برگ‌ها به روش خاکستر تر با دستگاه جذب اتمی اندازه‌گیری شد.

اندازه‌گیری مقدار فیتوکلات کل: میزان فیتوکلات به روش (De Vos *et al.*, 1992) اندازه‌گیری شد. در این روش مقدار دو گرم از ماده تر گیاهی را با ۲۰ میلی‌لیتر اسید ٥- سولفو سالیسیلیک (SSA) ٥٪ و ۲۰ میلی‌لیتر دی‌اتیلن تری‌آمینو پنتا اسید استیک (DTPA) داخل هاون کاملاً ساییده شد. محتویات ساییده‌شده را به‌مدت ۱۰ دقیقه به حال خود گذاشته، و بعد از سانتریفوژ با دور ۱۲۰۰۰g در ٤°C برای مدت ۱۰ دقیقه محلول رویی برای اندازه‌گیری فیتوکلات به داخل لوله آزمایش دیگری منتقل شد. برای ثابت نگه‌داشتن PH محیط به‌تدریج (H_2PO_4K) ۰/٥ مولار به‌طور جداگانه داخل لوله‌های آزمایش ریخته با هم مخلوط شد، و میزان جذب را با دستگاه اسپکترومتر در طول‌موج ٤۱۲ نانومتر یاداشت گردید (Perkin, Elmer Lambda, 45 UV/VIS, D6484, USA). سپس منحنی استاندارد تهیه شد و در پایان غلظت فیتوکلاتین بر حسب $\mu mol/g^{-1}$ FW محاسبه گردید.

اندازه‌گیری مقدار فیتوکلات پیوند با Al^{+3} و Si^{+2}: برای اندازه‌گیری مقدار فیتوکلات پیوند با آلومینیم در این تحقیق از روش Sema و همکاران (۲۰۰٥) که برای جداسازی Al^{+3} پیوند با پلی‌فنل‌ها در برگ‌های چای انجام شده بود به‌صورت انتخابی برای اولین بار جهت تعیین Al^{+3} و Si^{+2} پیوند با فیتوکلات استفاده گردید. از آنجایی که این روش جداسازی براساس شستشوی یون‌ها و تشکیل رسوب است، بنابراین می‌تواند برای جداسازی عناصر از فیتوکلات‌ها نیز مورد استفاده قرار بگیرد. برای این منظور بعد از جداسازی فیتوکلات کل توسط روش ذکرشده مقدار ۱٥ ml از محتویات نمونه برگی تیمارشده با Al^{+3} را با ٦ ml از BSA (Bovien Serum Albumin) با غلظت $g.L^{-1}$ ۲ مخلوط کرده، سپس این مخلوط در حمام داغ در دمای ۹۰°C برای مدت ۳۰ دقیقه نگهداری شد و بعد از سردشدن در دور ۸۰۰۰ rpm به‌مدت ۱٥ دقیقه سانتریفوژ گردید. غلظت Al^{+3} در محلول رویی سریع با دستگاه FAAS (Fleam Atomic Absorbtion Spectrometer) تعیین شد. برای تعیین غلظت Al^{+3} در رسوب آن را در ۱۰ ml سدیم دودسیل سولفات (SDS) حل کرده، سپس غلظت Al^{+3} با دستگاه FAAS اندازه‌گیری شد. با آزمایش زمان‌های متفاوت برای

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1399.9.38.1.8]

تشکیل رسوب Si^{+2}، در نهایت بهترین زمان لازم برای تشکیل رسوب در pH=٦ برابر ۳۰ دقیقه به‌دست آمد. در واقع در pH=٦ و مقدار BSA=٨ mol^{-1} با زمان ۳۰ دقیقه مناسب‌ترین شرایط برای رسوب Si^{+2} است. برای تجزیه داده‌ها و مقایسه میانگین‌ها از نرم‌افزار آماری SPSS ورژن ۱۲ استفاده شد.

Al^{+3} و Si^{+2} آزاد به‌وسیله دستگاه جذب اتمی FAAS اندازه‌گیری شدند. برای اندازه‌گیری Al^{+3} ابتدا دستگاه جذب اتمی با محلول‌های صفر، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ٤٠ و ۵۰ میلی‌گرم در لیتر $AlCl_3$ استاندارد می‌شود. پس از رسم منحنی توسط دستگاه به‌ترتیب تیمارهای Al^{+3} اندازه‌گیری می‌شود. برای اندازه‌گیری Si^{+2} ابتدا دستگاه جذب اتمی با محلول‌های غلظت صفر، ۳۰، ٦٠ و ۱۲۰ میلی‌گرم در لیتر SiO_2 استاندارد شد.

نتایج و بحث

مقایسه غلظت Si^{+2} و Al^{+3} در محیط‌کشت، ریشه و برگ‌های دو رقم برنج: با مقایسه تغییرات غلظت عناصر Al^{+3} و Si^{+2} در داخل ریشه گیاه نسبت به تغییرات غلظت این عناصر در محیط‌کشت (جدول ۱) ملاحظه شد که با گذشت زمان غلظت هر دو فلز در محیط‌کشت کاهش یافت. این کاهش غلظت برای Si^{+2} در برداشت‌ها به‌طور متوسط ۱۸٪ و برای Al^{+3} ۷/۵٪ است (P<۰/۰۵). بنابراین متوسط سرعت جذب Si^{+2} بیش از دو برابر Al^{+3} از محیط‌کشت است. بین دو رقم برنج با توجه به غلظت Si^{+2} و Al^{+3} در ریشه و برگ اختلاف معنی‌دار است (P<۰/۰۵، جدول ۲ و ٤). نتایج توزیع این دو عنصر در برگ‌ها و سایر قسمت‌های ریشه در جداول (۳، ۵ و۱۰) نشان داد مقدار Si^{+2} ابتدا در ریشه اصلی افزایش و سپس کاهش یافت که میزان این کاهش متناسب با افزایش غلظت Si^{+2} در برگ‌ها است (فلاح، ۱۳۸۳). با گذشت زمان غلظت Si^{+2} در برگ‌های ۳، ٤ و ۵ در دو رقم برنج ابتدا افزایش سپس کاهش پیدا کرد (P<۰/۰۵، جدول ۲). با مقایسه داده‌های (جدول ۵) بعد از اضافه‌شدن Al^{+3} به محیط‌کشت به‌تدریج غلظت Al^{+3} در ریشه افزایش و به‌خصوص در ریشه رقم آوس بیشتر از رقم شیرودی است (P<۰/۰۵ ،جدول ٤). بعد از گذشت شش روز از اضافه‌شدن Al^{+3} به محیط‌کشت، در رقم آوس تقریباً ۵۰٪ Al^{+3} در ریشه اصلی باقی ماند و بقیه به قسمت‌های بالای گیاه منتقل شد. با توجه به توزیع دو عنصر Al^{+3} و Si^{+2} ملاحظه شد Si^{+2} با سرعت بیشتری در داخل گیاه انتقال پیدا کرد، در حالی که Al^{+3} از عناصر اساساً سرعت انتقال کمی داشته و از انتقال آن به داخل ریشه جلوگیری شده است. ملاحظه شد Al^{+3} در ریشه دو رقم برنج بیشتر از Si^{+2} تجمیع شده است (P<۰/۰۵). تغییرات غلظت Si^{+2} از الگوی زیر تبعیت می‌کند.

ریشه = مریستم انتهایی= برگ پایین > برگ‌های وسط=برگ‌های بالا

با مقایسه مقدار Si^{+2} و Al^{+3} انتقال‌یافته، ضریب انتقال Si^{+2} در دو رقم برنج یکنواخت‌تر از ضریب انتقال Al^{+3} است. مقدار ضریب انتقال Si^{+2} با پیرشدن گیاه افزایش یافت، در صورتی که ضریب انتقال Al^{+3} در دو رقم برنج کاهش یافت و این کاهش در رقم آوس سریع‌تر از رقم شیرودی بود. بنابراین با مقایسه غلظت Al^{+3} در محیط‌کشت، ریشه و برگ‌ها ملاحظه شد که تغییرات غلظت Al^{+3} از الگوی زیر تبعیت می‌کند.

ریشه > برگ پایین > برگ‌های وسط > برگ‌های بالا > مریستم انتهایی

غلظت Al^{+3} در محیط‌کشت بیشتر از ریشه و در ریشه هم بیشتر از برگ‌ها بود. در حقیقت شیب غلظت از محیط‌کشت تا انتهای قسمت هوایی تقسیم‌بندی شده است (جدول ۵). در صورتی که این روند در مورد Si^{+2} وجود نداشت. در حقیقت ابتدای رشد یک شیب غلظت از محیط‌کشت به انتهای قسمت هوایی وجود داشت و به‌تدریج این روند به سمت برابری و در آخر عکس شد (جدول ۳). از آنجایی که گیاه برنج دائماً در حال رشد است، به‌خصوص در مرحله نموی القای خوشه است که

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1399.9.38.1.8]

جدول ۱- مقایسه میانگین غلظت Al^{+3} و Si^{+2} در زه‌آب محیط‌کشت. اعداد با حداقل یک حرف مشابه در هر ردیف براساس آزمون مقایسه میانگین‌ها به روش دانکن اختلاف معنی‌داری با یکدیگر در سطح ۵٪ ندارند.

زمان نمونه‌برداری (روز بعد از جوانه‌زنی)								
عناصر ($mg.L^{-1}$)	۳۰	۳۳	۳۶	۳۹	۴۲	۴۵	۴۸	درصد تغییر
آلومینیم	۳۰^{a}	$۲۸/۴^{b}$	$۲۶/۸^{c}$	$۲۵/۵^{d}$	$۲۴/۳^{e}$	۲۲^{f}	$۲۱/۷^{g}$	۸
سیلسیم	۳۰۰^{a}	$۲۸۱/۶^{b}$	$۲۵۴/۴^{c}$	$۲۰۷/۳^{d}$	$۱۶۴/۲^{e}$	۱۱۴^{f}	$۸۸/۵^{g}$	۱۸

جدول ۲- تحلیل واریانس غلظت Si^{+2} در برگ اول، دوم، سوم، چهارم، پنجم، ششم، قسمت اول ریشه و قسمت دوم ریشه

منابع تغییر	درجه آزادی	برگ اول	دوم	سوم	چهارم	پنجم	ششم	اول ریشه	دوم ریشه
فلز	۱	۲۳^{**}	۱۴^{**}	۱۰^{**}	۷^{**}	۷^{**}	۸^{**}	۱۲^{**}	۳۷^{**}
رقم	۱	۲۷^{**}	۱۸^{**}	۱۴^{**}	۱۲^{**}	۹^{**}	۷^{**}	۲۵^{*}	۳۲^{**}
برداشت	۵	۲۵^{**}	۳۲^{**}	۲۵^{**}	۱۶^{**}	۱۸^{**}	۱۲^{**}	۳۱^{**}	۲۱^{**}
فلز× رقم	۱	۵^{*}	۴^{*}	۵^{*}	۹^{**}	۳^{*}	$۲/۴۳^{ns}$	۱۵^{**}	۳۱^{**}
فلز × برداشت	۵	۳^{*}	۴^{*}	۵^{*}	۶^{*}	$۲/۹۱^{ns}$	$۱/۵۲^{ns}$	$۱/۵۳^{ns}$	$۱/۹۱^{ns}$
رقم × برداشت	۵	$۲/۶۵^{ns}$	$۱/۷۴^{ns}$	$۱/۵۷^{ns}$	$۱/۱۵^{ns}$	$۲/۱۵^{ns}$	$۲/۶۷^{ns}$	$۱/۱۱^{ns}$	$۲/۱۵^{ns}$
فلز×رقم× برداشت	۵	$۱/۵۱^{ns}$	$۲/۳۵^{ns}$	$۱/۶۷^{ns}$	$۱/۵۷^{ns}$	$۲/۷۴^{ns}$	$۱/۶۵^{ns}$	$۲/۵۵^{ns}$	$۲/۴۱^{ns}$
خطای کل	۴۸	۰/۳۲	۰/۲	۰/۱۲	۰/۱۴	۰/۱۶	۰/۱۳	۰/۱۸	۰/۱
ضریب تغییرات (٪)		۷/۳	۴/۲	۵/۶	۷/۹	۵/۴	۴/۵	۷/۲۱	۱۳/۵

****، * و ns به‌ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵، ۰/۱و غیرمعنی‌دار**

جدول ۳- مقایسه میانگین غلظت Si^{+2} در ریشه و برگ‌ها

	شیرودی						آوس				
برداشت	اول	دوم	سوم	چهارم	پنجم	ششم	اول	دوم	سوم	چهارم	پنجم	ششم
برگ ۱	$۷/۸^{e}$	$۱۹/۳^{c}$	$۲۱/۳^{a}$	$۲۱/۶^{a}$	$۲۰/۶^{b}$	$۲۰/۲^{b}$	$۲/۷^{f}$	$۱۹/۷^{b}$	$۲۰/۳^{b}$	$۱۹/۶^{c}$	$۱۸/۸^{c}$	$۱۶/۷^{d}$
برگ ۲	$۳/۳^{f}$	$۱۷/۶^{b}$	$۱۸/۱^{ab}$	$۱۹/۴^{a}$	$۱۹/۲^{a}$	$۱۹/۱^{a}$		$۱۵/۷^{c}$	$۱۹/۵^{a}$	$۱۶/۳^{c}$	$۱۳/۴^{d}$	$۱۲/۸^{e}$
برگ ۳	۱	$۱۲/۸^{d}$	$۱۳/۲^{b}$	$۱۷/۶^{b}$	$۱۶/۶^{b}$	$۱۴/۳^{c}$		$۷/۴^{f}$	$۱۵/۳^{c}$	$۱۹/۸^{a}$	$۲۱/۷^{a}$	$۱۶/۹^{b}$
برگ ۴		$۲/۲$	$۴/۷^{f}$	$۱۲/۱^{d}$	$۱۰/۲^{e}$	$۹/۳^{e}$		$۵/۳^{f}$	$۱۲/۲^{d}$	$۱۴/۳^{c}$	$۱۵/۳^{b}$	$۱۶/۴^{a}$
برگ ۵		$۲/۲^{h}$	$۳/۲^{g}$	$۹/۵^{bc}$	$۱۰/۵^{b}$	$۱۱/۶^{a}$			$۴/۳^{f}$	$۵/۷^{e}$	$۶/۸^{d}$	$۱۱/۹^{a}$
برگ ۶				$۲/۱^{d}$	$۳/۲^{c}$	$۶/۷^{b}$						$۸/۶^{a}$
برگ ۷						$۸/۳^{a}$						$۸/۳^{a}$
نوک ساقه	$۵/۵^{d}$	$۸/۳^{c}$	$۱۰/۳^{b}$	$۱۲/۳^{a}$	$۱۳/۳^{a}$	$۱۰/۲^{b}$			$۴/۷^{d}$	$۷/۲^{c}$	$۱۰/۴^{b}$	$۱۰/۹^{b}$
اول ریشه	$۲۵/۷^{e}$	$۳۵/۶^{d}$	$۳۹/۶^{bc}$	$۴۱/۳^{b}$	$۴۳/۴^{a}$	$۴۱/۴^{b}$	$۱۹/۷^{e}$	۴۰^{b}	۳۶^{d}	۳۶^{d}	$۳۸/۷^{c}$	$۳۸/۳^{c}$
دوم ریشه	$۲۱/۴^{h}$	$۳۰/۷^{g}$	$۳۲/۷^{f}$	$۴۰/۸^{b}$	$۴۱/۸^{a}$	$۴۱/۵^{b}$	$۲۱/۵^{h}$	$۴۰/۶^{c}$	$۴۲/۲^{a}$	$۳۵/۴^{d}$	$۳۴/۸^{e}$	$۳۴/۵^{e}$

مقادیر میانگین‌ها با حداقل یک حرف مشابه در هر ردیف براساس آزمون مقایسه میانگین‌ها به روش دانکن اختلاف معنی‌داری با یکدیگر در سطح ۵٪ ندارند.

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1399.9.38.1.8]

جدول ٤- تحلیل واریانس غلظت Al^{+3} در برگ اول، دوم، سوم، چهارم، پنجم، ششم، قسمت اول ریشه و قسمت دوم ریشه

منابع تغییر	درجه آزادی	برگ اول	دوم	سوم	چهارم	پنجم	ششم	اول ریشه	دوم ریشه
فلز	۱	۵*	۸**	۱۵**	۱۷**	۱۱**	۱٤**	۹**	۱٦**
رقم	۱	۱٤**	۱٤**	۱٤**	۱٤**	۱٤**	۱٤**	۱٤**	۱/۲ns
برداشت	۵	۹**	٦**	۱٤**	۱۰**	۱۵**	٤/۵*	۹/۸**	۱۱/٤**
فلز × رقم	۱	۵/۸*	۳/۲ns	۱۲/۳**	۸/۳**	۲/۱۵ns	۱/۲۱ns	۱۳/۲**	۱/۲۵ns
فلز × برداشت	۵	۱/۳ns	۲ns	۱/۵٤ns	۱/۵۵ns	۱/۹۹ns	۱/۹ns	۵/۱**	۳/۷*
رقم× برداشت	۵	۱۱/۳**	۸/۲**	٦/۸*	۲/٤۱ns	۱/٦۱ns	۲/۸۵ns	۱٤/۵**	۱/٤۵**
فلز × رقم× برداشت	۵	۱/۱۵ns	۱/۸ns	۱/٤۱ns	۱/۳۵ns	۱/۲۲ns	۲/۳ns	٤/۲*	۵/۸*
خطای کل	٤۸	۱/۲	۲/۲	۸/۳۱	۳/۷۸	۱۲/٤	۳/٦	۸/۳	٦/٤
ضریب تغییرات (٪)		۱٤/۹	۱۰/۷	۵/۵	۱۲/۳	۷/۷	٤/۵	۵۰/۸	٦۱/۳

****، * و ns به‌ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵، ۰/۱و غیرمعنی‌دار**

جدول ۵- مقایسه میانگین غلظت Al^{+3} در ریشه و برگ در برداشت‌های مختلف

	شیرودی							آوس				
برداشت	اول	دوم	سوم	چهارم	پنجم	ششم	اول	دوم	سوم	چهارم	پنجم	ششم
برگ ۱	$۳/۱^{f}$	$٦/۷^{d}$	$۷/۷^{c}$	$۸/٤^{c}$	$۸/۹^{c}$	$۹/۱^{b}$	$٤/۱^{e}$	$۹/۷^{b}$	$۱۰/٤^{b}$	$۱۱/٤^{a}$	$۱۱/۳^{a}$	$۱۲/۸^{a}$
برگ ۲		$٤/۷^{d}$	$۵/۳^{d}$	$۷/۹^{b}$	$۸/۵^{b}$	$۸/۳^{b}$	$۳/٤^{e}$	$۷/۵^{b}$	$۸/۳^{b}$	$۹/۲^{a}$	$۹/۳^{a}$	$۱۰/۵^{a}$
برگ ۳		$۲/٦^{e}$	$۳/٤^{d}$	$۵/۷^{c}$	$۷/۳^{b}$	$٦/۸^{b}$			$۳/۷^{d}$	$۳/۷^{d}$	$۷/٦^{a}$	$۷/۸^{a}$
برگ ٤		$۳/۷^{c}$	$۳/۹^{c}$	$٤/۳^{bc}$	$٤/۸^{b}$	$۵/۲^{a}$					$٤/٦^{b}$	$٤/۸^{a}$
برگ ۵		$۳/۱^{c}$	$۳/۸^{c}$	$٤/۱^{b}$	$٤/۵^{a}$	$٤/۷^{a}$					$۳/۳^{c}$	$۳/۷^{c}$
برگ ٦				$٤/۲^{a}$	$۳/۹^{a}$	$٤/۱^{a}$						$۲/۳^{b}$
برگ ۷				$۲/۱^{b}$	$۲/۷^{b}$	$۳/۸^{a}$						$۲/٦^{b}$
نوک ساقه					$۲/٦^{b}$	$۳/٤^{a}$					$۳/۲^{a}$	$۳/٤^{a}$
اول ریشه	$۱۵/٤^{c}$	$۱۸/۱^{b}$	$۱۷/۹^{b}$	$۱۷/۳^{bc}$	$۲۰/٦^{a}$	$۱۸/۳^{b}$	$۱۱/۵^{e}$	$۱۳/۵^{d}$	$۱۰/۵^{f}$	$۱۱/۵^{e}$	$۱۳/۵^{d}$	$۱۵/۷^{c}$
دوم ریشه	$۱۳/۷^{e}$	$۱۵/٤^{cd}$	$۱۷/٤^{b}$	$۱۸/۲^{a}$	$۱٦/۵^{c}$	$۱۷/۸^{a}$	$٤/۱^{i}$	$۹/۷^{h}$	$۱۱/٤^{f}$	$۱۰/٤^{g}$	$۱۱/۳^{f}$	$۱۲/۸^{ef}$

مقادیر میانگین‌ها با حداقل یک حرف مشابه در هر ردیف براساس آزمون مقایسه میانگین‌ها به روش دانکن اختلاف معنی‌داری با یکدیگر در سطح ۵٪ ندارند.

گیاه برنج به فتوپریود عکس‌العمل نشان می‌دهد. با توسعه برگ‌های نزدیک به خوشه، غلظت عناصر در داخل برگ‌های پایین مرتب کاهش می‌یابد. و در این مرحله از رشد سرعت انتقال عناصر از جذب آنها پیشی می‌گیرد. بنابراین در طول رشد محدودیتی از نظر انتقال Si^{+2} از محیط‌کشت به ریشه و از ریشه به برگ‌ها وجود ندارد و جذب Si^{+2} متناسب با غلظت محیط صورت می‌گیرد. در حالی که برای Al^{+3} با توجه به غلظت محیط اساساً Al^{+3} به مقدار کم توسط دو رقم برنج جذب‌شده با اینکه در این مرحله از رشد سرعت انتقال بیشتر از جذب است.

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1399.9.38.1.8]

جدول ٦- مقایسه میانگین‌ها و درصد تغییرات غلظت کل فیتوکلات در برگ‌ها و ریشه رقم شیرودی

شیرودی	کل فیتوکلات		درصد تغییرات فیتوکلات	
اجزا	شاهد	Al	Si	تغییرات Al	تغییراتSi
برگ ۱	۱۸/۷^{c}	۳۹/۷^{a}	۳۰/۹^{b}	۵۲/۹	۳۹/۵
برگ ۲	۲۰/۸^{b}	۳۷/۹^{b}	۳۱/٦^{a}	٤٥/۲	۳٤/۲
برگ ۳	۲۱/٤^{a}	۳۷/٥^{b}	۳۰/۷^{b}	٤۲/۹	۳۰/۲
برگ ٤	۲۱/۲^{a}	۳۷/٦^{b}	۳۰/٥^{b}	٤۳/٦	۳۰/٤
برگ ٥	۲۲/۳^{a}	۳۷/۲^{b}	۲۹/۱^{c}	٤۰/۲	۲۳/۳
برگ ٦	۲۰/۷^{b}	۳٦/٥^{bc}	۲۷/٥^{d}	٤۸/۸	۲۹/٥
برگ ۷	۱۸/٦^{c}	۳٦/۳^{c}	۲٦/٤^{e}	٤٥/۳	۳۰/٤
میانگین	۲۰	۳۷	۲۹	٤٥/۳	۳۰/٤
نوک ساقه	۱٦/۲^{a}	۳٤/۷^{a}	۲۲/٦^{a}	۵۳/۳	۲۸/۳
نوک ریشه	۱۰/۷^{b}	۲۳/٥^{b}	۱۱/۷^{b}	٥٤/٥	۸/٥
اول ریشه	۱۰/٥^{b}	۲۲/۳^{b}	۱۰/۲^{b}	۵۲/۹	۲۰/۹
دوم ریشه	۹/۳^{c}	۱۷/۸^{c}	۱۱/۸^{c}	٤۷/۸	۲۱/۲
میانگین	۱۰	۲۱	۱۲	۵۲	۱۸
R2	۰/٦٥	۰/۸۹	۰/۷۸	۰/۸۲	۰/۷۹

مقادیر میانگین‌ها با حداقل یک حرف مشابه در هر ستون براساس آزمون مقایسه میانگین‌ها به روش دانکن اختلاف معنی‌داری با یکدیگر در سطح ٥٪ ندارند.

مقدار بیشتر Al^{+3} جذب‌شده در ریشه و برگ‌های پایین تجمیع داشت. این نتایج، گزارش تحقیقات (Collet *et al.*, 2002; Juan *et al.*, 2002; Miyasaka and Hawes, 2001) را تأیید کرد که نشان داده‌اند سهم Al^{+3} اتصال‌یافته آپوپلاستی در ریشه بالغ بر ٥۰٪ Al^{+3} جذب شده است و مقدار کمی Al^{+3} وارد بخش‌های بالای گیاه می‌شود.

تحقیقاتی که روی گیاه ذرت انجام شده نشان داد توزیع Al^{+3} در ریشه و برگ‌های این گیاه متفاوت است (Collet *et al.*, 2002). مطالعات Ma در سال ۲۰۰٤ نشان داد در گیاه برنج میزان جذب Si^{+2} از محلول غذایی به رشد گیاه، عملکرد بافت‌ها و دانه‌ها بستگی دارد. مطالعات بسیاری گزارش داده‌اند که مقاومت نسبت به فلز مس در برنج تا حدودی برای عناصر دیگر هم قابل استناد است (Lidon *et al.*, 1998). بنابراین وقتی مقاومت نسبت به یک یا دو فلز ایجاد شود شاید انعکاس‌دهنده مقاومت به تعدادی از عناصر در محیط رشد گیاه باشد. علت کاهش غلظت Si^{+2} در برگ سوم و چهارم شاید به‌دلیل کشیدگی ساقه و انتقال Si^{+2} از برگ‌های نزدیک به قسمت‌های نوک و برگ‌های در حال رشد باشد (Ma, 2003). در این مورد Epstein و همکاران (۱۹۹۹) گزارش داده‌اند که Si^{+2} ممکن است در آوند آبکش انتقال پیدا کند.

بیشتر عناصر از جمله Si^{+2} از طریق آوند چوبی ابتدا به بخش‌های بالای گیاه منتقل شده، سپس وارد آوند آبکش می‌شود. چون نواحی در حال رشد فعال به عناصر و انرژی نیاز دارند. بنابراین با افزایش بیشتر رشد Si^{+2} به سرعت به بالای گیاه انتقال می‌یابد. حتی اگر این نیاز شدید باشد ممکن همراه موادی مانند فیتوکلات از برگ‌های پایین‌تر وارد نواحی در حال رشد و فعال گردد.

همچنین گزارش‌هایی وجود دارد که نشان داده انتقال Si^{+2} می‌تواند از طریق آوند آبکش به نوک ریشه و

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-25]
[DOR: 20.1001.1.23222727.1399.9.38.1.8]

جدول ۷- میانگین مقادیر فیتوکلات در ترکیب با Al^{+3} و Si^{+2} بر حسب $mg.g^{-1}$ و غلظت کل عناصر آزاد Al^{+3} و Si^{+2} در برگ‌ها و ریشه رقم شیرودی

شیرودی	عناصر با فیتوکلات		عناصر آزاد		درصد عناصر آزاد	
اجزا	Al	Si	Al	Si	Al	Si
برگ ۱	۱۲^{b}	۹^{b}	۱٦/۱^{a}	۱٥٦^{a}	۲٥/٥	۹٦/۷
برگ ۲	۱۱/۲^{b}	۱۱^{a}	۱٥/۳^{b}	۱٤۸^{b}	۲٦/۷	۹٥/۲
برگ ۳	۱۰/٥^{c}	۱۰^{a}	۱۳/۸^{c}	۱۳۹^{c}	۲۳/۹	۹٥/٦
برگ ٤	۹/۸^{d}	۷^{c}	۱۲/۲^{d}	۱۳۳^{d}	۱۹/٦	۹٦/۹
برگ ٥	۹/٤^{d}	۷^{c}	۱۳/٦^{e}	۱۳۰^{d}	۳۰/۸	۹٦/۲
برگ ٦	۸/٥^{e}	۹^{b}	۱۲/۹^{e}	۱۳۱^{d}	۳٤/۲	۹٦
برگ ۷	۱٥/٥^{a}	۹^{b}	۱۹/٥^{f}	۱۲۷^{d}	۲۰	۹٤
میانگین	۱۱	٥	۲/٥	۱۲۸	۲٥	۱٤۷
نوک ساقه	۱۹/٤^{d}	٦^{d}	۲۲/۷^{b}	۱۲۷^{b}	۱٤/٥	۹٥
نوک ریشه	۲۲/۲^{a}	۱۳^{a}	۲۱/٤^{c}	۱٤۸^{a}	۳	۹۱
اول ریشه	۲۰/۳^{c}	۹^{c}	۲۷/٦^{a}	۱٤۸^{a}	۲۸	۹۳
دوم ریشه	۲۱^{b}	۱۲^{b}	۲۸/٥^{a}	۱٤۹^{a}	۲٦	۹۱
میانگین	۲۰/۷	۱۰	۲٥	۱٤۳	۱٥	۹۳
R2	۰/٦۱	۰/۷٤	۰/٦۸	۰/٦۸	۰/۹۳	۰/۸٥

مقادیر میانگین‌ها با حداقل یک حرف مشابه در هر ستون براساس آزمون مقایسه میانگین‌ها به روش دانکن اختلاف معنی‌داری با یکدیگر در سطح ٥٪ ندارند.

برگ‌ها جوان صورت بگیرد (Ma, 2005, 2004). شاید یک دلیل این باشدکه آوند آبکش سریع‌تر از آوند چوبی تمایز پیدا می‌کند و انتقال Si^{+2} به بخش‌های در حالت رشد فعال بیشتر با شیره پرورده از طریق آوند آبکش صورت می‌گیرد. بنابراین عدم‌تجمیع Si^{+2} در ریشه به احتمال زیاد درنتیجه انتقال سریع این عنصر از طریق هر دو آوند است (فلاح، ۱۳۸۳).

تغییرات مقدار فیتوکلات در دو رقم برنج: تحقیقات Ma در سال ۲۰۰٤ و ۲۰۰٥ نشان داد رشد فعال گیاه برنج به مقدار زیادی کربن نیاز دارد. حال اگر کربن به متابولیت‌های دیگری غیر مواد رشد، مانند فیتوکلات‌ها اختصاص یابد، پیش‌بینی می‌شود که رشد کاهش یابد. در واقع مواد اختصاص‌یافته به ترکیبات سازگاری افزایش می‌یابد. با مقایسه غلظت فیتوکلات در تیمار Al^{+3} و Si^{+2} با شاهد ملاحظه شد در رقم شیرودی Al^{+3} غلظت فیتوکلات را تقریباً ۱٥٪ و در رقم آوس تقریباً ۹٪ بیشتر از Si^{+2} افزایش داده است ($P<0/05$ ،جدول ٦ و ۸). Al^{+3} غلظت فیتوکلات را در رقم شیرودی در برگ اول تا هفتم به‌ترتیب ٥۲، ٤٥، ٤۲، ٤۳، ٤۰، ٤۸ و ٤٥٪ افزایش داد. در حالیکه Si^{+2} غلظت فیتوکلات را در برگ اول تا هفتم به ترتیب ۳۹، ۳٤، ۳۰، ۳۰، ۲۳، ۲۹ و ۳۰٪ افزایش داد. با مقایسه فیتوکلات در رقم آوس در تیمار Al^{+3} و Si^{+2} با شاهد ملاحظه شد با اضافه‌شدن Al^{+3} به محیط‌کشت میزان کل فیتوکلات در رقم آوس حدود ٥۲٪ افزایش یافت ($P<0/05$ ،جدول ۸). Al^{+3} غلظت فیتوکلات را در برگ اول تا هفتم به‌ترتیب ٥٦، ٥٤، ٥٥، ٥٦، ٥۰، ٤۸ و ٤۱٪ افزایش داد. در حالی که اضافه‌شدن Si^{+2} به محیط‌کشت غلظت فیتوکلات را در برگ اول تا هفتم در

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1399.9.38.1.8]

جدول ۸- مقایسه میانگین‌ها و درصد تغییرات غلظت کل فیتوکلات (mg g^{-1} FW) در برگ‌ها و ریشه رقم آوس

آوس	کل فیتوکلات			درصد تغییرات فیتوکلات	
اجزا	شاهد	Si	Al	تغییرات Al	تغییرات Si
برگ ۱	۲۱/۳^{a}	۳۸/۹^{a}	٤۸/٦^{a}	٥٦	٤٥
برگ ۲	۲۲/٦^{a}	۳۷/۷^{b}	٤۹/۳^{a}	٥٤	۳۹
برگ ۳	۲۰/۳^{b}	۳۹/۸^{a}	٤٦/۳^{b}	٥٥	٤۸
برگ ٤	۱۹/٤^{c}	۳۷/۲^{b}	٤٤/۸^{c}	٥٦	٤۸
برگ ٥	۲۰/۳^{b}	۳٦/۷^{b}	٤۲/۲^{d}	٥۰	٤۲
برگ ٦	۲۰/٦^{b}	۳٥/٦^{b}	۳۹/۳^{e}	٤۸	٤۲
برگ ۷	۲۰/۳^{b}	۳۳/۳^{b}	۳٥/۲^{f}	٤۱	۳۸
میانگین	۲۰	۳٦	٤۳	٥۲	٤۳
نوک ساقه	۱۳/۲^{a}	۱٦/٥^{a}	۲۸/۷^{c}	٥٤	۲۰
نوک ریشه	۱۱/۲^{b}	۱٦/۳^{a}	٥٥/۷^{b}	۷۹	۳۱
اول ریشه	۱۱/٤^{b}	۱٥/٥^{b}	٥۷/۳^{a}	۸۰	۲٦
دوم ریشه	۱۱/۲^{b}	۳٤/٦^{c}	٥٦/۳^{a}	۸۰	٦۷
میانگین	۱۱	۱۸	٥٦	۸۰	٤۹
R2	۰/٦٤	۰/۷۰	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۷۱

مقادیر میانگین‌ها با حداقل یک حرف مشابه به ترتیب در هر ستون یا بر اساس آزمون مقایسه میانگین‌ها به روش دانکن اختلاف معنی داری با یکدیگر در سطح احتمال ٥٪ ندارند.

این رقم به‌ترتیب ٤٥، ۳۹، ٤۸، ٤۸، ٤۲، ٤۲ و ۳۸٪ افزایش داد. با مقایسه تأثیر دو فلز روی افزایش فیتوکلات در رقم آوس Al^{+3} غلظت فیتوکلات را در بخش‌های هوایی تقریباً ۹٪ بیشتر از Si^{+2} افزایش داد. در حالی که این مقدار در ریشه بیش از ۳۲٪ است. بنابراین مقدار بیشتری از Al^{+3} جذب شده بود در ریشه نگهداری می‌شود. مقدار فیتوکلات در رقم آوس بیشتر از رقم شیرودی است ($P<$۰/۰٥ ،جدول ۸). تحقیقاتی که روی رقمی از برنج انجام شده بود نشان داد زمانی که Si^{+2} با EDTA در اختیار گیاه قرار گیرد سرعت انتقال Si^{+2} چندین برابر افزایش پیدا می‌کند (Juan and Charlot, 2002). بر این اساس بعضی محققین اعتقاد دارند که انتقال سریع Si^{+2} در گیاهان ممکن هست با نوعی از فیتوکلات همراه باشد که قابل انتقال است و درنتیجه انتقال آن سریع‌تر انجام می‌شود.

در صورتی که این روند برای Al^{+3} متفاوت است حتی در ریشه بین دو قسمت نوک ریشه و قسمت‌های بالاتر تفاوت وجود داشت و با افزایش غلظت Al^{+3} در برگ‌های دو رقم مقدار فیتوکلات افزایش یافت و این افزایش متناسب با مقدار فیتوکلات در ترکیب با Al^{+3} و حدود ۷٥٪ کل فیتوکلات بود. بنابراین با توجه به تغییرات کمی که از نظر مقدار Al^{+3} در قسمت‌های مختلف ریشه و برگ‌ها وجود دارد، تجمیع Al^{+3} را در بافت‌های ریشه و در دیواره‌های سلولی و یا کلاً فضای آپوپلاست ریشه تأیید می‌کند. به‌طوری که نتایج تحقیق نشان داده کمتر از ۱۰٪ از مقداز کل Al^{+3} در ریشه و برگ‌ها به‌صورت آزاد وجود دارد (Miyasaka and Hawes, 2001; Leopold *et al*., 1999).

نتایج این تحقیق نشان داد بیش از ۷۰٪ Al^{+3} در آپوپلاست ریشه باقی ماند که احتمالاً با نواحی باردار منفی در سطح

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-25]
[DOR: 20.1001.1.23222727.1399.9.38.1.8]

جدول ۹- مقایسه میانگین فیتوکلات ترکیب با Al^{+3} و Si^{+2} بر حسب $mg.g^{-1}$ و غلظت کل Al^{+3} و Si^{+2} در برگ‌ها و ریشه رقم آوس

آوس	عناصر پیوند با فیتوکلات		غلظت کل عناصر		درصد عناصر آزاد	
اجزا	Al	Si	Al	Si	Al	Si
برگ ۱	۱۷^{a}	۵^{a}	۲٤/۸^{a}	۱۳۳^{a}	۳۱	۹٦
برگ ۲	۱٦/۱^{a}	۵^{a}	۲۲/٦^{b}	۱۲۸^{b}	۲۷	۹٦
برگ ۳	۱۷/٦^{a}	٤^{b}	۱۹/٦^{c}	۱۳۲^{a}	۱۳	۹٦
برگ ٤	۱۵/۲^{b}	٤^{b}	۱٦/۸^{d}	۱۲۸^{b}	۱۰	۹٦
برگ ۵	۱۳/٤^{c}	۵^{a}	۱۵/٦^{d}	۱۲٤^{d}	۱٦	۹۵
برگ ٦	۱۳/۹^{d}	۵^{a}	۱۵/۳^{e}	۱۲۵^{c}	۸	۹۵
برگ ۷	۱۰/۲^{e}	٤^{b}	۱٤/٦^{f}	۱۲۵^{c}	۳۱	۹٦
میانگین	۱٤	٤	۱۸/٤	۱۲۷	۲۰	۹٦
نوک ساقه	۲۰/۷^{a}	۳^{c}	۲۳/٤^{d}	۱٤٤^{c}	۱۲	۹۷
نوک ریشه	۲۱/۲^{a}	۷^{b}	۲۵/۷^{c}	۱٤۹^{a}	۱۷	۹۵
اول ریشه	۲۰/۷^{a}	۹^{a}	۳۱/۷^{a}	۱٤٦^{b}	۳٤	۹۳
دوم ریشه	۲۰/٤^{b}	۹^{a}	۲۸/۷^{b}	۱٤٦^{b}	۲۸	۹۳
میانگین	۲۰	۸	۲۸	۱٤۷	۲۷	۹٤
R2	۰/۷۱	۰/۷۱	۰/۸۷	۰/٦۵	۰/۸۷	۰/٦۵

اعداد با حداقل یک حرف مشابه در هر ستون براساس آزمون مقایسه میانگین‌ها به روش دانکن اختلاف معنی‌داری با یکدیگر در سطح ۵٪ ندارند.

دیواره سلول‌های ریشه پیوند تشکیل داده است (Marzouk and Chaffai, 2009). به فرض اینکه سهم Al^{+3} انتقال‌یافته از ریشه به برگ‌ها کمتر از حد برآورد شده باشد، در این تحقیق ملاحظه شد در رقم آوس بالغ بر ۵۰٪ مقدار Al^{+3} جذب‌شده توسط فیتوکلات در ریشه نگهداری شد. لذا انتقال مجدد Al^{+3} در آوند آبکش به سایر قسمت‌های دیگر گیاه نمی‌تواند توسط هیچ یک از روش‌های شناخته‌شده صورت گرفته باشد چون اساساً مقدار Al^{+3} به‌صورت یون آزاد کم هست. در مقابل Juan و Charlotte (۲۰۰۲) نشان داده‌اند که Al^{+3} به مقدار بسیار کم وارد آوند آبکش می‌شود و انتقال آن در آوند آبکش بسیار کند است. زیرا شیره آوند آبکش دارای مقدار زیادی ترکیبات کلاته‌کننده شامل گلوتاتیون و پروتئین است که می‌توانند با Al^{+3} پیوند تشکیل دهند. در تیمار Al^{+3} با توجه به نتایج حاصل از برداشت‌های مختلف افزایش مقدار فیتوکلات در برداشت‌های سوم و چهارم بیشتر از سایر مراحل بود، از طرفی افزایش فیتوکلات در برگ‌های پیر بیشتر از برگ‌های جوان و آن هم به‌نوبه خود بیشتر از ریشه بود. بنابراین از یک طرف رابطه منطقی بین افزایش غلظت Al^{+3} و افزایش فیتوکلات وجود داشت. از طرفی افزایش فیتوکلات در برگ‌های جوان تیمارشده با Al^{+3} کمتر از برگ‌های پیر و آن هم کمتر از ریشه بود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که فیتوکلات تولیدی در برگ‌ها در جای دیگری مصرف دارد (Leopold *et al.*, 1999).

رابطه بین Al^{+3} و Si^{+2} آزاد با Al^{+3} و Si^{+2} پیوند با فیتوکلات در دو رقم برنج: جذب عناصر توسط گیاه به‌طور معمول دو مرحله‌ای است، و جذب یون در یک توده گیاهی زنده، قبل از اینکه یون‌ها به داخل سلول وارد شوند جذب آنها توسط دیواره ترجیح داده می‌شود. فرضیه‌های ارائه‌شده در جذب یون Juan و Charlot

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-25]
[DOR: 20.1001.1.23222727.1399.9.38.1.8]

جدول ۱۰- مقایسه میانگین ضریب انتقال و تجمیع Al^{+3} و Si^{+2} بین ریشه و برگ‌ها

	سیلیسیم				آلومینیم			
	شیرودی		آوس		شیرودی		آوس	
برداشت	انتقال	تجمیع	انتقال	تجمیع	انتقال	تجمیع	انتقال	تجمیع
اول	۰/۵۹^{c}	۰/۱۲^{d}	۰/۳٤^{c}	۰/۲٤^{e}	۰/۹۲^{a}	۰/۲۹^{c}	۰/۲۲^{d}	۰/۲٦^{b}
دوم	۱/۲۲^{b}	۰/۳۵^{c}	۰/۳۵^{c}	۰/۳۷^{d}	۰/۷۵^{c}	۰/۳۳^{b}	۰/۳۲^{c}	۰/۲۸^{b}
سوم	۱/۲^{b}	۰/٤۸^{b}	۱/٤٤^{a}	۰/٤٤^{bc}	۰/۸٤^{b}	۰/۳۹^{a}	۰/٤۱^{a}	۰/۲۷^{b}
چهارم	۱/۲^{b}	۰/٤۹^{b}	۱/۲٦^{b}	۰/٤۵^{b}	۰/۵٦^{d}	۰/۳۹^{a}	۰/۳۸^{b}	۰/۲۹^{b}
پنجم	۱/۲^{b}	۰/۵۱^{b}	۱/٤^{a}	۰/٤۹^{a}	۰/۵۵^{d}	۰/٤۱^{a}	۰/۳۸^{b}	۰/۳۷^{a}
ششم	۱/۳٦^{a}	۰/۵۷^{a}	۱/٤۵^{a}	۰/۵۲^{a}	۰/۵٤^{e}	۰/٤۰^{a}	۰/۳۲^{c}	۰/۳۷^{a}

اعداد با حداقل یک حرف مشابه به‌ترتیب در هر ستون براساس آزمون مقایسه میانگین‌ها به روش دانکن اختلاف معنی‌داری با یکدیگر در سطح ۵٪ ندارند.

(۲۰۰۲) پیشنهاد می‌دهند که جذب یون‌ها در شرایط زنده ممکن است با مکانیزم تبادل کاتیون، جذب سطحی و یا مستقیماً یون جذب شود. با مقایسه داده‌ها در جدول ۸ در رقم شیرودی ملاحظه شد غلظت Al^{+3} آزاد در برگ اول تا هفتم به‌ترتیب ۲۵، ۲٦، ۲۳، ۱۹، ۳۰، ۳٤ و ۲۰٪ است. در حالی که غلظت Si^{+2} آزاد در برگ اول تا هفتم به‌ترتیب ۹٦، ۹۵، ۹۵، ۹٦، ۹٦، ۹٦ و ۹۵٪ است. با مقایسه داده‌ها در جدول ۹ در رقم آوس همین روند با اندک تفاوتی وجود داشت. این نتایج گزارش تحقیقات Okuda و همکاران (۱۹٦۲) که جذب Si^{+2} را در انواع گیاهان زراعی بررسی کرده‌اند را تأیید می‌کند. با مقایسه غلظت فیتوکلات، غلظت Si^{+2} و Al^{+3} آزاد و Si^{+2} و Al^{+3} در ترکیب (جدول ٦، ۷، ۸ و ۹) در طول رشد با افزایش سن برگ‌ها مقدار فیتوکلات افزایش یافت. با افزایش غلظت Si^{+2} در برگ مقدار فیتوکلات افزایش پیدا کرد و مقدار Si^{+2} در ترکیب با فیتوکلات تقریباً ۵٪ و بیش از ۹۵٪ Si^{+2} به‌صورت آزاد است. در صورتی که در تیمار Al^{+3} میزان کل فیتوکلات به‌تدریج از برگ اول پیرترین برگ تا جوان‌ترین برگ افزایش پیدا کرد ومتناسب با آن تقریباً ۷۵٪ Al^{+3} به‌صورت ترکیب با فیتوکلات بود و تنها ۲٤٪ Al^{+3} به‌صورت آزاد است.

با توجه به یکسان‌بودن غلظت Si^{+2} در برگ‌ها و ریشه، این یکسانی نشان‌دهنده عدم‌رسوب Si^{+2} در داخل ریشه و برگ و یا باندشدن آن یا ترکیباتی از دیواره سلول‌های ریشه و برگ که سبب تجمیع Si^{+2} باشد. نتایج نشان داد با گذشت زمان در برداشت‌های آخر توزیع Si^{+2} در ریشه، برگ‌های پیر، برگ‌های جوان و ساقه گیاه روندی عکس توزیع Si^{+2} در برداشت‌های اول دارد، از طرفی تولید فیتوکلات در ریشه، برگ‌های پیر، برگ‌های جوان و ساقه گیاه از الگویی توزیع Si^{+2} پیروی کرد و از الگویی توزیع Al^{+3} پیروی نکرد. به‌نظر می‌رسد افزایش مقدار فیتوکلات به‌دلیل افزایش بار مثبت Al^{+3} و Si^{+2} است. از آنجایی که افزایش بیشتر بار مثبت مشکلات متابولیسمی ایجاد می‌کند، لذا فیتوکلات‌ها دارای بار منفی زیادی هستند بنابراین می‌توانند در پاسخ جهت ایجاد تعادل با بار مثبت Al^{+3} و Si^{+2} سنتز شوند. بنابراین دو نوع فیتوکلات وجود دارد فیتوکلات متحرک و غیرمتحرک. فیتوکلات متحرک سرعت انتقال را افزایش می‌دهد و با عنصر جابجا می‌شود. فیتوکلات‌هایی که از تحرک عناصر جلوگیری می‌کنند ساکن و غیرمتحرک هستند (Juan and Charlot, 2002).

نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد سرعت جذب و انتقال Si^{+2} بسیار بیشتر

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1399.9.38.1.8]

Al^{+3} است. مقدار Al^{+3} و فیتوکلات به‌تدریج با گذشت زمان یا پیرشدن برگ‌ها افزایش یافت. مقدار Si^{+2} ابتدا در ریشه اصلی افزایش یافت و سپس کاهش یافت که میزان این کاهش متناسب با افزایش مقدار آن در برگ‌ها است. علت کاهش غلظت Si^{+2} در برگ سوم و چهارم در دو رقم شاید به‌دلیل انتقال Si^{+2} از برگ‌های نزدیک به خوشه هنگام کشیدگی ساقه به قسمت‌های در حال رشد باشد که دلیلی بر این است که Si^{+2} ممکن است در آوند آبکش انتقال پیدا کند. مقدار بیشتر Al^{+3} در ریشه و برگ‌های هر دو رقم به‌خصوص رقم آوس در ترکیب با فیتوکلات است و مقدار کمتری Al^{+3} در ریشه و برگ‌ها به‌صورت آزاد است. به همین دلیل میزان مقاومت رقم آوس نسبت به محیط شور و Al^{+3} بیشتر از رقم شیرودی است. با مقایسه غلظت Al^{+3} و Si^{+2} در محیط رشد ملاحظه شد که غلظت Al^{+3} در گیاه در طول رشد قسمت‌بندی شده در حالی که برای Si^{+2} در ابتدای رشد ابتدا شیب از پایین به بالا است و در ادامه رشد این شیب بر عکس می‌شود که نشان‌دهنده عدم‌رسوب و سرعت بالای Si^{+2} از داخل ریشه به برگ و یا باندشدن آن با فیتوکلات و یا ترکیباتی از دیواره سلول‌های برگ است. همچنین نتایج نشان داده سهم Al^{+3} اتصال‌یافته آپوپلاستی در ریشه و برگ‌های پایین گیاه بیش از بالای آن است و مقدار کمی Al^{+3} وارد سیتوپلاست می‌شود.

منابع

فلاح، الف. (۱۳۸۳) بررسی اثرات مصرف سیلیس بر روی رشد و عملکرد برنج. معاونت مؤسسه تحقیقات برنج کشور در مازندران، آمل.

Brown, S., Chaney, R., Hallfrisch, J., Ryan, J. A. and Berti, W. R. (2004) In situ soil treatments to reduce the phyto- and bioavailability of lead, zinc, and cadmium. Journal of Environmental Quality 33: 522-531.

Bonanno, G. and Giudice, R. L. (2010) Heavy metal bioaccumulation by the organs of *Phragmites australis* (common reed) and their potential use as contamination indicators. Ecological Indicators 10: 639-645.

Chaffai, R. and Marzouk, B. (2009) The role of organic acids in the short- and long-term aluminum tolerance in maize seedlings (Zea mays L.). Acta Physiologiae Plantarum 31: 805-814.

Chen, J. J., Zhou, J. M. and Goldsbrough, P. B. (1997) Characterization of phytochelatin synthase from tomato. Physiologia Plantarum 101: 165-172.

Collet, L., De-Leon, C., Kollmeier, M., Schmohl, N. and Horst, W. J. (2002) Assessment of aluminum sensitivity of maize cultivars using roots of intact plants and excised root tips. Journal of Plant Nutrition and Soil Science 165: 357-365.

De Vos, V., Onk, M. J., Vooijs, R. and Schat, H. (1992) Glutathione depletion due to copper-induced phytochelatin synthesis causes oxidative stress in Silene cucubalus. Plant Physiology 98: 853-858.

Epstein, E. (1999) Silicon. Annual Review of Plant Physiology an Plant Molecular Biology 50: 641-66.

Juan, B. and Charlotte, P. (2002) Fast root growth responses, root exudates, and internal detoxification as clues to mechanisms of aluminum toxicity and resistance. Experimental of Botany 48: 75-92.

Leopold, I., Gunther, D., Schmidt, J. and Neumann, D. (1999) Phytochelatins and heavy metal tolerance. Phytochemistry 50: 1323-1328.

Lidon, F. C. and Henriques, F. S. (1998) Role of rice shoot vacuoles in copper toxicity regulation. Environmental and Experimental Botany 93: 197-202.

Ma, J. F. (2004) Role of silicon in enhancing the resistance of plants to biotic and abiotic stresses. *S*oil Science and Plant Nutrition 50: 11-18.

Ma, J. F. (2000) Role of organic acids in detoxification of Al in higher plants. Plant and Cell Physiology 41: 383-390.

Ma, J. F. (2003) Functions of silicon in higher plants. In: Silicon Biomineralization (ed. Muller, W.) Pp. 127-147. Springer Verlag, Berlin.

Miyasaka, S. C. and Hawes, M. C. (2001) Possible role of root border cells in detection and avoidance of aluminum toxicity. Plant Physiology 125: 1978-1987.

Okuda, A. and Takahashi, E. (1962) Studies on the physiological role of silicon in crop plants, Part 9. Effect of various metabolic inhibitors on the silicon uptake by rice plant. Japanese Journal of Soil Science and Manure 33: 453-455.

Sema, B. and Seref, G. (2005) Selective determination of aluminum bound with tannin in tea infusion. The Japan Society for Analytical chemistry. Analytical Sciences 21: 1005-10100.

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1399.9.38.1.8]

Richmond, R. E. and Sussman, M. (2003) Got silicon the non-essential beneficial plant nutrient, Current Opinion in Plant Biology 6: 268-272.

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1399.9.38.1.8]

The relationship between the amount of total phytochlate, the phytochlate bounded with Al^{+3} and Si^{+2} and the distribution Al^{+3}, Si^{+2} ions in the roots and leaves of two Iranian rice cultivars (*Oryza sativa* L)

Heidar Ali Malmir* and Allahyar Fallah

Department of Biology, BU-Ali Sina University, Hamedan, Iran.
(Received: 02/07/2019, Accepted: 15/01/2020)

Abstract

The phytochlates are the charged compounds that bonds with elements. For this purpose, in 1391, in the greenhouse of Bo Ali Sina University, the effect of Al^{+3} and Si^{+2} on the amount of total phytochlate, the Phytoclate bounded with Al^{+3} and Si^{+2} and the distribution of Al^{+3} and Si^{+2} ions in leaves and roots of two rice cultivars differing in salt tolerance were investigated. In this study, 30-day-old rice seedlings (Shirudi, Aus) were treated in sand culture with solutions of containing Al^{+3} and Si^{+2} in a split plot design were investigated, and samplings were done every three days. The results showed that there was a significant difference between the two rice cultivars in terms of distribution of Al^{+3} and Si^{+2} ions in roots and leaves ($P\leq0.05$). By comparing the concentrations of Al^{+3} and Si^{+2} in the roots and different of leaves, it was observed that the concentrations of Al^{+3} in the plant were partitioned. The absorption process of Si^{+2} was the first from the bottom to the top and then were reversed of the plant. In the process of absorption of Al^{+3}, the concentration gradient from the bottom to the top of the plant was intensified. The amount of Al^{+3} bounded with the phytochlate were higher than free Al^{+3}. Meanwhile, the amount of Si^{+2} bounded with the phytochlate were less than free Si^{+2}. Therefore, the results showed that the phytochlates were compounds that might be mobile or non-mobile and play an important role in charge balance and cation transport in plant leaves and roots. The higher resistance of Aus cultivar to Al^{+3} was due to the increase of immobile phytoclates in combination with Al^{+3} in the roots.

Keywords: Distribution of Al^{+3} and Si^{+2}, Types of phytochlates, Compartmentation

Corresponding author, Email: Malmir1970@gmail.com

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1399.9.38.1.8]