تغییرات کانی‌شناسی کانی گلوکونیت در اثر تلقیح باکتری‌های حل‌کننده سیلیکات در محیط ریشه کلزا

ندا رحیم‌زاده[1]، فرهاد خرمالی، محسن علمائی و آرش امینی

دانشجوی کارشناسی‌ارشد گروه علوم خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان؛ **Nrahimzadeh17@gmail.com**

دانشیار گروه علوم خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان؛ **Khormali@yahoo.com**

استادیار گروه علوم خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان؛ **Olamaee_m@yahoo.com**

استادیار گروه زمین‌شناسی، دانشگاه گلستان؛ **Arash88amini@yahoo.com**

دریافت: **92/5/27** و پذیرش: **93/11/29**

چکیده

ریزجانداران و ریزوسفر (ریشه سپهر) نقش مهمی را در هوادیدگی کانی‌های رسی ایفا می‌کنند. هوادیدگی کانی‌های موجود در خاک منبع اولیه بسیاری از عناصر غذایی ضروری گیاه از جمله پتاسیم هستند. این مطالعه با هدف بررسی تأثیر باکتری حل‌کننده سیلیکات و ریزوسفر گیاه کلزا بر تغییر و تحول کانی گلوکونیت انجام شد. در این پژوهش آزمایشی با آرایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار انجام شد. بستر کشت مخلوطی از شن کوارتزی (به عنوان ماده پرکننده) و کانی موجود در شیل گلوکونیتی بوده و گیاه کلزا در دو نوع حاوی و عاری از باکتری حل‌کننده سیلیکات به وسیله محلول غذایی استگنر در دو نوع پتاسیم‌دار و بدون پتاسیم در دوره کشت 100 روزه تغذیه شدند. بررسی بخش رس کانی توسط پراش پرتو ایکس انجام گردید. نتایج به دست آمده، ورمی‌کولیتی شدن گلوکونیت را در هر دو شرایط تغذیه‌ای نشان داد. شدت پیک 14 آنگستروم ورمی‌کولیت در شرایط تغذیه‌ای بدون پتاسیم و حاوی باکتری حل‌کننده سیلیکات بیشتر از شرایط تغذیه‌ای کامل بود. در شرایط تغذیه‌ای بدون پتاسیم و حاوی باکتری نسبت مساحت پیک 14 به 10 آنگستروم 7/58 بود که از نظر آماری در سطح 5% معنی‌دار بود. بنابراین به‌نظر می‌رسد که مهم‌ترین تغییر ایجاد شده، هوادیدگی میکا می‌باشد که در طی آن پتاسیم از بین لایه‌های میکا خارج می‌گردد. نتایج کانی‌شناسی با آزمایش گلخانه‌ای مطابقت داشته و نشانگر تأثیر مثبت افزایش شیل گلوکونیتی حتی در یک دوره کشت می‌باشد.

واژه های کلیدی: گلوکونیت، باکتری حل‌کننده سیلیکات، اثرات ریزوسفری، هوادیدگی

---

[1] نویسنده مسئول، آدرس: گرگان، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، دانشکده آب و خاک، گروه مهندسی علوم خاک

مقدمه

کانی‌های رسی با خصوصیات ویژه خود محل تبادلات یونی و ریشه گیاه می‌باشند و منبع ذخیره عناصر غذایی خاک به‌شمار می‌روند. هر یک از کانی‌های رسی دارای خصوصیات منحصر به فردی بوده و بر حسب این که هر کدام چقدر در خاک وجود داشته باشند، خصوصیات آن خاک تحت‌تأثیر کانی یا کانی‌های رسی غالب قرار می‌گیرد. اطلاع از درصد کانی‌های رسی برای تفسیر چگونگی تشکیل و تحول خاک‌ها، منشاءیابی کانی‌های رسی و حل پاره‌ای از مسایل تغذیه‌ای مانند تثبیت و آزادسازی عناصر مهمی چون پتاسیم کاربرد دارد. مهم‌ترین کانی‌های پتاسیم‌دار خاک فلدسپارهای پتاسیم و انواع میکاها می‌باشند که منابع طبیعی پتاسیم برای گیاهان هستند و پتاسیم آن‌ها به وسیله هوادیدگی آزاد می‌شود (جاردین و اسپارکس، 1984).

میکاها سیلیکات‌های لایه‌ای 2:1 می‌باشند که در صفحه هشت‌وجهی آن‌ها آلومینیم، منیزیم یا آهن وجود دارد. لایه‌های 2:1 به وسیله یک سری کاتیون‌ها، به ویژه پتاسیم، با نیروی زیادی کنار هم نگه داشته می‌شوند (تامپسون و یوکراینچزیک، 2002). این کانی‌ها بسته به کاتیون موجود در لایه هشت‌وجهی به میکای دوجائی (موسکویت و گلوکونیت) و میکای سه جائی (بیوتیت و فلوگوپیت) تقسیم‌بندی می‌شوند (اسپارکس و هوانگ، 1985). چهار شکل مختلف پتاسیم در خاک به ترتیب سهل‌الوصول بودن برای گیاهان شامل پتاسیم محلول، پتاسیم تبادلی، پتاسیم غیرتبادلی (تثبیت‌شده) و پتاسیم ساختمانی می‌باشد (اسپارکس و هوانگ، 1985). تعادل موجود بین شکل‌های مختلف پتاسیم در خاک، باعث تداوم تأمین پتاسیم برای گیاهان می‌شود (اسپارکس، 1987).

معمولاً پتاسیم ساختمانی برای گیاهان به کندی قابل استفاده بوده و قابلیت استفاده آن به عوامل متعددی از قبیل مقدار پتاسیم در سایر شکل‌ها و نیز درجه هوادیدگی میکاها و فلدسپارها بستگی دارد (ملکوتی و همکاران، 1384). کانی‌های میکایی از لحاظ اینکه منبع مهم عناصری مثل پتاسیم، منیزیم، روی و منگنز هستند، نقش ویژه‌ای در تغذیه گیاه دارند (هوانگ، 1989). برای حداکثر رشد گیاه، پتاسیم محلول و تبادلی خاک باید به طور مداوم از طریق آزادسازی پتاسیم غیرتبادلی در اثر هوادیدگی ذخایر پتاسیم یا افزودن کودهای پتاسیمی جایگزین شود (برش و توماس، 1985). مطالعات زیادی نشان داده‌اند که آزادسازی پتاسیم از ذخایر غیرتبادلی یا ساختمانی می‌تواند به طور معنی‌داری در میزان پتاسیم جذب‌شده توسط گیاه نقش داشته باشد (اسنپ و همکاران، 1995). خیامیم و همکاران (1390) در مطالعه خود مشاهده کردند که فلوگوپیت توانست نیاز پتاسیمی گیاهان تحت کشت را به خوبی تأمین نماید به طوری که غلظت پتاسیم شاخسار جو در محدوده کفایت این عنصر قرار داشت. لطفی پارسا و همکاران (1391) در آزمایش خود به این نکته رسیدند که غلظت پتاسیم با گذشت زمان به صورت معنی‌داری کم می‌شود. همچنین آنها مشاهده نمودند که فلوگوپیت توانسته است تا بیش از 110 روز پتاسیم گیاه را در محدوده کفایت نگه دارد.

شواهد متعددی نشان می‌دهد که گیاهان قادرند از پتاسیم غیرتبادلی و ساختمانی، افزون بر پتاسیم محلول و تبادلی، جهت تأمین پتاسیم مورد نیاز خود استفاده کنند. این امر می‌تواند موجب تغییرات کانی در منطقه ریزوسفر گردد. اسیدهای آلی تراویده از ریشه با کاهش pH ریزوسفر موجب قابل جذب شدن عناصر غذایی می‌شوند (فاگریا و استون، 2006). خادمی و آروسینا (2008) در تحقیقی تأثیر ریزوسفر گیاهان جو، یونجه و کلزا و ماده آلی (پیت) بر آزادسازی منیزیم از کانی‌های سپیولیت و پالیگورسکیت را بررسی کردند. مطالعات کانی‌شناسی پس از 100 روز کشت، تشکیل کائولینیت را در بسترهای حاوی پالیگورسکیت در ریزوسفر گیاهان یونجه، کلزا و جو در تیمارهای با و بدون ماده آلی نشان داد. بخشنده و همکاران (2011) در بررسی هوادیدگی کانی پالیگورسکیت در ریزوسفر گیاه سورگوم، مشاهده نمودند که فعالیت ریشه و باکتری حل‌کننده سیلیکات منجربه افزایش اسیدیته محیط ریزوسفر و در نهایت باعث آزادسازی منیزیم ساختمانی از بین لایه‌های کانی می‌شود.

مطالعه رضایی (1389) بر روی هوادیدگی کانی‌ها در ریزوسفر ذرت نشان داد که خاک توانسته است مقدار قابل توجهی از نیاز گیاه به پتاسیم را تأمین نماید. در این مطالعه با اعمال محلول غذایی بدون پتاسیم کانی ورمی‌کولیت تشکیل شد که نشان‌دهنده خروج پتاسیم بین لایه‌ای از بین لایه‌های کانی میکا (ایلیت) و هوادیدگی آن می‌باشد. خرمالی و همکاران (1390) در تحقیقی تأثیر ریزوسفر گیاه سورگوم و باکتری‌های باسیلوس بر آزادسازی پتاسیم از کانی گلوکونیت را بررسی کردند. مطالعات نشان داد در بسترهایی که محلول غذایی پتاسیم‌دار و محلول غذایی بدون پتاسیم دریافت کرده‌اند عمل هوادیدگی در جزء رس صورت گرفته است که این تغییر در تیمار محلول غذایی بدون پتاسیم بیشتر بوده است. همچنین آنها مشاهده نمودند که اختلاف معنی‌داری بین تیمار کود پتاسیم بر وزن خشک گیاه نداشته که

نشان‌دهنده برآورده شدن نیاز گیاه به پتاسیم از منبع گلوکونیت است. منبع گلوکونیت توانسته مقدار مورد نیاز پتاسیم گیاه را تأمین نماید. فانگ شنگ و یان هی (2006)، تأثیر باکتری *Bacillus edaphicus* را بر روی کانی ایلایت و فلدسپار بررسی کردند. آن‌ها مشاهده کردند که در نتیجه ترشح پلی‌ساکاریدها و اسیدهای آلی میزان پتاس آزاد شده از هر دو کانی افزایش یافت. آزمایشات نشان دادند که در اثر تلقیح *Bacillus exlorguen* به محیط‌های تجدید نشده در مدت 15 روز تا حدود 12 درصد K_2O از ارتوکلاز آزاد می‌شود، ولی در محلول تجدید شونده حدود 27 درصد K_2O، 23 درصد Al_2O_3 و 13درصد SiO_2 آزاد می‌گردد. مانیب و همکاران (1984) به بررسی تأثیر باکتری‌های سیلیکاته بر دو کانی ارتوکلاز و میکا پرداختند و نشان دادند که این باکتری‌ها قادر به آزاد کردن عناصر سیلیسیم و پتاسیم از این کانی‌ها هستند. دردی‌پور و همکاران (1389) تأثیر *Azospirillum lipoferum* و *Azotobacter chrococoum* بر آزادسازی پتاسیم خاک در کشت سویا بررسی کرده و مطالعات آنها نشان داد که بر پارامترهای رشد گیاه در سطح احتمال 1% معنی‌دار بوده و گیاهان تلقیح شده با ازتوباکتر نسبت به گیاهان تلقیح شده با آزوسپیریلیوم و تیمار بدون باکتری وزن خشک و غلظت پتاسیم بالاتری دارند. کشاورز زوجانی و همکاران (1392) تأثیر شش سویه از باکتری‌های آزاد کننده پتاسیم بر افزایش جذب پتاسیم در گیاه گوجه‌فرنگی بررسی نموده و نتایج آنها نشان داد که تلقیح هر شش سویه به ریشه گیاه در خاک لوم شنی با پتاسیم قابل جذب پایین، منجر به جذب بیشتر پتاسیم شده و این افزایش رشد حتی بیشتر از تیمار کود پتاسیم بود.

بنابراین تحقیق حاضر ظرفیت عرضه پتاسیم گلوکونیت را به روش‌های کانی‌شناسی و بیولوژیک مطالعه می‌نماید. نتایج این تحقیق باعث آگاهی از تغییر و تحول کانی رسی گلوکونیت در خاک و محیط ریزوسفر و توانایی عرضه پتاسیم از گلوکونیت بومی می‌شود.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش از آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار استفاده شد. فاکتورهای آزمایش شامل محلول غذایی (محلول غذایی کامل و محلول غذایی عاری از پتاسیم) و باکتری (حضور و عدم حضور باکتری) بود.

آزمایش گلدانی در گلدان‌های 1 کیلویی حاوی مخلوط شن کوارتزی (به عنوان ماده پرکننده) و گلوکونیت بدست آمده از شیل گلوکونیتی انجام شد. ابتدا در ته هر گلدان دو برگ کاغذ صافی قرار داده شد و سپس 250 گرم شن کوارتزی روی آن ریخته شد و پس از آن مخلوط شن کوارتزی و کانی میکایی به میزان 500 گرم اضافه گردید، سپس 8 عدد بذر کلزا در سطح آن قرار گرفت و مجدداً 250 گرم از شن کوارتزی روی بذرها ریخته شد. شن کوارتزی از معدنی در همدان تهیه گردید. با توجه به سهولت و دسترسی به منابع گلوکونیت از سازند اتامیر، نمونه‌برداری از این سازند صورت گرفت. با توجه به مطالعات کریمی و همکاران (2011) و خرمالی و همکاران (1390) آنالیزهای مربوط به عناصر سنگین مانند Cd و Pb در مطالعات آنها انجام گردیده و مقادیر این عناصر بسیار ناچیز می‌باشد. جهت آماده کردن بستر کشت جداسازی اندازه ذرات روی پودر شیل گلوکونیت‌دار به روش‌هایی که در زیر آمده است اقدام گردید.

حذف شیمیایی مواد ملاتی و جداسازی اجزاء رس از خاک نمونه‌برداری شده با روش کیتریک و هوپ (1963) انجام شد. کربنات‌ها در ابتدا توسط استات آمونیوم بافر شده یک نرمال در pH=5 حذف شدند. اضافه کردن استات سدیم یک نرمال تا هنگامی صورت گرفت که دیگر اثر واکنش با اسید کلریدریک یک نرمال دیده نشد. مواد آلی سپس با آب اکسیژنه 30 درصد در حمام آب هضم شدند. اکسیدهای آهن آزاد از نمونه‌ها به‌وسیله روش مهرا و جکسون (1960) حذف شدند. سپس ذرات در اندازه شن و سیلت درشت و نیز بخش رس و سیلت ریز توسط روش ترسیب جدا شدند و از بخش رس و سیلت ریز در این آزمایش استفاده گردید. به منظور بررسی ترکیب عنصری هر کدام از مواد ذکر شده تجزیه عنصری فلورسانس پرتوایکس (XRF) انجام شد (جدول 1).

پس از آگاهی از این که شن کوارتزی حاوی مقادیر بسیار ناچیز پتاسیم است، از این ماده به عنوان ماده پرکننده محیط کشت استفاده شد. به منظور استفاده از شن کوارتزی ابتدا ذرات بزرگتر از 200 مش با اسید کلریدریک 0/2 نرمال و سپس با آب مقطر به خوبی شستشو شده و در آون با دمای 105 درجه سانتی گراد خشک شد. برای حذف ناخالصی‌های موجود در سطوح تبادلی کانی‌های میکایی و همچنین اطمینان از عدم وجود پتاسیم محلول و تبادلی، کانی مورد نظر ابتدا با کلرور کلسیم 0/5 نرمال اشباع شد و سپس پس از شستشو مورد استفاده قرار گرفت. از کانی میکایی به منظور منبع تأمین نیاز پتاسیم گیاهان در این پژوهش استفاده شد، بدین منظور به میزان مساوی از کانی میکایی جهت تأمین 0/25

درصد K_2O به گلدان‌ها اضافه و به خوبی با شن کوارتزی مخلوط گردید.

از باکتری‌های حل‌کننده سیلیکات (*Bacillus spp*) در این آزمایش استفاده شد. باکتری‌های مورد نظر از بانک میکروبی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان تهیه شد. برای تلقیح این باکتری‌ها، ابتدا آنها را در محیط نوتریت براث (NB)[1] در دمای 27 درجه سانتی‌گراد به مدت 48 ساعت با سرعت 150 دور در دقیقه شیک شده و به منظور حذف پتاسیم، محیط کشت شده، در سانتریفوژ با دور 10 هزار دور در دقیقه، بمدت 15 دقیقه سانتریفوژ گردید. با بهم زدن و یکنواخت کردن رسوب تشکیل شده در محلول سرم فیزیولوژیک به مقدار 1 میلی‌لیتر مایه تلقیح با جمعیت 10^7 باکتری به هر گلدان اضافه شد.

جهت انجام کشت از رقم هایولا که از ار قام غالب کلزا در استان گلستان است، استفاده شد. در طول دوره 100 روزه کشت از آب مقطر به منظور آبیاری و از محلول غذایی استگنر در دو نوع کامل یا بدون پتاسیم بر حسب نوع تیمار، برای تغذیه گیاهان استفاده شد. به منظور ارزیابی وضعیت محیط کشت از لحاظ میزان پتاسیم محلول و pH در طول دوره کشت سه مرتبه زهکش گلدان‌ها جمع‌آوری شد. بدین‌گونه که ابتدا گلدان‌ها را از لحاظ رطوبتی به حد اشباع رسانده و پس از خروج مقدار مشابه آب از تمام گلدان‌ها به میزان مساوی آب به گلدان‌ها اضافه و عصاره محیط کشت از ته گلدان جمع‌آوری شد. در عصاره بدست آمده غلظت پتاسیم و pH مورد ارزیابی قرار گرفت. به منظور بررسی تغییر و تحولات کانی‌های رسی، نمونه‌برداری از محیط کشت پس از اتمام دوره کشت به عمل آمد. بدین‌منظور، تمامی محتویات گلدان خارج گردید و پس از برش دادن قسمت‌های رویی و انتهایی که حاوی شن کوارتزی خالص بوده، از وسط گلدان به‌ویژه از اطراف ریشه اصلی نمونه‌برداری انجام شد. سپس نمونه تهیه شده را برروی الک 270 مش قرار داده تا ذرات کانی کوچکتر از 53 میکرون جدا شوند.

این عمل با فشار آب مقطر انجام شد. جهت انجام آزمایش کانی‌شناسی بعد از کشت گیاه، جزء رس با محلول کلریدپتاسیم و کلریدمنیزیم اشباع گردید. برای اشباع سازی مقادیر غلظت‌های یکسانی از رس‌ها تهیه شده و سپس سوسپانسیون ته لوله آزمایش با پیپت و به آرامی و دقت روی سطح اسلاید پخش گردید تا امکان مقایسه دقیق‌تر نمونه‌های مختلف فراهم شود. سپس هر نمونه رس تحت تأثیر چهار تیمار منیزیم، منیزیم-گلیسرول، پتاسیم در دمای معمولی و پتاسیم در حرارت 550 سانتی‌گراد قرار گرفت تا توسط دستگاه پراش‌سنج پرتو ایکس مدل D8 ADVANCE دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان (در زوایای 2^θ بین 2-30 درجه، ولتاژ 40 کیلوولت و جریان 30 ملی‌آمپر) مورد تجزیه کانی‌شناسی قرار گرفته و تفسیر شدند. از مساحت نسبی قله‌های پراش‌نگاشت پرتو ایکس جهت تحلیل کمی کانی‌شناسی استفاده گردید. داده‌های بدست آمده از آزمایش با استفاده از نرم‌افزار SAS مورد تجزیه و تحلیل آماری و مقایسه میانگین‌ها با آزمون LSD انجام شد.

نتایج و بحث

آنالیز پراش پرتو ایکس کانی میکایی قبل از انجام کشت

شکل 1 پراش نگاشت پرتو ایکس کانی گلوکونیت در اندازه رس را قبل از انجام کشت نشان می‌دهد. در آنالیز بخش رس، کانی‌های کلریت، میکا (ایلیت و گلوکونیت)، کائولینیت، کانی مختلط نامنظم (میکا-ورمی‌کولیت، پیک 11 آنگستروم) و مقداری ورمی‌کولیت دیده می‌شود. در نمونه گلوکونیت پیک‌های رده اول (001) و رده سوم (003) به ترتیب 10 و 3/33 آنگستروم به وضوح قابل مشاهده است. این دو پیک در تمامی میکاها وجود دارد. در این شکل در تیمار اشباع با منیزیم علاوه بر دو پیک معمولی کانی‌های میکایی یعنی پیک‌های رده اول و سوم 10 و 3/33 آنگستروم پیک رده دوم (5 آنگستروم) به طور واضح مشاهده می‌شود. در واقع این یک روش معمولی در تشخیص کانی‌های میکایی دی و تری‌اکتاهدرال است، به طوریکه اگر پیک 5 آنگستروم به طور واضح در میکا وجود داشته باشد نشان‌دهنده دی‌اکتاهدرال بودن آن است و اگر این پیک وجود نداشته باشد یا ضعیف باشد آن میکا تری‌اکتاهدرال است (فنینگ و همکاران، 1989). اساساً میکاها در خاک‌ها از مواد مادری به ارث می‌رسند. بنابراین در خاک‌های جوان‌تر مقدار بیشتری نسبت به خاک‌های تکامل‌یافته‌تر و هوادیده‌تر وجود دارد (دیکسون و وید، 1989).

---

1. Nutrient broth

جدول 1- تجزیه عنصری شن کوارتزی و شیل گلوکونیتی مورد استفاده به روش فلورسانس پرتو ایکس

کانی	Na_2O	MgO	Al_2O_3	SiO_2	K_2O	CaO	Fe_2O_3	MnO	P_2O_5	TiO_2	LOI*	Total
						%						
گلوکونیت	1/49	2/24	15/67	48/86	4/85	1/24	12/85	0/035	0/214	1/32	10/5	99/31
شن کوارتزی	<0/10	0/11	0/36	97/50	<0/10	0/61	0/57	-	-	-	0/48	99/86

*LOI: کاهش وزن در دمای بالا

جدول 2- مساحت نسبی پیک 14 به 10 آنگستروم در تیمار Mg به تفکیک نوع محلول غذایی و باکتری حل‌کننده سیلیکات

نوع کانی	شاهد (قبل از آزمایش)	محلول غذایی پتاسیم دار		محلول غذایی بدون پتاسیم	
		حاوی باکتری	بدون باکتری	حاوی باکتری	بدون باکتری
گلوکونیت	0/72	2/47[c]	1/97[c]	7/58[a]	4/21[b]

میانگین‌های با حروف مشترک در سطح 5 درصد اختلاف معنی‌دار ندارند.

کانی‌شناسی بخش رس بسترهای حاوی گلوکونیت در پایان دوره کشت

شکل 2 پراش نگاشت پرتو ایکس نمونه‌های اشباع با منیزیم کانی گلوکونیت را در دو حالت تغذیه‌ای و به تفکیک حضور و عدم حضور باکتری حل‌کننده سیلیکات نشان می‌دهد. در شرایط تغذیه‌ای بدون پتاسیم که گلوکونیت تنها منبع پتاسیم مورد نیاز گیاه بوده است، در هر دو شرایط حضور و عدم حضور باکتری حل کننده سیلیکات تغییرات محسوسی در شدت پیک 10 آنگستروم که مربوط به کانی میکا می‌باشد، دیده شده است. اما همانطور که جدول 2 نشان می‌دهد، نسبت مساحت پیک 14 به 10 آنگستروم در تیمار Mg حاوی باکتری و بدون باکتری به ترتیب 7/58 و 4/21 می‌باشد. به عبارتی تأثیر باکتری حل‌کننده سیلیکات بر نسبت مساحت پیک 14 به 10 آنگستروم از نظر آماری در سطح 5% معنی‌دار بوده است.

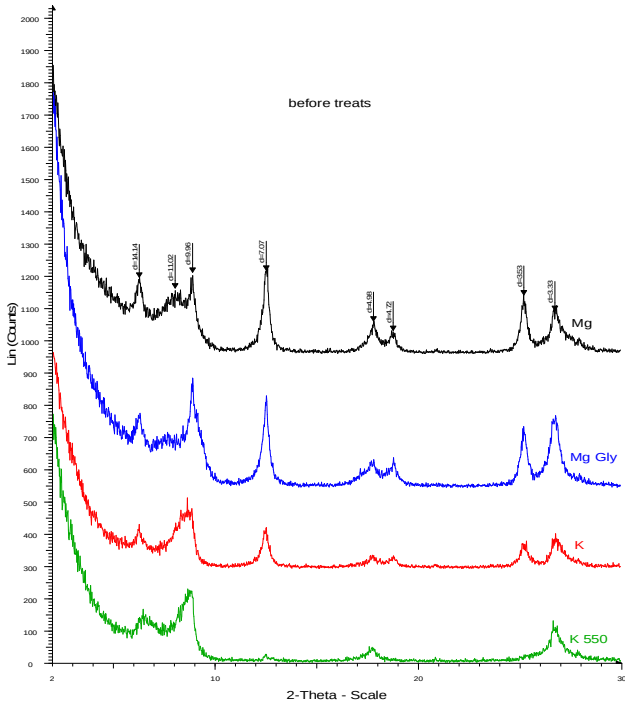
پس از اعمال تیمار کاشت گیاه کلزا همراه با محلول غذایی بدون پتاسیم و باکتری، شدت پیک کانی ورمی‌کولیت افزایش محسوسی را نشان می‌دهد. این افزایش با کاهش شدت پیک 10 آنگستروم میکا همراه می‌باشد. بنابراین به نظر می‌رسد که مهمترین تغییر ایجاد شده، هوادیدگی میکا بوده که در طی آن پتاسیم از بین لایه‌های میکا خارج شده و کانی ورمی‌کولیت تشکیل می‌گردد. همانطور که جدول 2 نیز نشان می‌دهد نسبت مساحت پیک 14 آنگستروم به 10 آنگستروم در شرایط تغذیه‌ای با پتاسیم در مقایسه با شرایط بدون پتاسیم کمتر بوده و اختلاف معنی‌دار از این لحاظ وجود دارد. پراش نگاشت اشعه ایکس در تیمار با منیزیم در شرایط تغذیه‌ای با پتاسیم و بدون پتاسیم تشکیل پیک پل مانندی را بین فرازهای 10 و 14 آنگستروم نشان می‌دهد که بیانگر تشکیل کانی مخلوط میکا- ورمی‌کولیت می‌باشد.

در شرایط تغذیه‌ای بدون پتاسیم، حضور پیک 16/81 آنگستروم در تیمار اشباع با منیزیم و اتیلن گلیکول از تشکیل مقدار کمی کانی اسمکتیت حکایت دارد (شکل 3-الف). لازم به ذکر است که در شرایط عدم حضور باکتری حل‌کننده سیلیکات ورمی‌کولیت کمتر و اسمکتیت بیشتر به وجود آمده است. در تیمارهای اشباع با منیزیم و اتیلن گلیکول و در شرایط تغذیه محلول غذایی حاوی پتاسیم نیز از شدت پیک 14 آنگستروم کاسته و پیک 16/81 آنگستروم تشکیل شده است (شکل3-ب). در این شرایط نیز همانند شرایط تغذیه‌ای بدون پتاسیم شدت پیک 16/81 آنگستروم حاصله در تیمار بدون باکتری بیشتر از شرایطی است که باکتری حل‌کننده سیلیکات حضور دارد.

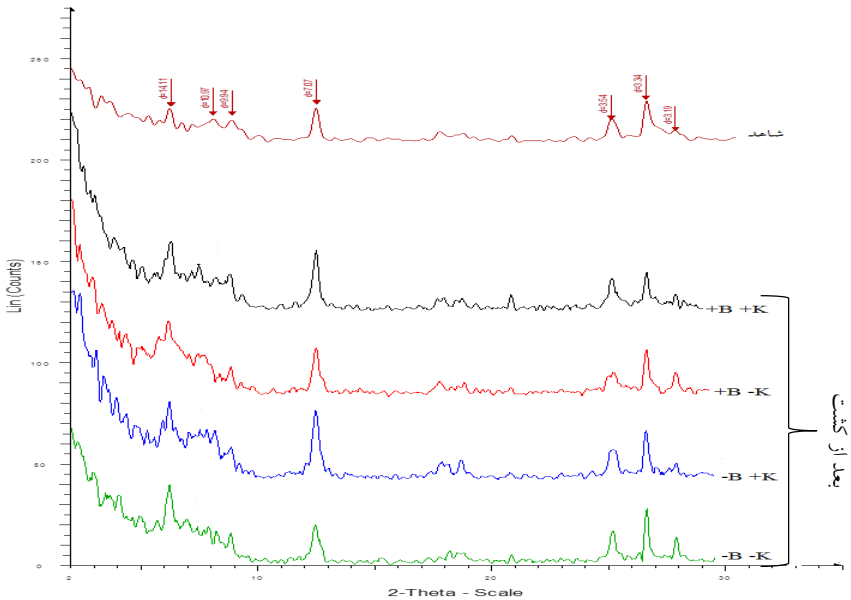
جدول 3- متوسط pH زهکش‌های تهیه شده در طول دوره کشت

نوع بستر کشت	(+K)+B	(-K)+B	(+K)-B	(-K)-B
اولین زهکش (30 روز پس از شروع کشت)	7/32	7/27	7/58	7/60
دومین زهکش (60 روز پس از شروع کشت)	7/09	7/17	7/21	7/30
سومین زهکش (100 روز پس از شروع کشت)	7/16	7/21	7/35	7/43

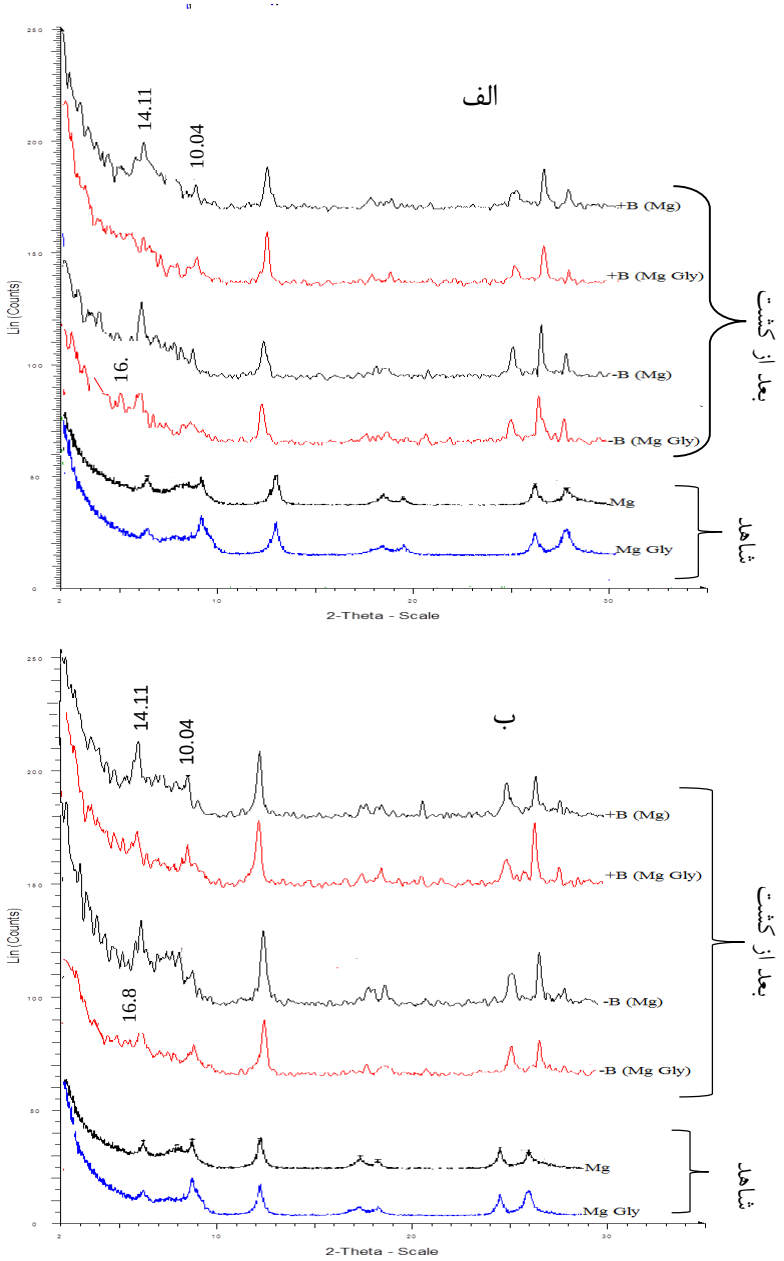
K+ و K- به ترتیب بیانگر محلول غذایی کامل (حاوی پتاسیم) و محلول غذایی فاقد پتاسیم و B+ و B- به ترتیب بیانگر وجود و عدم وجود باکتری حل‌کننده سیلیکات می‌باشند.



شکل 1- پراش‌نگاشت پرتو ایکس تیمارهای مختلف بخش رس کانی گلوکونیت قبل از انجام کشت. Mg، Mg Gly، K و K-550 به ترتیب نشان‌دهنده تیمارهای اشباع با منیزیم، منیزیم و اتیلن گلیکول، پتاسیم و پتاسیم و حرارت 550 درجه سانتی گراد می‌باشد



شکل 2- پراش‌نگاشت پرتو ایکس بخش رس کانی گلوکونیت و محصولات هوادیدگی آن در تیمار منیزیم اشباع در پایان دوره کشت به تفکیک حضور باکتری حل‌کننده سیلیکات و شرایط تغذیه‌ای. B+ و B– به ترتیب حضور و عدم حضور باکتری حل‌کننده سیلیکات و K+ و K– به ترتیب شرایط تغذیه‌ای با و بدون پتاسیم را نشان می‌دهند.



شکل 3- پراش‌نگاشت پرتو ایکس بخش رس کانی گلوکونیت و محصولات هوادیدگی آن در پایان دوره کشت (الف) تیمارهای منیزیم اشباع و منیزیم و اتیلن گلیکول اشباع در شرایط تغذیه‌ای بدون پتاسیم و (ب) تیمارهای منیزیم اشباع و منیزیم و اتیلن گلیکول اشباع در شرایط تغذیه‌ای با پتاسیم. B+ و B– به ترتیب حضور و عدم حضور باکتری حل‌کننده سیلیکات و K+ و K– به ترتیب شرایط تغذیه‌ای با و بدون پتاسیم را نشان می‌دهند. همچنین Mg و Mg Gly به ترتیب شرایط اشباع با منیزیم و اشباع با منیزیم و اتیلن گلیکول را نشان می‌دهند

بعد از اتمام کشت گیاه و اتمام یک دوره فصل زراعی در بسترهایی که محلول غذایی پتاسیم‌دار و محلول غذایی بدون پتاسیم دریافت کرده‌اند عمل هوادیدگی و تغییر و تحول کانی‌ها در جزء رس صورت گرفته است که این تغییر در محیطی که محلول غذایی بدون پتاسیم دریافت کرده بیشتر بوده است. در شرایط تغذیه‌ای با

پتاسیم اگرچه پتاسیم مورد نیاز گیاه از طریق محلول غذایی تأمین می‌شود اما شرایط ریزوسفری و ترشحات ریشه، سرعت رشد و مقدار جذب گیاه باعث می‌شوند که مقداری از پتاسیم موجود در کانی آزاد شده و هوادیدگی در کانی‌ها صورت بگیرد.در شرایط تغذیه‌ای بدون پتاسیم تحت‌تأثیر ترشحات ریشه گیاه سطح ریشه اسیدی شده است. خرمالی و ابطحی (2013) بیان می‌کنند که ورمی‌کولیت در pH اسیدی کم و به سبب افزایش فعالیت آلومینیوم در خاک تشکیل می‌شود. مطالعات کوداما و همکاران (1994) نشان داد که در شرایط کمبود پتاسیم در ریزوسفر گیاهان تراوش اسیدهای آلی و یون هیدرونیوم زیاد می‌شود. با کاهش pH در ریزوسفر شرایط برای هوادیدگی کانی‌ها از جمله میکا فراهم شده است. با انجام عمل هوادیدگی پتاسیم بین لایه‌ای از ساختار میکا خارج شده و ورمی‌کولیت تشکیل می‌شود. با اعمال ریشه کانی میکا هوادیده شد و هوادیدگی میکا به این صورت انجام گرفت که یون H_3O^+ به لبه افقی ذرات حمله کرده و به درون شبکه میکا می‌رود، در این فرآیند لبه کانی به 18 آنگستروم رسیده و یون پتاسیم رها می‌شود (تیلور و ولبل، 1991). گرکه و همکاران (1994) افزایش خروج پروتون‌ها و کاهش ترشح ترکیبات کربوکسیلات را در اثر کمبود پتاسیم در گندم، کلزا و چغندر قند گزارش نمود. نتایج مربوط به آنالیز گیاه نشان می‌دهد که گیاه کلزا در شرایط تغذیه‌ای بدون پتاسیم در محیط گلوکونیت به خوبی توانسته است از پتاسیم موجود در بین لایه‌های کانی استفاده کند به طوریکه غلظت پتاسیم اندام هوایی در محدوده کفایت این عنصر قرار داشت (رحیم‌زاده و همکاران، 1392). نتایج کانی‌شناسی با آزمایش گلخانه‌ای مطابقت داشته و نشانگر تأثیر مثبت افزایش شیل گلوکونیتی حتی در یک دوره کشت می‌باشد.

غلظت پتاسیم و pH موجود در زهکش

نتایج pH زهکش‌ها که در جدول 3 آمده است، نشان می‌دهد در حضور باکتری حل‌کننده سیلیکات pH محیط نسبت به تیمارهای فاقد باکتری حل‌کننده سیلیکات اندکی کاهش پیدا کرده است که به نظر می‌رسد این نشان‌دهنده تأثیر مثبت باکتری‌های حل‌کننده سیلیکات در کاهش pH ریزوسفر و در نتیجه هوادیدگی می‌باشد.

نتایج جدول 4 نیز نشان می‌دهد در شرایط تغذیه‌ای بدون پتاسیم، مقدار پتاسیم موجود در عصاره گیاهان بسیار ناچیز است. بیشترین میزان پتاسیم موجود در عصاره گیاه به تیمار تغذیه شده با محلول غذایی کامل و حاوی باکتری حل‌کننده سیلیکات می‌باشد که این امری کاملاً بدیهی است. با توجه به اطلاعات موجود در جدول 3 و 4، تأثیر مثبت باکتری‌های حل‌کننده سیلیکات را در افزایش اسیدیته محیط ریزوسفر و افزایش غلظت پتاسیم در عصاره گیاه دیده می‌شود که علت این امر به دلایل زیر می‌باشد:

1- تجزیه کانی در اثر کاهش pH محیط کشت (با ترشح اسیدهای آلی) 2- تشکیل کمپلکس با کاتیون‌های سطحی کانی (از طریق سیدروفور و اسید آلی) 3- پلی‌ساکاریدهای تولید شده توسط باکتری‌ها که به طور غیر مستقیم در آزاد سازی عناصر نقش دارند: این پلی‌ساکاریدها، اسیدهای آلی و سیدروفرها را به شدت جذب کرده و منجر به تشکیل غلظت بالائی از اسیدهای آلی و سیدروفرها در نزدیکی سطح کانی شده و با اکسید سیلیسیم موجود در سطح کانی کمپلکس کرده است و این عناصر از سطح کانی آزاد شده و وارد محیط کشت محلول شده است، از طرفی پلی‌ساکاریدهای موجود در محیط کشت این عنصر را جذب کرده و باعث به هم خوردن تعادل سیلیسیم بین کانی و فاز مایع شده است و در نهایت منجر به آزاد شدن عناصری مثل پتاسیم و آهن گردیده است (لی و همکاران، 2006؛ دریور و ستلینگز، 1997).

جدول 4- متوسط غلظت پتاسیم ($mg\ L^{-1}$) زهکش‌های تهیه شده در طول دوره کشت

نوع بستر کشت	(+K)+B	(-K)+B	(+K)-B	(-K)-B
اولین زهکش (30 روز پس از شروع کشت)	8/54	3/63	6/63	1/82
دومین زهکش (60 روز پس از شروع کشت)	7/94	3/86	5/87	1/90
سومین زهکش (100 روز پس از شروع کشت)	8/12	2/92	5/59	1/49

K+ و K- به ترتیب بیانگر محلول غذایی کامل (حاوی پتاسیم) و محلول غذایی فاقد پتاسیم و B+ و B- به ترتیب بیانگر وجود و عدم وجود باکتری حل‌کننده سیلیکات می‌باشند.

شرایط محیط ریزوسفر مانند کمبود پتاسیم، گونه گیاهی و تلقیح باکتری‌های حل‌کننده سیلیکات از جمله عواملی هستند که ترشحات ریزوسفری را تحت تأثیر قرار می‌دهند. با توجه به بررسی‌های pH محیط ریزوسفر که سه مرتبه در طول دوره کشت اندازه‌گیری شد و در جدول 3 نشان داده شده است، می‌توان دریافت که در حضور باکتری‌های حل‌کننده سیلیکات مقدار pH کاهش می‌یابد. با توجه به اطلاعات موجود، در pH کمتر نسبت مساحت پیک 14 به 10 آنگستروم افزایش یافته است. بنابراین، از بین مکانیسم‌های ذکر شده، ترشح آنیون‌های آلی و تولید پروتون و در نتیجه کاهش اسیدیته ریزوسفر در توجیه تغییرات کانی‌شناسی محتمل‌تر است. نتایج تحقیقات خیامیم و همکاران (1389) در بررسی تأثیر همزیستی قارچ اندوفایت با فسیکوی بلند بر هوازدگی فلوگوپیت نشان داد که در حضور قارچ اندوفایت مقادیر pH کاهش یافته و با نمونه بدون اندوفایت اختلاف معنی‌داری نشان می‌دهد. همچنین در pH کمتر افزایش نسبت پیک 14 به 10 آنگستروم دیده شد. لازم به ذکر است به دلیل عدم امکان بررسی pH در محیط ریزوسفر، آب زهکش نمی‌تواند معیار مناسبی برای توجیه کاهش pH باشد.

نتیجه‌گیری

پس از اتمام دوره 100 روزه کشت، ورمی‌کولیتی شدن کانی گلوکونیت در شرایط تغذیه‌ای بدون پتاسیم و حاوی باکتری حل‌کننده سیلیکات در ریزوسفر گیاه کلزا مشاهده شد. در حالیکه، در گیاهان تغذیه شده با محلول غذایی کامل و عاری از باکتری حل‌کننده سیلیکات ورمی‌کولیتی شدن گلوکونیت با شدت بسیار کمتری اتفاق افتاد. همچنین قابل ذکر است که کانی اسمکتیت نیز تشکیل گردید که شدت پیک اسمکتیت در تیمارهای عاری از باکتری حل‌کننده سیلیکات بیشتر از شرایط حضور باکتری می‌باشد. با توجه به کاهش pH محیط ریزوسفر در شرایط حضور باکتری حل‌کننده سیلیکات، می‌توان تأثیر این باکتری را بر ترشحات ریشه، افزایش ترشح ترکیباتی مانند آنیون‌های آلی و تسریع هوازدگی کانی مشاهده نمود. در واقع باکتری‌های حل‌کننده سیلیکات با کاهش pH ریزوسفر،ترشح آنیون‌های آلی و تشکیل کمپلکس با کاتیون‌های سطحی کانی منجر به آزادسازی پتاسیم ساختمانی از کانی گلوکونیت می‌شود. به طور کلی مطالعات مختلف نشان داده‌اند که نوع گیاه و میزان ترشحات ریشه‌ای آن در استفاده از پتاسیم ساختمانی حائز اهمیت است. علاوه بر نقش گیاه در استفاده از پتاسیم ساختمانی، رهاسازی پتاسیم ساختمانی و بین لایه‌ای شدیداً به نوع کانی میکائی وابسته است. در نتیجه لازم است منابع بومی گلوکونیت شناسایی شده و از آن به عنوان کود پتاسیمی بر اساس کانی شناسی و آزمون خاک در جهت افزایش تولید استفاده شود.

فهرست منابع:

1. خرمالی، ف.، ا. دردی‌پور، آ. امینی، م. عجمی و ر. قربانی. 1390. بررسی منابع بومی ماسه‌سنگ گلوکونیتی از لحاظ توانایی عرضه پتاسیم و مطالعه هوادیدگی شیمیایی و بیولوژیک آن توسط روش‌های کانی‌شناسی و میکروسکوپی. طرح تحقیقاتی، دانشکده آب و خاک، دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی گرگان. 46 صفحه.
2. خیامیم، ف.، ح. خادمی و م.ح. صالحی. 1389. تغییرات کانی‌شناسی فلوگوپیت و موسکویت در اندازه رس در اثر همزیستی قارچ اندوفایت با فسکیوی بلند. نشریه آب و خاک، جلد 24، شماره 3: 556-545.
3. خیامیم، ف.، ح. خادمی، ا.ح. خوشگفتارمنش و ش. ایوبی. 1390. توانایی گیاه جو (*Hordeum vulgare L.*) در جذب پتاسیم از میکاهای دی و تری اکتا هدرال. نشریه آب و خاک، جلد 23، شماره 4: 178-170.
4. دردی‌پور، ا.، ا. فرشادی راد، م.ح. ارزانش. 1389. تأثیر *Azospirillum lipoferum* و *Azotobacter chrococoum* بر آزادسازی پتاسیم خاک در کشت گلدانی سویا (*Glycine max* var. Williams). نشریه بوم‌شناسی کشاورزی، جلد 2، شماره 4: 599-593.
5. رحیم‌زاده، ن.، م. علمائی، ف. خرمالی، ا. دردی‌پور و آ. آمینی. 1392. اثر باکتری¬های حل¬کننده سیلیکات بر آزادسازی پتاسیم از کانی میکایی گلوکونیت در ریزوسفر گیاه کلزا (*Brassica napus*). مدیریت خاک و تولید پایدار، جلد 3، شماره 2: 185-169.

6. رضایی، ف. 1389. هوازدگی کانی‌ها در سایز رس و سیلت در ریزوسفر گیاه کلزا. پایان‌نامه کارشناسی ارشد خاکشناسی، دانشکده آب و خاک، دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.
7. کشاورز زرجانی، ج.، ن. علی اصغر زاد و ش. اوستان. 1392. تأثیر شش سویه از باکتری‌های آزاد کننده پتاسیم بر رشد و افزایش جذب پتاسیم در گیاه گوجه‌فرنگی. نشریه دانش آب و خاک. جلد 23، شماره 2: 255-245.
8. لطفی پارسا، ح.، ح. خادمی، ش. ایوبی و آ. هادی‌نژاد. 1391. تغییرات زمانی میزان رهاسازی پتاسیم از فلوگوپیت در محیط ریشه یونجه (Medicago sativa L.). مجله پژوهش‌های خاک، جلد 26، شماره 1: 122-111.
9. ملکوتی، م.ج.، ع.ا. شهابی و ک. بازرگان. 1384. پتاسیم در کشاورزی ایران. انتشارات سنا. 292 صفحه.
10. Bakhshandeh, S., Khormali, F., Dordipour, E., Olamaei, M. and Kehl, M.2011. Comparing the weathering of soil and sedimentary palygorskite in the rhizosphere zone. Applied Clay Science 54:235-241.
11. Bertsch, P.M. and Thomas, G.W.1985. Potassium status of temperate region soils. p. 131-162. In: Munson, R.D. (ed.) Potassium in Agriculture. ASA. CSSA. SSSA. Madison, WI.
12. Dixon, J.B. and Weed, S.W.1989. Minerals in Soil Environment. Soil Sci. Soc. Am, 2nd ed. Madison, USA.
13. Drever, J.I. and Stillings, L.L.1997. The role of organic acids in mineral weathering. Colloids and Surface 120:167-181.
14. Fageria, N.K. and Stone, L.2006. Physical chemical biological changes in the rhizosphere and nutrient availability. Journal of plant nutrition 29:1327-1356.
15. Fang sheng, X. and Yan He, L.2006. Solubilization of potassium-bearing minerals by wild-type strain of *Bacillus edaphicus* and its mutants and increased potassium uptake by wheat. Canadian Journal of Microbiology 52:66-72.
16. Fanning, D.S., Keramidas, V.Z. and El-desoky, M.A.1989. Micas. p. 551-634. In: Dixon, J.B. and Weed, S.B. (eds.) Minerals in Soil Environments. Soil Sci. Soc. Am. Madison. WI.
17. Gerke, J., Romer, W. and Jungk, A.1994. The excretion of citric and malic acid by proteoid roots of luinus albus L., effects on soil solutions concentrations of phosphate, iron and aluminum in the proteoid rhizosphere in samples of an Oxisol and Luvisol. Z. Pflanzenernernahr. Bodenk 157:289-294.
18. Huang, P.M. 1989. Feldspars, olivines, pyroxines, and amphiboles. p. 975-1050. In: Dixon, J.B. and Weed, S.B. (eds.) Minerals in Soil Environment. Soil Sci. Soc. Am., Madison, WI.
19. Jardine, P.M. and Sparks, D.L.1984. Potassium-calcium exchange in a multireactive soil system. I. Kinetics. Soil Sci. Soc. Am. 48:39-45.
20. Karimi, E., Abdolzadeh, A., Sadeghipour H.R. and Amini, A.2011. The potential of glauconitic sandstone as a potassium fertilizer for olive plants. Archives of Agronomy and Soil Science. DOI: 10.1080/03650340.2011.557369.
21. Khademi, H. and Arocena, J.M.2008. Kaolinite formation from palygorskite and sepiolite in rhizosphere soils. Clays and Clay Minerals 56:422-436.
22. Khormali, F. and Abtahi, A. 2003. Origin and distribution of clay minerals in calcareous arid and semiarid soils of Fars Province, Southern Iran. Clay Miner. 38: 511-527.
23. Kittrick, J.A., and E.W. Hope. 1963. A procedure for the particle size separation of soil for X-ray diffraction analysis. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 37: 201-205.
24. Kodama, H., S. Nelson, A.F. Yang and N. Khoyama. 1994. Mineralogy of rhizospheric and non rhizospheric soils in corn fields. Clay Minerals 42:755-763.
25. Liu, W., Xu, X., Wu, X., Yang, Q., Luo, Y. and Christie, P.2006. Decomposition of silicate minerals by *Bacillus mucilaginosus* in liquid culture. Environ Geochemistry and Health 28:133-140.

26. Mehra, O.P. and Jackson, M.L.1960. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite citrate system with sodium bicarbonate. Clay Minerals 7:317-327.
27. Monib, M., Zahra, M.K., Abdel, E.A. and Heggo, A.1984. Role of silicate bacteria in releasing K and Si from biotite and orthoclase. Soil Biology and Conservation of the Biosphere 2:173-233.
28. Snap, S., Koide, R. and Lynch, J.1995. Exploitation of localized phosphorous patches by common bean roots. Plant Soil 177:211-218.
29. Sparks, D.L. 1987. Potassium dynamics in soils. Advances in Soil Science 6:1-63.
30. Sparks, D.L. and Huang, P.M.1985. Physical chemistry of soil potassium. p. 201-276. In: Munson, R.D. (ed.) Potassium in agriculture. Am. Soc. Agron., Crop Sci. Soc. Am. And Soil Sci. Soc. Am., Madison, WI.
31. Taylor, A.B. and Velbel, M.A.1991. Geochemical mass balances and weathering rate in forested watershed of the southern blue ridge II. Effects of botanical uptake terms. Geoderma 5:29-50.
32. Thompson, M.L. and Ukrainczyk, L.2002. Micas. P. 431-466. In: Dixon J.B. and Schulze D.G. (eds.) Soil Mineralogy with Environmental Applications. Soil Sci. Soc. Am., Madison, WI.