مجله بلورشناسی و کانی شناسی ایران

سال هجدهم، شماره‌ی ۲، تابستان ۸۹، از صفحه‌ی ۲۶۷ تا ۲۸۰

انجمن بلورشناسی و کانی شناسی ایران

تأثیر ماده‌ی آلی بر تغییرات کانی‌شناسی فلوگوپیت و موسکویت در اندازه‌ی رس در محیط ریشه‌ی یونجه

زینب نادری زاده، حسین خادمی*

گروه خاکشناسی ، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

(دریافت مقاله: ۸۸/۸/۱۷ ، نسخه نهایی: ۸۸/۱۲/۱۰)

چکیده: هوادیدگی کانی‌های پتاسیم‌دار، خاستگاه اصلی پتاسیم در خاک‌هاست که در شرایط کمبود این عنصر اهمیت ویژه‌ای دارد. بررسی‌های زیادی در مورد تأثیر انواع گیاهان و میکروارگانیسم‌ها بر تغییر و تبدیل کانی‌های میکایی و رهاسازی پتاسیم از آن‌ها صورت گرفته است ولی تاکنون پژوهشی در مورد تأثیر ماده‌ی آلی بر تغییرات کانی‌شناسی میکاها انجام نشده است. این پژوهش با هدف بررسی تاثیر میزان ماده‌ی آلی بر تغییر و تبدیل فلوگوپیت (میکای سه جائی) و موسکویت (میکای دوجائی) در محیط ریشه‌ی یونجه صورت گرفت. آزمایش گلدانی در قالب طرح کاملاً تصادفی با آرایش فاکتوریل در سه تکرار انجام شد. بستر کشت مخلوطی از شن کوارتزی، دو نوع کانی میکایی (موسکویت یا فلوگوپیت) و ماده‌ی آلی در سه سطح شاهد، نیم و یک درصد بود. در دوره‌ی ۱۲۰ روزه‌ی کشت، گیاهان با محلول غذایی کامل یا بدون پتاسیم تغذیه شدند. پس از پایان دوره‌ی رشد، گیاه برداشت و عصاره‌گیری به روش خاکستر خشک انجام و مقدار پتاسیم با فلیم فتومتر تعیین شد. همچنین کانی‌های میکایی بستر کشت و محصولات هوادیدگی آن‌ها از شن کوارتزی جدا شدند و بخش رس آن‌ها با پراش پرتو ایکس بررسی شد. نتایج نشان داد که در بسترهای دارای فلوگوپیت، حضور ماده‌ی آلی در هر دو حالت تغذیه‌ای باعث افزایش معنی‌دار مقدار کل پتاسیم جذب‌شده نسبت به بسترهای بدون ماده‌ی آلی شده است. پراش پرتو ایکس، تغییر کانی‌شناسی فلوگوپیت را در هر دو حالت تغذیه‌ای به خوبی نشان داد ولی هیچ‌گونه تغییر کانی‌شناسی در موسکویت با پراش پرتو ایکس تشخیص داده نشد. با حضور ماده‌ی آلی، در هر دو حالت تغذیه‌ای، تغییرات کانی‌شناسی چشم‌گیری در کانی سه‌جائی فلوگوپیت ایجاد شده است. به نظر می‌رسد که تجزیه‌ی ماده‌ی آلی و فعالیت‌های ریشه، قدرت اسیدی ریزوسفر [خاک ریشه] را افزایش داده و رهاسازی پتاسیم را از کانی سه‌جائی فلوگوپیت تسهیل کرده و در پایان باعث تبدیل این کانی به ورمیکولیت و تا حدودی اسمکتیت و نیز تشکیل مقدار ناچیزی کلریت شده است. بنابراین تأثیر ماده‌ی آلی روی تغییرات کانی‌شناختی به نوع کانی میکایی وابسته است.

واژه‌های کلیدی: *رهاسازی پتاسیم، فلوگوپیت، موسکویت، ماده‌ی آلی، ورمیکولیت، اسمکتیت، کلریت.*

مقدمه

پتاسیم از ترکیبات اصلی پوسته‌ی زمین بوده و مقدار آن در سنگ‌کره به طور متوسط ۲٫۵۸ درصد است. از نظر فراوانی، چهارمین عنصر غذایی در سنگ‌کره به حساب می‌آید [۱]. مقدار آن در خاک‌ها بین کمتر از ۰٫۰۱ تا ۴ درصد تغییر می‌کند و معمولاً حدود ۱ درصد است [۲] که عموماً به چهار شکل پتاسیم محلول، تبادلی، غیرتبادلی و ساختاری تقسیم می‌شود [۳].

بیشترین مقدار پتاسیم در کانی‌های اولیه و ثانویه رسی وجود دارد [۱] و میکاها و فلدسپارهای پتاسیم دو گروه

* نویسنده مسئول، تلفن: ۳۹۱۲۷۲۴ (۰۳۱۱)، نمابر: ۳۹۱۳۴۷۱ (۰۳۱۱)، پست الکترونیکی: hkhademi@cc.iut.ac.ir

عمده‌ی کانی‌های پتاسیم‌دار هستند [۴]. میکاها سیلیکات‌های لایه‌ای ۲:۱ را تشکیل می دهند که در صفحه‌ی هشت‌وجهی آن‌ها آلومینیم، منیزیم یا آهن وجود دارند. لایه‌های ۲:۱ با رشته ای از کاتیون‌ها، به ویژه پتاسیم، با نیروی زیادی کنار هم نگه داشته می‌شوند [۵]. این کانی‌ها بسته به کاتیون موجود در صفحه‌ی هشت‌وجهی به میکای دوجائی (موسکویت و گلیکونیت) و میکای سه‌جائی (بیوتیت و فلوگوپیت) رده‌بندی می‌شوند [۶]. کانی‌های میکایی به دلیل اینکه خاستگاه مهم عناصری مثل پتاسیم، منیزیم، روی و منگنز هستند نقش ویژه-ای در تغذیه ی گیاه دارند [۷]. برای رشد بیشتر گیاه، پتاسیم محلول و تبادلی خاک باید همواره از طریق آزادسازی پتاسیم غیرتبادلی در اثر هوادیدگی ذخایر پتاسیم یا افزودن کودهای پتاسیمی جایگزین شود [۸].

در بسیاری از بررسی‌ها معلوم شد که آزادسازی پتاسیم از ذخایر غیرتبادلی یا ساختاری می‌تواند به‌صورت معنی‌داری در میزان پتاسیم جذب‌شده به وسیله‌ی گیاه نقش داشته باشد. توانایی ریشه‌های گیاه و میکروارگانیسم‌های [ریز سازواره‌های] خاک در هوادیدگی کانی‌ها و ایجاد تغییرات قابل‌توجه کانی-شناسی در گذشته گزارش شده است [۹، ۱۰]. وانگ و همکاران [۱۱] در بررسی از گنیس (با اندازه‌ی کوچکتر از ۱۰ میلی‌متر) به عنوان خاستگاه تأمین پتاسیم برای گیاهان رای‌گراس، دو رقم یونجه و گیاه Pak-choi استفاده کردند. در شرایطی که گنیس تنها خاستگاه تأمین پتاسیم بود گیاهان به خوبی رشد کرده بودند و هیچ علائم کمبودی نسبت به گیاهان تغذیه‌شده با محلول غذایی با پتاسیم نشان ندادند. این نتیجه نشان می-دهد بعضی از سنگ‌ها حاوی کانی‌های پتاسیم دار هستند که می‌توان از آن‌ها به عنوان کود پتاسی استفاده کرد. همچنین بنابر گزارش زو و همکاران [۱۲] مقدار پتاسیم آزادشده از سنگ‌های مادری منطقه‌ی سی‌چوان چین در مدت دو سال، مقدار چشم‌گیری از پتاسیم کل را شامل شده است. بنابراین هوادیدگی نقش مهمی در حاصل‌خیزی خاک منطقه داشته است. تقاضای گیاه برای پتاسیم، شکل ظاهری و فعالیت ریشه و قدرت اسیدی کردن ریزوسفر [خاک ریشه] به وسیله ریشه‌ی گیاه بر آزادسازی پتاسیم از سنگ‌ها و کانی‌های حاوی پتاسیم تأثیرگذار است [۱۱].

گزارش‌های متعددی از تغییرات کانی‌های میکایی در اثر فعالیت جذبی ریشه گیاهان و میکروارگانیسم‌ها [ریزسازواره‌ها] ارائه شده است. هینسینجر و جیلارد [۹] تغییرات کانی‌شناسی میکای سه‌جائی فلوگوپیت به عنوان تنها خاستگاه تأمین منیزیم و پتاسیم برای گیاه رای‌گراس را گزارش کردند. پس از ۸ روز پتاسیم بین لایه‌ای رها شده از این کانی به‌طور معنی-داری افزایش یافت و پس از ۳۲ روز ریشه‌های گیاه توانستند ۱۹۱ گرم بر کیلوگرم از کل پتاسیم را آزاد کنند که بخش مهمی از نیاز گیاه را تأمین کرد. نتایج کانی‌شناسی، ورمیکولیتی شدن فلوگوپیت را پس از ۳ و ۸ روز به ترتیب در فاصله‌ی ۰/۵ و ۲ میلی‌متری از ریشه نشان داد. اسپیریداکیس و همکاران [۱۳] در بستر کشت نهال‌های درختان جنگلی از ۰/۲ درصد بیوتیت با اندازه‌ی ۲ تا ۵۰ میکرون به‌عنوان تنها خاستگاه تأمین‌کننده‌ی پتاسیم استفاده کردند. پس از ۱۳ ماه کشت، تشکیل کائولینیت و ورمیکولیت را در اثر رهاسازی پتاسیم از بیوتیت و هوادیدگی آن گزارش کردند. تغییر شکل و انحلال کانی سه‌جائی فلوگوپیت (با اندازه‌ی ذرات ۲ تا ۱۰۵ میکرون) به عنوان تنها خاستگاه تأمین‌کننده‌ی پتاسیم و منیزیم باعث تشکیل ورمیکولیت در ریزوسفر [خاک ریشه] کلم شد. pH ریزوسفر [خاک ریشه] در مدت ۶ روز ۳ واحد کاهش یافت و این باعث رهاسازی چشمگیر پتاسیم بین لایه‌ای و منیزیم ساختاری شد [۱۴]. مقدار یون‌های H_3O^+ همراه ریشه‌ها، ویژگی‌های تبادل یونی ریشه و خواص ترکیبات آلی که از ریشه ترشح و یا در نتیجه‌ی فعالیت میکروبی روی بافت-های مرده‌ی ریشه تولید می‌شوند، از مهم‌ترین فاکتورهای تعیین‌کننده‌ی سرعت هوادیدگی کانی‌ها در ریزوسفر [خاک ریشه] گیاه است [۱۳]. بررسی مجللی و وید [۱۰] نشان داد که تلقیح ریشه‌های سویا با میکوریزای وزیکولار آربسکولار (Vesicular arbuscular mycorrhiza) باعث تشدید آزاد شدن پتاسیم از بیوتیت و سپس فلوگوپیت شده و این رهاسازی منجر به ورمیکولیتی شدن بیوتیت و تا حدی فلوگوپیت می-شود. این بررسی‌ها نشان می‌دهد که پتاسیم ساختاری و غیرتبادلی خاستگاه مهم پتاسیم برای گیاهان در شرایط کمبود

این عنصر محسوب می‌شود و ریزوسفر [خاک ریشه] گیاهی و میکروارگانیسم‌ها [ریز سازواره‌ها] با ساز و کار خاصی رهاسازی این عنصر را از کانی‌ها تسهیل و باعث تغییرات کانی‌شناسی آن‌ها می‌شوند.

اسیدهای آلی که در خاک‌ها از تجزیه‌ی باقی مانده‌های گیاهی، حیوانی، مواد هومیکی، متابولیسم میکروبی و فعالیت‌های ریزوسفر [خاک ریشه] تولید می‌شوند [۱۵] برای هوادیدگی کانی‌های اولیه خاک مهم هستند [۱۶]. این اسیدها با آزادسازی پروتون در محلول خاک قدرت اسیدی آن را افزایش می‌دهند [۱۷]. از اسیدهای آلی موجود خاک‌ها می‌توان به اسیدهای استیک، فوماریک، سیتریک، فرمیک، لاکتیک، اگزالیک، تارتاریک و غیره اشاره کرد [۱۸]. مولکول‌های اسیدهای آلی سبک که دارای گروه‌های عامل COOH و OH هستند، به تشکیل همبافت اسید آلی - فلز با بعضی از یون‌های فلزی در ساختار کانی تمایل دارند و تجزیه کانی‌ها را تشدید می‌کنند [۱۹]. این اسیدها از طریق افزایش سرعت هوادیدگی کانی‌های پتاسیم‌دار خاک‌ها، باعث افزایش مقدار پتاسیم قابل دسترس گیاه می‌شوند [۲۰]. حضور مواد آلی حل‌شده در محلول خاک تأثیر شایانی بر هوادیدگی کانی‌ها و آزادسازی عناصر دارد [۲۱] و در نتیجه تشکیل همبافت بین این مواد و آهن و آلومینیوم سرعت هوادیدگی افزایش می‌یابد [۲۲]. خادمی و آروسینا [۲۳] در پژوهشی تأثیر ریزوسفر [خاک ریشه] گیاهان جو، یونجه و کلزا و ماده‌ی آلی (پیت) بر آزادسازی منیزیم از کانی‌های سپیولیت و پالیگورسکیت را بررسی کردند. بررسی‌های کانی‌شناسی پس از ۱۰۰ روز کشت، تشکیل کائولینیت را در بسترهای حاوی پالیگورسکیت در ریزوسفر گیاهان یونجه، کلزا و جو در تیمارهای با و بدون ماده‌ی آلی نشان داد. علاوه‌براین، سپیولیت نیز در ریزوسفر [خاک ریشه‌ی] جو و کلزا به کائولینیت تبدیل شده بود ولی در شرایط بدون ماده‌ی آلی در ریزوسفر [خاک ریشه‌ی] یونجه، کائولینیت مشاهده نشد. این پژوهشگران ایجاد اسید بالای ناشی از فعالیت ریشه، تجزیه‌ی مواد آلی و جذب منیزیم به وسیله‌ی گیاه را از عوامل تشکیل کائولینیت بیان کردند.

بررسی‌های زیادی در زمینه‌ی تأثیر انواع گیاهان و میکروارگانیسم‌ها [ریزسازواره‌ها] بر رهاسازی پتاسیم از کانی‌های میکایی و تغییر شکل این کانی‌ها صورت گرفته است ولی تاکنون پژوهشی در مورد تأثیر ماده‌ی آلی بر تغییر و تبدیل کانی‌های میکایی انجام نشده است. بنابراین این پژوهش با هدف بررسی تأثیر مقادیر متفاوت ماده‌ی آلی بر تغییرات کانی‌شناسی کانی‌های دوجائی و سه‌جائی میکایی انجام شد.

مواد و روش‌ها

بررسی‌های گلخانه‌ای

آزمایش گلدانی با آرایش فاکتوریل و در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار انجام گرفت. تیمارهای آزمایشی شامل دو نوع میکا (موسکویت و فلوگوپیت) و شاهد، دو نوع محلول غذایی با پتاسیم و بدون پتاسیم و ماده‌ی آلی در سه سطح (شاهد، نیم درصد و یک درصد) بود. در این پژوهش از دو کانی میکایی شامل موسکویت و فلوگوپیت که ترکیب عنصری و خلوص این کانی‌ها با استفاده از بررسی‌های پراش پرتو ایکس و فلورسانس پرتو ایکس تعیین شده بود[۲۴]، استفاده شد. کانی‌های موسکویت و فلوگوپیت از معادنی در همدان تهیه شدند. این کانی‌های که نخست به‌صورت پولک‌هایی به قطر ۵ تا ۱۰ میلی‌متر بودند، آسیاب شده و در اندازه‌ی کوچکتر از ۲۳۰ مش (قطر کمتر از ۶۰ میکرون) برای آزمایش انتخاب شدند. این کانی‌ها به گونه‌ای به محیط کشت اضافه شدند که مقادیر یکسانی پتاسیم (معادل ۰/۳۵ درصد K_2O) داشته باشند که بر این اساس مقدار موسکویت و فلوگوپیت اضافه شده به هر یک از گلدان‌ها (با گنجایش ۶۰۰ گرم) به ترتیب ۲۱ و ۲۲/۶ گرم بود. شن کوارتزی نیز از معدنی در همدان تهیه و در اندازه‌ی بزرگتر از ۲۰۰ مش به عنوان ماده‌ی پرکننده‌ی گلدان‌ها (همراه کانی‌های میکایی) و نیز به‌عنوان تیمار شاهد استفاده شد. برای اطمینان از تمیز بودن شن کوارتزی دو بار با اسید کلریدریک ۰/۲ نرمال و آب مقطر شستشو و در دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس در آون خشک شد. ماده آلی (کوکوپیت) نیز با کلرید آمونیوم ۱ نرمال اشباع و سپس با آب مقطر شستشو داده شد و در دمای ۶۰ درجه‌ی سلسیوس در آون خشک و در اندازه‌ی کوچکتر از ۶۰ مش مورد استفاده قرار گرفت.

ماده‌ی آلی استفاده شده در این آزمایش می‌بایستی کمترین پتاسیم ممکن را دارا می‌بود تا پتاسیم آن به‌عنوان خاستگاه تغذیه‌ای برای گیاهان استفاده نشود. پس از اندازه‌گیری پتاسیم چند باقی‌مانده‌ی گیاهی، کوکوپیت به علت داشتن کمترین مقدار پتاسیم به‌عنوان ماده‌ی آلی انتخاب شد. مقدار کربن، ازت و پتاسیم ماده‌ی آلی به‌ترتیب با روش‌های

سوزاندن تر، کلدال و خاکستر خشک [۲۵] اندازه‌گیری شد (جدول ۱). کوکوپیت یک فراورده‌ی تجاری است که پس از پردازش پوست میوه نارگیل و حذف فیبرهای بلند و متوسط از آن، به‌دست می‌آید و در گلخانه‌ها به‌عنوان بستر کشت استفاده می‌شود.

جدول ۱ مقدار کربن، نیتروژن و پتاسیم ماده آلی (کوکوپیت) اشباع شده با کلرید آمونیوم استفاده شده در آزمایش (بر حسب درصد)

C	N	K
۴۸	۰/۸	۰/۰۰۲۵

تمامی بسترهای کشت پیش از کاشت بذر یونجه، برای آغاز تجزیه‌ی ماده‌ی آلی به مدت یک ماه در رطوبت نزدیک ظرفیت مزرعه و دمای گلخانه نگه‌داری شدند. در دوره‌ی کشت گیاهان با محلول غذایی با پتاسیم یا بدون پتاسیم [۲۶] تغذیه و با آب مقطر آبیاری شدند. پس از ۱۲۰ روز گیاهان برداشت و در آون به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۷۰ درجه‌ی سلسیوس خشک و سپس عصاره‌گیری به روش خاکستر خشک [۲۵] انجام و مقدار پتاسیم با فلیم فتومتر [نورسنج شعله‌ای] تعیین شد.

بررسی‌های کانی‌شناسی

برای بررسی‌های کانی‌شناسی، نمونه‌هایی از بخش میانی گلدان با بیشترین فعالیت ریشه (به‌عنوان ناحیه‌ی ریزوسفری [خاک ریشه]) تهیه و پس از جداسازی کامل ریشه‌های گیاه، در هوا - خشک شدند و برای جدا کردن کانی‌های بستر از شن کوارتزی، از الک ۲۳۰ مش استفاده شد. همچنین برای حذف ماده‌ی آلی نمونه‌ها، از آب اکسیژنه ۳۰ درصد استفاده شد. با انجام این مراحل کانی‌های میکایی یا فراورده‌های حاصل از تبدیل آن‌ها از بستر کشت جدا شدند و بخش رس کانی‌ها نیز با استفاده از یک مرکز گریز جدا شد. دو نمونه ی ۴۰ میلی‌گرمی رس با منیزیم یا پتاسیم اشباع شدند و هر کدام از آن‌ها را روی اسلایدهای شیشه‌ای به مساحت ۲ × ۴ سانتی‌متر مربع به ضخامت یکسان پهن شد. علاوه‌براین، برای آزمایش‌های پراش پرتو ایکس نمونه‌های اشباع با منیزیم و اتیلن گلیکول، نمونه-های اشباع با منیزیم و گلیسرول و نمونه‌های تیمار گرمایی با دمای ۵۵۰ درجه سلسیوس اسلایدهای اشباع شده با پتاسیم نیز تهیه شد. اسلایدهای تهیه شده با پراش‌سنج پرتو ایکس از نوع Bruker مدل AXS با لامپ کبالت با جریانی به شدت ۲۰ میلی آمپر و ولتاژ ۴۰ کیلوولت در دانشگاه بریتیش کلمبیای شمالی کانادا مورد بررسی کانی‌شناسی قرار گرفتند.

برای بررسی تغییرات نسبی کانی‌ها از نسبت شدت قله‌های شاخص آن‌ها استفاده شد و متوسط سه تکرار در هر تیمار ملاک ارزیابی قرار گرفت. به‌علاوه سعی شد تا نمونه‌ها و آنالیز آن‌ها با دستگاه پراش‌سنج پرتو ایکس در شرایط کاملاً مشابه انجام شود.

داده‌های به دست آمده از آزمایش با نرم افزارهای SAS 9.1 و SPSS 16 تجزیه و تحلیل شدند. مقایسه ی میانگین‌ها نیز با آزمون LSD در سطح ۵ درصد صورت گرفت. همچنین پراش نگاشت‌های پرتو ایکس نمونه‌ها نیز با برنامه‌ی Origin 7 تهیه شدند.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه‌های شن کوارتزی و کانی‌های میکایی پیش از آزمایش

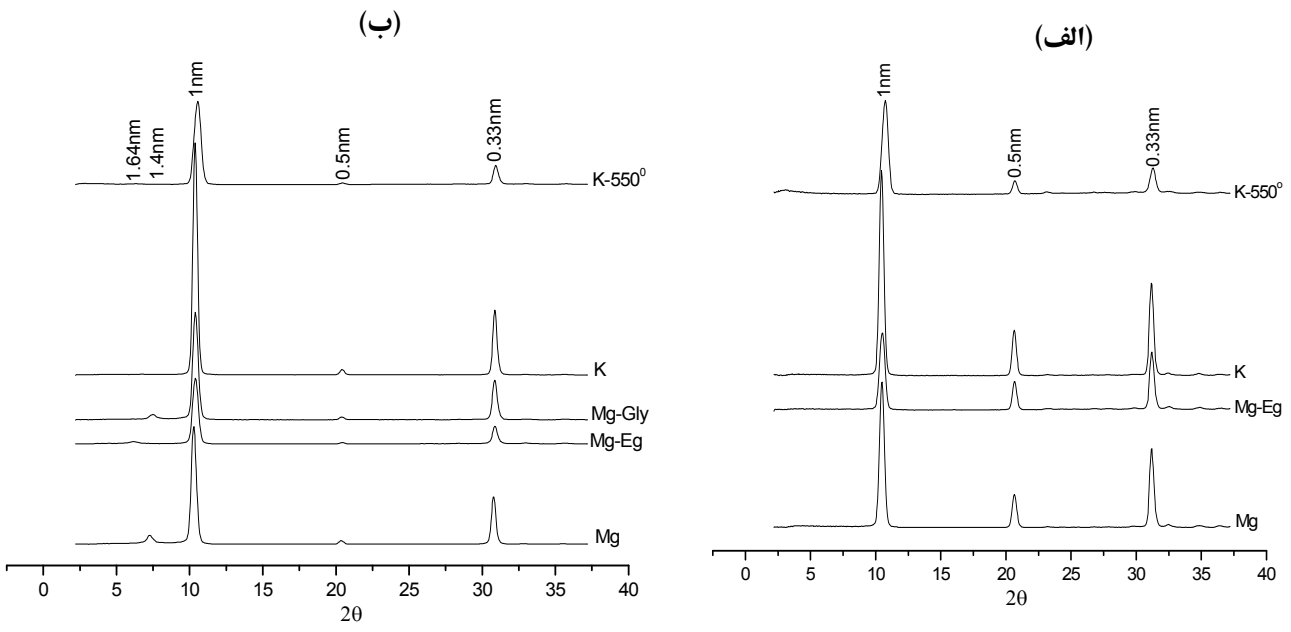
ترکیب عنصری کانی‌های میکایی و شن کوارتزی مورد استفاده بر حسب درصد مقادیر اکسیدی عناصر در جدول ۲ آمده است. نتایج نشان می‌دهند مقدار پتاسیم موجود در شن کوارتزی کمتر از ۰/۱ درصد است و به نظر می‌رسد به‌عنوان پرکننده‌ی گلدان‌ها در آزمایش، بستر بسیار مناسبی باشد. بنابر نتایج این جدول مقدار پتاسیم بر حسب K_2O در موسکویت ۹/۹۸ درصد و مقدار آن در فلوگوپیت ۹/۲۹ درصد است. بیشترین مقدار آلومینیم در کانی دوجائی موسکویت است که بر حسب اکسید آلومینیم ۳۳/۹۲ درصد است که دو موقعیت از سه موقعیت لایه‌ی هشت وجهی این کانی دوجائی که به وسیله‌ی آلومینیم اشغال شده است را تایید می‌کند.

از بررسی پراش پرتو ایکس برای آگاهی کانی‌شناختی بخش رس موسکویت و فلوگوپیت استفاده شد (شکل ۱- الف و ب). حضور قله‌ی رده‌ی اول (۰۰۱) ۱ نانومتر و قله‌ی رده سوم (۰۰۳) ۰٫۳۳ نانومتر در تیمار اشباع با منیزیم، نشان می‌دهد که این دو کانی جزء کانی‌های میکایی هستند. زیرا این دو قله در همه‌ی میکاها وجود دارند. علاوه بر قله‌های رده‌های اول (۰۰۱) و سوم (۰۰۳) کانی‌های میکایی، از قله‌ی رده‌ی دوم (۰۰۲) در نمونه‌ی اشباع با منیزیم برای شناسایی کانی‌های میکایی دوجائی از سه‌جائی استفاده می‌شود. وجود قله‌ی مشخص ۰٫۵ نانومتر در میکا (شکل ۱- الف) نشان دهنده‌ی این است که این کانی دوجائی است [۲۷]. این کانی در تیمارهای اشباع با اتیلن گلیکول، اشباع با پتاسیم و تیمار گرمایی نمونه‌ی اشباع با پتاسیم بدون تغییر مانده است. بنابراین نمونه موسکویت استفاده شده یک کانی نسبتاً خالص است. در نمونه اشباع با منیزیم کانی استفاده شده به‌عنوان فلوگوپیت علاوه بر قله‌ی رده‌های (۰۰۱) و (۰۰۳) کانی‌های میکایی، قله‌ی بسیار ضعیف ۱٫۴ نانومتر نیز قابل مشاهده است (شکل ۱-ب)، که نسبت شدت قله‌ی ۱٫۴ نانومتر به ۱ نانومتر، ۰٫۰۸ است (جدول ۳). حضور این قله نشان‌دهنده‌ی وجود ناخالصی ورمیکولیت، اسمکتیت یا کلریت است که به دلیل حذف قله‌ی ۱٫۴ نانومتر در تیمار اشباع با پتاسیم ناخالصی کلریت در نمونه وجود ندارد. باقی ماندن این قله در تیمار اشباع با منیزیم و گلیسرول نشان می‌دهد که ناخالصی به ورمیکولیت وابسته است.

جدول ۲ تجزیه عنصری کانی های میکایی و شن کوارتزی استفاده شده در آزمایش به وسیله فلورسانس پرتو ایکس (بر حسب درصد) [۲۴]

	Na_2O	MgO	Al_2O_3	SiO_2	K_2O	CaO	Fe_2O_3	MnO	P_2O_5	TiO_2	LOI*	Total
موسکویت	۰٫۶۴	۰٫۰۸	۳۳٫۹۲	۴۸٫۳۴	۹٫۹۸	۰٫۱۷	۱٫۷۶	۰٫۰۶	۰٫۰۳	۰٫۰۶	۴٫۵	۹۹٫۵۴
فلوگوپیت	۰٫۴۵	۲۲٫۵۴	۱۴٫۶	۴۲٫۲۴	۹٫۲۹	۴٫۲۱	۴٫۶۹	۰٫۱۱	۰٫۰۳۷	۰٫۵۶	۰٫۹	۹۹٫۶۳
شن کوارتزی	<۰٫۱	۰٫۱۱	۰٫۳۶	۹۷٫۵۳	<۰٫۱	۰٫۶۱	۰٫۵۷	-	-	-	۰٫۴۸	۹۹٫۸۶

* کاهش وزن در دمای بالا (Loss on ignition)



شکل۱ پراش نگاشت پرتو ایکس تیمارهای اشباع از منیزیم (Mg)، اشباع از منیزیم و اتیلن گلیکول (Mg-Eg)، اشباع از منیزیم و گلیسرول (Mg-Gly)، اشباع از پتاسیم (K) و تیمار گرمایی نمونه‌ی اشباع با پتاسیم ($K\text{-}550^0$) بخش رس موسکویت قبل از آزمایش (الف) و بخش رس فلوگوپیت قبل از آزمایش (ب).

جدول ۳ نسبت شدت قله ۱٫۴ نانومتر به ۱ نانومتر و نسبت شدت قله‌های رده دوم تا پنجم کلریت به شدت قله ۰٫۵ نانومتر در تیمارهای منیزیم اشباع در بسترهای دارای فلوگوپیت در وضعیت تغذیه‌ای با پتاسیم (+K) و بدون پتاسیم (-K) (میانگین سه تکرار) میانگین‌های دارای حروف مشترک در مورد هر پارامتر در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌دار آماری ندارند.

بسترهای کشت	نسبت قله ۱٫۴به نسبت قله ۰٫۷۱ به ۱ نانومتر		نسبت قله ۰٫۴۷به ۰٫۵ نانومتر		نسبت قله ۰٫۳۵۴به ۰٫۵ نانومتر		نسبت قله ۰٫۲۸۴به ۰٫۵ نانومتر	
	-K	+K	-K	+K	-K	+K	-K	+K
شن کوارتزی + فلوگوپیت (بدون ماده آلی)	^{c}۰٫۲۷	^{c}۰٫۱۷	^{ab}۰٫۲۲	^{b}۰٫۱۹	^{bc}۰٫۳۹	^{c}۰٫۲۲	^{bc}۰٫۸۹	^{c}۰٫۴۷	^{dc}۰٫۴۵	^{de}۰٫۲۴
شن کوارتزی + فلوگوپیت + نیم درصد ماده آلی	^{a}۱٫۳۸	^{b}۰٫۶۵	^{a}۰٫۲۶	^{b}۰٫۱۹	^{a}۰٫۷۸	^{b}۰٫۴۵	^{a}۱٫۶۷	^{b}۱٫۰۰	^{ab}۰٫۸۸	^{bc}۰٫۶۲
شن کوارتزی + فلوگوپیت + یک درصد ماده آلی	^{a}۱٫۲۶	^{b}۰٫۸۸	^{ab}۰٫۲۳	^{b}۰٫۱۹	^{a}۰٫۶۹	^{b}۰٫۴۳	^{a}۱٫۶۲	^{b}۰٫۹۸	^{a}۰٫۹۴	^{abc}۰٫۶۵
شاهد (فلوگوپیت قبل از آزمایش)	^{c}۰٫۰۸	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	^{e}۰٫۱۳	

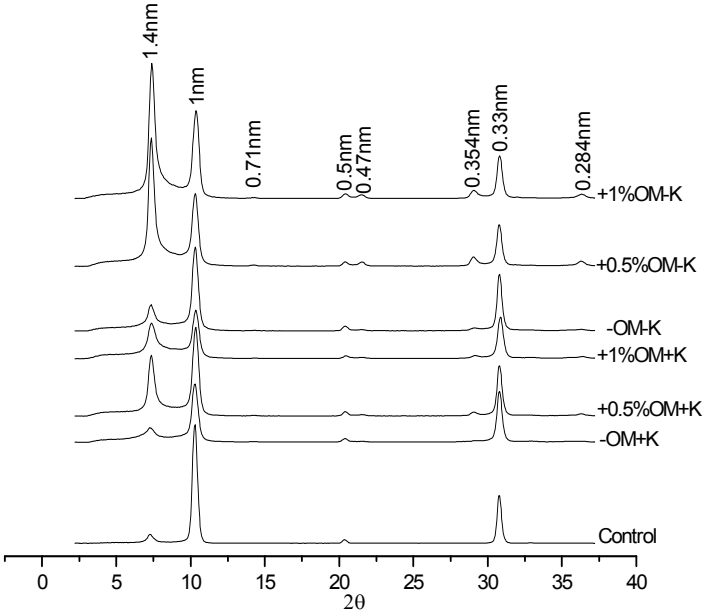
کانی‌شناسی بخش رس بستر کشت در پایان آزمایش

کانی‌شناسی بخش رس محیط ریشه حاوی فلوگوپیت

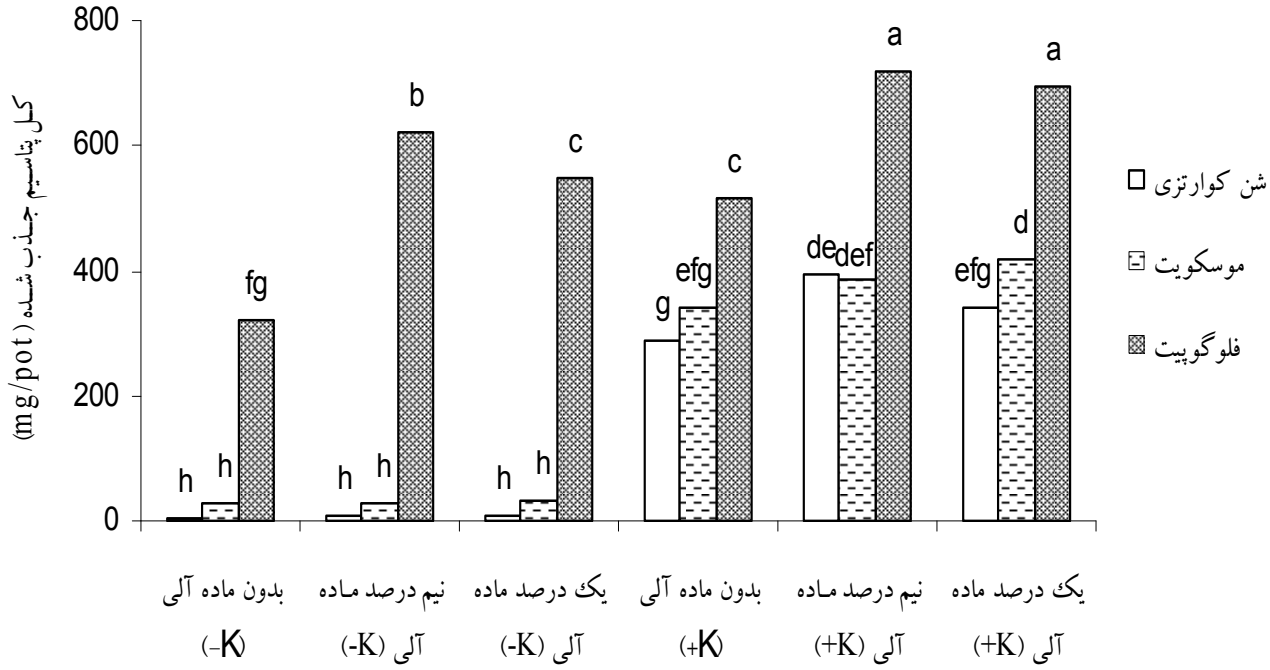
پراش نگاشت پرتو ایکس نمونه‌های اشباع با منیزیم بسترهای کشت دارای فلوگوپیت، تغییرات کانی‌شناسی این کانی سه‌جائی را در هر سه سطح ماده‌ی آلی و در شرایط تغذیه‌ای با پتاسیم و بدون پتاسیم نشان می‌دهد (شکل ۲). در نمونه‌ی اشباع با منیزیم بخش رس بسترهای کشت دارای فلوگوپیت علاوه بر قله‌های ۰٫۳۳ نانومتر و ۱ نانومتر کانی‌های میکایی، قله‌ی ۱٫۴ نانومتر نیز با شدت‌های مختلف قابل مشاهده است. در شرایطی که ماده‌ی آلی به محیط کشت گیاهان اضافه نشده و گیاهان با محلول غذایی با پتاسیم تغذیه شده‌اند، شدت قله‌ی ۱٫۴ نانومتر نسبت به شدت این قله در نمونه‌ی فلوگوپیت پیش از کشت، افزایش یافته است، ولی نسبت شدت قله‌ی ۱٫۴ نانومتر به ۱ نانومتر در مقایسه با نسبت شدت این دو قله در فلوگوپیت پیش از کشت افزایش معنی‌دار آماری ($p<0.05$) نشان نمی‌دهد (جدول ۳). در شرایطی که بستر کشت دارای فلوگوپیت، با محلول غذایی پتاسیم‌دار تغذیه و به این بستر کشت نیم درصد ماده ی آلی اضافه شد، نسبت شدت قله‌ی ۱٫۴ نانومتر به ۱ نانومتر در مقایسه با بسترهای بدون ماده‌ی آلی از نظر آماری افزایش معنی‌داری ($p<0.05$) نشان داده و از ۰٫۱۷ به ۰٫۶۵ افزایش یافت که تقریباً ۳٫۸۲ برابر شده است. نتایج میزان جذب پتاسیم به‌وسیله‌ی گیاهان، افزایش شدت قله‌ی ۱٫۴ نانومتری در بسترهای دارای نیم درصد ماده‌ی آلی را تأیید می‌کند (شکل ۳). در شرایطی که گیاهان با محلول غذایی پتاسیم‌دار تغذیه شدند، با افزودن نیم درصد ماده‌ی آلی به محیط کشت دارای فلوگوپیت میزان جذب پتاسیم نسبت به سطح بدون ماده‌ی آلی به صورت معنی‌داری ($p<0.05$) افزایش یافته است. با اضافه کردن یک درصد ماده‌ی آلی به این بستر کشت، نسبت شدت قله‌ی ۱٫۴ نانومتر به ۱ نانومتر در مقایسه با بستر کشت دارای نیم درصد ماده‌ی آلی افزایش معنی‌داری نشان نداده است. ولی افزودن یک درصد ماده‌ی آلی به بستر کشت دارای فلوگوپیت، مشابه سطح نیم درصد ماده‌ی آلی، توانسته است به‌صورت معنی‌داری ($p<0.05$)، شدت قله‌ی ۱٫۴ نانومتر به ۱ نانومتر را در مقایسه با بسترهای کشتی که هیچ گونه ماده‌ی آلی دریافت نکرده بودند، افزایش دهد و تقریباً ۵٫۱۸ برابر شده است. در مورد جذب پتاسیم به وسیله‌ی گیاه نیز همین نتیجه به دست آمد و در بسترهای دارای فلوگوپیت در شرایط تغذیه با محلول غذایی حاوی پتاسیم، بین سطوح نیم و یک درصد ماده‌ی آلی از لحاظ میزان پتاسیم جذب‌شده به وسیله‌ی گیاهان اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد (شکل ۳).

علاوه‌براین، در هر دو حالت تغذیه‌ای، حضور ماده‌ی آلی در بسترهای دارای فلوگوپیت باعث افزایش وزن خشک گیاهان نسبت به‌حالتی که این بسترها بدون ماده‌ی آلی بودند، شد.

در شرایط تغذیه با محلول غذایی بدون پتاسیم که گیاه غیر از کانی سه‌جائی فلوگوپیت خاستگاه دیگری برای تأمین نیاز پتاسیمی خود نداشته است، کانی فلوگوپیت تحت تأثیر فعالیت‌های ریزوسفر [خاک ریشه‌ی] گیاه و تجزیه‌ی ماده‌ی آلی هوادیده شده و کانی‌های جدیدی در محیط کشت تشکیل شده است. در تیمار اشباع با منیزیم بخش رس نمونه‌ی وابسته به بسترهای کشتی که با محلول غذایی بدون پتاسیم تغذیه شده بودند، شدت قله‌ی ۱/۴ نانومتر نسبت به نمونه فلوگوپیت پیش از کشت افزایش یافته است (شکل ۲). از آنجا که گیاهان کشت‌شده در این بستر، غیر از کانی فلوگوپیت هیچ خاستگاه دیگری برای تأمین نیاز پتاسیمی خود نداشته‌اند، بنابراین جذب پتاسیم به وسیله‌ی ریشه‌های گیاهان، غلظت پتاسیم را در ناحیه‌ی ریزوسفر کاهش داده که منجر به رهاسازی چشمگیر پتاسیم بین لایه‌ای فلوگوپیت شده است. همچنین ریشه‌های گیاه اسیدهای آلی ترشح کرده و از طریق H^+ تولیدی باعث تغییر شکل این کانی شده‌اند. در شرایطی که گیاهان با محلول غذایی بدون پتاسیم تغذیه شدند با افزودن نیم درصد ماده‌ی آلی به محیط کشت دارای کانی فلوگوپیت هشت وجهی سه-گانه، نسبت شدت قله ۱/۴ نانومتر به ۱ نانومتر به‌صورت معنا-داری نسبت به بسترهای بدون ماده‌ی آلی افزایش یافته و از ۰/۲۷ به ۱/۳۸ (تقریباً ۵ برابر) رسیده است (جدول۳). بین تمامی تیمارها بیشترین نسبت شدت قله‌ی ۱/۴ نانومتر به ۱ نانومتر به این بستر کشت (تغذیه با محلول غذایی بدون پتاسیم و دارای نیم درصد ماده آلی) وابسته است. نسبت شدت قله‌ی ۱/۴ نانومتر به ۱ نانومتر در نمونه‌ی اشباع با منیزیم وابسته به بسترهای کشت دارای یک درصد ماده‌ی آلی نیز در مقایسه با تیمار بدون ماده آلی ($p<0.05$) افزایش یافته است، ولی در مقایسه با بسترهای کشت حاوی نیم درصد ماده‌ی آلی افزایش معنی‌دار آماری نشان نمی‌دهد. نتایج شکل ۳ نیز بیانگر این است که با افزودن نیم درصد ماده‌ی آلی به بسترهای کشت دارای کانی سه‌جائی فلوگوپیت و در شرایطی که گیاهان با محلول غذایی بدون پتاسیم تغذیه شده بودند، میزان پتاسیم جذب‌شده به وسیله‌ی یونجه در مقایسه با بسترهای کشتی که هیچ گونه ماده‌ی آلی دریافت نکرده‌اند به‌صورت معنی‌داری ($p<0.05$) افزایش یافته است و بین بسترهای کشت دارای نیم و یک درصد ماده‌ی آلی از نظر جذب پتاسیم تفاوت معنی‌دار آماری وجود ندارد. ماده‌ی آلی حالت فیزیکی مناسبی در محیط رشد ایجاد کرده و باعث بهبود شرایط تهویه‌ای ریشه و فراهم کردن امکان رشد و گسترش بیشتر ریشه در بسترهای کشت شده و سطح جذب ریشه را افزایش داده است. از طرف دیگر اسیدهای آلی تولید شده در اثر تجزیه‌ی ماده آلی با پتاسیم همبافت تشکیل داده و رهاسازی پتاسیم غیرتبادلی فلوگوپیت را در شرایط کمبود این عنصر تسهیل کرده و باعث تغییرات چشم گیر کانی‌شناسی فلوگوپیت شده است. گر چه مواد آلی با بهبود ویژگی‌های فیزیکی بستر ریشه به‌صورت غیر مستقیم بر تغییرات کانی‌شناسی موثرند، سهم و تأثیر شیمیایی آن‌ها در تغییرات کانی‌شناسی به مراتب بارزتر است.



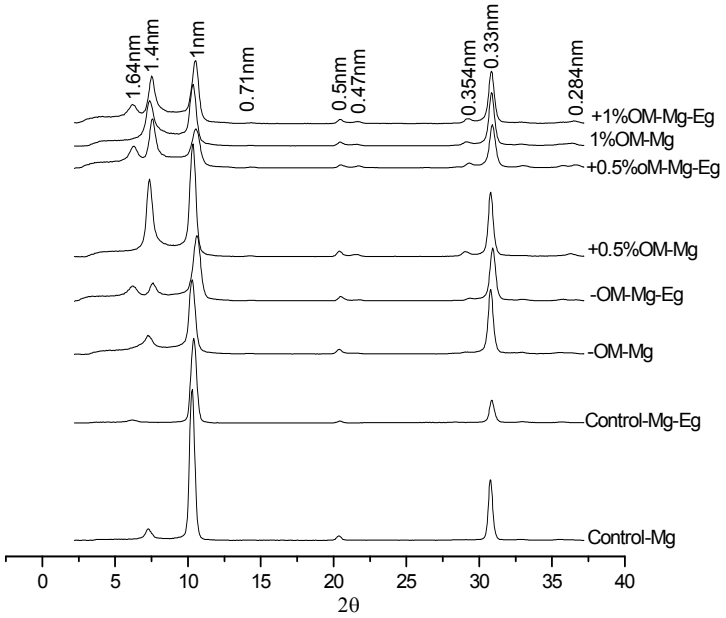
شکل ۲ پراش نگاشت پرتو ایکس تیمارهای اشباع از منیزیم بخش رس نمونه فلوگوپیت قبل از آزمایش (Control) و پس از کشت مربوط به دو وضعیت تغذیه‌ای با پتاسیم (K+) و بدون پتاسیم (K-) و سه سطح بدون ماده آلی (OM-)، نیم درصد ماده آلی (0.5%OM+) و ۱ درصد ماده آلی (1%OM+)



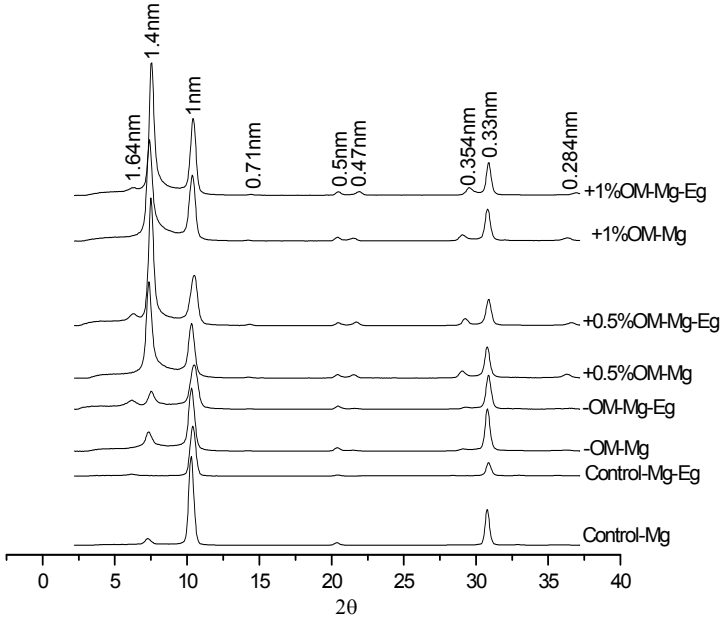
شکل ۳ کل پتاسیم جذب شده توسط یونجه در دو وضعیت تغذیه‌ای با پتاسیم (K+) و بدون پتاسیم (K-). میانگین‌های دارای حروف مشترک در سطح ۵ درصد تفاوت معنی‌دار ندارند.

قله‌های ۱٫۶۴ نانومتر و ۱٫۴ نانومتر در تیمار اشباع با اتیلن گلیکول نمونه‌های وابسته به بسترهای کشت دارای فلوگوپیت در هر دو حالت تغذیه‌ای مشاهده شد (شکل‌های ۴ و ۵) که در نمونه‌های وابسته به تمامی بسترهای کشت جز در تیمارهای دارای ماده‌ی آلی که با محلول غذایی بدون پتاسیم تغذیه شده بودند، قله‌ی ۱٫۴ نانومتر با تیمار گلیسرول باقی مانده و بخشی از کانی نیز تا نزدیک به ۱٫۷ نانومتر منبسط شد. قله‌ی ۱٫۷ نانومتر حاکی از تشکیل کانی اسمکتیت در این بسترهای کشت است. همچنین حضور قله‌های رده‌های دوم (۰٫۷۱ نانومتر)، سوم (۰٫۴۷ نانومتر)، چهارم (۰٫۳۵۴ نانومتر) و پنجم (۰٫۲۸۴ نانومتر) کلریت در نمونه‌ی اشباع با منیزیم (شکل‌های ۴ و ۵) بسترهای کشت بدون ماده‌ی آلی در هر دو حالت تغذیه‌ای (محلول غذایی با پتاسیم و بدون پتاسیم) نشان می‌دهد که علاوه بر کانی اسمکتیت، کانی کلریت نیز در اثر هوادیدگی فلوگوپیت تشکیل شده است. در این دو بستر کشت قله‌ی ۱٫۴ نانومتر در تیمار اشباع با پتاسیم و تیمار گرمایی نمونه‌ی اشباع با پتاسیم که به کانی کلریت وابسته است، نسبت به شدت قله‌ی ۱٫۴ نانومتر تیمار گلیسرول کاهش زیادی یافته است که این نشان می‌دهد بخشی از شدت قله‌ی ۱٫۴ نانومتر تیمار گلیسرول به ورمیکولیتی شدن فلوگوپیت وابسته است. در شرایطی که گیاهان با محلول غذایی دارای پتاسیم تغذیه شدند و محیط کشت دارای ماده‌ی آلی بوده است، نسبت شدت قله‌ی ۱٫۴ نانومتر به ۱٫۷ نانومتر در تیمار گلیسرول و نیز شدت قله‌های رده‌ی سوم تا پنجم کلریت در مقایسه با سطح بدون ماده‌ی آلی افزایش نشان می‌دهد (جدول ۳). بنابراین در شرایط تغذیه‌ای با پتاسیم در اثر هوادیدگی فلوگوپیت سه کانی ورمیکولیت، کلریت و اسمکتیت تشکیل شد که با حضور ماده‌ی آلی در این بستر کشت، علاوه بر افزایش مقدار ورمیکولیت،

کلریت بیشتری نیز در محیط به‌وجود آمده است. تاکنون گزارشی مبنی بر تشکیل کانی کلریت در محیط ریشه‌ی گیاه ارائه نشده است. به نظر می‌رسد تشکیل بروسایت ($Mg(OH)_2$) در محیط کشت گیاه در اثر انحلال کانی منیزیم‌دار فلوگوپیت و ورود آن در لایه‌های سیلیکات‌های صفحه‌ای ۲:۱ مثل اسمکتیت و ورمیکولیت منجر به تشکیل کانی کلریت شده است [۲۸]. به‌طور کلی این نتایج نشان می‌دهند که ماده‌ی آلی حتی در شرایط تغذیه‌ای با پتاسیم توانسته است تغییرات کانی‌شناسی چشم‌گیری در کانی سه‌جائی فلوگوپیت ایجاد کند.



شکل ۴ پراش نگاشت پرتو ایکس تیمارهای اشباع از منیزیم (Mg)، اشباع از منیزیم واتیلن گلیکول (Mg-Eg) بخش رس نمونه فلوگوپیت قبل از آزمایش (Control) و پس از کشت در سه سطح بدون ماده آلی (OM-)، نیم درصد ماده آلی (0.5%OM+) و ۱ درصد ماده آلی (1%OM+) در شرایط تغذیه با محلول غذایی با پتاسیم.



شکل۵ پراش نگاشت پرتو ایکس تیمارهای اشباع از منیزیم (Mg)، اشباع از منیزیم واتیلن گلیکول (Mg-Eg) بخش رس نمونه فلوگوپیت قبل از آزمایش (Control) و پس از کشت در سه سطح بدون ماده آلی (OM-)، نیم درصد ماده آلی (0.5%OM+) و ۱ درصد ماده آلی (1%OM+) در شرایط تغذیه با محلول غذایی بدون پتاسیم.

هینسینجر و جیلارد [۹] پس از ۸ روزکشت، ورمیکولیتی شدن قوی فلوگوپیت در اثر هوادیدگی و رهاسازی چشمگیر پتاسیم بین لایه‌ای این کانی در ریزوسفر رای‌گراس را گزارش کردند. به علت کاهش غلظت پتاسیم محلول در مجاورت ریشه-ها، پتاسیم بین لایه‌ای در فلوگوپیت به وسیله‌ی کاتیون‌های با انرژی آبپوشی بالا مثل کلسیم جایگزین شده و باعث تشکیل ورمیکولیت می‌شود [۲۹]. بررسی گلووا و همکاران [۳۰] در خاک مناطق ریزوسفری [خاک ریشه‌ی] جنگل‌های درختان مخروطی، تغییر شکل میکا و کلریت و تشکیل کانی‌های منبسط‌شونده ورمیکولیت و اسمکتیت را نشان داد. تریبوت و همکاران [۳۱] نیز در یکی از بررسی‌های خود تشکیل اسمکتیت و کانی‌های مختلط ایلیت- اسمکتیت را در محیط کشت شبدر و رای‌گراس، در شرایطی که هیچ‌گونه کود پتاسیمی به محیط کشت اضافه نشده بود، گزارش کردند.

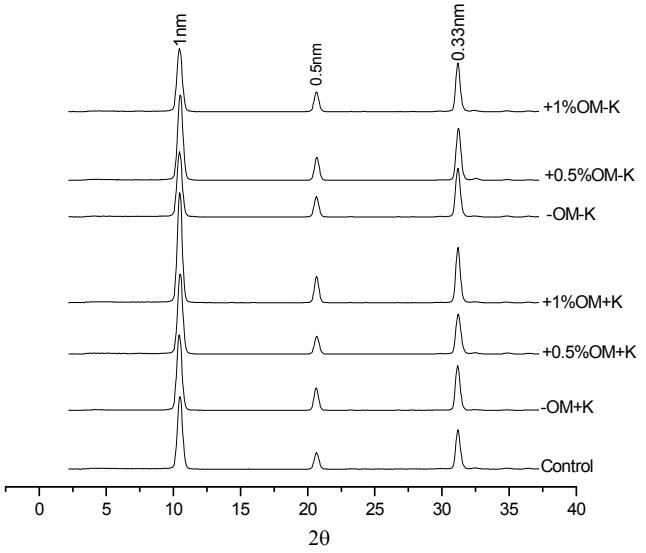
در شرایط تغذیه‌ای بدون پتاسیم با افزودن ماده‌ی آلی به بسترهای کشت دارای کانی فلوگوپیت، قله‌های ۱/۴ و ۱/۶۴ نانومتر در تیمار اشباع با اتیلن گلیکول مشاهده شد (شکل ۵). حذف کامل قله‌ی ۱/۶۴ نانومتر و باقی‌ماندن قله‌ی ۱/۴ نانومتر در تیمار گلیسرول نشان می‌دهد که برخلاف دیگر بسترهای کشت با افزودن ماده‌ی آلی به محیط رشد، در شرایطی که تنها خاستگاه تأمین پتاسیم مورد نیاز گیاه فلوگوپیت بوده است، کانی اسمکتیت تشکیل نشده است. حضور ماده‌ی آلی در بسترهای کشت حاوی فلوگوپیت، باعث افزایش معنی‌دار ($p<0.05$) نسبت شدت قله‌های رده دوم تا پنجم کلریت به قله‌ی ۰/۵ نانومتر در تیمار اشباع با منیزیم در مقایسه با سطح بدون ماده‌ی آلی شده است (جدول ۳). بنابراین در شرایط تغذیه‌ای بدون پتاسیم با حضور ماده‌ی آلی در اثر تبدیل فلوگوپیت، کلریت بیشتری تشکیل شده است. با توجه به اینکه شدت قله‌ی ۱/۴ نانومتر در تیمار اشباع با پتاسیم کاهش یافته است، بنابراین بخش بزرگی از شدت قله‌ی ۱/۴ نانومتر تشکیل-شده در تیمار اشباع با منیزیم به ورمیکولیتی‌شدن شدید فلوگوپیت تحت تأثیر ماده آلی مربوط است. البته در شرایط تغذیه‌ای بدون پتاسیم بین بسترهای کشت دارای فلوگوپیت که نیم و یک درصد ماده‌ی آلی دریافت کرده‌اند از نظر مقدار ورمیکولیت و کلریت تشکیل‌شده اختلاف معنی‌داری آماری وجود ندارد (جدول ۳). به نظر می‌رسد تجزیه ماده‌ی آلی در محیط کشت گیاهان، قدرت اسیدی و گروه‌های همبافت‌کننده را در محیط ریشه افزایش داده و باعث تغییرات کانی‌شناسی بیشتر فلوگوپیت شده است و با رهاسازی پتاسیم از کانی در شرایط عدم کوددهی پتاسیم، نیاز گیاه به این عنصر تأمین شده است و با افزودن نیم و یک درصد ماده‌ی آلی به محیط کشت، در شرایطی که فلوگوپیت تنها منبع تأمین پتاسیم مورد نیاز گیاهان بوده، به ترتیب ۳۵/۸۱ و ۳۱/۵۵ درصد از کل پتاسیم غیرتبادلی فلوگوپیت به وسیله‌ی گیاهان تخلیه شده است. در-حالی‌که در بستر کشت فاقد ماده‌ی آلی فقط ۱۸/۵ درصد از کل این پتاسیم توسط گیاه تخلیه شده است.

ماده‌ی آلی از طریق تأثیر بر پارامترهای رشد باعث افزایش رشد گیاهان می‌شود که متعاقب آن نیاز پتاسیمی گیاه افزایش می‌یابد. این مسئله منجربه رهاسازی بیشتر پتاسیم از کانی می‌شود. علاوه‌براین، ماده‌ی آلی مستقیماً از طریق سه ساز و کار ممکن است منجر به رهاسازی بیشتر پتاسیم و افزایش تغییرات کانی‌شناسی شود، (۱) تشکیل کلات با عناصر فلزی ساختاری کانی و افزایش میزان رهاسازی آن‌ها، (۲) رهاسازی اسیدهای آلی که این اسیدها خاستگاه یون H^+ هستند و می-توانند باعث انحلال ساختاری کانی شوند یا (۳) تولید گاز دی-اکسیدکربن در طول تجزیه که این گاز با تولید اسید کربنیک منجر به کاهش pH و تسهیل رهاسازی پتاسیم از کانی می-شود. مجموع این اثرهای ماده‌ی آلی در شرایط تغذیه‌ای بدون پتاسیم که گیاه غیر از کانی فلوگوپیت خاستگاه دیگری برای تأمین نیاز پتاسیمی خود نداشته است، بیشتر است.

کانی‌شناسی بخش رس محیط ریشه حاوی موسکویت

پراش نگاشت پرتو ایکس تیمارهای اشباع با منیزیم نمونه‌های وابسته به بسترهای کشت دارای کانی موسکویت در هر دو حالت تغذیه‌ای با و بدون پتاسیم و در هر سه سطح ماده‌ی آلی (شاهد، نیم و یک درصد) در شکل ۶ نشان داده شده است. به غیر از قله‌های۰/۳۳، ۰/۵ و ۱ نانومتر وابسته به کانی دوجائی موسکویت، هیچ قله‌ی دیگری در نمونه‌های اشباع با منیزیم بسترهای دارای موسکویت تشکیل نشده است و برخلاف کانی سه‌جائی فلوگوپیت هیچ تغییر کانی‌شناسی در کانی دوجائی موسکویت ایجاد نشده است. نتایج حاصل از کل پتاسیم جذب-شده به وسیله‌ی گیاه نیز با نتایج پراش پرتو ایکس همخوانی دارد (شکل ۳). در شرایط تغذیه‌ای با و بدون پتاسیم، گیاهان کشت‌شده در بستر حاوی فلوگوپیت در هر سه سطح ماده‌ی آلی تفاوت معنی‌داری ($p<0.05$) از نظر میزان جذب پتاسیم

با گیاهان کشت‌شده در بستر حاوی موسکویت نشان دادند. در شرایط تغذیه‌ای بدون پتاسیم، حضور ماده‌ی آلی نیز نتوانسته است رهاسازی پتاسیم غیرتبادلی را از کانی دوجائی موسکویت تسهیل کند و بین بسترهای شاهد (شن کوارتزی) و بسترهای دارای موسکویت در شرایطی که گیاهان با محلول غذایی بدون پتاسیم تغذیه شده‌اند، از نظر میزان جذب پتاسیم تفاوت معنی‌داری وجود ندارد. در این بسترهای کشت حضور ماده‌ی آلی در شرایط تغذیه‌ای بدون پتاسیم، تفاوت معنی‌داری در وزن خشک گیاهان نسبت به شرایطی که این بسترها هیچ گونه ماده‌ی آلی نداشتند، ایجاد نکرد و عملکرد گیاهان در هر سه سطح ماده‌ی آلی نسبت به حالت تغذیه با پتاسیم به‌صورت معنی‌داری کاهش یافت.



شکل ۶ پراش نگاشت پرتو ایکس تیمارهای اشباع از منیزیم بخش رس نمونه موسکویت قبل از آزمایش (Control) و پس از کشت مربوط به دو وضعیت تغذیه‌ای با پتاسیم (K+) و بدون پتاسیم (K-) و سه سطح بدون ماده آلی (OM-)، نیم درصد ماده آلی (0.5%OM+) و ۱ درصد ماده آلی (1%OM+)

نوروزی و خادمی [۲۴] در شرایط کمبود پتاسیم در ریزوسفر [خاک و ریشه‌ی] یونجه، ورمیکولیتی‌شدن قوی فلوگوپیت و عدم تغییر شکل موسکویت را گزارش کردند. مجللی و وید [۱۰] در محیط کشت گیاه و در شرایط همزیستی با قارچ میکوریزا، تغییر کانی‌شناسی چشم‌گیری در کانی موسکویت مشاهده نکردند. در موسکویت به دلیل اینکه موقعیت هیدروکسیل نسبت به ورقه‌های سیلیکات، مایل بوده و فاصله‌ی پروتون و پتاسیم زیادتر است، پتاسیم کمتر دفع می‌شود و آزادسازی پتاسیم از این کانی سخت‌تر از یک کانی سه‌جائی است [۱]. ترتیب آزاد شدن پتاسیم از کانی‌های خاک در شرایطی که پتاسیم خاک کاهش می‌یابد به‌صورت میکاهای سه‌جائی>میکاهای دوجائی > فلدسپارهای پتاسیم است [۲۷].

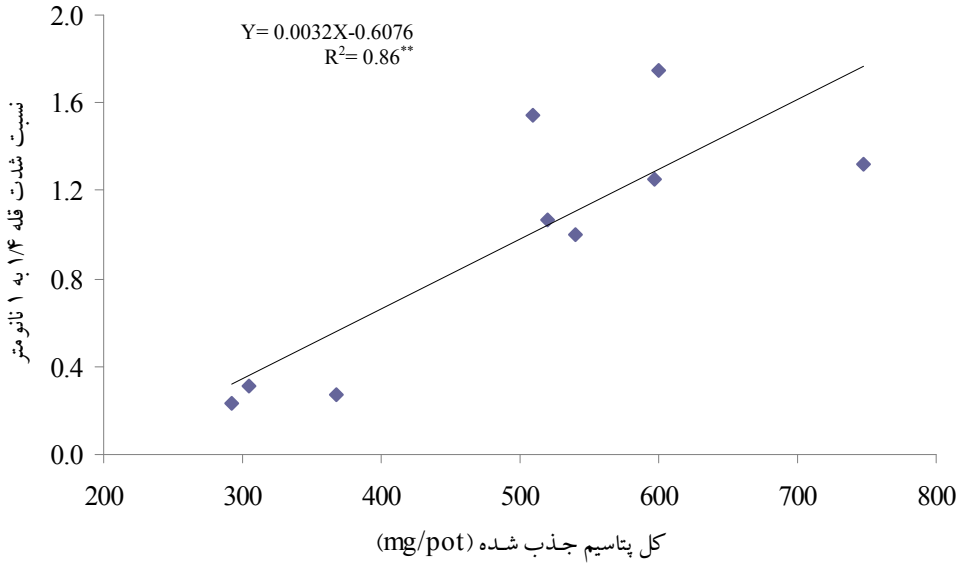
رابطه‌ی تغییرات کانی‌شناسی و کل پتاسیم جذب‌شده

نمودار همبستگی بین نسبت شدت قله‌ی ۱/۴ نانومتر به ۱ نانومتر در تیمارهای اشباع با منیزیم و کل پتاسیم جذب‌شده به وسیله ی یونجه در هر دو حالت تغذیه‌ای در بسترهای کشتی که دارای کانی سه‌جائی فلوگوپیت بودند، در شکل‌های ۷- الف و ۷-ب نشان داده شده‌اند. همبستگی بالا و معنی‌دار در سطح ۱ درصد بین نسبت شدت قله و پتاسیم جذب‌شده نشان می‌دهد که در هر دو حالت تغذیه‌ای، با افزایش پتاسیم جذب‌شده به وسیله‌ی گیاه تغییرات کانی‌شناسی بیشتری در کانی سه‌جائی فلوگوپیت رخ داده و باعث تشکیل مقادیر بیشتر فراورده‌های ناشی از هوادیدگی آن شده است. علاوه‌براین، بیشتر بودن شیب خط نمودار ۷- الف نسبت به نمودار ۷- ب نشان می‌دهد که در حالتی که کانی فلوگوپیت تنها خاستگاه تأمین پتاسیم گیاهان بوده، میزان تخلیه‌ی پتاسیم غیرتبادلی کانی بیشتر شده و این مسئله تغییرات کانی‌شناسی بیشتری در فلوگوپیت ایجاد کرده است.

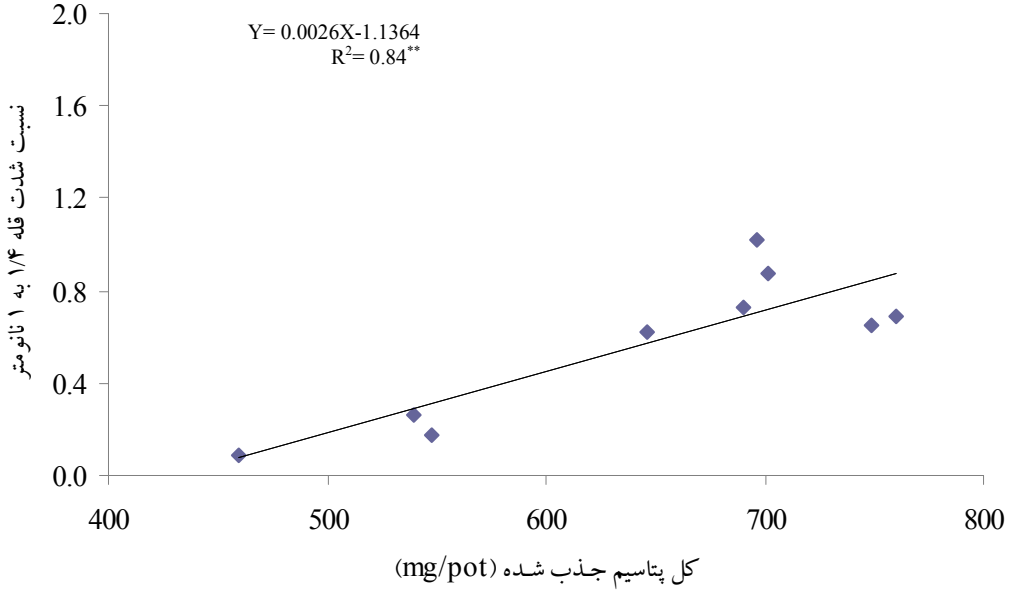
برداشت

تجزیه‌ی ماده‌ی آلی در محیط رشد گیاه توانسته است شرایط مناسبی برای هوادیدگی کانی‌ها و آزادسازی پتاسیم غیرتبادلی آن‌ها فراهم کرده و تغییرات کانی‌شناسی چشم‌گیری در کانی ایجاد کند. البته این تأثیر کاملاً به نوع کانی میکایی وابسته است، به طوری که کانی سه‌جائی فلوگوپیت تحت تأثیر تجزیه ماده‌ی آلی در ریزوسفر [خاک ریشه‌ی] گیاه به خوبی توانسته پتاسیم غیرتبادلی خود را آزاد کند و به کانی‌های دیگر تبدیل شود، ولی در مورد کانی دوجائی موسکویت که مقاوم به هوادیدگی است حتی حضور ماده‌ی آلی در بستر کشت هم باعث تسهیل هوادیدگی و آزادسازی پتاسیم غیرتبادلی آن نشده است و هیچ تغییری در این کانی مشاهده نمی‌شود. با توجه به اهمیت پتاسیم غیرتبادلی در تأمین نیاز گیاه، در خاک‌های با ذخایر بالای پتاسیم باید نوع کانی‌های پتاسیم‌دار و میزان رهاسازی پتاسیم آن‌ها هنگام توصیه کودی مورد توجه خاص قرار گیرد. همچنین با افزودن کود آلی به این خاک‌ها می‌توان علاوه بر ایجاد شرایط فیزیکی و شیمیایی مناسب در خاک، رهاسازی پتاسیم غیرتبادلی کانی‌ها را نیز تا حدودی تسهیل کرد. به علاوه، به نظر می‌رسد که حداقل بخشی از کانی‌های رسی ورمیکولیت، اسمکتیت و حتی کلریت در خاک-ها به ویژه در خاک‌های با مواد آلی بالا حاصل تبدیل‌های بیولوژیکی کانی‌های میکایی و بیشتر میکاهای سه‌جائی باشد.

(الف)



(ب)



شکل ۷ همبستگی بین نسبت شدت قله‌ی ۱/۴ به ۱ نانومتر در تیمارهای منیزیم اشباع و کل پتاسیم جذب شده توسط گیاه در وضعیت تغذیه‌ای بدون پتاسیم (K-) (الف) و با پتاسیم (K+) (ب) در بسترهای کشت دارای کانی فلوگوپیت. ** همبستگی در سطح ۱ درصد معنی‌دار است.

قدردانی

هزینه‌های این پژوهش از سوی دانشگاه صنعتی اصفهان (پژوهانه نویسنده‌ی دوم و اعتبارات تخصیصی تحصیلات تکمیلی و قطب علمی آلودگی خاک و آب) تأمین شده است. آزمایش گلدانی در این پژوهش در مرکز پژوهشی کشت بدون خاک گروه خاکشناسی دانشکده ی کشاورزی دانشگاه صنعتی اصفهان و بررسی پراش پرتو ایکس در دانشگاه بریتیش کلمبیای شمالی کانادا انجام شده است. نویسندگان لازم می‌دانند از همکاری این موسسه‌ها سپاسگزاری کنند.

مراجع

[۱] ملکوتی م. ج.، شهابی ع. ا.، بازرگان ک.، *"پتاسیم در کشاورزی ایران"*، انتشارات سنا (۱۳۸۴) ۲۹۲ صفحه.

[2] Wild A., *"Potassium, sodium, calcium, magnesium, sulphur, silicon"*, In: Wild A. (Ed.), Russell's Soil Conditions and Plant Growth, Longman Scientific & Technical, Harlow, UK. (1988) 743-779.

[3] Barber S.A., *"Soil Nutrient Bioavailability"*. John Wiley & Sons, Inc., New York (1995) 414 p.

[4] Sing B., Goulding K.W.T., *"Changes with time in the potassium content and phyllosilicates in the soil of the Broadbalk continuous wheat experiment at Rothamsted"*, Eur. J. Soil Sci. 48 (1997) 651-659.

[5] Thompson M.L., Ukrainczyk L., *"Micas"*, In: Dixon J.B., Schulze D.G. (Eds.), Soil Mineralogy with Environmental Applications, Soil Sci. Soc. Am. Madison, WI. (2002) 431-466.

[6] Sparks D.L., Huang P.M., *"Physical chemistry of soil potassium"*, In: Munson R.D., (Ed.), Potassium in Agriculture, ASA, CSSA, SSSA. Madison, WI. (1985) 201-276.

[7] Huang P.M., *"Feldspars, olivines, pyroxines, and amphiboles"*, In: Dixon J.B., Weed S.B. (Eds.), Minerals in Soil Environment. Soil Sci. Soc. Am. Madison, WI. (1989) 975-1050.

[8] Bertsch P.M., Thomas G.W., *"Potassium status of temperate region soils"*, In: Munson R.D. (Ed.), Potassium in Agriculture, ASA. CSSA. SSSA. Madison, WI. (1985) 131-162.

[9] Hinsinger P., Jaillard B., *"Root-induced release of interlayer potassium and vermiculitization of phlogopite as related to potassium depletion in the rhizosphere of ryegrass"*, Soil Sci. 44 (1993) 525-534.

[10] Mojallali H., Weed S.B., *"Weathering of micas by mycorrhizal soybean plants"*, Soil Sci. Soc. Am. J. 42 (1978) 367-372.

[11] Wang J.G., Zhang F.S., Cao Y.P., Zhang X.L., *"Effect of plant types on release of mineral potassium from gneiss"*, Nutr. Cycl. Agroecosys. 56 (2000) 37-44.

[12] Zhu B., Wang T., You X., Gao M.R., *"Nutrient release from weathering of purplish rocks in the Sichuan Basin, China"*, Pedosphere. 18 (2008) 257-264.

[13] Spyridakis D.E., Chester S.G., Wilde S.A., *"Kaolinization of biotite as a result of coniferous and deciduous seedling growth"*, Soil Sci. Soc. Am. Proc. 31 (1967) 203-210.

[14] Hinsinger P., Elsass F., Jaillard B., Robert M., *"Root-induced irreversible transformation of*

[15] Rao D.N., Mikkelsen D.S., *"Effect of rice straw additions on production of organic acids in a flooded soil"*, Plant Soil. 47 (1997) 303-311.

[16] Ugolin F.C., Sletten R.S., *The role of proton donors in pedogenesis as revealed by soil solution studies"*, Soil Sci. 151(1991) 51-75.

[17] Kelly E.F., Chadwick O.A., Hilinski T.E., *"The effect of plants on mineral weathering"*, Biogeochemistry. 42 (1998) 21-53.

[18] Shen Y., StrÖm L., JÖnsson J.A., Tyler G., *"Low-molecular organic acids in the rhizosphere soil solution of beech forest (Fagus sylvatica L.) Cambisols determined by ion chromatography using supported liquid membran enrichment technique"*, Soil Biol. Biochem. 28 (1996) 1163-1169.

[19] Medvedeva O.P., *"Unexchangeable fixation of potassium as an indicator of the potassium supply of plants"*, Agrokhimiya. 11 (1983) 25-31.

[20] Gerke J., Beissner L., Romer W., *The quantitative effect of chemical phosphate mobilization by carboxylate anions on P uptake by a single root. I. The basic concept and determination of soil parameters"*, J. Plant Nutr. Soil Sci. 1163 (2000) 207-212.

[21] Lindroos A.J., Brugger T., Derome J., Derome K., *The weathering of mineral soil by natural soil solutions"*, Water Air. Soil Poll. 149 (2003) 269-279.

[22] LundstrÖm U.S., *The role of organic acids in the soil solution chemistry of a podzolized soil"*, J. Soil Sci. 44 (1993) 121-133.

[23] Khademi H., Arocena J.M., *"Kaolinite formation from palygorskite and sepiolite in rhizosphere soils"*, Clays Clay Miner. 56 (2008) 422-436

[24] Norouzi S., Khademi H**.,** *"Ability of alfalfa (Medicago sativa L.) to take up potassium from different micaceous minerals and consequent vermiculitization"*, Plant Soil (In Press). (2009).

[۲۵] خوشگفتارمنش ا. ح.، *"ارزیابی وضعیت تغذیه‌ای گیاه و مدیریت بهینه کودی"*، انتشارات دانشگاه صنعتی اصفهان (۱۳۸۶) ۱۵۸ صفحه.

[26] Stegner R., *"Plant Nutrition Studies"*, Lamotte company. Maryland. USA. (2002) 76 p.

[27] Fanning D.S., Keramidas V.Z., El-Desoky M.A., *"Micas"*, In: Dixon J.B., Weed S.B. (Eds.), Minerals in Soil Environments, Soil Sci. Soc. Am. Madison, WI. (1989) 551-634.

[28] Kohut C., Warren C.J., *"Chlorite"*, In: Dixon J.B., Shulze D.G. (Eds.), Soil Mineralogy with Environmental Applications, Soil Sci. Soc. Am. Madison, WI. (2002) 531-556.

[29] Harely A.D., Gilkes R.J., *"Factors influencing the release of plant nutrient elements from silicate rock powders: A geochemical overview"*, Nutr. Cycl. Agroecosys. 56 (2000) 11-36.

[30] Glowa K.R., J. Arocena M., Massicotte H.B., *"Properties of soils influenced by ectomycorrhizal fungi in hybrid spruce [Picea glauca x engelmannii (Moench.) Voss]"*, Can. J. Soil Sci. 84 (2004) 91-102.

[31] Tributh H., Boguslawski E.v., Lieres A.v., Steffens D. Mengel K., *Effect of potassium removal by crops on transformation of illitic clay mineral"*, J. Soil Sci. 143 (1987) 404-409.