رهاسازی شکل‌های محلول، تبادلی و غیرتبادلی پتاسیم در برخی از کانی‌های سیلیکاته پتاسیم‌دار تحت تأثیر اسید اگزالیک

حدیث حاتمی، علیرضا کریمی[۱*]، امیر فتوت[۱] و حسین خادمی[۲]

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۲/۲۴ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۶/۲۱)

چکیده

اسیدهای آلی در افزایش زیست فراهمی عناصر غذایی خاک نقش مهمی دارند. این مطالعه به‌منظور تعیین تأثیر غلظت‌های مختلف اسید اگزالیک در آزادسازی شکل‌های محلول، تبادلی و غیرتبادلی پتاسیم در برخی از کانی‌های میکایی و فلدسپات پتاسیم و بررسی روند آزادسازی پتاسیم در طول زمان، انجام شد. آزمایش در قالب طرح کاملاً تصادفی با آرایش فاکتوریل شامل پنج نوع کانی (بیوتیت، فلوگوپیت، موسکویت، فلدسپات‌زنجان و فلدسپات‌یزد)، چهار غلظت اسیداگزالیک (صفر، ۱، ۱۰ و ۱۰۰ میلی‌مولار)، چهار زمان (۵ ساعت، ۲۰، ۶۰ و ۹۰ روز) و در دو تکرار انجام شد. کانی‌های موردمطالعه (کوچک‌تر از ۵۰ میکرون) تحت تأثیر اسید اگزالیک با غلظت‌های مختلف در دوره‌های زمانی گفته شده قرار گرفتند. **مقدار پتاسیم محلول، تبادلی و غیرتبادلی آزاد شده در این کانی‌ها، با استفاده از دستگاه فلیم فتومتر اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که از بین غلظت‌های مختلف اسید اگزالیک، بیشترین غلظت اسید (۱۰۰ میلی‌مولار) توانسته است بیشترین مقدار پتاسیم محلول، تبادلی و غیرتبادلی را در تمام کانی‌ها آزاد نماید. بیشترین میزان پتاسیم محلول به‌مقدار ۰/۸۶ گرم بر کیلوگرم از کانی فلوگوپیت و بیشترین پتاسیم تبادلی و غیرتبادلی به‌ترتیب، به میزان ۱/۵۶ و ۲۹/۶۴ گرم بر کیلوگرم از کانی بیوتیت آزاد شد. کانی موسکویت با مقادیر ۰/۱۹، ۰/۳۴ و ۱/۴۱ گرم بر کیلوگرم به‌ترتیب کمترین آزادسازی پتاسیم محلول، تبادلی و غیرتبادلی را در بین کانی‌های مورد مطالعه داشت. به‌طور کلی روند رهاسازی پتاسیم از کانی‌ها دارای دو فاز مشخص رهاسازی سریع در مراحل اولیه و رهاسازی با سرعتی کمتر تا انتهای آزمایش می‌باشد. پیشنهاد می‌شود که در پژوهش‌های بعدی، بازه زمانی طولانی‌تری برای رهاسازی پتاسیم در نظر گرفته شود.**

واژه‌های کلیدی: اسید اگزالیک، رهاسازی پتاسیم، کانی‌های پتاسیم‌دار، شکل‌های پتاسیم

۱. گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
۲. گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان
* : مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: Karimi-a@um.ac.ir

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-19]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.69.3.0]

مقدمه

چهار شکل مختلف پتاسیم در خاک به‌ترتیب قابلیت استفاده بودن برای گیاهان و میکروب‌ها شامل پتاسیم محلول، تبادلی، غیرتبادلی (تثبیت‌شده) و ساختمانی می‌باشند (۱۲ و ۱۸). تعادل موجود بین شکل‌های مختلف پتاسیم در خاک، منجر به تداوم تأمین پتاسیم می‌گردد. طبق پژوهش‌های انجام شده، حدود ۹۸ درصد از پتاسیم خاک در فلدسپات‌های پتاسیم و سیلیکات‌های لایه‌ای قرار دارد که این موضوع نشان‌دهنده اهمیت این کانی‌ها در تامین پتاسیم مورد نیاز گیاه می‌باشد (۵). کانی‌های گروه فلدسپات، در تقسیم‌بندی کلی کانی‌های سیلیکاته در گروه سیلیکات‌های سه‌بعدی (Tectosilicate) قرار می‌گیرند. پتاسیم در فلدسپات‌های پتاسیم به‌وسیله پیوند کووالانسی درون چارچوب بلورها متصل شده است و رهاسازی پتاسیم تحت تأثیر هوادیدگی صورت می‌گیرد. در میکاها که نوعی از سیلیکات‌های لایه‌ای (Phyllosilicate) ۲:۱ می‌باشند، پتاسیم به‌وسیله نیروهای الکتروستاتیک نگهداری می‌شود. رهاسازی پتاسیم از میکاها می‌تواند به‌وسیله دو فرآیند انحلال ساختار بلور و یا تبادل پتاسیم بین‌لایه‌ای با کاتیون آب‌پوشیده انجام شود (۱۴).

اسیدهای کربوکسیلیک با وزن مولکولی کم به صورت‌های آلیفاتیک مونو، دی و تری کربوکسیلیک و اسیدهای بنزوئیک جانشین شده در محلول خاک یافت می‌شوند که شامل کربن‌های اشباع نشده و گروه‌های هیدروکسی می‌باشند (۱۹). اسیدهای کربوکسیلیک بسته به تعداد گروه‌های کربوکسیلیک، می‌توانند بارهای منفی متفاوتی را حمل کنند و در نتیجه می‌توانند با کاتیون‌های فلزی موجود در محلول خاک، کمپلکس شوند (۱۱). به‌علاوه، دو فرآیند دیگر شامل تبادل لیگاندی و واکنش‌های پروتونه شدن نیز در رهاسازی کاتیون‌های فلزی توسط اسیدهای کربوکسیلیک نقش دارند (۱۶). غلظت اسیدهای کربوکسیلیک در محلول خاک بین ۰/۰۰۰۱ تا ۰/۰۰۱ مول بر لیتر گزارش شده است. از جمله اسیدهای آلی آلیفاتیک خاک می‌توان به اسید اگزالیک، اسید سیتریک، اسید مالیک، اسید فوماریک، اسید تارتاریک و اسید سوکسنیک اشاره کرد (۱۹). از بین این اسیدها، سه اسید اول به مقدار بیشتری در محلول خاک وجود دارند و بر حرکت و وضعیت پتاسیم در خاک اثر می‌گذارند (۱۷). منشأ اسیدهای آلی در خاک، تجزیه مواد آلی موجود در خاک (مانند بقایای گیاهان، قارچ‌ها و باکتری‌ها)، ترشحات ریشه و شست‌وشوی برگ‌ها می‌باشند (۲۲).

تو و همکاران (۲۰) در آزمایشی با هدف تعیین اثر اسید اگزالیک بر آزادسازی پتاسیم از سه رده خاک مالی‌سول، اولتی‌سول و انتی‌سول در چین و چهار کانی پتاسیم‌دار بیوتیت، فلوگوپیت، موسکویت و میکروکلاین نتیجه گرفتند که پتاسیم استخراج شده از خاک با استفاده از اسید اگزالیک ۰/۲ مولار، مشابه استفاده از اسید نیتریک جوشان ۱ مولار می‌باشد و ترتیب آزاد شدن پتاسیم از کانی‌ها به‌صورت بیوتیت > فلوگوپیت > موسکویت > میکروکلاین و برای خاک‌ها به‌صورت مالی‌سول > انتی‌سول > اولتی‌سول است. ونگ و همکاران (۲۱) در یک مطالعه گلدانی اثر کانی‌های پتاسیم‌دار گنیس و فلدسپات را بر رشد سه گیاه ذرت، چچم و کلزا مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که گیاهان با ترشح اسیدهای آلی از ریشه خود و خروج پتاسیم از کانی‌ها، در مقایسه با نمونه شاهد دارای وزن خشک و غلظت پتاسیم بیشتری در ریشه می‌باشند. هم‌چنین این پژوهشگران رهاسازی پتاسیم را تحت تأثیر اسید مالیک و اسید تارتاریک، در اندازه‌های مختلف گنیس بررسی کردند و نشان دادند که با افزایش غلظت اسید و کوچک‌تر شدن ذرات، میزان پتاسیم آزاد شده بیشتر می‌گردد. در یک مطالعه گلدانی دیگر، از پسماندهای معادن که حاوی کانی‌های پتاسیم‌دار بیوتیت، فلدسپات پتاسیم و نفلیت (نوعی شبه‌فلدسپات) بودند به‌عنوان کود پتاسیم در گیاه ذرت استفاده شد. نتایج نشان داد که فلدسپات پتاسیم در طی زمان آزمایش برای گیاه غیرقابل دسترس بوده در حالی‌که مقدار قابل توجهی از پتاسیم بیوتیت و نفلیت جذب شده است (۶).

سانگ و هوانگ (۱۷) اثر اسیدهای آلی اگزالیک و سیتریک

[Downloaded from jstmar.iut.ac.ir on 2026-11-19]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.69.3.0]

با غلظت ۰/۰۱ مولار را بر آزادسازی پتاسیم از کانی‌های بیوتیت، موسکویت، میکروکلاین و ارتوکلاز برای مدت ۱ ساعت تا ۳۰ روز مورد بررسی قرار دادند و نتیجه گرفتند که توالی آزادسازی پتاسیم از این کانی‌ها به‌صورت بیوتیت > میکروکلاین = اتوکلاز > موسکویت می‌باشد و اسید اگزالیک، پتاسیم بیشتری نسبت به اسید سیتریک آزاد کرده است. نوروزی و خادمی (۴) آزادسازی پتاسیم غیرتبادلی در کانی‌های فلوگوپیت و موسکویت را توسط سه اسیدآلی اگزالیک، مالیک و سیتریک در یک دوره زمانی ۵ ساعت تا ۱۲۰ روز بررسی کردند. نتایج نشان داد که سرعت رهاسازی پتاسیم بسته به نوع اسیدهای آلی و ترکیب شیمیایی و ساختمان تبلور کانی‌های میکایی متفاوت است. اسید سیتریک با غلظت ۴۰۰۰ میکرومولار در بین سایر اسیدها پتاسیم بیشتری از کانی‌ها آزاد نمود و کانی فلوگوپیت در تمام تیمارها، پتاسیم بیشتری نسبت به کانی موسکویت آزاد نمود. اسماعیل‌پورفرد و گیوی (۱) آزاد شدن پتاسیم غیرتبادلی از کانی‌های میکایی موجود در ذرات مختلف خاک را تحت تأثیر اسیدهای آلی اگزالیک، مالیک و سیتریک در یک دوره ۲۰۰۰ ساعته مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که مقدار پتاسیم غیرتبادلی تجمعی آزاد شده از ذرات در اندازه سیلت نسبت به‌سایر ذرات بیشتر بود و اسید اگزالیک نسبت به اسیدهای دیگر بیشترین میزان پتاسیم غیرتبادلی را آزاد نمود. با توجه به مطالب گفته شده، اسید اگزالیک در مقایسه با سایر اسیدهای آلی، در رهاسازی پتاسیم موفق‌تر بوده است. هم‌چنین ونگ و همکاران (۲۲) نشان دادند که توالی ثابت سرعت آنیون‌های اگزالات، مالات و سوکسنات به‌صورت $K_{oxalate} > K_{malonate} > K_{succinate}$ می‌باشد که نشان‌دهنده اهمیت اسید اگزالیک در هوادیدگی کانی‌ها و آزادسازی عناصر غذایی (مانند پتاسیم) است.

اسیدهای آلی (به‌ویژه اسید اگزالیک)، نقش بسیار مهمی در رهاسازی پتاسیم غیرتبادلی دارند و این شکل از پتاسیم با سایر شکل‌های پتاسیم در حال تعادل می‌باشد؛ ولی تاکنون پژوهشی درباره اثر اسیدهای آلی بر شکل‌های محلول و تبادلی انجام نشده است. بنابراین تحقیق حاضر با اهداف: ۱- بررسی تأثیر غلظت اسیداگزالیک بر آزادسازی شکل‌های محلول، تبادلی و غیرتبادلی پتاسیم در کانی‌های میکایی بیوتیت، فلوگوپیت، موسکویت و فلدسپات‌پتاسیم، ۲- مقایسه آزادسازی پتاسیم در کانی‌های مورد مطالعه و ۳- بررسی روند زمان در آزادسازی پتاسیم انجام شد.

مواد و روش‌ها

آزمایش در قالب طرح کاملاً تصادفی با آرایش فاکتوریل و در دو تکرار انجام شد. تیمارهای آزمایش شامل پنج نوع کانی سیلیکاته پتاسیم‌دار (بیوتیت، فلوگوپیت، موسکویت و فلدسپات یزد و زنجان)، چهار سطح اسید اگزالیک (شاهد، ۱، ۱۰ و ۱۰۰ میلی‌مولار) و چهار زمان (۵ ساعت، ۲۰، ۶۰ و ۹۰ روز) بودند. تجزیه و تحلیل‌های آماری توسط نرم‌افزار MSTAT-C و با استفاده از آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد انجام شدند.

در این پژوهش، سه نوع کانی میکایی بیوتیت، فلوگوپیت، موسکویت و دو کانی فلدسپات پتاسیم استفاده گردید. کانی‌های بیوتیت و موسکویت از معادنی در همدان، فلوگوپیت از معدنی در ارومیه و فلدسپات‌های پتاسیم از معادنی در یزد و زنجان تهیه شدند. کانی‌ها آسیاب شده و کانی‌های عبور کرده از الک ۲۷۰ مش (با قطری کمتر از ۵۰ میکرون) برای انجام آزمایش انتخاب شدند. ترکیب عنصری کانی‌ها، به‌روش طیف‌سنجی فلورسنس پرتو ایکس (XRF) تعیین شد.

پس از تهیه محلول ۱۰۰ میلی‌مولار اسید اگزالیک، غلظت‌های ۱۰ و ۱ میلی‌مولار از غلظت ۱۰۰ میلی‌مولار اسید تهیه شدند. برای به حجم رساندن تمام محلول‌ها از نیترات سدیم ۰/۰۱ مولار استفاده گردید. نیترات سدیم، قدرت یونی را در تمام محلول‌ها یکسان نگه می‌دارد (۴). چند قطره کلروفورم برای جلوگیری از فعالیت‌های میکروبی قبل از به حجم رساندن محلول‌ها اضافه گردید. هم‌چنین برای خنثی کردن اثر pH در آزادسازی پتاسیم، قبل از به حجم رساندن محلول‌ها، pH همه

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-19]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.69.3.0]

آنها با استفاده از سود ۲ نرمال در عدد ۵ تنظیم شد. محلولی از نیترات سدیم ۰/۰۱ مولار نیز تهیه شد که به‌عنوان تیمار شاهد در آزمایش مورد استفاده قرار گرفت.

برای انجام آزمایش، ابتدا ۲ گرم از هر نمونه کانی به دقت توزین شد و به داخل یک ظرف پلی‌اتیلن منتقل گردید و ۴ میلی‌لیتر از هر یک از محلول‌های تهیه شده، به هر ظرف اضافه شد. این نمونه‌ها در دمای ۲۵ درجه سلسیوس برای مدت‌های زمانی ۵ ساعت و ۲۰، ۶۰ و ۹۰ روز در انکوباتور نگهداری شدند. نمونه‌ها هفته‌ای ۳ بار و هر بار به‌مدت یک ساعت توسط یک تکان‌دهنده الکتریکی، تکان داده شده و مجدداً به انکوباتور منتقل می‌شدند. پس از پایان هر دوره زمانی، نمونه‌های مربوط به آن زمان به‌مدت ۸ ساعت در آون (دمای ۴۰ درجه سلسیوس) قرار داده می‌شدند. پس از خشک شدن نمونه‌ها، شکل‌های محلول، تبادلی و غیرتبادلی پتاسیم به‌ترتیب توسط آب‌مقطر، استات آمونیوم یک مولار در pH=۷ (۱۰) و اسید نیتریک یک مولار جوشان (۹) عصاره‌گیری شدند و با استفاده از دستگاه فلیم‌فتومتر مدل جنوی (JENWAY PFP 7) اندازه‌گیری گردیدند.

برای اندازه‌گیری پتاسیم محلول در آب، ابتدا ۵۰۰ میلی‌گرم از نمونه‌ها به‌دقت توزین شد و داخل یک ظرف پلی‌اتیلن ۵۰ میلی‌لیتری منتقل گردید و ۵ میلی‌لیتر آب مقطر به هر ظرف اضافه شد. سپس، نمونه‌ها توسط یک تکان‌دهنده الکتریکی رفت و برگشتی با سرعت ۲۰۰ دور در دقیقه، به‌مدت یک ساعت تکان داده شدند. پس از پایان این زمان، نمونه‌ها با سرعت ۲۰۰۰ دور در دقیقه و به‌مدت ۵ دقیقه سانتریفیوژ شدند و محلول زلال رویی جمع‌آوری گردید (۱۰). غلظت پتاسیم در محلول رویی به‌وسیله دستگاه فلیم‌فتومتر اندازه‌گیری شد.

برای اندازه‌گیری پتاسیم تبادلی به کانی توزین‌شده در مرحله قبل که شکل محلول آن خارج شده بود، ۵ میلی‌لیتر استات آمونیوم یک مولار (pH=۷) اضافه شده و مانند مرحله قبل، به‌مدت یک ساعت تکان داده شد. سپس، به‌مدت ۵ دقیقه و با سرعت ۲۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ شد و محلول زلال رویی جمع‌آوری گردید و غلظت پتاسیم در محلول رویی اندازه‌گیری شد (۱۰).

به‌منظور اندازه‌گیری پتاسیم غیرتبادلی، ابتدا ۵۰۰ میلی‌گرم از هر یک از اندازه‌های کانی‌ها، توزین شد و داخل ارلن‌های ۵۰ میلی‌لیتری منتقل گردید و ۵ میلی‌لیتر اسید نیتریک یک مولار به ظرف‌ها اضافه شد. نمونه‌ها به‌مدت ۱۵ دقیقه پس از به‌جوش آمدن، در دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس حرارت داده شدند. پس از این مرحله، نمونه‌های سرد شده، صاف گردیدند و غلظت پتاسیم در محلول‌های صاف‌شده اندازه‌گیری شد (پس از ریختن نمونه‌ها روی کاغذ صافی، محتویات هر ارلن چند بار توسط اسید نیتریک ۰/۱ مولار شسته شده و برروی کاغذ صافی منتقل شد). پتاسیم غیرتبادلی، با کم کردن مقدار پتاسیم عصاره‌گیری شده با اسید نیتریک مولار جوشان، از مجموع مقدار پتاسیم محلول و تبادلی محاسبه گردید (۹).

نتایج و بحث

الف. تأثیر نوع کانی و غلظت اسید اگزالیک در رهاسازی پتاسیم

نتایج تجزیه عنصری (XRF) کانی‌های مورد آزمایش در جدول ۱ نشان داده شده‌اند. مقدار پتاسیم کل کانی‌های بیوتیت، فلوگوپیت، موسکویت، فلدسپات زنجان و فلدسپات یزد به‌ترتیب ۹/۴۱، ۱۰/۷۹، ۱۱/۸۰، ۱۳/۹۸ و ۱۳/۷۵ درصد می‌باشد (جدول۱). کانی موسکویت یک میکای دوجایی است و فاقد آهن و منیزیم در لایه هشت وجهی خود می‌باشد. میکاهای سه‌جایی بیوتیت و فلوگوپیت دارای مقدار قابل توجهی MgO و Fe_2O_3 هستند. مقدار SiO_2 و AL_2O_3 در کانی موسکویت، بیش از بیوتیت و فلوگوپیت است که این مسئله وجود آلومنیوم در لایه هشت وجهی میکاهای دوجایی را تایید می‌نماید. کانی‌های فلدسپات پتاسیم به‌عنوان تکتوسیلیکات دارای میزان SiO_2 بیشتری در مقایسه با کانی‌های میکایی می‌باشند. مقدار قابل توجه K_2O نشان می‌دهد که پتاسیم کاتیون اصلی خنثی‌کننده بار الکتریکی در فلدسپات‌ها می‌باشد.

[Downloaded from jstmar.iut.ac.ir on 2026-11-19]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.69.3.0]

جدول ۱. درصد اکسید عناصر اصلی تشکیل دهنده کانی‌های مورد مطالعه به روش XRF

کانی	SiO_2	Al_2O_3	MgO	Fe_2O_3	K_2O	CaO	Na_2O	TiO_2	MnO	LOI*
بیوتیت	۴۱/۷	۱۴/۹	۱۲/۹	۱۱/۴	۹/۴	۰/۴	۰/۳	۷/۰۲	۰/۰۳	۱/۵
فلوگوپیت	۴۰/۷	۱۴/۷	۲۳/۸	**۵/۵**	۱۰/۸	۰/۹	۰/۲	**۰/۰۵**	۰/۱	۲/۷
موسکویت	۴۵/۷	۳۲/۶	۰/۱	**۲/۵**	۱۱/۸	۰/۱	۰/۶	۰/۰۶	۰/۱	۴/۸
فلدسپات زنجان	۶۵/۲	۱۷/۱	۰/۰۱	۰/۴	۱۳/۹	۰/۱	۲/۳	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۳
فلدسپات یزد	۶۳/۹	۱۷/۶	۰/۰۱	۰/۲	۱۳/۷	۰/۱	۲/۹	۰/۰۲	۰/۰۱	**۰/۵**

* کاهش وزن در دمای بالا (Loss on Ignition)

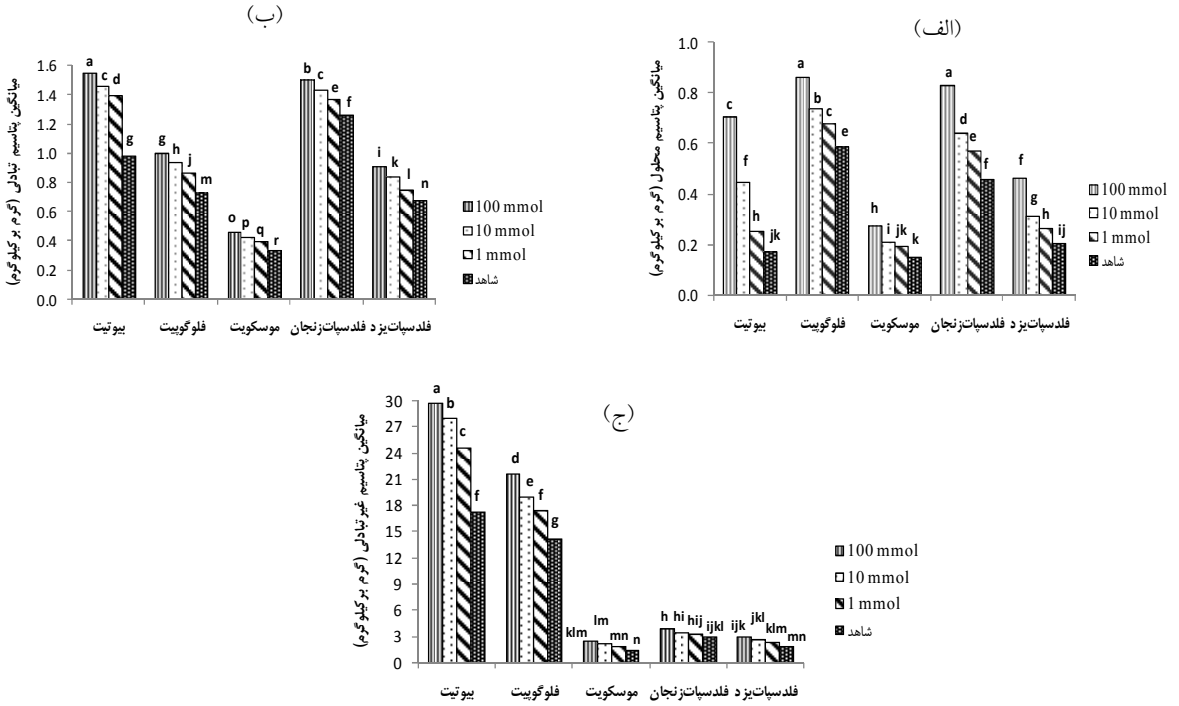
مقدار پتاسیم محلول، تبادلی و غیرتبادلی آزاد شده تحت تأثیر اسیداگزالیک با غلظت‌های مختلف در شکل ۱ نشان داده شده است. از بین غلظت‌های مختلف اسید اگزالیک، بیشترین غلظت اسید (۱۰۰ میلی‌مولار) توانسته است بیشترین مقدار پتاسیم محلول، تبادلی و غیرتبادلی را در تمام کانی‌ها آزاد نماید. بیشترین میزان پتاسیم محلول به‌مقدار ۰/۸۶ گرم بر کیلوگرم در غلظت ۱۰۰ میلی‌مولار اسید در کانی فلوگوپیت و کمترین میزان آن به مقدار ۰/۱۹ گرم برکیلوگرم در غلظت ۱ میلی‌مولار اسید در کانی موسکویت مشاهده شد. هم‌چنین بیشترین پتاسیم تبادلی و غیرتبادلی نیز به‌میزان ۱/۵۶ و ۲۹/۶۴ گرم بر کیلوگرم در تیمار ۱۰۰ میلی‌مولار اسید و در کانی بیوتیت وجود داشت و کمترین پتاسیم تبادلی و غیرتبادلی به‌مقدار ۰/۳۴ و ۱/۴۱ گرم بر کیلوگرم در تیمار ۱ میلی‌مولار اسید در کانی موسکویت مشاهده گردید. بنابراین، در تمام شکل‌های پتاسیم و در همه غلظت‌ها، کانی موسکویت، کمترین میزان پتاسیم را آزاد کرده است؛ به‌گونه‌ای که در غلظت ۱ میلی‌مولار، میزان پتاسیم محلول کانی موسکویت با نمونه شاهد، دارای تفاوت معنی‌دار نمی‌باشد و این درحالی است که کانی‌های فلدسپات در این غلظت با نمونه شاهد خود، تفاوت معنی‌داری نشان داده‌اند (شکل ۱- الف). نکته مهم دیگری که در شکل ۱-الف وجود دارد، این است که بین غلظت‌های ۱۰۰ میلی‌مولار در کانی‌های فلوگوپیت و فلدسپات زنجان، تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد. هم‌چنین میزان آزادسازی پتاسیم محلول در غلظت‌های ۱ میلی‌مولار و نمونه شاهد در کانی فلوگوپیت، به‌ترتیب، مشابه غلظت‌های ۱۰۰ میلی‌مولار کانی بیوتیت و ۱ میلی‌مولار کانی فلدسپات زنجان بود که این مطلب می‌تواند نشان‌دهنده بالا بودن پتاسیم محلول در کانی فلوگوپیت باشد. با توجه به شکل ۱-ب، در هر یک از کانی‌های مورد مطالعه، بین نمونه شاهد و غلظت‌های اسید اگزالیک، تفاوت معنی‌داری مشاهده شد؛ اما بین نمونه شاهد کانی بیوتیت و غلظت ۱۰۰ میلی‌مولار در کانی فلوگوپیت و هم‌چنین بین غلظت‌های ۱۰ میلی‌مولار در کانی‌های بیوتیت و فلدسپات زنجان، تفاوت معنی‌داری از نظر آماری وجود نداشت.

شکل ۱-ج رهاسازی پتاسیم غیرتبادلی را در کانی‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد. همانند پتاسیم تبادلی، پتاسیم غیرتبادلی نیز در هر یک از کانی‌های مورد مطالعه، بین نمونه شاهد و غلظت‌های اسید اگزالیک، تفاوت معنی‌داری وجود دارد. بین نمونه شاهد کانی بیوتیت و غلظت ۱ میلی‌مولار کانی فلوگوپیت، اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد. هم‌چنین، در هر کدام از کانی‌های موسکویت، فلدسپات زنجان و فلدسپات یزد، بین غلظت‌های ۱۰۰، ۱۰ و ۱ میلی‌مولار آنها اختلاف معنی‌داری مشاهده نگردید. به‌طورکلی، از نظر مقدار رهاسازی پتاسیم، تحت تأثیر غلظت‌های مختلف اسید اگزالیک می‌توان روند میکای دوجایی (موسکویت) < فلدسپات‌های پتاسیم (زنجان و یزد) < میکاهای سه‌جایی (بیوتیت، فلوگوپیت) را پیشنهاد کرد.

لازم به‌ذکر است که روند گفته شده، مربوط به مقدار پتاسیم آزاد شده می‌باشد و ارتباطی با تأثیر اسید اگزالیک بر

[Downloaded from jstmar.iut.ac.ir on 2026-11-19]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.69.3.0]



شکل ۱. میانگین پتاسیم محلول (الف)، تبادلی (ب) و غیرتبادلی (ج) آزاد شده تحت تأثیر اسید اگزالیک با غلظت‌های مختلف در کانی‌های بیوتیت، فلوگوپیت، موسکویت، فلدسپات زنجان و فلدسپات یزد (میانگین‌های دارای حرف مشترک در سطح ۵٪ دارای اختلاف معنی‌دار نمی‌باشند)

رهاسازی پتاسیم (در مقایسه با نمونه شاهد) ندارد.؛ به‌عبارت دیگر همان‌گونه که در نمودارهای شکل ۱ مشاهده می‌گردد، میزان پتاسیم نمونه شاهد در میکاهای سه جایی قابل توجه است و حتی از میزان پتاسیم رها شده توسط تیمارهای اسید اگزالیک، در کانی‌های موسکویت و فلدسپات بیشتر است. بنابراین، کانی‌های سه‌جایی بدون تأثیر اسید اگزالیک نیز دارای مقدار رهاسازی قابل توجهی می‌باشند و زمانی‌که تحت تأثیر اسید اگزالیک قرار می‌گیرند نسبت به سایر کانی‌ها، پتاسیم بیشتری آزاد می‌نمایند.

نسبت پتاسیم آزاد شده توسط اسید اگزالیک ۱۰۰ میلی‌مولار در مقایسه با نمونه شاهد، برای کانی‌های مورد مطالعه در جدول ۲ نشان داده شده است. همان‌گونه که در این جدول مشاهده می‌گردد، اسید اگزالیک، بیشترین تأثیر را در رهاسازی شکل‌های محلول و تبادلی پتاسیم، بر کانی بیوتیت داشته است؛ اما در مورد شکل غیرتبادلی، این تأثیر در کانی موسکویت، مشابه با کانی بیوتیت بوده است. هم‌چنین در شکل‌های محلول و تبادلی نیز نسبت آزادسازی پتاسیم در کانی موسکویت قابل توجه می‌باشد. بنابراین می‌توان گفت که اسید اگزالیک در آزادسازی پتاسیم از موسکویت اثرگذار بوده است اما میزان رهاسازی آن کم می‌باشد. نکته دیگر این‌که اسید اگزالیک بر آزادسازی پتاسیم از کانی فلدسپات زنجان، کمترین تأثیر را داشته است. به‌طور کلی براساس شکل ۱ می‌توان گفت که اسید اگزالیک منجر به افزایش رهاسازی پتاسیم در تمام کانی‌های مورد مطالعه و در نتیجه، افزایش غلظت پتاسیم آزاد شده، شده است و از نظر غلظت پتاسیم آزاد شده، دارای روند میکای دوجایی (موسکویت) < فلدسپات‌های پتاسیم (زنجان و یزد) < میکاهای سه‌جایی (بیوتیت، فلوگوپیت)، می‌باشند اما از نظر تأثیری که تیمارهای اسید اگزالیک در مقایسه با نمونه شاهد، در

[Downloaded from jstmar.iut.ac.ir on 2026-11-19]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.69.3.0]

جدول ۲. نسبت پتاسیم آزاد شده توسط اسید اگزالیک ۱۰۰ میلی‌مولار در مقایسه با نمونه شاهد، در کانی‌های بیوتیت، فلوگوپیت، موسکویت، فلدسپات‌زنجان و فلدسپات‌یزد

کانی / شکل	بیوتیت	فلوگوپیت	موسکویت	فلدسپات زنجان	فلدسپات یزد
محلول	۴/۱	۱/۵	۱/۸	۱/۱	۲/۳
تبادلی	۱/۵	۱/۴	۱/۵	۱/۲	۱/۳
غیرتبادلی	۱/۷	۱/۵	۱/۷	۱/۳	۱/۶

رهاسازی پتاسیم داشته‌اند (جدول ۲)، این روند به‌صورت فلدسپات‌های پتاسیم (زنجان و یزد) < میکای دوجایی (موسکویت) < میکاهای سه‌جایی (بیوتیت، فلوگوپیت)، است. به‌عبارت دیگر تأثیری که اسید اگزالیک، بر رهاسازی پتاسیم از کانی موسکویت در مقایسه با نمونه شاهد دارد؛ تقریبا به اندازه میکاهای سه‌جایی می‌باشد ولی مقدار پتاسیم آزاد شده از کانی موسکویت کمتر از میکاهای سه‌جایی می‌باشد.

طبق نظریه پولمن و مک‌کول (۱۵) توانایی اسیدهای آلی در آزادسازی پتاسیم از خاک و کانی‌ها به‌سرعت پخشیدگی اسید آلی در خاک، توانایی پخشیدگی کمپلکس اسید آلی و عنصر مورد نظر، زمان تماس اسید آلی روی سطح کانی، یونیزه شدن اسید آلی، گروه‌های عاملی اسید آلی و موقعیت آنها و تمایل شیمیایی بین اسید آلی و عنصر موجود در کانی بستگی دارد. هم‌چنین ساختمان بلور، ترکیب شیمیایی کانی، جهت‌گیری گروه هیدروکسیل ساختمانی، موقعیت و محل بار لایه‌ای، درجه تخلیه پتاسیم و بار لایه‌ای حاصل از جانشینی هم‌شکل در کانی‌های میکایی نیز نقش مهمی در آزادسازی پتاسیم از کانی‌ها دارند (۱۷). گروه‌های هیدروکسیل موجود در لایه اکتاهدرال میکاهای دوجایی به سمت فضای خالی موجود در این لایه می‌روند؛ بنابراین پتاسیم با قدرت زیادی نگهداری می‌شود. اما در میکاهای سه‌جایی به‌دلیل فاصله کمتری که بین گروه‌های هیدروکسیل لایه اکتاهدرال وجود دارد، پتاسیم بین لایه‌ها دارای پایداری کمی می‌باشد و سبب آزادسازی پتاسیم بیشتری می‌شود (۱۸). علاوه بر این، کاتیون‌های غالب در لایه اکتاهدرال کانی‌های بیوتیت و فلوگوپیت، Fe(II) و Mg و در کانی موسکویت، Al می‌باشند. حلالیت Fe(II) و Mg ساختمانی در فلوگوپیت و بیوتیت از طریق حمله یون‌های هیدرونیوم و واکنش‌های کمپلکس‌کنندگی با لیگاند اگزالات، بسیار بیشتر از حلالیت Al موجود در ساختمان موسکویت است. این واکنش‌ها منجر به آزادسازی پتاسیم غیرتبادلی بیشتری از ساختمان فلوگوپیت و بیوتیت در مقایسه با موسکویت می‌گردد (۴).

کم‌بودن میزان آزادسازی پتاسیم در کانی‌های فلدسپات را می‌توان این‌گونه توجیه کرد که با افزایش درجه پلیمریزه شدن سیلیکات‌ها، پایداری کانی افزایش می‌یابد. فلدسپات‌های پتاسیم از جمله سیلیکات‌های سه‌بعدی، دارای ساختار بسیار متراکم و پیوندهای کووالانس می‌باشند. بنابراین، میزان حلالیت آنها کم است. برداشته شدن یون‌های فلزی که در ساختمان این کانی‌ها وجود دارد، منجر به تضعیف ساختار کانی‌ها و در نتیجه انحلال آنها می‌گردد؛ اما از آن‌جا که دسترسی به این یون‌ها به احاطه شدن آنها توسط مولکول‌های آب در چارچوب آلومینوسیلیکات‌ها وابسته است، انحلال آنها محدود به سطح می‌شود (۷). به‌همین دلیل، میزان پتاسیم غیرتبادلی آزاد شده در فلدسپات‌ها در مقایسه با سایر کانی‌های مورد مطالعه کمتر است. در مورد زیاد بودن شکل‌های محلول و تبادلی فلدسپات‌ها می‌توان گفت که این افزایش تا حدی به‌دلیل آزادسازی پتاسیم غیرتبادلی تحت تأثیر اسید اگزالیک بوده است (جدول ۲)، اما این کانی‌ها خود دارای شکل‌های محلول و تبادلی بالایی می‌باشند. بالا بودن پتاسیم محلول و تبادلی در نمونه شاهد کانی‌های فلدسپات، می‌تواند تا حدودی تایید کننده

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-19]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.69.3.0]

این موضوع باشد (شکل ۱). با توجه به جدول ۱، کانی‌های فلدسپات‌زنجان و یزد، بیش‌ترین درصد K_2O را در بین کانی‌های مورد مطالعه دارا می‌باشند. بنابراین، ممکن است که بالا بودن شکل‌های پتاسیم محلول و تبادلی به‌دلیل پتاسیم کل بالایی باشد که این کانی‌ها دارند.

ب. روند رهاسازی پتاسیم با زمان از کانی‌های مورد مطالعه در تیمارهای مختلف

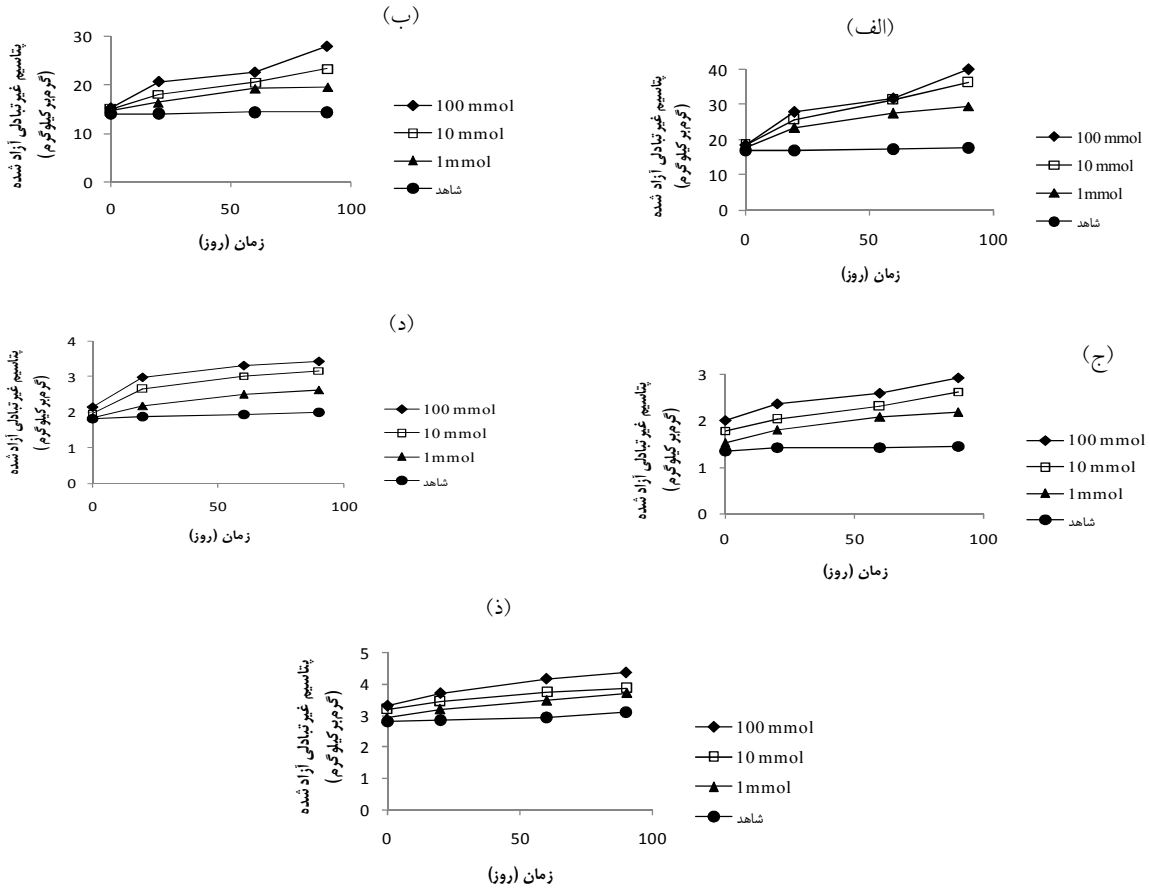
با توجه به این‌که روند زمان در شکل‌های محلول، تبادلی و غیرتبادلی پتاسیم، در کانی‌های مورد مطالعه، تقریباً مشابه یکدیگر بود، تنها نمودارهای مربوط به پتاسیم غیرتبادلی نشان داده شده‌اند.

روند رهاسازی پتاسیم غیرتبادلی برای کانی‌های بیوتیت، فلوگوپیت، موسکویت، فلدسپات‌یزد و فلدسپات‌زنجان به‌عنوان تابعی از زمان، تحت تأثیر اسید اگزالیک با غلظت‌های مختلف در شکل ۲ نشان داده شده است. مطالعات نشان می‌دهند که رهاسازی پتاسیم در دو مرحله انجام می‌شود. مرحله اول، مربوط به رهاسازی پتاسیم از مناطق گوه‌ای و لبه‌های کانی می‌باشد. با پیش‌روی رهاسازی، لبه‌های کانی‌های میکایی از هم جدا می‌شوند و پتاسیم‌های بین لایه‌ای موجود در ساختمان این کانی‌ها رها می‌شوند. به‌علت وجود فاصله بیشتر پتاسیم‌های درونی از لبه‌ها و قدرت جذب پتاسیم، رهاسازی در مرحله دوم با سرعت و پخشیدگی کمتری صورت می‌گیرد (۸ و ۱۳). اگر آزادسازی پتاسیم غیرتبادلی خیلی زیاد و شدید باشد؛ احتمال تخریب کانی‌های پتاسیمی وجود دارد. روند گفته شده برای آزادسازی پتاسیم، تقریباً در تمام کانی‌های مورد مطالعه صادق است. همان‌گونه که در شکل ۲ (الف و ب) مشاهده می‌شود، نمودارها در زمان ۲۰ روز در مقایسه با سایر زمان‌ها دارای شیب تندتری می‌باشند که نشان‌دهنده بالا بودن سرعت رهاسازی تا این زمان است؛ اما پس از آن، سرعت رهاسازی کاهش می‌یابد و در غلظت ۱ میلی‌مولار تقریباً تا پایان زمان آزمایش ثابت باقی می‌ماند. در مقابل، شیب نمودارهای ۱۰ میلی‌مولار و به‌ویژه ۱۰۰ میلی‌مولار، بین زمان‌های ۶۰ تا ۹۰ روز مجددا افزایش می‌یابد؛ علت احتمالی آن می‌تواند زیاد بودن غلظت‌های به‌کار رفته در این پژوهش باشد که قادر است میزان پتاسیم غیرتبادلی بیشتری را در مقایسه با غلظت‌های کمتر، از بین لایه‌های کانی آزاد نماید. در صورت طولانی‌تر بودن بازه زمانی آزمایش، نمودارهای مربوط به این غلظت‌ها نیز به تعادل می‌رسیدند. میکای موسکویت (شکل ۲- ج) نیز دارای روندی مشابه با کانی‌های بیوتیت و فلوگوپیت می‌باشد اما از آن‌جایی که این کانی در مقایسه با کانی‌های بیوتیت و فلوگوپیت، دارای رهاسازی پتاسیم غیرتبادلی کمتری است، افزایش شیب مربوط به غلظت ۱۰۰ میلی‌مولار، در بازه زمانی ۶۰ تا ۹۰ روز، در این کانی کمتر می‌باشد.

کانی‌های فلدسپات یزد و فلدسپات زنجان نیز تقریبا رفتاری مشابه با کانی‌های میکایی نشان می‌دهند (شکل ۲-د و ذ). با توجه به این‌که فلدسپات‌های پتاسیم، فاقد حالت لایه‌ای و هم‌چنین دارای استحکام ساختاری می‌باشند؛ پس از رهاسازی پتاسیم‌های موجود در لبه و سطح کانی، میزان رهاسازی این کانی‌ها در بازه زمانی آزمایش تقریبا به تعادل می‌رسد. هم‌چنین، از آن‌جا که ابتدا پتاسیم‌های موجود در لبه کانی آزاد می‌شوند؛ بنابراین در کانی‌های فلدسپات انتظار می‌رود که بیشترین شیب منحنی در زمان‌های آغازین آزمایش مشاهده گردد. این روند در کانی فلدسپات‌یزد به خوبی مشاهده می‌شود؛ اما در کانی فلدسپات زنجان، شیب منحنی در بازه زمانی ۲۰ روز در مقایسه با سایر زمان‌های آزمایش، شدیدتر نمی‌باشد. وجود این تفاوت را می‌توان به دوباره جذب شدن یا دوباره تثبیت شدن بخشی از پتاسیم آزاد شده از کانی در زمان‌های کوتاه مدت نسبت داد. به‌طوری که پتاسیم رها شده در زمان ۵ ساعت، در طی ۲۰ روز دوباره جذب کانی می‌شود و سپس تا زمان ۶۰ روز مجدداً فرصت کافی می‌یابد تا از سطح و لبه‌های کانی به محلول آزاد شود و به این ترتیب، روند افزایشی خود را ادامه دهد تا به حالت یکنواخت برسد. علاوه بر این، با توجه به جدول ۲ مشاهده می‌گردد که اسید اگزالیک کمترین تأثیر را در رهاسازی

[Downloaded from jstmar.iut.ac.ir on 2026-11-19]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.69.3.0]



شکل ۲. روند آزاد شدن پتاسیم غیرتبادلی از کانی‌های بیوتیت (الف)، فلوگوپیت (ب)، موسکویت (ج)، فلدسپات یزد (د) و فلدسپات زنجان (ذ) با زمان، تحت تأثیر اسید اگزالیک با غلظت‌های مختلف

پتاسیم غیرتبادلی در کانی فلدسپات زنجان داشته است. بنابراین، پایین بودن آزادسازی پتاسیم تحت تأثیر اسید اگزالیک در فلدسپات زنجان در مقایسه با سایر کانی‌ها، می‌تواند دلیل دیگری برای این موضوع باشد.

روند رهاسازی سریع‌تر پتاسیم با زمان در مراحل اولیه و سپس یکنواخت شدن آن در بسیاری از مطالعات رهاسازی، از جمله در مطالعات تو و همکاران (۲۰) دیده می‌شود. در این مطالعه، کانی‌های بیوتیت و فلوگوپیت ابتدا روند افزایشی شدید و سپس روند یکنواختی را داشتند. مهتا و همکاران (۱۳) نیز رهاسازی پتاسیم غیرتبادلی را در چهار نوع خاک با مواد مادری و بافت متفاوت توسط غلظت‌های مختلفی از اسید نیتریک، اسید اگزالیک و اسید سیتریک بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که اسید اگزالیک در مقایسه با سایر اسیدها، پتاسیم غیرتبادلی بیشتری آزاد کرده است و هم‌چنین رهاسازی پتاسیم در دو مرحله انجام شده است. در مرحله اول به‌دلیل خروج پتاسیم‌های موجود در لبه‌های کانی‌های خاک، سرعت آزادسازی بالا می‌باشد؛ اما در ادامه، رهاسازی با سرعت کمتری انجام می‌شود. بحرینی طوحان و همکاران (۲) سرعت رهاسازی پتاسیم غیرتبادلی را در ۱۲ سری غالب خاک‌های زراعی استان گلستان توسط اسیدهای آلی و کلرید کلسیم بررسی کردند و نتیجه گرفتند که اسید آلی به‌طور میانگین میزان پتاسیم بیشتری نسبت به کلرید کلسیم رها کرده است. آنها هم‌چنین نشان دادند

[Downloaded from jstmar.iut.ac.ir on 2026-11-19]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.69.3.0]

که رهاسازی پتاسیم در تمام خاک‌ها در مراحل اولیه سریع است و در مراحل بعدی با سرعت کمتری تا پایان آزمایش ادامه می‌یابد. ضرابی و همکاران (۳) نیز گزارش دادند که رهاسازی پتاسیم در مراحل اولیه در تمام خاک‌ها سریع است و در مراحل بعدی با سرعت کمتری تا انتهای آزمایش ادامه دارد و نتیجه گرفتند که عواملی مانند اندازه ذرات کانی‌های حاوی پتاسیم و شرایط محیطی خاک برروی رهاسازی پتاسیم تأثیر می‌گذارند.

نتیجه‌گیری

کانی‌های مورد استفاده در این پژوهش، تحت تأثیر اسید اگزالیک، پتاسیم بین لایه‌ای خود را آزاد نمودند. در بین عوامل گوناگون، شاید بتوان نوع کانی را مهم‌ترین عامل در آزادسازی پتاسیم تلقی کرد. میکاهای سه‌جایی (بیوتیت و فلوگوپیت) به‌علت وجود Fe^{+2} و Mg^{2+} در ساختمان اکتاهدرال خود، غالبا سریع‌تر از میکاهای دوجایی (موسکویت) که حاوی Al^{+3} یا Fe^{+3} در لایه اکتاهدرال خود می‌باشند، تحت تأثیر اسید اگزالیک، پتاسیم خود را آزاد نمودند. فلدسپات‌های پتاسیم (زنجان و یزد) برخلاف بالا بودن پتاسیم کل آنها، به‌دلیل ساختار متراکم و مستحکم و هم‌چنین نداشتن حالت لایه‌ای، قادر به رهاسازی پتاسیم غیرتبادلی قابل توجهی نبودند. تمام کانی‌های مورد مطالعه، تحت تأثیر تیمارهای اسید اگزالیک توانستند میزان پتاسیم محلول، تبادلی و غیرتبادلی بیشتری در مقایسه با نمونه‌های شاهد خود آزاد کنند. هم‌چنین از بین غلظت‌های به‌کار رفته برای اسید اگزالیک، غلظت ۱۰۰ میلی‌مولار، بیشترین تأثیر را در رهاسازی شکل‌های پتاسیم داشت. روند رهاسازی پتاسیم از کانی‌ها نشان داد که در مراحل اولیه سرعت رهاسازی بیشتر است، این یافته مؤید آن است که ابتدا پتاسیم از مناطق گوه‌ای شکل و لبه‌ای کانی‌ها آزاد می‌شود و پس از گذشت زمان، لبه‌های کانی‌ها از هم جدا شده و به‌تدریج پتاسیم ساختمانی از کانی‌ها رها می‌شود و در مرحله دوم، به‌علت افزایش فاصله پتاسیم درونی از لبه‌ها و قدرت جذب پتاسیم، رهاسازی با سرعت کمتری صورت می‌گیرد. به‌علت زیاد بودن غلظت‌های مورد استفاده، رهاسازی پتاسیم در اکثر کانی‌ها، در بازه زمانی آزمایش به تعادل کامل نرسید، بنابراین پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده، بازه زمانی طولانی‌تری درنظر گرفته شود. هم‌چنین، با توجه به تأثیر اندازه ذرات، پیشنهاد می‌شود که ذرات در حد سیلت ریز و رس نیز استفاده شود.

منابع مورد استفاده

۱. اسماعیل پورفرد، ن. و ج. گیوی. ۱۳۸۶. آزادشدن پتاسیم غیرتبادلی از کانی‌های میکای ذرات خاک تحت تأثیر اسیدهای آلی. مجموعه مقالات پانزدهمین همایش انجمن بلورشناسی و کانی شناسی ایران، ۲۴ و ۲۵ بهمن ماه، دانشگاه فردوسی مشهد.

۲. بحرینی طوحان، م.، الف. دردی‌پور و ع. موحدی نایینی. ۱۳۸۹. سرعت رهاسازی پتاسیم غیرتبادلی با استفاده از اسید سیتریک و کلرید کلسیم رقیق در خاک‌های زراعی سری‌های غالب استان گلستان. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک ۵۳ (۱۴):۱۲۶-۱۱۳.

۳. ضرابی، م.، م. جلالی و ش. مهدوی حاجیلویی. ۱۳۸۵. بررسی سرعت رهاسازی پتاسیم غیرتبادلی و قابلیت جذب آن با استفاده از اسید مالیک در بعضی از خاک‌های استان همدان .مجله علوم کشاورزی ایران ۳۷ (۶): ۹۶۴-۹۵۱.

۴. نوروزی، س. و ح. خادمی. ۱۳۸۸. آزادسازی پتاسیم از موسکویت و فلوگوپیت توسط چند اسید آلی. مجله آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی) ۲۳(۱): ۲۷۳-۲۶۳.

5. Andrist-Rangel, Y., S. Hillier, I. Öborn, A. Lilly, W. Towers, A. Edwards and E. Paterson. 2010. Assessing potassium reserves in northern temperate grassland soils: A perspective based on quantitative mineralogical analysis and aqua-regia extractable potassium. Geoderma. 158: 303-314.

[Downloaded from jstmar.iut.ac.ir on 2026-11-19]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.69.3.0]

6. Bakken, A. K., H. Gautneb and K. Myhr. 1997. Plant available potassium in rocks and mine tailings with biotite, nepheline and K-feldspar as K-bearing minerals. Acta Agric. Scand., Sect. B, Soil and Plant Sci. 47: 129-134.
7. Barman, A. K., C. Varadachari and K. Ghosh. 1991. Weathering of silicate minerals by organic acids. I. Nature of cation solubilisation. Geoderma 53: 45-63.
8. Goulding, K. W. T. 1984. The availability of potassium in soils to crops as measured by its release to a calciumsaturated cation exchange resin. J. Agric. Sci. Camb. 103: 265-275.
9. Helmke, P. A. and D. L. Sparks. 1996. Lithium, sodium and potassium. PP. 551-574. *In*: D. L. Sparks, A.L. Page, P. A. Helmke, R. H. Loeppert, P. N. Sultanpour, M. A. Tabatabai, C. T. Jhonston, and M. E. Sumner (Eds.), Methods of Soil Analysis, part 2, Chemical and Microbiological Properties., Soil Sci. Soc. Am., WI. USA.
10. Knudsen, D., G. A. Peterson and P. F. Pratt. 1982. Lithium, sodium and potassium. PP. 225–246. *In*: A. L. Page, R. H. Miller and D. R. Keeney (Eds.), Methods of Soil Analysis, 2nd ed., Part 2, Chemical and Microbiological Properties, Am. Soc. Agron., Soil Sci. Soc. Am., Madison, WI.
11. Lian, B., B. Wang, M. Pan, C. Liu and H. Henry Teng. 2008. Microbial release of potassium from K-bearing minerals by thermophilic fungus Aspergillus fumigates. Geochimica et Cosmochimica Acta. 72 :87–98.
12. Martin, W. H. and D. L. Sparks. 1985. On the behavior of nonexchangeable potassium in soils. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 16: 133-162.
13. Mehta, S. C., P. K. Meel, K. S. Grewal and S. Mahendra. 1995. Release of non-exchangeable potassium in entisols. J. Ind. Soc. Soil Sci. 43: 351-356.
14. Ogaard, A. F. and T. Krogstad. 2005. Release of interlayer potassium in Norwegian grassland soils. J. Plant Nutr. Soil Sci. 168: 80-88.
15. Pohlman, A. and J. McColl. 1986. Kinetics of metal dissolution from forest soils soluble organic acids. J. Environ. Qual. 15: 86-92.
16. Simard. R. R., C. R. De Kimpe. and J. Zizka. 1992. Release of potassium and magnesium from soil fractions and its kinetics. Soil Sci. Soc. Am. J. 56:1421-1428.
17. Song, S. K. and P. M. Huang. 1988. Dynamics of potassium release from potassium bearing minerals as influenced by oxalic and citric acids. Soil Sci. Soc. Am. J. 52: 383-390.
18. Sparks, D. L. and P. M. Huang. 1985. Physical chemistry of soil potassium. PP. 201-276. *In*: R.D. Munson. (Ed.), Potassium in Agriculture. ASA, CSSA, SSSA. Madison. WI.
19. Strobel, W. 2001. Influence of vegetation on low molecular-weight carboxylic acids in soil solution, A review. Geoderma. 99: 169-198.
20. Tu, S. X., Z. F. Guo and J. H. Sun. 2007. Effect of oxalic acid on potassium release from typical Chinese soils and minerals. Pedosphere. 17: 1-10.
21. Wang, J. G., F. S. Zhang, X. L. Zhang and Y. P. Cao. 2000. Release of potassium from K-bearing minerals: Effect of plant roots under P deficiency. Nutr. Cycl. Agroecosys. 56: 45–52.
22. Wang, X., L. Qingman, H. Huafeng, T. Zhang and Y. Zhou. 2005. Dissolution of kaolinite induced by citric, oxalic, and malic acids. J. Colloid Interf. Sci. 290: 481–488.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-19]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.69.3.0]