



اثر برخی نمک‌ها بر آبشویی پتاسیم محلول در ستون‌های خاک

* منصور میرزایی‌ورویی^۱، مجید فکری^۲ و مجید محمودآبادی^۲

^۱دانشجوی کارشناسی ارشد گروه علوم خاک، دانشگاه شهید باهنر کرمان،

^۲دانشیار گروه علوم خاک، دانشگاه شهید باهنر کرمان

تاریخ دریافت: ۹۱/۸/۲۶؛ تاریخ پذیرش: ۹۲/۴/۱۷

چکیده

پتاسیم محلول خاک قابل دسترس‌ترین نوع پتاسیم برای گیاهان است که در تولید محصولات زراعی دارای اهمیت می‌باشد. این پژوهش به بررسی میزان پتاسیم محلول تحت تأثیر برخی نمک‌ها و تأثیر حجم و محلول‌های آبشویی بر پتاسیم محلول در خاک می‌پردازد. آزمایش‌ها به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با استفاده از ۴ تیمار نمک شامل شاهد، کلرید کلسیم، سولفات کلسیم و کلرید سدیم؛ ۳ تیمار محلول آبشویی (آب مقطر، کلرید پتاسیم و سولفات پتاسیم)، ۸ دور آبیاری (هر دور ۲۳۶ میلی‌لیتر یا ۰/۲۵ حجم منفذی) و ۳ تکرار در شرایط آزمایشگاهی و با استفاده از ستون‌های خاک اجرا گردید. در پایان آزمایش، غلظت پتاسیم محلول در ستون‌های خاک اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که بیش‌ترین درصد آبشویی پتاسیم محلول خاک در بین خاک‌های تیمار شده با نمک، مربوط به خاک تیمار شده با کلرید کلسیم بود که تفاوت معنی‌داری با خاک تیمار شده با کلرید سدیم، سولفات کلسیم و خاک شاهد نشان داد. همچنین در میان محلول‌های آبشویی، کلرید پتاسیم نسبت به سولفات پتاسیم و آب مقطر اثر بیش‌تری بر کاهش غلظت پتاسیم محلول در خاک نشان داد. ضمن این‌که با افزایش حجم آبشویی، مقدار پتاسیم محلول در خاک به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافت. یافته‌های این پژوهش، اهمیت پرداختن بیش‌تر به نقش شوری، حجم آبشویی و کود پتاسیم مصرفی در خاک بر روی پتاسیم محلول را در جهت جلوگیری از هدررفت پتاسیم محلول برای گیاهان نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: شوری، کلرید کلسیم، سولفات کلسیم، محلول آبشویی

* مسئول مکاتبه: mansourmirzaei63@gmail.com

مقدمه

پتاسیم عنصری ضروری برای رشد گیاه و یک یون پویا در خاک می‌باشد (نجفی و همکاران ۲۰۱۰). پتاسیم فراوان‌ترین عنصر غذایی در ۱۵ سانتی‌متری بخش رویین خاک است ولی این در صورت لزوم به این معنی نیست که پتاسیم قابل دسترس‌ترین عنصر برای گیاه است (ملکوئی و همایی، ۲۰۰۳). پتاسیم در خاک به چهار شکل محلول در خاک، تبادل، تثبیت شده و در ساختار کانی‌های اولیه وجود دارد (هاولین و همکاران، ۲۰۰۵). پتاسیم محلول قابل دسترس‌ترین نوع پتاسیم برای گیاهان است (اسپارکس، ۲۰۰۰) که در تولید محصولات زراعی دارای اهمیت می‌باشد (اردلان و ثواقبی، ۲۰۰۱). گیاه، پتاسیم مورد نیاز خود را به صورت کاتیون پتاسیم (K^+) از محلول خاک دریافت می‌کند (ملکوئی و همایی، ۲۰۰۳).

فاکتورهای زیادی بر آبشویی مواد غذایی مؤثرند، در عین حال دارای اثرات متقابل پیچیده‌ای نیز هستند، اما زمان و شدت بارندگی یا آبیاری، نوع و مقدار کود مصرفی و پوشش گیاهی بر آبشویی مواد غذایی مؤثر است (بروش، ۱۹۹۵). پتاسیم یک یون متحرک در خاک بوده و مقادیر قابل‌توجهی از آن می‌تواند از طریق آبشویی هدر رود. با توجه به اهمیت پتاسیم در رشد و نمو گیاهان ضرورت جلوگیری از آبشویی آن بیش از پیش آشکار می‌گردد. هدررفت پتاسیم از طریق آبشویی به مقدار پتاسیم قابل دسترس خاک بستگی دارد، این مقدار به نوع خاک وابسته است اما شیمی خاک اهمیت کم‌تری نسبت به هیدرولوژی در کنترل دینامیک آبشویی آن دارد (آلفارو و همکاران، ۲۰۰۴). اگرچه در خاک‌ها کانی‌های غنی از پتاسیم وجود دارد که قادر به تأمین مقدار زیادی پتاسیم در خاک هستند، ولی این پتاسیم موجود در خاک‌ها در نتیجه افزایش هواپدگی و آبشویی یا کاربرد پتاسیم در سیستم‌های فشرده کشاورزی از خاک خارج می‌شود (تریبوس و همکاران، ۱۹۸۷). آبشویی پتاسیم باعث افزایش غلظت آن در آب‌های زیرزمینی می‌شود (جلالی، ۲۰۰۸). آبشویی مواد شیمیایی از خاک و انتقال آن‌ها به آب‌های زیرزمینی باعث آلودگی منابع آب می‌شود، همچنین آبشویی کودها و انتقال آن‌ها به خارج از منطقه ریشه باعث کاهش بازدهی کودها خواهد شد. بنابراین برآورد مقدار کمی و انبارش املاح در خاک در بسیاری از موارد مهم است (شعبانپور شهرستانی، ۲۰۰۲).

به‌علت افزایش نگرانی‌ها در مورد آلودگی آب‌های زیرزمینی از طریق آبشویی مواد شیمیایی به‌کار برده شده و مواد غذایی محلول، سرنوشت مواد محلول در خاک به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای مورد توجه قرار گرفته است (کلاهیچی و جلالی، ۲۰۰۷؛ جلالی و راول، ۲۰۰۹). یکی از عوامل مهم در آلودگی خاک جابه‌جایی مواد محلول می‌باشد که توجه زیادی را به خود جلب کرده است (کلاهیچی و جلالی،

۲۰۰۷). آبشویی پتاسیم و انتقال آن به آب‌های زیرزمینی سبب افزایش پتاسیم در این آب‌ها می‌شود و مقدار آن می‌تواند بیش‌تر از میزانی باشد که توسط سازمان بهداشت جهانی (WHO) (۱۲ میلی‌گرم در لیتر) توصیه شده است.

شوری و سدیمی بودن دو نگرانی عمده کیفیت آب آبیاری در نواحی خشک و نیمه‌خشک می‌باشد (آیارس و تنجی، ۱۹۹۹). در مناطق خشک و نیمه‌خشک، به‌طور اساسی آب آبیاری مناسب برای کشاورزی محدود است و آب زیرزمینی منبع اصلی آبیاری است. در این مناطق استفاده از آب زیرزمینی با کیفیت پایین (شامل غلظت بالایی از عناصری مانند کلسیم، منیزیم و سدیم) برای جبران تقاضای آب ضروری است (جلالی، ۲۰۰۸). آبیاری با آبی که محتوی غلظتی بالایی از Ca^{2+} ، Mg^{2+} و Na^{+} باشد باعث افزایش در واجدبی و آبشویی پتاسیم می‌شود (جلالی و مریخ‌پور، ۲۰۰۸). این پتاسیم ممکن است به آسانی برای ریشه گیاهان قابل دسترس باشد اما به آسانی نیز می‌تواند با آبشویی از منطقه ریشه خارج شود (کلاهچی و جلالی، ۲۰۰۷). وقتی که آبی با کیفیت پایین به‌کار برده می‌شود، تأثیر تبادل Ca^{2+} ، Mg^{2+} و Na^{+} در آزادسازی پتاسیم قابل تبادل و غیرقابل تبادل برای تعیین این‌که چه مقدار پتاسیم برای گیاه قابل جذب است و چه مقدار آبشویی می‌شود ضروری است (جلالی، ۲۰۰۸). کاربرد $CaCl_2$ برای احیای خاک‌های سدیمی در آبشویی پتاسیم از خاک سهم می‌باشد. آبشویی پتاسیم تحت شرایط مزرعه با ستون‌های خاک متفاوت است. در طی دوره‌های خشک، پتاسیم به‌کار برده شده در مزرعه ممکن است برای زمان‌های طولانی در منطقه ریشه نسبت به ستون‌های آزمایشگاهی باقی بماند که این امر به پتاسیم اجازه می‌دهد به داخل بخش‌های غیرتبادلی انتقال داده شود (جلالی و راول، ۲۰۰۳). پیش‌بینی حرکت پتاسیم به‌علت لازم بودن آن در ارتباط با کارایی استفاده از کود مهم است (جلالی و راول، ۲۰۰۳).

در مناطق خشک و نیمه‌خشک آبشویی پتاسیم با حضور کلسیت و سولفات کلسیم در خاک تسهیل می‌گردد. که Ca^{2+} حل شده از کلسیت و گچ، آبشویی پتاسیم را افزایش می‌دهد. این مواد معدنی به‌طور طبیعی در خاک‌ها یافت می‌شوند، یا ممکن است به‌عنوان اصلاح‌کننده برای بهبود خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌های شور و سدیمی در مناطق خشک و نیمه‌خشک اضافه شوند (اسپارکس و هوانگ، ۱۹۸۵؛ جلالی و راول، ۲۰۰۹). در این خاک‌ها آبیاری زیاد که نیاز آبشویی نامیده می‌شود، برای حفظ سطوح شوری کم مورد نیاز می‌باشد که منجر به افزایش تلفات K^{+} می‌گردد (جلالی و راول، ۲۰۰۳؛ جلالی و راول، ۲۰۰۹). فیگنبرگ (۱۹۸۶) گزارش کرد که با افزایش مقدار مخلوط

NaCl-CaCl₂ در ستون‌های خاک هدررفت پتاسیم در خاک افزایش یافت. نتایج پژوهش‌های جلالی و راول (۲۰۰۳) نشان داد که خاک تیمار شده با سولفات کلسیم وقتی با آب مقطر آبشویی شد ۶۴ درصد پتاسیم قابل تبادل اولیه را انتقال داد که معادل با آبشویی خاک شاهد به وسیله ۱۵ میلی‌مول CaCl₂ بود. همچنین آن‌ها گزارش کردند که میزان پتاسیم انتقال یافته از خاک تیمار شده با کلسیت ۳۲ درصد پتاسیم قابل تبادل اولیه بود و معادل با آبشویی خاک شاهد به وسیله ۱ میلی‌مول CaCl₂ بود. محلول‌های شور (راول، ۱۹۸۵) یا هوایدگی کانی‌های خاک (شاینبرگ و همکاران، ۱۹۸۱) منبع کلسیم برای جابه‌جایی با پتاسیم می‌باشد، به‌خصوص کانی‌هایی که شامل سولفات کلسیم و کلسیت هستند. وقتی که کودهای پتاسیمی در خاک به کار برده می‌شود، یون Ca²⁺ با K⁺ برای مکان‌های تبدالی رقابت می‌کند. میزان زیادی پتاسیم در اثر آبیاری با آب‌هایی با کیفیتی پایین (شامل غلظت‌های قابل توجهی از Na⁺، Mg²⁺ و Ca²⁺)، از خاک‌های زراعی آبشویی می‌شود (جلالی و همکاران، ۲۰۰۸؛ جلالی و راول، ۲۰۰۹). افزایش میزان حرکت K⁺ با افزایش غلظت Ca²⁺ به افزایش ظرفیت Ca²⁺ برای تبادل با K⁺ از مکان‌های تبدالی در محلول بستگی دارد (کلاهیچی و جلالی، ۲۰۰۷).

با توجه به آنچه که گفته شد و به دلیل اهمیت پتاسیم محلول برای گیاهان، اثرات شوری و آبشویی بر پتاسیم و تأثیر آن بر آلودگی آب‌های زیرزمینی، این پژوهش به بررسی میزان آبشویی پتاسیم محلول تحت تأثیر برخی نمک‌ها و تأثیر حجم و محلول‌های آبشویی بر پتاسیم محلول خاک می‌پردازد.

مواد و روش‌ها

نمونه‌برداری: خاک مورد مطالعه در این پژوهش، از مزرعه دانشگاه شهید باهنر کرمان با کاربری زراعی تهیه شد. نمونه‌برداری از عمق ۳۰-۰ سانتی‌متری سطح خاک از ۴ نقطه به فاصله ۱۰۰ متر از یکدیگر انجام شد. پس از انجام نمونه‌برداری، نمونه موردنظر هوا خشک شده و از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد و خاک ۴ نقطه با هم مخلوط و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آن تعیین شد (جدول ۱).

تیمارهای مورد مطالعه: آزمایش‌ها به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی انجام شد. تیمارهای مورد مطالعه شامل نمک با ۳ سطح شامل CaCl₂ - ۲H₂O (۲۰۰ میلی‌گرم کلسیم در کیلوگرم خاک)، NaCl (۲۳۰ میلی‌گرم سدیم در کیلوگرم خاک)، CaSO₄ - ۲H₂O (۲۰۰ میلی‌گرم کلسیم در کیلوگرم خاک) (کاتیون سدیم در کلرید سدیم و کاتیون کلسیم در گچ آبدار و کلرید کلسیم از نظر اکی‌والان مساوی انتخاب شدند، که این مقدار برابر ۱۰ میلی‌اکی‌والان بود)؛ آبشویی در

۳ سطح با محلول‌های KCl (۱۰۰ میلی‌گرم پتاسیم در لیتر)، K_2SO_4 (۱۰۰ میلی‌گرم پتاسیم در لیتر) و آب مقطر، آبخوبی در ۸ دور (هر دور آبیاری شامل ۰/۲۵ حجم منفذی^۱ (PV) یا ۲۳۶ میلی‌لیتر) در ۳ تکرار انجام شد.

اعمال تیمارها: برای انجام آزمایش ستون‌هایی از جنس پلی‌وینیل‌کلراید (PVC) به قطر داخلی ۱۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۲۵ سانتی‌متر تهیه شد. مقدار نمک‌های $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ و NaCl، $CaCl_2 \cdot 2H_2O$ برای هر ستون خاک محاسبه و کاملاً با خاک مخلوط شد. مقدار خاک با توجه به حجم ستون خاک (سطح مقطع \times ارتفاع ستون خاک (۲۰ سانتی‌متر)) و جرم مخصوص ظاهری (۱/۳۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب) محاسبه شد. سپس این میزان خاک در چند مرحله (لایه) به ستون‌ها اضافه شد و در هر مرحله ضربات ملایم و یکسان به ستون‌ها وارد می‌شد تا مقدار خاک داخل ستون به ارتفاع موردنظر (۲۰ سانتی‌متر) برسد. ستون‌های خاک شامل ۱۰۸ ستون بود که از این تعداد ۲۷ ستون تیمار $CaCl_2 \cdot 2H_2O$ ، ۲۷ ستون تیمار $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ، ۲۷ ستون تیمار NaCl و ۲۷ ستون بدون تیمار به‌عنوان تیمار شاهد در نظر گرفته شد. بعد از آماده‌سازی ستون‌های خاک، مرحله انکوباسیون به مدت ۴۵ روز در رطوبت FC و دمای 25 ± 5 سانتی‌گراد انجام شد. در طول این دوره در صورت نیاز آب مقطر به نمونه‌ها اضافه می‌گردید تا رطوبت در حد ظرفیت زراعی باقی بماند. در طی مراحل انکوباسیون دهانه ستون‌های خاک با نایلون پوشیده شد تا از تبخیر جلوگیری شود. بعد از مرحله انکوباسیون، ستون‌ها در رطوبت FC آبخوبی شدند. یعنی در مرحله اول آبخوبی، رطوبت ستون‌های خاک در حد FC بود که در مراحل بعد به‌علت جلوگیری از تبخیر از سطح (برای جلوگیری از تبخیر، دهانه ستون‌ها با نایلون پوشیده شد) این رطوبت بیش‌تر از رطوبت FC بود، که در دور آبیاری سوم و هشتم به حالت بالا اشباع بوده که زه‌آب از ستون خاک بدون نیاز به مکش خارج شده است. در این مرحله، آبخوبی با آب مقطر و دو محلول KCl و K_2SO_4 صورت گرفت. مراحل آبخوبی شامل ۸ مرحله و فواصل بین آبخوبی‌ها ۵ روز بود. اساس آبخوبی بر مبنای PV بود، هر PV برابر ۹۴۴ میلی‌لیتر محاسبه شد. برای به‌دست آوردن PV، حجم ستون خاک در کل تخلخل خاک ضرب شد (جلالی و راول، ۲۰۰۳). از نظر آبخوبی، ستون‌ها به ۳ دسته ۳۶ تایی تقسیم می‌شدند که ۳۶ ستون یک مرحله (۲۳۶ میلی‌لیتر)، ۳۶ ستون سه مرحله (۷۰۸ میلی‌لیتر) و ۳۶ ستون ۸ مرحله (۱۸۸۸ میلی‌لیتر) آبخوبی شدند.

1- Pore Volume

تعیین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی: بعد از هوا خشک شدن کامل، خاک‌ها کوبیده و از الک ۲ میلی‌متر عبور داده شد. پس از انجام این مرحله ۱۰۸ نمونه خاک (از هر ستون یک نمونه از عمق ۰-۲۰ سانتی‌متر) برای آنالیزهای فیزیکی و شیمیایی به آزمایشگاه انتقال داده شد. نمونه‌های خاک از مراحل اول، سوم و هشتم آبیاری بودند. ویژگی‌های فیزیکی شامل، بافت به روش هیدرومتری اندازه‌گیری شد (پیچ و همکاران، ۱۹۹۲a). همچنین، ویژگی‌های شیمیایی شامل: کاتیون‌های سدیم، پتاسیم، کلسیم و منیزیم محلول با استفاده از عصاره‌گیر آب مقطر (نسبت ۱:۵ خاک به آب) عصاره‌گیری و در ادامه غلظت سدیم و پتاسیم با استفاده از فلیم‌فوتومتر و کلسیم و منیزیم از طریق تیتراسیون قرائت شد (پیچ و همکاران، ۱۹۹۲b). میزان pH با دستگاه pH سنج، EC با EC سنج، آهک به روش تیتراسیون و سولفات کلسیم به روش استون اندازه‌گیری شد (پانسو و گاتیرو، ۲۰۰۶). آنالیز داده‌ها و محاسبه‌های انجام شده در مطالعه: در این مطالعه به‌منظور بررسی تغییرات پتاسیم محلول شاخص‌های زیر محاسبه گردید:

درصد تغییر نسبی (RCP) پتاسیم محلول در خاک تیمار شده با نمک نسبت به خاک شاهد

$$RCP_{\text{Salt}} = \frac{(K_T - K_C)}{K_C} \times 100 \quad (1)$$

که در آن، RCP_{Salt} : درصد تغییر نسبی پتاسیم محلول نسبت به شاهد (خاک شاهد)، K_T : میزان پتاسیم محلول در خاک تیمار شده با نمک (کلرید کلسیم، کلرید سدیم و سولفات کلسیم) بر حسب میلی‌گرم بر کیلوگرم و K_C : میزان پتاسیم محلول در خاک شاهد بر حسب میلی‌گرم بر کیلوگرم می‌باشد.

درصد تغییر نسبی پتاسیم در خاک آبتوی شده با کلرید و سولفات پتاسیم نسبت به آب مقطر

$$RCP_{\text{Solution}} = \frac{(K_S - K_W)}{K_W} \times 100 \quad (2)$$

که در آن، RCP_{Solution} : درصد تغییر نسبی نسبت به شاهد (آب مقطر)، K_S : میزان پتاسیم محلول در خاک آبتوی شده با KCl و K_2SO_4 بر حسب میلی‌گرم بر کیلوگرم و K_W : میزان پتاسیم محلول در خاک آبتوی شده با آب مقطر بر حسب میلی‌گرم بر کیلوگرم می‌باشد.

درصد آبشویی پتاسیم (PLP)^۱ از خاک

$$PLP = \frac{(K_S + K_T) - K_M}{(K_S + K_T)} \times 100 \quad (3)$$

که در آن، PLP: درصد پتاسیم آبشویی شده، K_S : پتاسیم اولیه خاک بر حسب میلی گرم بر کیلوگرم، K_T : مقدار پتاسیم محلول در خاک در تیمارهای کلرید پتاسیم یا سولفات پتاسیم بر حسب میلی گرم بر کیلوگرم و K_M : غلظت پتاسیم محلول اندازه گیری شده در خاک بعد از آبشویی بر حسب میلی گرم بر کیلوگرم می باشد.

در نهایت داده ها با استفاده از نرم افزار SAS به صورت فاکتوریل در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفت و رسم نمودارها با Excel انجام شد. مقایسه میانگین داده ها نیز از طریق آزمون دانکن در سطح آماری ۵ درصد انجام گردید.

نتایج و بحث

جدول ۱ ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه را نشان می دهد. اعداد جدول ۱ از عصاره ۱:۵ (خاک به آب) به دست آمده است. با توجه به درصد رس، سیلت و شن بافت خاک لومرسی تعیین شد. کربنات محلول در خاک وجود نداشت. درصد تخلخل و جرم مخصوص ظاهری خاک داخل ستون به ترتیب ۴۸ درصد و ۱/۳۵ گرم بر سانتی متر مکعب بود. از بین کاتیون های محلول کلسیم بیشترین و منیزیم کمترین مقدار بود. pH خاک، خنثی تا کمی قلیایی و هدایت الکتریکی با توجه به این که در عصاره ۱:۵ به دست آمده است (جلالی و راول ۲۰۰۹؛ لویز و همکاران، ۲۰۰۷) میزان قابل توجهی دارد. میزان کربن آلی نیز از یک درصد کم تر است که در بیش تر خاک های ایران طبیعی است.

1- Potassium Leaching Percent

نشریه مدیریت خاک و تولید پایدار جلد (۴)، شماره (۲) ۱۳۹۳

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه.

ویژگی	مقدار	ویژگی	مقدار
سدیم محلول (میلی‌اکی‌والان بر لیتر)	۸/۷۵	گچ (درصد)	۲۷
پتاسیم محلول (میلی‌اکی‌والان بر لیتر)	۰/۰۹	pH	۷/۶۶
کلسیم محلول (میلی‌اکی‌والان بر لیتر)	۳۲	EC (دسی‌زیمنس بر متر)	۲/۵
منیزیم محلول (میلی‌اکی‌والان بر لیتر)	۲	جرم مخصوص ظاهری (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	۱/۳۵
کلر (میلی‌اکی‌والان بر لیتر)	۸	تخلخل (درصد)	۴۸
بیکربنات (میلی‌اکی‌والان بر لیتر)	۷/۵	شن (درصد)	۳۵
کربن آلی (درصد)	۰/۳۵	سیلت (درصد)	۲۷
کربنات کلسیم معادل (درصد)	۱۳/۷۵	رس (درصد)	۳۸

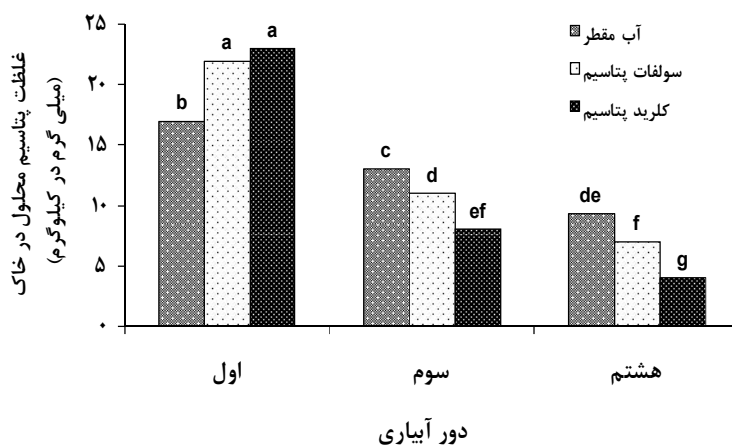
جدول ۲ نتایج تجزیه واریانس پتاسیم محلول خاک و درصد پتاسیم آبشویی شده از خاک را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود محلول آبشویی، حجم آبشویی و نمک تأثیر معنی‌داری (در سطح ۱ درصد) بر غلظت پتاسیم محلول خاک و درصد پتاسیم آبشویی شده در عمق ۰-۲۰ سانتی‌متر داشته‌اند. اثرات متقابل دوگانه به‌جز اثر دوگانه محلول \times نمک بر غلظت پتاسیم محلول و درصد آبشویی پتاسیم خاک تأثیر داشته و باعث معنی‌دار شدن (در سطح ۱ درصد) این پارامتر شده‌اند. ضمن این‌که اثر سه‌گانه تیمارها بر غلظت پتاسیم محلول و درصد آبشویی پتاسیم معنی‌دار نبود.

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس پتاسیم محلول خاک و درصد پتاسیم آبشویی شده از خاک (اعداد جدول میانگین مربعات (MS) را نشان می‌دهد).

منبع تغییرات	درجه آزادی	پتاسیم محلول در خاک	درصد پتاسیم آبشویی شده
محلول آبشویی (A)	۲	۲۰۹/۸۴**	۳۱۶۹۵/۴۵**
حجم آبشویی (B)	۲	۴۹۱۵/۹۸**	۱۶۵۵۹۵/۶۳**
نمک (C)	۳	۵۹۸/۵۹**	۹۶۷۹/۶۳**
A \times B	۴	۲۸۱/۱۲**	۸۷۱۶/۳۱**
A \times C	۶	۶/۱۴ ^{ns}	۷۸۹/۴۹ ^{ns}
B \times C	۶	۲۲۱/۹۹**	۴۱۴۳/۷۴**
A \times B \times C	۸	۴/۱۹ ^{ns}	۲۶۰/۸۹ ^{ns}
خطا	۲۸۸	۱۷/۵۲	۴۷۳/۹۰
ضریب تغییرات	-	۳۴/۲۸	۵۴/۰۵

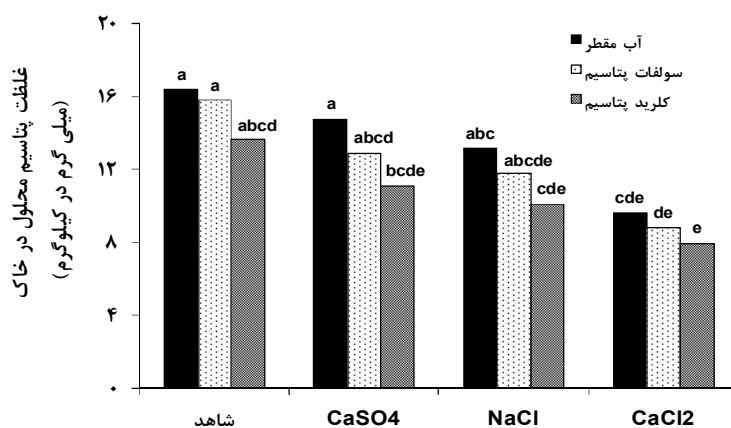
** معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد و ^{ns} غیرمعنی‌دار.

شکل ۱ اثر محلول و دور آبیاری را بر غلظت پتاسیم محلول در خاک را نشان می‌دهد. با افزایش دور آبیاری، پتاسیم محلول کاهش یافته است. بدیهی است که آیشویی بیش‌تر باعث خروج بیش‌تر املاح محلول از خاک شده و هدررفت پتاسیم محلول در حجم آیشویی بالا می‌تواند ناشی از این علت باشد. بیش‌ترین غلظت پتاسیم محلول در دور آبیاری اول و محلول آیشویی کلرید پتاسیم مشاهده می‌شود، البته تفاوت معنی‌داری با محلول آیشویی سولفات پتاسیم در دور اول آبیاری ندارد. در دور آبیاری‌های سوم و هشتم بر عکس دور آبیاری اول به‌ترتیب بیش‌ترین و کم‌ترین غلظت پتاسیم محلول مربوط به آب مقطر و کلرید پتاسیم است. زیرا کلرید پتاسیم حلالیت بیش‌تری نسبت به سولفات پتاسیم دارد و آیشویی آن با خروج بیش‌تری از پتاسیم محلول همراه است. همچنین، هاولین و همکاران (۲۰۰۵) گزارش کردند که محلول آیشویی کلرید پتاسیم، بیش‌تر از سولفات پتاسیم باعث آیشویی پتاسیم می‌شود و منبع سولفات نسبت به کلرید پتاسیم آنیون جذبی بیش‌تری را برای مکان‌های تبدلی مثبت نشان می‌دهد، بنابراین، در محلول‌هایی با آنیون کم‌تر برای آیشویی، پتاسیم کم‌تری شسته می‌شود. از سوی دیگر، حلالیت زیاد کلرید پتاسیم نسبت به سولفات پتاسیم سبب فراوان شدن کلرید نسبت به سولفات در محلول خاک شده است. از طرفی، آب مقطر احتمالاً به‌دلیل نبود آنیون کلرید، که خروج آن از محلول خاک باعث خروج کاتیون می‌شود (که این امر می‌تواند به‌دلیل ایجاد تعادل بار در محلول خاک باشد) و همچنین نبود آنیون سولفات، باعث شده تا غلظت پتاسیم در آب مقطر نسبت به محلول کلرید و سولفات پتاسیم بیش‌تر باشد. هاولین و همکاران (۲۰۰۵) گزارش کردند که در مقایسه با کلرید پتاسیم منبع سولفات آنیون جذبی بیش‌تری را برای مکان‌های تبدلی مثبت نشان می‌دهد، بنابراین در محلول‌هایی با آنیون کم‌تر برای آیشویی، پتاسیم کم‌تری شسته می‌شود و در یک حجم مساوی از محلول‌های آیشویی کلرید پتاسیم و سولفات پتاسیم، درصد آیشویی پتاسیم در محلول کلرید پتاسیم به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای بیش‌تر از محلول سولفات پتاسیم است.



شکل ۱- اثر دور آبیاری و محلول آبشویی مختلف بر غلظت پتاسیم محلول در خاک (مقایسه میانگین دانکن در سطح ۵ درصد انجام شد).

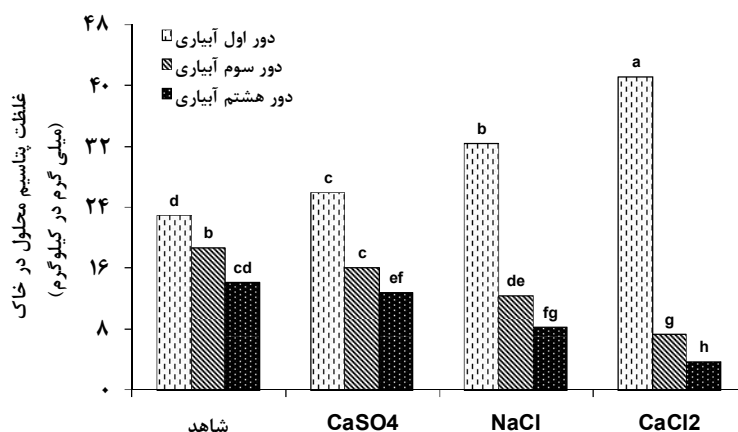
تأثیر دوگانه تیمارهای نمک و محلول آبشویی بر پتاسیم محلول خاک در شکل ۲ بیانگر اثر خاک تیمار شده با کلرید کلسیم بر کاهش غلظت پتاسیم محلول است. تفاوت معنی داری بین خاک تیمار شده با کلرید کلسیم و خاک شاهد وجود دارد. غلظت پایین پتاسیم محلول در خاک تیمار شده با کلرید کلسیم نسبت به دیگر تیمارها می تواند ناشی از حلالیت زیاد و وجود دو یون کلسیم و کلر در ترکیب کلرید کلسیم باشد. کلسیم یک کاتیون دو ظرفیتی است که تمایل زیادی به جذب روی سطوح منفی دارد و پتاسیم به علت ظرفیت پایین تر شانس کمتری برای جذب روی این سطوح دارد و در محلول خاک مستعد آبشویی می گردد. همچنین کلاهچی و جلالی (۲۰۰۷) گزارش کردند که کاربرد کلرید کلسیم در اصلاح خاک های سدیمی باعث آبشویی پتاسیم از خاک می شود. غلظت پتاسیم محلول در خاک تیمار شده با کلرید سدیم و سولفات کلسیم کم تر از خاک شاهد بود، هر چند که این دو تیمار تفاوت معنی داری با شاهد نداشتند. البته تیمار کلرید کلسیم و کلرید سدیم نیز تفاوت معنی داری با هم نشان ندادند. در همه تیمارهای نمک، محلول آبشویی کلرید پتاسیم کم ترین و آب مقطر بیش ترین مقدار غلظت پتاسیم را نشان داد، با این حال در یک تیمار نمک مشخص بین محلول های آبشویی تفاوت معنی داری مشاهده نمی شود.



شکل ۲- اثر محلول‌های آبشویی مختلف و کاربرد تیمارهای نمک بر غلظت پتاسیم محلول در خاک (مقایسه میانگین دانکن در سطح ۵ درصد انجام شد).

اثر دور آبیاری و تیمارهای نمک بر پتاسیم محلول خاک در شکل ۳ نشان داده شده است. بیش‌ترین تأثیر در کاهش پتاسیم محلول در تیمار کلرید کلسیم و دور آبیاری هشتم مشاهده شد و در خاک‌های تیمار شده با نمک و خاک شاهد دور آبیاری اول بیش‌ترین و دور آبیاری هشتم کم‌ترین غلظت پتاسیم محلول را نشان داد. در بین خاک‌های تیمار شده با نمک و خاک شاهد تفاوت معنی‌داری بین دور آبیاری اول مشاهده نمی‌شود هر چند که بیش‌ترین مقدار مربوط به خاک تیمار شده با کلرید کلسیم و کم‌ترین مقدار مربوط به خاک شاهد است. دلیل نبود تفاوت معنی‌دار بین این تیمارها در دور آبیاری اول این است که هنوز آبشویی به خارج از ستون خاک صورت نگرفته، البته داخل ستون خاک آبشویی انجام شده است و ممکن است پتاسیم محلول از سطح به عمق منتقل شده باشد اما پتاسیمی از خاک خارج نشده و به عبارت دیگر زه‌آب ایجاد نشده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش حجم آبشویی در خاک‌های تیمار شده با نمک و خاک شاهد غلظت پتاسیم محلول کاهش یافته است. اولیویرا و همکاران (۲۰۰۲) نیز گزارش کردند که با افزایش حجم آبشویی غلظت پتاسیم محلول کاهش یافته است. پس می‌توان نتیجه گرفت که هرچه حجم آبشویی بیش‌تر باشد، هدررفت و آبشویی پتاسیم محلول بیش‌تر می‌شود. هم‌چنین در یک نمک معین کلرید کلسیم کم‌ترین غلظت پتاسیم محلول را نشان می‌دهد (شکل ۳). کلرید کلسیم به دلیل حلالیت بالا و وجود کاتیون

دو ظرفیتی کلسیم باعث آبشویی بیش تر پتاسیم محلول نسبت به دیگر تیمارها شده است. انتقال آنیون‌ها در خاک بیش تر از کاتیون‌هاست و هرچه اندازه یون کوچک تر باشد انتقال آن بیش تر است بنابراین، کلر با توجه به این که کوچک ترین آنیون خاک نیز محسوب می شود میل به آبشویی زیادی دارد. از طرفی، محلول از نظر بار الکتریکی باید خنثی باشد. بر این اساس برای برقراری تعادل بار در محلول خاک، باید به ازای هر آنیون، کاتیونی هم ظرفیت خارج شود. پتاسیم کوچک ترین کاتیون خاک و هم ظرفیت کلر است. ضمن این که کلسیم تمایل زیادی به جذب روی سطوح منفی دارد و پتاسیم به علت ظرفیت پایین تر شانس کمتری برای جذب روی این سطوح دارد و در محلول خاک مستعد آبشویی می گردد. در ظاهر آن دسته از آنیون‌هایی که با کلسیم تولید نمک‌های محلول می کنند سبب جانسختی بیش تر کلسیم به جای پتاسیم گردیده و در نتیجه حرکت پتاسیم را افزایش می دهند (ملکوئی و همایی، ۲۰۰۳). رحمت‌اله و همکاران (۱۹۹۴) گزارش کردند که کاتیون‌های دو ظرفیتی نسبت به کاتیون‌های تک ظرفیتی محکم تر نگه داشته می شوند، بنابراین افزایش مقدار Mg^{2+} و Ca^{2+} در محلول نسبت به Na^{+} پتاسیم بیش تری را آزاد می کند. یافته‌های جانستون و گلدینگ (۱۹۹۰) نیز نشان داد که در اثر هر ۱۰۰ میلی لیتر بارندگی تقریباً ۱ کیلوگرم پتاسیم از خاک آبشویی می شود، اما این مقدار در صورتی که پتاسیم توسط محلول‌های با غلظت بالای یون‌های کلسیم جانسختین شود ممکن است بیش تر باشد.



شکل ۳- اثر تیمارهای نمک و دور آبیاری بر غلظت پتاسیم محلول در خاک (مقایسه میانگین دانکن در سطح ۵ درصد انجام شد).

درصد تغییر نسبی پتاسیم محلول خاک تیمار شده با نمک نسبت به خاک شاهد در حجم آبتشویی‌های مختلف و محلول‌های آبتشویی مختلف در جدول ۳ نشان داده شده است. اعداد جدول ۳ از رابطه ۱ به دست آمده‌اند. در دور آبیاری‌های اول، سوم و هشتم به ترتیب خاک تیمار شده با کلرید کلسیم، کلرید سدیم و سولفات کلسیم بیش‌ترین اختلاف غلظت پتاسیم را با خاک شاهد نشان داده‌اند، با این تفاوت که در دور اول آبیاری این درصد اختلاف، مثبت و در دور آبیاری‌های سوم و هشتم، منفی است. درصد مثبت به منزله بیش‌تر بودن غلظت پتاسیم محلول در خاک تیمار شده با نمک نسبت به خاک شاهد است و همان‌طور که گفته شد این حالت فقط در دور آبیاری اول اتفاق افتاده است که به علت خارج نشدن محلول از کف ستون و یا به عبارتی، ایجاد نشدن زه‌آب است که ناشی از حجم کم محلول آبتشویی بوده است. پس، غلظت پتاسیم محلول در خاک‌های تیمار شده با نمک نسبت به خاک شاهد بیش‌تر بوده است چون پتاسیم بیش‌تری در اثر تبادل پتاسیم با کاتیون‌های کلسیم و سدیم در خاک‌های تیمار شده با نمک وارد محلول خاک شده است و باعث شده است تا غلظت پتاسیم در خاک تیمار شده با نمک نسبت به خاک شاهد بیش‌تر باشد. اما منفی بودن اعداد نشان می‌دهد که غلظت پتاسیم محلول در خاک تیمار شده با نمک نسبت به خاک شاهد کم‌تر است. درصد منفی در دور آبیاری‌های سوم و هشتم ایجاد شده است که ناشی از حجم زیاد محلول آبتشویی و خروج بیش‌تر پتاسیم از ستون خاک به دلیل وجود آنیون‌های کلر و سولفات که در خاک‌های تیمار شده با نمک بیش‌تر از خاک شاهد است. همچنین در محلول‌های آبتشویی آب مقطر، سولفات پتاسیم و کلرید پتاسیم بیش‌ترین اختلاف غلظت پتاسیم محلول نسبت به خاک شاهد در خاک تیمار شده با کلرید کلسیم و آبتشویی شده با کلرید پتاسیم مشاهده شد و کم‌ترین اختلاف غلظت پتاسیم محلول با خاک شاهد مربوط به خاک تیمار شده با سولفات کلسیم و آبتشویی شده با آب مقطر بود.

جدول ۳- درصد نسبی تغییر پتاسیم محلول خاک تیمار شده با نمک نسبت به خاک شاهد.

		CaSO ₄	NaCl	CaCl ₂
	۰/۲۵	۰/۷۹	۵/۶۶	۶/۰۳
حجم آبتشویی (PV)	۰/۷۵	-۱۷/۳۰	-۳۶/۳۸	-۷۰/۷۸
	۲	-۳۹/۴۲	-۵۳/۵۳	-۸۴/۳۷
	آب مقطر	-۹/۸۱	-۱۹/۵	-۴۱/۲۶
محلول آبتشویی	سولفات پتاسیم	-۱۸/۴۵	-۲۵/۲۰	-۴۴/۱۶
	کلرید پتاسیم	-۱۸/۷۷	-۲۵/۷۹	-۴۱/۶۴

درصد تغییر نسبی پتاسیم محلول خاک آبخویی شده با محلول‌های KCl و K_2SO_4 نسبت به خاک آبخویی شده با آب مقطر در حجم آبخویی‌های مختلف و تیمارهای نمک در جدول ۴ نشان داده شده است. اعداد جدول ۴ از رابطه ۲ به دست آمده‌اند. در خاک آبخویی شده با KCl بیش‌ترین اختلاف غلظت پتاسیم محلول نسبت به آب مقطر (شاهد) در حجم آبخویی‌های مختلف مربوط به دور هشتم آبیاری و محلول آبخویی کلرید پتاسیم است. البته برای دور اول آبیاری این اختلاف غلظت مثبت است و نشان می‌دهد که در این حجم آبخویی غلظت پتاسیم محلول در خاک آبخویی شده با آب مقطر نسبت به دیگر محلول‌های آبخویی کم‌تر بوده است.

جدول ۴- درصد نسبی تغییر پتاسیم محلول خاک آبخویی شده با KCl و K_2SO_4 نسبت به خاک آبخویی شده با آب مقطر.

	اول	سوم	هشتم	شاهد	CaSO ₄	NaCl	CaCl ₂
	دور آبیاری						
K ₂ SO ₄	۱۷/۲۱	-۲۱/۰۳	-۳۷/۷	-۳/۵۳	-۱۲/۷۷	-۱۰/۳۷	-۸/۳۰
KCl	۲۰/۳۰	-۴۴/۵۵	-۶۲/۷	-۱۶/۵۸	-۲۴/۸۶	-۲۳/۰۹	-۱۷/۱۱

به دلیل حلالیت بیش‌تر محلول KCl نسبت به محلول K_2SO_4 (لوپز و همکاران، ۲۰۰۷؛ هاو لین و همکاران، ۲۰۰۵) و به دنبال آن آبخویی بیش‌تر سبب شده تا خاک آبخویی شده با محلول KCl، درصد اختلاف غلظت پتاسیم محلول بیش‌تری را در مقایسه با خاک آبخویی شده با K_2SO_4 نسبت به آب مقطر در تیمارهای مختلف نشان دهد. توضیحات و دلایل کافی در شکل‌های ۱، ۲ و ۳ ارائه شده است.

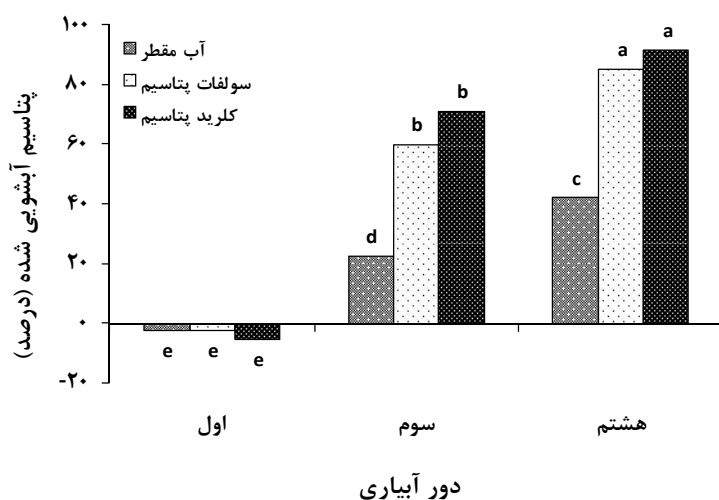
اثرات سه‌گانه محلول آبخویی، حجم آبخویی و تیمارهای نمک بر غلظت پتاسیم محلول خاک در جدول ۵ نشان داده شده است. با نگاهی به جدول ۵ مشاهده می‌شود که خاک تیمار شده با کلرید کلسیم که با ۸ دور آبیاری و محلول کلرید پتاسیم آبخویی شده کم‌ترین غلظت پتاسیم محلول (۰/۴۶ میلی‌اکی‌والان بر کیلوگرم) را نشان می‌دهد. میانگین غلظت پتاسیم محلول برای محلول آبخویی کلرید پتاسیم کم‌ترین مقدار را نشان می‌دهد. در خاک‌های تیمار شده با نمک نیز به ترتیب کم‌ترین غلظت پتاسیم محلول در کلرید کلسیم، کلرید سدیم و سولفات کلسیم مشاهده می‌شود و بیش‌ترین غلظت مربوط به خاک شاهد است.

جدول ۵- اثرات سه گانه محلول آبشویی، دور آبیاری و تیمارهای نمک بر غلظت پتاسیم محلول در خاک (اعداد بر حسب میلی گرم بر کیلوگرم خاک است).

میانگین	خاک شاهد	تیمارهای نمک			دور آبیاری	محلول آبشویی
		CaSO ₄	NaCl	CaCl ₂		
۱۷/۴۹	۱۷/۰۷	۱۷/۱۶	۱۷/۵۹	۱۸/۱۳	اول	آب مقطر
۱۳/۲۳	۱۷/۵۳	۱۵/۸۱	۱۲/۸۲	۶/۷۴	سوم	
۹/۸۵	۱۴/۶۵	۱۱/۴۶	۹/۲۴	۴/۰۶	هشتم	
۱۳/۵۲	۱۶/۴۱	۱۴/۸۱	۱۳/۲۱	۹/۶۴	-	میانگین
۲۰/۵۰	۱۹/۸۸	۲۰/۲۶	۲۰/۸	۲۱/۰۶	اول	سولفات پتاسیم
۱۰/۴۴	۱۵/۱۶	۱۲/۴۴	۹/۶۸	۴/۴۷	سوم	
۶/۱۴	۱۲/۴۴	۶/۰۵	۵/۰۶	۱/۰۱	هشتم	
۱۲/۳۶	۱۵/۸۲	۱۲/۹۲	۱۱/۸۴	۸/۸۵	-	میانگین
۲۱/۰۴	۲۰/۳	۲۰/۲۸	۲۲/۰۸	۲۱/۵۱	اول	کلرید پتاسیم
۷/۵۲	۱۲/۵۸	۹/۱۹	۶/۳	۲/۰۲	سوم	
۳/۶۷	۸/۲۱	۳/۹۱	۲/۱۱	۰/۴۶	هشتم	
۱۰/۷۴	۱۳/۷۰	۱۱/۱۲	۱۰/۱۶	۷/۹۹	-	میانگین

درصد پتاسیم آبشویی شده از خاک در اثر حجم و محلول‌های آبشویی مختلف در شکل ۴ نشان داده شده است. بیشترین درصد آبشویی مربوط به دور آبیاری هشتم و محلول آبشویی کلرید پتاسیم است. آبشویی پتاسیم از ستون خاک فقط در دور آبیاری‌های سوم و هشتم صورت گرفته است. در دور آبیاری اول نه تنها آبشویی صورت نگرفته، بلکه درصد پتاسیم در خاک نیز زیاد شده است و کلرید پتاسیم سهم بیش‌تری برای افزایش درصد پتاسیم داشته است هر چند که تفاوت معنی‌داری با سولفات پتاسیم و آب مقطر ندارد. این افزایش غلظت در دور اول آبیاری می‌تواند ناشی از حرکت پتاسیم از فاز تبادل به فاز محلول باشد. همان‌طور که گفته شد آبشویی ستون‌های خاک بعد از مرحله انکوباسیون انجام شده و رطوبت خاک قبل از مرحله آبشویی در حد ظرفیت زراعی (FC) بوده است، بنابراین برای تولید زه‌آب و خروج محلول‌های آبشویی از ستون خاک اولاً رطوبت باید به حد اشباع برسد و تمام خلل و فرج از محلول‌های آبشویی پر شود و بعد از این رطوبت است که آب مقطر یا محلول می‌تواند از ستون خاک خارج شود و تولید زه‌آب کند. دور اول آبیاری برای اشباع خاک کافی نبوده است و در آستانه اشباع بوده است.

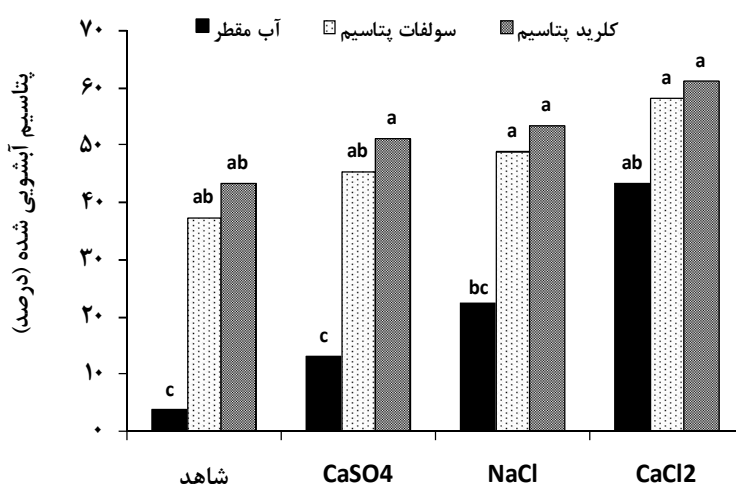
شکل ۱ و ۴ مربوط به اثر حجم آبخویی و محلول‌های آبخویی مختلف بر غلظت پتاسیم است با این تفاوت که شکل ۱ غلظت پتاسیم محلول را در خاک نشان می‌دهد و شکل ۴ غلظت پتاسیم آبخویی شده از خاک و یا به عبارتی درصد آبخویی پتاسیم محلول را نشان می‌دهد. نکته قابل توجه در این دو شکل این است که همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده شد در دور آبیاری‌های سوم و هشتم، بین محلول کلرید پتاسیم و سولفات پتاسیم اختلاف معنی‌داری وجود دارد ولی در شکل ۴ این اختلاف‌ها معنی‌دار نیست. ولی با این حال کلرید پتاسیم آبخویی بیشتری را نسبت به سولفات پتاسیم در دور آبیاری‌های سوم و هشتم نشان می‌دهد. ضمن این‌که این دو محلول تفاوت کاملاً معنی‌داری را با آب مقطر نشان می‌دهند، دلایل در شکل ۱ ذکر شد.



شکل ۴- اثر دور آبیاری و محلول‌های آبخویی مختلف بر غلظت پتاسیم آبخویی شده از خاک (مقایسه میانگین دانکن در سطح ۵ درصد انجام شد).

اثر محلول‌های آبخویی مختلف و تیمارهای نمک بر غلظت پتاسیم آبخویی شده از خاک در شکل ۵ نشان داده شده است. بیش‌ترین و کم‌ترین درصد آبخویی پتاسیم محلول به ترتیب در خاک تیمار شده با کلرید کلسیم و خاک شاهد مشاهده شد. ولی در مجموع تفاوت معنی‌داری بین تیمارها مشاهده نشد. محلول کلرید پتاسیم نیز به دلیل حلالیت بیشتر درصد آبخویی بیشتری را نسبت به سولفات

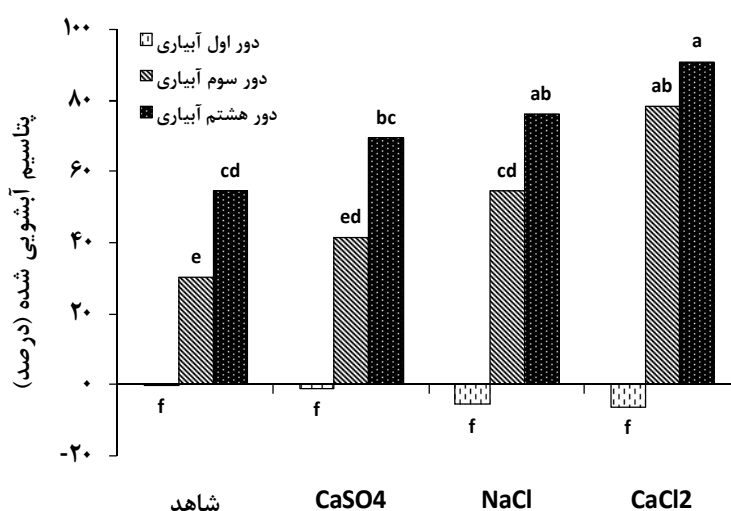
پتاسیم و آب مقطر نشان داد. محلول‌های آبشویی کلرید و سولفات پتاسیم در همه خاک‌های تیمار شده با نمک و خاک شاهد تفاوت معنی‌داری با هم نداشتند، اما، آب مقطر به‌جز در مورد خاک تیمار شده با کلرید کلسیم در بقیه تیمارها با محلول آبشویی کلرید و سولفات پتاسیم تفاوت معنی‌داری نشان داد.



شکل ۵- اثر محلول‌های آبشویی مختلف و کاربرد تیمارهای نمک بر غلظت پتاسیم آبشویی شده از خاک (مقایسه میانگین دانکن در سطح ۵ درصد انجام شد).

شکل ۶ اثر دور آبیاری و تیمارهای نمک را بر غلظت پتاسیم آبشویی شده از خاک نشان می‌دهد. در بین تیمارهای نمک در دور آبیاری‌های سوم و هشتم تیمار کلرید کلسیم بیش‌ترین درصد آبشویی را به خود اختصاص داده است. همچنین با افزایش حجم آبشویی درصد آبشویی پتاسیم محلول افزایش یافته است و در دور اول آبیاری به دلایلی که قبلاً ذکر شد، نه تنها آبشویی پتاسیم محلول صورت نگرفته بلکه مقدار اندکی پتاسیم نیز به خاک اضافه شده است. بین تیمار کلرید سدیم و سولفات کلسیم نیز تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد. اگرچه کلرید سدیم حلالیت بیش‌تری نسبت به سولفات کلسیم دارد اما احتمالاً وجود کاتیون دوزوفیتی کلسیم در ترکیب سولفات کلسیم سبب شده تا تفاوت معنی‌داری بین کلرید سدیم و سولفات کلسیم مشاهده نشود. ولی درصد آبشویی پتاسیم

محلول در خاک تیمار شده با کلرید سدیم نسبت به خاک تیمار شده با سولفات کلسیم بیش‌تر بود یعنی کلرید سدیم درصد بیش‌تری پتاسیم محلول را از خاک آیشویی کرده است. این می‌تواند به دلیل آنیون همراه با کاتیون باشد. آنیون کلرید (Cl^-) نسبت به آنیون سولفات (SO_4^{2-}) در ترکیب با کلسیم تولید نمک محلول‌تری می‌کند. آنیون‌های هالید از جمله کلر پتانسیل یونی بالایی دارند و کاملاً محلول هستند و در اثر آیشویی از خاک خارج می‌شوند (دارمودی و همکاران، ۱۹۸۳)، پس حلالیت پایین سولفات کلسیم متأثر از وجود سولفات در ترکیب آن است.



شکل ۶- اثر دور آبیاری و تیمارهای نمک بر درصد پتاسیم آیشویی شده از خاک (مقایسه میانگین دانکن در سطح ۵ درصد انجام شد).

اثرات سه‌گانه محلول آیشویی، دور آبیاری و تیمارهای نمک بر درصد پتاسیم آیشویی شده از خاک در جدول ۶ نشان داده شده است. خاک تیمار شده با کلرید کلسیم که با ۸ دور آبیاری و محلول کلرید پتاسیم آیشویی شده بیش‌ترین درصد آیشویی پتاسیم (۹۸/۸۹ درصد) را نشان داد. علت آیشویی زیاد در این تیمار می‌تواند اثر سه فاکتور مهم کلرید کلسیم، حجم آیشویی بالا و محلول کلرید پتاسیم باشد که هر کدام به‌تنهایی بر افزایش درصد آیشویی پتاسیم از خاک تأثیر داشته‌اند که دلایل آن‌ها قبلاً ذکر

شد. درصدهای منفی در دور اول آبیاری که در قسمت‌های قبلی نیز توضیح داده شد نشان می‌دهد که در این حجم آبخوئی به علت حجم کم محلول آبخوئی، آبخوئی صورت نگرفته و پتاسیمی به خارج از ستون خاک منتقل نشده است، ولی تبادل کاتیون‌های کلسیم و سدیم موجود در محلول با پتاسیم روی مکان‌های تبدالی، باعث افزایش پتاسیم محلول خاک شده است. پس، نه تنها پتاسیم آبخوئی نشده بلکه پتاسیم از فاز تبدالی وارد فاز محلول شده و پتاسیم محلول را افزایش داده است. میانگین درصد پتاسیم آبخوئی شده برای محلول آبخوئی کلرید پتاسیم بیش‌ترین مقدار را نسبت به سولفات پتاسیم و آب مقطر نشان داد. در خاک‌های تیمار شده با نمک نیز به ترتیب بیش‌ترین درصد آبخوئی پتاسیم در کلرید کلسیم، کلرید سدیم و سولفات کلسیم مشاهده شد و خاک شاهد کم‌ترین درصد آبخوئی پتاسیم را نشان داد.

جدول ۶- اثرات سه‌گانه محلول آبخوئی، دور آبیاری و تیمارهای نمک بر درصد پتاسیم آبخوئی شده از خاک (اعداد بر حسب درصد است).

میانگین	خاک شاهد	تیمارهای نمک			دور آبیاری	محلول آبخوئی
		CaSO ₄	NaCl	CaCl ₂		
-۲/۵۸	-۰/۱۱	-۰/۶۷	-۳/۲۱	-۶۳۵	دور اول	
۲۳/۸۵	۲/۸۱	۷/۲۹	۲۴/۸۴	۶۰/۵۴	دور سوم	آب مقطر
۴۲/۲۱	۱۴/۰۵	۳۲/۸	۴۵/۸۲	۷۶/۱۸	دور هشتم	
۲۱/۱۶	۵/۵۸	۱۳/۱۴	۲۲/۴۸	۴۳/۴۵	-	میانگین
-۲/۶۱	-۰/۹۳	-۰/۹۳	-۳/۶۵	-۴/۹۳	دور اول	
۶۰/۰۲	۴۱/۹۲	۵۲/۳۸	۶۲/۹۲	۸۲/۸۵	دور سوم	سولفات پتاسیم
۸۵/۱	۶۹/۸۱	۸۵/۳۳	۸۷/۷۲	۹۷/۵۵	دور هشتم	
۴۷/۵	۳۶/۹۳	۴۵/۵۹	۴۹	۵۸/۴۹	-	میانگین
-۴/۸۳	-۱/۱۳	-۱/۰۴	-۱۰	-۷/۱۹	دور اول	
۷۱/۲	۵۱/۸	۶۴/۷۸	۷۵/۸۷	۹۲/۲۶	دور سوم	کلرید پتاسیم
۹۱/۰۹	۸۰/۰۷	۹۰/۵۲	۹۴/۸۷	۹۸/۸۹	دور هشتم	
۵۲/۴۹	۴۳/۵۸	۵۱/۴۲	۵۳/۵۸	۶۱/۳۲	-	میانگین

نتیجه گیری

با توجه به نتایج به دست آمده و تأثیر کلرید کلسیم، کلرید سدیم و سولفات کلسیم در کاهش پتاسیم محلول خاک می توان بیان نمود که کلسیم نسبت به پتاسیم تمایل بیش تری برای جذب بر روی سطوح منفی خاک دارد و به علت دوظرفیتی بودن با قدرت بیش تری جذب این سطوح می شود. بنابراین پتاسیم توانایی اندکی برای جایگزینی با کلسیم دارد و خاک های دارای مقدار قابل توجه کلسیم مانند خاک های گچی که دارای کاتیون غالب کلسیم هستند هدررفت پتاسیم محلول در آنها زیاد است و باید کود پتاسیمی بیش تری استفاده شود تا کمبود پتاسیم ناشی از وجود کلسیم در این خاک ها جبران شود. البته خاک های سدیمی که برای اصلاح آنها از سولفات کلسیم استفاده می شود نیز از این قضیه مستثنی نیستند. اگرچه نباید فراموش کرد که کلرید سدیم نیز بر آبشویی پتاسیم تأثیر مثبتی نشان داد و آبشویی پتاسیم در خاک های شامل کلرید سدیم دارای اهمیت است. همچنین آبشویی زیاد به ویژه در خاک های شور نه تنها باعث آبشویی پتاسیم و از دسترس خارج کردن این عنصر برای گیاهان می شود بلکه موجب آلودگی منابع آب های زیرزمینی شده و این امر می تواند خطری جدی برای محیط زیست تلقی شود. با توجه به مؤثر بودن منبع کود مصرفی بر آبشویی پتاسیم، توصیه می شود که در انتخاب کودهای پتاسیمی دقت لازم اعمال شود و کود پتاسیمی مناسب استفاده شود ضمن این که کاربرد کودهای پتاسیم در بیش تر از یک نوبت به منظور جلوگیری از تلفات آبشویی می تواند تا حد زیادی مؤثر واقع شود. همچنین پیشنهاد می شود که به دلیل اهمیت پتاسیم بررسی های بیش تری بر روی عوامل مؤثر بر آبشویی پتاسیم محلول در خاک صورت گیرد. این بررسی ها می تواند در قالب استفاده از نمک های دیگر و یا دور آبیاری با حجم آبشویی های بیش تر باشد و در شرایط مزرعه انجام پذیرد تا خروجی آنالیزها بیش تر به واقعیت نزدیک باشد.

منابع

1. Alfaro, M.A., Jarvis, S.C., and Gregory, P.J. 2004. Factors affecting potassium leaching in different soils. *Soil Use and Management*. Pp: 182-189.
2. Ardalan, M.M., and Savaghebi Firoozabadi, Gh.R. 2001. *Soil fertility management for Sustainable agriculture*. Tehran University Press, 387p. (In Persian)
3. Ayars, J.E., and Tanji, K.K. 1999. Effects of drainage on water quality in arid and semiarid lands. *Agricultural Drainage*. Pp: 831-867.
4. Broschat, T.K. 1995. Nitrate, phosphate and potassium leaching from container-grown plants fertilized by several methods. *Horticulture Science*. 30: 74-77.

5. Darmody, R.G., Foss, J.E., Intosh, M.Mc., and Wolf, D.C. 1983. Municipal sludge compost-amended soils: some spatiotemporal treat effects. *J. Environ. Qual.* 12: 231-236.
6. Feigenbaum, S. 1986. Potassium distribution in a sandy soil exposed to leaching with saline water. In: *Nutrient Balances and the Need for Potassium*. International Potash Institute. Pp: 155-162.
7. Havlin, J.L., Beaton, J.D., Tisdal, S.L., and Nelson, W.L. 2005. *Soil Fertility and Fertilizers an Introduction to Nutrient Management*. 7th Edition. 528p.
8. Jalali, M. 2008. Effect of sodium and magnesium on kinetics of potassium release in some calcareous soils of western Iran. *Geoderma*. 145: 207-215.
9. Jalali, M., and Merrikhpour, H. 2008. Effects of poor quality irrigation waters on the nutrient leaching and groundwater quality from sandy soil. *Environmental Geology*. 53: 1289-1298.
10. Jalali, M., and Rowell, D.L. 2003. The role of calcite and gypsum in the leaching of potassium in a sandy soil. *Experimental Agriculture*. 39: 379-394.
11. Jalali, M., and Rowell, D.L. 2009. Potassium leaching in undisturbed soil cores following surface applications of gypsum. *Environmental Geology*. 57: 41-48.
12. Jalali, M., Merrikhpour, H., Kaledhonkar, M.J., Van Der Zee, S.E.A.T.M. 2008. Effects of wastewater irrigation on soil sodicity and nutrient leaching in calcareous soils. *Agriculture Water Management*. 95: 143-153.
13. Johnston, A.E., and Goulding, K.W.T. 1990. The use of plant and soil analyses to predict the potassium supplying capacity of soil, P 177-204. In: *Development of K-fertilizer Recommendations*. International Potash Institute.
14. Kolahchi, Z., and Jalali, M. 2007. Effect of water quality on the leaching of potassium from sandy soil. *J. Arid Environ.* 68: 624-639.
15. López, A., José, G., Javier, F.L., Jaime, M.O., Sergio, A.E., Del Rocío, F.B., and González, R. 2007. Salt Leaching Process in an Alkaline Soil Treated with Elemental Sulphur under Dry Tropic Conditions. *World J. Agric. Sci.* 3: 3. 356-362.
16. Malakouti, M.J., and Homae, M. 2003. *Soil fertility of arid and semi-arid regions "Difficulties and solutions"*. 2nd Edition. Tarbiat Modarres University Press, 482p.
17. Najafi, M., Abtahi, A., Karimian, N., Owliaie, H.R., and Khormali, F. 2010. Kinetics of non exchangeable potassium release as a function of clay mineralogy and soil taxonomy in calcareous soils of southern Iran. *Archives of Agronomy and Soil Science*.
18. Oliveira, M.W., Trivelin, P.C.O., Boaretto, A.E., Muraoka, T., and Mortatti, J. 2002. Leaching of nitrogen, potassium, calcium and magnesium in a sandy soil cultivated with sugarcane. *Pesq. agroppec. Brasilia*. 37: 6. 861-868.
19. Page, A.L., Miller, R.H., and Jeeney, D.R. 1992a. *Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical properties*. Soil Science Society of America, 1750p.

20. Page, A.L., Miller, R.H., and Jeeney, D.R. 1992b. Methods of Soil Analysis, Part 2. Chemical and mineralogical properties. Soil Science Society of America, 1159p.
21. Pansu, M., and Gautheyrou, J. 2006. Handbook of Soil Analysis, Mineralogical, Organic and Inorganic Methods. Springer. 993p.
22. Rahmatullah, B.Z., Shaikh, M.A., and Salim, M. 1994. Bioavailable potassium in river-bed sediments and release of interlayer potassium in irrigated arid soils. Soil Use Manage. 10: 43-46.
23. Rowell, D.L. 1985. The reduction in sodicity during the displacement of mixed $\text{CaCl}_2\text{-NaCl}$ salts from soils by water. Irrigation Water. 6: 11-18.
24. Shabanpoor Shahrestani, M. 2002. Comparison of three solute transport models using bromide as a tracer. J. Soil Res. 15: 3. 261-272.
25. Shainberg, I., Rhoades, J.D., and Prather, R.J. 1981. Effect of low electrolyte concentration on clay dispersion and hydraulic conductivity of a sodic soil. Soil Sci. Soc. Amer. J. 45: 273-277.
26. Sparks, D.L. 2000. Bioavailability of soil potassium. Handbook of Soil Science. D-38-D-52.
27. Sparks, D.L., and Huang, P.M. 1985. Physical chemistry of soil potassium, P 201-276. In: Munson, R.D. (ed.), Potassium in Agriculture. Soil Sci. Soc. Amer. J.
28. Tributh, H., Boguslawski, E.V., Liers, A.V., Steffens, D., and Mengel, K. 1987. Effect of potassium removal by crops on transformation of illite clay minerals. Soil Science. 143: 404-409.



Effect of different salts on soluble potassium leaching in soil columns

***M. Mirzaei Varoei¹, M. Fekri² and M. Mahmoodabadi²**

¹M.Sc. Student, Dept. of Soil Science, Shahid Bahonar University of Kerman,

²Associate Prof., Dept. of Soil Science, Shahid Bahonar University of Kerman

Received: 11/16/2012; Accepted: 07/08/2013

Abstract

Soluble potassium is the most available form of potassium for plants and it is very important for crop production. This study investigates the effect of some salts, different volumes and solutions of leaching on the soluble potassium in soil. The experiments were factorial based on completely randomized design (CRD) using four salt treatments consist of control, calcium chloride, calcium sulphate and sodium chloride; three leaching solutions (distilled water, potassium chloride and potassium sulfate); eight irrigation steps (each irrigation step equals 236 millimeter or 0.25 pore volume) and three replications, which were conducted in laboratory conditions using soil columns. At the end of experiment, the soluble potassium concentration was measured in the soil columns. The results showed that among the salt treatments, the highest amount of the soluble potassium leaching was observed for calcium chloride treatment, but its differences with sodium chloride, calcium sulphate and control were significant. Moreover among the leaching solutions, potassium chloride compared to potassium sulfate and distilled water had higher effect on decreasing soluble potassium in the soil solution. Also with increasing leaching volume, the concentration of soluble potassium significantly decreased. The findings of this research showed that the importance of salinity, leaching volume and potassium fertilizer should be regarded on the soluble potassium in order to prevent the losses of this form of potassium for plants.

Keywords: Salinity, Calcium chloride, Calcium sulphate, Leaching solution

* Corresponding Authors; Email: mansourmirzaei63@gmail.com

