اثر شیب و پوشش گیاهی بر حرکت کلر و پتاسیم در رواناب و زه‌آب یک خاک لوم‌رسی

آزاده صفادوست*، ساناز غنی‌زاده و محسن نائل[۱]

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱/۲۳ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۴/۲۰)

چکیده

این پژوهش به منظور بررسی اثر نوع گیاه (گندم و یونجه) و شیب زمین (۵ و ۲۰ درصد) بر آلودگی آب‌های سطحی و زیرزمینی در یک خاک لوم‌رسی انجام گرفت. خاک‌های نمونه‌برداری شده در داخل جعبه‌های فلزی که دارای یک خروجی برای زه‌آب و یک خروجی برای رواناب بود، ریخته و گیاهان گندم و یونجه در آنها کاشته شد. پس از رشد گیاه محلول کلرید پتاسیم ۰/۰۵ مولار به سطح خاک اضافه و آبیاری با استفاده از شبیه‌ساز باران با شدت ۶۴ میلی‌متر در ساعت به مدت دو ساعت انجام شد. سپس میزان کلرید و پتاسیم در نمونه‌های برداشت شده از رواناب و زه‌آب اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که غلظت اندازه‌گیری شده پتاسیم به علت ویژگی قابل جذب بودن آن کمتر از کلر بود. منحنی‌های رخنه کلر و پتاسیم نشان داد که شیب زمین و نوع کشت انتقال کلر و پتاسیم را تحت تأثیر قرار می‌دهد. زمان رسیدن به نقطه اوج منحنی‌های کلر و پتاسیم در رواناب به ترتیب کشت گندم با شیب ۲۰ درصد > کشت یونجه با شیب ۲۰ درصد > کشت گندم با شیب ۵ درصد > کشت یونجه با شیب ۵ درصد بود؛ و در زه‌آب به صورت کشت یونجه با شیب ۵ درصد > کشت گندم با شیب ۵ درصد > کشت یونجه با شیب ۲۰ درصد > کشت گندم با شیب ۲۰ درصد تغییر کرد. در هر شیب، پوشش گیاهی فشرده یونجه نسبت به گندم میزان آلودگی کلر و پتاسیم را در رواناب کاهش داد، در حالی‌که در زه‌آب به علت توسعه سیستم ریشه‌ای بزرگتر و عمیق‌تر، سبب آبشویی بیشتر هر دو ردیاب گردید. بر اساس مطالعه انجام شده تغییر پوشش سطحی گیاهی از گندم به یونجه در زمین‌های شیب‌دار برای جلوگیری از آلودگی آب‌های سطحی پیشنهاد می‌شود؛ اگرچه فاکتورهای دیگری مانند اقلیم، بافت و ساختمان خاک نیز باید مورد توجه قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: آبشویی، آلودگی، ردیاب، سیستم ریشه‌ای، منحنی رخنه

۱. گروه خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی‌سینا

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: safadoust@basu.ac.ir

مقدمه

استفاده از کودهای حیوانی و شیمیایی، در کشاورزی پایدار، برای بهبود ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیک خاک و به دنبال آن افزایش تولیدات کشاورزی اجتناب‌ناپذیر است. در سال‌های اخیر استفاده بی‌رویه از کودهای شیمیایی سبب ایجاد خطرهای زیست‌محیطی زیادی شده است. ازمهم‌ترین این مشکلات و نگرانی‌ها، افزایش آلودگی آب‌های سطحی و زیرزمینی است. این موضوع به‌ویژه در مناطق پرباران و نواحی که سطح آب زیرزمینی بالاست، سبب نگرانی‌های زیادی شده است. آب‌های زیرزمینی و سطحی یکی از منابع مهم آب آشامیدنی است که کیفیت این آب‌ها به اندازه کمیت آنها مهم بوده و از مهم‌ترین عواملی است که باید به هنگام ارزیابی توسعه مناسب یک منطقه بررسی شود (۹).

هنگامی که کود بر روی خاک افزوده می‌شود، خاک به‌عنوان یک فیلتر (صافی) طبیعی در تصفیه آبی که از آن عبور می‌کند تا هنگامی که به سفره آب زیرزمینی یا سطحی برسد عمل می‌کند. با توجه به نقش مؤثر خاک در اکثر فرایندهای هیدرولوژی مانند نفوذ، ذخیره رطوبت، جذب نمک و آب توسط گیاهان، تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی و فرسایش، مباحث حرکت و انتقال آب و آلاینده‌ها در خاک، از دیرباز مورد توجه پژوهشگران بوده است (۱۶). استفاده از برخی نمک‌ها به‌عنوان ردیاب برای بررسی حرکت آب و املاح در خاک معمول است که به دو گروه نمک‌های فعال و غیرفعال تقسیم می‌شوند. نمک‌های برومید و کلرید به‌عنوان ردیاب‌های شیمیایی غیرفعال در پژوهش‌های زیادی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. ازآنجا که این نمک‌ها به راحتی از خاک شسته شده، در خاک مورد تجزیه یا جذب سطحی قرار نمی‌گیرد، در واکنش‌های شیمیایی و بیوشیمیایی شرکت نمی‌کند و حرکتی همسو با آب دارند، به‌عنوان ردیاب‌های حرکت آب و آلاینده‌ها در خاک مورد توجه قرار گرفته‌اند (۳۱ و ۱۷). آنیون کلر به راحتی با ذرات خاک تشکیل کمپلکس نمی‌دهد و میل کمی به جذب اختصاصی به ذرات خاک نشان می‌دهد. از این‌رو حرکت کلر در خاک تا حد زیادی توسط جریان آب تعیین می‌شود (۲۹). همچنین نمک‌های لیتیم، پتاسیم، کلسیم و منیزیم به‌عنوان ردیاب‌های فعال شناخته شده‌اند که می‌توانند در واکنش‌های برگشت‌ناپذیر شرکت کنند. پتاسیم به‌عنوان عنصری ضروری در خاک بوده و یکی از عناصر پرمصرف توسط گیاهان است. پتاسیم به چهار شکل کلی محلول، تبادلی، غیرتبادلی و ساختاری در خاک وجود دارد. مقدار پتاسیم محلول بسیار متغیر بوده و به عواملی مانند نوع گیاه کشت شده، ویژگی‌های خاک، میزان کود مصرفی و مقدار رطوبت بستگی دارد. پتاسیم تبادلی بخش کمی از پتاسیم کل خاک را تشکیل می‌دهد و به نوع و مقدار رس، ماده آلی و اسیدیته خاک بستگی دارد. پتاسیم غیرتبادلی نیز در بین لایه‌های کانی‌های خاک نگهداری شده و در مواقع ضروری می‌تواند منبع پتاسیم برای گیاه باشد (۲۷ و ۲۱). از طرفی مطالعات نشان می‌دهد که پتاسیم یک یون متحرک بوده و مقادیر قابل توجهی از آن می‌تواند از طریق آبشویی هدر رود (۲۳).

ناحیه غیراشباع خاک به‌عنوان بخش جدانشدنی از چرخه هیدرولیک نقش بسیار مهمی در بسیاری از فرایندها مانند نفوذپذیری، ذخیره رطوبت خاک، تبخیر، جذب آب توسط ریشه، تغذیه مجدد آب زیرزمینی، رواناب و فرسایش دارد (۲۶). پس از ورود نمک‌ها وآلاینده‌ها به خاک این مواد دستخوش واکنش‌های گوناگونی می‌شوند، به این مفهوم که برخی جذب سطحی ذرات خاک شده و یا وارد واکنش‌های شیمیایی می‌گردند و پاره‌ای نیز توسط آب در خاک حرکت کرده و خود را به آب‌های زیرسطحی می‌رسانند. مقدار و کیفیت آب نفوذ کرده از خاک سطحی اثری مستقیم بر کیفیت رواناب سطحی و زیرسطحی، فرسایش و همچنین رطوبت خاک دارد (۱۹). نفوذ و حرکت آب و املاح در خاک تابع عوامل مختلفی مانند بافت و ساختمان خاک، پوشش گیاهی، شیب سطحی زمین و قابلیت پراکندگی ذرات سطح خاک و شدت بارندگی است (۲).

نوع گیاه کشت شده و سیستم ریشه‌ای آنها با ایجاد معابر و مسیرهای ترجیحی در خاک، انتقال نمک‌ها را تحت تأثیر قرار

می‌دهند (۱۵)؛ به‌طوری که گیاهانی مانند یونجه که دارای ریشه‌های عمیق هستند، کانال‌هایی در خاک ایجاد می‌کنند که باعث حرکت سریع‌تر املاح به عمق خاک می‌شود (۵). لو و دایی (۲۰) بیان کردند که وجود پوشش گیاهی تأثیر قابل توجهی در توزیع سرعت و تلاطم جریان و همچنین اختلاط املاح در یک کانال باز دارد. یوسفی و همکاران (۳۰) با مطالعه اثر نوع کشت و بافت خاک بر حرکت لیتیم و برمید گزارش کردند که میزان آلودگی زه‌آب خاک‌های تحت کشت یونجه بیشتر از خاک‌های تحت کشت گندم بود. آنها دلیل این امر را تأثیر پوشش گیاهی یونجه و نوع ریشه آن بر ویژگی‌های فیزیکی خاک‌های مورد بررسی اعلام کردند. شعبانپور شهرستانی و همکاران (۲۵) با بررسی حرکت برمید درشرایط طبیعی مزرعه و در خاک‌های زیرکشت گیاهان مختلف، بیان کردند که تغییر ویژگی‌های فیزیکی خاک تحت کشت‌های گوناگون ممکن است بر میزان آبشویی نمک‌ها در خاک تأثیر بگذارد. آنها نشان دادند در زمین‌های تحت کشت یونجه که سرعت آبشویی در آنها زیاد است، برای کارایی بیشتر کودهایی با قابلیت آبشویی بالا (مانند کودهای نیتروژنی)، باید آنها را در چند نوبت استفاده کرد.

نتایج حاصل از مطالعات یو و همکاران (۳۱) بر حرکت کلوئید و برمید تحت شرایط اشباع نشان داد که میزان آلاینده‌ها در رواناب سطحی بیشتر از میزان آنها در زه‌آب مشاهده شد، و با افزایش شیب، میزان آلودگی آب سطحی نیز افزایش یافت. همچنین، بوهم و آندرسن (۴) نیز گزارش کردند که با حرکت آب حاوی املاح در زمین‌های شیب‌دار میزان شوری خاک در قسمت‌های پایین‌تر شیب بیشتر بود. کلی و همکاران (۸) گزارش کردند که توانایی یک زمین‌نما در قسمت‌های مختلف آن از نظر نفوذ و نگهداری آنیون‌ها و حرکت آنها در خاک متفاوت است. فو و همکاران (۱۸) در بررسی تأثیر درجه شیب بر هدررفت نیتروژن در لس‌های چین، اعلام کردند که اراضی با شیب بیش از ۲۵/۶ درصد به دلیل هدررفت زیاد مواد غذایی نباید به‌عنوان اراضی مزروعی مورد استفاده قرار گیرند. دونگ و همکاران (۱۰) با بررسی اثر رطوبت اولیه، درجه شیب و شدت بارندگی گزارش کردند که با تندتر شدن درجه شیب، حرکت املاح و میزان رسوب در رواناب افزایش می یابد. تاران و همکاران (۲۷) با مطالعه تأثیر شیب خاک و شدت بارندگی بر انتقال املاح در شرایط آزمایشگاهی نشان دادند که افزایش شیب سبب افزایش انتقال املاح در جهت افقی خاک می‌شود و به علت وجود حرکت در جهت افقی به‌طور همزمان به تمام زهکش‌ها نمی‌رسد. مطالعات نشان داده است که به دلیل کم‌بودن نفوذپذیری خاک‌های رسی و لوم‌رسی، خطر آلودگی آب‌های زیرزمینی در این خاک‌ها کم است؛ با وجود این، منافذ درشت ساختمانی می‌توانند موجب افزایش چند برابری در هدایت هیدرولیکی و همچنین ایجاد جریان های ترجیحی در این خاک‌ها شوند (۷، ۱۳ و ۲۲).

نظر به اینکه کاربرد نامناسب کود به‌عنوان منبع آلوده‌کننده مستقیم محصولات کشاورزی، منابع آبی، جانوران یا انسان مشخص شده است (۱۴)، افزایش نگرانی در مورد آلودگی منابع آب سطحی و زیرزمینی به ویژه در طی دهه‌های اخیر بیشتر شده و مورد توجه قرار گرفته است. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که تاکنون پژوهش‌های زیادی در رابطه با مقایسه همزمان آلودگی رواناب و زه‌آب در کشور ما انجام نشده است. هدف از انجام این پژوهش ارزیابی و مقایسه حرکت یک ردیاب غیر واکنش‌پذیر (یون کلرید) و یک ردیاب واکنش‌پذیر (یون پتاسیم) در رواناب و زه‌آب با استفاده از جعبه‌ای خاک تحت تأثیر نوع پوشش گیاهی و شیب زمین است. آگاهی از چگونگی حرکت آلاینده‌ها تحت تیمارهای آزمایشی ذکر شده، پژوهشگران را در چگونگی استفاده از کودهای شیمیایی یاری خواهد کرد تا با مدیریت متکی بر دانش، خطر آلودگی منابع آبی کاهش یابد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش به‌منظور بررسی تأثیر شیب و نوع کشت گیاه بر

حرکت املاح و مقایسه میزان آلودگی آب‌های سطحی و زیرسطحی در محل دانشکده کشاورزی دانشگاه بوعلی سینا همدان انجام شد. نمونه‌برداری از یک خاک لوم‌رسی تحت آیش به مدت دو سال، با طول جغرافیایی ″۹/۱ ′۳۲ °۴۸ شرقی و عرض جغرافیایی ″۴۲/۱ ′۵۲ °۳۴ شمالی، واقع در استان همدان انجام گرفت. بر اساس نتایج کانی شناسی، کانی‌های رسی غالب خاک مورد مطالعه شامل کلسیت و کوارتز بوده و کانی‌های آلبیت، کلریت و اسمکتیت کمترین سهم را در نمونه خاک داشتند.

برای انجام این پژوهش جعبه‌های فلزی با ابعاد ۱۰۰ سانتی‌متر طول، ۳۰ سانتی‌متر عرض و ۲۵ سانتی‌متر ارتفاع تهیه شد. جعبه‌های خاک دارای یک خروجی برای خارج شدن رواناب سطحی در فاصله ۵ سانتی‌متر از لبه بالایی و یک خروجی برای خارج‌شدن زه‌آب در ته جعبه، هر دو در یک وجه از پهنای جعبه، بودند. برای ایجاد زهکشی بهتر ۵ سانتی‌متر سنگریزه‌های درشت در کف جعبه‌ها ریخته شد و توری‌های ۲/۵ میلی‌متری بر روی سنگریزه‌ها گذاشته شد؛ سپس به‌منظور ایجاد شرایط یکنواخت و جداسازی کلوخه‌ها از خاک، خاک نمونه‌برداری شده از الکی با قطر روزنه‌های ۴/۵ میلی‌متر عبور داده شد. جداسازی ذرات بیش از حد درشت، امکان یکنواختی بیشتر خاک را فراهم آورده و از ایجاد جریان ترجیحی در ستون‌های خاک جلوگیری می‌کند (۲۴). جعبه‌های خاک بر اساس جرم مخصوص ظاهری منطقه نمونه‌برداری شده برابر با ۱/۳۶ مگاگرم بر مترمکعب، با خاک نمونه‌برداری‌شده پر شدند. به این صورت که با توجه به ابعاد جعبه‌های خاک (۱۰۰ × ۳۰ × ۲۵)، حجم آن محاسبه و با استفاده از رابطه جرم مخصوص ظاهری ($\rho=\frac{M}{V}$)، جرم خاک مورد نیاز برای هر جعبه مشخص شد. سپس خاک مشخص شده به آهستگی و با مختصر تکان در طی چند روز در داخل جعبه‌های خاک ریخته شد.

به‌منظور بررسی اثر شیب، بر اساس شیب مزارع کشاورزی و مراتع دو شیب ۵ و ۲۰ درصد انتخاب و با استفاده از قرار دادن بلوک‌های سفالی در زیر جعبه‌های خاک ایجاد شد پس از آماده شدن جعبه‌های خاک، گیاه گندم (رقم گندم پیشگام) به‌عنوان گیاه زراعی به صورت ردیفی و گیاه یونجه (رقم یونجه همدانی) به‌عنوان پوشش مرتعی کشت شد. در کل تعداد ۱۲ جعبه خاک آماده شد.

پس از گذشت ۶۰ روز از کشت گیاهان، هنگامی که ارتفاع آنها حدوداً به ۳۰ تا ۳۵ سانتی‌متر رسیده بود، با استفاده از دستگاه شبیه‌ساز باران قابل حمل ساخته شده توسط دانشجویان دانشگاه بوعلی‌سینا، با شدت ثابت ۶۰ میلی‌متر بر ساعت بر اساس شبیه‌سازی شدیدترین گزارش باران در منطقه (مطابق با گزارش اداره کل هواشناسی) به مدت ۱۲۰ دقیقه بر روی جعبه‌های خاک ایجاد شد. ویژگی‌های آب استفاده شده در این مطالعه در جدول ۱ آورده شده است. قبل از اعمال باران، ۲ لیترمحلول کلرید پتاسیم ۰/۰۵ مولار به مدت ۱۵ دقیقه و به صورت یکنواخت بر سطح خاک هر جعبه اسپری شد و پس از آن بارانی به مدت ۲ ساعت اعمال شد. در طی بارندگی به فاصله زمانی هر ۱۰ دقیقه از رواناب سطحی و زه‌آب زیر سطحی ۱۰۰ میلی‌لیتر نمونه جمع‌آوری شد و غلظت کلرید و پتاسیم در محلول خروجی به‌ترتیب با استفاده از روش تیتراسیون و دستگاه شعله‌سنج نوری تعیین شد. سپس منحنی‌های رخنه کلرید و پتاسیم بر حسب غلظت نسبی (C/C_0) کلرید و پتاسیم (C_0، غلظت کلرید و پتاسیم ورودی برابر با ۰/۰۵ مولار و C، غلظت کلرید و پتاسیم خروجی) در برابر زمان نمونه‌برداری رسم شد و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

همچنین، به‌منظور بررسی ارتباط بین ضریب جذب و غلظت تعادلی پتاسیم با میزان هدرروی پتاسیم از خاک، ایزوترم جذبی پتاسیم با استفاده از محلول کلرور کلسیم ۱۰ میلی‌مول بر لیتر در حضور پتاسیم با دامنه‌ای از غلظت بین صفر تا ۵ میلی‌مول بر لیتر (۰، ۰/۲، ۰/۴، ۱، ۲ و ۵) انجام گرفت (۳). ضریب جذب (K_D) برای پتاسیم بر اساس مدل همدمای جذب خطی به دست آمد:

شکل ۱. نمایش جعبه‌های خاک (الف)، آماده‌سازی جعبه‌های خاک (ب)، کشت گندم (ج) و کشت یونجه (د)

جدول ۱. برخی از ویژگی‌های آب مورد استفاده

هدایت الکتریکی	اسیدیته	کربنات	بی‌کربنات	کلر	سولفات	کلسیم	منیزیم	سدیم	نسبت جذب سدیم
$mohs\ cm^{-1}$	(-)	$meq\ L^{-1}$							$(meq\ L^{-1})^{0.5}$
۵۱۰	۷/۷۲	۰/۰۰	۳/۵	۰/۵	۱/۰۷	۲/۸	۱/۵	۰/۷۷	۰/۵۲

$$C^* = K_D.C$$

که در این رابطه C^*، جرم ماده جذب‌شده در واحد جرم خاک (MM^{-1})؛ K_D، ضریب جذب (L^3M^{-1}) و C، جرم ماده محلول به ازای واحد حجم محلول (ML^{-3}) هستند.

در این مطالعه از آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار استفاده شد. عامل اول، نوع کشت (یونجه و گندم) و دوم شیب زمین (۵ و ۲۰ درصد) بود. سپس اثر این تیمارها بر غلظت نسبی (C/C_0) کلرید و پتاسیم خروجی از ستون‌ها در برخی زمان های نمونه‌برداری و همچنین بر پارامتر K_D با استفاده از برنامه SAS تجزیه و تحلیل گردید. مقایسه میانگین‌ها با آزمون LSD انجام گرفت.

نتایج و بحث

برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده در جدول ۲ آورده شده است.

نتایج نشان می‌دهد که خاک مورد مطالعه خاکی غیرشور با اسیدیته خنثی تا کمی قلیایی با مقادیر کمی از کربنات کلسیم و ماده آلی بود و از نظر کشت گیاهان دارای محدودیت خاصی نبوده و مناسب است. همچنین، مقدار پتاسیم موجود در خاک برای رشد اغلب گونه‌های گیاهی کافی بوده و میزان کلر نیز محدودیتی برای رشد دو گیاه گندم و یونجه نداشت.

اثر شیب و نوع کشت بر حرکت کلر در رواناب و زه‌آب

جدول ۳ نتایج تجزیه واریانس اثر تیمارهای نوع کشت و شیب زمین را بر غلظت نسبی کلر در رواناب و زه‌آب خروجی در زمان‌های ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۷۰، ۹۰ و ۱۲۰ دقیقه پس از بارندگی نشان می‌دهد.

همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد شیب در تمامی زمان‌ها به غیر از ۷۰ و ۱۲۰ دقیقه اثر معنی‌داری بر غلظت نسبی کلر در رواناب داشت که نشان‌دهنده اثر قابل توجه شیب بر حرکت کلر در رواناب است. اما نوع کشت به غیر از زمان ۱۰ دقیقه اثر معنی‌داری بر غلظت کلر نداشت. همچنین اثر متقابل نوع کشت و شیب زمین به غیر از زمان ۱۰ دقیقه معنی‌دار نبود. در زه‌آب اثر نوع کشت بر غلظت نسبی کلر به غیر از زمان های ۱۰، ۲۰ و ۱۲۰ دقیقه اثر معنی‌داری بر زمان های دیگر نداشت. اثر شیب زمین نیز فقط در زمان های ۵۰، ۹۰ و ۱۲۰ دقیقه معنی‌دار بود.

جدول ۲. برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک نمونه‌برداری‌شده

بافت خاک	رس	سیلت	شن	کربنات کلسیم	ماده آلی	هدایت الکتریکی	اسیدیته	پتاسیم	کلر
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	($dS\ m^{-1}$)	(-)	$mg\ kg^{-1}$	$meq\ L^{-1}$
لوم‌رسی	۳۲	۳۲	۳۵	۲/۱۶	۱/۴۴	۰/۲۲	۷/۷۶	۱۴۱	۰/۷۴

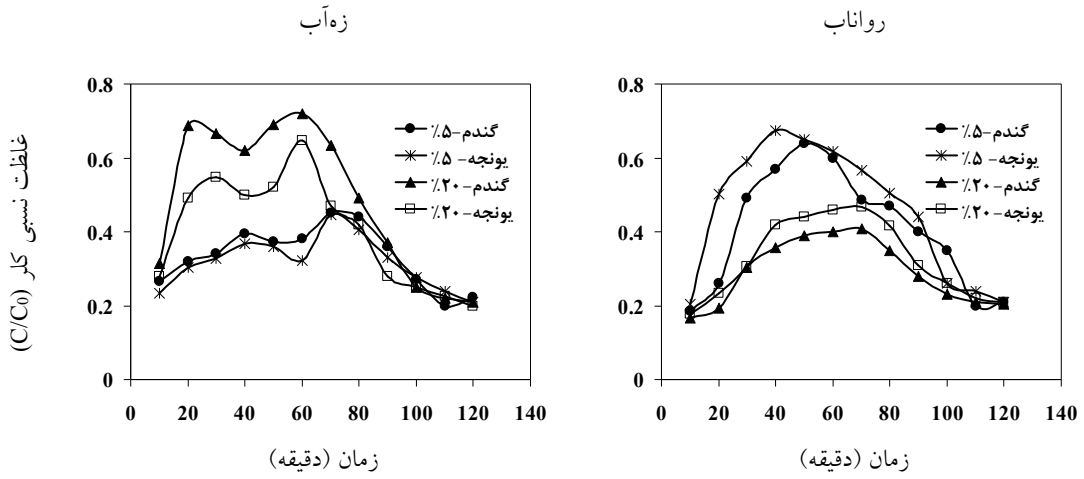
جدول ۳. نتایج تجزیه واریانس اثر تیمارهای شیب زمین (S)، نوع کشت (P) و همچنین اثر متقابل آنها بر غلظت نسبی کلرید خروجی در زه‌آب و رواناب در زمان های نمونه‌برداری

منبع تغییر	درجه آزادی	نسبت F							
		۱۰ دقیقه	۲۰ دقیقه	۳۰ دقیقه	۴۰ دقیقه	۵۰ دقیقه	۷۰ دقیقه	۹۰ دقیقه	۱۲۰ دقیقه
رواناب									
S	۱	۲۱۵/۰۲**	۴۵/۷۴**	۶/۴۳*	۹/۱۶*	۲۶/۸۳**	۰/۲۵	۲۱۶/۸۵**	۱/۷۰
P	۱	۳۵/۶۶**	۱/۱۸	۱/۴۶	۲/۱۵	۰/۰۱	۰/۲۰	۱/۹۶	۰/۵۷۷
S×P	۳	۸/۴۵**	۰/۸	۲/۲۸	۱/۳۳	۰/۱۶	۴/۱۳	۰/۱۸	۰/۷
زه‌آب									
S	۱	۰/۲	۰/۲۷	۰/۰۲	۴/۴۹	۱۹/۰۶**	۱/۰۱	۱۱/۴۳**	۲۷/۲۵**
P	۱	۷/۸۶*	۷/۳۱*	۰/۷۲	۰/۸۱	۲/۱۸	۳/۷۴	۰/۰۵	۵۱/۰۲**
S×P	۳	۱/۸۵	۰/۰۷	۰/۰۷	۰/۰۱	۰/۱۷	۲/۳۵	۰/۶۲	۲۱۶/۸۵**

** و * به ترتیب بیانگر اثر معنی‌دار در سطوح آماری ۱ و ۵ درصد هستند.

همچنین اثر متقابل نوع کشت و شیب زمین به غیر از زمان ۹۰ دقیقه بر غلظت نسبی کلر معنی‌دار نبود.

در شکل ۲ منحنی رخنه کلر برای تیمارهای نوع کشت و شیب زمین نشان داده شده است. در رواناب در زمان های ۱۰ تا ۵۰ دقیقه غلظت نسبی کلر خروجی در شیب ۲۰ درصد به‌طور معنی‌داری بالاتر از شیب‌های ۵ درصد بود. در زمان ۷۰ دقیقه نیز همین روند مشاهده شد ولی اختلاف بین غلظت نسبی کلر خروجی رواناب در کشت یونجه با شیب ۲۰ درصد و تیمارهای زیر کشت ۵ درصد معنی‌دار نبود. همچنین، در شیب ۲۰ درصد با کشت گندم به‌طور معنی‌داری بالاتر از شیب ۲۰ درصد با کشت یونجه بود؛ به‌طوری که در زمان ۱۰ دقیقه ۱۱درصد (۰/۳۱۳ در مقایسه با ۰/۲۸۸)، در زمان ۲۰ دقیقه ۳۹ درصد (۰/۶۸۶ در مقایسه با ۰/۴۹۲)، در زمان ۳۰ دقیقه ۲۲ درصد (۰/۶۶۶ در مقایسه با ۰/۵۴۸)، در زمان ۴۰ دقیقه ۲۳ درصد (۰/۶۲۲ در مقایسه با ۰/۵۰۴) و در زمان ۵۰ دقیقه ۳۲ درصد (۰/۶۹۰ در مقایسه با ۰/۵۲۴) آلودگی بیشتری در رواناب کشت گندم با شیب ۲۰ درصد نسبت به کشت یونجه با شیب ۲۰ درصد مشاهده شد (شکل ۲). از دلایل این امر می‌توان به کشت ردیفی گندم و در نتیجه حرکت سریع‌تر رواناب بر سطح خاک اشاره کرد. چنگ و همکاران (۶) در مطالعه‌ای در شمال چین مشاهده کردند که افزایش شیب، افزایش تولید رواناب و هدررفت خاک را به دنبال دارد. در شیب ۵ درصد نیز روند تغییرات به همین صورت بود؛ بدین‌معنی که میزان آلودگی در خاک‌های زیر کشت گندم بیشتر از خاک‌های زیر کشت یونجه



شکل ۲. اثر شیب و نوع کشت بر منحنی رخنه کلر در زمان های مختلف نمونه‌برداری

بود، اگرچه اختلاف آنها تنها در زمان های ۱۰، ۲۰ و ۴۰ دقیقه معنی‌دار بود. همان‌طور که مشاهده می‌شود در زمان ۱۰ دقیقه ۱۴ درصد (۰/۲۶۵ در مقایسه با ۰/۲۳۳)، در زمان ۲۰ دقیقه ۶ درصد (۰/۳۲۱ در مقایسه با ۰/۳۰۳)، در زمان ۳۰ دقیقه ۴ درصد (۰/۳۴۲ در مقایسه با ۰/۳۲۷)، در زمان ۴۰ دقیقه ۷ درصد (۰/۳۹۵ در مقایسه با ۰/۳۶۹)، در زمان ۵۰ دقیقه ۳ درصد (۰/۳۷۲ در مقایسه با ۰/۳۶۲) و در زمان ۷۰ دقیقه ۲ درصد (۰/۴۵۱ در مقایسه با ۰/۴۴۶) آلودگی بیشتری در رواناب کشت گندم با شیب ۵ درصد نسبت به کشت یونجه با شیب ۵ درصد مشاهده شد (شکل ۲).

نتایج نشان می‌دهد که در زمان های بررسی شده به جز زمان ۱۲۰ دقیقه، مقدار کلر خروجی به صورت خاک زیر کشت گندم با شیب ۲۰ درصد > خاک زیر کشت یونجه با شیب ۲۰ درصد > خاک زیر کشت گندم با شیب ۵ درصد > خاک زیر کشت یونجه با شیب ۵ درصد بود (شکل ۲).

همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود در رواناب منحنی رخنه در هر دو بافت برای همه تیمارها دارای دو نقطه اوج است. لی و قدرتی (۱۸) نیز در پژوهش خود، منحنی رخنه با دو نقطه اوج را مشاهده کردند. در این پژوهش اولین پیک در زمان های ابتدایی مشاهده می‌شود. علت ظهور زودهنگام کلر در همه تیمارها را می‌توان خارج شدن کلر در نزدیکی خروجی جعبه‌ها را دانست. اولین نقطه اوج منحنی رخنه گندم با شیب ۲۰ درصد برابر با ۰/۶۹ در زمان ۲۰ دقیقه مشاهده شد و پس از این تیمار منحنی رخنه یونجه با شیب ۲۰ درصد قرار گرفت. در این تیمار نیز اولین نقطه اوج منحنی برابر با ۰/۵۵ در زمان ۳۰ دقیقه واقع شد. بر اساس نتایج مشاهده شده شیب بیشتر سبب تولید رواناب بیشتر شده (۱۲) و در نتیجه آبشویی کلر افزایش یافت. با مقایسه این دو تیمار مشاهده می‌شود که با وجود شیب یکسان، کشت گندم به صورت ردیفی سبب ایجاد رواناب و سرعت بیشتر آن بر سطح خاک شده و در نتیجه سبب شسته شدن بیشتر کلر در این تیمارها نسبت به تیمار با کشت یونجه شده است. دو منحنی رخنه بعدی مربوط به شیب ۵ درصد به‌ترتیب با کشت‌های گندم و یونجه است. در این تیمارها نیز تأثیر نوع کشت مانند تیمارهای شیب ۲۰ درصد بود ولی به دلیل داشتن شیب کمتر، میزان غلظت نسبی کلر خروجی در نقطه اوج اول به‌ترتیب ۰/۴۰ و ۰/۳۷ در زمان ۴۰ دقیقه بود (شکل۲). پس از نقطه اوج اول میزان کلر در همه تیماها کم شده و در زمان ۶۰ دقیقه در شیب ۲۰ درصد و ۷۰ دقیقه در شیب ۵ درصد دوباره میزان کلر در نمونه‌ها افزایش یافت (شکل۲). که احتمالاً به علت شسته‌شدن کلر موجود در سطح خاک از قسمت‌های بالای شیب به سمت خروجی است.

روند تغییرات غلظت کلر خروجی در زه‌آب متفاوت از رواناب

بود و بیشترین غلظت در شیب ۵ درصد زیر کشت یونجه مشاهده شد و به غیر از زمان ۷۰ دقیقه مقدار کلر خروجی اختلاف معنی‌داری با سایر تیمارها داشت. همچنین بر خلاف رواناب، در همه زمان های نمونه‌برداری، کلر خروجی از خاک‌های زیر کشت یونجه بیشتر از خاک‌های زیر کشت گندم بود. به‌طوری که میانگین کلر خروجی زه‌آب در دو شیب در کشت یونجه در زمان‌های۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۷۰ دقیقه به‌ترتیب ۱۰ درصد (۰/۱۸۹ در مقایسه با ۰/۱۷۶)، ۳۳ درصد (۰/۳۶۸ در مقایسه با ۰/۲۷۷)، ۱۳ درصد (۰/۴۴۹ در مقایسه با ۰/۳۹۶)، ۲۶ درصد (۰/۵۸۲ در مقایسه با ۰/۴۶۳)، ۶ درصد (۰/۵۴۶ در مقایسه با ۰/۵۱۶) و ۱۹ درصد (۰/۵۳۱ در مقایسه با ۰/۴۴۷۴) بیشتر از کشت گندم بود (شکل ۲). دلیل این مشاهدات را می‌توان به امکان نفوذ بیشتر آب در شیب کمتر و وجود سیستم ریشه‌ای قوی در یونجه که تا عمق ۲۰ سانتی‌متری در خاک مشاهده شد، نسبت داد. درواقع ایجاد منافذ درشت و بهم پیوسته در کشت یونجه سبب انتقال بیشتر کلر در زه‌آب خروجی این تیمارها است. نتایج حاصل با یافته‌های کارن و همکاران (۵) هماهنگی داشت؛ آنها نیز گزارش کردند که نوع گیاه کشت شده، ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی خاک را تحت تأثیر قرار داده و بر آبشویی نمک‌ها مؤثر است.

در زه‌آب غلظت نسبی کلر خروجی در خاک زیر کشت یونجه با شیب ۵ درصد > خاک زیر کشت گندم با شیب ۵ درصد > خاک زیر کشت یونجه با شیب ۲۰ درصد > خاک زیر کشت گندم با شیب ۲۰ درصد مشاهده شد؛ ولی بین هیچ‌یک از تیمارها اختلاف معنی‌داری وجود نداشت.

در زمان پایانی آبشویی یعنی در زمان۱۲۰ دقیقه، در رواناب و زه‌آب، تفاوت معنی‌داری در غلظت نسبی کلر خروجی بین تیمارهای مختلف مشاهده نشد (شکل ۲).

همان‌طور که مشاهده می‌شود در زه‌آب، در شیب ۵ درصد با کشت یونجه حداکثر غلظت نسبی کلر خروجی در زمان ۴۰ دقیقه برابر با ۰/۶۷ اندازه‌گیری شد (شکل ۲). ظهور بیشتر کلر در زه‌آب خروجی به دلیل نقش مؤثر نوع کشت و شیب زمین در این تیمار بود. در این تیمار شیب کمتر سبب نفوذ بیشتر آب شده و از طرفی گیاه یونجه به دلیل سیستم ریشه خاصی که دارد (ریشه‌های قطور و عمیق) باعث ایجاد کانال‌های عمودی در خاک شده و شرایط را برای وقوع جریان سریع‌تر فراهم می‌کند. منحنی رخنه در این تیمارها شیب تندی داشته که احتمالاً به دلیل غالب‌بودن نقش جریان توده‌ای است. پس از این تیمار (کشت یونجه با شیب ۵ درصد) منحنی رخنه تیمار گندم با شیب ۵ درصد بیشترین مقدار را داشت. در این تیمار نقطه اوج منحنی در زمان ۵۰ دقیقه با غلظت نسبی کلر برابر با ۰/۶۴ اندازه‌گیری شد (شکل ۲). در این تیمار نیز نقش شیب زمین واضح و آشکار بود؛ اما به دلیل نوع گیاه کشت شده در این خاک (گیاه گندم با ریشه‌های نازک و افشان) احتمالاً تعداد منافذ درشت نسبت به دو تیمار تحت کشت یونجه کمتر بوده و در نتیجه انتقال آب و به همراه آن کلر در این تیمارها کمتر بود. منحنی رخنه تیمارها با شیب ۲۰ درصد با شیب ملایمی شروع شده و پس از رسیدن به حداکثر غلظت نسبی، با شیب کمی کاهش یافت. غلظت کم کلر در نقطه اوج منحنی‌ها نشان‌دهنده نفوذ کمتر آب در نتیجه شیب بیشتر است، به گونه‌ای که حداکثر غلظت نسبی در کشت یونجه و گندم به‌ترتیب ۰/۴۷ و ۰/۴۱ بود. در زمان‌های پایانی، شیب منحنی‌ها ملایم بود که می‌توان از دلایل آن آزاد شدن کلر حبس شده در منافذ ریز خاک و در نتیجه انتقال کندتر کلر اشاره کرد. احتمالاً این دلایل سبب شده است در زمان‌های پایانی، غلظت نسبی کلر به هم نزدیک شده و اختلاف چندانی با هم نداشته باشند (شکل ۲). در واقع نوع کاربری اراضی می‌تواند سبب تغییر در ویژگی ساختمانی و تفاوت در نفوذ خاک و به دنبال آن تولید رواناب و انتقال املاح شود (۳۲).

اثر شیب و نوع کشت بر حرکت پتاسیم در رواناب و زه‌آب

جدول ۴ نتایج تجزیه واریانس اثر تیمارهای نوع کشت و شیب زمین را بر غلظت نسبی پتاسیم در رواناب و زه‌آب خروجی در

جدول ۴. نتایج تجزیه واریانس اثر تیمارهای شیب زمین (S)، نوع کشت (P) و همچنین اثر متقابل آنها بر غلظت نسبی پتاسیم خروجی در زه‌آب و رواناب در زمان‌های نمونه‌برداری

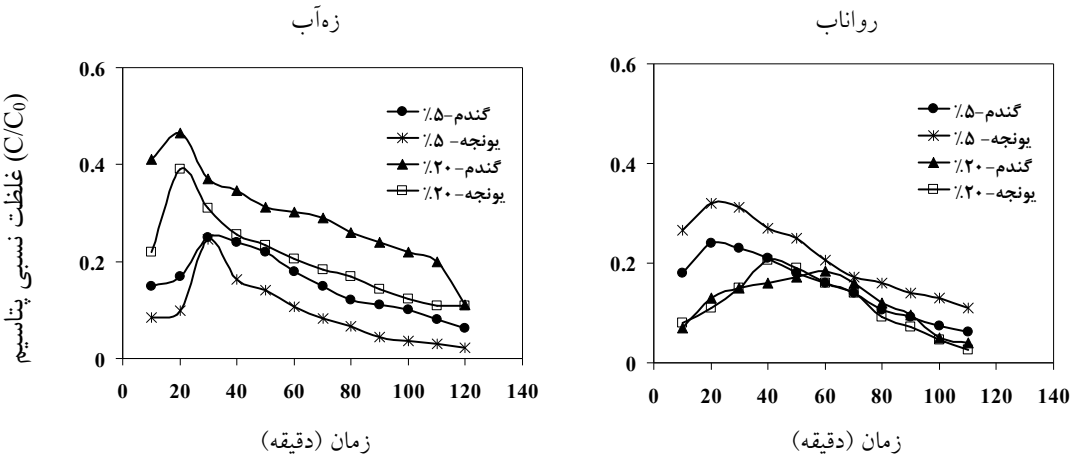
منبع تغییر	درجه آزادی	نسبت F							
		۲۰ دقیقه	۳۰ دقیقه	۴۰ دقیقه	۵۰ دقیقه	۶۰ دقیقه	۷۰ دقیقه	۹۰ دقیقه	۱۲۰ دقیقه
رواناب									
S	۱	۶۴/۱۶**	۲۸/۵۲**	۷/۷۴*	۱۴/۹۶**	۱۴/۷۷**	۱۲/۲۵**	۲۶/۵۵**	۱۲۵/۱۳**
P	۱	۹/۶۴**	۰/۱۹	۴/۰۰	۵/۱۸*	۳/۳۶**	۹/۷۰**	۲۷/۰۵**	۰/۲۱
S×P	۳	۴/۹۰*	۰/۵۲	۶/۶۹*	۱۰/۸۹**	۱۵/۷۴	۱۶/۲۶**	۲۷/۰۵**	۴۵/۷۳**
زه‌آب									
S	۱	۱۸۱/۹۲**	۵۰/۲۲**	۴/۳۹	۰/۰۱	۲/۳۱	۸/۹۷**	۰/۵۶	۲۹/۵۶**
P	۱	۱/۰۸	۳/۴۱	۳/۹۳	۰/۰۶	۳/۸۱	۹/۶۹**	۲/۸۴	۱/۰۲
S×P	۳	۳/۹۸	۰/۴۳	۰/۷۲	۰/۰۶	۱/۱۸	۳/۷۶	۰/۸۸	۱/۸۵

** و * به ترتیب بیانگر اثر معنی‌دار در سطوح آماری ۱ و ۵ درصد هستند.

زمان‌های ۲۰، ۴۰، ۵۰،۶۰، ۷۰، ۹۰ و ۱۲۰ دقیقه پس از بارندگی نشان می‌دهد.

در شکل ۳ منحنی رخنه پتاسیم برای تیمارهای نوع کشت و شیب زمین نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که اثر تیمارهای مطالعه شده بر غلظت نسبی پتاسیم، مانند کلر بود و بیشترین میزان آلودگی رواناب در شیب ۲۰ درصد و کشت گندم و کمترین میزان آلودگی در شیب ۵ درصد و کشت یونجه مشاهده شد که می‌توان گفت که کشت ردیفی گندم و شیب ۲۰ درصد سبب تولید بیشتر رواناب و هدایت آن به پایین شیب و در نتیجه غلظت بیشتر پتاسیم در خروجی این تیمار شده است. در همه زمان‌های نمونه‌برداری، پتاسیم خروجی از رواناب خاک‌های زیر کشت یونجه بیشتر از خاک‌های زیر کشت گندم بود. به‌طوری که مقدار پتاسیم خروجی در شیب ۲۰ درصد (میانگین نوع کشت) در زمان ۲۰ دقیقه ۳/۲ برابر (۰/۴۲۹ در مقایسه با ۰/۱۳۵)، در زمان ۴۰ دقیقه ۱/۵ برابر (۰/۳۰۱ در مقایسه با ۰/۲۰۲)، در زمان ۵۰ دقیقه ۱/۵ برابر (۰/۲۷۳ در مقایسه با ۰/۱۸۱)، در زمان ۶۰ دقیقه ۱/۸ برابر (۰/۲۳۷ در مقایسه با ۰/۱۱۸) و در زمان ۷۰ دقیقه ۲/۵ برابر (۰/۱۹۳ در مقایسه با ۰/۷۸۰) بیشتر از مقدار پتاسیم خروجی در شیب ۵ درصد (میانگین نوع کشت) بود. همان‌گونه که نتایج نشان می‌دهد میزان آلودگی رواناب در هر شیب، با تغییر کشت گندم به یونجه، کمتر شد و بیشترین کاهش برابر با ۴۱ درصد (۰/۲۴۲ در مقایسه با ۰/۱۴۳) در شیب ۲۰ درصد و ۶۷ درصد (۰/۱۱۱ در مقایسه با ۰/۰۴۴) در شیب ۵ درصد در زمان ۷۰ دقیقه مشاهده شد.

روند کلی قرارگیری منحنی‌های رخنه پتاسیم برای تیمارهای مختلف مانند یون کلر بود. به این مفهوم که در هر دو کشت منحنی‌های رخنه شیب ۲۰ درصد دارای مقادیر آلودگی بیشتر از منحنی‌های رخنه در شیب ۵ درصد بودند. در شیب ۲۰ درصد منحنی‌های رخنه با شیب تندی در زمان‌های اولیه آغاز و بعد از رسیدن به نقطه اوج با شیب ملایمی کاهش یافت؛ به‌طوری که منحنی رخنه پتاسیم در شیب۲۰ درصد با کشت گندم با حداکثر غلظت نسبی برابر با ۰/۴۷ بیشتر از سایر تیمارها بود. همان‌گونه که انتظار می‌رفت در رواناب غلظت نسبی پتاسیم برای تمام تیمارها کمتر از غلظت نسبی کلر در تیمارهای مشابه بود که دلیل آن جذب سطحی پتاسیم توسط سطوح جذب‌کننده است (شکل ۳).



شکل۳. اثر شیب و نوع کشت بر منحنی رخنه پتاسیم در زمان‌های مختلف نمونه‌برداری

در زه‌آب نیز بیشترین پتاسیم خروجی در کشت یونجه و شیب ۵ درصد با اختلاف معنی‌داری نسبت به سایر تیمارها مشاهده شد، ولی روند تغییرات برای سایر تیمارها در زمان‌های مختلف مانند کلر نبود که احتمالاً به دلیل تأخیر در زمان اوج منحنی‌های رخنه است. به‌طوری که بیشترین غلظت‌های خروجی برای کشت‌های یونجه در شیب ۵ درصد (۰/۳۲۱) و گندم در شیب ۲۰ درصد (۰/۲۴۱) در زمان ۲۰ دقیقه، برای کشت یونجه در شیب ۲۰ درصد در زمان ۵۰ دقیقه (۰/۱۹۱) و برای کشت گندم در شیب ۲۰ درصد در زمان ۶۰ دقیقه (۰/۱۸۵) مشاهده شد.

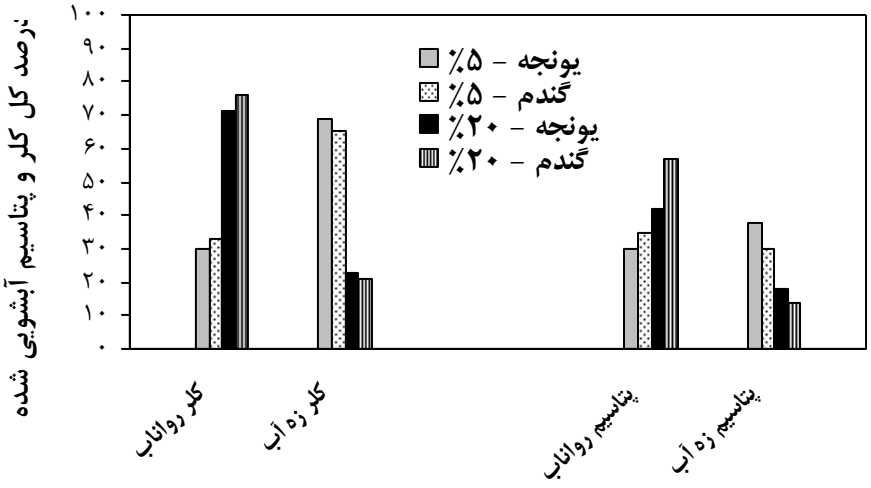
در زمان ۱۲۰ دقیقه نیز، مانند کلر، تفاوت معنی‌داری بین غلظت‌های نسبی پتاسیم خروجی در زه‌آب و رواناب مشاهده نشد. همچنین، روند کلی قرارگرفتن منحنی‌های رخنه برای تیمارهای مختلف مانند کلر بود. به این ترتیب که در هر دو بافت منحنی رخنه پتاسیم در شیب ۵ درصد با کشت یونجه و گندم بیشتر از سایر تیمارها بود و حداکثر پتاسیم در شیب ۵ درصد با کشت یونجه و گندم به‌ترتیب ۰/۳۲ و ۰/۲۴ در زمان ۲۰ دقیقه بیشتر از سایر تیمارها مشاهده شد (شکل ۳). همان‌گونه که انتظار می‌رفت غلظت نسبی پتاسیم در زه‌آب خروجی برای تمام تیمارها کمتر از غلظت نسبی کلر در تیمارهای مشابه بود که همان‌گونه که اشاره شد دلیل آن جذب سطحی پتاسیم روی سطوح فعال (بار منفی سطح رس‌ها و ماده آلی) است (شکل ۳).

منحنی رخنه در شیب ۲۰ درصد برای هر دو کشت گندم و یونجه بسیار کشیده‌تر از تیمارهای قبلی بود. همچنین، در این تیمارها غلظت نسبی پتاسیم خروجی با شیب ملایمی آغاز شده و پس از رسیدن به حداکثر غلظت نسبی، دوباره با شیب کمی کاهش یافت.

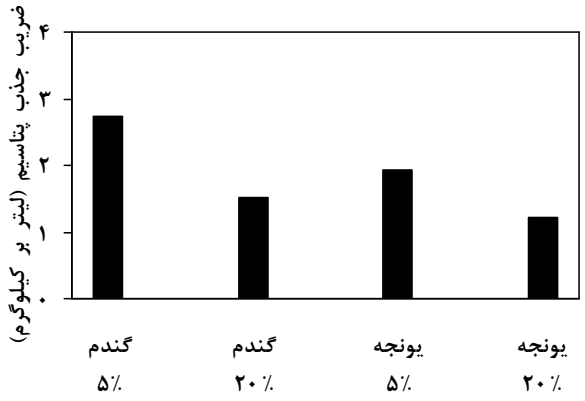
مقایسه منحنی‌های رخنه در زه‌آب و رواناب مربوط به هر دو ردیاب نشان می‌دهد که غلظت عناصر آبشویی شده در رواناب بیشتر از زه‌آب بود که دلیل آن جذب و گیر افتادن آنها در منافذ ته‌بسته است. نتایج حاصل از مطالعات یو و همکاران (۳۱) بر حرکت کلوئید و برمید در شیب تحت شرایط اشباع نشان داد که میزان آلاینده‌ها در رواناب سطحی بیشتر از میزان آنها در زه‌آب بوده و با افزایش شیب میزان آلودگی آب سطحی نیز افزایش یافت.

مقایسه میزان کلر و پتاسیم خارج شده در رواناب و زه‌آب

در شکل ۴، درصد کلر و پتاسیم خارج شده در رواناب و زه‌آب در پایان آزمایش‌های آبشویی نشان داده شده است. نتایج شکل ۴ دلیلی بر صحت نتایج ضریب جذب و منحنی‌های رخنه است. همان گونه که مشاهده می‌شود درصد کل کلر و پتاسیم خارج شده از رواناب به صورت کشت گندم با شیب ۲۰ درصد > کشت یونجه با شیب ۲۰ درصد > کشت گندم با شیب ۵ درصد > کشت یونجه



شکل۴. اثر شیب و نوع کشت بر درصد کلر و پتاسیم آبشویی شده در رواناب و زه‌آب



شکل۵. اثر متقابل شیب و نوع کشت بر ضریب جذب (KD) پتاسیم

با شیب ۵ درصد و از زه‌آب به صورت کشت یونجه با شیب ۵ درصد > کشت گندم با شیب ۵ درصد > کشت یونجه با شیب ۲۰ درصد > کشت گندم با شیب ۲۰ درصد بود. اگرچه درصد کل کلر و پتاسیم آبشویی شده از رواناب و زه‌آب در کشت گندم با شیب ۵ درصد نسبت به کشت یونجه با شیب ۵ درصد و در کشت گندم با شیب ۲۰ درصد نسبت به کشت یونجه با شیب ۲۰ درصد از نظر آماری اختلاف معنی‌داری نداشت.

اثر شیب و نوع کشت بر ضریب جذب (K_D)

ضرایب جذب به‌دست آمده در دامنه ۱/۲۱۹– ۲/۷۴۶ لیتر بر کیلوگرم بود و به صورت کشت گندم با شیب ۵ درصد > کشت یونجه با شیب ۵ درصد > کشت گندم با شیب ۲۰ درصد > کشت یونجه با شیب ۲۰ درصد، تفاوت معنی‌داری را نشان داد (شکل ۵). در هر دو شیب مطالعه شده، کشت گندم سبب افزایش K_D نسبت به کشت یونجه بود، به‌گونه‌ای که نسبت مقادیر ضریب جذب در کشت یونجه و گندم (میانگین شیب) به ترتیب ۱/۳۵:۱ (۱/۵۸ در مقایسه با ۲/۱۴ لیتر بر کیلوگرم) بود (شکل ۵).

تغییر شیب از ۲۰ درصد به ۵ درصد در کشت گندم سبب ۸۰ درصد افزایش (۱/۵۲ در مقایسه با ۲/۷۵ لیتر بر کیلوگرم) و در کشت یونجه سبب ۶۰ درصد افزایش (۱/۲۲ در مقایسه با ۱/۹۴ لیتر بر کیلوگرم)

در ضریب جذب شد (شکل ۵). دلیل این مشاهدات را می‌توان فرصت نفوذ بیشتر آب به علت شیب کمتر و در نتیجه امکان تماس کمتر پتاسیم با سطوح فعال خاک بیان کرد. اختر و همکاران (۱) با بررسی حرکت لیتیم در دو خاک لوم‌سیلتی ساختمان‌دار و لوم‌شنی بدون ساختمان گزارش کردند که مقدار K_D در خاک لوم‌سیلتی نسبت به خاک لوم‌شنی کمتر بود و دلیل آن را سرعت بیشتر آب و تماس کمتر یون لیتیم با ذرات خاک در خاک دارای ساختمان بیان کردند. یوسفی و همکاران (۳۰) نیز نتایج مشابهی ارائه دادند؛ آنها با بررسی حرکت لیتیم در خاک‌های زیر کشت گندم و یونجه گزارش کردند که مقدار K_D در خاک‌های زیر کشت گندم بیشتر بود.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش اثر پوشش گیاهی و شیب بر حرکت پتاسیم و کلر در رواناب و زه‌آب مطالعه شد. نتایج نشان داد که پوشش گیاهی به دلیل داشتن سطح پوشش و سیستم ریشه متفاوت، سبب تغییر در انتقال ردیاب‌های مطالعه شده در رواناب و زه‌آب شد. به گونه‌ای که گیاه یونجه به علت ایجاد پوشش سطحی متراکم و متفاوت نسبت به گندم و در نتیجه کم‌کردن اثر برخورد قطرات باران و سرعت برخورد آنها با خاک سبب کاهش مقدار کلر و پتاسیم در رواناب شد. همچنین، این گیاه به دلیل سیستم ریشه‌ای خاصی که دارد (ریشه‌های قطور و عمیق) سبب ایجاد کانال‌های عمودی در خاک شده و شرایط را برای وقوع جریان سریع‌تر فراهم می‌کند. در نتیجه متفاوت با آنچه در رواناب مشاهده شد، در زه‌آب میزان کلر و پتاسیم خارج‌شده نسبت به گیاه گندم بیشتر بود. حرکت هر دو ردیاب در رواناب در شیب ۲۰ درصد با کشت گندم بیشترین مقدار را داشت و بعد از آن به‌ترتیب تیمارهای شیب ۲۰ درصد با کشت یونجه، شیب ۵ درصد با کشت گندم و شیب ۵ درصد با کشت یونجه قرار گرفت. روند تغییرات منحنی‌های رخنه برای هر دو ردیاب یکسان بود، اما به دلیل اینکه کلر یک ردیاب غیرفعال (واکنش ناپذیر) و پتاسیم یک ردیاب فعال (واکنش پذیر) است، غلظت نسبی پتاسیم به دلیل جذب روی سطح رس‌ها کمتر از کلر بود. نتایج پژوهش نشان داد که شیب زمین، پوشش گیاهی و تغییر کاربری اراضی نقش مهمی در انتقال املاح در رواناب و خاک دارند. از آنجا که در این مطالعه تنها به دو نوع کاربری اراضی و شیب پرداخته شد، پژوهش‌های بیشتری در مورد سایر انواع کاربری اراضی در شیب‌های متفاوت توصیه می‌شود.

منابع مورد استفاده

1. Akhtar, M. S., T. S. Steenhuis, B. K. Richards and M. B. McBride. 2003. Chloride and lithium transport in large arrays of undisturbed silt loam and sandy loam soil columns. *Vadose Zone Journal* 2: 715-727.
2. Bachmair, S., M. Weiler and G. Nutsmann. 2009. Controls of land use and soil structure water movement: lessons for pollutant transfer through the unsaturated zone. *Journal of Hydrology* 369: 241-252.
3. Beckett, P.H.T. 1964. Studies on soil potassium. I. Confirmation of ratio law: Measurement of labile potassium in the soil. *Journal of Soil Science* 15: 9-23.
4. Boehm, M.M. and D.W. Anderson. 1997. A landscape-scale study of soil quality Journal.in three prairie farming systems. *Soil Science Society of America* 61:1147-1159.
5. Caron, J., O. Benton, D.A. Anger and J.P. Villeneuve. 1996. Preferential bromide transport through a clay loam under alfalfa and corn. *Geoderma* 69: 175-191.
6. Chang, Q., W. Ma and Q. Cai. 2008. The relative importance of soil crust and slope angle in run off and soil loss: a case study in the hilly areas of the loess plateau, north China. *Geoderma* 71(2-3): 117-125.
7. Chen, X. and J. Cheng. 2016. Application of landscape pattern analysis to quantitatively evaluate the spatial structure characteristics of preferential flow paths in farmland. *Applied Engineering in Agriculture* 32: 203-215.
8. Clay, D.E., Z. Zheng, Z. Liu, S.A. Clay and T.P. Trooien. 2004. Bromide and nitrate movement through undisturbed soil columns. *Journal of Environmental Quality* 33: 338-342.

9. Codoba, E., A. Martinez and E. Ferrer. 2010. Water quality indicators: comparison of a probabilistic index and a general quality index. The case of the confederation hidrografica del jucar (Spain). *Ecological Indicators* 10: 1049-1054.
10. Dong, W., C. Cao, X. Meng, Q. Wang and Q. Fu. 2018. Experimental studies on the transfer of dissolved solutes from soil into surface runoff on loess slopes in China. *Applied Water Science* 8(188): 1-10.
11. Fu, B.J., Q.H. Meng, Yi. Qiu, W.W. Zhao, Q.J. Zhang and D.A. Davidson. 2004. Effect of land use on soil erosion and nitrogen loss in the hilly area of the loess plateau, china. *Land Degradation and Development* 15: 87-96.
12. Ghanizadeh, S., A. Safadoust, M. Nael and G. Yousefi. 2019. Comparison of sediment content in runoff and drainage water under two different slopes and cultivation types. *Applied Soil Research* 6(4): 109-120 (In Farsi).
13. Grant, K.N., M.L. Macrae and G.A. Ali. 2019. Differences in preferential flow with antecedent moisture conditions and soil texture: Implications for subsurface P transport. *Hydrological Processes* 33: 2068-2079.
14. Guan, T.Y. and R.A. Holley. 2003. Pathogen survival in swine manure environments and transmission of human enteric illness-a review. *Journal of Environmental Quality* 32 (3): 1153.
15. Jabro, J.D., E.G. Lotse, K.E. Simmons and D.E. Baker. 1991. A field study of macropore flow under saturated conditions using a bromide tracer. *Journal of Soil and Water Conservation* 46: 376-380.
16. Lal, R. and M.K. Shukla. 2004. Principles of Soil Physics. Marcel Dekker, USA.
17. Leibundgut, C., P. Maliszewski and C. Kull. 2009 .Tracers in Hydrology. John Wiley & Sons, Chichester, UK.
18. Li, Y. and M. Ghodrati. 1997. Preferential transport of solute through soil columns containing constructed macropores. *Soil Science Society of America Journal* 61: 1308-1317.
19. Liu, H., T.W. Lei, I. Zhao, C.P. Yuan, Y.T. Fan and L.Q. Qu. 2011. Effects of rain fall intensity and initial soil water content on soil infiltrability under rain fall conditions using the run off-on-out method. *Journal of Hydrology* 396 (1-2): 24-32.
20. Lu. J. and H. C. Dai. 2016. Effect of submerged vegetation on solute transport in an open channel using large eddy simulation. *Advanced in Water Resources* 97: 87-99.
21. Luan, M., R. Tang, Y. Tang, W. Tian, C. Hou , F. Zhao, W. Lan and S. Luan. 2017. Transport and homeostasis of potassium and phosphate: limiting factors for sustainable crop production. *Journal of Experimental Botany* 86: 3091-3105.
22. Mingfeng, L., Y. Jingjing, Y. Ru and C. Jinhua. 2021. Effects of infiltration amounts on preferential flow characteristics and solute transport in the protection forest soil of southwestern China. *Water* 13(9): 2-11.
23. Najafi, M., A. Abtahi, N. Karimian, H.R. Owliaie and F. Khormali. 2010. Kinetics of non exchangeable potassium release as a function of clay mineralogy and soil taxonomy in calcareous soil of southern Iran. *Archive of Agronomy and Soil Science* 57(4):107-118.
24. Safadoust, A., A. A. Mahboubi, M.R. Mosaddeghi, B. Gharabaghi, A. Unc, P. Voroney and A. Heydari. 2012. Effect of regenerated soil structure on unsaturated transport of Escherichia coli and bromide. *Journal of Hydrology* 430,431: 80-90.
25. Shabanpour-Shahrestani, M., M. Afyuni and S.F. Mousavi. 2003. Bromide transport in soil under different cultivated crops. *Journal of Water and Soil Science* 6 (4): 79-89 (In Farsi).
26. Simunek, J., M. Senja, H. Saito, M. Sakai and M.T. Van Genuchten. 2008. The HYDRUS-1D software package for simulating the movement of water, heat, and multiple salts in variably saturated media version 4.0. HYDRUS Software series 3, Department of Environmental Sciences, university of California Riverside, Riverside, California, USA.
27. Sparks, D.L. 1987. Potassium dynamics in soils. *Advances in Soil Science* 6: 1-63.
28. Taran, F., A. Nazemi, A. A. Sadraddini and Y. Dinpazhuh. 2017. An investigation into the effects of soil slope and rainfall intensity on solute transport using laboratory experiments and HYDRUS-2D model. *Journal of Irrigation and Water Engineering* 7(2): 78-94. (In Farsi)
29. White, P.J. and M.R. Broadley. 2001. Chloride in soils and its uptake and movement within the plant: a review. *Annals of Botany* 88(6): 967-988.
30. Yousefi, G., A. Safadoust, A.A. Mahboubi, B. Gharabaghi, M.R. Mosaddeghi, B. Ahrens and H. Shirani. 2014. Bromide and lithium transport in soils under long-term cultivation of alfalfa and wheat. *Agriculture, Ecosystem and Environment* 188: 221-228.
31. Yu, C., B. Gao, R. Munoz-Carpena, Y. Tian, L. Wu and O. Perez-Ovilla. 2011. A laboratory study of colloid and solute transport in surface run off on saturated soil. *Journal of Hydrology* 402: 159-164.
32. Zehetner, F. and W.P. Miller. 2006. Erodibility and runoff-infiltration characteristics of volcanic ash soils along an altitudinal climosequence in the Ecuadorian Andes. *Catena* 65: 201-213.

Journal of Water and Soil Science
Vol. 26, No. 1, Spring 2022, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

Effects of Vegetation Type and Slope on Cl^- and K^+ Transport in Runoff and Drainage of a Clay Loam Soil

A. Safadoust*, S. Ghanizadeh and M. Nael[1]

(Received: April 12-2021; Accepted: July 11-2021)

Abstract

This study was conducted to investigate the effects of vegetation type (Alfalfa and Wheat) and slope (5% and 20%) on runoff and drainage pollution in clay loam soil. Sampled soils were repacked in the box with one soil drainage outlet and one surface flow outlet and were cultivated by wheat or alfalfa. A solution containing 0.05 M KCl was poured quickly and uniformly, over the surface of each box, after plant growth. Simulated rainfall was applied to the soil box with the intensity of a constant rate of 64 mm h-1 for 2 hours immediately. Then the concentration of Cl- and K+ were measured in the collected samples of runoff and the drainage outlet. Results showed that the measured concentration of K^+ was lower than the Cl^- concentration as a result of its absorbable property. The breakthrough curves (BTCs) of Cl^- and K^+ showed that slope and vegetation type affected the transport of Cl^- and K^+. The peak of the BTCs for Cl- and K^+ in runoff ranked in the order of wheat and 20% slope> alfalfa and 20% slope> wheat and 5% slope> alfalfa and 5% slope, and in the drainage changed to alfalfa and 5% slope> wheat and 5% slope> alfalfa and 20% slope> wheat and 20% slope. For each slope, the intensive vegetation cover of alfalfa than wheat considerably reduces Cl^- or K^+ pollution in runoff; whereas drainage development of larger and deeper root systems was the cause of higher leached concentrations for both tracers. Based on our research changes in soil surface vegetation cover from wheat to alfalfa are suggested in slope land to prevent surface water pollution; although other factors such as the climate, soil texture, and structure should also be considered.

Keywords: Leaching, Pollution, Tracer, Root system, Breakthrough curve

1. Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamadan, Iran.
*: Corresponding author, Email: safadoust@basu.ac.ir