



مجله علمی مهندسی آب و خاک

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک

جلد بیست و هشتم، شماره اول، ۱۴۰۰

۲۳۶-۲۱۹

<http://jwsc.gau.ac.ir>

DOI: 10.22069/jwsc.2021.18889.3435

مقاله کامل علمی - پژوهشی

## اثر سیستم‌های آبیاری سطحی و قطره‌ای بر انتقال آلاینده در یک خاک درز و ترک‌دار

زهرة ناظم<sup>۱</sup>، سید حسن طباطبائی\*<sup>۲</sup>، علیرضا حسین‌پور<sup>۳</sup>، پیام نجفی<sup>۴</sup> و مهدی قبادی‌نیا<sup>۵</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری گروه مهندسی آب، دانشگاه شهرکرد، آدانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه شهرکرد، آستاد گروه علوم و مهندسی خاک،

دانشگاه شهرکرد، آدانشیار گروه مهندسی آب، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان (خوراسگان)، ایران،

<sup>۵</sup> استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه شهرکرد

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۰۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۱۷

### چکیده

**سابقه و هدف:** بررسی بیلان جرم آلاینده انتقال‌یافته در پروفیل خاک در مدیریت‌های طولانی‌مدت عملیات کشاورزی ضروری است. بنابراین این پژوهش با هدف بررسی میزان تأثیرگذاری درز و ترک بر جریان ترجیحی، زمان انتقال ترجیحی آلاینده نیترات و بیلان جرمی انتقال‌یافته در دو سیستم آبیاری مختلف طراحی گردید.

**مواد و روش‌ها:** بدین‌منظور در این پژوهش، ۹ ستون PVC به ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر و قطر ۱۶ سانتی‌متر استفاده شد. هر ستون از خاک لوم-رسی به ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر پر گردید و دو بخش درز و ترک به عرض ۱ سانتی‌متر و پر شده با شن درشت با قطر ۷۱۰ میکرومتر در طول ستون خاک ایجاد شد. تیمارهای آزمایش شامل دودسته، تیمار اصلی درز و ترک و تیمار فرعی سیستم آبیاری بود. تیمارهای اصلی در سه سطح عبارت بودند از: بدون درز و ترک (M)، عدم ارتباط جانبی بین درز و ترک و خاک (MC-S)، ارتباط کامل بین درز و ترک و خاک (MC-C). عبارت بودند از آبیاری سطحی (SI) و آبیاری قطره‌ای سطحی با دبی ۲ و ۴ لیتر در ساعت (DI4 & DI2). برنامه آبیاری شامل ۱ ساعت تزریق آب مقطر، ۲ ساعت تزریق محلول نمکی (۱۷۶ و ۶۱/۸ میلی‌گرم یون خالص نیترات و کلراید) و ۴ ساعت تزریق آب مقطر بود. قبل از شروع، تمام ستون‌های آزمایش به‌مدت ۵ ساعت تا رسیدن به شرایط اشباع کامل آبیاری شدند. زه‌آب خروجی در زمان ۱۵، ۳۰ و ۶۰ دقیقه به‌صورت مجزا از ماتریکس خاک و درز و ترک جمع‌آوری شدند.

**یافته‌ها:** نتایج نشان داد بیلان جرم نیترات و کلراید انتقال‌یافته SI و DI4 تفاوت چندانی نداشتند. نیترات زه‌آب در سیستم آبیاری DI2 تقریباً نصف SI و DI4 بود. درحالی‌که جرم کلراید انتقال‌یافته در سیستم آبیاری DI2 بیش‌تر از سایر سیستم‌های آبیاری بود. نتایج نشان داد که زمان سفر کلراید به‌ویژه در درز و ترک MC-C کوتاه‌تر از نیترات است. نتایج نشان داد که جرم نیترات و کلراید از بخش درز و ترک بیش از ۱/۵ برابر سایر تیمارها بود که تأکیدی بر

\* مسئول مکاتبه: [tabatabaei@sku.ac.ir](mailto:tabatabaei@sku.ac.ir)

نقش جریان‌ات از درز و ترک در خاک‌های یک منطقه در انتقال آلاینده نیترات و کلراید به سمت آب‌های زیرزمینی است.

**نتیجه‌گیری:** نتایج نشان داد در جریان‌های سریع آب مثل SI، بیلان جرمی نیترات انتقال یافته بیش‌تر و در جریان‌ات کندتر آب مثل DI2، بیلان جرمی کلراید آبشویی شده بیش‌تر بود. جریان‌های ترجیحی به‌ویژه در تیمارهای دارای تبدلات کامل بین ماتریکس خاک و درز و ترک بیش‌تر رخ داد و در زمان انتقال کلراید در مقایسه با نیترات جریان‌های ترجیحی بیش‌تر نقش داشتند.

**واژه‌های کلیدی:** آبیاری قطره‌ای، بیلان جرمی، جریان ترجیحی، نیترات

### مقدمه

در سال‌های اخیر، مطالعات انتقال و حرکت نمک‌ها در محیط‌های متخلخل در ستون آزمایشگاهی یا در مزرعه انجام شده است. در بافت‌های درشت‌تر و درز و ترک‌دار به‌علت نگهداشت کم‌تر املاح، در رطوبت‌های کم‌تر از اشباع و سرعت‌پایین جریان، راندمان آبشویی املاح بیش‌تر است و با تعداد حجم منفذی کم‌تر، درصد آبشویی بالاتر است (۱۴). مقدار و سرعت انتقال املاح از نیم‌رخ خاک به بافت خاک، جرم مخصوص خاک و تخلخل خاک، روش آبشویی، کیفیت آب آبشویی، سرعت جریان آب، رطوبت اولیه خاک و متوسط اندازه ذرات خاک بستگی دارد (۱۱).

جریان ترجیحی پدیده‌ای فیزیکی است که سبب حرکت سهل‌الوصول آب و املاح در مسیرهای ناشی از درز و ترک‌ها، منافذ درشت، مسیرهای ناشی از پوسیدگی ریشه یا محل عبور کرم‌های خاکی و شکاف‌های ناشی از انقباض و انبساط خاک می‌شود (۶). براساس تعریف زهانگ و همکاران (۲۰۱۸)، عبور ۷۰-۸۵٪ از جریان آب به سرعت از منطقه غیراشباع از مسیرهایی بدون هیچ‌گونه مقاومت و عمدتاً به‌صورت عمودی را جریان ترجیحی می‌گویند (۳۶). شدت وقوع جریان ترجیحی در خاک وابسته به ساختمان خاک، بافت و تغییرات مکانی خصوصیات خاک دارد. تغییرات مکانی در خاک، خود ناشی از

تغییرات ویژگی‌های خاک مانند بافت، مقدار مواد معدنی و آلی، اثر تراکم، حجم و عمق پیوستگی درز و شکاف‌ها بر هدایت هیدرولیکی خاک است. در شرایط خاک مرطوب جریان‌های ترجیحی در خاک تسریع می‌شود، چراکه جریان‌های جانبی در خاک کاهش می‌یابد و در نتیجه جریان‌های عمودی در مسیرهای جریان ترجیحی افزایش می‌یابد (۱۷). اثر متقابل بین مسیرهای جریان ترجیحی و خاک در توانایی انتقال آب و املاح به‌شدت تحت‌تأثیر خصوصیات خاک و محتوای رطوبتی خاک است (۳۶). در مرحله اول، عموماً انتقال آب از مسیرهای جریان ترجیحی به‌سمت ماتریکس خاک به‌علت محتوای رطوبتی بالاتر صورت می‌گیرد (۳۶). نتایج نشان داده که عموماً تنها ۱٪ حجم آب و کم‌تر از ۱٪ املاح محلول از مسیرهای جریان ترجیحی به‌سمت پایین پروفیل خاک حرکت می‌کند (۲۶). در حضور درز و ترک در بخش ماتریکس خاک، نیترات مسیر عبوری در خاک را میان‌بر می‌زند. در چنین شرایطی املاح در یک‌زمان کوتاه از سطح خاک به‌طرف قسمت انتهایی لایه درشت منفذ حرکت می‌کند. از آنجایی که لایه‌های درشت منفذ معمولاً به‌صورت عمودی قرار گرفته‌اند، یک گرادیان غلظت در جهت افقی ایجاد گردیده و موجب شده که محلول علاوه بر نفوذ بیش‌تر به اعماق خاک، به‌صورت جانبی از لایه‌های درشت منفذ به

آلودگی خاک و آب‌های زیرزمینی به نیترات می‌گردد (۱۰). ایشان پیشنهاد کردند کاربرد سیستم آبیاری قطره‌ای به‌ویژه آبیاری قطره‌ای زیرسطحی به‌علت حداقل شدن انتقال و نفوذ نیترات به محیط بهترین روش آبیاری پیشنهادی است (۳۰ و ۳۱). بسته به پیوستگی یا ناپیوستگی از سطح تا کف ستون خاک، مسیرهای درشت منفذ همواره نمی‌توانند به حرکت محلول در خاک کمک کنند. پژوهشی توسط ال-داری و عبدل نصر (۲۰۰۶) بر انتقال نیترات از ستون‌های آزمایش پرشده از خاک با بافت شن لومی با شدت جریان ۰/۱۹، ۰/۲۶ و ۰/۴۴ ( $\text{cm min}^{-1}$ ) در سه غلظت مختلف نیترات ۱۵۰، ۳۰۰، ۶۰۰ ( $\text{mg l}^{-1}$ ) انجام گرفت. نتایج نشان داد افزایش سرعت کاربرد جریان آب سبب افزایش حرکت نیترات به عمق‌های پایین‌تر پروفیل خاک شد. از بین سه شدت جریان به‌کار رفته، فقط ۰/۴۴ ( $\text{cm min}^{-1}$ ) قادر به انتقال نیترات تا اعماق بود (۴). امامی (۲۰۱۲) گزارش کرد بیش‌ترین نیترات آبشویی شده بعد از عبور ۰/۵ حجم منفذی جریان آب و تا عمق ۲۰ سانتی‌متری خاک رخ می‌دهد و با گذر زمان کاهش یافت (۱۵). موری و هیراری (۲۰۱۴) نیز بر این مطلب تأکید کردند که منفذهای درشت معمولاً در بلندمدت تخریب و مسدود می‌شود و دوام آن‌ها اندک است (۲۱).

تاکنون اکثر مطالعات بر انتقال املاح توسط منافذ درشت صورت گرفته است. بنابراین در این مقاله به بررسی نقش درز و ترک که به‌نوعی دیگر بر جریان ترجیحی املاح در خاک اثر دارد، پرداخته می‌شود. از طرفی، نوع سامانه آبیاری و دبی عبوری جز مؤثرترین عوامل بر میزان هدررفت بیلان جرمی پرکاربردترین عنصر غذایی (نیترات) است. هم‌چنین جریان‌های ترجیحی در خاک درز و ترک‌دار، بیش‌ترین تأثیر را در زمان انتقال آلاینده نیترات به‌سمت سفره‌های آب زیرزمینی خواهد داشت. بنابراین پژوهش حاضر با هدف بررسی میزان تأثیرگذاری درز و ترک بر جریان

سمت ماتریکس نیز حرکت کند (۳۲). هم‌چنین در شرایط اشباع، ایجاد جریان‌های ترجیحی ناشی از پیوسته بودن منافذ درشت و درز و ترک‌های موجود خاک سبب انتقال سریع‌تر از میانگین سرعت منافذ آلاینده به‌سمت پایین پروفیل خاک می‌شود که قدرت یونی یکی مهم‌ترین خصوصیات تأثیرگذار بر سرعت انتقال آلاینده (باکتری و آنیون) است (۳، ۳۴).

آنیون‌ها حاصل هیدرولیز نمک‌ها در محلول خاک، به دلیل داشتن بار منفی توسط مواد معدنی رسی دفع گردیده و دارای ضریب تأخیر کم‌تر از یک هستند (۱۸). همین ماهیت شیمیایی سبب کاهش زمان سفر این آنیون‌ها می‌شوند. در انتقال بیلان جرمی آنیون‌ها در یک خاک سرعت منفذی، زمان باقیمانده (Resident time) معادل مدت‌زمانی که آب طول می‌کشد تا طول ستون آزمایش را طی کند و هم‌چنین زمان سفر (Travel time) معادل زمانی که طول می‌کشد تا املاح طول ستون خاک را طی کند از اهمیت بالایی برخوردار است. تفاوت بین سرعت و شدت‌جریان عامل کنترل‌کننده هیدروگراف و زمان سفر و زمان باقیمانده عناصر ردیاب است. زمان باقیمانده تحت کنترل ذرات آب ذخیره‌شده در حجم کنترل خاک است در حالی زمان سفر تحت کنترل زمان تزریق محلول نمکی است (۲۸).

افزایش آلودگی نیتراتی آب‌های زیرزمینی می‌تواند نتیجه استفاده کنترل نشده پساب‌ها و منابع نیتراتی آلوده باشد. لاله‌زاری و همکاران (۲۰۱۳) در بررسی آلودگی حوزه آبخیز دشت شهرکرد به نیترات در طی سال‌های ۲۰۰۷-۲۰۰۸ دریافتند فاکتورهای اصلی آلوده‌کننده آب چاه‌های منطقه، فاضلاب شهری و انتقال کودهای ازته کاربردی از زمین‌های کشاورزی است. نیترات جز مهم سازنده کودهای شیمیایی است که در غلظت بالا در پسماند انسانی و حیوانی وجود دارد (۲۰، ۲۲، ۲۹). هم‌چنین کاربرد فاضلاب شهری در زمین‌های کشاورزی به‌عنوان آب آبیاری سبب

۲ (cm) ستون آب (SI) و دو سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی (DI2 و DI4) به ترتیب با دبی  $2 \text{ (l hr}^{-1}\text{)}$  و دبی  $4 \text{ (l hr}^{-1}\text{)}$  است. در طول آزمایش سطح آب بر روی ستون‌های آزمایش تحت سیستم آبیاری سطحی با شناور ثابت نگه‌داشته شد. برنامه آبیاری شامل ۱ (hr) تزریق آب مقطر، ۲ (hr) تزریق پیوسته محلول نمکی و ۳ (hr) تزریق مجدد آب مقطر که در مجموع ۶ (hr) بود. قبل از شروع آزمایش ستون‌های آزمایش به مدت ۵ (hr) با آب مقطر تا رسیدن به شرایط یکسان و اشباع مورد آبیاری قرار گرفتند. بازه زمانی نمونه‌گیری زه‌آب خروجی ۳۰ و ۶۰ (min) در دو مرحله اول و سوم تزریق با آب مقطر و بازه زمانی ۱۵ (min) در مرحله تزریق محلول نمکی و تا یک ساعت بعد از قطع تزریق محلول نمکی (ابتدای مرحله سوم تزریق با آب مقطر) به‌صورت تفکیک‌شده از بخش درز و ترک و ماتریکس خاک صورت گرفت.

ترجیحی، زمان انتقال آلاینده نترات و بیلان جرمی انتقال‌یافته در سه سیستم آبیاری مختلف طراحی شد.

### مواد و روش‌ها

در آزمایش در ستون‌هایی از جنس PVC به ارتفاع ۶۰ (cm) و قطر دهانه ۱۶ (cm) براساس دستورالعمل ارائه‌شده توسط گیبتر و همکاران (۲۰۱۵) در ابعاد استاندارد طراحی و انجام شد (۱۶). تیمارهای آزمایش شامل دو گروه در سه سطح بودند. گروه اول درز و ترک و گروه دوم سیستم آبیاری بود. (جدول ۱). گروه اول درز و ترک عبارت‌اند از: ۱- حذف کامل جریانات عمودی و جانبی بین خاک و درز و ترک (M)، ۲- حذف تبادلات جانبی با قرارگیری ورقه آلومینیوم مابین خاک و درز و ترک (MC-S) و ۳- ارتباط کامل عمودی و جانبی بین خاک و درز و ترک (MC-C). ترتیب قرارگیری لایه‌های مختلف خاک و فیلتر نیز در شکل ۱ به‌صورت شماتیک نشان داده‌شده است. گروه دوم سیستم آبیاری نیز شامل: آبیاری سطحی با ارتفاع ثابت

جدول ۱- تیمارهای آزمایش.

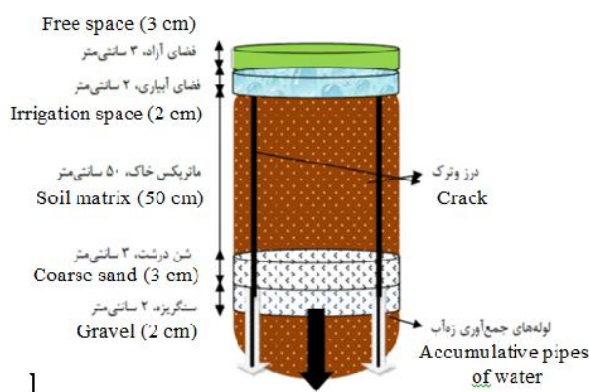
Table 1. Experiment treatments.

| نام اختصاری<br>Abbreviation name | ارتباط خاک با درز و ترک<br>Interchange soil with cracks | وجود درز و ترک<br>Crack persence | سیستم آبیاری<br>Irrigation system |
|----------------------------------|---|----------------------------------|-----------------------------------|
| M-SI                             | -   | -                                | SI                                |
| MC-S-SI                          | -   | +                                | SI                                |
| MC-C-SI                          | +   | +                                | SI                                |
| M-DI2                            | -   | -                                | DI2                               |
| MC-S-DI2                         | -   | +                                | DI2                               |
| MC-C-DI2                         | +   | +                                | DI2                               |
| M-DI4                            | -   | -                                | DI4                               |
| MC-S-DI4                         | -   | +                                | DI4                               |
| MC-C-DI4                         | +   | +                                | DI4                               |

DI2 و DI4، M، MC-S، MC-C به ترتیب تیمارهای فرعی سیستم آبیاری سطحی، آبیاری قطره‌ای با دبی ۲ و ۴ لیتر بر ساعت، تیمارهای اصلی تیمار اول درز و ترک مسدود، تیمار دوم با حذف جریانات جانبی خاک و درز و ترک، تیمار سوم با تبادلات کامل بین خاک و درز و ترک.

درز و ترک تیمار M با فوم سرد، تیمار MC-S با کاربرد صفحات آلومینیومی و تیمار MC-C با توری مسی شبکه‌دار با مش ۸۰ بخش خاک و درز و ترک جداسازی شدند (شکل ۱) و محل درز و ترک‌ها از شن درشت با قطر ۷۱۰ (μm) شسته شده به مدت ۴۸ ساعت، پر گردید. فضای بین درز و ترک‌ها از خاک با بافت لوم-رسی از عمق ۰-۳۰ (cm) از منطقه با سابقه بیش از ۵ سال از عدم مصرف کودهای نیترا، عبور داده شده از الک ۲ (mm) به طور یکنواخت پر گردید.

از انتهای ستون، ۲ (cm) از سنگریزه با متوسط قطر ۵-۹ (mm) و ۳ (cm) باقیمانده از شن خیلی درشت با متوسط قطر ۱-۲ (mm) پر گردید. در این پژوهش برای دستیابی به بررسی نقش جریان‌های ترجیحی در انتقال، دو محل درز و ترک به عرض ۱۰ (mm) و به فاصله ۳ (cm) از دیواره‌ها با توجه به ابعاد درز و ترک پیشنهادی وانگ و همکاران (۲۰۱۴) با کمک نقشه‌های خاک‌های طبیعی درز و ترک‌دار و محاسبه نسبت دقیق مساحت درز و ترک به کل مساحت زمین با کمک پلانی متر طراحی شدند (۳۴).



شکل ۱- شماتیک کلی ستون‌ها.

Figure 1. Schematic of the experiment column.

محلول به ترتیب به روش کج‌جلدال (۲۴) و اسپکتروفوتومتر در طول موج ۴۱۰ نانومتر (۵) و هدایت هیدرولیکی به روش بار ثابت تعیین گردید (جدول ۲). نمونه‌های آب ورودی و زه‌آب خروجی از سه بخش شامل ۲ درز و ترک و یک بخش ماتریکس خاک هر ستون آزمایش در ظروف پلاستیکی در بازه‌های زمانی ۱۵ و ۳۰ دقیقه تحت سیستم آبیاری سطحی و ۳۰ و ۶۰ دقیقه تحت سیستم آبیاری قطره‌ای جمع‌آوری و بر روی یخ به آزمایشگاه انتقال یافت. بلافاصله هدایت الکتریکی نمونه‌های زه‌آب جمع‌آوری شده اندازه‌گیری شد. برای جلوگیری از ایجاد خطا، نمونه‌ها سریعاً به

در این پژوهش محلول نمکی ساخته شده از نمک نیترات پتاسیم (نیترات) و نمک کلرید سدیم (کلراید) با درصد خلوص ۹۹/۹٪ مرک آلمان به غلظت ۲۸۷ و ۱۰۲ (mg) به ترتیب معادل ۱۷۶ و ۶۱/۸ (mg) از یون خالص نیترات و کلراید بود. اسیدیته و هدایت الکتریکی محلول نمکی به ترتیب معادل ۷/۵ و ۰/۵ (ds m<sup>-1</sup>) بود. همچنین برخی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک براساس روش‌های استاندارد موجود در دستورالعمل‌های آزمایشگاهی در ستون‌های آزمایش اندازه‌گیری شدند (۲۴). کلراید به روش تیتراسیون با نیترات نقره (۱۹) و ازت کل و نیترات

یخچال در دمای زیر ۴ درجه سانتی‌گراد تا زمان ارسال به آزمایشگاه تحقیقاتی منتقل شدند. نیترات زه‌آب به روش رنگ‌سنجی با اسپکتروفتومتر (۵) و کلراید به روش نیتراسیون (۱۹) اندازه‌گیری شد.

جدول ۲- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک.

Table 2. Soil chemical and physical characteristics.

| تخلخل<br>Porosity                         | کلراید<br>Chloride     | نیترات<br>Nitrate     | ازت کل<br>N <sub>total</sub> | کربنات کلسیم معادل<br>Calcium carbonate equivalent | کربن آلی<br>Organic carbon | CEC                                  | EC                   | pH  |
|---|------------------------|-----------------------|------------------------------|--|----------------------------|--------------------------------------|----------------------|-----|
| (%)                                       | (meq l <sup>-1</sup> ) | (mg l <sup>-1</sup> ) |                              | (%)  |                            | (Cmol <sup>+</sup> k <sup>-1</sup> ) | (dSm <sup>-1</sup> ) | -   |
| 4   | 26.8                   | 21.1                  | 0.05                         | 42   | 0.5                        | 23.2                                 | 2.8                  | 7.7 |
| هدایت هیدرولیکی<br>Hydraulic conductivity |                        | ps                    | pb                           | بافت<br>Texture                                    | شن<br>Sand                 | سیلت<br>Silt                         | رس<br>Clay           | SP  |
| درزوترک<br>Crack                          | خاک<br>Soil            |                       |                              |  | (%)                        |                                      |                      |     |
| (m day <sup>-1</sup> )                    |                        | (g cm <sup>-3</sup> ) |                              | لوم رسی<br>Clay Loam                               | 20                         | 36                                   | 44                   | 48  |

ps, pb, SP, OC, CEC, EC, pH به ترتیب اسیدینه خاک، هدایت الکتریکی، کربن آلی، رطوبت اشباع خاک، وزن مخصوص ظاهری و حقیقی

$$RT_{\text{Travel}} = T_{\text{Arrival}} - \frac{1}{2} T_{\text{Injection}} \quad (۳)$$

$$M_0 = \int C d_x = \int \bar{c} \Delta x \quad (۴)$$

که در آن،  $V_a$  متوسط سرعت جریان منفذی ( $\text{cm hr}^{-1}$ )،  $K_s$  هدایت هیدرولیکی اشباع ( $\text{cm hr}^{-1}$ )،  $n$  تخلخل،  $\Delta H$  بار هیدرولیکی (بارفشاری + بار ثقلی) ( $\text{cm}$ )،  $\Delta L$  اختلاف ارتفاع بین سطح تا انتهای ستون خاک ( $\text{cm}$ )،  $T$  زمان باقیمانده ( $\text{hr}$ )،  $L$  طول ستون خاک (طول مستقیم مسیر حرکت آب یا املاح) ( $\text{cm}$ )،  $V_d$  سرعت دارسی ( $\text{cm hr}^{-1}$ )،  $T_{\text{Travel}}$  زمان سفر ( $\text{h}$ )،  $T_{\text{Arrival}}$  زمان رسیدن ( $\text{hr}$ ) و  $T_{\text{Injection}}$  زمان تزریق محلول نمکی ( $\text{hr}$ ) است.

طبق تعریف متوسط سرعت جریان منفذی برابر تقسیم سرعت دارسی بر تخلخل کل، زمان باقیمانده برابر تقسیم طول ستون خاک بر سرعت دارسی، زمان رسیدن برابر زمان رسیدن نصف جرم آلاینده تزریق شده و زمان سفر برابر زمان رسیدن منهای متوسط زمان تزریق محلول نمکی است که از رابطه‌های ۱ تا ۴ به دست می‌آید. همچنین میزان جرم برابر با ممنتوم صفر بوده که از حاصل ضرب متوسط غلظت اندازه‌گیری شده نیترات و کلراید برحسب ( $\text{mg l}^{-1}$ ) در حجم زه‌آب جمع‌آوری شده در طی ساعات ۶ تا ۱۲ ساعت آبیاری در اختلاف زمان نقاط اندازه‌گیری زمان ( $\text{hr}$ ) محاسبه شد.

$$V_a = \frac{V_d}{n} = \frac{K_s}{n} * \frac{\Delta H}{\Delta L} \quad (۱)$$

$$RT = \frac{L}{V_d} \quad (۲)$$

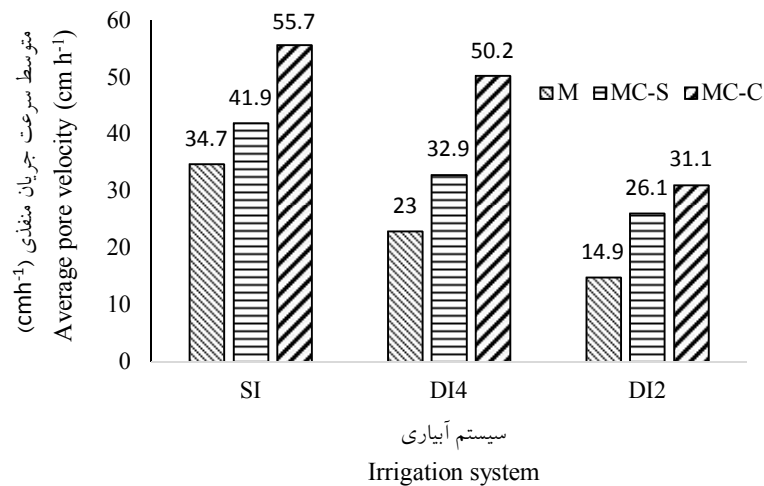
## نتایج و بحث

در این بخش ابتدا نتایج سرعت جریان منفذی و زمان باقیمانده بحث می‌شود و سپس به زمان باقیمانده املاح پرداخته می‌شود پس‌از آن بیان جرمی آب و بیان جرمی آلاینده‌های نیترات و کلراید و اثر جریان ترجیحی بر شاخص‌های مورد مطالعه مورد بحث قرار خواهد گرفت.

بر اساس متوسط سرعت جریان منفذی و زمان باقیمانده در ستون‌های آزمایش، نتایج شکل ۲، بیش‌ترین متوسط سرعت جریان منفذی ( $V_p$ ) در تیمار MC-C-SI با مقدار  $55/68$  و کم‌ترین آن در M-DI2 با مقدار  $14/91$  ( $cm\ h^{-1}$ ) مشاهده شد. مقایسه  $V_p$  در MC-C-SI با M-SI بیانگر سرعت بالای حرکت آب و املاح به دلیل هدایت هیدرولیکی بالای درز و ترک ( $46$  متر در روز) به سبب حضور منافذ درشت، اعوجاج کم‌تر در مسیر حرکت آب، برقراری تبادلات جانبی بین خاک و درز و ترک و در نتیجه کاهش زمان باقیمانده (RT) را نشان می‌دهد. بیش‌ترین مقدار RT در تیمار M-DI2 و سپس در تیمارهای M-SI و M-DI4 مشاهده شد (شکل ۳). بر اساس نتایج حاصل، حضور درز و ترک سبب کاهش چشمگیر RT در تیمار MC-C در مقایسه با دو تیمار دیگر شد. در سیستم آبیاری سطحی مقدار RT در تیمار M-SI با بیش‌ترین مقدار  $1/44$  (h) به کم‌ترین مقدار  $0/90$  (h) در MC-C-SI کاهش یافت که تأکید محکمی بر رخ دادن جریان‌های ترجیحی با شدت بالا در مسیرهای درشت منفذ عبور

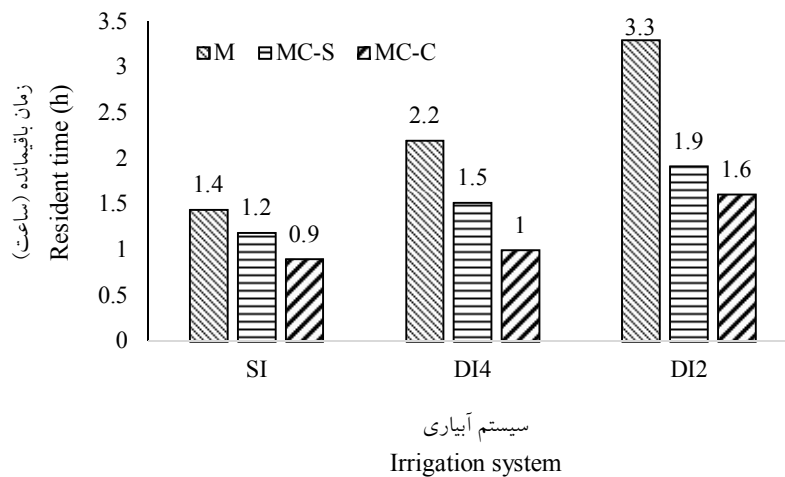
آب در بخش درز و ترک و انتقال سریع‌تر املاح از ماتریکس خاک است. مقایسه نتایج RT در دو سیستم SI و DI2 بیانگر افزایش تقریبی سه برابری RT (زمان سفر آب) در M-DI2 ( $3/35$  ساعت) به سبب کاهش دبی جریان آب در مقایسه با M-SI ( $1/44$  ساعت) است.

مقایسه RT در MC-S و MC-C تحت هر سه سیستم آبیاری نشان می‌دهد تا چه میزان وجود تبادلات جانبی علاوه بر حرکت عمودی آب می‌تواند در افزایش سرعت داری و سرعت انتقال نمک‌ها مؤثر باشد و با توجه به هدف کاربر، سبب افزایش راندمان آبیاری (دیدگاه مثبت به موضوع) یا کاهش راندمان کاربرد کود-آبیاری و افزایش سرعت انتقال آلاینده به سمت سفره‌های آب زیرزمینی (دیدگاه منفی) می‌گردد. به نظر می‌رسد دبی مورد مطالعه در DI2 نتوانسته از تمام ظرفیت مسیرهای عبوری آب در ستون آزمایش استفاده کند و همین امر سبب افزایش زمان سفر آب در ستون آزمایش گردیده است (شکل ۲). یکی از دلایل سرعت بیش‌تر نفوذ آب در مسیرهای درز و ترک در تیمار MC-C به‌غیر از منافذ درشت با اعوجاج کم‌تر، اثر آب‌گریزی بیش‌تر ذرات شن به خاطر سطح ویژه کم ذرات شن در مقایسه با خاک است (۷). با گذشت زمان، با توجه به خاصیت آب‌گریزی بیش‌تر شن بخش درز و ترک، متوسط سرعت نفوذ نهایی در بخش شن درز و ترک بیش‌تر از سرعت متوسط نفوذ نهایی در خاک لوم‌رسی خواهد بود (۱۲).



شکل ۲- متوسط سرعت جریان منفذی نیترات و کلراید در سه سیستم آبیاری.

Figure 2. Average pore velocity of NO<sub>3</sub> and Cl in three irrigation systems.



شکل ۳- زمان باقیمانده در سه سیستم آبیاری.

Figure 3. Resident time in three irrigation systems.

MC-C بیش‌تر از سایر تیمارها بود که به علت دو خصوصیت هدایت‌هیدرولیکی بالای درز و ترک و ارتباط کامل بین درز و ترک و خاک می‌باشد. ایجاد ارتباط بین خاک و درز و ترک سبب افزایش تقریبی ۱/۵ برابری در تعداد حجم منفذی ورودی و خروجی در MC-C-SI در مقایسه با M-SI گردید. افزایش بیش از ۱/۵ برابری  $V_p$  در بخش درز و ترک تیمار MC-C در با M نیز تأییدی مؤکد بر اهمیت بالای

برای بیلان آب و مقایسه اثر جریان ترجیحی، تعداد حجم منفذی ورودی و خروجی که از تقسیم حجم کل ستون خاک به حجم تخلخل خاک به دست می‌آید و معادل تعداد حجم آب در خاک است (۹). در جدول ۳ نشان داده شده است. لازم به ذکر است اختلاف تعداد حجم منفذی ورودی و خروجی، توسط خاک ستون‌های آزمایش جذب شده است. تعداد حجم منفذی ورودی آب به ستون‌های آزمایش



تحرک پذیری املاح در خاک و افزایش تخلخل درشت موجب افزایش انتقال نیترات، افزایش ضریب انتشار و کاهش عدد پکلت (عدد بی بعد و بیانگر نسبت فرایند انتقال توده‌ای به فرایند پخشیدگی و انتشار) (۲) و تأثیر بر هدایت هیدرولیکی اشباع می‌گردد که نتیجه آن جابجایی منحنی رخنه به سمت چپ می‌باشد (۸).

حضور منافذ درشت و افزایش راندمان آبشویی املاح مطلب است که با نتایج پرون و همکاران (۲۰۱۲) مطابقت داشت (۲۵). در پژوهشی که بر روی ستون‌های آزمایش حاوی خاک شور و آهکی بود، کاربرد ۱/۵ حجم منفذی از آب آبیاری منجر به انتقال ۷۰ درصد کل نمک‌های محلول از ستون خاک گردید (۱۱). افزایش تخلخل ریز موجب کاهش

جدول ۳- بیان جرم آب در سه سیستم آبیاری.

Table 3. Water mass balance in three irrigation systems.

| MC-C               |             | MC-S               |             | M           | سیستم آبیاری<br>Irrigation system | پارامتر<br>Parameter                                      |
|--------------------|-------------|--------------------|-------------|-------------|-----------------------------------|---|
| درز و ترک<br>Crack | خاک<br>Soil | درز و ترک<br>Crack | خاک<br>Soil | خاک<br>Soil |                                   |   |
| 19.3               |             | 14.5               |             | 12          | SI                                | تعداد حجم منفذی ورودی<br>The input number of pore volume  |
| 10.1               |             | 8.5                |             | 4.9         | DI2                               |   |
| 16.2               |             | 10.6               |             | 5.5         | DI4                               |   |
| 6.5                | 5.5         | 3.7                | 3           | 5.4         | SI                                | تعداد حجم منفذی خروجی<br>The output number of pore volume |
| 3.9                | 2.3         | 2.1                | 1.9         | 1.9         | DI2                               |   |
| 6.2                | 5.6         | 2.6                | 1.9         | 3.9         | DI4                               |   |

ادامه سبب خروج سریع‌تر مرکز ثقل نیترات تحت سیستم آبیاری DI2 در مقایسه SI و DI4 شده است. کاهش سرعت جریان آب در DI2، به علت رخ دادن فرایند پخشیدگی در شرایط غیراشباع، توانسته است تأثیر مثبتی بر سرعت انتقال نیترات داشته باشد. این درحالی‌که در سیستم آبیاری DI4 به مانند SI (برعکس سیستم آبیاری DI2) زمان سفر آنیون کلراید کم‌تر از نیترات بود. نوسانات غلظت شدید نیترات و کلراید ناشی از الگوهای موقت زمانی رسوب و جذب می‌تواند تأثیر زیادی بر زمان سفر آن‌ها به سمت آب‌های زیرزمینی داشته باشد (۳۳). بر همین اساس در سیستم آبیاری SI به ترتیب شاهد کاهش ۸ و ۴۱ دقیقه زمان رسیدن نیترات به ترتیب در بخش خاک و

در این پژوهش، کاهش زمان سفر کلراید (معیاری از املاح ردیاب) در مقایسه با آلاینده نیترات در کلیه تیمارها تحت هر دو سیستم آبیاری SI و DI4 به جز DI2 مشاهده شد. کلراید به علت ماهیت شیمیایی خود از طریق جریان توده‌ای در سرعت‌های بالای آب انتقال می‌یابد درحالی‌که انتقال نیترات در بدنه خاک، بیشتر توسط مجموع فرایندهای پخشیدگی و توده‌ای صورت می‌گیرد (۱، ۲۰). براساس نتایج حاصله، تیمارها تحت DI2، انتقال کلراید در مقایسه با نیترات کندتر صورت گرفت (جدول ۴). در این پژوهش مشخص گردید طولانی‌تر بودن شرایط غیراشباع خاک در ساعات اولیه مرحله اول انتقال سبب خروج بیشتر نیترات و افزایش راندمان آبیاری گردید که در

در مقایسه با نیترات نشان داد که می‌توان با در نظر گرفتن نتایج حاصل بیان کرد در پروژه‌های مدیریتی انتقال در صورت کاربرد سیستم‌های آبیاری با سرعت بالای جریان آب، کلراید زودتر از خاک خارج می‌گردد. از دیدگاه دیگر، می‌توان به همان نسبت از سرعت بالای انتقال کلرایدها ناشی نمک‌ها در زمین‌های شور به سمت زهکش‌ها نگران بود که با نتایج وان در ولد و همکاران (۲۰۱۰) مطابقت داشت (۳۳). سایر پژوهش‌ها بر روی زمان رسیدن دو آنیون کلراید و نیترات در حوزه آبخیز نشان می‌دهد که زمان رسیدن نیترات و زمان رسیدن به پیک غلظت نیترات در یک حوزه آبخیز حدود ۲۰ روز است در حالی‌که برای آنیون کلراید زمان سفر و زمان رسیدن به پیک غلظت کم‌تر از ۲۰ روز است (۳۳).

درز و ترک تیمار MC-C در مقام مقایسه با M شد (شکل ۵). دلیل این امر را می‌توان به علت غالبیت کامل جریان‌های توده‌ای و ترجیحی و جریان سریع‌تر در منافذ درشت تا انتهای ستون دانست که بیانگر اهمیت ساختمان خاک، مسیرهای ترجیحی و شرایط جریان در انتقال نمک‌ها می‌باشد (۶). زمان سفر آلاینده نیترات در بخش خاک تیمار MC-S-DI2 در مقایسه با M-DI2 و MC-C-DI2 کم‌تر بود (جدول ۴). طولانی‌تر شدن شرایط غیراشباع اولیه خاک در ساعات اولیه آبهویی سبب تخلیه بیش‌تر آنیون نیترات و انتقال از خاک تیمار MC-S شده است و همین امر سبب کاهش زمان سفر نیترات در این تیمار در مقایسه با سایر سیستم‌های آبیاری شد.

در مجموع، زمان رسیدن کلراید در M-SI کاهش ۱۹ دقیقه (زودآبی) و کاهش ۱۷ دقیقه در M-DI4

جدول ۴- زمان سفر نیترات و کلراید در سه سیستم آبیاری.

Table 4. Travel time of NO<sub>3</sub> and Cl in three irrigation systems.

| MC-C               |             | MC-S               |             | M           | سیستم آبیاری<br>Irrigation system | واحد<br>Unit | پارامتر<br>Parameter      |
|--------------------|-------------|--------------------|-------------|-------------|-----------------------------------|--------------|---------------------------|
| درز و ترک<br>Crack | خاک<br>Soil | درز و ترک<br>Crack | خاک<br>Soil | خاک<br>Soil |                                   |              |                           |
| 0:58               | 1:31        | 1:54               | 1:42        | 1:39        | SI                                |              |                           |
| 1:36               | 1:17        | 1:20               | 1:10        | 0:53        | DI2                               |              | نیترات<br>NO <sub>3</sub> |
| 1:06               | 1:20        | 1:22               | 1:19        | 1:48        | DI4                               |              | زمان سفر<br>Travel time   |
| 0:55               | 1:30        | 1:31               | 1:34        | 1:20        | SI                                | h: min       |                           |
| 1:36               | 1:37        | 1:12               | 1:43        | 1:15        | DI2                               |              | کلراید<br>Cl              |
| 1:32               | 1:22        | 1:06               | 1:42        | 1:21        | DI4                               |              |                           |

زمان تزریق بیش‌ترین تأثیر را بر زمان سفر آلاینده نیترات در سیستم‌های آبیاری داشته است. در مجموع، به نظر می‌رسد متوسط سرعت جریان منفذی بالا به علت سرعت بالای دارسی آب و استفاده از ظرفیت تمام منافذ و مسیرهای عبوری آب و املاح در خاک و درز و ترک‌ها سبب خروج زود هنگام مرکز ثقل

زمان سفر کوتاه‌تر آنیون کلراید غیرقطعی و متغیر می‌باشد و به تخلخل محیط و اندازه سلول مطالعه بسیار حساس می‌باشد. با توجه به مدت زمان و شرایط اجرای آزمایش به نظر می‌رسد دو عامل دینامیک جریان آب در منافذ ریز و درشت و وقوع جریان‌های ترجیحی و غلظت نیترات محلول نمکی در مدت

اصلی افزایش بیلان جرمی نیترات انتقال یافته در بخش درز و ترک می باشد (جدول ۵). در شرایط خاک مرطوب، جریان های ترجیحی در خاک تسریع می یابد، چراکه جریان های افقی در خاک کاهش می یابد و در نتیجه جریان های عمودی در مسیرهای جریان ترجیحی افزایش می یابد (۱۷). در تیمار MC-C-SI جرم نیترات انتقال یافته از بخش درز و ترک بیش از ۲/۸ برابر از نیترات انتقال یافته خاک بود (جدول ۴). در سیستم آبیاری DI4 نیز مانند SI، متوسط سرعت جریان منفذی بیش تر از DI2 بوده و در نتیجه سهم نیترات انتقال یافته از تیمار M بیش از ۲ برابر بود. جرم نیترات انتقال یافته در تیمار M-DI2 از ۹۴/۱ (mg l<sup>-1</sup>) به ۲۰۱/۹۶ و ۲۲۳/۴۱ (mg l<sup>-1</sup>) به ترتیب در تیمارهای M-SI و M-DI4 رسید (جدول ۵). بنابراین با توجه به حجم آب آبیاری مورداستفاده و بیلان جرمی انتقال یافته نیترات در سیستم آبیاری SI در خاک دارای درز و ترک، این سیستم از نظر اقتصادی مناسب برای این خاک ها نیست.

کلراید شد و در سیستم آبیاری DI2 با طولانی مدت بودن شرایط غیراشباع و راندمان بالای آبیاری در مرحله اول آبتشویی سبب خروج زودآبی نیترات شد. بیلان جرمی آلاینده های نیترات و کلراید با محاسبه ممنتوم صفر در طی ۶ ساعت از کل ۱۷ ساعت آبیاری که خاک کاملاً اشباع شده و به شرایط یکسان اشباع خاک رسیده بود محاسبه گردید. سهم نیترات انتقال شده در کلیه تیمارها کم تر از ۵۰٪ نیترات تزریقی در طی ۲ ساعت آبیاری با محلول نمکی بود (جدول ۵) که فقط از تغییرات V<sub>D</sub> و V<sub>P</sub> (شکل ۳) در محیط نشات می گیرد. بر اساس نتایج حاصله بیش ترین تزریق محلول نمکی به ترتیب در سیستم های آبیاری SI، DI4 و DI2 بود. حضور درز و ترک در تیمارهای MC-S و MC-C سبب تسریع جریان های ترجیحی و عمودی در طول درز و ترک ستون های آزمایش و افزایش بیلان جرمی آنیون های انتقال یافته است. V<sub>P</sub> در بخش درز و ترک در تیمارهای MC-S و به ویژه MC-C افزایش تقریبی ۱/۵ برابری در مقایسه با تیمار M داشت که دلیل

جدول ۵- بیلان جرم نیترات در سیستم های آبیاری (میلی گرم).

Table 5. NO<sub>3</sub> mass balance in three irrigation system (mg).

| MC-C               |             | MC-S               |             | M           | سیستم آبیاری<br>Irrigation system | پارامتر<br>Parameter  |
|--------------------|-------------|--------------------|-------------|-------------|-----------------------------------|---|
| درز و ترک<br>Crack | خاک<br>Soil | درز و ترک<br>Crack | خاک<br>Soil | خاک<br>Soil |                                   |   |
| 2288               |             | 1760               |             | 1408        | SI                                | جرم نیترات تزریق شده<br>Injected NO <sub>3</sub> mass       |
| 1760               |             | 1232               |             | 880         | DI2                               |   |
| 1936               |             | 1408               |             | 1232        | DI4                               |   |
| 475                | 166.8       | 238.1              | 258.2       | 223.4       | SI                                | جرم نیترات انتقال یافته<br>Transported NO <sub>3</sub> mass |
| 195.4              | 66.8        | 77.4               | 58.9        | 94.1        | DI2                               |   |
| 200.4              | 165.2       | 138.8              | 130.2       | 201.9       | DI4                               |   |

به‌طرف قسمت انتهایی لایه درشت منفذ فیلترها حرکت می‌کند. از آنجایی که لایه‌های درشت منفذ معمولاً به‌صورت عمودی قرار گرفته‌اند، یک گرا دیان غلظت در جهت افقی ایجاد گردیده و موجب شده که محلول علاوه بر نفوذ بیشتر به اعماق خاک، به‌صورت جانبی از لایه‌های درشت منفذ به سمت ماتریکس نیز حرکت کند (۳۲). براساس جدول ۶، مشخص گردید که علاوه بر آبخویی ۱۰۰ درصدی کلراید تزریقی در تیمارها (به‌جز تیمارهای M-DI2 و M-DI4) کلراید موجود در ماتریکس خاک نیز به مقدار قابل‌توجهی دچار آبخویی شده است.

کاربرد سیستم‌های آبیاری SI در طی ۶ ساعت عملیات آبیاری در همه تیمارهای مورد مطالعه قادر به آبخویی کامل کلراید تزریقی محلول نمک بود ولی در تیمارهای DI2 و DI4 به‌جز M-DI2 و M-DI4 آبخویی کامل کلراید محلول نمکی صورت گرفت. کلراید انتقال‌یافته در تیمار MC-C از مجموع دو بخش درز و ترک بیشتر از سایر تیمارها در همه سیستم‌های آبیاری بود (جدول ۶). در حقیقت به دلیل حضور درز و ترک در بخش ماتریکس خاک، کلراید مسیر عبوری در خاک را میان‌بر می‌زند. در چنین شرایطی املاح در یک‌زمان کوتاه از سطح خاک

جدول ۶- بیان جرم کلراید در سیستم‌های آبیاری (میلی‌گرم).

Table 6. NO<sub>3</sub> mass balance in three irrigation system (mg).

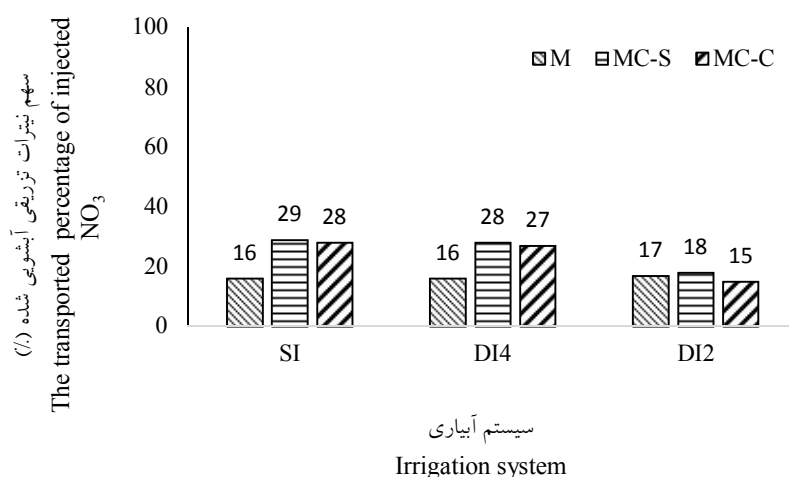
| MC-C               |             | MC-S               |             | M           | سیستم آبیاری<br>Irrigation system | پارامتر<br>Parameter                           |
|--------------------|-------------|--------------------|-------------|-------------|-----------------------------------|--|
| درز و ترک<br>Crack | خاک<br>Soil | درز و ترک<br>Crack | خاک<br>Soil | خاک<br>Soil |                                   |  |
| 803.4              |             | 610                |             | 494         | SI                                |  |
| 618                |             | 432.6              |             | 309         | DI2                               | جرم کلراید تزریق شده<br>Injected Cl mass       |
| 679.8              |             | 494.4              |             | 432.6       | DI4                               |  |
| 857                | 458         | 420.8              | 398.7       | 612.3       | SI                                |  |
| 615.2              | 571.7       | 637.2              | 327.5       | 202.9       | DI2                               | جرم کلراید انتقال‌یافته<br>Transported Cl mass |
| 562.5              | 348.9       | 444.9              | 242.1       | 201.9       | DI4                               |  |

به‌علت افزایش رطوبت و افزایش واکنش بین دو ناحیه خاک و درز و ترک افزایش می‌یابد (۱۳). هدایت هیدرولیکی متوسط خاک و دست‌خورده بودن خاک، حضور درز و ترک نیز مزید بر علت افزایش راندمان آبخویی املاح می‌باشد. افزایش متوسط سرعت جریان منفذی در تیمار MC-C در مقام مقایسه با تیمار M سبب افزایش قابل‌توجه آبخویی جرم نیترات و کلراید گردید.

مقایسه جدول‌های ۴ و ۵ نشان می‌دهد راندمان آبخویی کلراید بیش‌تر از نیترات بود، چراکه نیترات بیش‌تر از کلراید در مکان‌های ریز خاک گیر افتاده و در نتیجه تأخیر در خروج آن از خاک مشاهده گردید. غیرجذبی بودن کلراید این پیام را برای کارشناسان آبیاری و کشاورزانی که هدف آن‌ها از آبیاری فقط آبخویی کلراید اضافی خاک است را دارد که با کاربرد حجم کم آب آبیاری تکمیلی به نتایج خوبی از راندمان آبخویی دست یافت. با گذشت زمان مقدار آن

تیمار MC-C و عدم امکان ورود نیترات انتقال یافته از ماتریکس خاک به مسیرهای عبوری بخش درز و ترک می‌توان نتیجه گرفت جریان‌ات عمودی و جریان‌ات جانبی در عبور آنیون‌ها به سمت آب‌های زیرزمینی بسیار مؤثرتر هستند که بیانگر اهمیت جریان‌های توده‌ای و ترجیحی در مقایسه با فرایند پخشیدگی در شرایطی که سرعت حرکت آب و رطوبت خاک زیاد است. همین مسأله سبب شده که درصد سهم نیترات انتقال یافته از خاک در سیستم آبیاری SI و DI4 بین ۱۲ و ۱۳٪ یابد، در صورتی DI2 افزایش درصد سهم نیترات انتقال یافته از تیمارها چندان نبود چراکه در این تیمار احتمال وقوع جریان ترجیحی و شدت آن کم‌تر از دو سیستم آبیاری دیگر است (شکل ۴).

در مقایسه اثر سیستم‌های آبیاری بر انتقال نیترات، شکل ۴، سهم نیترات انتقال یافته پس از قطع تزریق محلول نمکی در همه تیمارها نشان می‌دهد. سهم نیترات انتقال یافته پس از قطع تزریق محلول نمکی در همه تیمارها و در سیستم‌های مختلف آبیاری کم‌تر ۳۰٪ بود که بیانگر تمایل بیش‌تر جذب نیترات توسط مکان‌های جذبی در خاک می‌باشد (۲۳). مقایسه نتایج سهم نیترات انتقال یافته در تیمارهای M و MC-C نشان می‌دهد که نیترات در مقایسه با کلراید به شدت تحت تأثیر حضور درز و ترک و وجود جریان‌ات عمودی و ترجیحی در طول ستون خاک است. از بررسی نتایج تیمار M در شرایط حذف کامل تبادلات جانبی و عمودی بین بخش درز و ترک در مقایسه با



شکل ۴- مقایسه اثر سیستم‌های آبیاری بر انتقال بیلان جرمی نیترات تزریقی.

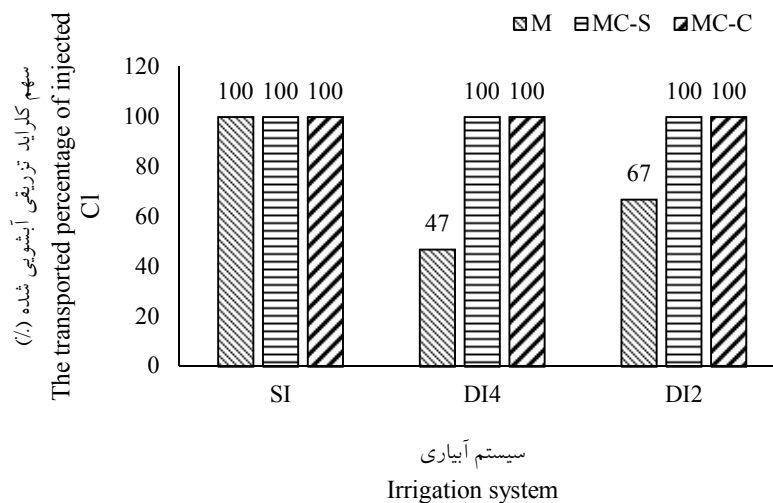
Figure 4. A comparison of the effects of irrigation systems on transportation of the injected  $\text{NO}_3$  mass balance.

با SI ناشی از دو علت متوسط سرعت جریان منفذی کم‌تر، حجم آب ورودی کم‌تر و عدم حضور درز و ترک و نبودن مسیرهای عبوری با منافذ درشت در ستون آزمایش است. در تیمار M-DI2، خاک با سرعت کم‌تری به شرایط اشباع می‌رسد و راندمان حذف نمک‌ها (راندمان آبشویی) در شرایط غیراشباع در مقایسه با اشباع به‌علت عبور آب از منافذ ریز

برای مقایسه اثر سیستم‌های آبیاری بر انتقال کلراید، در DI2 حتی با وجود دبی کم مانند دو سیستم آبیاری دیگر آبشویی ۱۰۰ درصدی سهم کلراید خالص اضافه‌شده از منبع محلول نمکی تزریق شده در طی دو ساعت، در تمامی تیمارها به‌جز M-DI2 و M-DI4 صورت گرفته است (شکل ۵). کم‌تر بودن جرم کل کلراید انتقال یافته در DI4 و DI2 در مقایسه

در صورت عدم حضور هرگونه آنیون مزاحم دیگر، می‌توان با کاربرد حجم کم آب آبیاری تکمیلی مانند DI2 به نتایج خوبی از راندمان آبخوئی دست یافت. دلیل این پدیده را می‌توان در راندمان بالاتر آبخوئی کلراید خاک در مرحله اولیه آبخوئی در طی ۷ ساعت به‌علت طولانی بودن شرایط غیراشباع دانست. در شرایط غیراشباع در مقایسه با اشباع عبور آب از منافذ ریز بیشتر است و نهایتاً در طولانی‌مدت به غلظت یکسانی می‌رسند که این نشانگر از بین رفتن اثر منافذ درشت بر انتقال مواد در نتیجه ادامه آبخوئی و انتقال عمده آن‌ها از راه جریان از خاک بود. در مجموع مشخص گردید که غلظت کلراید همراه زه‌آب بیش از ۹۰٪ آن مربوط منبع خاک است (۳۵).

بیش‌تر است (۶) درصد کلراید تزریقی انتقال‌یافته در تیمار M-DI2 ۶۶٪ و در مقایسه با M-DI4 (۴۷٪) بیش‌تر بود. این روند در MC-S-DI2 نیز قابل‌مشاهده بود. هم‌چنین چون در این سیستم آبیاری مقدار کلراید تزریقی کم‌تر از ظرفیت عبوری مسیرهای جریان آب بوده، تمام کلراید تزریقی به‌علاوه بخش اعظمی از کلراید خاک در مقایسه با دو تیمار دیگر آبیاری آبخوئی شدند. نکته قابل‌توجه، راندمان بالای ۱۰۰ درصد آبخوئی کلراید تزریقی در اکثر تیمارها تحت سه سیستم آبیاری می‌تواند گویای این پیام باشد آنیون کلراید به‌علت ماهیت غیرجذبی بودن، در صورتی‌که هدف کاربران کشاورزی از عملیات آبخوئی فقط کلراید از خاک‌های شور با منشأ کلریدسديم باشد و



شکل ۵- مقایسه اثر سیستم‌های آبیاری بر انتقال بیلان جرمی کلراید تزریقی.

Figure 5. A comparison of the effects of irrigation systems on transportation of the injected Cl mass.

افزایش جریان‌های توده‌ای در منافذ درشت‌تر خاک با سرعت بیش‌تر گردید. نیترات به دلیل ماهیت شیمیایی خود بیش‌تر تحت‌تأثیر جذب توسط مکان‌های جذبی ذرات خاک قرار می‌گیرد و در بخش محلول خاک کم‌تر از کلراید حضور دارد، بنابراین سهم آبخوئی محلول نیترات تزریقی پس از قطع تزریق محلول

### نتیجه‌گیری کلی

بیش‌ترین سرعت داری و متوسط سرعت جریان منفذی به‌ترتیب در سیستم‌های آبیاری SI، DI4 و DI2 مشاهده شد. در سرعت‌های بالاتر آب ناشی از دبی بیش‌تر مثل SI، بیلان جرم نیترات و کلراید منتقل‌شده بیش‌تر بود چراکه افزایش دبی آب سبب

و ترک‌دار با هدف جلوگیری از آبشویی کودهای ازته، مناسب‌تر هستند.

### تقدیر و تشکر

از دانشگاه شهرکرد به دلیل حمایت مالی از این پژوهش در قالب رساله دکتری نویسنده اول سپاسگزاری می‌گردد.

### داده‌ها و اطلاعات

مقاله شامل اطلاعات و داده‌های پایان‌نامه مقطع دکتری مهندسی آب دانشگاه شهرکرد، دانشکده کشاورزی، گروه مهندسی آب در سال ۱۳۹۸-۱۳۹۹ است.

### تعارض منافع

تضاد منافع وجود ندارد و این مسأله مورد تأیید همه نویسندگان است.

نمکی کم‌تر از ۳۰ درصد بود درحالی‌که سهم ۱۰۰ درصدی آبشویی کلراید به علت ماهیت غیرجذبی در همه تیمارها به‌جز M-DI2 و M-DI4 مشاهده شد. همچنین در سیستم آبیاری DI2 سهم کلراید انتقال‌یافته بیش‌تر از SI و DI4 گردید. افزایش تدریجی رطوبت خاک و سرعت حرکت آب در خاک در سیستم‌های آبیاری SI و DI4، دفع نترات از سطح ذرات خاک بیش‌تر و انتقال بیلان جرمی به اعماق سریع‌تر شد. زمان سفر کلراید از نترات در چنین شرایطی کوتاه‌تر بود. بر اساس نتایج حاصل برای مسیرهای جریان سریع (درز و شکاف) زمان سفر کوتاه و انحراف بزرگ در توزیع زمان سفر را می‌توان انتظار داشت (۲۷). در مجموع می‌توان گفت، بر اساس دو شاخص، راندمان آبشویی و مصرف آب، به ترتیب سیستم‌های آبیاری DI4 و DI2 در زمین‌های کشاورزی آلوده به نترات و زمین‌های کشاورزی درز

### منابع

1. Abbasi, F. 2013. Advanced Soil Physics. University of Tehran Press. 3<sup>rd</sup> Edition. 334p.
2. Ahmadimoghadam, Z., and Tabatabaei S.H. 2021. Evaluation of CDE and MIM models to transfer Trichloroethylene (TCE) in a carbonate porous media using inverse solution method. Amirkabir Journal of Civil Engineering. 53 :1. 393-404. <https://dx.doi.org/10.22060/ceej.2018.13256.5356>. (In Persian)
3. Akhavan, S., Ebrahimi, S., Navabian, M., Shabanpour, M., Mojtahedi, A., and Movahedi Naeni, A. 2018. Significance of physicochemical factors in the transmission of Escherichia coli and chloride. Environmental Health Engineering and Management J. 5: 2. 115-122.
4. Al-Darby, A., and Abdel-Nasser, A. 2006. Nitrate leaching through unsaturated soil columns: comparison between numerical and analytical solution. Journal of applied sciences. 6: 4. 735-743.
5. Alef, K., and Nannipieri, P. 1995. Methods in applied soil microbiology and biochemistry. Academic Press, London. 576p.
6. Amiri, E., Mahboubi, A.A., Mosaddeghi, M.R., and Shirani, H. 2014. Breakthrough curve of bromide as affected by soil structure in saturated and unsaturated conditions. J. Sci. Technol. Agric. Natur. Resour. Water and Soil Sci. 18: 68. 111-120. (In Persian)
7. Arye, G., Tarchitzky, J., and Chen, Y. 2011. Treated wastewater effects on water repellency and soil hydraulic properties of soil aquifer treatment infiltration basins. J. of Hydrology. 397: 136-145.
8. Asghari, Sh., Abbasi, F., Neyshabouri, M.R., Oustan, Sh., and Aliasgharzad, N. 2011. Effects of four organic soil condition on some hydraulic and solute transport parameters in a sandy loam soil. J. of Water and Soil Conservation. 18: 2. 177-192. (In Persian)

9. Azadifar, H., Moazed, A., Soltani Mohammadi A., and Farrokhian Firouzi A. 2015. The Effect of Soil Texture and Transmission Distance on The Nitrate Dispersivity in Sandy Soil Using Brigham, Fried-Combernous Models and CXTFIT code. *Science and Irrigation Engineer.* 39: 4. 147-157. (In Persian)
10. Bagheri, H., and Zare Abyaneh, H. 2017. Simulation of Nitrate and Sodium Transport in Soil Treatment with Vermicompost Under Different Irrigation Regimes. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage.* 5: 11. 888-899. (In Persian)
11. Behbahani Zadeh Rezaian, Z., Pazira, A., Panahpour, A., and Zarabi, N. 2017. Comparison of different leaching ways of solute from salinity and sodic soil profil. *J. of Science and Water Engineer. Azad Islamic university. Ahvaz Branch.* 7: 15. 81-95. (In Persian)
12. Beyrami, H., Neyshabouri, M.R., Nazemi, A.H., and Abbasi, F. 2014. Effects of soil water repellency on infiltration characteristics of two Sandy Loam and Clay Loam soils. *J. of Water and Soil Science.* 25: 2. 181-192. (In Persian)
13. Bogner, C., Borken, W., and Huwe, B. 2012. Impact of preferential flow on soil chemistry of a podzol. *Geoderma.* 175: 37-46.
14. Delbari, M., Talebzadeh, M., Naghavi, H., and Gholamalizadeh, A. 2012. Salt Leaching Process in saline soils through disturbed soil columns. *science and Research J. of water and irrigation engineer.* 2: 4. 54-65. (In Persian)
15. Emami, A. 2012. Evaluation effect of nitrate fertigation and frequency on nitrate leaching and distribution in soil. *Water and Soil Journal,* 26: 3. 545-553.
16. Gibert, O., Hernández, M., Wefer-Roehl, A., Wefer-Roehl, Ch., and Leitão, T. 2015. Guidelining protocol for soil-column experiments assessing fate and transport of trace organics. 7p.
17. Hardie, M., Lisson, S., Doyle, R., and et al. 2013. Determining the frequency, depth and velocity of preferential flow by high frequency soil moisture monitoring. *Journal of Contaminant Hydrology.* 144: 1. 66-77.
18. Kafil, M., Moazed, H., and Moradzadeh, M. 2018. Simulation of nitrate and ammonium ions leaching in a sandy loam soil using analytical and numerical models. *J. of Water and Soil Conservation,* 25: 3. 255-267. (In Persian)
19. Klute, A. 1986. Methods of soil analysis. Part 1-Physical and Mineralogical Methods. 2nd. ed Agronomy Monograph No 9: American Society of Agronomy/Soil Science Society of America (Ed. A Klute), Madison, Wisconsin. 1188p.
20. Lalehzari, R., Tabatabaei, S.H., and Kholghi, M. 2013. Simulation of nitrate transport and wastewater seepage in groundwater flow system. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 10: 1367-1376.
21. Mori, Y., and Hirai, Y. 2014. Effective Vertical Solute Transport in Soils by Artificial Macropore System. *J. of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste,* 18: 2. 1-7.
22. Morkani, M., Nasrollahi, M., Ravanbakhs, M., Bahrami, P., and Jafarzadeh Haghghi Fard, N. 2015. Evaluation of natural zeolite clinoptilolite efficiency for the removal of ammonium and nitrate from aquatic solutions. *Environmental Health Engineering and Management J.* 2: 1: 17-22.
23. Nabipour, M., Emami, H., and Astaraei, A. 2012. The effect of N-fertilize source and irrigation period on nitrate leaching and distribution in soil profil. The 1<sup>th</sup> international conference on water management in farm. Karaj. 350p. (In Persian)
24. Nelson, D.W., and Sommers, L.E. 1996. Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical Methods. Soil Science Society of America Book Series No. 5. pp. 961-1010.
25. Peron, H., Hueckel, T., Laloui, L., and Hu, L.B. 2012. Formation of drying crack patterns in soils: a deterministic approach. *Acta Geotechnica.* 8: 215-221



26. Peterson, E.W., and Wicks, C.M. 2005. Fluid and solute transport from a conduit to the matrix in a carbonate aquifer system. *Mathematical Geology*. 37: 8. 851-867.
27. Ramzani, Z., Vaezi, A., Mohamadi, M.H., and Babaei, F. 2017. The effect of crust and surface crack on saturation hydraulic conductivity of soil. *Research J. of water and soil of Iran*. 48: 3. 565-572. (In Persian)
28. Rinaldo, A., Beven, K.J., Bertuzzo, E., Nicotina, L., Davies, J., Fiori, A., Russo, D., and Botter, G. 2011. Catchment travel time distributions and water flow in soils. *Water Resources Research J.* 47: 1-13.
29. Tabatabaei, S.H., and Lalehzari, R. 2009. Determination of the contaminant sources by mapping tools in Shahrekord aquifer Iran. *International Groundwater Symposium, Thailand*. Pp: 914-922.
30. Tabatabaei, S.H., Mousavi, S.M., Mirlatifi, S.M., Sharifnia, R.S., and Pesarakli, M. 2017. Effects of municipal wastewater on soil chemical properties in cultivating Turfgrass using subsurface drip irrigation. *Journal of Plant Nutrition*. 40: 1133-1142.
31. Tabatabaei, S.H., Nourmahnad, N., Golestani Kermani, S., Tabatabaei, S.A., Heidarpour, M., and Najafi, P. 2020. Urban wastewater reuse in agriculture for irrigation in arid and semi-arid regions - A review. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*. 9: 193-220.
32. Taran, F., Ashraf Sadraddini, A., and Nazemi, A.H. 2016. Laboratory study of the influence of continuous and non-continuous macropore layers on solute transport in soil. *J. of Water and Soil Conservation*. 6: 3. 113-125. (In Persian)
33. Van der Velde, Y., Rooij, G.H., Rozemeijer, J.C., and Van Geer, F.C. 2010. Nitrate response of a lowland catchment: On the relation between stream concentration and travel time distribution dynamics. *Water Resources Research J.* 46: 1-17.
34. Wang, Y., Bradford, S.A., and Simunek, J. 2014. Physicochemical factors influencing the preferential transport of *Escherichia coli* in soils. *Vadose Zone J.* 13: 1-10.
35. Yousefi, G., Safadoust, A., Mosaddegh, M.R., and Mahboubi, A.A. 2012. Long-term cropping and soil texture effects on lithium and bromide transport under unsaturated flow conditions. *J. Sci. Technol. Agric. Natur. Resour. Water and Soil Sci.* 17: 65. 89-99. (In Persian)
36. Zhang, Y., Zhang, Z., Ma, Z., Chen, J., Akbar, J., Zhang, S., CheCh Zhang, M. and Cerdà, A. 2018. A Review of Preferential Water Flow in Soil Science. *Canadian J. of Soil Science*. 98: 4. 604-618.



## Effect of drip and surface irrigation systems on contaminant transport in a soil affected by cracking pathway

Z. Nazem<sup>1</sup>, S.H. Tabatabaei<sup>\*2</sup>, A.R. Hosseinpour<sup>3</sup>, P. Najafi<sup>4</sup> and M. Ghobadinia<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Ph.D. Student, Dept. of Water Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran,

<sup>2</sup>Associate Prof., Dept. of Water Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran,

<sup>3</sup>Professor, Dept. of Soil Science and Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran,

<sup>4</sup>Associate Prof., Dept. of Water Engineering, Isfahan Branch (Khorasgan), Islamic Azad University, Isfahan, Iran,

<sup>5</sup>Assistant Prof., Dept. of Water Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

Received: 02.21.2021; Accepted: 06.07.2021

### Abstract

**Background and Objectives:** The contaminant mass balance in a soil profile is highly necessary in long term agriculture management under different irrigation systems. The objective of this research was assessment of the preferential flow on the travel time and mass balance of NO<sub>3</sub> under two irrigation systems.

**Materials and Methods:** Nine PVC-columns were employed with a 60 cm length and 16 cm diameter. Each column included 50 cm height of clay loam soil and two cracks with 50 cm length and 1 cm diameter that filled by coarse sand. The treatments were based on two groups at three levels. The main group was crack: soil with blocked cracks (M); soil with remove lateral infiltration to cracks (MC-S); soil with lateraled and vertical correlation and infiltration with cracks (MC-C). The subgroup was irrigation systems: surface irrigation (SI) with 2 cm water constant height and surface drip irrigation system (DI4 & DI2) with 2 and 4 l/h flux, respectively. Each experiment column was irrigated for 6 hours (1 h with distilled water; 2h with solution consist of 176 (mg) of NO<sub>3</sub> and 61.8 (mg) of Cl in 1 liter distilled water and finally 3 h with distilled water). Before the start of experiment, each column was irrigated with distilled water for 5 h to reach saturation condition. The drainage water separately collected from soil and cracks every 15, 30 and 60 min.

**Results:** The results showed the value of mass balance of NO<sub>3</sub> and Cl in SI and DI4 irrigation systems were not significantly different. Based on the results, the mass of NO<sub>3</sub> of drainage water in M in DI2 was approximately half that of SI and DI4. Whiles, this mass of transported Cl in DI2 irrigation system was higher than other irrigation systems. Also, the travel time of Cl in MC-C treatment, in crack section, was shorter than that of NO<sub>3</sub>. On the other hand, the results show the mass balance of these anions that transported from crack section was more than 1.5 times that of other treatments, which emphasizes the role of the vertical flows in course paths of crack in the transport of contaminants such as NO<sub>3</sub> and Cl toward groundwater.

**Conclusion:** Over all, under high water velocity as SI, NO<sub>3</sub> is transporting more rapidly but under condition with low water velocity like as DI2 with longer time of unsaturation condition, Cl is leaching more. The preferential flows in treatment with full interaction between soil matrix and cracks were happen more. Also, the preferential flow has stronger role to transport of Cl than NO<sub>3</sub>.

**Keywords:** Mass balance, NO<sub>3</sub>, Preferential flow, Surface drip irrigation

\* Corresponding Author; Email: tabatabaei@sku.ac.ir