

نقش ریشه گیاه در انتقال کلرید در خاک تحت شرایط جریان اشباع

مولود عالیپورشهینی^۱، احمد فرخیان فیروزی^{۲*}، علی کرابی^۳ و حسین معتمدی^۴

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز

۲- استادیار، گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز

۳- کارشناسی ارشد، گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز

۴- دانشیار، گروه میکروبیولوژی، دانشکده علوم، دانشگاه شهید چمران اهواز

تاریخچه مقاله	چکیده
دریافت: ۱۳۹۰/۱۱/۱۱ پذیرش: ۱۳۹۲/۱۲/۲۱	منافذ درشت ناشی از رشد ریشه گیاه، مسیرهای آبگذری سریعی را برای انتقال آلاینده‌ها در نیمرخ خاک فراهم می‌کنند. هدف از انجام این پژوهش بررسی کمی اثر ریشه گیاه بر حرکت یون کلرید در شرایط جریان اشباع در خاک بوده است. بدین منظور آزمایشی در قالب طرح کاملاً تصادفی اجرا شد. تیمارها شامل ستون‌های خاک دست‌خورده به ترتیب شاهد (بدون ریشه گیاه)، با ریشه گیاه و با ریشه سه ماه پس از برداشت گیاه ذرت بودند. تعداد ۹ ستون خاک با بافت شن لومی تهیه گردید. منحنی‌های رخنه کلرید در حالت اشباع و به روش بار ثابت اندازه‌گیری شد. از مدل جریان توده‌ای-انتشار (CDE) و مدل روان ساکن (MIM) برنامه کامپیوتری CXTFIT برای شبیه‌سازی حرکت کلرید در خاک استفاده شد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که تفاوت بین ویژگی‌های هیدرولیکی تیمارهای مختلف چشمگیر بود و این تفاوت در سطح ۵ درصد معنی‌دار بود. تفاوت بین پارامترهای انتقال شامل ضریب انتشار آبی املاح (D) و سرعت جریان منفذی (v) در تیمارهای مختلف در سطح ۵ درصد معنی‌دار بود. مقدار پارامتر ضریب انتشار آبی در تیمارهای با ریشه گیاه و با ریشه سه ماه پس از برداشت و به ترتیب ۲/۶۵ و ۳/۷۱ برابر تیمار شاهد بود. سرعت جریان منفذی در تیمارهای با ریشه گیاه و با ریشه سه ماه پس از برداشت به ترتیب ۱/۳۶ و ۱/۵۲ برابر تیمار شاهد بود. نتایج این پژوهش نشان داد که منافذ درشت ناشی از رشد و باقی ماندن ریشه گیاه ذرت تاثیر معنی-داری بر ویژگی‌های هیدرولیکی خاک و انتقال املاح دارد.
کلمات کلیدی: ریشه گیاه، ضریب انتشار آبی، جریان ترجیحی، کلرید، هدایت هیدرولیکی	

*عهده‌دار مکاتبات

E-mail: a.farrokhan@seu.ac.ir

مقدمه

فرآیندی پیچیده بوده و مکانیزم‌های مختلفی بر انتقال املاح در خاک نقش دارند (۱۹). مواد شیمیایی که جهت افزایش عملکرد و بهبود کیفیت گیاهان در اراضی کشاورزی مورد استفاده قرار می‌گیرند، با عبور از

در سال‌های اخیر مدل‌سازی انتقال آلاینده‌های آلی و معدنی و بیولوژیکی از نیمرخ خاک مورد توجه پژوهشگران خاک و آب قرار گرفته است. در کشاورزی صنعتی مقادیر زیادی از کودهای شیمیایی و علف‌کش‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. انتقال املاح در خاک

کشت شده با یونجه در مقایسه با خاک فاقد کشت، میزان نفوذ آب و املاح بیشتر است. گیش و جوری^۶ (۶) در پژوهشی دیگر مشاهده کردند هنگامی که گیاهان به سرعت رشد می کنند، میزان نفوذ کاهش می یابد که این امر به دلیل بسته شدن مسیرهای انتقال املاح در اثر رشد ریشه ها می باشد. در مراحل بعدی رشد، زمانی که ریشه گیاه پوسیده می شود، مسیرهای جریان جهت عبور آب باز می شود.

از جمله آنیون های مناسب برای بررسی حرکت نمک ها، کلرید می باشد. این آنیون به راحتی در خاک آبشویی شده و در واکنش های شیمیایی و بیوشیمیایی شرکت نمی کند و به همین دلیل به عنوان ردیاب مورد توجه قرار گرفته است (۱۷).

ریشه گیاهان، خصوصیات فیزیکی مانند پایداری ساختمان، تخلخل و فعالیت بیولوژیکی را تحت تاثیر قرار می دهد. گرچه تحقیقات بی شماری تاثیر خصوصیات فیزیکی خاک بر رشد ریشه را مورد بحث قرار داده است؛ ولی تحقیقات اندکی در رابطه با توصیف تغییرات خصوصیات خاک در اثر رشد گیاهان زراعی انجام گرفته است.

در خاک های همگن، مدل جریان توده ای-انتشار^۷ (CDE) برای پیش بینی حرکت املاح به کار می رود و از سویی دیگر در صورت وجود ناهمگنی فیزیکی خاک از مدل های غیر تعادلی دو ناحیه ای مانند مدل روان-ساکن^۸ (MIM) در خاک استفاده می شود (۲۷). برنامه های زیادی برای پیش بینی انتقال آب و املاح در خاک ارائه گردیده است. از جمله برنامه های کامپیوتری ارائه شده برای پیش بینی انتقال املاح می توان به دو برنامه CXTFIT (۲۶) اشاره کرد. این دو برنامه معادله ریچاردز را برای حرکت آب در خاک و معادله جریان توده ای-انتشار (CDE) را برای پیش بینی حرکت انتقال املاح

مسیرهای جریان ترجیحی^۱ در نیمرخ خاک سبب آلودگی منابع آب زیرزمینی می شوند (۳).

واژه ی جریان ترجیحی به حرکت سریع و غیریکنواخت^۲ آب و املاح از مسیرهای مشخص در زیر سطح خاک گفته می شود (۲۲). وجود مسیرهای جریان ترجیحی در خاک می تواند موجب از دست رفتن مقدار قابل توجهی آب و موادغذایی مورد نیاز گیاهان شود (۲). مهم ترین عواملی که بر حرکت املاح در خاک اثر

می گذارند عبارتند از؛ بافت، ساختمان و هدایت هیدرولیکی خاک که تحت تاثیر مدیریت و عملیات خاک ورزی قرار دارند. شکاف ها و منافذ درشت ناشی از فعالیت کرم های خاکی و ریشه گیاهان در خاک، مسیرهای آنگذری سریعی را برای انتقال آلاینده ها فراهم می کنند که این مسیرها را مسیرهای ترجیحی گویند. میزان منافذ درشت و پیوستگی آن ها در خاک های با ساختمان خوب و پایداری، تاثیر زیادی بر میزان و شدت این نوع جریان دارد (۸).

نوع گیاه کشت شده و سیستم ریشه ای آن می تواند ویژگی های هیدرولیکی خاک را تغییر دهد و در نتیجه بر حرکت نمک ها تاثیر گذارد (۴). پراکندگی سیستم های ریشه ای در نیمرخ خاک عاملی مهم در تعیین میزان آب و املاح قابل دسترس برای گیاهان است (۱۱).

نتایج پژوهش اسموکر و همکاران^۳ (۲۲) نشان داد که سیستم های ریشه ای مختلف، تاثیری متفاوت بر هدایت هیدرولیکی اشباع خاک دارند؛ همچنین پژوهش های مادسلی و همکاران^۴ (۱۴) نشان داد که سیستم های ریشه ای مستقیم و رو به پایین به دلیل ایجاد مسیرهای پیوسته در خاک سبب انتقال سریع تر املاح و آلاینده ها به آب های زیرزمینی می گردد. در پژوهشی دیگر دیسپارت^۵ (۵) مشاهده کرد که در یک خاک

1- Preferential Flow

2- Non-Uniform

3- Smucker *et al.*

4- Maudsley *et al.*

5- Dispart

6- Gish and Jury

7- Convection-Dispersion Model (CDE)

8- Mobile Immobile Model (MIM)

در انتهای ستون‌های خاک غشایی از جنس پلی‌استایرن و توری فلزی قرار داده شد و با استفاده از حلقه فلزی محکم گردید؛ برای جلوگیری از ایجاد جریان ترجیحی در کناره‌های ستون خاک، دیواره‌های ستون به مواد نفتی آغشته گردید و برای حصول اطمینان از همگنی خاک و لایه‌ای نشدن، هر یک از ستون‌ها با کیف فلزی و به آرامی پر شدند. همچنین لایه نازکی از سنگریزه بر سطح ستون خاک برای جلوگیری از تخریب ساختمان خاک در نتیجه ضربه قطرات آب به هنگام آبیاری قرار داده شد. توزیع اندازه ذرات خاک به روش هیدرومتری، مقدار کربن آلی خاک به روش اکسیداسیون تر و تیتراسیون با فروآمونیم سولفات (۱۶) و ظرفیت تبادل کاتیونی خاک (CEC) با جایگزینی کاتیون‌ها با استات سدیم (NaOAc) در pH ۸/۵ اندازه‌گیری شد (۲۵). پ-هاش در گل اشباع و هدایت الکتریکی (کل املاح محلول) در عصاره اشباع تعیین شد.

انتخاب و کاشت گیاه

گیاه انتخاب شده جهت این پژوهش، ذرت هیبرید *سینگل کراس ۷۰۴ (Sc.704)* بود که کاشت آن در منطقه متداول است. در ده سال گذشته سطح زیر کشت این گیاه در ایران روند صعودی داشته و از ۳۳ هزار هکتار در سال ۱۳۷۴ به ۱۰۰ هزار هکتار در سال ۱۳۸۳ افزایش یافته است. دوره رشد آن از ۱۲۵ تا ۱۳۵ روز است و از گروه دیررس می‌باشد (۹). این آزمایش در سال زراعی ۱۳۸۹-۱۳۹۰ در مزرعه دانشگاه شهید چمران اهواز در ستون‌های خاک دست‌خورده با بافت شن لومی انجام شد. در هر ستون ۵ بذر کاشته شد که پس از استقرار کامل بوته‌ها و کسب اطمینان از رفع خطرات اولیه، اقدام به تنک کردن بوته‌های اضافی گردید و در هر ستون خاک تنها یک بوته باقی گذاشته شد.

پس از اتمام رشد ریشه گیاه در مرحله ۱۱-۱۰ برگی، قسمت هوایی گیاه بریده شد و ستون‌ها جهت آزمایش انتقال کلرید در شرایط جریان اشباع آماده گردیدند. همچنین برای تیمار ستون‌های خاک با ریشه

در خاک مورد استفاده قرار می‌دهند. تفاوت این دو مدل در آن است که مدل CXTFIT این معادلات را به صورت تحلیلی برای شرایط مرزی و اولیه معینی حل می‌کند؛ در حالی که برنامه HYDRUS این معادلات را به صورت عددی حل می‌کند (۲۱).

تاکنون بیشتر پژوهش‌های انجام شده در زمینه بررسی نقش ریشه گیاه بر انتقال املاح، به صورت کیفی بوده است. در این پژوهش تلاش بر آن بوده است که اثر ریشه گیاه تازه و سه ماه پس از برداشت آن بر ویژگی‌های هیدرولیکی خاک و پارامترهای انتقال املاح به صورت کمی مورد بررسی قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

خاک

به منظور مطالعه اثر ریشه گیاه بر انتقال کلرید در خاک، آزمایشی در قالب طرح کاملاً تصادفی با منظور کردن سه تیمار (خاک شاهد، خاک با ریشه گیاه و خاک با ریشه سه ماه پس از برداشت) در ستون‌های خاک دست‌خورده اجرا گردید. در این آزمایش خاک درشت بافت با بافت شن لومی از مزرعه شماره ۲ باغبانی دانشکده کشاورزی دانشگاه شهید چمران اهواز انتخاب شد. به منظور حذف اثر درز و شکاف ناشی از انقباض و انبساط رس، خاک با بافت سبک شن لومی انتخاب گردید. فراوانی ذرات شن، سیلت و رس این خاک به ترتیب ۸۲/۹، ۱۲/۶، ۴/۵ بود. این خاک دارای pH قلیایی ۸/۲ و هدایت الکتریکی ۲/۱۹ دسی‌زیمنس بر متر و غیر شور بود. میزان کربن آلی و کربنات کلسیم معادل در این خاک به ترتیب ۰/۱۲ و ۳۸/۲ درصد و میزان ظرفیت تبادل کاتیونی آن ۸ سانتی‌مول بر کیلوگرم بود. نمونه‌ی خاک نخست هواخشک شده و پس از کوبیدن از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد. تعداد ۹ عدد لوله پلی‌اتیلن با قطر و ارتفاع به ترتیب ۲۴ و ۲۵ سانتی‌متر برش داده شدند. ستون‌های خاک همگن با جرم ویژه ظاهری ۱/۴۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب بازسازی شد (۷).

توده‌ای-انتشار (CDE) بیشترین کاربرد را دارد (۲۱). در مدل جریان توده‌ای-انتشار فرآیند انتقال در اثر دو پدیده جریان توده‌ای و انتشار در نظر گرفته می‌شود و دو عامل v (سرعت جریان در منافذ) و D (ضریب انتشار) بیانگر خصوصیات انتقال محیط خاک می‌باشند. انتقال املاح غیرواکسژنر مانند کلرید عموماً با معادله جریان توده‌ای-انتشار (CDE) بیان می‌شود (رابطه ۱).

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - v \frac{\partial C}{\partial z} \quad (1)$$

که در آن C غلظت نمک در فاز مایع (ML^{-3})، D ضریب انتشار (L^2T^{-1})، v سرعت آب منفذی (LT^{-1})، t زمان و z عمق (L) می‌باشد. پارامترهای v و D با استفاده از روش غیرخطی تخمین پارامتر بر اساس الگوریتم لونیبرگ-مارگورت برآورد شدند (۱۳).

در حالتی که خاک دارای ناهمگنی فیزیکی باشد، مدل غیر تعادلی روان-ساکن (MIM) را می‌توان برای پیش‌بینی انتقال آب و املاح استفاده کرد. مدل روان-ساکن (MIM) برای انتقال عنصر غیر واکسژنر کلرید را می‌توان به شکل (رابطه ۲ و ۳) نوشت (۲۷):

$$\theta_m \frac{\partial C_m}{\partial t} + \theta_{im} \frac{\partial C_{im}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left(D_e \frac{\partial C_m}{\partial z} \right) - \frac{\partial (q_m C_m)}{\partial z} \quad (2)$$

$$\theta_{im} \frac{\partial C_{im}}{\partial t} = \alpha (C_m - C_{im}) \quad (3)$$

که در آن θ_m و θ_{im} به ترتیب رطوبت حجمی در ناحیه روان و ساکن، C_m و C_{im} غلظت املاح در ناحیه روان و ساکن (ML^{-3})، q_m شدت جریان در ناحیه روان (LT^{-1})، α ضریب تبادل جرمی املاح (T^{-1}) بین دو ناحیه روان و ساکن و D_e ضریب انتشار است.

شکل بدون بعد این معادله به صورت زیر است (۱۶):

$$\beta R \frac{\partial C_1}{\partial T} = \frac{1}{P} \frac{\partial^2 C_1}{\partial Z^2} - \frac{\partial C_1}{\partial Z} - \omega (C_1 - C_2) \quad (4)$$

سه ماه پس از برداشت، ستون‌ها به مدت ۳ ماه در شرایط مزرعه نگهداری شدند (۲۴).

تیمارهای مورد مطالعه شامل ستون‌های خاک شاهد (بدون گیاه)، ستون‌های خاک با ریشه تازه گیاه و ستون‌های خاک با ریشه سه ماه پس از برداشت گیاه ذرت بودند. شایان ذکر است که در مدت زمان آزمایش تیمارها به طور یکسان آبیاری شدند.

آزمایش انتقال کلرید

آزمایش انتقال کلرید به گونه‌ای طراحی شد که جریان اشباع پایدار با شیب هیدرولیکی واحد (جریان ثقلی) در طول ستون خاک برقرار شود. برای اندازه‌گیری ضریب هدایت هیدرولیکی اشباع ماندگار به روش بار ثابت اندازه‌گیری شد (۱۰).

بدین منظور بار آبی به ارتفاع کمتر از ۵ میلی‌متر بر سطح خاک برقرار گردید. محلول ۰/۰۱ مولار $CaCl_2$ به عنوان محلول زمینه استفاده شد. پیش از انجام آزمایش انتقال کلرید، ستون خاک از پایین با محلول ۰/۰۱ مولار کلرید کلسیم ($CaCl_2$) به مدت ۲ روز اشباع شد. آبشویی ستون خاک با محلول زمینه قبل از انجام آزمایش انتقال انجام شد. آزمایش انتقال کلرید تا حدوداً ۱/۶ برابر حجم منفذی اندازه‌گیری شد (شکل ۲). پس از برقراری جریان پایدار محلول ۰/۰۵ مولار $CaCl_2$ به مدت ۲۰ دقیقه (حدوداً ۰/۵ برابر حجم منفذی) به صورت پالسی به خاک تزریق شد. پس از پایان تزریق مجدداً محلول زمینه جایگزین آن گردید. تغییرات هدایت الکتریکی زهاب خروجی جمع‌آوری شده با دستگاه EC سنسج اندازه‌گیری شد؛ سپس هدایت الکتریکی اندازه‌گیری و با توجه به منحنی واسنجی به غلظت کلرید تبدیل گردید. پس از انجام آزمایش، منحنی رخنه کلرید بر حسب غلظت نسبی (C/C_0) در برابر حجم منفذی رسم شد و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

معادلات حاکم بر انتقال عنصر غیر واکسژنر کلرید

مدل‌های زیادی برای بیان کمی حرکت املاح در خاک وجود دارند. در این میان، مدل موسوم به جریان

نتایج و بحث

نقش ریشه گیاه بر ویژگی‌های انتقال املاح در خاک

در شکل ۱ منحنی‌های رخنه کلرید اندازه‌گیری شده و برآورد شده با نرم افزار CXTFIT برای ستون‌های خاک در یکی از سه تکرار انجام شده ارائه گردیده است. با این فرض که احتمالاً کاهش دقت مدل CDE در برآورد رطوبت در تیمارهای با ریشه‌ی گیاه و با ریشه‌ی پوسیده شده‌ی گیاه به دلیل غیر تعادلی بودن فرآیند است، مدل غیر تعادلی روان ساکن MIM نیز برای پیش‌بینی انتقال استفاده شد. همان‌طوری که مشاهده می‌شود، هر دو مدل تعادلی و غیر تعادلی برآورد خوب و یکسانی از منحنی رخنه کلرید در تمامی تیمارها داشته‌اند. پارامترهای برآورد شده این دو مدل در جدول (۲) آمده است. ضریب تبیین (R^2) بین مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده با مدل‌ها ۸۸ تا ۹۷ درصد است. همان‌طوری که ملاحظه می‌شود، مقدار ضریب تبیین (R^2) بین مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده توسط هر دو مدل تقریباً در دو مدل برابر است؛ پس می‌توان گفت دقت هر دو مدل یکسان بوده است. نکته قابل توجه آن است که مقادیر برآورد شده پارامترهای مانند ضریب انتشار آبی و سرعت جریان هر دو مدل CDE و MIM مشابه است. این نتیجه نشانگر آن است که داده‌های مشاهده‌ای به خوبی با استفاده از مدل ساده CDE قابل تخمین بوده‌اند و برای خاک‌های مورد مطالعه نیازی به مدل پیچیده‌ای مانند مدل روان ساکن نمی‌باشد.

$$(1 - \beta)R \frac{\partial C_2}{\partial T} = \omega(C_1 - C_2) \quad (5)$$

که در آن اندیس‌های ۱ و ۲ به ترتیب بیانگر مکان‌های تعادلی و غیر تعادلی، β ضریب تفکیک، ω ضریب انتقال توده‌ای بدون بعد است. پارامترهای بدون بعد مدل غیر تعادلی MIM در جدول (۱) تعریف شده‌اند. برای برآورد پارامترهای مدل‌های انتقال از برنامه CXTFIT از زیر برنامه‌های STANMOD استفاده شد (۲۶). این برنامه به طور تحلیلی معادله CDE را برای شرایط مرزی معین حل می‌نماید (۱۳)؛ سپس پارامترهای انتقال (v و D) برآورد شده و شدت جریان داریسی (q) که در آزمایشگاه اندازه‌گیری گردید. برای محاسبه مقدار رطوبت حجمی ($\theta = \frac{q}{v}$) و ضریب انتشارپذیری ($\lambda = \frac{D}{v}$) استفاده شدند.

تجزیه و تحلیل داده‌ها

این آزمایش در قالب طرح کاملاً تصادفی شامل تیمارهای خاک بدون گیاه (شاهد)، خاک با ریشه تازه گیاه و خاک با ریشه سه ماه پس از برداشت گیاه و در سه تکرار انجام شد. برای تجزیه و تحلیل داده‌ها از برنامه آماری SPSS استفاده گردید و مقایسه میانگین‌ها بر پایه آزمون LSD در سطح ۵ درصد انجام شد.

جدول (۱) پارامترهای بدون بعد مدل غیر تعادلی روان-ساکن MIM

Table (1) Dimensionless parameters for non-equilibrium mobile-immobile model (MIM)

T	Z	P	R	β	ω	C_1	C_2	پارامتر
$\frac{vt}{L}$	$\frac{x}{L}$	$\frac{vL}{D}$	$1 + \frac{\rho_b K_d}{\theta}$	$\frac{\theta_m + f \rho_b K_d}{\theta + \rho_b K_d}$	$\frac{\alpha L}{\theta v}$	$\frac{C_m}{C_0}$	$\frac{C_{im}}{C_0}$	میزان

K_d ضریب ثابت جذب، β ضریب تفکیک، ω ضریب انتقال بدون بعد، f قسمت از کل جذب آبی یا تبادلی C_0 و L به ترتیب بیانگر ویژگی‌های غلظت و طول می‌باشند.

K_d : An empirical distribution coefficient, β : a partitioning coefficient, ω : dimensionless mass transfer coefficient, f : the fraction of adsorption sites, C_0 and L represent a characteristic concentration and length, respectively.

عالیپور شهنی و همکاران: نقش ریشه گیاه در انتقال کلرید...

جدول (۲) ویژگی‌های هیدرولیکی و انتقال املاح خاک در تیمارهای مختلف

Table (2) Soil Hydraulic and solute transport parameters in different treatments

$PV \frac{C_{max}}{C_0}$	PV_{out}	$\frac{C_{max}}{C_0}$	R^2_{MIM}	R^2_{CDE}	θ	K_s	q	λ	D	v	ستون خاک (Soil column)
0.87 ^a	0.77 ^a	0.69 ^c	0.973	0.973	0.48	12.49 _c	12.74 _c	0.11 ^c	5.19 ^a	26.19 _c	شاهد (Control)
0.63 ^b	0.49 ^c	0.71 ^b	0.897	0.898	0.44	15.40 _b	15.71 _b	0.38 ^b	13.80 _b	35.88 _b	ریشه تازه گیاه (Fresh corn root)
0.51 ^c	0.55 ^b	0.76 ^a	0.885	0.886	0.42	16.35 _a	16.68 _a	0.49 ^a	19.30 _a	39.89 _a	ریشه سه ماه پس از برداشت (root three months after harvesting)

v : سرعت آب منفذی (متر بر ثانیه)، D : ضریب انتشار (متر مربع بر ثانیه)، λ : ضریب انتشار پذیری، q : شدت جریان (متر بر ثانیه)، K_s : هدایت هیدرولیکی اشباع (متر در روز)، θ : مقدار رطوبت حجمی، $\left(\frac{C_{max}}{C_0}\right)$: حداکثر غلظت نسبی، $\left(PV \frac{C_{max}}{C_0}\right)$: حجم منفذی حداکثر غلظت نسبی، (PV_{out}) : نقطه خروج جبهه املاح.

v : pore water velocity (LT^{-1}), D : dispersion coefficient (L^2T^{-1}), λ : dispersivity coefficient (m), q : water flux density (LT^{-1}), θ : volumetric water content (L^3L^{-3}), $\left(\frac{C_{max}}{C_0}\right)$: maximum relative concentration, $\left(PV \frac{C_{max}}{C_0}\right)$: pore volume of maximum relative concentration.

جدول (۳) آزمون تجزیه واریانس اثر تیمارها بر میزان پارامترهای هیدرولیکی و انتقال املاح

Table (3) Analysis of variance (ANOVA) of treatment effects on soil hydraulic and solute transport parameters

میانگین مربعات (Sum of squares)									منبع تغییرات (SV)	df	تیمار (Treatment)
$\frac{C}{C_0} _{max}$	PV_{out}	$PV \frac{C_{max}}{C_0}$	K_s	D	λ	q	v				
0.009*	0.075*	0.115*	12.17**	0.042*	0.112*	12.66*	149.94**	2	خطا (Error)		
0.001	0.001	0.000	0.151	0.001	0.000	0.156	0.448	6	کل (Total)		

**، * به ترتیب در سطح ۱ و ۵ درصد معنی دار است.

** and * represent significance at the 1% and 5%, respectively. SV: source of variation, df: degree of freedom

می‌گردد. با توجه به مندرجات جدول ۲ و ۳ می‌توان بیان نمود که تیمارهای به کار رفته در این طرح اثر معنی داری بر پارامترهای پارامترهای هیدرولیکی و انتقال املاح در خاک دارند.

به منظور مقایسه پارامترهای انتقال املاح آزمون مقایسه میانگین LSD انجام شد. نتایج تجزیه واریانس و میانگین اثر تیمارها بر پارامترهای هیدرولیکی و انتقال املاح در خاک به ترتیب در جداول ۳ و ۲ مشاهده

تواند در اثر ریشه‌های عمیق و پیوسته گیاهان و تاثیر خلل و فرج حاصل از ریشه پوسیده گیاهان سال قبل باشد. همچنین یوسفی و همکاران^۲ (۲۹) در بررسی حرکت ردیاب بروماید در ستون‌های خاک لوم رسی تحت کشت یونجه و گندم اثر معنی‌داری نوع کشت را بر حرکت ردیاب غیرواکشنگر نشان دادند. بررسی روند تغییرات منحنی رخنه نشان داد کشت گیاه یونجه به دلیل ایجاد منافذ درشت و با پیوستگی بیشتر در خاک نسبت به گیاه گندم با ریشه نازک و افشان سبب افزایش سرعت انتقال ردیاب بروماید شده است. اختر و همکاران^۳ (۱) در بررسی حرکت ردیاب کلرید در ستون‌های خاک دست‌نخورده لوم‌سیلتی ساختمان‌دار و لوم شنی بدون ساختمان نشان دادند که وجود جریان ترجیحی در خاک دارای ساختمان، سبب انتقال سریع‌تر و بیشتر کلرید می‌گردد.

نقش ریشه گیاه بر منحنی رخنه کلرید

به منظور مقایسه اثر ریشه گیاه بر شکل منحنی رخنه-ی کلرید منحنی رخنه تیمارهای مورد مطالعه رسم گردید (شکل ۲). همچنین به منظور بررسی کمی اثر هر یک از تیمارها بر شکل منحنی رخنه پارامترهای حداکثر غلظت نسبی املاح $\left(\frac{C_{max}}{C_0}\right)$ ، حجم منفذی حداکثر غلظت نسبی املاح $\left(pV \frac{C_{max}}{C_0}\right)$ و نقطه خروج جبهه املاح (pV_{out}) در تیمارهای مختلف بررسی شد.

نتایج تجزیه واریانس اثر تیمارها بر پارامترهای مذکور در جدول ۳ گزارش شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، ریشه گیاه و سه ماه پس از برداشت آن بر این پارامترها تاثیر معنی‌داری داشته است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، نقطه خروج جبهه املاح (pV_{out}) در تیمار با ریشه گیاه و ریشه سه ماه پس از برداشت که در آنها سرعت جریان منفذی بیشتر بوده در مقایسه با تیمار شاهد زودتر ظاهر شده است (شکل ۲). ظاهر شدن زودتر

نتایج حاصل از آزمون مقایسه میانگین *LSD* برای مقایسه میانگین‌های ضریب انتشار املاح (*D*)، سرعت جریان منفذی (*v*)، ضریب انتشارپذیری املاح (*λ*) در سطح معنی‌دار ۵ درصد نشان داد که اختلاف معنی‌داری بین تیمارهای مورد مقایسه وجود دارد (جدول ۳). ضریب انتشار آبی املاح (*D*) در تیمارهای حاوی ریشه و ریشه سه ماه پس از برداشت نسبت به شاهد به ترتیب ۲/۶۵ و ۳/۷۱ برابر افزایش یافته است، که این افزایش نشان دهنده وجود منافذ درشت و ناهمگنی فیزیکی در تیمارهای حاوی ریشه و ریشه سه ماه پس از برداشت گیاه ذرت نسبت به تیمار شاهد است. از آنجایی که قسمت عمده حرکت آب در خاک از شکاف‌ها و کانال‌های ناشی از ریشه گیاه صورت می‌گیرد، املاح موجود در منافذ درشت می‌توانند به راحتی و سریع عبور کنند و زودتر در زهاب خروجی مشاهده شوند.

سرعت جریان آب منفذی در تیمارهای ریشه سه ماه پس از برداشت و دارای ریشه نسبت به شاهد، به ترتیب ۱/۵۲ و ۱/۳۸ برابر افزایش داشته است. نتایج نشان می‌دهد (جدول ۲) پارامتر ضریب انتشارپذیری املاح (*λ*) سه تیمار تفاوت معنی‌داری در سطح ۵ درصد دارد. این پارامتر در دو تیمار با ریشه و با ریشه سه ماه پس از برداشت افزایش یافته است (به ترتیب ۰/۳۷ و ۰/۴۹) این افزایش بیانگر ایجاد ناهمگنی فیزیکی بیشتر در خاک با ریشه است که در حالت ریشه سه ماه پس از برداشت شده این ناهمگنی فیزیکی به حداکثر رسیده است. شعبانپور شاهرستانی و همکاران^۱ (۱۸) انتقال بروماید در مزرعه تحت کشت ذرت، گندم و یونجه را بررسی کردند. نتایج برازش به کمک مدل CDE بر مقادیر سرعت آب منفذی (*v*) و ضریب انتشار (*D*) نشان دهنده افزایش معنی‌دار در سرعت آب منفذی (*v*) و ضریب انتشار (*D*) بود. آنان افزایش سرعت جریان و انتشارپذیری را بیانگر افزایش جریان‌های ترجیحی در تیمارهای تحت کشت گیاهان بیان نمودند که خود می‌-

2- Yousefi et al.

3- Akhtar et al.

1- Shabanpour Shahrestani et al.

نشان دهنده ایجاد منافذ پیوسته و مسیرهای آبگذری سریع توسط سیستم ریشه‌ای گیاه ذرت می‌باشد. همچنین نتایج نشان می‌دهد شدت جریان (q) در تیمارهای ریشه سه ماه پس از برداشت و حاوی ریشه نسبت به شاهد $1/3$ و $1/24$ برابر افزایش داشته است. در تیمار با ریشه سه ماه پس از برداشت شدت جریان دارسی (q) بیشترین مقدار را دارد (متر مربع بر ثانیه)؛ از سویی دیگر بنا به قانون پُوازی شدت جریان آب متناسب با توان دوّم شعاع منافذ است. لذا در منافذ درشت کلرید با سرعت بیشتر و زمان کمتری در زهاب خروجی مشاهده شده است.

نتایج تجزیه واریانس اثر تیمارها بر پارامترهای پارامترهای هیدرولیکی در جدول ۳ گزارش گردیده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، ریشه گیاه و سه ماه پس از برداشت آن بر پارامترهای هیدرولیکی خاک تاثیر معنی داری داشته‌اند. جهت بررسی تفاوت بین تیمارها آزمون مقایسه میانگین LSD نیز انجام شد. نتایج نشان داد که تفاوت بین تیمارها معنی دار بوده است (جدول ۳). به-طور کلی نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که سیستم ریشه‌ی گیاه ذرت و منافذ بجای مانده از ریشه‌ی آن تاثیر معنی‌دار بر ویژگی‌های هیدرولیکی خاک مانند شدت جریان منفذی و هدایت هیدرولیکی اشباع دارد. نتایج این پژوهش با نتایج اسموکر و همکاران^۳ (۲۲) مطابقت دارد. اشتاینر و همکاران^۴ (۲۴) در بررسی انتقال عنصر ردیاب بروماید در ستون‌های خاک نشان دادند که میزان هدایت هیدرولیکی اشباع خاک (K_s) در مراحل اولیه رشد گیاه ذرت تفاوت چندانی نداشته؛ اما پس از

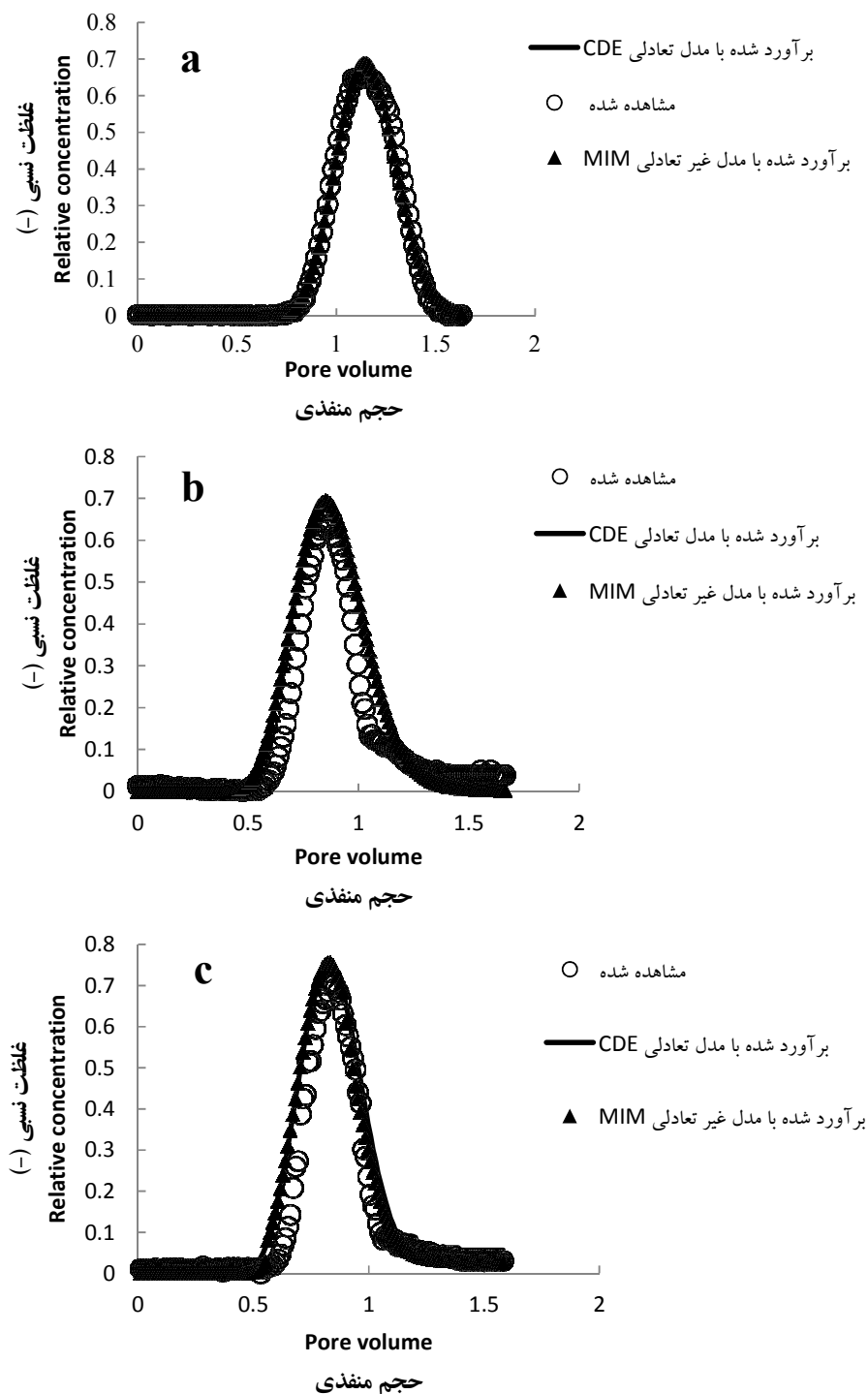
کلرید در تیمار با ریشه گیاه و در تیمار با ریشه سه ماه پس از برداشت شده، می‌تواند نشان دهنده وجود منافذ درشت ایجاد شده توسط ریشه گیاه در این خاک‌ها باشد. در تیمار شاهد، نقطه خروج جبهه املاح (PV_{out}) در $0/87$ حجم منفذی و در تیمارهای با ریشه و با ریشه سه ماه پس از برداشت به ترتیب در $0/63$ و $0/5$ حجم منفذی مشاهده شد. همچنین حداکثر غلظت نسبی املاح $\left(\frac{C_{max}}{C_0}\right)$ در تیمار شاهد با حجم منفذی $0/87$ برابر با $0/69$ می‌باشد و در تیمارهای با ریشه و با ریشه سه ماه پس از برداشت، حداکثر غلظت نسبی املاح به ترتیب برابر با $0/71$ - $0/76$ بود که به ترتیب در حجم‌های منفذی $0/63$ و $0/5$ مشاهده شد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، ریشه گیاه سه ماه پس از برداشت آن بر پارامترهای بیان شده تاثیر معنی‌داری داشته‌اند. نتایج نشان داد تفاوت بین تیمارها معنی‌دار بوده است (جدول ۳). این بخش از مطالعه نشان دهنده تاثیر معنی‌دار اندازه و پیوستگی منافذ بر شکل منحنی رخنه انتقال املاح در خاک است. نتایج این بخش از پژوهش با یافته‌های شوکلا و همکاران^۱ (۲۰) و کوتلاک و نلسون^۲ (۱۲) مطابقت دارد.

نقش ریشه گیاه بر ویژگی‌های هیدرولیکی خاک

در این بخش از پژوهش برای بررسی اثر ریشه گیاه در تغییر ویژگی‌های هیدرولیکی خاک دو پارامتر شدت جریان دارسی (q) و هدایت هیدرولیکی اشباع (K_s) در تیمارهای مختلف مقایسه گردید. هدایت هیدرولیکی توان خاک را در انتقال آب نشان می‌دهد؛ هرچه، مقدار آن برای خاکی بیشتر باشد، توانایی خاک برای انتقال آب و املاح بیشتر است. همان‌طوری که در جدول ۲ دیده می‌شود، در ستون‌های خاک با ریشه گیاه و با ریشه سه ماه پس از برداشت در مقایسه با تیمار شاهد هدایت هیدرولیکی اشباع به ترتیب $1/23$ و $1/31$ برابر افزایش نشان داد. افزایش هدایت هیدرولیکی اشباع در شرایط حضور ریشه تازه گیاه و ریشه سه ماه پس از برداشت،

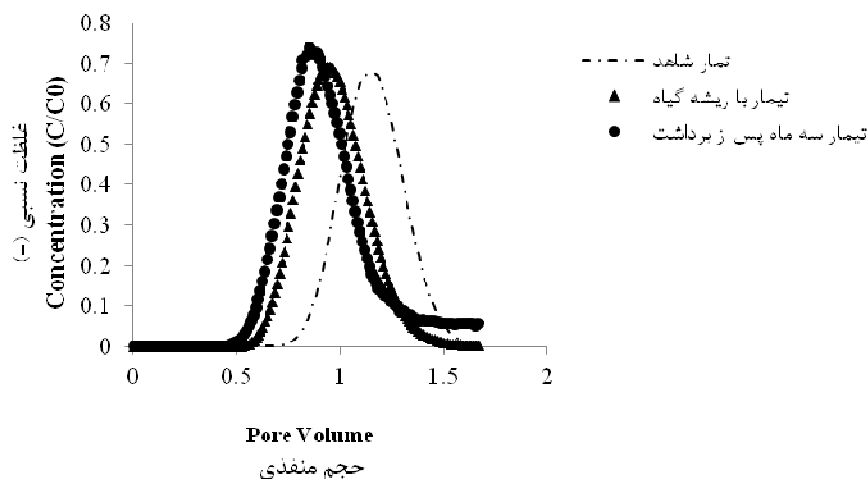
3- Smuker et al
4- Steiner et al.

1- Shukla et al
2- Kutilek and Nielsen



شکل (۱) مقادیر اندازه‌گیری شده و برازش داده شده منحنی رخنه کلرید با نرم افزار CXTFIT: (a) تیمار شاهد، (b) تیمار در حضور ریشه تازه گیاه، (c) تیمار ریشه سه ماه پس از برداشت.

Figure (1) Measured and fitted breakthrough curves of chloride using CXTFIT: A) Bare soil treatment, B) Corn root treatment, and C) Corn root 3 months after harvesting treatment



شکل (۲) مقادیر اندازه‌گیری شده منحنی رخنه کلرید در تیمارهای مورد مطالعه
Figure (2) Measured chloride breakthrough curve

میزان هدایت هیدرولیکی موثر است. همچنین نتایج حاصل از آزمون مقایسه میانگین LSD برای مقایسه میانگین‌های هدایت هیدرولیکی (K_s) و شدت جریان (q) در سطح معنی‌دار ۵ درصد نشان داد که اختلاف معنی‌داری بین تیمارهای مورد مقایسه وجود دارد.

نتیجه‌گیری

آبشویی املاح ناشی از کاربرد کودهای شیمیایی و پساب‌ها در خاک‌های کشاورزی و انتقال آنها به اعماق باعث آلودگی آب‌های زیرزمینی می‌شود؛ همچنین آبشویی کودها و انتقال آنها به خارج از منطقه ریشه باعث کاهش بازده کودها و آلودگی آب‌های زیرزمینی می‌شود و بر سلامتی بشر تاثیر گذار است. لذا مطالعه کمی انتقال املاح و پیش بینی انتقال آنها در خاک امری ضروری است.

در این پژوهش انتقال کلرید در تحت تاثیر حضور ریشه گیاه و ریشه سه ماه پس از برداشت در ستون‌های خاک تحت شرایط جریان اشباع مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این پژوهش به خوبی نشان می‌دهد سیستم ریشه گیاه ذرت و منافذ بجا مانده ریشه سه ماه پس از

پایان مرحله ۶-۷ برگی و پس از پوسیدگی ریشه گیاه میزان هدایت هیدرولیکی اشباع بطور چشم‌گیری نسبت به تیمار شاهد افزایش یافته بود. آنها دلیل افزایش در میزان هدایت هیدرولیکی اشباع خاک (K_s) و سرعت انتقال عنصر ردیاب را در اثر ریشه‌های عمیق و پیوسته گیاه و تاثیر خلل و فرج حاصل ریشه بیان نمودند. همچنین میک و همکاران^۱ (۱۵) در بررسی اثر سیستم‌های ریشه‌ای بر میزان هدایت هیدرولیکی دریافتند که سیستم ریشه‌ای گیاه یونجه با ایجاد مسیرهای پیوسته و منافذ درشت باعث افزایش سرعت نفوذ می‌گردد. همچنین وارنر و یانگ^۲ (۲۸) نشان دادند که ریشه‌های گیاه ذرت سبب ایجاد مسیرهای پیوسته و افزایش سرعت انتقال آب و املاح می‌گردد. نتایج مطالعه شیرمحمدی و اسکاگ^۳ (۱۹) در بررسی اثر سیستم ریشه گیاه بر پارامترهای هیدرولیکی خاک در ستون‌های خاک شنی نشان دهنده افزایش میزان هدایت هیدرولیکی در ستون‌های تحت کشت گیاه یونجه بود. آنها همچنین دریافتند که بقایای ریشه و کاهش خاصیت چوبی آنها در افزایش

1- Meek *et al.*

2- Warner and Young

3- Shirmohammadi and Skagg

گیاه ذرت با ایجاد منافذ درشت و پیوسته، سبب انتقال سریع املاح در نیمرخ خاک می‌گردد. بنابراین پیشنهاد می‌شود که به هنگام مطالعه انتقال املاح در خاک زراعی نقش ریشه گیاه نیز لحاظ گردد.

برداشت شده آن می‌تواند تاثیری معنی‌دار بر ویژگی‌های هیدرولیکی خاک (شدت جریان و هدایت هیدرولیکی) داشته باشد؛ همچنین نتایج این پژوهش نشان داد کلرید در تیمارهای با ریشه و با ریشه سه ماه پس از برداشت شده زودتر از خاک شاهد (فاقد ریشه) ظاهر شدند. ریشه

منابع

1. Akhtar, M.S., Steenhuis, T.S., Richards, B.K., and McBride, M.B. 2003. Chloride and lithium transport in large arrays of undisturbed silt loam and sandy loam soil columns. *Vadose Zone Journal*, 2: 715–727.
2. Bouma, J., and Dekker, L.W. 1978. A case study on infiltration into dry clay soil. I. Morphological observation. *Geoderma*, 20: 27-40.
3. Biggar, J.W., and Nielson, D.R. 1976. Spatial variability of the leaching characteristics of a field soils. *Water Resources Research*, 12: 78-84.
4. Caron, J., Banton, O., Angers, D.A., and Villeneuve., J.P. 1996. Preferential bromide transport through a clay loam under alfalfa and corn. *Geoderma*, 69: 175-191.
5. Dispart, A.A. 1987. Effect of root mass density on infiltration among four Mediterranean dryland and forages and two irrigated legumes. M.S. Thesis. Univ. of California, Riverside.
6. Gish, T.L., and Jury., W.A. 1983. Effect of plant roots and root channels on solute transport. *Soil Science and Plant Analysis*, 26: 440-444.
7. Hashemi Nejhadi, Y., and Gholami, M. 2008. Introducing an appropriate packing method in disturbed soil columns and its verification to achieve a homogenous porous media. *Journal of Water and Soil*, 22(2): 447-455. (In Persian with Persian abstract).
8. Hillel, D., and Baker, R.S. 1988. A descriptive theory of fingering during infiltration in to layered soils. *Soil Science*, 146: 51-56.
9. Khodabandeh, N. 2005. *Cereals*. Published by Tehran University. Tehran.
10. Klute, A., and Dirksen, C. 1986. Hydraulic conductivity and diffusivity: laboratory methods. In: Klute, A. (ed), *Methods of Soil Analysis . Part 1. Physical and Mineralogical Methods*. ASA/SSSA. Monograph 9. 2nd Ed. pp. 687-732.
11. Kuchembuch, R.O., and Barber, S.A. 1987. Yearly variation of root distribution with depth in relation to nutrient uptake and corn yield. *Soil Science and Plant Analysis*, 18: 255-263.

12. Kutilek, M., and Nielsen, D.R. 1994. Soil hydrology. Cremlingen-Destedt Goeoecology textbook. Catena Verl., Germany.
13. Marquardt, D.W. 1963. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, 11: 431-441.
14. Mawdsley, J., Bardgett, R.D., Merry, R.J., Pain, B.F., and Theodoru, M.K. 1994. Pathogens in livestock waste, their potential for movement through soil and environmental pollution, *Applied Soil Ecology*, 2: 1-15.
15. Meek, B.D., Detar, W.R., Rolph, D., Rechel, E.R., and Carter, L.M. 1990. Infiltration rate as affected by an alfalfa and no till cotton cropping system. *Soil Science Society of America Journal*, 54: 505-508.
16. Nelson, R.E. 1982. Carbonate and gypsum. In *Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties*. American Society of Agronomy, Madison, WI, pp. 181-199.
17. Nkedi-Kizza, P., Biggar, J.W., Selim, H.M., Van Genuchten, M.Th. Wierenga, P.J., Davidson, J.M., and Nielsen, D.R. 1984. On the equivalence of two conceptual models for describing ion exchange during transport through aggregated oxisol. *Water Resources Research*, 20: 1123-1130.
18. Shabanpour Shahrestani, M., Afyuni, M., and Mousavi, S.F. 2003. Bromide transport in soils under different cultivated crops. *Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources, Water and Soil Science*, 6 (4): 79-89. (in Persian with Persian abstract).
19. Shirmohammadi, A., and Skagg, R.W. 1984. Effect of surface conditions on infiltration for shallow water table soils, *Transaction of American Society of Agricultural Engineers*. 27(6): 1789-1787.
20. Shukla, M.K., Kastanek, F.J., and Nielsen, D.R. 2000. Transport of chloride through water saturated soil column. *Die Budenjulture*, 52: 235-246.
21. Simunek, J., Sejna, M., Saito, H., Sakai, M., and van Genuchten, M.Th. 2008. The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media, Version 4.0x, *Hydrus Series 3*, Department of Environmental Sciences, University of California Riverside, Riverside, CA, USA.
22. Smucker, A.J.M., Richner, W., and Snow, V.O. 1995. Bypass flow via root. Induced macropores (RTMS) in subirrigated agriculture. Clean water, clean environment, 21st century: team agriculture, working to protect water resources: ASAE conference proceedings, March 5-8, 1995, Kansas city, Missouri.
23. Stagnitti, F., Parlange, J.Y., Steenhuis, T.S., Nijssen, B., and Lockington, D. 1994. Modeling the migration of water soluble contaminants through preferred paths in the soil. P. 367-379. In K. Kovar and J. Soveri (ed), *Groundwater quality management*. IAHS Publ. No. 220. Intl. Assoc. Hydrological Sci. Press, Oxfordshire, UK.

24. Steiner, P.N. 2009. Effects of growing and desiccated roots on *E.coli* movement through soil column. Ph.D. Thesis. Biosystems Engineering. Michigan State University. UMI Number: 1478855.
25. Sumner, M.E., and Miller, W.P. 1996. Cation exchange capacity and exchange coefficients. In: Sparks (Ed.), Methods of Soils Analysis. Part 2. America Society of Agronomy, Madison, WI, pp. 1201-1229.
26. Toride N., Leij F.J., and van Genuchten M.Th. 1999. The CXTFIT code for estimating transport parameters from laboratory or field tracer experiments version 2.1 Research Report, vol. 137. U.S. Salinity Laboratory, Riverside, CA.
27. Van Genuchten, M.Th., and Wagnet, R.J. 1989. Two-site two region models for pesticide transport and degradation: Theoretical development and analytical solutions. Soil Science Society America Journal, 53(5): 1303-1310.
28. Warner, G.S., and Young, R.A. 1991. Measurement of preferential flow beneath mature corn in proceedings of the national symposium on preferential flow. Soil Science Society America Journal, pp: 150-159.
29. Yousefi. G., Safadoust. A., Mosaddeghi. M., and Mahboubi. A. 2013. Long term cropping and soil texture effects on lithium and bromide transport under unsaturated flow condition. Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources, Water and Soil Science, 17 (6): 89-99. (in Persian with English abstract).