

نقش رشد و پوسیدگی ریشه گیاه ذرت در انتقال باکتری اشریشیاکلی در خاک تحت شرایط جریان اشباع

مولود عالی پور شهنی^۱، احمد فرخیان فیروزی^{۱*}، حسین معتمدی^۱ و علی کرای^۲

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۱۲/۱۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۲/۱۰)

چکیده

شکاف‌ها و منافذ درشت ناشی از پوسیدگی ریشه گیاه، مسیرهای آب‌گذری سریعی را برای انتقال آلاینده‌ها در خاک‌رخ فراهم می‌کنند. هدف از این پژوهش، بررسی کمی اثر ریشه گیاه ذرت بر حرکت یون کلرید و باکتری اشریشیاکلی در شرایط جریان اشباع در خاک بوده است. تیمارها شامل ستون‌های خاک دست‌خورده به ترتیب شاهد (بدون ریشه گیاه)، با ریشه گیاه و با ریشه پوسیده شده گیاه بودند. تعداد ۹ ستون خاک با بافت شن لومی (با جرم ویژه ظاهری ۱/۴۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب) تهیه گردید. مدل سینتیک جذب-واجذب تک‌مکانی و دومکانی برنامه HYDRUS-1D برای پیش‌بینی انتقال و جذب باکتری در ستون خاک استفاده شد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که تفاوت بین ویژگی‌های هیدرولیکی (K_s و v و D) تیمارهای مختلف چشمگیر بود. مدل جذب-واجذب سینتیک دو مکانی در مقایسه با تک‌مکانی برازش بهتری با داده‌های انتقال باکتری داشت. کارایی این مدل (E) در برآورد منحنی رخنه باکتری از ۰/۹۷ تا ۰/۹۹ بود. بیشتر باکتری‌های پالایش شده در لایه‌های سطحی خاک نگهداشته شدند. کاهش نرخ حذف باکتری در تیمارهای با ریشه گیاه و با ریشه پوسیده شده، بیانگر وجود منافذ درشت در خاک بوده که در نتیجه سیستم ریشه‌ای عمیق گیاه ذرت در خاک ایجاد شده‌اند.

کلمات کلیدی: اشریشیاکلی، انتقال باکتری، جریان اشباع، ریشه گیاه، منحنی رخنه

۱. گروه خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز

۲. گروه میکروبیولوژی، دانشکده علوم، دانشگاه شهید چمران اهواز

*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: a.farrokhan@scu.ac.ir

مقدمه

منبع آب آشامیدنی بیش از نیمی از مردم جهان آب‌های زیرزمینی است. آلودگی میکروبی آب‌های زیرزمینی نقش قابل ملاحظه‌ای در شیوع بیماری‌های میکروبی دارد. امروزه آلودگی آب‌های زیرزمینی و ارائه راهکارهای مناسب برای حفاظت از آنها به آلاینده‌های میکروبی، یکی از مسائل نگران‌کننده جوامع گوناگون است (۶). بیش از ۱۵۰ پاتوژن مضر برای بشر در طبیعت شناخته شده‌اند که در کود دامی نیز یافت می‌شوند. در سال‌های اخیر وجود باکتری‌های بیماری‌زا در سیستم‌های آب شهری به اثبات رسیده است. به نظر می‌رسد که کاربرد کود دامی در اراضی با زهکشی مناسب عامل اصلی این آلودگی باشد (۱۰). ویژگی‌های فیزیکی خاک بر نحوه انتقال املاح و آلاینده‌ها به آب‌های زیرزمینی تأثیر چشم‌گیری دارند.

از جمله ویژگی‌های مهم فیزیکی تأثیرگذار بر انتقال املاح و آلاینده‌ها در خاک‌رخ، ساختمان خاک است. ریشه گیاهان، خصوصیات فیزیکی مانند پایداری ساختمان، تخلخل، خصوصیات هیدرولیکی خاک و فعالیت بیولوژیکی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. شکاف‌ها و منافذ درشت ناشی از فعالیت کرم‌های خاکی و ریشه گیاهان در خاک، مسیرهای آب‌گذری سریعی را برای انتقال آلاینده‌ها فراهم می‌کنند. که این مسیرها را مسیر ترجیحی (Preferential Flow) گویند. میزان منافذ درشت و پیوستگی آنها در خاک‌های با ساختمان خوب و پایدار، تأثیر زیادی بر میزان و شدت این نوع جریان دارد. مواد شیمیایی که جهت افزایش عملکرد و بهبود کیفیت گیاهان در اراضی کشاورزی مورد استفاده قرار می‌گیرند با عبور از مسیرهای جریان ترجیحی در نیم‌رخ خاک سبب آلودگی منابع آب زیرزمینی می‌شوند. نوع گیاه کشت شده و سیستم ریشه‌ای آن می‌تواند ویژگی‌های هیدرولیکی خاک را تغییر داده و در نتیجه بر حرکت نمک‌ها تأثیر گذارد (۱۵).

ریشه گیاهانی که در خاک نفوذ می‌کنند از خود منافذی را باقی می‌گذارند که باعث بهتر شدن حرکت آب و پخشیدگی گاز در خاک، همچنین به هم پیوستن خلل و فرج موجود در

خاک می‌شوند. محیط تماس ریشه با خاک می‌تواند با توجه به مرگ ریشه و یا چوب پنبه‌ای شدن آنها بر اثر حمله میکروارگانیسم‌ها کاهش یافته و برعکس تخلخل افزایش یابد (۱۹). پراکندگی سیستم‌های ریشه‌ای در خاک‌رخ عاملی مهم در تعیین میزان آب و املاح قابل دسترس برای گیاهان می‌باشد (۱۳). مطالعات گوناگون نشان داده‌اند که مسیرهای سهل‌الوصول ایجاد شده توسط منافذ درشت و درز و شکاف‌های حاصل از رشد و پوسیدگی ریشه گیاه در خاک سبب انتقال سریع میکروب‌های بیماری‌زا به لایه‌های زیرین خاک و آب‌های زیرزمینی می‌گردند. سیستم‌های ریشه‌ای مختلف، تأثیری متفاوت بر هدایت هیدرولیکی اشباع خاک دارند (۱۸). همچنین سیستم‌های ریشه‌ای مستقیم و رو به پایین به دلیل ایجاد مسیرهای پیوسته در خاک سبب انتقال سریع‌تر املاح و آلاینده‌ها به آب‌های زیرزمینی می‌گردند (۱۱). در یک خاک کشت شده با یونجه در مقایسه با خاک فاقد کشت، میزان نفوذ آب و املاح بیشتر است (۴). خطر شستشو و انتقال پاتوژن‌ها در هنگام وقوع جریان ماکروپوری حداکثر است. در هنگام وقوع چنین جریانی حداقل تماس با ماتریکس خاک وجود دارد پژوهش‌های تور و همکاران (۲۱) نشان داد در خاک‌های تحت پوشش علفزار در مقایسه با خاک‌های کشاورزی نسبت منافذ درشت و جریان ترجیحی بیشتر است. آنها علت این پدیده را وجود ساختمان‌سازی بیشتر در خاک‌های علفزار دانستند. ون‌الساس و همکاران (۲۲) انتقال *Pseudomonas fluorescens Tn5-tagged* را در ستون‌های خاک شن‌لومی با طول ۵۰ سانتی‌متر بررسی نمودند. این پژوهشگران پس از پایان آبیاری ستون‌های خاک مشاهده نمودند که انتقال باکتری در ستون‌های خاک دست نخورده نسبت به ستون‌های دست خورده به دلیل جریان از منافذ درشت به‌طور چشمگیری بیشتر بود. گرچه تحقیقات بی‌شماری تأثیر خصوصیات فیزیکی خاک بر رشد و اعمال ریشه را مورد بحث قرار داده‌اند ولی تحقیقات اندکی در رابطه با توصیف تغییرات خصوصیات خاک در اثر رشد گیاهان زراعی انجام گرفته‌اند.

بدون گیاه (شاهد)، خاک با ریشه تازه گیاه پس از ۲ ماه رشد و در مرحله ۱۰-۱۱ برگگی و خاک با ریشه‌ی پوسیده شده گیاه پس از چهار ماه و در سه تکرار انجام شد. برای تجزیه و تحلیل داده‌ها از برنامه آماری SPSS استفاده شد و مقایسه میانگین‌ها بر پایه آزمون LSD در سطح ۵ درصد انجام شد. در این مطالعه امکان وجود بیش از یک مکان جذب مورد قرار بررسی گرفت. لذا دو مدل سینتیک جذب-واجذب تک‌مکانی و دو مکانی برنامه HYDRUS-1D برای پیش‌بینی انتقال و جذب باکتری در ستون خاک استفاده شد.

انتخاب و کاشت گیاه

گیاه انتخاب شده برای این پژوهش، ذرت هیبرید سینگل کراس ۷۰۴ (Sc.704) بود که کاشت آن در منطقه متداول است. 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 ۲ ماه و اتمام رشد ریشه گیاه در مرحله‌ی ۱۱-۱۰ برگگی، قسمت هوایی گیاه بریده شد. همچنین برای تیمار ستون‌های خاک با ریشه پوسیده ستون‌ها به مدت ۴ ماه نگهداری شدند.

باکتری

در این پژوهش انتقال و جذب باکتری اشریشیاکلی در شرایط اشباع مطالعه شد. یکی از مهم‌ترین سویه‌های این باکتری که امروزه توجه اغلب محققان را به‌خود جلب نموده است، سویه O157:H7 می‌باشد. مطالعات متعدد نشان داده‌اند که این سویه اغلب از طریق فراورده‌های دامی به‌انسان منتقل می‌گردد (۲). باکتری اشریشیاکلی گرم منفی، متحرک، هوازی یا بی‌هوازی اختیاری و از خانواده انتروباکتریاسه با طول ۱-۶ میکرومتر بوده و کود گاوی سرشار از این باکتری است باکتری اشریشیاکلی

هدف از این پژوهش مطالعه کمی اثر سیستم ریشه گیاه ذرت بر انتقال و نگهداشت باکتری گرم منفی اشریشیاکلی (*Escherichia Coli*) در ستون‌های خاک دست‌خورده خاک تحت شرایط جریان اشباع بود.

مواد و روش‌ها

خاک

به‌منظور مطالعه کمی جذب و انتقال باکتری در خاک کشاورزی تحت شرایط اشباع، ۹ ستون خاک دست‌خورده از مزرعه باغبانی دانشکده کشاورزی دانشگاه شهید چمران اهواز نمونه‌برداری گردید. نمونه‌های خاک، نخست هواخشک شدند و پس از کوبیدن از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند. 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 تهیه گردیدند. توزیع اندازه ذرات خاک به روش هیدرومتری، مقدار کربن آلی خاک به روش اکسیداسیون تر و تیتراسیون با فروآمونیم (۱۳) و مقدار ظرفیت تبادل کاتیونی خاک (CEC) با جایگزینی کاتیون‌ها با استات سدیم (NaOAc) در pH ۸/۵ اندازه‌گیری شد (۳). ترکیب کانی‌های خاک به کمک دستگاه پراش سنج اشعه X (XRD) مدل Xpert ساخت شرکت فیلیپس (CuK=0.9, Radiation, =0.154056A)، آمپراژ ۴۰ کیلووات استفاده شد. ابتدا عوامل سیمانی‌کننده در خاک از جمله گچ به روش شستشو با آب مقطر، مواد آلی به روش آب اکسیژنه، آهک به روش استات سدیم، اکسیدهای آهن به روش دی‌تیونات سدیم حذف، سپس بخش رس خاک جدا شده و پس از جداسازی تحت تیمارهای اشباع با منیزیم و اعمال تیمار اتیلن گلیکول، پتاسیم اشباع و پتاسیم اشباع به‌علاوه حرارت دیده در دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت. آنگاه ترکیب کانی‌شناسی خاک با کمک دستگاه پراش سنج اشعه تعیین گردید. اسیدیته در گل اشباع و قابلیت هدایت الکتریکی در عصاره اشباع تعیین شد. این آزمایش در قالب طرح کاملاً تصادفی شامل تیمارهای خاک

به دلیل بار منفی، تحرک بالا و فراوانی در زهاب‌های حاصل از کشاورزی به عنوان شاخص میکروبی آب‌های زیرزمینی شناخته شده است (۵).

روش تهیه محلول سوسپانسیون باکتری

یک کلونی از سویه استاندارد باکتری اشریشیاکلی O157:H7 خالص‌سازی شده، مطابق با روش‌های مذکور در ۵۰۰ میلی‌لیتر محیط نوترینت برات به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۳۷ درجه سلسیوس رشد داده شد. سپس باکتری با استفاده از سانتریفیوژ در دور ۳۰۰۰ rpm به مدت ۱۰ دقیقه از محیط مغذی جداسازی شد. پس از آن باکتری جدا شده دو مرتبه با محلول کلرید کلسیم ۰/۰۵ مولار شست‌وشو شد. سوسپانسیون باکتری با غلظت 10^9 (cfu/ml) در محلول کلرید کلسیم ۰/۰۵ مولار استریل به کمک قرائت چگالی نوری OD (Optical Density) به وسیله دستگاه اسپکتروفوتومتر در طول موج ۶۰۰ نانومتر به دست آمد. به منظور اطمینان از تهیه سوسپانسیون باکتری با غلظت 10^9 (cfu/ml) با استفاده از شمارش بشقابی از غلظت مورد نظر اطمینان حاصل گردید (۷).

شمارش باکتری در زهاب خروجی و نیم‌رخ خاک

برای شمارش باکتری در زهاب خروجی از روش شمارش زنده استفاده شد. در این روش در ابتدا محلول سوسپانسیون باکتری به میزان لازم رقیق شد و با استفاده از پیت سترون ۰/۱ میلی‌لیتر از نمونه رقیق شده بر روی محیط کشت ائوزین متیلین بلو (EMB) کشت داده شد. سپس با لوپ به آرامی در سطح محیط پخش شده و به طور وارونه در دمای ۳۷ درجه سلسیوس (دمای مناسب برای رشد باکتری مورد نظر) گرمخانه‌گذاری شدند. پلیت‌ها بعد از ۲۴ ساعت گرمخانه‌گذاری توسط دستگاه کلنی شمار (مدل RTC) شمارش زنده و ثبت می‌شدند شایان ذکر است که به منظور کاهش خطا در شمارش باکتری، پیش از شروع آزمایش انتقال غلظت باکتری در زهاب خروجی شمارش گردید.

به منظور شمارش باکتری در نیم‌رخ خاک بلافاصله پس از تمام شدن آزمایش انتقال باکتری، برای تهیه سوسپانسیون خاک ۱۰ گرم از خاک هر لایه با استفاده از محلول نمکی استریل فسفات بافر ($\text{Na}_2\text{P}_2\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) ساخته شده، به حجم ۱۰۰ میلی‌لیتر می‌رسید و با دور ۱۵۰ rpm به مدت ۳۰ دقیقه شیکر می‌شد. برای تعیین غلظت باکتری در محلول رویین به دست آمده از روش شمارش زنده استفاده می‌شد. سوسپانسیون فوقانی به میزان لازم رقیق شد. با استفاده از پیت سترون ۰/۱ میلی‌لیتر از سوسپانسیون فوقانی رقیق شده و مراحل کشت و شمارش مانند زهاب خروجی انجام گردید.

آزمایش انتقال

آزمایش انتقال باکتری و کلراید به گونه‌ای طراحی شد که جریان اشباع پایدار با شیب هیدرولیکی واحد در طول ستون خاک برقرار شود. 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. پس از برقراری جریان پایدار با محلول زمینه، محلول ۰/۰۵ مولار CaCl_2 به مدت ۲۰ دقیقه به سطح ستون خاک تزریق گردید. پس از پایان تزریق مجدداً محلول زمینه جایگزین گردید. تغییرات هدایت الکتریکی زهاب خروجی جمع‌آوری شده با دستگاه هدایت‌سنج اندازه‌گیری شد. سپس قابلیت هدایت الکتریکی اندازه‌گیری شده با توجه منحنی واسنجی به غلظت کلراید تبدیل گردید. پس از انجام آزمایش، منحنی رخنه کلرید بر حسب غلظت نسبی (C/C_0) در برابر زمان رسم شد و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. همچنین برای اندازه‌گیری منحنی رخنه باکتری سوسپانسیون باکتری با توجه به مدت زمان انجام آزمایش جایگزین محلول زمینه ۰/۰۱ مولار CaCl_2 شد. به منظور اندازه‌گیری باکتری در نیم‌رخ خاک پس از پایان آزمایش انتقال

اعداد ۱ و ۲ به ترتیب مکان‌های سینتیک ۱ و ۲ را نشان می‌دهند. ضریب انتشار $(L^2 T^{-1})$ ، v سرعت منفذی آب $(L T^{-1})$ ، θ تخلخل کل $(L^3 L^{-3})$ ، ρ_b جرم ویژه ظاهری خاک (ML^{-3}) و S غلظت باکتری جذب شده به خاک (NL^{-3}) می‌باشد. k_{att} و k_{det} به ترتیب نرخ جذب و واجذب باکتری از ذرات خاک (T^{-1}) و t زمان می‌باشد. μ_1 و μ_2 به ترتیب غیرفعال شدن باکتری در فاز مایع و جامد می‌باشند. برای برآورد پارامترهای مدل انتقال باکتری در خاک از برنامه کامپیوتری HYDRUS-1D استفاده شد.

ارزیابی مدل‌ها

برای تعیین دقت هر یک از مدل‌های جذب سینتیک تک‌مکانی و دو مکانی از آماره‌های تعیین کارایی مدل (Model efficiency) و ریشه میانگین مربعات خطا (Root mean square error) استفاده شد (۲۱).

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (C_{fit}^i - C_{obs}^i)^2}{\sum_{i=1}^N (C_{fit}^i - C_{ovg}^i)^2} \quad [5]$$

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (C_{obs}^i - C_{fit}^i)^2}{n} \right]^{1/2} \quad [6]$$

که در آنها، C_{obs}^i و C_{fit}^i به ترتیب تعداد باکتری برازش داده شده و مشاهده شده در زمان t_i می‌باشند. C_{avg} میانگین غلظت‌های خروجی مشاهده شده و N تعداد مشاهدات است. مقدار C_{avg} از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$C_{avg} = \sum_{i=1}^N C_{obs}^i / N \quad [7]$$

نتایج و بحث

در شکل (۱) ترکیب کانی‌شناسی خاک مورد مطالعه توسط دستگاه پراش سنج اشعه X (XRD) ارائه شده است. همچنین

باکتری، ستون خاک به لایه‌های ۵ سانتی‌متری برش داده شد. از هر لایه به کمک رینگ‌های فلزی استریل نمونه‌های همگن تهیه گردید.

معادلات حاکم بر انتقال عنصر ردیاب کلراید و باکتری

انتقال املاح غیرواکنش‌گر مانند کلراید عموماً با معادله جریان توده‌ای-انتشار (CDE) بیان می‌شود. برای شرایط جریان پایدار این معادله را می‌توان به شکل زیر نوشت:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} - v \frac{\partial c}{\partial z} \quad [1]$$

که در آن، c غلظت نمک در فاز مایع (ML^{-3}) ، D ضریب انتشار $(L^2 T^{-1})$ ، سرعت منفذی آب $(L T^{-1})$ ، t زمان و z عمق (L) می‌باشد. پارامترهای D و v با استفاده از روش غیرخطی تخمین پارامتر براساس الگوریتم لونبرگ-مارگورت برآورد شدند (مارگورت، ۱۹۶۳). بدین منظور از برنامه CXTFIT که به‌طور تحلیلی معادله CDE را برای شرایط مرزی معین حل می‌نماید، استفاده شد (۲۱). سپس پارامترهای انتقال (D و v) تخمین داده شده و شدت جریان دارسی (q) که در آزمایشگاه اندازه‌گیری شد. برای تعیین مقدار رطوبت حجمی $\left(\theta = \frac{q}{v}\right)$ و ضریب انتشارپذیری $\left(\lambda = \frac{D}{v}\right)$ استفاده شدند. پارامترهای تخمین زده شده (D و v) و شدت جریان اندازه‌گیری شده در شبیه‌سازی انتقال باکتری با استفاده از برنامه HYDRUS-1D مورد استفاده قرار گرفتند (۱۷).

معادله سینتیک دو مکانی یا مدل جذب واجذب برای پیش‌بینی انتقال باکتری در خاک استفاده شد (۹):

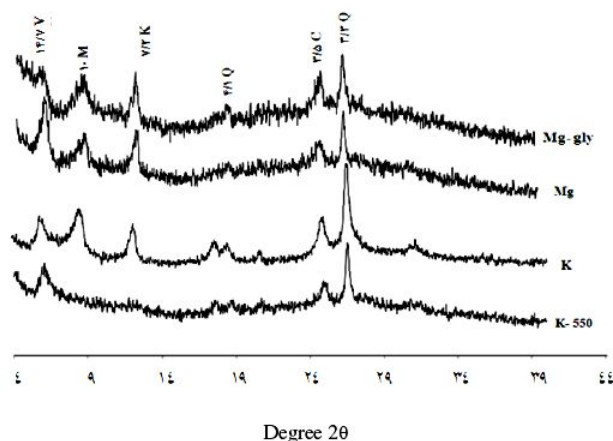
$$\frac{\rho_b}{\theta} \frac{\partial S_1}{\partial t} = k_{att1} C - k_{det1} \frac{\rho_b}{\theta} - \mu_1 \rho_b S_1 \quad [2]$$

$$\frac{\rho_b}{\theta} \frac{\partial S_2}{\partial t} = k_{att2} C - k_{det2} \frac{\rho_b}{\theta} - \mu_2 \rho_b S_2 \quad [3]$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\rho_b}{\theta} \frac{\partial S_1}{\partial t} + \frac{\rho_b}{\theta} \frac{\partial S_2}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - v \frac{\partial C}{\partial z} - \mu_1 C - \mu_2 \rho_b (S_1 + S_2) \quad [4]$$

که در آنها، C غلظت باکتری در فاز مایع (NL^{-3}) ، S غلظت (کلوئید، باکتری یا ویروس) در فاز جامد (NM^{-1}) ، اندیس‌های

ترکیب کانی‌شناسی خاک مورد مطالعه توسط دستگاه XRD



شکل ۱. پراش نگاشت اشعه ایکس ذرات رس مربوط به خاک با بافت شن لومی

Mg-gly تیمار اشباع با منیزیم و گلیسرول، تیمار اشباع با منیزیم، تیمار اشباع با پتاسیم و تیمار اشباع با پتاسیم با حرارت ۵۵° درجه سانتی‌گراد). تمامی پیک‌ها برحسب آنگستروم می‌باشند. (Q: کوآرتز، M: میکا و C: کلریت، K: کائولینیت و V: ورمی‌کولیت)

جدول ۱. برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه

بافت خاک	شن (%)	سیلت (%)	رس (%)	کربنات کلسیم معادل (%)	pH	ECe (dS/m)	کربن آلی (%)	CEC (Cmol/kg)
شن لومی	۸۲/۹	۱۲/۶	۴/۵	۳۸/۲	۸/۲	۲/۱	۰/۱	۸

شامل کانی‌های کلریت و کوآرتز بود.

ریشه پوسیده شده می‌تواند نشان‌دهنده وجود منافذ درشت ایجاد شده توسط ریشه گیاه در این خاک‌ها باشد (نمودارهای ب و ج).

در جدول (۱) ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه ارائه شده است. همان‌گونه که در جدول (۱) نشان داده شده است، بافت خاک مورد مطالعه شن لومی بوده. همچنین متوسط قطر ذرات خاک ۱۱۵/۴۹ میکرومتر و سطح ویژه آن ۲/۷۷ مترمربع بر گرم بود.

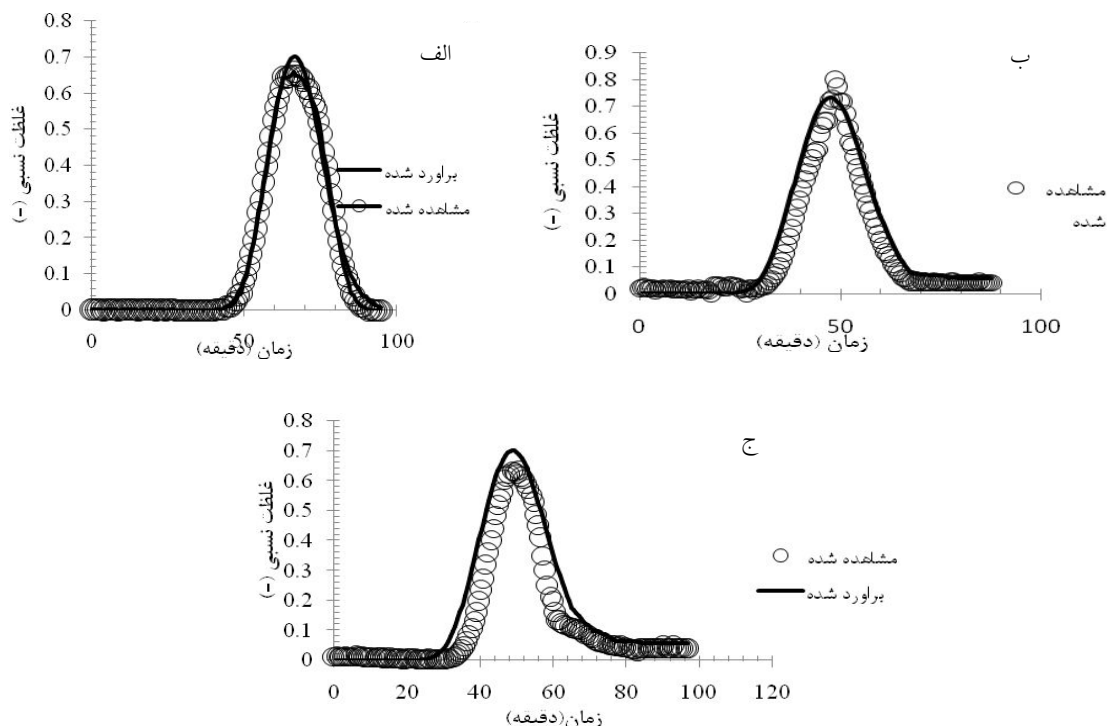
مقایسه انتقال باکتری با املاح غیر واکنشگر مانند کلراید به درک بهتر مکانیزم‌ها و فاکتورهای حاکم بر انتقال ذرات باکتری در خاک کمک می‌نماید. منحنی رخنه باکتری و کلراید برای هر یک از تیمارهای با ریشه و با ریشه پوسیده شده در شکل (۳) آمده است. مقایسه منحنی رخنه باکتری با کلراید به خوبی تفاوت بین آن دو را نشان می‌دهد. همانظوری که ملاحظه می‌شود در هر دو تیمار، باکتری قبل از کلراید در زهاب خروجی مشاهده شده و به نقطه اوج رسیده است و پس از پایان ورود محلول سوسپانسیون باکتری به سطح ستون خاک، منحنی رخنه باکتری قبل از کلراید سیر نزولی داشته است. انتقال سریع‌تر باکتری در مقایسه با کلراید را می‌توان به مسیرهای متفاوت انتقال باکتری و کلراید

انتقال کلراید

در شکل (۲) منحنی‌های رخنه کلراید اندازه‌گیری شده و برآورد شده با مدل CXTFIT برای ستون‌های خاک سه تیمار مورد مطالعه ارائه شده است. ضریب تبیین (R^2) بین مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده با مدل ۸۸ تا ۹۷ درصد است. ظاهر شدن زودتر کلراید در تیمار با ریشه گیاه و در تیمار با

را ندارد و تنها از منافذ درشت خاک عبور می کند. بنابراین

نسبت داد. زیرا باکتری برخلاف کلراید توانایی عبور از منافذ ریز



شکل ۲. مقادیر اندازه گیری شده منحنی رخنه کلراید و برازش داده شده آن با مدل CDE الف) تیمار شاهد، ب) تیمار در حضور ریشه گیاه، ج) تیمار ریشه پوسیده.

سیستم ریشه گیاه بر پارامترهای هیدرولیکی خاک در ستون های خاک در جدول (۲) مقدار پارامترهای حاصل از برازش با مدل CDE به همراه ضریب تبیین حاصل از مدل ارائه شده است. در این پژوهش هدایت هیدرولیکی، شدت جریان و ضریب انتشار آبی املاح مورد تجزیه واریانس قرار گرفت تا معنی دار بودن و عدم معنی دار بودن بین تیمارها مشخص گردد. پارامترهای انتقال به خوبی وجود جریان ترجیحی در ستون های خاک تحت کشت گیاه را نشان می دهند.

همان طوری که در جدول (۲) ملاحظه می شود در ستون های خاک با ریشه گیاه و با ریشه پوسیده شده هدایت هیدرولیکی اشباع به ترتیب $1/23$ و $1/31$ افزایش نشان داد. همان طور که ملاحظه می شود، افزایش هدایت هیدرولیکی اشباع در شرایط تحت کشت گیاه، نشان دهنده ایجاد منافذ پیوسته و مسیرهای آب گذاری سریع توسط سیستم ریشه ای گیاه ذرت می باشد. شنی نشان دهنده افزایش میزان هدایت هیدرولیکی در

میانگین سرعت انتقال باکتری بیشتر از کلراید بوده و زودتر از آن در زهاب خروجی مشاهده می شود. همچنین مقایسه منحنی رخنه کلراید و باکتری نشان می دهد که غلظت نسبی باکتری در مقایسه با کلراید بسیار کمتر بوده است که نشان دهنده نگهداشت قوی باکتری در خاک در نتیجه مکانیزم های پالایش فیزیکی و جذب است. نتایج حاصل از آزمون آماری LSD برای مقایسه میانگین های هدایت هیدرولیکی (K_s)، شدت جریان (q) و ضریب انتشار املاح، در سطح معنی دار ۵ درصد نشان داد که اختلاف معنی داری بین تیمارهای مورد مقایسه وجود دارد. همچنین بررسی آزمون مقایسه میانگین ها در سطح ۵ درصد گویای تفاوت معنادار بین پارامترهای D و تیمارهای مختلف بود. مطالعات بارلی و همکاران (۱) بیانگر افزایش چشم گیر میزان هدایت هیدرولیکی در ردیف های تحت کشت گیاه ذرت در خاک های زراعی با بافت فشرده و نفوذپذیری کم بود. همچنین نتایج مطالعه شیرمحمدی و اسکاگ (۱۶) در بررسی اثر

ستون‌های تحت کشت گیاه *Fescue* بود. آنها همچنین دریافتند که پوسیدگی ریشه و کاهش خاصیت چوبی آنها در افزایش جدول ۲. پارامترهای هیدرولیکی انتقال کلراید در ستون‌های خاک مورد مطالعه

ستون خاک	$V(\text{cm h}^{-1})$	$D(\text{cm h}^{-1})$	(cm)	$q(\text{cm}^2 \text{hr}^{-1})$	$K(\text{cmhr}^{-1})$	R^2
شاهد (فاقد ریشه)	۲۶/۱ ^c	۵/۱ ^c	۰/۱ ^c	۱۲/۷ ^c	۱۲/۷ ^c	۰/۹
ریشه گیاه	۳۵/۸ ^b	۱۳/۸ ^b	۰/۳ ^b	۱۵/۷ ^b	۱۴/۵ ^b	۰/۸
ریشه پوسیده گیاه پس از ۴ ماه	۳۹/۸ ^a	۱۹/۳ ^a	۰/۴ ^a	۱۶/۶ ^a	۱۶/۳ ^a	۰/۸

: سرعت منفذی، D: ضریب انتشار، q: شدت جریان داری، انتشارپذیری، θ : رطوبت خاک (حروف متفاوت نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح ۵ درصد است).

میزان هدایت هیدرولیکی مؤثر است. دارای بار موافق جذب مانند اکسیدهای آهن و آلومینیوم، کربنات کلسیم و لبه رس‌ها با بار مثبت باشد.

همان‌طوری که در جدول (۳) ملاحظه می‌شود در مدل تک‌مکانی مقدار k_{att} بیش از ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ برابر می‌باشد که نشان دهنده این است که جذب باکتری در خاک مورد مطالعه تقریباً غیرقابل برگشت است نتایج جدول (۳) نشان می‌دهند که نرخ جذب (k_{att}) در مکان سینتیک یک سریع و واجذب (k_{det}) از آن بسیار کند است. مقدار نرخ جذب (k_{det}) در مکان سینتیک یک در ستون خاک شاهد به ترتیب ۰/۳۴۱ و ۰/۳۰۲ می‌باشند. این درحالی است که در این مکان، میزان واجذب بسیار ناچیز است. مقدار واجذب در مکان سینتیک یک در ستون خاک شاهد به ترتیب $(\text{min}^{-1}) 5/2 \times 10^{-5}$ و $(\text{min}^{-1}) 1/0 \times 10^{-6}$ می‌باشد. درحالی که در مکان جذب، دو فرآیند جذب و واجذب سریع است.

به‌منظور بررسی اثر سیستم ریشه و پوسیده شده آن بر پارامتر نرخ جذب- واجذب مدل سینتیک دو‌مکانی آزمایش طرح کاملاً تصادفی با ۳ تکرار انجام شد. که تیمارها شاهد، خاک با ریشه گیاه ذرت پس از دو ماه رشد گیاه و خاک با ریشه پوسیده در طول مدت چهارماه بودند. نتایج تجزیه واریانس نشان داد که تیمار با ریشه و پوسیده شده آن بر پارامتر نرخ جذب و واجذب باکتری از خاک اثر معنی‌دار در سطح ۵ درصد داشته است. دلیل کاهش معنی‌دار جذب باکتری در

انتقال باکتری

پارامترهای برآورد شده مدل سینتیک جذب- واجذب باکتری (معادلات ۲، ۳ و ۴) در جدول (۳) ارائه شده است. مقدار نرخ جذب باکتری (k_{att}) در این ستون‌های خاک شاهد از ۰/۰۳۰۲ تا ۰/۰۱۲ متغیر است که نرخ جذب نسبتاً بالایی است. دلیل جذب بالای باکتری در شرایط اشباع حاکم بر ستون‌های خاک شاهد مورد مطالعه را می‌توان در نقش کانی‌های خاک جستجو کرد. باکتری اشیریشیاکلی دارای بار منفی بوده و سطوح با بار سطحی مثبت این ذرات را به شدت جذب می‌نماید. ترکیب کانی‌شناسی خاک مورد مطالعه شامل کانی‌های کلریت و کوآرتز بود (شکل ۱) همچنین مقدار pH_{PZC} کانی کربنات کلسیم بین ۹/۵ تا ۱۰/۸ متغیر است (۷). از طرفی مقدار اسیدیته خاک‌های مورد مطالعه ۸/۲ می‌باشد. لذا در این شرایط احتمالاً بارسطحی کانی کربنات کلسیم در خاک مورد مطالعه مثبت است. زیرا این کانی pH_{PZC} بیشتر از pH محلول خاک دارد. بنابراین با افزایش مقدار کربنات کلسیم که انرژی جذب متفاوتی با سایر کانی‌های خاک دارد شرایط بهتری برای جذب بیشتر باکتری اشیریشیاکلی که دارای بار سطحی منفی است، فراهم شده است. بنابراین نرخ جذب بالای باکتری می‌تواند در نتیجه جذب باکتری به مکان‌های

ستون‌های خاک با ریشه گیاه و با ریشه پوسیده مورد مطالعه، مسیرهای جریان از منافذ درشت جستجو کرد. همان‌طور که در نسبت به تیمار شاهد را می‌توان در نقش ریشه گیاه در ایجاد

جدول ۳. پارامترهای مدل سینتیک جذب و واجذب تک‌مکانی و دو مکانی برآزش داده شده بر منحنی رخنه باکتری (اعداد داخل پراوتر ضریب انحراف معیار هر پارامتر را نشان می‌دهند)

پارامتر	ستون شاهد	ستون با ریشه گیاه	ستون با ریشه پوسیده گیاه
$k_{att} \text{ (min}^{-1}\text{)}$	تک مکانی	تک مکانی	تک مکانی
	$3/4 \times 10^{-2}$	$2/4 \times 10^{-2}$	$1/2 \times 10^{-2}$
$k_{det} \text{ (min}^{-1}\text{)}$	تک مکانی	تک مکانی	تک مکانی
	$5/2 \times 10^{-5}$	$5/1 \times 10^{-4}$	$1/1 \times 10^{-5}$
$k_{att} \text{ (min}^{-1}\text{)}$	-	-	-
	-	-	-
$k_{det} \text{ (min}^{-1}\text{)}$	-	-	-
	-	-	-

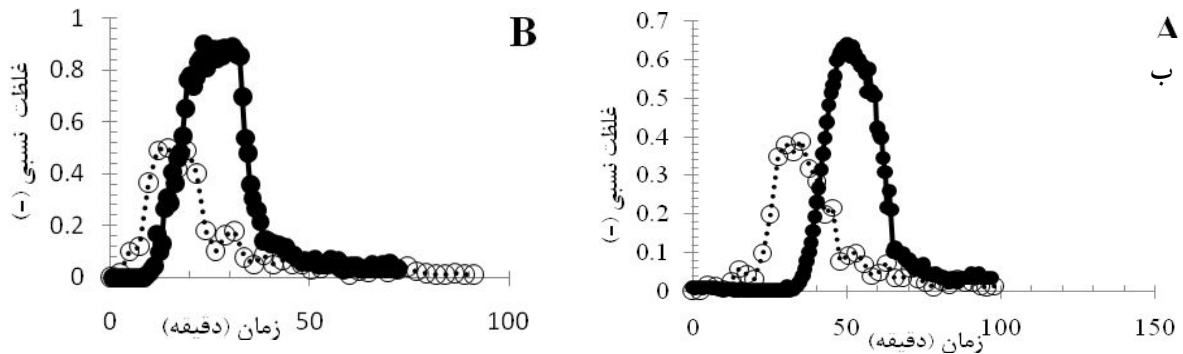
معنی دار جذب باکتری در شرایط خاک با ریشه زنده و خاک با ریشه پوسیده شده گیاه ذرت در مقایسه با تیمار شاهد را علاوه بر ایجاد منافذ درشت می‌توان در مواد آلی محلول حاصل از ریزوسفر ریشه‌ای جستجو کرد. ریشه گیاهان مختلف انواع متفاوتی از ترکیبات شیمیایی محلول را در طول فصل رشد خود تولید می‌کنند (۱۸).

ماده آلی موجود در فاز مایع ممکن است با ایجاد رقابت با باکتری برای جذب، مقدار جذب آن را کاهش دهد. مواد آلی دارای بار منفی، سطح ذرات خاک را پوشش داده سبب افزایش بار سطحی و در نتیجه نیروی دافعه شده و مقدار جذب باکتری را کاهش می‌دهند (۱۲). همچنین منحنی رخنه باکتری اندازه‌گیری شده و برآورد شده با مدل سینتیک جذب- واجذب سینتیک تک‌مکانی و دو مکانی برای تیمار شاهد با ریشه گیاه و با ریشه پوسیده در شکل (۴) نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در تمامی تیمارها مدل سینتیک جذب- واجذب دو مکانی تخمینی بسیار خوب از منحنی رخنه انتقال

جدول (۳) نشان داده شده است میزان پارامتر جذب باکتری (k_{att}) در تیمارهای با ریشه و ریشه پوسیده شده کمتر از حالت شاهد بود. میزان جذب باکتری در تیمار با ریشه گیاه نسبت به تیمار شاهد کاهش و در تیمار با ریشه پوسیده نسبت به تیمار شاهد کاهش نشان داد. ساختمان خاک نقشی بسیار مهم بر انتقال آب، املاح و ذرات کلوئیدی در خاک دارد. نتایج مطالعات استودار و همکاران (۲۰) نشان داد که مقدار جذب باکتری در خاک دارای ساختمان با منافذ درشت کمتر از خاک فاقد ساختمان است زیرا وجود منافذ درشت سبب کاهش زمان تماس باکتری شده و فاصله بین باکتری و سطح ذرات خاک افزایش می‌یابد. همچنین جریان از منافذ درشت در خاک‌های دارای ساختمان باعث افزایش سرعت انتقال باکتری از نیم‌رخ خاک می‌گردد. برخی پژوهش‌ها نشان داده‌اند که هرچند منافذ درشت خاک ممکن است تنها ۱/۵ تا ۵ درصد تخلخل خاک را تشکیل دهند اما نقش بسیار چشمگیری بر انتقال آب، املاح و میکروب‌های بیماری‌زا در خاک داشته‌اند (۱۰). دلیل کاهش

مقایسه حداکثر غلظت نسبی باکتری (C_{max}/C_0)
منحنی‌های رخنه مختلف در جدول (۴) نشان می‌دهد که

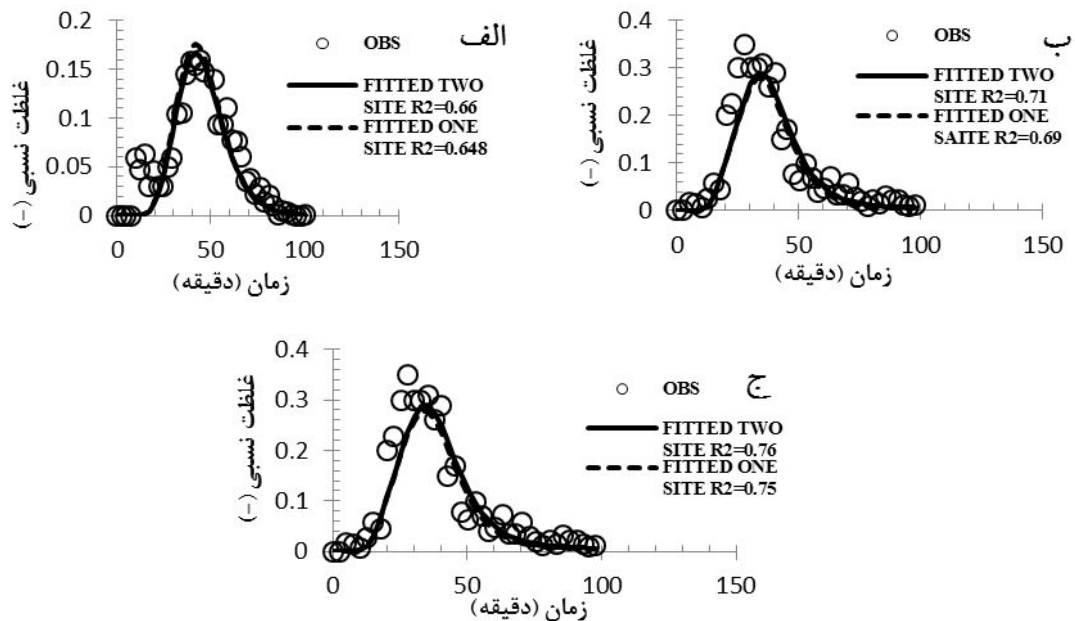
باکتری داشته است. ضریب تبیین بین مقادیر اندازه‌گیری شده و
برآورد شده ۰/۶۸ تا ۰/۹۰ می‌باشد.



شکل ۳. منحنی رخنه کلراید (دایره توپُر) و باکتری اندازه‌گیری شده (دایره تو خالی) در تیمار با ریشه گیاه (الف) و با ریشه پوسیده شده (ب)

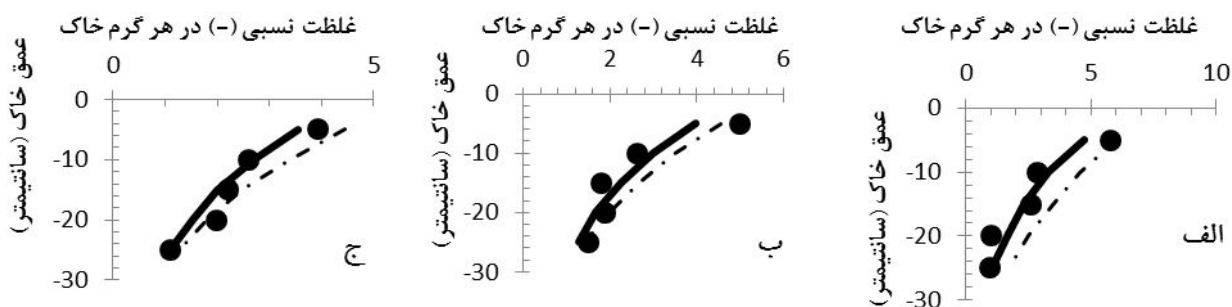
جدول ۴. حداکثر غلظت نسبی (C_{max}/C_0)، نرخ حذف باکتری $\log(C_{max}/C_0)m^{-1}$

نرخ حذف باکتری	حداکثر غلظت نسبی	ستون خاک
۷/۰ ^a	۰/۱	شاهد
۴/۰ ^b	۰/۳	ریشه گیاه
۲/۰ ^c	۰/۵	ریشه پوسیده گیاه



شکل ۴. منحنی رخنه باکتری اندازه‌گیری شده (دایره تو خالی) و برآورد شده با مدل سینتیک جذب-واجذب تک مکانی (خط چین) و دو

مکانی (خط ممتد) در تیمار شاهد(الف)، با ریشه گیاه (ب) و با ریشه پوسیده (ج)



شکل ۵. مقدار باکتری اندازه‌گیری شده در نیمرخ خاک (دایره توپر) و برآورد شده با مدل سینتیک تک مکانی (خط چین) و دو مکانی (خط ممتد) در تیمار شاهد (الف)، با ریشه گیاه (ب) و با ریشه پوسیده (ج)

ریشه زنده و خاک با ریشه پوسیده در ۳ تکرار انجام شد. نتایج حاصل از آزمون آماری LSD برای مقایسه میانگین‌ها نشان داد که ریشه گیاه بر نرخ حذف باکتری $\log (C_{\max}/C_0) m^{-1}$ تأثیری معنی‌دار در سطح ۵ درصد دارد (جدول (۴)). همچنین آزمون مقایسه میانگین نشان‌داد تفاوت بین تیمارهای شاهد، با ریشه زنده و ریشه پوسیده شده معنی‌دار است. این نتایج نشان می‌دهد که ستون با ریشه پوسیده با بیشترین مقدار شدت جریان منفذی، حداکثر غلظت نسبی باکتری را در زهاب خروجی داشته است. این درحالی است که ستون شاهد کمترین شدت جریان منفذی و کمترین مقدار C_{\max}/C_0 در زهاب خروجی را نیز داشته است. زیرا بنابر قانون پوازی مقدار زیادی از کل جریان از منافذ درشت عبور نموده و در نتیجه مقدار بیشتری باکتری از خاک انتقال یافته است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت درحالی‌که کانی‌های خاک با انرژی جذب و دفع متفاوت بر جذب و واجذب باکتری یا به عبارتی تبادل جرم بین فاز مایع و جامد تأثیر داشته‌اند منافذ درشت ایجاد شده حاصل از رشد و پوسیدگی ریشه گیاه ذرت و شدت جریان آب نقشی مهم در انتقال باکتری در خاک مورد مطالعه داشته است.

نگهداشت باکتری در خاک

کمترین مقدار غلظت نسبی مربوط به ستون خاک شاهد بوده (۱۹۸/۰ درصد) و پس از آن به ترتیب ستون‌های با ریشه گیاه و با ریشه پوسیده به ترتیب با مقادیر ۳۸۹۹/۰ و ۵۴۸/۰ درصد قرار دارند. نتایج نشان می‌دهد ستون خاک با ریشه پوسیده دارای کمترین میزان نرخ حذف بوده است و بیشترین میزان C_{\max}/C_0 را داشته است. به بیان دیگر در تیمار با ریشه پوسیده میزان پالایش باکتری کمتر بوده است.

نرخ حذف باکتری با پارامتر $\log (C_{\max}/C_0) m^{-1}$ بیان می‌شود. در خاک‌های مورد مطالعه مقدار این پارامتر از ۲/۶۰۵ در تیمار با ریشه پوسیده تا $7/033 (\log m^{-1})$ در تیمار شاهد متغیر است. مقدار زیاد نرخ حذف نشان دهنده توان بالای این خاک‌ها در پالایش باکتری است. در جدول (۴) نرخ حذف باکتری برای هر ۳ تیمار مورد مطالعه آمده است. همچنین با توجه به نتایج حاصل از آزمون آماری LSD برای مقایسه میانگین‌ها کاهش معنی‌دار نرخ حذف باکتری در تیمارهای با ریشه گیاه و با ریشه پوسیده را می‌توان در منافذ درشت حاصل از رشد و پوسیدگی ریشه گیاه ذرت جستجو کرد.

به منظور بررسی تأثیر ریشه گیاه بر انتقال باکتری آزمایش در قالب طرح کاملاً تصادفی انجام شد. تیمارها شاهد، خاک با

منحنی نگهداشت اندازه‌گیری شده شکل نمایی کامل ندارد و کاهش عمق مقدار نگهداشت کاهش می‌یابد (شکل ۵) و این بیشتر باکتری‌ها در لایه‌های سطحی خاک نگه داشته شده‌اند و با کاهش در لایه‌های زیرین تقریباً حالت یکنواخت پیدا

جدول ۵. نتایج ارزیابی مدل‌های سینتیک جذب-واجذب تک‌مکانی و دو مکانی با استفاده از آماره‌های کارایی مدل

(E) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)

مدل	شاهد		با ریشه گیاه		با ریشه پوسیده	
	RMSE	E	RMSE	E	RMSE	E
تک مکانی	۰/۹۶	۰/۰۵۶	۰/۱۱۵۹	۰/۹۵	۰/۱۰۷۱	۰/۹۵
دو مکانی	۰/۹۸	۰/۰۴۹	۰/۰۱۸۳	۰/۹۹	۰/۰۷۷۲	۰/۹۷

باکتری در ورودی ستون‌ها را بیانگر غالب بودن مکانیزم پالایش فیزیکی در ستون‌های شن دانستند (۱۴).

ارزیابی کارایی مدل‌های جذب-واجذب

نتایج ارزیابی دو مدل جذب سینتیک تک‌مکانی و دو مکانی در جدول (۵) ارائه شده است. با استفاده از مدل سینتیک جذب-واجذب HYDRUS-1D به‌طور هم‌زمان منحنی رخنه باکتری و نگهداشت آن در نیم‌رخ خاک برآورد شدند. برای ارزیابی دقت و توانایی هر یک از مدل‌های سینتیک جذب تک‌مکانی و دو مکانی از آماره‌های تعیین کارایی مدل (E) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده شد. هرچه میزان پارامتر کارایی مدل (E) به یک نزدیک‌تر باشد برازش مدل بهتر بوده است. همچنین هرچه مقدار میانگین مربعات خطا (RMSE) به صفر نزدیک‌تر باشد برازش مدل بر داده‌ها بهتر بوده است (۲۱). همان‌طوری که در جدول (۵) ملاحظه می‌شود مقایسه مقادیر آماره‌های E و RMSE نشان می‌دهد که مدل سینتیک جذب دو مکانی برآوردی بهتر از منحنی رخنه و نگهداشت باکتری در خاک دارد.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش به‌خوبی نشان می‌دهد که سیستم ریشه گیاه و منافذ به‌جا مانده ریشه پوسیده شده آن می‌تواند تأثیری معنی‌دار بر ویژگی‌های هیدرولیکی خاک (شدت جریان و هدایت

کرده است. لایه اول ستون‌های خاک تیمارهای شاهد، خاک با ریشه گیاه و خاک با ریشه پوسیده به‌ترتیب ۴۷/۳۳، ۴۱/۹۶، ۳۳/۹۹ درصد جرم کل باکتری شمارش شده را نگه داشته‌اند. پالایش فیزیکی زمانی اتفاق می‌افتد که نسبت قطر کلئوئید به میانگین قطر ذرات خاک بیش از ۰/۵ درصد باشد (۸). وقتی که این نسبت به‌بیش از ۰/۸ برسد مقدار پالایش بسیار چشمگیر خواهد بود (۱۲). با توجه به این‌که قطر باکتری اشریشیاکلی مورد استفاده ۰/۰۰۰۳ سانتی‌متر و قطر ذرات خاک $10^{-4} \times 115$ بود و در خاک مورد استفاده در پژوهش حاضر این نسبت به‌میزان ۲/۶ درصد است؛ می‌توان نتیجه گرفت که درصد بالای نگهداشت باکتری در اعماق سطحی ستون‌های خاک مورد مطالعه به‌دلیل وقوع فرآیند پالایش است. منافذ درشت ایجاد شده در خاک دارای ساختمان امکان انتقال باکتری را با حداقل پالایش فیزیکی فراهم می‌کند. بنابراین با توجه به ناهمگن بودن خاک طبیعی دارای ساختمان و تغییر پذیری مکانی آن اثر ساختمان خاک و منافذ درشت بر پالایش فیزیکی هنوز شناخته نشده است و بیان کمی آن بسیار دشوار است. پاولسون و میلز (۱۴) انتقال باکتری اشریشیاکلی را در ستون‌های شن کوارتز تحت شرایط رطوبتی مختلف مطالعه کردند و نشان دادند که در شرایط رطوبتی نزدیک به اشباع، میزان انتقال باکتری در خاک بیشتر است. آنها مشاهده کردند که در شرایط رطوبتی اشباع و نزدیک به اشباع، میزان جذب باکتری در طول ستون‌های شن کاهش می‌یابد. این پژوهشگران دلیل میزان نگهداشت زیاد

نرخ حذف باکتری $\log(C_{\max}/C_0)m^{-1}$ در این خاک‌ها بسیار زیاد بود. نرخ حذف باکتری در خاک‌های مورد مطالعه در تیمار شاهد $7/033 \log m^{-1}$ بود که در تیمار با ریشه گیاه و با ریشه پوسیده کاهش معنی‌داری را نشان داد. این ویژگی در خاک مورد مطالعه می‌تواند دلیلی بر وجود منافذ درشت ایجاد شده توسط ریشه در حال رشد و پوسیده شده آن باشد. در این پژوهش مدل سینتیک جذب-واجذب برنامه HYDRUS-1D توانست انتقال و نگهداشت باکتری را در خاک به خوبی برآورد نماید.

هیدرولیکی) داشته‌باشد. همچنین ریشه گیاه با ایجاد منافذ درشت سبب انتقال سریع املاح در خاک رخ می‌گردد. بنابراین پیشنهاد می‌شود به هنگام مطالعه انتقال املاح در خاک زراعی، نقش ریشه گیاه نیز لحاظ گردد. نتایج نشان داد که نگهداشت باکتری در تمامی ستون‌های خاک بسیار بیشتر از مقدار انتقال یافته از ستون خاک بود. مقدار باکتری مشاهده‌شده در زهاب خروجی در ستون‌های خاک شاهد، با ریشه گیاه و با ریشه پوسیده به ترتیب ۲/۹، ۹/۷۵ و ۱۳/۷۹ درصد بود. به عبارت دیگر، به ترتیب حدود ۶۹/۶، ۶۵/۲۵ و ۶۳/۴ درصد باکتری‌ها در ستون خاک نگه‌داشته شدند که نشان دهنده توان بالای خاک‌های مورد مطالعه در پالایش باکتری است. مقدار

منابع مورد استفاده

1. Barley, K. P. 1994. Effects of root growth and decay on the permeability of synthetic sandy. Soil Sci. Soc. Am. J. 78: 205-210.
2. Barkle, K. L. and M. T. Osterhol. 1993. Foodborne outbreak of *Escherichia Coli* O157:H7 infections from hamburgers. Morb. Mortal. Wkly Rep. 42(4): 85-80.
3. Chapman, H. D. 1965. Cation exchange capacity. PP. 891-900. In: Black, C. A. (Ed.), Methods of Soil Analysis: Part 2. American Society of Agronomy, Madison, WI.
4. Dispart, A. A. 1987. Effect of root mass density on infiltration among four Mediterranean dryland and forages and two irrigated legumes. Master degree Thesis, University of California, Riverside.
5. Foppen, J. W. A and J. F. Schijven. 2005. Transport of *E.coli* in columns of geochemically heterogeneous sediment. Water Resour. Res. 39: 3082-3088.
6. Foppen, J. W. A. and J. F. Schijven. 2006. Evaluation of data from the literature on the transport and survival of *Escherichia Coli* and thermo tolerant coliforms in aquifer under saturated conditions. Water Resour. Res. 40:401-426.
7. Foppen, J. W., A. A. Mporokoso and J. F. Schijven. 2005. Determining straining of *Escherichia coli* from breakthrough curves. J. Contam. Hydrol. 76: 191-210.
8. Ginn, T. R., B. D. Wood, K. E. Nelson, T. D. Scheibe, E. M. Murphy and T. P. Clement. 2002. Processes in microbial transport in the natural subsurface. Adv. Water Resour. 25:1017-1042.
9. Hassanizadeh, S. M. and J. F. Schijven. 2000. Use of bacteriophages as tracers for the study of removal of viruses. PP. 167-174. In: Dassargues, A. (Ed.), Tracers and Modeling in Hydrogeology. Proceedings of TRAM'2000 held in Liege, Belgium, 23- 26 May 2000.
10. Jamieson, R. C., R. J. Gordon, K. E. Sharples, G. W. Stratton and A. Madani. 2002. Movement and persistence of fecal bacteria in agricultural soils and subsurface drainage water: a review. Can. Biosyst. Eng. 44: 1.1-1.9.
11. Mawdsley, J. R. D., R. J. BardgettMerry, B. F. Pain and M. K. Theodoru. 1994. Pathogens in livestock waste, their potential for movement through soil and environmental pollution, Appl. Soil Ecol.: 2:1-15.
12. McDowell-Boyer, L. M., J. R. Hunt and N. Sitar. 1986. Particle transport through porous media. Water Resour. Res. 22: 1901-1921.
13. Nelson, R. E. 1982. Carbonat and gypsum. PP. 181-199. In Black, A. C. (Ed.), Methods of Soil Analysis: Part 1. American Society of Agronomy, Madison, WI.
14. Powelson, D. K. and A. L. Mills. 2001. Transport of *Escherichia coli* in sand columns with constant and changing water contents. J. Environ. Qual. 30: 238-245.
15. Reynolds, P. J., P. Sharma, G. E. Jenneman and M. J. McInerney. 1989. Mechanisms of microbial movement in subsurface materials. Appl. Environ. Microb. 55(9): 2280-2286.
16. Shirmohammadi, A. and R. W. Skagg. 1984. Effect of surface conditions on infiltration for shallow water table

- soils. *Trans Am. Soc. Agric. Eng.* 27(6): 1789-1787.
17. Simunek, J., M. Sejna, H. Saito, M. Sakai and M. Th. van Genuchten. 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, HydrusSeries 3, Department of Environmental Sciences, University of California Riverside, Riverside, CA, USA.
 18. Smucker, A. J. M., W. Richner and V. O. Snow. 1995. Bypass flow via root. Induced macropores (RTMS) in subirrigated agriculture. *Clean water, clean environment, 21st century: team agriculture, working to protect water resources: American Society of Agricultural Engineers.* 5-8, Kansas City, Missouri.
 19. Stagnitti, F., J. Y. Parlange, T. S. Steenhuis, B. Nijssen and D. Lockington. 1994. Modeling the migration of water soluble contaminants through preferred paths in the soil. PP. 367-379. *In: K. Kovar and J. Soveri (Ed.), Groundwater quality management. IAHS Publ. No. 220. Intl. Assoc. of hydrological Sciences J., Oxfordshire, UK.*
 20. Stoddard, C. S., M. S. Coyne and J. H. Grove. 1998. Fecal bacteria survival and infiltration through a shallow agricultural soil: Timing and tillage effects. *J. Environ. Qual.* 27:1516-1523.
 21. Toride, N., F. J. Leij and M. T. Van Genuchten. 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. *Transport of solutes in soil. Geoderma* 46: 283-297.
 22. Toor, G. S., L. M. Condon and K. C. Cameron. 2004. Seasonal fluctuations in phosphorus loss by leaching from a grassland soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68: 1429-1436.
 23. Van Elsas, J. D., J. T. Trevors and L. S. van Overbeek. 1991. Influence of soil properties on the vertical movement of genetically-marked *Pseudomonas fluorescens* through large soil microcosms. *Biol. Fert. Soils* 10: 249-255.