نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۶، جلد ۱۵، بهمن-اسفند ۱۴۰۰، ص. ۱۳۹۳-۱۳۸۲

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 6, Vol. 15, Feb.-Mar. 2022, p. 1382-1393

مقاله علمی-پژوهشی

تأثیر اندازه ذرات کود گاوی بر انتقال آلودگی باکتریایی با استفاده از مدل جذب- واجذب در خاک تحت جریان اشباع

حمداله نوروزی[۱]، سیدحسن طباطبائی[۲*]، نگار نورمهناد[۳]، حسین شیرانی[۴]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۳/۱۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۲۴

چکیده

کودهای دامی منبع میکروارگانیسم‌های بیماری‌زایی می‌باشند که می‌توانند سبب آلودگی منابع آب‌های سطحی و زیرسطحی شوند. باکتری‌ها پس از آزاد شدن از کود، می‌توانند به درون خاک نفوذ کرده و انتقال یابند. این پژوهش با هدف شبیه‌سازی اثر دانه‌بندی کود گاوی بر ضرایب انتقال باکتری ایشریشیاکولی در ستون شن تحت جریان اشباع انجام شد. کود گاوی با اندازه ذرات ۰/۲۵، ۰/۵، ۱ و ۲ میلی‌متر معادل با ۳۰ تن در هکتار بر حسب وزن خشک استفاده شد. به موازات این تحقیق از ردیاب کلراید نیز برای بررسی ضریب انتشار پذیری خاک استفاده گردید. اثر تیمارهای کود بر انتقال باکتری ایشریشیاکولی در خاک با اندازه‌گیری تعداد باکتری و ردیاب کلراید در زه‌آب خروجی تا ۲۰ سانتی‌متر مکعب حجم آب منفذی بررسی شد. از نرم‌افزار HYDRUS-1D برای شبیه‌سازی استفاده شد. به‌منظور تعیین کلراید از الگوریتم لونبرگ- مارگوت و بهینه‌سازی غیرخطی و برای تعیین نگهداشت و انتقال باکتری از معادله سینتیک دو مکانی یا مدل جذب واجذب و حل معکوس استفاده شد. نتایج نشان داد شبیه‌سازی انتقال باکتری توسط HYDRUS-1D و مدل سینتیک دو مکانی به‌خوبی برای تمام تیمارهای کودی انجام شده است (میانگین انحراف معیار ۰/۰۵۶ و ضریب تعیین ۰/۹۰۵). تیمار ۰/۲۵ میلی‌متر بهترین تطابق را با نتایج شبیه‌سازی داشت. بر اساس نتایج تحقیق، بیشترین غلظت باکتری زه‌آب، در تیمار ۲ میلی‌متر به دست آمد که ناشی از درشتی ذرات کود و خروج سریع‌تر و زودهنگام باکتری از بین ذرات آن می‌باشد. کمترین نرخ جذب، $۵/۵۹\times۱۰^{-۶}$ (s^{-1})، در تیمار کودی ۲ میلی‌متر به دست آمد که دلیل آن رهایش بیشتر باکتری در این تیمار کودی و در نتیجه افزایش نرخ واجذب، $۳/۶۱\times۱۰^{-۱}$ (s^{-1})، بود. همچنین با افزایش عمق خاک میزان نگهداشت باکتری نیز افزایش یافت که احتمالاً به دلیل تجمع باکتری‌ها روی سطح ذرات خاک در عمق‌های پایین‌تر می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: ایشریشیاکولی، پالایش، مدل سینتیک، منحنی رخنه، HYDRUS-1D

مقدمه

آلودگی عبارت است از وارد کردن عناصر و مواد شیمیایی معدنی یا آلی به محیط‌زیست به‌طوری‌که پتانسیل خطر برای سلامتی انسان یا محیط‌زیست را داشته باشد. یکی از بحران‌ها در سطح جهان، آلودگی منابع آب و خاک است، پخش کود دامی در سطح خاک، سبب می‌شود باکتری‌های بیماری‌زا موجود در آن از طریق آب آبیاری یا بارندگی در خاک منتقل‌شده و موجب آلودگی آب‌های سطحی و رودخانه‌ها گردد و یا به اعماق حرکت کرده و آب‌های زیرزمینی و منابع آب شرب را آلوده نماید (Warnemuende and Kanwar, 2000). خاک‌ها به دلیل دارا بودن خواص فیزیکی و شیمیایی و بیولوژیکی خاص و پیچیده‌ای که دارند، نقش بسیار مهمی را در بهبود کیفیت انواع آلاینده‌ها ایفا می‌کنند (Tabatabaei et al., 2020). اطلاع از وضعیت تحرک و تجمع آلاینده‌ها در خاک و پیامد انتقال آن‌ها به منابع آب‌های زیرزمینی و چرخه غذایی انسان، از جمله مسائل مهمی است که تحقیقات زیادی را در دهه اخیر متوجه خود ساخته است.

در کودهای آلی، باکتری‌های بیماری‌زای گوناگونی وجود دارند که هر کدام به‌گونه‌ای سلامتی انسان را به خطر می‌اندازند. در کود گاوی، باکتری ایشریشیاکولی به‌عنوان باکتری شاخص آلوده‌کننده آب‌های سطحی و زیرزمینی انتخاب و حرکت آن در خاک بررسی می‌شود. ایشریشیاکولی جز اصلی باکتری‌های کلی‌فرم روده‌ای است. این باکتری یک باسیل گرم منفی، هوازی یا بی‌هوازی اختیاری و از

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران
۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران
۳- استادیار گروه کشاورزی، دانشگاه پیام نور، ایران
۴- استاد گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ولیعصر رفسنجان، رفسنجان، ایران
(*- نویسنده مسئول: (Email: Tabatabaei@sku.ac.ir
DOR: 20.1001.1.20087942.1400.15.6.13.3

خانواده آنتروباکتریاسه می‌باشد. این باکتری متحرک و حرکت آن توسط تاژک پری‌تریش انجام می‌گیرد. قطر سلول آن از یک تا شش میکرومتر است. بیش‌تر به شکل دوتایی دیده می‌شود. چگالی باکتری ایشریشیاکولی ۰/۰۳۴ گرم بر میلی‌لیتر است. ویژگی‌هایی از خاک که بر حرکت باکتری اثر دارند، عبارت‌اند از: توزیع اندازه ذرات، ساختمان، تخلخل، چگالی ظاهری خاک، نفوذپذیری، اسیدیته، مقدار ماده آلی، قدرت یونی، دمای خاک، مقدار رطوبت و شدت جریان آب در خاک. معمولاً خاک یکنواخت به‌عنوان فیلتر کامل برای جلوگیری از ورود باکتری به آب‌های زیرزمینی فرض می‌شود درحالی‌که خاک محیطی ناهمگن است که دارای منافذ متفاوتی به لحاظ اندازه می‌باشد، که باعث می‌شود باکتری در قسمت‌های مختلف خاک متفاوت باشد. سپهرنیا (۱۳۹۵) با بررسی انتقال و جذب (نگهداشت) دو نوع باکتری ایشریشیاکولی و ردوکوکوس اریتروپولیس در خاک‌های آب‌گریز و آب‌دوست نشان داد که در محیط‌های آب‌گریز در مقایسه با محیط آب‌دوست میزان جذب باکتری کم‌تر است و با افزایش میزان رطوبت خاک، جبهه آلودگی باکتری با غلظت کمتری نسبت به حالت هوا خشک به زه‌آب خروجی می‌رسد. سپهرنیا و همکاران با بررسی اثر بافت خاک بر توزیع باکتری از کودهای مختلف حیوانی دریافتند که تأثیر بافت خاک بر جذب و انتقال باکتری در کود مرغی آشکارتر از کودهای گاوی و گوسفندی بود و با افزایش عمق در بافت‌های شنی و لوم-رس-سیلتی میزان جذب باکتری کاهش می‌یابد و روند توزیع باکتری در پروفیل خاک با بافت لوم-رس-سیلتی منظم‌تر از بافت‌های شنی و لومی است (Sepehrnia et al., 2018). اخوان و همکاران انتقال باکتری ایشریشیاکولی را در شرایط اشباع تحت شرایط جریان ترجیحی در ستون‌های خاک با قطر ۱۰۰ و ارتفاع ۲۰۰ میلی‌متر بررسی کردند نتایج این پژوهش نشان داد که در شرایط اشباع میزان باکتری نگهداشته شده در مسیرهای جریان ترجیحی کمتر از ماتریکس خاک است و افزایش میزان فضای ماکروپورها سبب کاهش جذب باکتری در ستون خاک می‌شود (Akhavan et al., 2019).

مدل‌سازی ابزاری قدرتمند برای درک درست از یک سیستم است. مدل‌سازی به معنای استخراج معادلات و روابط بین پدیده‌های مرتبط با هم و ارایه یک سیستم پویا است تا امکان پیشگویی تغییرات پدیده یا پدیده‌ها نسبت به زمان، مکان و غیره به وجود آید. استفاده از مدل‌ها در پیش‌بینی حرکت املاح و آلاینده‌ها در خاک، می‌تواند موجب صرفه‌جویی زیاد در وقت و هزینه‌ها گردد. ولی این پیش‌بینی زمانی مفید و کاربردی است که دقت و اعتبار مدل در این برآورد، ابتدا بررسی‌شده باشد. در دهه‌های اخیر مدل‌هایی مانند HYDRUS (Šimunek and van Genuchten, 2000) ارائه شده است. احمدی‌مقدم و طباطبائی (۱۴۰۰) به شبیه‌سازی انتقال آلودگی با حل معکوس و با استفاده از مدل جابه‌جایی انتقال املاح (CDE) و روان- ساکن (MIM) پرداختند و نشان دادند حل معکوس عددی نسبت به حل تحلیلی دقت بیشتری دارد و تخمین ضرایب در مدل HYDRUS-1D دقیق‌تر از STANMOD انجام شد. شبیه‌سازی حرکت املاح و آلاینده‌ها (باکتری) با استفاده از مدل HYDRUS-1D می‌تواند در کاهش آلودگی‌های ناشی از مصرف کودهای حیوانی مؤثر و مفید باشد. با نتایج حاصل از شبیه‌سازی انتقال باکتری در خاک می‌توان، میزان آلودگی آب‌های زیرزمینی در اثر استفاده از کودهای حیوانی را به دست آورده و توصیه‌های مدیریتی را در صورت نیاز اعمال نمود. احمدی‌مقدم و همکاران (۱۳۹۹) اثر کم آبیاری و جریان ترجیحی را بر نگهداشت باکتری در خاک بررسی کردند و نشان دادند میزان نگهداشت باکتری در اعماق خاک کمتر است این موضوع نشان می‌دهد خاک همانند یک فیلتر طبیعی در پالایش آلاینده‌های میکروبی عمل می‌کند. با افزایش میزان سطح آبیاری میزان نگهداشت باکتری در اعماق پایین‌تر خاک بیش‌تر می‌شود. در اثر کم آبیاری در ستون‌هایی که رطوبت اولیه یکسانی داشتند انتقال باکتری کمتر شد و میزان باکتری در سطح خاک افزایش یافت. یافته‌های سپهر نیا و همکاران، نشان داد فیزیک کودهای جامد آزادسازی سلول را کنترل می‌کند و منحنی ترشحات باکتریایی از کودها و منحنی رخنه باکتری‌ها در خاک‌های تیمار شده با کود باید به‌طور جداگانه برای عملکردهای مدیریت کود در مزارع ارزیابی شوند. آن‌ها به‌عنوان یک پروتکل مدیریتی، کود گاوی با اجزای کوچک‌تر از ۰/۵ میلی‌متر و ۱ میلی‌متر را برای به حداقل رساندن ریسک آلودگی ناشی از باکتری‌ها پیشنهاد دادند (Sepehrnia et al., 2021). منیشداوی و همکاران (۱۳۹۴) به شبیه‌سازی حرکت باکتری ایشریشیاکولی جهت برآورد میزان آلودگی باکتریایی در خاک تحت تیمار کود مرغی با کاربرد معادله تعادلی (CDE) و غیر تعادلی حرکت املاح (NECD) به‌وسیله HYDRUS-1D اقدام کردند و نتیجه گرفتند که، شبیه‌سازی حرکت باکتری ایشریشیاکولی در خاک با کاربرد معادله غیرتعادلی نسبت به معادله تعادلی از دقت بالاتری برخوردار است. تلاش‌های بسیاری در زمینه بررسی کمّی انتقال باکتری در ستون‌های خاک شنی دست‌خورده انجام شده است Shein (et al., 2002; Jiang et al., 2007). فرخیان فیروزی و همکاران معادله جذب و واجذب مدل HYDRUS-1D را برای پیش‌بینی انتقال و جذب باکتری سودوموناس فلورسنس در ستون خاک دست‌نخورده آهکی استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد مدل سینتیک جذب و واجذب برآوردی خوب از منحنی‌های رخنه در شرایط غیراشباع داشت درحالی‌که تخمین کم‌تری از مقدار باکتری نگه‌داشته شده در نیمرخ خاک نشان داد. در واقع منحنی نگهداشت باکتری به علت نگهداشت عمده باکتری‌ها در لایه سطحی خاک و کاهش میزان باکتری‌ها با افزایش عمق، شکل تقریباً نمایی داشت درحالی‌که منحنی برآورد شده با مدل جذب و واجذب سینتیک کاملاً نمایی بود

(Farrokhian Firouzi et al., 2010).

بررسی‌ها نشان می‌دهد که مدل HYDRUS توانایی شبیه‌سازی باکتری در بافت‌های مختلف خاک را دارد و شرایط توزیع باکتری در پروفیل خاک و منحنی رخنه را به‌خوبی شبیه‌سازی کرده است بااین‌حال از آنجایی دقت مدل به‌طور بسیار بالایی به ضرایب مدل از جمله غلظت باکتری، نرخ جذب و واجذب و غیرفعال شدن باکتری در فاز جامد و مایع بستگی دارد و این ضرایب تابع بافت خاک و به احتمال زیاد تابع خصوصیات کود نیز است لذا پژوهش حاضر با هدف بررسی شبیه‌سازی اثر دانه‌بندی کود گاوی بر حرکت باکتری ایشریشیاکولی در خاک و تعیین ضرایب مربوطه با کمک حل معکوس انجام گرفت.

مواد و روش‌ها

خاک مورداستفاده در پژوهش، از اراضی دانشکده کشاورزی دانشگاه شهرکرد تهیه شد. سپس نمونه‌ها، هوا خشک و کوبیده و از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند. ویژگی‌های فیزیکی خاک موردمطالعه شامل درصد سیلت، شن و رس، جرم مخصوص ظاهری و حقیقی و ویژگی‌های شیمیایی آن شامل EC، pH، سدیم، کلسیم، منیزیم، غلظت املاح محلول، کربن آلی و مقدار باکتری اندازه‌گیری شدند. خاک مورد آزمایش در دستگاه اتوکلاو قرار داده و استریل شد. ویژگی‌های شیمیایی کود موردمطالعه شامل pH، EC، سدیم، کلسیم، منیزیم، غلظت املاح محلول و کربن آلی اندازه‌گیری شد. در جداول ۱و ۲ ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و کود نشان داده شده است. خاک از نظر باکتری کاملاً استریل و برای آزمایش مناسب بود. مقدار شوری خاک در حد ۰/۶۵ دسی زیمنس بر متر بود بنابراین خاک غیر شور و از نظر شرایط زنده‌مانی باکتری مشکلی نداشت.

جدول ۱- برخی ویژگی‌های فیزیکی خاک موردمطالعه

بافت خاک	سیلت (٪)	رس (٪)	شن (٪)	ρs (g/cm^3)	ρb (g/cm^3)
لوم شنی	۶/۷۲	۹/۸۸	۸۳/۴	۲/۷	۱/۵

جدول ۲- ویژگی‌های شیمیایی خاک موردمطالعه

پارامتر	EC	pH	Na	Ca	Mg	TDS	کربن آلی	باکتری موجود در خاک	ماده آلی
واحد	dS/m	–	meq/l	meq/l	meq/l	g/l	٪		٪
خاک	۰/۶۵	۸/۰۵	۱۰/۱۲	۴	۵	۱/۲۲	۰/۱۳	۰	–
کود گاوی	۷/۳۵	۵/۸۵	۲۴/۳۴	۱۲/۵	۲۸/۵		۴/۷۱	–	۶۸/۴

معرفی تیمارها

این پژوهش به‌منظور بررسی تأثیر دانه‌بندی کود گاوی بر حرکت باکتری ایشریشیاکولی در بافت سبک تحت جریان اشباع و به‌صورت ستونی انجام شد. آزمایش در قالب طرح کاملاً تصادفی در آزمایشگاه دانشکده کشاورزی دانشگاه شهرکرد در ۳ تکرار انجام شد. در این پژوهش از کود گاوی تازه به میزان۳۰ تن در هکتار (برحسب وزن خشک) به‌عنوان منبع باکتری استفاده شد. کود گاوی استفاده‌شده در این پژوهش از فضولات گاوداری دانشگاه به‌صورت تازه تهیه و پس از هوا خشک نمودن و کوبیدن، از الک‌های معین، عبور داده شدند. تیمارهای کود شامل چهار اندازه دانه‌بندی کود (۰/۲۵، ۰/۵، ۱ و ۲ میلی‌متر) بودند. برای جلوگیری از خشک شدن و تغییر جمعیت میکروبی کود، کودها آماده و به‌صورت جداگانه درون ظرف‌های در پوشیده قرار داده و در یخچال نگهداری شدند.

به‌منظور انجام آزمایش‌های ستونی، برای آن‌که ستون خاک تا حدی شرایط مشابه خاک مزرعه داشته باشد با توجه به جرم مخصوص ظاهری خاک، مقدار ۲۹۴ گرم خاک به درون هر سیلندر با قطر داخلی ۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۱۲ سانتی‌متر ریخته شد. پس از هر بار اضافه کردن خاک، مرز بین خاک و سیلندر توسط پارافین مایع روغن‌کاری شد، تا از ایجاد جریان ترجیحی در محل تماس خاک با سیلندر جلوگیری شود. ستون‌های خاک به مدت دو روز تحت جریان اشباع بودند. ستون‌ها پس از اشباع شدن، روی قیف‌هایی در جایگاه مخصوص قرار داده شدند (شکل ۱). بعدازاین مرحله با خروج آب ثقلی، میزان کود محاسبه‌شده برای هر ستون (۳۰ تن در هکتار) به سطح خاک اضافه گردید.

در حین آزمایش آبشویی، از زه‌آب‌ها ۲۹ بار نمونه‌گیری در حجم‌های (۰/۱، ۰/۲، ۰/۳، ۰/۴، ۰/۵، ۰/۶، ۰/۷، ۰/۸، ۰/۹، ۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸، ۹، ۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۳، ۱۴، ۱۵، ۱۶، ۱۷، ۱۸، ۱۹و ۲۰) سانتی‌متر مکعب آب منفذی (PV[1]) انجام گرفت. در زمان

۱- Pore Volume (PV)

نمونه‌گیری، زه‌آب‌های خارج‌شده از ستون‌های خاک، در ظروف استریل جمع‌آوری و تعداد باکتری‌های ایشریشیاکولی آن به کمک محیط کشت متیلن آئوزین بلو (EMB[1]) و روش شمارش زنده اندازه‌گیری شد. پس از آبشویی و در پایان کار، خاک ستون‌ها خارج و از عمق‌های ۳، ۶ و ۱۰ سانتی‌متری خاک نمونه‌برداری انجام شد و تعداد باکتری در هر عمق به‌وسیله کشت میکروبی به دست آمد.

اندازه‌گیری حجم آب منفذی

برای اندازه‌گیری حجم آب منفذی در شرایط اشباع، ابتدا چگالی ظاهری و سپس رطوبت حجمی خاک تعیین شد و از رابطه زیر حجم آب منفذی به دست آمد.

$$PV=\theta_v \times v_t \quad (۱)$$

v_t حجم کل خاک ستون بر حسب سانتی‌متر مکعب و θ_v رطوبت حجمی خاک است (اجلالی و دهقانی، ۱۳۹۲).

شمارش تعداد میکروارگانیسم‌ها

محیط کشت متیلین آئوزین بلو یک محیط مناسب برای رشد و تشخیص باکتری خانواده‌های آنتروباکتریاسه محسوب می‌شود. باکتری ایشریشیاکولی بر روی محیط کشت متیلین آئوزین بلو به‌صورت جلا سبز رنگ هست. شناسایی باکتری ایشریشیاکولی از محیط کشت EMB و روش شمارش باکتری، روش شمارش پلیت است که هر یاخته بر روی محیط کشت، کلنی مجزایی پدید می‌آورد، که با چشم غیرمسلح دیده می‌شود. در این روش می‌توان تعداد کلنی‌های پدید آمده بر روی محیط کشت را پس از ۲۴ ساعت نگهداری در آنکوباتور شمرد. این رقم را در ضریب رقت و در عدد ۱۰ ضرب کرده و تعداد یاخته‌های زنده اولیه محلول مشخص شد. در این مطالعه برای شمارش باکتری از روش شمارش زنده استفاده شد. برای نمونه جامد (کود روی سطح)، یک گرم از کود را در لوله آزمایش ریخته و ۱۰ میلی‌لیتر آب مقطر استریل به آن اضافه و به مدت ۱۵ دقیقه با شیکر مخلوط شد. سپس یک میلی‌لیتر از عصاره را برداشته و با همان روش ذکرشده کشت و تعداد باکتری ایشریشیاکولی تعیین شد. تمامی مراحل بالا در شرایط کاملاً استریل و در کنار شعله انجام شد.

ضریب پالایش باکتری

ضریب پالایش باکتری ایشرشیاکولی در ستون‌های خاک بر اساس معادله ماتس و همکاران، محاسبه شد (Mathess et al., 1988):

$$\lambda_f = Ln(\frac{C0}{C-Cn}) \times \frac{1}{z} \quad (۲)$$

که در این رابطه λ_f ضریب پالایش باکتری (m-1)، z عمق خاک، C_0 میانگین غلظت ورودی باکتری به سطح یا لایه خاک (CFU ml-1)، C میانگین غلظت باکتری در محلول خاک در عمق‌های نمونه‌برداری شده (CFU ml-1) و C_n میانگین غلظت باکتری بومی خاک (CFU ml-1) هستند. با توجه به استریل بودن خاک، غلظت باکتری بومی خاک (C_n=0) می‌باشد.

مدل‌سازی با HYDRUS-1D

انتقال کلراید

کلراید به‌عنوان ماده ردیاب انتخاب شد و با روش تیتراسیون نیترات نقره اندازه‌گیری شد. معادله جریان توده‌ای انتشار[2] طبق رابطه ۱ برای انتقال کلراید استفاده شد.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -v\frac{\partial C}{\partial z} + D\frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \quad (۳)$$

که در آن، C غلظت نمک در فاز مایع (ML-3)، v سرعت آب منفذی (LT^{-1})، D ضریب انتشار (L^2T^{-1})، z عمق خاک (L) است. از برنامه CXTFIT به‌منظور حل تحلیلی معادله جریان توده‌ای – انتشار استفاده شد. به‌منظور تعیین سرعت آب منفذی vو ضریب انتشار D از الگوریتم لونبرگ- مارگوت و بهینه‌سازی غیرخطی استفاده شد (Marquardt, 1963). در این مدل با استفاده از روش بهینه‌سازی حداقل مربعات بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی‌شده بر اساس الگوریتم، ضرایب مدل را برآورد و شروع به پردازش می‌کند و مقادیر جدیدی برای پارامترها ارائه می‌کند، با واردکردن مقادیر جدید، دوباره عمل حل معکوس با نرم‌افزار تکرار می‌شود تا زمانی که پارامترها به یک عدد ثابت و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و جمع مربعات داده‌ها (SSQ) حداقل شود. شدت‌جریان دارسی نیز با اندازه‌گیری حجم آب خروجی و زمان محاسبه شد. به‌این‌ترتیب شدت‌جریان دارسی، رطوبت و ضریب انتشار پذیری تعیین و در شبیه‌سازی انتقال باکتری مورداستفاده قرار گرفتند.

انتقال باکتری

به‌منظور بررسی حرکت باکتری در خاک، دو جزء در نظر گرفته می‌شود، جزء اول یا مکان اول جذب تعادلی (Equilibrium) و مکان دوم سینیتیک (Non-Equilibrium) (Lindqvist et al., 1994). جذب آنی املاح به ذرات خاک را جذب تعادلی گویند و به معنی وقوع هم‌زمان فرایندهای نگهداشت و جذب است ولی در جذب غیرتعادلی و یا سینیتیک فرآیندها تابع زمان هستند. معادله کلی حاکم بر جذب و انتقال باکتری در شرایط جریان اشباع و غیراشباع به‌صورت معادله سینتیک دو مکانی یا مدل جذب واجذب به شکل زیر می‌باشد (Hassanizadeh and Schijven., 2000):

۱- Eosin–Methylen Blue Agar (EMB)

۲- Convention-Dispersion Equation (CDE)

$$\frac{\partial C}{\partial t}+\frac{\rho_b}{\theta}\frac{\partial S_1}{\partial t}+\frac{\rho_b}{\theta}\frac{\partial S_2}{\partial t}= \quad (۴)$$
$$D\frac{\partial^2 C}{\partial z^2}-v\frac{\partial C}{\partial z}-\mu_1 C-\mu_s\rho_b(S_1+S_2)$$

$$\frac{\rho_b}{\theta}\frac{\partial S_1}{\partial t}=k_{att1}C-k_{det1}\frac{\rho_b}{\theta}-\mu_s\rho_b S_1 \quad (۵)$$

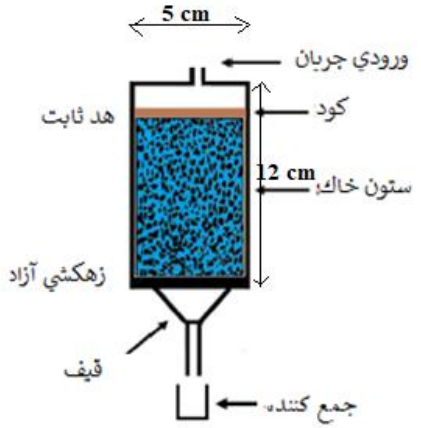
$$\frac{\rho_b}{\theta}\frac{\partial S_2}{\partial t}=k_{att2}C-k_{det2}\frac{\rho_b}{\theta}-\mu_s\rho_b S_2 \quad (۶)$$

که در آن C غلظت باکتری در فاز مایع (NL^{-3})، S غلظت باکتری در فاز جامد (NM^{-1})، اندیس‌های ۱ و ۲ به ترتیب مکان‌های سینتیک ۱ و ۲ را نشان می‌دهد. D ضریب انتشار (L^2T^{-1})، v سرعت منفذی آب(LT^{-1})، θ تخلخل کل ($L^{-3}L^{-3}$)، ρ_b جرم ویژه ظاهری خاک (ML^{-3})، S غلظت باکتری جذب‌شده 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_l و μ_s به ترتیب ضریب رشد باکتری در فاز مایع و جامد می‌باشند. انتقال و نگهداشت باکتری در محیط با استفاده از مدل HYDRUS_1D شبیه‌سازی شد. به‌علاوه تأثیر محیط متخلخل در انتقال باکتری به‌صورت کمی مطالعه شد. به این منظور مدل جذب و واجذب سینتیک دو مکانی[۱] بر داده‌های منحنی رخنه برازش داده شد. مدل جذب–واجذب دو مکانی فرآیندهای جذب و واجذب را با نرخ سینتیک درجه اول توصیف می‌نماید (عباسی تشنیزی و همکاران، ۱۳۹۵). به‌منظور تعیین پارامترهای مدل نیز از حل معکوس استفاده شد. در این روش میزان غلظت باکتری در عمق‌های مختلف از داده-های مشاهداتی، به مدل معرفی شد و با تعریف شرایط اولیه و مرزی، مقدار نگهداشت و انتقال باکتری شبیه‌سازی گردید. با ورود داده‌های اولیه نرم‌افزار HYDRUS شروع به پردازش داده‌ها می‌کند. پایان محاسبات زمانی است که مقادیر برآورد شده به یک مقدار ثابت میل کنند و اختلاف بین دو مقدار نهایی حداقل باشد. لازم به ذکر است ضریب انتشار پذیری نیز بر مبنای آزمایشات متعدد برابر $0.1\times L$ است که در این آزمایش طول نمونه ۱۲ سانتیمتر و لذا ضریب انتشار پذیری ۱/۲ سانتیمتر لحاظ شد.

شرایط مرزی و شرایط اولیه مدل HYDRUS-1D

مطابق شکل ۱ هندسه مدل وارد نرم‌افزار HYDRUS-1D شد. با توجه به شرایط فیزیکی حاکم بر آزمایش، برای شرایط مرزی کف زهکشی آزاد و شرایط مرزی بالادست هد ثابت ۵+ سانتیمتر در نظر گرفته شد. شرایط اولیه نیز رطوبت ظرفیت زراعی لحاظ شد. در خصوص باکتری نیز شرایط اولیه مقدار صفر برای باکتری در مدل وارد گردید. منحنی‌ها با استفاده از نرم‌افزار Excel رسم گردید و روند آلودگی زه‌آب ستون‌های خاک تیمار شده با کود آلی و توانایی خاک در پالایش آب آلوده، بحث و بررسی شد.

۱- Two-site kinetic attachment-detachment model



شکل ۱- شماتیکی از سیستم اجرای آزمایش برای هر تیمار

ارزیابی مدل

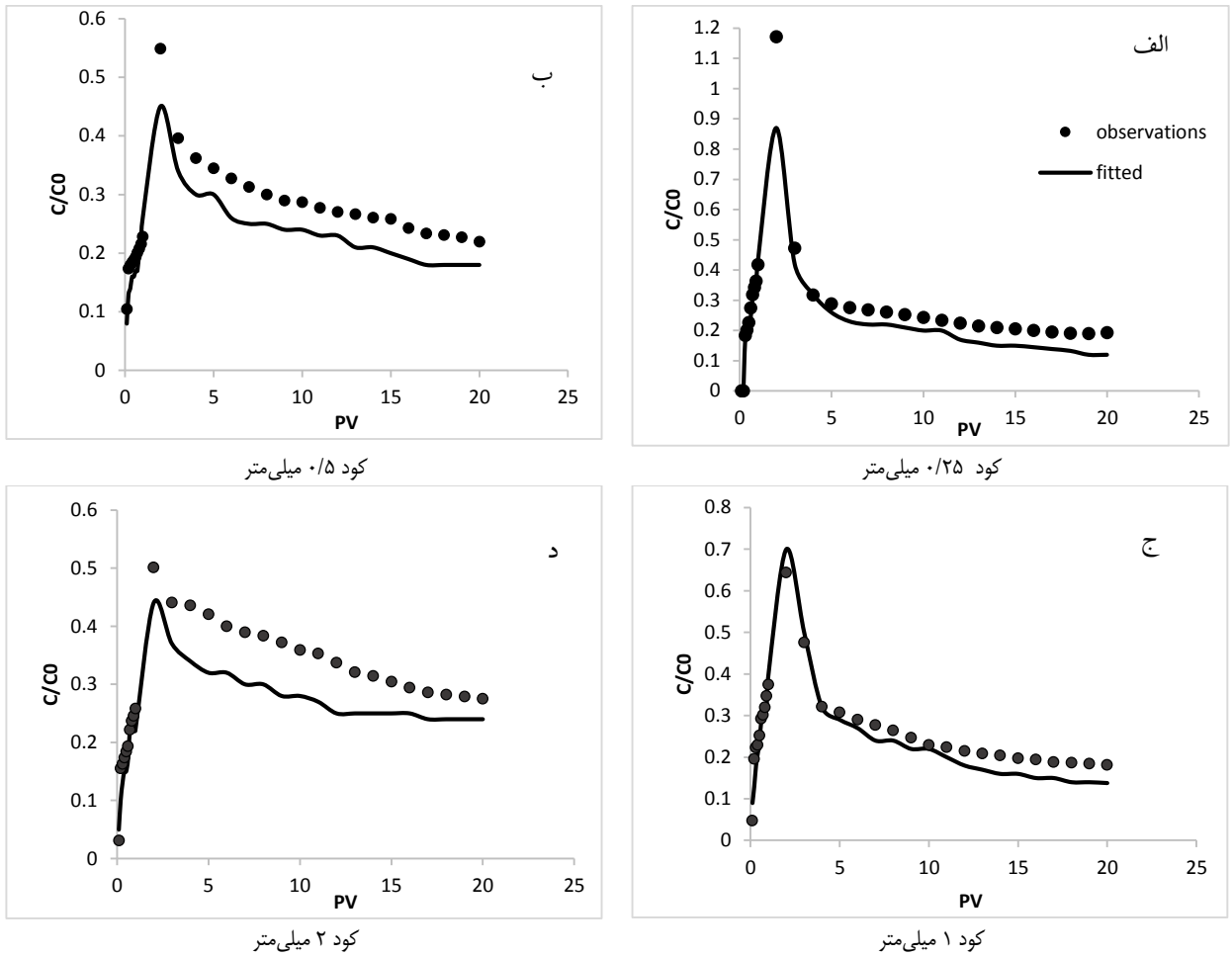
به‌منظور ارزیابی و تعیین دقت مدل از آماره‌های ریشه مربعات خطا (RMSE) و ضریب تعیین (R^2) استفاده شد (Toride et al., 1999). هر چه میزان پارامتر ضریب تعیین (R^2) به یک نزدیک‌تر باشد و مقدار میانگین مربعات خطا (RMSE) به صفر نزدیک‌تر باشد، برازش مدل بر داده‌ها بهتر است.

نتایج و بحث

شبیه‌سازی انتقال کلر و باکتری در خاک

منحنی رخنه کلراید و باکتری اندازه‌گیری شده و برآورد شده در تیمارهای کود گاوی در شکل ۲ و ۳ نشان داده شده است. در تمام تیمارهای کودی بیشترین مقدار غلظت کلر در حجم منفذی ۲ سانتی‌متر مکعب رخ داد و قبل از رسیدن به ماکزیمم مقدار یعنی در حجم منفذی کمتر از ۲ سانتی‌متر مکعب نرم‌افزار به‌خوبی مقدار کلر را شبیه‌سازی کرد ولی در حجم‌های منفذی بالاتر تفاوت مقدار شبیه‌سازی‌شده و برآورد شده مشهود بود. این تفاوت در تیمار کودی با اندازه ۰/۲۵ (شکل ۲- الف) کمتر از سایر تیمارهای کودی بود.

شبیه‌سازی میزان باکتری در زه آب توسط نرم‌افزار در تیمارهای مختلف کودی با مقادیر اندازه‌گیری شده تطابق خوبی داشت (شکل ۳- الف تا د). روند تغییرات میزان باکتری در تیمار کودی با اندازه ۰/۲۵ (شکل ۳-الف) از سایر تیمارها متفاوت بود. در این تیمار در حجم منفذی ۲۰ به بالاترین میزان خود رسید درحالی‌که در سایر تیمارها در حجم‌های پایین‌تر مقدار ماکزیمم باکتری مشاهده شد. در حقیقت به دلیل بافت ریزتر این تیمار، جبهه آلودگی باکتریایی دیرتر به انتهای ستون‌های خاک رسید. با مقایسه نقطه پیک نمودارهای شبیه‌سازی باکتری می‌توان ملاحظه کرد بیشترین غلظت باکتری در تیمار کودی ۲ میلی‌متر به‌دست‌آمده که ناشی از درشتی ذرات کود و خروج راحت‌تر و زودهنگام باکتری از بین منافذ در این تیمار می‌باشد.



کود ۰/۲۵ میلی‌متر

کود ۰/۵ میلی‌متر

کود ۱ میلی‌متر

کود ۲ میلی‌متر

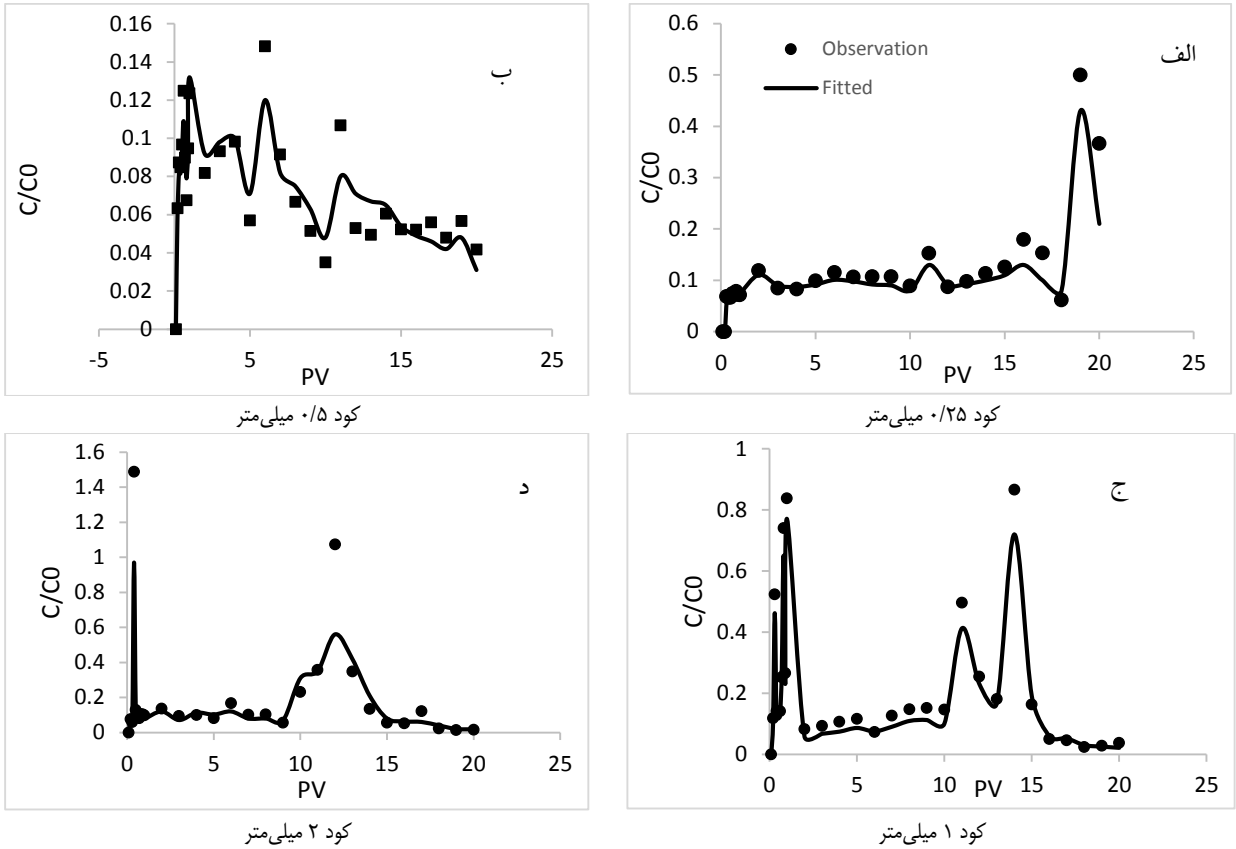
شکل۲- منحنی رخنه کلر اندازه‌گیری شده و برازش داده‌شده در اندازه‌های مختلف کود

با توجه به جدول ۳ می‌توان نتیجه گرفت که در تمام اندازه‌های کودی میزان باکتری در زه‌آب به‌خوبی توسط نرم‌افزار شبیه‌سازی‌شده است. به‌طوری‌که میزان R^2 در تمام تیمارها بالاتر از ۰/۸۷ و RMSE نیز حداکثر ۰/۰۸ (CFU/ml) بود. بهترین برآورد میزان باکتری در منحنه رخنه تیمار کودی ۰/۲۵ انجام شد که دارای R^2 ۰/۹۵ و RMSE ۰/۰۵ (CFU/ml) بود.

پارامترهای مدل سینتیک دو مکانی

در مدل سینتیک دو مکانی فرض بر این است که مکان سینتیک اول به پالایش فیزیکی اختصاص داده‌شده و در مکان دوم فرآیند انتقال جرم بین فاز مایع و جامد یا همان جذب- واجذب صورت می‌گیرد (تشنیزی و همکاران، ۱۳۹۵). همان‌طور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود نرخ جذب در تیمارهای کودی با اندازه متوسط ۰/۵ و ۱ میلی‌متری بیشتر و در تیمارهای با اندازه ۰/۲۵ و ۲ میلی‌متر کمتر و نرخ واجذب در مکان‌های سینتیک ۱ و ۲ در تیمار کودی با اندازه متوسط ۰/۵ و ۱ میلی‌متر، کمتر از تیمارهای با اندازه ۰/۲۵ و ۲ میلی‌متر بود. کمترین نرخ جذب در مکان سینتیک ۱و ۲، در تیمار کودی ۲ میلی‌متر مشاهده شد که دلیل آن رهایش[۱] بیشتر باکتری در اندازه‌های درشت کود و در نتیجه افزایش نرخ واجذب در این تیمار می‌باشد. همین عامل سبب آزاد شدن باکتری‌های گیر افتاده در منافذ خاک و افزایش باکتری در زهاب در تیمار کودی ۲ میلی‌متر شد. ضریب رشد باکتری در فاز مایع و جامد نشان می‌دهد این میزان در فاز مایع بیشتر از مقدار مشابه آن در فاز جامد بود. در حقیقت باکتری‌های موجود در محلول خاک شدت تقسیم بیشتری نسبت به فاز جامد داشتند، این موضوع با نظر عباسی تشنیزی و همکاران (۱۳۹۵) و گارگیلو و همکاران مغایرت دارد (Gargiulo et al., 2007).

۱-Release



شکل ۳- منحنی رخنه باکتری اندازه‌گیری شده و برازش داده‌شده در اندازه‌های مختلف کود

جدول۳- آماره‌های غلظت باکتری اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی‌شده به‌وسیله مدل HYDRUS-1D

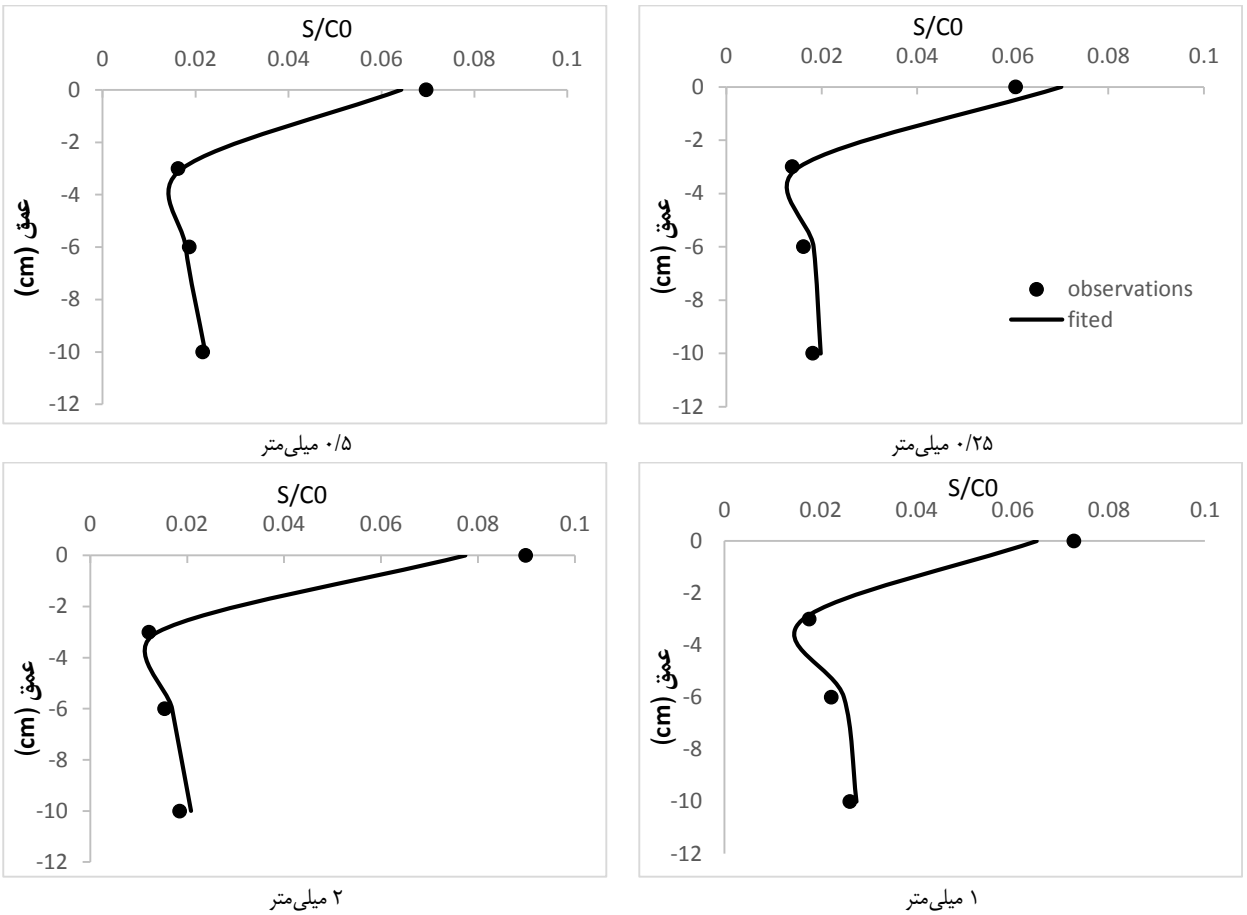
تیمار	RMSE (CFU/ml)	R^2
کود ۰/۲۵ میلی‌متر	۰/۰۵	۰/۹۵
کود ۰/۵ میلی‌متر	۰/۰۸۱	۰/۹۱
کود ۱ میلی‌متر	۰/۰۴۲	۰/۸۷
کود ۲ میلی‌متر	۰/۰۵۱	۰/۸۹
میانگین	۰/۰۵۶	۰/۹۰۵

جدول ٤- پارامترهای مدل سینتیک دو مکانی برازش داده‌شده بر منحنی رخنه باکتری

پارامتر	مقادیر برآورد شده			ضریب انحراف معیار		
	۰/۲۵ میلی‌متر	۰/۵ میلی‌متر	۱ میلی‌متر	۲ میلی‌متر	۰/۲۵ میلی‌متر	۰/۵ میلی‌متر	۱ میلی‌متر	۲ میلی‌متر
S_{max}	۲۳/۵۳×۱۰$^{-۲}$	۲/۱۲۷×۱۰$^{-۱}$	۴/۱۲	۵/۳۸×۱۰$^{-۲}$	۲/۶۱×۱۰$^{-۲}$	۳/۴۵×۱۰$^{-۱}$	۳/۰۳×۱۰$^{-۱}$	۴/۳۵×۱۰^{۱}
$K_{att1}(s^{-1})$	۸/۳۳×۱۰$^{-۳}$	۶/۰۸۳×۱۰$^{-۱}$	۵/۷۱×۱۰$^{-۱}$	۶/۴۱×۱۰$^{-۵}$	۲/۵۲×۱۰$^{-۲}$	۴/۲۵×۱۰^{۲}	۱/۱۳×۱۰$^{-۱}$	۲/۳۹×۱۰$^{-۳}$
$K_{det1}(s^{-1})$	۵/۲۱×۱۰$^{-۵}$	۳/۱۲۵×۱۰$^{-۵}$	۲/۳۱×۱۰$^{-۶}$	۴/۷۶×۱۰$^{-۲}$	۵/۰۴×۱۰$^{-۴}$	۱/۸۴×۱۰$^{-۱}$	۴/۵۱×۱۰$^{-۲}$	۱/۵۲×۱۰^{۱}
$K_{att2}(s^{-1})$	۲/۷۴×۱۰$^{-۴}$	۴/۲۵×۱۰$^{-۱}$	۴/۶۸×۱۰$^{-۱۰}$	۵/۵۹×۱۰$^{-۶}$	۶/۱۵×۱۰$^{-۳}$	۳/۴۳×۱۰^{۲}	۵/۴۹×۱۰^{۱}	۷/۰۴×۱۰$^{-۱}$
$K_{det2}(s^{-1})$	۳/۲۶×۱۰$^{-۳}$	۱/۰۵×۱۰$^{-۵}$	۳/۳۸×۱۰$^{-۴}$	۳/۶۱×۱۰$^{-۱}$	۳/۲۱×۱۰$^{-۳}$	۷/۱۲×۱۰^{۱}	۲/۸۲×۱۰^{۱}	۵/۸۱×۱۰$^{-۳}$
$\mu_s(s^{-1})$	۱/۶۱×۱۰$^{-۵}$	۲/۵۴×۱۰$^{-۵}$	۷/۰۵×۱۰$^{-۳}$	۴/۱۵×۱۰$^{-۵}$	۴/۸۳×۱۰$^{-۳}$	۶/۴۱×۱۰$^{-۴}$	۳/۴۸×۱۰$^{-۳}$	۱/۴۲×۱۰$^{-۴}$
$\mu_w(s^{-1})$	۵/۷۰×۱۰$^{-۳}$	۸/۵۴×۱۰$^{-۴}$	۴/۶۳×۱۰$^{-۳}$	۴/۱۰×۱۰$^{-۴}$	۵/۱۶×۱۰$^{-۳}$	۳/۵۳×۱۰$^{-۳}$	۵/۳۵×۱۰$^{-۳}$	۳/۷۸×۱۰$^{-۳}$

نگهداشت باکتری در خاک تحت شرایط جریان اشباع در خاک

با استفاده از مدل HYDRUS-1D نگهداشت باکتری در نیم‌رخ خاک برآورد و نتایج در شکل ۴ ارائه شده است. با توجه به شکل می‌توان نتیجه گرفت، که با افزایش عمق، به‌جز در سطح خاک که کود اضافه شد، نگهداشت باکتری افزایش یافت. در حقیقت بیش‌تر باکتری‌ها در لایه‌های سطحی خاک نگه‌داشته شده‌اند و با کاهش عمق، مقدار نگهداشت کاهش یافت و این کاهش در لایه‌های زیرین تقریباً حالت یکنواخت دارد. این در حالی است که برای تیمارهای مختلف، نمودار نگهداشت باکتری، تغییر پیدا کرده است. نگهداشت باکتری به‌وضوح تحت تأثیر اندازه کود می‌باشد (Tabatabaei et al., 2022) هر چه اندازه کود ریزتر باشد منافذ ستون شن بسته می‌شوند و جذب باکتری بیش‌تر می‌شود. نگهداشت باکتری در خاک اشباع می‌تواند در نتیجه پدیده‌های مختلفی مانند جذب، رسوب و تجمع باکتری‌ها روی سطح ذرات خاک باشد. بالا بودن k_{det} نسبت به k_{att} به دلیل افزایش تعداد باکتری‌ها و کمبود مکان جذب برای آن‌ها می‌باشد به‌گونه‌ای که باکتری‌های بیشتری آزاد شده و وارد زهاب می‌گردد که این موضوع در تیمار کودی ۲ میلی‌متر مشاهده شد. گارگیلو و همکاران، میزان انتقال و نگهداشت باکتری را در ستون‌های خاک دست‌خورده با قطر ۸ سانتی‌متر و ارتفاع ۲۴ سانتی‌متر که توسط شن پر شده بود و در شرایط رطوبتی متفاوت ۴۰، ۸۰ و ۱۰۰ درصد بررسی کردند. نتایج نشان داد در شرایط اشباع (۱۰۰ درصد)، ۹۰ درصد باکتری در زه‌آب و تنها ۸ درصد آن در نیم‌رخ خاک نگهداشت می‌شد. با کاهش رطوبت و شدت جریان میزان انتقال تا ۳۶ درصد کاهش و میزان نگهداشت تا ۶۵ درصد افزایش نشان داد. نتایج بررسی آن‌ها بیانگر نگهداشت بیش‌تر باکتری در سطح خاک بود (Gargilo et al., 2007). در بررسی احمدی‌مقدم و همکاران (۱۳۹۹) در شرایط بیش‌آبیاری میزان نگهداشت باکتری در حالت با و بدون جریان ترجیحی در اعماق خاک بیشتر بود.



شکل ٤- منحنی توزیع باکتری اندازه‌گیری شده و برازش داده‌شده با نرم‌افزار HYDRUS-1D برای تیمارهای اندازه کود (S/C0 میزان باکتری جذب‌شده به غلظت اولیه آن می‌باشد)

جدول ۵- آزمون تجزیه واریانس اثر تیمارها بر میزان ضریب پالایش باکتری

منبع تغییرات	متغیر وابسته	درجه آزادی	میانگین مربعات	F
تیمار	$\lambda f\ (m^{-1})$	۳	۰/۰۰۲۵۸**	۱۷/۳۸
خطا		۸		

** معنی‌داری در سطح ۵ درصد را نشان می‌دهد.

جدول ٦- مقایسه میانگین تیمارها

تیمار	کود ۰/۲۵ میلی‌متر	کود ۰/۵ میلی‌متر	کود ۱ میلی‌متر	کود ۲ میلی‌متر	میانگین
ضریب پالایش	۰/۰۲۷۵^{c}	۰/۰۴۶۵^{a}	۰/۰۳۰۷۵^{b}	۰/۰۰۳۵^{d}	۰/۰۲۷

در مطالعه‌ای که دیوید و همکاران انجام دادند، به این نتیجه رسیدند در شرایط رطوبتی اشباع و نزدیک به اشباع، میزان پالایش باکتری در طول ستون‌های شن نسبت به شرایط رطوبتی غیراشباع کاهش می‌یابد، و مقدار بیش‌تر باکتری استخراج‌شده در بخش بالایی ستون‌ها بیانگر غالب بودن پالایش فیزیکی در نگه‌داری باکتری در ستون‌های شن می‌باشد که با نتایج این پژوهش تطابق دارد (David et al., 2001).

محاسبه ضریب پالایش باکتری[۱]:

ضریب پالایش باکتری (λ_f) در تیمارهای مختلف با سه تکرار، محاسبه گردید. نتایج تجزیه واریانس در قالب طرح کاملاً تصادفی در سطح پنج درصد معنی‌دار بود (جدول ۵). آزمون مقایسه میانگین مربعات تیمارها در جدول ۶ آمده است. همان‌طور که در جدول ۶ ملاحظه می‌شود در ستون شن همراه با کود ۲ میلی‌متر کم‌ترین پالایش اتفاق افتاده است. دلیل این موضوع آن است که در اثر وجود ذرات درشت‌تر زمان تماس آب با ذرات کاهش یافته و در نتیجه پالایش کمتری رخ داده. ضریب پالایش باکتری بیانگر توانایی محیط متخلخل خاک در جذب شیمیایی باکتری‌ها روی سطوح ذرات و گیر افتادن آن‌ها در منافذ ریز است. مکانسیم‌های مختلفی پالایش باکتری در خاک تحت جریان اشباع را کنترل می‌کند از جمله جذب و واجذب و پالایش فیزیکی، تبادل باکتری بین فاز مایع و جامد و جریان توده‌ای و انتشار (اخوان و همکاران، ۱۳۹۸).

در بررسی مصدقی و همکاران انتقال E.Coli در شرایط جریان اشباع و غیراشباع در لایسی‌متر با خاک لوم رسی به طول ۵۰ و قطر ۲۲ سانتی‌متر بررسی شد. آن‌ها پارامترهای نوع و عمق خاک را بر ضریب پالایش مؤثر دانستند. بیش‌ترین و کم‌ترین ضریب پالایش برای شرایط غیراشباع، اعماق اولیه و شرایط اشباع، اعماق اولیه به ترتیب به میزان ۵/۷۴ و ۳/۷۹ بود (Mosaddeghi et al., 2010).

استویک و همکاران، مکانیزم‌ها و فاکتورهای مؤثر بر نگهداشت باکتری را بررسی نمودند. آن‌ها مهم‌ترین مکانیزم نگهداشت باکتری در شرایط جریان اشباع را، پالایش فیزیکی و جذب عنوان کردند. این پژوهشگران توزیع اندازه ذرات، اندازه باکتری و ویژگی‌های هیدرولیکی جریان را فاکتورهای مؤثر بر پالایش فیزیکی دانستند. درحالی‌که جذب باکتری خاک را تحت تأثیر مقدار ماده آلی، مقدار تشکیل توده زنده، جذب الکترواستاتیک در نتیجه قدرت یونی محلول یا بار الکترواستاتیکی سلول و سطح ذره خاک می‌دانستند (Stevik et al., 2004).

نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج حاصل از پژوهش می‌توان چنین نتیجه‌گیری نمود نرم‌افزار HYDRS-1D و کاربرد مدل سینتیک دو مکانی به‌خوبی باکتری انتقال‌یافته و جذب‌شده در خاک را در تمام تیمارهای کودی شبیه‌سازی کرد. تیمار کودی ۲ میلی‌متر کمترین نرخ جذب را داشت که دلیل آن رهایش بیشتر باکتری در این تیمار کودی و در نتیجه افزایش نرخ واجذب بود. همچنین باکتری‌های موجود در فاز مایع شدت تقسیم بیشتری و درنتیجه ضریب رشد بالاتری نسبت به فاز جامد داشتند. همچنین این پژوهش نشان داد هر چه اندازه ذرات کود کوچک‌تر باشد، توانایی محیط متخلخل خاک در جذب باکتری‌ها و گیر افتادن آن‌ها در منافذ ریز بیشتر است و با افزایش عمق خاک (بدون در نظر گرفتن سطح خاک که کود به آن اضافه شد) میزان نگهداشت باکتری نیز افزایش یافت.

منابع

اجلالی، ف. و دهقانی، م. ۱۳۹۲. آبیاری عمومی. انتشارات پیام نور. ۲۲۶ صفحه.

احمدی‌مقدم، ز. و طباطبائی، س. ح. ۱۴۰۰. تعیین دقت دو مدل

۱- Filtration Coefficient of Bacteria (λf)

CDEو MIM با حل معکوس در انتقال آلودگی تری کلـرواتیلن (TCE)در یک محیط متخلخل کربناته. نشریه مهندسی عمـران امیرکبیر ۵۳(۱):۳۹۳-۴۰۴.

https://dx.doi.org/10.22060/ceej.2018.13256.5356

احمدی‌مقـدم، ز.، طباطبـائی. س. ح. و ابراهیمـی کهریـز سـنگی، ع. ۱۳۹۹. اثر هم‌زمان کم‌آبیاری و جریـان ترجیحـی بـر نگهداشـت باکتری ایشریشیاکولی در خاک. نشریه آبیاری و زهکشـی ایـران. ۱۴(۶):۲۲۰۳-۲۲۱۶.

اخوان، س.، ابراهیمی، س. نوابیـان، م. مجتهـدی، ع. شـعبانپور، م. و موحدی نایینی، ع. ۱۳۹۸. بررسی شاخص‌های جـذب و پـالایش ترابری باکتری ای‌کـولای در سیسـتم جریـان ترجیحـی. مجلـه مهندسی زراعی (علمی کشاورزی). ۴۲(۱):۱-۱۱.

سپهرنیا، ن. ۱۳۹۵. انتقال و جذب/نگهداشت بـاکتری ایشریشـیاکولی (Escherichia coli) و ردوکوکـــــوس اریتروپـــــولیس (Rhodococcus erythropolis) در خـــاک‌هـــای آبگریـــز و آبدوست. رساله دکتری خاکشناسی، دانشکده کشـاورزی و منـابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان.

عباسی تشنیزی، ف. کوچک زاده، ه. و عباسی، ف. ۱۳۹۵. مدلسـازی انتقال باکتری فکال کلی فرم در آبیاری قطره‌ای سطحی در یـک خاک لوم رسی. نشریه آب و خاک (علوم و صـنایع کشـاورزی).۳۰ (۶): ۱۷۵۸-۱۷۷۲.

منیشـــداوی، م.، جعفرنـــژادی، ع. صـــیاد، غ. و شـــیرانی، ح. ۱۳۹۴. مدل‌سازی معکوس حرکت باکتری اشریشیاکولی در خاک بوسیله مدل HYDRUS-1D با کاربرد معادله‌های تعـادلی و غیرتعـادلی حرکت املاح. علوم و مهندسی آبیاری. ۳۸ (۳): ۱۰۵-۱۱۵.

Akhavan, S., Ebrahimi, S., Mojtahedi, A., Navabian, M., Shabanpour, Ma. and Movahedi Naeini, A. 2019. Simulation of columnar transfer and retention of Escherichia coli bio-pollutant index in a saline saturated soil. International Journal of Engineering and Technology. 10(4):1067-1075.

David, K. P. and Mills, A. L. 2001. Transport of Escherichia coli in sand columns with constant and changing water contents. Journal of Environmental Quality. 30: 238-245.

Farrokhian Firouzi, A., Homaee, M., Klumpp, E., Kasteel, R. and Sattari, M. 2010. Bacteria transport and deposition in calcareous soil under unsaturated flow conditions. Journal of Water and soil. 24 (3): 439-452.

Gargiulo, G., Bradford, S., Šimunek, J., Ustohal, P., Vereecken, H. and Klumpp, E. 2007. Transport and deposition of metabolically active and stationary phase Deinococcus radiodurans in unsaturated porous media. Environmental Science and Technology. 41(4): 1265-1271.

Hassanizadeh, S. M. and Schijven, J. F. 2000. Use of bacteriophages as tracers for the study of removal of viruses. In: Dassargues, A. (Ed.), Tracers and modeling in hydrogeology. Proceedings of TRAM'2000 held in Liege, Belgium. 167– 174.

Jiang, G., Noonan, M. J., Buchan, G. D. and Smith, N. 2007. Transport of Escherichia coli through variably saturated sand columns and modeling approaches. Journal of Contaminant Hydrology. 93(1): 2-20.

Lindqvist, R., Cho, J. S., and Enfield, C. G. 1994. A kinetic model for cell density dependent bacterial transport in porous media. Water Resources Research, 30(12): 3291-3299

Mathess, G., Peckdegger, A. and Schroefer, J. 1988. Persistence and transport of bacteria and viruses in groundwater-a conceptual evaluation. Journal of Contaminant Hydrology. 2: 171-188.

Marquardt, D.W. 1963. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. SIAM J. Applied Mathematics. 11:431-441.

Mosaddeghi, M. R., Sinegani, A. A., Farhangi, M. B., Mahboubi, A. A. and Unc, A. 2010. Saturated and unsaturated transport of cow manure-borne Escherichia coli through in situ clay loam lysimeters. Agriculture, Ecosystems and Environment. 137(1): 163-171.

Sepehrnia, N., Memarianfardb, L., Moosavi, A.A., Bachmanna, J., Rezanezhadd, F. and Sepehrie, M. 2018. Retention modes of manure-fecal coliforms in soil under saturated hydraulic condition. Journal of Environmental Management. 227: 209–215.

Sepehrnia, N., Tabatabaei, S. H., Norouzi, H., Gorakifard, M., Shirani, H. and Rezanezhad, F. 2021. Particle fractionation controls Escherichia coli release from solid manure. Heliyon. 7(5): e07038. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07038

Šimunek, J., van Genuchten, M. T. and Šejna, M. 2008. Development and applications of the HYDRUS and STANMOD software packages and related codes. Vadose Zone Journal. 7(2): 587-600.

Shein, E. V., Polyanskaya, L. and Devin, B. A. 2002. Transport of microorganisms in soils: physicochemical approach and mathematical modeling. Eurasian Soil Science. 35(5): 500-508.

Stevik, T. K., Aa, K., Ausland, G. and Hanssen, J. F. 2004. Retention and removal of pathogenic bacteria in wastewater percolating through porous media: a review. Water Research. 38(6): 1355-1367.

Tabatabaei, S.H., Nourmahnad, N., Golestani Kermani, S., Tabatabaei, S., Najafi, P. and Heidarpour, M. 2020. Urban wastewater reuse in agriculture for

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.

Unc, A. and Goss, M.J. 2003. Movement of fecal bacteria through the vadose zone. Water Air Soil Pollution. 149: 327–337.

Warnemuende, E.A. and Kanwar, R.S. 2000. The effect of swine manure application on bacterial quality of leachate from intact soil columns. Transactions of the ASAE. 45(6): 1849.

irrigation in arid and semi-arid regions - A review. International Journal of Recycling Oganic Waste in Agriculture. 9(2):193-220. https://dx.doi.org/10.30486/ijrowa.2020.671672.

Tabatabaei, S. H., Sepehrnia, N., Norouzi, H., Shirani, H., & Rezanezhad, F. 2022. Effects of solid manure particle fractionation on transport, retention, and release of Escherichia coli. Environmental Technology & Innovation. 25: 102086. https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.102086

Toride, N., Leij, F. J. and Van Genuchten, M. T. 1999. The CXTFIT code for estimating transport

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 6, Vol. 15, Feb.-Mar. 2022, p. 1382-1393

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۶، جلد ۱۵، بهمن-اسفند ۱۴۰۰، ص. ۱۳۹۳-۱۳۸۲

Effect of Cow Manure's Particle Size on Bacterial Contamination Transport in Soil using Attachment-Detachment Model under Saturation Condition

H. Norouzi[1], **S.H. Tabatabaei**[2]*, **N. Nourmahnad**[3], **H. Shirani**[4]
Recived: Jun.04, 2021 Accepted: Sep.15, 2021

Abstract

Livestock manures are a source of pathogenic microorganisms that cause contamination of water surface and groundwater. The aim of this study was to simulate the effect of cow manure granulation on the transmission coefficients of Escherichia coli in a column of sand under saturated flow. Cow manure with particle sizes of 0.25, 0.5, 1 and 2 mm equivalent to 30 (ton/hec) in terms of dry weight was used. The effect of fertilizer treatments on the transmission of Escherichia coli in the soil was investigated by measuring the number of bacteria and chloride detector in the drainage water, up to 20 cm^3 of pore volume. In order to determine chloride, Levenberg-Marquardt algorithm and nonlinear optimization were used, and to determine bacterial retention and transfer, a two-site kinetic Attachment-Detachment equation and inverse solution were used. The results showed that the bacterial transfer simulation was performed well for all fertilizer treatments by HYDRUS-1D using a two-site kinetic model (average of mean deviation and coefficient of determination was 0.056 and 0.905 respectively). The 0.25 mm treatment had the best agreement with the simulation results. The highest concentration of wastewater bacteria was obtained in the fertilizer treatment of 2 mm, which is due to the coarseness of fertilizer particles and faster and earlier removal of bacteria from its particles. The lowest attachment coefficient rate, was obtained in the fertilizer treatment of 2 mm ($5.59*10^{-6}$ s^{-1}) due to the release of more bacteria in this fertilizer treatment and as a result of increasing the rate of detachment coefficient ($3.61*10^{-1}$ s^{-1}). Also, with increasing soil depth, the amount of bacterial retention increased, which is probably due to the accumulation of bacteria on the surface of soil particles at lower depths.

Keywords: Breakthrough curve, E-Coli, Filtration, HYDRUS-1D, Kinetic model

1- M.Sc. Student, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran
2- Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran
3- Assistant Professor, Department of Agriculture, Payame Noor University. Iran
4- Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran
(*- Corresponding Author Email: Tabatabaei@sku.ac.ir)