نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد 30، شماره 6، بهمن – اسفند 1395، ص. 1772-1758

Journal of Water and Soil
Vol. 30, No. 6, Jan.-Feb. 2017, p. 1758-1772

مدل‌سازی انتقال باکتری فکال کلی‌فرم در آبیاری قطره‌ای سطحی در یک خاک لوم رسی

فروغ عباسی تشنیزی[1*] - مهدی کوچک زاده[2] - فریبرز عباسی[3]

تاریخ دریافت: 1393/05/14
تاریخ پذیرش: 1395/05/11

چکیده

وجود آب برای کشاورزی یکی از مهم‌ترین فاکتورها در نواحی خشک و نیمه خشک است و فاضلاب شهری تصفیه شده یک منبع مهم برای این منظور است. پتانسیل انتقال آلودگی، یک مسئله جدی در مورد استفاده از فاضلاب تصفیه شده برای کشاورزی است. با توجه به ریسک انتقال آلودگی از طریق استفاده از پساب، مطالعه انتقال میکروب‌ها در خاک مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. در پژوهش حاضر، انتقال باکتری فکال کلی‌فرم در یک مطالعهٔ لایسیمتری با قطر داخلی 30 و ارتفاع 75 سانتی‌متر که 60 سانتی‌متر آن از خاک لوم رسی عاری از باکتری فکال‌فرم پر شده بود و دو روش آبیاری قطره‌ای سطحی و قطره‌ای زیرسطحی با استفاده از پساب تصفیه‌خانه بررسی و برای شبیه‌سازی آن از مدل HYDRUS-1D استفاده گردید. برای واسنجی مدل و تخمین پارامترهای مورد نیاز مدل، از روش معکوس استفاده شد. نتایج نشان داد که مدل HYDRUS-1D با دقت قابل قبولی حجم آب خروجی از ستون را شبیه‌سازی نمود. برای شبیه‌سازی انتقال باکتری فکال کلی‌فرم از سه مدل جذب تک مکانی، مدل جذب- واجذب سینتیک دو مکانی و جذب- واجذب سینتیک تک مکانی موجود در مدل HYDRUS-1D استفاده گردید. در شبیه‌سازی انتقال باکتری، مدل جذب تک مکانی به علت داشتن کمترین مقدار ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و جمع مربعات داده‌ها (SSQ) و بیشترین مقدار R^2 از بین سه مدل مورد بررسی به عنوان بهترین مدل انتخاب گردید. مدل جذب تک مکانی ضریب رشد باکتری در فاز جامد را حدود 6 برابر ضریب رشد در فاز محلول بیش‌تر برآورد کرد. این مطلب نشانگر آن است که سلول‌های رسوب کرده در مقایسه با سلول‌های موجود در فاز محلول، شدت تقسیم بیشتری داشته‌اند. از مدل واسنجی شده برای بررسی تأثیر دور و مدت زمان آبیاری در انتقال باکتری در خاک استفاده شد. نتایج نشان داد که با افزایش ساعات آبیاری، مقدار باکتری بیش‌تری از نیم‌رخ خاک شسته و به اعماق پایین‌تر منتقل شدند. همچنین با افزایش فواصل (دور) آبیاری به تعداد باکتری‌های موجود در خاک افزوده شد که علت آن مساعد بودن شرایط محیطی و غذایی برای رشد باکتری بود. با توجه به شرایط حاکم بر پژوهش حاضر، بهترین دور و مدت زمان آبیاری از نظر تعداد باکتری موجود در نیم‌رخ خاک، به ترتیب یک روز و 4 ساعت انتخاب گردید.

واژه‌های کلیدی: روش معکوس، لایسیمتر، مدل جذب تک مکانی، HYDRUS-1D

مقدمه

با توجه به توسعه اجتماعی و اقتصادی، تغییرات جمعیتی و تغییرات آب و هوائی، مقدار کمّی منابع آب در جهان با کاهش تدریجی رو به رو شده است، بگونه‌ای که کمبود آب در مناطق خشک و نیمه خشک یک نگرانی مضاعف، برای مسئولان کشاورزی در جهان ایجاد نموده است. وجود آب برای کشاورزی یکی از مهمترین فاکتورها در نواحی خشک و نیمه خشک است و فاضلاب شهری تصفیه شده یک منبع مهم برای این منظور است. در بسیاری از کشورها استفاده مجدد از فاضلاب‌ها بخش عمده‌ای از طرح‌های مدیریتی آب به شمار می‌رود. در آمریکا بیش از 365 میلیون متر مکعب فاضلاب در سال برای آبیاری استفاده می‌شود (25). در کشور چین استفاده از فاضلاب برای کشاورزی از سال 1958 آغاز شده و در حال گسترش می‌باشد و اکنون بیش از 1/33 میلیون هکتار از اراضی این کشور با فاضلاب آبیاری می‌شوند. عربستان و اردن نیز سیاست‌های ملی در استفاده مجدد از فاضلاب‌های تصفیه شده دارند (23). در سرزمین‌های اشغالی بیش از 70 درصد از فاضلاب‌های تصفیه شده برای آبیاری در کشاورزی به کار می‌روند (30).

از آن‌جا که فاضلاب‌ها حاوی نمک، ترکیبات فلزی سمی و پاتوژن‌ها می‌باشند، بنابراین، استفاده بدون برنامه از آن‌ها می‌تواند برای خاک و محیط زیست مضر باشد. باید توجه داشت که حتی بعد

1 و 2- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد و دانشیار، گروه آبیاری و زهکشی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
(*- نویسنده مسئول: Email: Foroogh.abbassi@modares.ac.ir)
3- عضو هیئت علمی (استاد) مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران
DOI: 10.22067/jsw.v30i6.35887

از تصفیه نیز، ممکن است فاضلاب حاوی انواع مختلفی از میکروارگانیسم‌ها باشد که برای انسان بیماری‌زا هستند. بنابراین پتانسیل انتقال آلودگی، یک مسئله جدی در مورد استفاده از فاضلاب تصفیه شده برای کشاورزی است (7).

با توجه به ریسک انتقال آلودگی از طریق استفاده پساب، مطالعه انتقال میکروب‌ها در خاک در دهه اخیر مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. انتقال میکروب‌ها و باکتری‌ها در خاک در مباحثی مانند آلودگی و پالایش زیستی آب‌های زیرزمینی و خاک و کنترل بیولوژیکی بیماری‌های گیاهی اهمیت دارد و این موضوع نگرانی‌هایی را در مورد آلوده شدن منابع آب زیرزمینی توسط مواد شیمیایی خطرناک، رادیونوکلوئیدها و فلزات سنگین ایجاد کرده است (6). مکانیزم‌های مختلفی انتقال و سرنوشت باکتری را در خاک، تحت شرایط اشباع و غیراشباع، کنترل می‌نمایند. از جمله این مکانیزم‌ها می‌توان به انتقال (شامل جریان توده‌ای و انتشار)، غیرفعال شدن، تبادل باکتری بین فاز مایع و جامد یا همان جذب و واجذب، پالایش فیزیکی و در صورت داشتن شرایط غیراشباع جذب مرز مشترک آب- هوا[1] اشاره کرد (11).

انتقال باکتری در خاک به فاکتورهای پیچیده فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی بستگی دارد. از جمله فاکتورهای فیزیکی و شیمیایی، سرعت جریان آب، مقدار رطوبت، توزیع اندازه ذرات و منافذ، اسیدیته و قدرت یونی خاک هستند و از خصوصیات بیولوژیکی می‌توان وضعیت فیزیولوژیکی سلول باکتری را نام برد (9). نتایج تحقیقات نشان داده که فاکتورهای بیولوژیکی مانند رشد و بقاء باکتری، تحرک سلول باکتری، اندازه سلول، غلظت سلول و ویژگی‌های سطح سلول باکتری تأثیر چشمگیری بر انتقال و جذب برگشت‌ناپذیر سلول باکتری به سطح دارند (12).

میزان جذب، غیرفعال شدن و ارتباط میکروارگانیسم‌ها با ذرات خاک به ویژگی‌های خاک، کیفیت و شدت کاربرد فاضلاب تصفیه شده بستگی دارد. چند ویژگی از ویژگی‌های خاک هستند که قدرت خاک را برای فیلتراسیون و حذف میکروارگانیسم‌ها بیان می‌کنند: 1- توزیع ذرات خاک و اندازه متوسط آن‌ها که بر روی ظرفیت نگهداری مکانیکی ذرات معلق تأثیر می‌گذارند، 2- مقدار رطوبت خاک که زنده ماندن میکروارگانیسم‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد، 3- مقدار هوا که فعالیت‌های بیولوژیکی و شیمیایی را تحت تأثیر قرار می‌دهد، 4- مقدار مواد آلی که می‌تواند فعالیت‌های میکروارگانیسم‌ها را در خاک کنترل کند، 5- واکنش‌های خاک که بوسیله pH تعریف می‌شوند، 6- ویژگی‌های جذب سطحی که به ترکیبات شیمیایی و سطح مخصوص ذرات خاک مربوط می‌شود. این خواص ذرات خاک، ممکن است مانع و یا باعث تحریک واکنش‌های شیمیایی با جریان سیال در محیط خاک شوند و 7- عکس‌العمل الکتریکی یا مغناطیسی ذرات خاک به ذرات موجود در پساب (16). بطور کلی می‌توان این‌گونه بیان کرد که انتقال باکتری‌ها در زیر سطح خاک یک فرآیند پیچیده و غیرخطی است. باکتری‌ها به عنوان موجودات زنده در محیط متخلخل حرکت می‌کنند و علاوه بر فرآیندهای فیزیکی و شیمیایی با تعدادی از فرآیندهای بیولوژیکی نیز مرتبط هستند. از جمله فرآیندهای بیولوژیکی می‌توان به رشد و مرگ و میر سلول‌های باکتریایی، چسبندگی، جدا شدن به علت وجود مواد غذایی و تشکیل زیست توده[2] توده[2] اشاره کرد (3).

تحقیقات متعددی در زمینه مدل‌سازی انتقال آلودگی توسط باکتری‌ها صورت گرفته است، برادفورد و همکاران (4) برای شبیه‌سازی انتقال و رسوب اشریشیاکولی[3] تحت شرایط الکترواستاتیک نامساعد[4] در ماسه کوارتز اشباع از مدل HYDRUS-1D استفاده کردند. نتایج شبیه‌سازی حاکی از آن بود که مدل موفقیت خوبی نسبت به داده‌های آزمایشی داشته است. جیانگ و همکاران (21) برای شبیه‌سازی جریان آب و آبشوئی فکال کلی‌فرم و بروماید از 6 لایسیمتر حاوی خاک دست نخورده به عمق 70 و قطر 50 سانتی‌متر تحت شرایط طبیعی مزرعه از HYDRUS-1D استفاده کردند. نتایج حاصل از مدل ساکن- متحرک نشان داد که باکتری از طریق منافذ باریک‌تر و با میزان تبادل جرم کم‌تر بین نواحی ساکن و متحرک منتقل می‌شود. صفادوست و همکاران (26) از مدل نفوذپذیری دوگانه در نرم افزار HYDRUS-1D برای شبیه‌سازی پارامترهای انتقال Br و اشریشیاکولی NAR در ستون‌های خاک دست خورده (R) و هوازده (W) بر روی خاک‌های لوم رسی (CL) و لوم شنی (SL)، با استفاده از مدل‌سازی معکوس استفاده کردند. پارامترهای مدل جذب- واجذب با استفاده از برازش پارامترهای مدل نفوذپذیری دوگانه روی منحنی رخنه اشریشیاکولی NAR محاسبه شدند. ضریب جذب بزرگ‌تر مرتبط به خاک دست خورده با بافت رسی بود که اهمیت مکان جذب و فضای کوچک بین منافذ را نشان داد. آن‌ها بیان کردند که ضریب جذب و رسوب کوچک‌تر در ستون‌های خاک هوازده نیاز به تحقیقات بیش‌تر برای بررسی خطرات انتقال آلودگی در ناحیه غیراشباع در این خاک‌ها را نشان می‌دهد. فرخیان فیروزی و همکاران (10) با استفاده از مدل جذب- واجذب سینتیک برنامه HYDRUS-1D انتقال و جذب باکتری سودوموناس فلورسنس را در ستون خاک بررسی نمودند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که این مدل برآورد خوبی از منحنی رخنه باکتری داشته در حالی‌که تخمین خوبی از باکتری نگهداشته شده در خاک نداشته است.

با توجه به نتایج تحقیقات قبلی در زمینه استفاده از مدل

1- Air-Water Interface

2- Biofilm
3- E.coli O157:H7
4- Unfavorable

HUDRUS-1D برای شبیه‌سازی انتقال باکتری‌ها در خاک تحت شرایط مختلف، در این تحقیق قابلیت مدل HUDRUS-1D برای تعیین پارامترهای انتقال باکتری در آبیاری قطره‌ای سطحی با استفاده از پساب و نیز تأثیر دور و مدت زمان آبیاری بر نحوه توزیع و تجمع باکتری فکال کلی‌فرم در نیم‌رخ خاک، مورد بررسی قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

پژوهش مذکور به مدت 62 روز در پاییز سال 1392 بر روی یک ستون خاک دست خورده به ارتفاع 60 و قطر داخلی 30 سانتی‌متر و در آزمایشگاه آبیاری دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس انجام شد. خاک مورد استفاده در این پژوهش دارای بافت لوم رسی (Clay Loam) بود که از محل تصفیه خانه فاضلاب جنوب تهران تهیه گردید. خصوصیات شیمیایی و فیزیکی خاک مورد استفاده در جداول (1) و (2) ارائه گردیده است. فاضلاب مورد استفاده از تصفیه خانه فاضلاب جنوب شهر تهران واقع در شهر ری، اتوبان شهید آوینی مجاور روستای عمادآور تأمین گردید. برای تهیه ستون خاک، از یک عدد لوله PVC به قطر داخلی 30 و ارتفاع 75 سانتی‌متر استفاده شد. به منظور زهکشی مناسب ستون خاک، در انتهای ستون تا ارتفاع 5 سانتی‌متر شن درشت ریخته شد و برای جلوگیری از خروج خاک، انتهای لوله با توری فلزی بسته شد. لوله مذکور به صورت قائم و با فاصله 75 سانتی‌متر از زمین قرار داده شد؛ در نتیجه، جمع‌آوری زهاب ستون خاک به آسانی امکان‌پذیر بود. به منظور جلوگیری از جریان ترجیحی، با استفاده از ذرات ماسه و چسب دیواره داخلی ستون زبر شد و کناره‌های ستون خاک با استفاده از میله متراکم گردید. همچنین برای آن‌که ستون خاک تا حدودی شرایطی مشابه خاک مزرعه داشته باشند، با جرم مخصوص ظاهری ($\rho_b = 1/5$ gr/cm^3) مشابه خاک مزرعه تهیه گردید.

جدول 1- برخی از ویژگی‌های شیمیایی خاک آزمایش

Table 1- Selected chemical properties of soil

عمق خاک Depth (cm)	EC (dS/m)	pH	آنیون‌ها (meq/lit) Anions					کاتیون‌ها (meq/lit) Cations				
			SO_4^{-2}	Cl^-	HCO_3^-	CO_3^{-2}	جمع Sum	K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	جمع Sum
0-45	8.92	7.82	30.39	45.5	15	-	90.89	-	25.6	48.3	20.7	94.6

جدول 2- برخی از ویژگی‌های فیزیکی خاک آزمایش

Table 2– Selected physical properties of soil

عمق خاک (cm) Depth (cm)	درصد شن Sand percent	درصد رس Clay percent	درصد سیلت Silt percent	جرم مخصوص ظاهری (gr/cm^3) Bulk density	بافت Texture
0-45	31	28	41	1.5	لوم رسی(Clay-Loam)

برای آبیاری ستون خاک، از یک پمپ با حداکثر آبدهی 40 لیتر بر دقیقه استفاده شد. به منظور تزریق پساب داخل ستون خاک از لوله 16 میلی‌متری قطره‌چکان‌دار استفاده گردید. قطره‌چکان از نوع تنظیم کننده فشار، با دبی 3/78 تا 4 لیتر بر ساعت و فشار کاری 0/5 تا 2 اتمسفر بود، که در وسط سطح مقطع ستون و روی سطح خاک قرار داده شد. در هر آبیاری، ستون خاک به مدت 45-30 دقیقه، آبیاری و حدود 2 الی 3 لیتر پساب مصرف می‌شد. در طول آزمایش به گونه‌ای عمل شد که خاک اشباع نباشد از همین‌رو با سرد شدن هوا و کاهش دمای آزمایشگاه به مدت زمان بیشتری برای تبخیر و از دست دادن آب خاک نیاز بود، از همین‌رو دور آبیاری بین 3 تا 7 روز در طول دوره 62 روزه آزمایش متغیر بود. به گونه‌ای که با گذشت زمان و پایین آمدن دمای آزمایشگاه، دور آبیاری به تدریج افزایش یافت. برای نمونه‌برداری از آب خاک، یک کپسول مکش در عمق 15 سانتی‌متری زیر قطره‌چکان قرار داده شد و زهاب خروجی از انتهای ستون به روش حجمی اندازه‌گیری شد. حجم پساب مصرفی در زمان‌های مختلف از شروع آزمایش ثبت شد. به محض مشاهده خروج زه‌آب از ستون در هر آبیاری، زمان آن ثبت و حجم زه‌آب خروجی نیز با زمان اندازه‌گیری شد. باکتری فکال کلی‌فرم[1] به عنوان باکتری شاخص آلودگی آب انتخاب شد. فکال کلی‌فرم از خانواده باکتری‌های گرم منفی، فاقد اسپور، مقاوم به گرما، بی‌هوازی و دارای قطر 0/3 تا یک میکرومتر و طول 0/6 تا 6 میکرومتر است (18 و 22). غلظت باکتری پس از هر آبیاری در نمونه‌های جمع‌آوری شده از پساب ورودی (حجم هر نمونه 200-250 میلی‌لیتر)، زهاب خروجی (حجم هر نمونه 150-200 میلی‌لیتر) و محلول آب خاک در عمق 15 سانتی‌متری زیر قطره‌چکان توسط آزمایشگاه معتمد سازمان محیط زیست تعیین شد.

1- Fecal Coliform

نمونه‌های جمع‌آوری شده تا زمان انتقال به آزمایشگاه، در دمای 4 درجه سانتی‌گراد در یخچال نگهداری شدند و همچنین هنگام انتقال نمونه‌ها به آزمایشگاه از ظروف حاوی یخ استفاده شد.

معادله کلی حاکم بر انتقال باکتری در خاک

سرنوشت و بقاء باکتری‌ها در محیط متخلخل پیچیده‌تر از انتقال باکتری‌ها در محلول‌ها می‌باشد. این امر توسط فرآیندهای مختلفی تحت تأثیر قرار می‌گیرد. از جمله این فرآیندها می‌توان به فیلتراسیون، پالایش فیزیکی، رسوب، جذب و واجذب، رشد و کاهش/ مرگ و میر اشاره کرد (29). بطور کلی، می‌توان این مکانیسم‌ها را در سه دسته مهم طبقه‌بندی کرد: 1- انتقال (جریان توده‌ای و انتشار) 2- تبادل بین فاز مایع و جامد (به علت جذب و واجذب) و 3- رشد، غیر فعال شدن و مرگ. در مدل‌سازی، توصیف ریاضی مناسب برای این مکانیسم‌ها باید در نظر گرفته شود (31). به عبارت دیگر انتقال باکتری‌ها و ویروس‌ها در خاک‌های غیراشباع می‌تواند به عنوان نتیجه ترکیب جابجایی و انتشار که تحت تأثیر رشد، مرگ و میر و جذب و واجذب قرار می‌گیرد، شبیه‌سازی شود (28). معادله انتقال-انتشار حاکم بر انتقال ویروس یا باکتری با فرض فرآیند جذب/ واجذب به صورت زیر است (29):

$$\frac{\partial \theta c}{\partial t}+\rho\frac{\partial s_1}{\partial t}+\rho\frac{\partial s_2}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\theta D\frac{\partial c}{\partial x}\right)-\frac{\partial qc}{\partial x}-\mu_w\theta c-\mu_s\rho\left(s_1+s_2\right) \quad (1)$$

که در آن، c غلظت باکتری در فاز مایع (NL^{-3})، s غلظت باکتری جذب شده به خاک (NM^{-1})، اندیس‌های 1 و 2 به ترتیب نشانگر دو مکان سینتیک[1] می‌باشند. D ضریب انتشار[2] (L^2T^{-1})، θ رطوبت خاک ($L^{-3}L^{-3}$)، ρ جرم مخصوص ظاهری خاک (ML^{-3})، q شدت جریان (LT^{-1})، μ_w و μ_s به ترتیب ضریب غیرفعال شدن باکتری در فاز مایع و جامد می‌باشند.

دو محیط جذب جنبشی برای نشان دادن فرآیندهای مختلف فیزیکی و شیمیایی مورد استفاده قرار می‌گیرند. به عنوان مثال یک مکان جذب ممکن است نشان دهنده فرآیندهای شیمیایی جذب/ واجذب، در حالی‌که مکان جذب دیگر ممکن است نشان دهنده فرآیندهای فیزیکی پالایش باشد. در روش دیگر یکی از مکان‌ها می‌تواند نشان دهنده جذب/ واجذب و دیگری نشان دهنده برهم کنش سطح مشترک آب-هوا باشد (29).

مطالعات مختلف مکان‌های جذب را به دو بخش S_1 و S_2 تقسیم کرده‌اند، که شدت یا فرآیندهای مختلفی در هر یک از این مکان‌های جذب اتفاق می‌افتد. معادله بیلان جرم زمانی که رشد باکتری در فاز جامد در نظر گرفته شود، به شکل زیر خواهد بود:

$$\frac{\partial \theta c}{\partial t}+\rho\frac{\partial s_1}{\partial t}+\rho\frac{\partial s_2}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\theta D\frac{\partial c}{\partial x}\right)-\frac{\partial qc}{\partial x}+\mu_w\theta c+\mu_s\rho\left(s_1+s_2\right) \quad (2)$$

که در آن، k_{str} (T^{-1}) ضریب پالایش فیزیکی و k_a (T^{-1}) ضریب جذب و k_d (T^{-1}) ضریب واجذب می‌باشند. ψ_x تابع نگهداشت باکتری (بدون بعد) وابسته به مکان که برای رسوب بر روی مکان S_2 محاسبه می‌شود.

برای برآورد پارامترهای مدل انتقال باکتری شامل ضریب جذب، ضریب واجذب، ضریب پالایش فیزیکی، ضریب انتشار، ضریب غیرفعال شدن باکتری در فاز مایع و جامد در خاک، از مدل HYDRUS-1D استفاده شد. مدل HYDRUS-1D به منظور شبیه‌سازی یک بعدی حرکت آب، حرارت و املاح در محیط متخلخل و شرایط مختلف رطوبتی توسعه یافته است. این مدل برای حرکت آب و املاح به ترتیب از معادلات ریچاردز و انتقال- انتشار استفاده می‌کند. HYDRUS-1D با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی لونبرگ- مارکوارت به برآورد معکوس پارامترهای هیدرولیکی خاک و انتقال املاح می‌پردازد. تغییرات مختلف بوجود آمده در مدل HYDRUS این مدل را قادر ساخته تا بتواند فرآیندهای مربوط به انتقال و جابه‌جایی ویروس‌ها و باکتری‌ها را نیز شبیه‌سازی کند.

روش مدل‌سازی

برای برآورد پارامترهای مدل انتقال باکتری (معادله 1) در ستون خاک، از گزینه مدل‌سازی معکوس مدل HYDRUS-1D، استفاده شد. این مدل بطور همزمان و با استفاده از روش بهینه‌سازی حداقل مربعات بین مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده بر اساس الگوریتم لونبرگ- مارکوارت پارامترهای مدل را به منحنی رخنه باکتری برازش می‌دهد. از میان پارامترهای مختلف انتقال باکتری، با استفاده از تحلیل حساسیت و سعی و خطا، پارامترهای اصلی شناسایی گردیدند. در مرحله واسنجی، پس از وارد کردن مقادیر اولیه هر کدام از متغیرها در مدل، نرم‌افزار به پردازش داده‌ها می‌پردازد و مقادیر نهایی را برآورد می‌کند. در هر تکرار همزمان با برآورد متغیرها، SSQ[3] و RMSE[4] نیز محاسبه می‌شوند. پس از هر بار اجرای نرم‌افزار، دوباره مقادیر جدید محاسبه شده در مدل قرار می‌گیرند و دوباره این عمل تکرار می‌گردد. پایان محاسبات زمانی است که مقادیر برآورد شده به یک مقدار ثابت و SSQ و RMSE به یک مقدار ثابت و حداقل میل کنند. لازم به ذکر است که مقادیر اولیه تخمین پارامترها از داده‌های بدست آمده در

1- Kinetic
2- Dispersion coefficient
3- Sum of Square
4- Root Mean Squared Error

مطالعات سایر محققین کسب شدند (22 و 21). همچنین یکی از پارامترهای مهم مدل انتقال باکتری و سایر آلاینده‌ها در خاک، جذب است. برای جذب ایزوترم‌های جذب خطی، فروندلیخ و لانگمویر در مدل پیش‌بینی شده است که در پژوهش حاضر، جذب خطی به عنوان مناسب‌ترین ایزوترم جذب انتخاب و استفاده شد.

شرایط مرزی و اولیه معرفی شده به مدل

به منظور شبیه‌سازی انتقال باکتری لازم است شرایط مرزی و اولیه به مدل معرفی شوند، به همین دلیل در پژوهش مذکور مرز انتهایی ستون، بصورت زهکشی آزاد (Free Drainage) و مرز بالادست نیز به صورت (Variable Pressure Head/Flux) تعریف شدند. شرایط اولیه تعریف شده به مدل، با توجه به توزیع رطوبت خاک قبل از شروع اولین آبیاری و معادل 5 درصد حجمی به مدل معرفی شد.

پارامترهای هیدرولیکی خاک

پارامترهای هیدرولیکی خاک از مدل منحنی مشخصه رطوبتی ون گنوختن- معلم با استفاده از مدل‌سازی معکوس و بسته نرم‌افزاری ROSETTA بر اساس درصد ماسه، سیلت، رس، جرم مخصوص ظاهری، رطوبت در نقطه ظرفیت زراعی (26%) و نقطه پژمردگی (12%) تعیین شدند.

پارامترهای مورد نیاز بررسی تأثیر دور و مدت زمان آبیاری بر انتقال باکتری

برای بررسی تأثیر دور و مدت زمان آبیاری بر وضعیت باکتری فکال کلی‌فرم ناشی از آبیاری قطره‌ای با پساب، معمول‌ترین ساعات و دورها که در این روش آبیاری کاربرد دارند، شامل سه مدت زمان آبیاری (2، 3 و 4 ساعت) و سه دور آبیاری (یک، 2 و 3 روز) در یک فصل رشد (در این پژوهش برابر با 25 نوبت آبیاری) انتخاب گردید. دبی قطره‌چکان 2 لیتر بر ساعت، غلظت باکتری ورودی برابر 0/3 (متوسط غلظت باکتری موجود در پساب آزمایش‌های لایسیمتری)، همچنین طول نیم‌رخ خاک 100 سانتی‌متر لحاظ گردیدند.

نتایج و بحث

نتایج حاصل از داده‌های آزمایشگاهی این پژوهش توسط مدل HYDRUS-1D آنالیز گردیده‌است. مقادیر پارامترهای هیدرولیکی خاک با استفاده از بسته نرم افزاری ROSETTA در جدول (3) ارایه شده‌اند. پس از شبیه‌سازی حرکت آب در ستون آزمایشی با استفاده از این پارامترها، نیاز به تعدیل و اصلاح پارامترهای هیدرولیکی احساس شد. لذا، پارامترهای هیدرولیکی خاک با استفاده از مدل‌سازی معکوس و واسنجی مدل HYDRUS-1D با استفاده از حجم آب ورودی و خروجی از ستون خاک، تعیین شدند (جدول 4). بسته نرم افزاری ROSETTA و روش مدل‌سازی معکوس پارامترهای هیدرولیکی خاک به جز K_s را تقریباً مشابه برآورد نمودند به گونه‌ای که بین مقادیر تخمینی Ks از روش مدل‌سازی معکوس و روش توابع انتقالی (ROSETTA) تفاوت زیادی وجود دارد. تغییرات زیاد K_s تا حدود زیادی براساس منابع گذشته طبیعی است، به گونه‌ای که از میان پارامترهای هیدرولیکی خاک براساس پژوهش‌های انجام شده پارامتر K_s نسبت به سایر پارامترها تغییرات بیشتری دارد (1). همچنین ذکر این نکته ضروری است که در این پژوهش مقادیر تخمینی K_s به دو روش در محدوده مقادیر توصیه شده توسط کارسل و پریش (5)، رالز و همکاران (24) و شاپ و همکاران (27) برای خاک لوم رسی است. در این تحقیق از مقادیر واسنجی شده توسط مدل HYDRUS-1D استفاده شد.

جدول 3- پارامترهای هیدرولیکی خاک با استفاده از بسته نرم افزاری ROSETTA

Table 3- Estimated soil hydrolic parameters using the ROSETTA package

پارامتر Parameter	K_s(cm/min)	N	α (cm^{-1})	θ_s (cm^3/cm^3)	θ_r (cm^3/cm^3)
مقدار Value	0.007	1.3781	0.0113	0.38	0.0477

جدول 4- پارامترهای هیدرولیکی خاک پس از واسنجی مدل HYDRUS-1D

Table 4- Calibrated soil hydraulic parameter using the HYDRUS-1D model

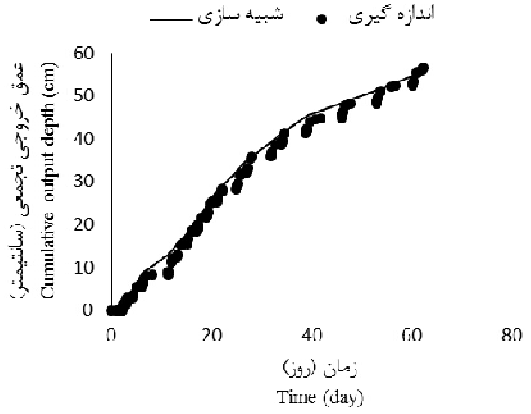
پارامتر Parameter	L	K_s(cm/min)	n	α (cm^{-1})	θ_s (cm^3/cm^3)	θ_r (cm^3/cm^3)
مقدار Value	0.5	0.2	1.3735	0.018	0.43	0.048

l پارامتر اتصال منافذ است Pore connectivity parameter

شبیه‌سازی جریان آب در خاک

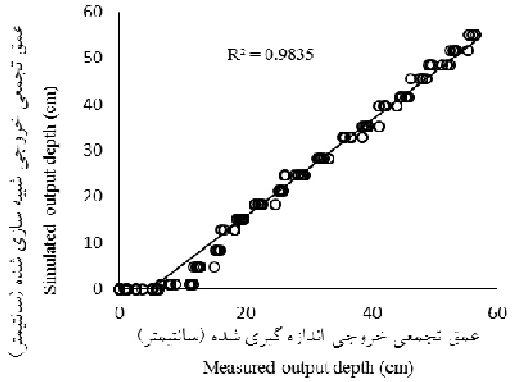
بیلان آب در ستون خاک

بین مقادیر خروجی اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده توسط مدل اندکی اختلاف وجود دارد. مدل در شبیه‌سازی حرکت آب در خاک، تبخیر را در نظر نگرفته است، بگونه‌ای که از 74 سانتی‌متر آب ورودی، 54 سانتی‌متر عمق زهاب خروجی و 20 سانتی‌متر عمق آب ذخیره شده در خاک است؛ این در حالی است که در داده‌های اندازه‌گیری شده، مقدار تبخیر لحاظ شده به گونه‌ای که مجموع تبخیر و زهاب خروجی تقریباً 57 سانتی‌متر (49 سانتی‌متر زهاب خروجی و 8 سانتی‌متر تبخیر) و عمق ذخیره شده در خاک برابر با 13 سانتی‌متر است، با توجه به این مطلب مشاهده می‌شود که مدل مقدار بیشتری را به ذخیره در خاک اختصاص داده است، در واقع مقدار تبخیر، سبب اختلاف بین عمق زهاب خروجی شبیه‌سازی شده توسط مدل و مقدار اندازه‌گیری شده است. شکل (1) اختلاف بین عمق تجمعی زهاب خروجی اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده در ستون آبیاری قطره‌ای سطحی را نشان می‌دهد. در شکل (2) ضریب تبیین (R^2) بین عمق تجمعی اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده نشان داده شده‌است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود از مقدار بالای R^2 می‌توان این‌طور نتیجه گرفت که مدل توانسته است جریان خروجی از ستون خاک را به خوبی شبیه‌سازی نماید.



شکل 1- مقایسهٔ عمق آب خروجی تجمعی اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده در ستون آبیاری قطره‌ای سطحی

Figure 1- Comparison of measured and simulated cumulative output depth in surface drip irrigation



شکل 2- مقایسهٔ بین عمق آب تجمعی اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده توسط مدل HYDRUS-1D

Figure 2- Comparison between measured and simulated cumulative output depth by the HYDRUS-1D model

شبیه‌سازی انتقال باکتری در خاک

شبیه‌سازی با مدل جذب تک مکانی و مدل جذب-واجذب سینتیک تک مکانی و دو مکانی

به منظور شبیه‌سازی انتقال باکتری به کمک معادله (1) از سه مدل جذب تک مکانی (One Site Sorption's Model)، مدل جذب- واجذب سینتیک دو مکانی ((Two Kinetic Sites Model Particle Transport using Attachment/Detachment)) و جذب- واجذب سینتیک تک مکانی استفاده گردید. مدل جذب تک مکانی، تنها جذب را در نظر گرفته و از واجذب باکتری صرف نظر می‌کند. مدل جذب- واجذب دو مکانی فرآیندهای جذب و واجذب را با نرخ سینتیک درجه اول (First order kinetic process) توصیف می‌نماید. در این مدل فرض بر این است که مکان سینتیک اول به پالایش فیزیکی اختصاص داده شده است و در مکان دوم فرآیند انتقال جرم بین فاز مایع و جامد یا همان جذب و واجذب صورت می‌گیرد. برای مدل جذب- واجذب سینتیک تک مکانی فرض شده است که در مکان دوم تنها جذب و واجذب صورت گرفته و پارامترهای انتقال برای مکان اول صفر در نظر گرفته شده‌اند. لازم به توضیح است که جذب به فاز جامد و سطح مشترک آب- هوا در ضریب جذب (K_{att}) گنجانده شده‌اند.

در تحقیق حاضر با توجه به اینکه ایزوترم جذب خطی نسبت به ایزوترم‌های جذب لانگمویر و فروندلیخ منجر به بهترین نتایج یا به عبارتی کمترین مقدار RMSE و SSQ بالاترین مقدار R^2 گردید، لذا از ایزوترم جذب خطی در مدل‌های مورد بررسی استفاده گردید. فرخیان فیروزی و همکاران (10) در مطالعه خود بر روی نقش کربنات کلسیم بر جذب و واجذب آلاینده‌های میکروبی در خاک آهکی، سه ایزوتروم جذب خطی، لانگمویر و فروندلیخ را مورد بررسی قرار دادند

و نتیجه گرفتند که ایزوترم جذب خطی نسبت به دو ایزوترم دیگر برآورد بهتری از جذب باکتری در خاک دارد. همچنین گاردیلو و همکاران (14) در تحقیقی بر روی توانایی ستون‌های ماسه برای حذف باکتری Radiodurans Deinococcus از ایزوترم جذب خطی استفاده نمودند.

مقادیر پارامترهای انتقال برای مدل‌های جذب تک مکانی، جذب- واجذب سینتیک تک مکانی و دو مکانی در جدول (5) ارائه شده است. ضریب انتشارپذیری (λ) برای کلیه مدل‌های مورد استفاده برابر با یک سانتی‌متر به روش معکوس برآورد شد. کم بودن این ضریب بیانگر آن است که باکتری تحرک کمی در ستون خاک داشته (29) که این می‌تواند یکی از علل افزایش جمعیت باکتری در خاک باشد زیرا زمانی که تحرک باکتری در خاک کم باشد امکان شسته شدن آن به دلیل جذب و یا پالایش فیزیکی و سایر عوامل کمتر است (20) و چون سلول مادر نیز در فاز جامد شروع به تقسیم و تکثیر می‌نماید، از همین‌رو افزایش و تجمع جمعیت رخ می‌دهد.

مدل جذب تک مکانی

با توجه به جدول (5) مشاهده می‌شود نرخ جذب باکتری min^{-1} 0/014 است. همچنین مشاهده می‌شود که ضریب رشد باکتری در فاز جامد حدود 6 برابر ضریب رشد در فاز مایع است. این مطلب نشان می‌دهد که باکتری‌هایی که بر روی ذرات خاک جذب شده‌اند، امکان بیشتری برای تکثیر و افزایش نرخ جمعیتی دارند، که با توجه به افزایش جمعیت باکتری در نتایج بدست آمده از آزمایش، مدل جذب تک مکانی برآورد خوبی از تعداد باکتری در خاک داشته است.

مدل جذب- واجذب سینتیک تک مکانی

با توجه به جدول (5) ملاحظه می‌شود که نرخ جذب باکتری فکال کلی‌فرم در ستون خاک با استفاده از مدل جذب- واجذب سینتیک تک مکانی $0/1414\times10^{-2}$ min^{-1} و نرخ واجذب min^{-1} $0/3773\times10^{-2}$ می‌باشند. به عبارت دیگر مقدار ضریب واجذب تقریباً 2/5 برابر ضریب جذب است. همچنین در این مدل، مقدار ضریب رشد باکتری در فاز جامد 7/5 برابر بیشتر از ضریب رشد در فاز محلول است. بیشتر بودن ضریب رشد باکتری در فاز جامد نسبت به فاز محلول به این دلیل است که سلول‌های رسوب کرده در مقایسه با سلول‌های موجود در فاز محلول، شدت تقسیم بیشتری داشته‌اند. در فرآیند تقسیم سلولی، سلول مادر پس از رسوب روی سطح مواد، رشد کرده و در نهایت سلول دختر، آزاد و وارد فاز مایع می‌گردد، که این مسئله می‌تواند علت بیشتر بودن K_{det} باکتری نسبت به K_{att} آن نیز باشد (22).

مدل جذب- واجذب سینتیک دو مکانی

در این مدل دو مکان برای حذف باکتری در نظر گرفته شد. مکان اول به جذب و واجذب و مکان دوم برای پالایش فیزیکی است. مقدار ضریب پالایش فیزیکی با استفاده از روش حل معکوس min^{-1} $0/466\times10^{-2}$ برآورد شد، که در مقایسه با ضرایب جذب و واجذب رقم قابل توجهی است. همچنین مطابق جدول (5) مشاهده می‌شود که نرخ واجذب باکتری در این مدل 13/5 برابر نرخ جذب است. همچنین نرخ رشد باکتری در فاز مایع و جامد به ترتیب $0/5041\times10^{-3}$ و $0/8759\times10^{-3}$ می‌باشند. ملاحظه می‌شود که در این مدل نیز ضریب رشد باکتری در فاز جامد بزرگتر از مقدار مشابه آن در فاز مایع می‌باشد. بیشتر بودن مقدار ضریب رشد باکتری در فاز جامد نسبت به فاز مایع در مطالعه گاردیلو و همکاران (14) نیز گزارش شده است. علت کم بودن K_{att} را می‌توان چنین بیان کرد که بالا بودن K_{str} سبب می‌شود پالایش بیشتر و در نتیجه تعداد باکتری‌های موجود در فاز مایع کم شوند، در نتیجه مقدار جذب در مکان اول کاهش می‌یابد (13). یکی از علل بیشتر بودن K_{det}، زیاد بودن شدت جریان آب ورودی به ستون است. با افزایش شدت جریان، احتمال افزایش باکتری‌ها و کمبود مکان جذب برای آن‌ها وجود دارد، در نتیجه دفع باکتری از سطوح جذب و آزاد شدن باکتری‌های گیر افتاده در منافذ خاک بیشتر شده و باکتری بیشتری وارد زهاب می‌گردد و آلودگی آن را افزایش خواهد داد. همچنین بالا بودن مقدار K_{det} نسبت به K_{att} نشان دهنده برگشت‌پذیر بودن فرآیند جذب است. باکتری‌های جذب شده بر اثر تغییر در شرایط جریان ورودی، از سطح ذرات جدا می‌شوند و وارد فاز محلول می‌گردند (22).

شکل‌های 3 تا 5 غلظت مشاهده و شبیه‌سازی شده باکتری توسط مدل HYDRUS_1D را نشان می‌دهند. در این اشکال مشاهده می‌شود که بهترین برازش بین غلظت باکتری مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در مورد مدل جذب تک مکانی با ضریب تبیین 0/74 رخ داده است و توانایی دو مدل دیگر برای شبیه‌سازی غلظت باکتری، کمتر از مدل مذکور بوده است.

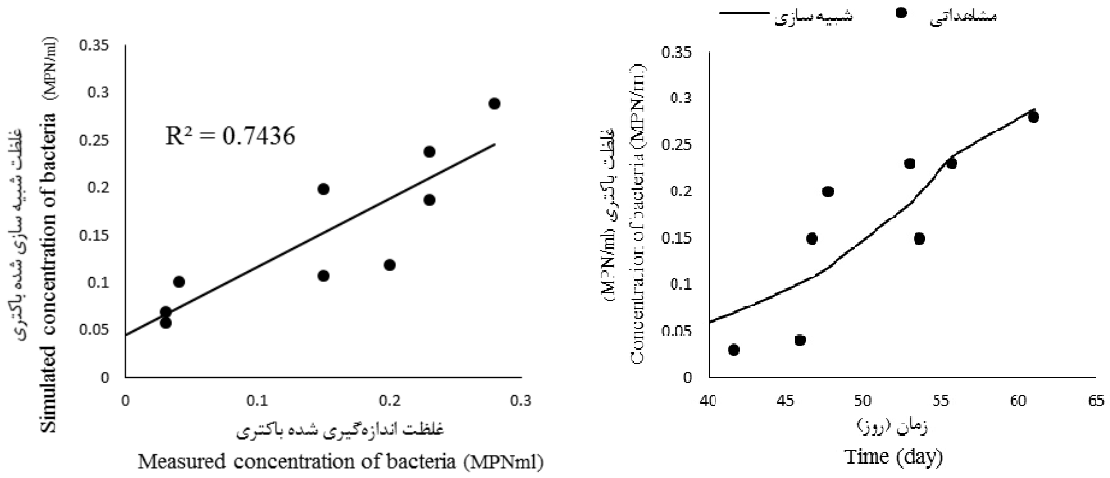
ارزیابی مدل‌های جذب تک مکانی، جذب-واجذب سینتیک تک مکانی و جذب-واجذب سینتیک دو مکانی

برای تعیین دقت هر یک از مدل‌های جذب تک مکانی، جذب–واجذب سینتیک تک مکانی و جذب- واجذب سینتیک دو مکانی، در ستون خاک، از آماره‌های ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، جمع مربعات داده‌ها (SSQ) و ضریب تبیین (R^2) استفاده گردید.

جدول 5- پارامترهای مدل جذب تک مکانی، جذب- واجذب سینتیک تک مکانی و دو مکانی برازش داده شده بر منحنی رخنه باکتری

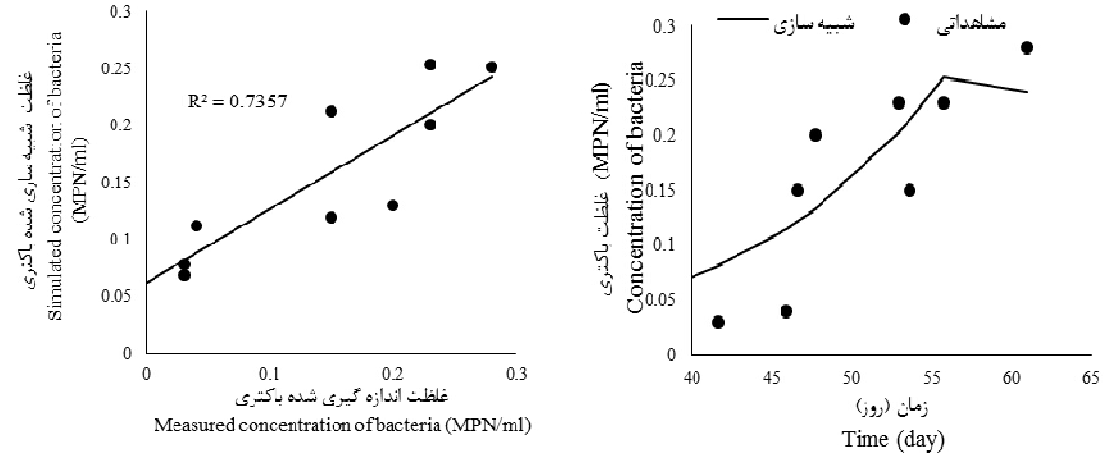
Table 5- Parameters of one site sorbtion's, attachment/detachment one kinetic site and attachment/detachment two kinetic sites models

پارامتر Parameter	جذب-واجذب سینتیک دو مکانی Attachement/Detachment two kinetic sites	جذب-واجذب سینتیک تک مکانی Attachement/Detachment one kinetic site	جذب تک مکانی One site sorbtion
K_{att} (min^{-1})	0.8361×10^{-4}	0.1414×10^{-2}	0.014
K_{det} (min^{-1})	0.1136×10^{-2}	0.3773×10^{-2}	-
K_{str} (min^{-1})	0.466×10^{-2}	-	-
μ_s (min^{-1})	-0.8759×10^{-3}	-0.1549×10^{-3}	-0.1267×10^{-3}
μ_l (min^{-1})	-0.5041×10^{-3}	-0.2055×10^{-4}	-0.2177×10^{-4}
λ (cm)	1	1	1



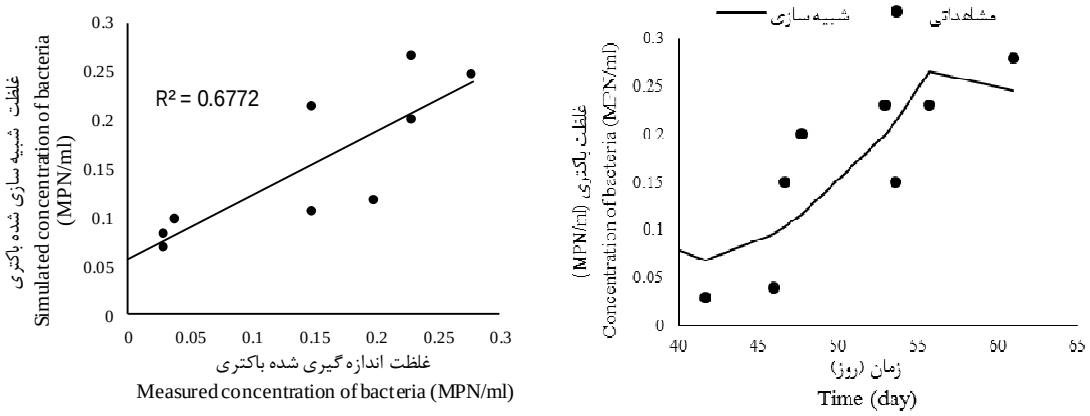
شکل 3- مدل جذب تک مکانی

Figure 3- One site sorbtion's model



شکل 4- مدل جذب- واجذب سینتیک تک مکانی

Figure 4- Attachment/Detachment one kinetic site model



شکل 5- مدل جذب- واجذب سینتیک دو مکانی
Figure 5- Attachment/Detachment two kinetic sites model

پس از مقایسه آماره‌های ذکر شده، (جدول 6) مشاهده شد که مقادیر این پارامترها در مدل جذب- واجذب سینتیک دو مکانی با دو مدل دیگر اختلاف قابل توجهی دارند، اما در مدل جذب- واجذب سینتیک تک مکانی و جذب تک مکانی تقریباً نتایج یکسانی وجود داشته است. هر چه مقدار RMSE به صفر نزدیک‌تر باشد، برآورد مدل بهتر بوده است. این نتایج نشان می‌دهد که مدل جذب تک مکانی و جذب-واجذب سینتیک تک مکانی در مقایسه با مدل جذب- واجذب سینتیک دو مکانی برآورد بهتری از پارامترهای انتقال باکتری داشته‌اند. ضریب تبیین، مشخص کننده مناسب بودن برازش معادله رگرسیونی بین داده‌های شبیه‌سازی شده و مقادیر مشاهداتی است و بهینه‌ترین مقدار R^2 برابر یک می‌باشد. ضریب تبیین محاسبه شده برای مدل جذب تک مکانی، 0/74 می‌باشد که نسبت به دو مدل دیگر به عدد یک نزدیک‌تر است. به این دلیل مدل جذب تک مکانی به عنوان بهترین مدل برای ادامه پژوهش انتخاب گردید. گاردیلو و همکاران (13) بیان کردند که بیشترین مقدار باکتری در ورودی ستون رسوب می‌کند و با افزایش عمق، مقدار رسوب باکتری کاهش می‌یابد. آن‌ها برای توصیف انتقال و نگهداشت باکتری‌ها از سه مدل جذب درجه اول، لانگمورین (جذب، واجذب و بلوک شدن) و دو مکانی (جذب، واجذب و رسوب وابسته به عمق) موجود در برنامه HYDRUS-1D استفاده و بیان نمودند که مدل دو مکانی نسبت به دو مدل دیگر با دقت بیشتری منحنی رخنه و داده‌های رسوب را در درجه اشباع‌های مختلف شبیه‌سازی نموده است. همچنین فرخیان فیروزی و همکاران (9) به منظور پیش‌بینی جذب و انتقال باکتری سودوموناس فلورسنس در ستون‌های خاک آهکی تحت شرایط رطوبتی اشباع از مدل جذب- واجذب سینتیک تک مکانی و دو مکانی برنامه HYDRUS-1D استفاده نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که مدل جذب- واجذب سینتیک دو مکانی در مقایسه با مدل تک مکانی برآورد بهتری از انتقال و نگهداشت باکتری در نیم‌رخ خاک دارد. آن‌ها علت برتری مدل جذب- واجذب دو مکانی را وجود آهک در خاک ذکر کردند.

جدول 6 – نتایج ارزیابی مدل جذب تک مکانی، جذب- واجذب سینتیک تک مکانی و دو مکانی با آماره‌های RMSE، R^2 و SSQ
Table 6- Result of evaluation of one site sorbtion's model, Attachment/Detachment one kinetic site, Attachment/Detachment two kinetic site model with RMSE,R^2, SSQ

پارامتر Parameter	جذب-واجذب سینتیک دو مکانی Attachment/Detachment two kinetic site	جذب-واجذب سینتیک تک مکانی Attachment/Detachment one kinetic site	جذب تک مکانی One site sorbtion
RMSE	0.20	0.18	0.18
R^2	0.67	0.73	0.74
SSQ	0.32	0.28	0.27

بررسی تأثیر دور و مدت زمان آبیاری بر انتقال باکتری

پس از تعریف پارامترهای دور و مدت زمان‌های مختلف آبیاری به مدل HYDRUS-1D، با استفاده از مدل جذب تک مکانی، شبیه‌سازی‌ها برای تعداد 25 آبیاری صورت گرفت و غلظت باکتری در عمق 30، 60 و 100 سانتی‌متری در نیم‌رخ خاک برآورد گردید. مقادیر بدست آمده از مدل HYDRUS-1D در پایان 25 نوبت آبیاری در

جدول (7) ارائه شده است.

مطابق جدول (7) مشاهده می‌شود که در هر آبیاری غلظت باکتری با افزایش عمق، افزایش می‌یابد؛ علت را می‌توان این‌گونه بیان کرد که با توجه به رشد باکتری در ستون خاک، باکتری‌های بیشتری با آبیاری شسته شده و به اعماق پائین‌تر در نیم‌رخ خاک حرکت می‌کنند. این مسئله در تمامی دورها و مدت زمان‌های مختلف آبیاری مشهود است. در شکل‌های (6)، (7) و (8) تغییرات غلظت باکتری فکال کلی‌فرم در یک دور مشخص و با مدت زمان‌های متفاوت آبیاری در برابر عمق در پایان آبیاری 25 اُم نشان داده شده است. همچنین تغییرات غلظت باکتری با عمق، در یک مدت زمان مشخص و دورهای متفاوت آبیاری در شکل‌های (9)، (10) و (11) در پایان 25 اُمین آبیاری قابل مشاهده است. در یک دور آبیاری مشخص، هر قدر مدت زمان آبیاری بیشتر شود، غلظت باکتری در یک عمق مشخص از خاک کمتر می‌شود. با افزایش مدت زمان آبیاری جریان آب بیشتری نیز از نیم‌رخ خاک عبور خواهد کرد و باکتری‌های بیشتری شسته شده و به اعماق پایین‌تر خواهند رفت. به عبارت دیگر جریان پیوسته آب سبب شده است تا باکتری‌هایی که جذب و یا دچار پالایش فیزیکی شده‌اند، از موقعیت خود جدا، آزاد و وارد فاز محلول شوند. هچنین می‌توان بیان کرد که هر قدر مدت زمان تماس بین باکتری و ذرات خاک کمتر شود، احتمال شسته شدن باکتری با جریان آب افزایش می‌یابد. ژئورینگ و همکاران (15) در پژوهش خود در مورد مدت زمان آبیاری روی انتقال باکتری فکال کلی‌فرم به این نتیجه رسیدند که با افزایش حجم جریان، باکتری بیشتری در اعماق خاک جمع می‌شود. هیوسمن و ورستریت (19) بیان کردند که با کاهش شدت آبیاری تعداد باکتری در عمق خاک، کاهش می‌یابد آن‌ها علت را به چسبندگی باکتری‌ها به ذارت خاک و مدت زمان تماس بین باکتری و خاک نسبت دادند. گوبر و همکاران (17) در پژوهش خود به این نتیجه رسیدند که حداکثر جذب باکتری در کمترین شدت جریان رخ می‌دهد.

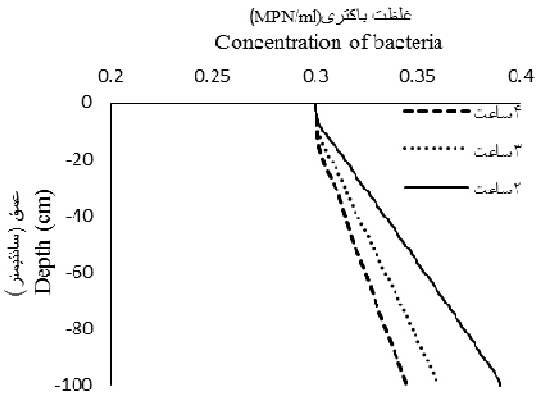
جدول 7- غلظت باکتری شبیه‌سازی شده با مدل HYDRUS-1D در اعماق 30، 60 و 100 سانتی‌متر نیم‌رخ خاک در پایان 25 اُمین آبیاری

Table 7- Concentration of simulated bacteria with the HYDRUS-1D in 30, 60 and 100 cm of soil depths at end of 25th irrigation event

دور آبیاری (روز) Interval of irrigation (day)	مدت آبیاری (ساعت) Time of irrigation (hr)	غلظت باکتری (MPN/ml) Concentration of bacteria		
		100 سانتی‌متر 100 cm	60 سانتی‌متر 60 cm	30 سانتی‌متر 30 cm
1	2	0.3904	0.3529	0.3235
1	3	0.3596	0.3338	0.3144
1	4	0.3442	0.3242	0.3096
2	2	0.4971	0.4126	0.3487
2	3	0.4264	0.371	0.3289
2	4	0.3932	0.3489	0.3188
3	2	0.6289	0.4806	0.3761
3	3	0.5022	0.4123	0.3444
3	4	0.4473	0.3779	0.3284

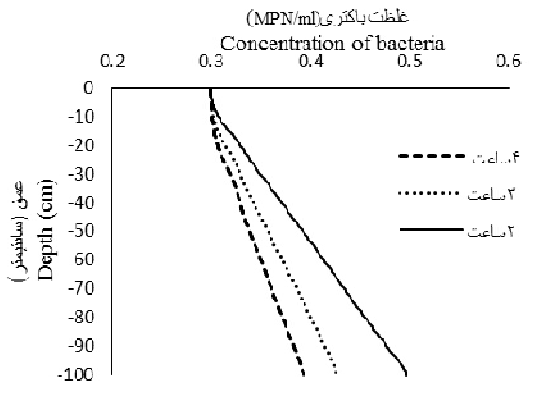
همان‌گونه که در جدول (6) مشاهده می‌شود، در دور آبیاری 2 روز و مدت زمان 3 ساعت؛ غلظت باکتری در عمق‌های 30، 60 و 100 سانتی‌متر به ترتیب 0/3289، 0/371 و 0/4264 (MPN/ml) خواهد بود.

با افزایش دور آبیاری در کلیه اعماق مورد بررسی غلظت باکتری افزایش یافته است. با نگاهی به جدول (7) مشاهده می‌شود که غلظت باکتری در عمق 30 سانتی‌متر و مدت زمان آبیاری 2 ساعت، در دورهای یک، 2 و 3 روز به ترتیب 0/3235، 0/3487 و 0/3761 (MPN/ml) است. علت افزایش غلظت باکتری با افزایش دور آبیاری را می‌توان به رشد باکتری در این فاصله زمانی نسبت داد زیرا با افزایش دور آبیاری فرصت و موقعیت بیشتری برای باکتری به لحاظ جذب، پالایش و به دنبال آن تکثیر وجود دارد. همچنین مشاهده می‌شود که کمترین غلظت باکتری در سطح خاک (ورودی ستون) وجود دارد. عالی نژادیان و همکاران (2) نشان دادند که هر قدر مدت زمان بیشتری از آبیاری بگذرد، باکتری‌های بیشتری جذب ذرات خاک می‌شوند. آن‌ها بیان نمودند که بقاء و تعداد باکتری‌های لاکتوز مثبت، فکال کلی‌فرم و توتال کلی‌فرم در نمونه‌های خاک با گذشت زمان کاهش یافته است به گونه‌ای که چند ساعت پس از آبیاری نسبت به 3 روز پس از آبیاری تعداد باکتری‌ها بیشتر بوده است. این پژوهشگران علت افزایش تعداد باکتری بلافاصله پس از آبیاری را به تکثیر باکتری به دلیل افزایش مواد آلی خاک نسبت دادند و علت کاهش آن‌ها پس از گذشت مدت زمانی از آبیاری را کاهش رطوبت خاک بیان کردند. در پژوهش حاضر چون رطوبت خاک بالا بوده است، هر چند با گذشت زمان از شروع آبیاری باکتری بیشتری جذب ذرات خاک شده است اما بالا بودن رطوبت، عاملی برای تکثیر و افزایش غلظت باکتری بوده است.



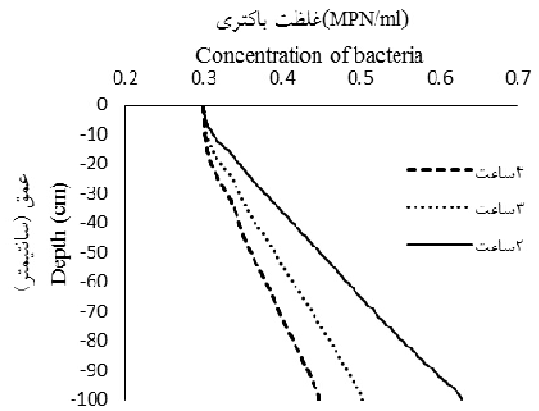
شکل 6- تغییرات غلظت باکتری با عمق در دور آبیاری یک روز

Figure 6- The concentration of bacteria in one day irrigation interval



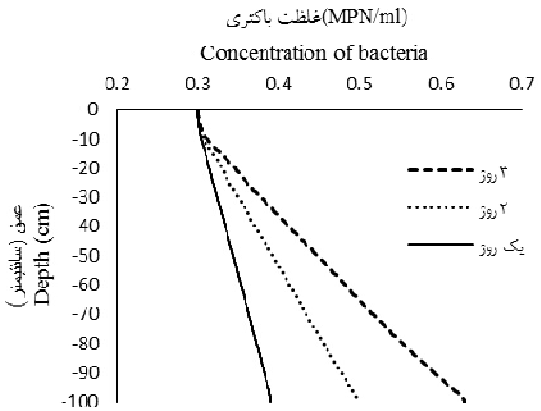
شکل 7- تغییرات غلظت باکتری با عمق در دور آبیاری 2 روز

Figure 7- The concentration of bacteria in two day irrigation interval



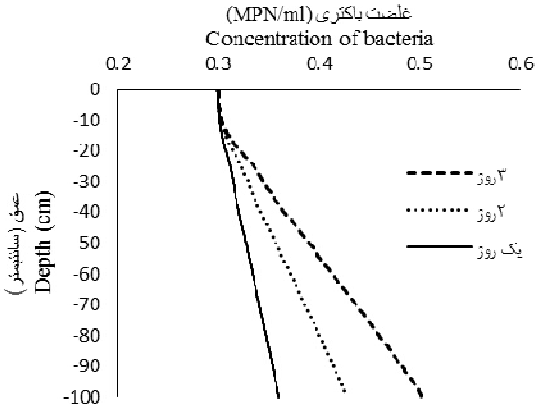
شکل 8- تغییرات غلظت باکتری با عمق در دور آبیاری 3 روز

Figure 8- The concentration of bacteria in three day irrigation interval



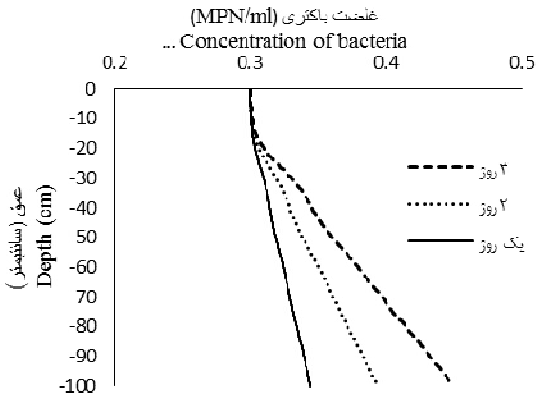
شکل 9- تغییرات غلظت باکتری با عمق در مدت زمان آبیاری یک ساعت

Figure 9- The concentration of bacteria in one hour irrigation times



شکل 10- تغییرات غلظت باکتری با عمق در مدت زمان آبیاری 2 ساعت

Figure 10- Concentration of bacteria in 2 hour irrigation times



شکل 11- تغییرات غلظت باکتری با عمق در مدت زمان آبیاری 3 ساعت

Figure 11- Concentration of bacteria in 3 hour irrigation times

نتیجه‌گیری

به منظور شبیه‌سازی جریان آب و انتقال باکتری فکال کلی‌فرم در یک ستون آبیاری قطره‌ای سطحی، از مدل HYDRUS-1D استفاده گردید. نتایج نشان داد که مدل مقدار آب خروجی از ستون خاک را بخوبی شبیه‌سازی نمود. تحت شرایط کاربرد آب با دور کم، مدیریت آبیاری باید به نحوی صورت گیرد که مقدار آبی که از ناحیه ریشه گیاه عبور می‌کند، با حداقل نفوذ عمقی و آبشوئی مواد غذائی، املاح و مواد شیمیایی همراه باشد. بدین منظور بوسیله تنظیم دبی قطره‌چکان مطابق با ویژگی‌های هیدرولیکی خاک و استفاده از مدل‌های مناسب (به جای آزمایشات مزرعه‌ای) می‌توان به درک صحیح‌تری از توزیع آب و املاح در خاک با استفاده از سیستم‌های آبیاری رسید.

به منظور شبیه‌سازی انتقال باکتری از سه مدل جذب تک مکانی، مدل جذب- واجذب سینتیک دو مکانی و جذب- واجذب سینتیک تک مکانی استفاده گردید. در شبیه‌سازی مدل جذب تک مکانی به علت داشتن کمترین مقدار RMSE و SSQ و بیشترین مقدار R^2 از بین سه مدل مورد بررسی انتخاب شد. مدل جذب تک مکانی بهترین برازش را بر روی غلظت باکتری اندازه‌گیری شده در مدت آزمایش داشت. همچنین ایزوترم جذب استفاده شده در مدل‌سازی، ایزوترم جذب خطی بود.

در کلیه مدل‌های مورد بررسی مشاهده شد که K_{det} بیش از K_{att} و μ_s بیش از μ_w بود. بیشتر بودن μ_s نسبت به μ_w به این دلیل است که سلول‌های رسوب کرده در مقایسه با سلول‌های موجود در فاز محلول، شدت تقسیم بیشتری داشته‌اند. در فرآیند تقسیم سلولی، سلول مادر پس از رسوب روی سطح مواد، رشد کرده و در نهایت سلول دختر آزاد و وارد فاز مایع می‌گردد. همچنین بیشتر بودن K_{det}، به دلیل زیاد بودن شدت جریان آب ورودی به ستون، افزایش تعداد باکتری‌ها و کمبود مکان جذب برای آن‌ها است به‌گونه‌ای که دفع باکتری از سطوح جذب و آزاد شدن باکتری‌های گیر افتاده در منافذ خاک بیشتر شده و باکتری بیشتری وارد زهاب می‌گردد. بالا بودن مقدار K_{det} نسبت به K_{att} نشان دهنده برگشت‌پذیر بودن فرآیند جذب است. باکتری‌های جذب شده بر اثر تغییر در شرایط جریان ورودی، از سطح ذرات جدا می‌شوند و وارد فاز محلول می‌گردند. به منظور پیش‌بینی انتقال باکتری در خاک از سه مدل جذب تک مکانی، جذب- واجذب سینتیک تک مکانی و جذب- واجذب سینتیک دو مکانی استفاده شد. پس از بررسی و ارزیابی سه مدل به روش آماری، مدل جذب تک مکانی به عنوان بهترین مدل برای شبیه‌سازی انتقال باکتری در خاک برگزیده شد. علت متفاوت بودن مدل برازش داده شده به داده‌ها در این طرح با مطالعات گذشته را می‌توان به شرایط متفاوت آزمایش حاضر در مقایسه با مطالعات پیشین از لحاظ شدت جریان زیاد، طولانی بودن زمان انجام آزمایش‌ها و بزرگتر بودن مقیاس ستون‌های آزمایشگاهی نسبت داد.

در بررسی تأثیر دور و مدت زمان‌های متفاوت آبیاری بر انتقال و توزیع باکتری فکال کلی‌فرم در خاک مشاهده گردید که در همه تیمارها کمترین مقدار باکتری در سطح ستون خاک بوده و با افزایش عمق مقدار باکتری در خاک افزایش یافته است. علت تفاوت نتایج این پژوهش در مقایسه با سایر مطالعات انجام شده در این زمینه به شرایط خاص حاکم بر پژوهش حاضر برمی‌گردد؛ چرا که در طرح حاضر مقدار رطوبت موجود در خاک بالا بود و به علت استفاده پیوسته از پساب و تأمین مواد غذایی برای باکتری‌های موجود در پساب، آن‌ها شروع به تقسیم و تکثیر کرده‌اند.

مناسب‌ترین حالت آبیاری برای کاهش تعداد باکتری در لایه مورد بررسی، دور یک روز و مدت آبیاری 4 ساعت بوده است. چرا که در این حالت مقدار باکتری نگهداشته شده در خاک نسبت به سایر تیمارها کمتر بوده است. هرچند احتمال آلوده شدن منابع آب زیرزمینی در این شیوه آبیاری زیاد است.

منابع

1- Abbasi F. 2007. Advanced Soil Physics. University of Tehran (in Persian).
2- Alinezhadian A., Mohammadi J., Karimi A., and Nikookhah F. 2013. Effect of municipal effluent irrigation on accumulation of indicator bacteria and some of heavy metal in soil and plant. Cellular and Molecular Researches (Iranian Journal of Biology). 26(4): 508-523.
3- Bekhit H.M., El-Kordy M.A., and Hassan A.E. 2009. Contaminant transport in groundwater in the presence of colloids and bacteria: Model development and verification. Journal of Contaminant Hydrology. 108(3):152-167.
4- Bradford S.A., Simunek J., and Walker S.L. 2006. Transport and straining of E. coli O157: H7 in saturated porous media. Water Resources Research, 42(12).
5- Carsel R.F., and Parrish R.S. 1988. Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics. Water Resour. Res. 24:755-769.
6- Champ D.R. 1986. Microbial mediation of radionulide transport. In: Molz, F.H., Mercer, J.W., Wilson, J.T. (Eds), Abstract of the AGU Chapman Conference on Microbial Processes in the Transport, Fate, and In-Situ

Treatment of Subsurface Contaminations, Snowbird, Utah. American Geophysical Union, Washington, DC, p. 17.
7- Crook J. 1998. Water reclamation and reuse criteria. In: Wastewater Reclamation and Reuse (Ed. Asano T.). Technomic Publishing, Lancaster. 627-703.
8- Cote C.M., Bristow K.L., Charlesworth P.B., Cook F.J., and Thorburn P.J. 2003. Analysis of soil wetting and solute transport in subsurface trickle irrigation. Irrigation Science. 22(3-4): 143-156.
9- Farrokhian F.A., Homaei M., Clumpp E., Kasteel R., and Satari M. 2012. Bacteria transport and deposition in calcareous soils under saturated flow condition. Journal of Water and Soil (Agricultural Science and Technology). 53: 58-68. (in Persian)
10- Farrokhian F.A., Homaei M., and Satari M. 2011. Quantitative study of microbial contaminant attachment and detachment in calcareous soil. Environmental Sciences. 8(1): 23-38. (in Persian with English abstract)
11- Farrokhian F.A. 2010. Modeling Microbial Contaminant Transport in Calcareous Soils under Saturated and unsaturated Conditions. (in Persian with English abstract)
12- Fontes D. E., Mills A. L., Hornberger G., and Herman J. S. 1991. Physical and chemical factors influencing transport of micro organisms through porous media. Appl Environ Microbiol. 57:2473-2481.
13- Gargiulo G., Bradford S., Šimunek J., Ustohal P., Vereecken H., and Klumpp E. 2008. Bacteria transport and deposition under unsaturated flow conditions: The Role of Water Content and Bacteria Surface Hydrophobicity. Vadose Zone J., 7: 406–419.
14- 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 & Technology. 41(4): 1265-1271.
15- Geohring L.D., Wright P.E., Steenhuis T.S., and Walter M.F. 1999. Fecal coliforms in tile drainage effluent. ASAE Paper No.992203. St. Joseph, MI: ASAE.
16- Gerba C.P., Wallis C., and Melnick J.L. 1975. Fate of wastewater bacteria and viruses in soil. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 101: 157-174.
17- Guber A.K., Shelton D.R., and Pachepsky Ya.A. 2005. Effect of manure on Esherichia coli attachment to soil. J. Environ. Qual. 34: 2086-2090.
18- Horan N. J. 2003. Faecal Indicator Organisms. The Handbook of Water and Wastewater Microbiology. 105-112.
19- Huysman F., and Verstraete W. 1993. Water-facilitated transport in porous media– evaluation of a model using laboratory observation. Water Resour. Res. 28: 915-923.
20- Jamieson R. C., Gordon R. J., Sharples K. E., Stratton G. W., and Madani A. 2002. Movement and persistence of fecal bacteria in agricultural soils and subsurface drainage water. Canadian Biosystems Engineering Journal. 44: 1.1-1.9.
21- Jiang S., Pang L., Buchan G.D., Šimunek J., Noonan M.J., and Close M.E. 2010. Modeling water flow and bacterial transport in undisturbed lysimeters under irrigations of dairy shed effluent and water using HYDRUS-1D. Water Research (Oxford). 44(4): 1050-1061.
22- Pang L., McLeod M., Aislabie J., Šimůnek J., Close M., and Hector R. 2008. Modeling transport of microbes in ten undisturbed soils under effluent irrigation. Vadose Zone Journal, 7(1), 97-111.
23- Pescod M. B. 1992. Wastewater treatment and use in agriculture–FAO Irrigation and Drainage. Paper 47. 125 p.
24- Rawls W.J., Brakensiek D.L., and Saxton K.E. 1982. Estimating soil water properties. Trans. ASAE, 25(5):1316-1320 and 1328.
25- Rose J. B., and Gerba C. P. 1991. Assessing potential health risks from viruses and parasites in reclaimed water in Arizona and Florida, USA. Water Sci. Tech., 23: 2091-2098.
26- Safadoust A., Mahboubi A. A., Mosaddeghi M. R., Gharabaghi B., Voroney P., Unc A., and Khodakaramian Gh. 2012. Significance of physical weathering of two-texturally different soils for the saturated transport of Escherichia coli and bromide. J. Environmental Management. 107: 147-158.
27- Schaap M.G., Leij F.J., and Van Genuchten M.Th. 2001. ROSETTA: A computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. J. Hydrol., 251: 163-176.
28- Schäfer A., Ustohal P., Harms H., Stauffer F., Dracos T., and Zehnder A. J. 1998. Transport of bacteria in unsaturated porous media. Journal of Contaminant Hydrology. 33(1): 149-169.
29- Simunek J., Jacques D., Twarakavi NK. C., and Van Genuchten M. Th. 2009. Selected HYDRUS modules for modeling subsurface flow and contaminant transport as influenced by biological processes at various scales. Biologia. 64(3): 465-469.
30- Travis M. J., Wiel-Shafran A., Weisbrod N., Adar E., and Gross A. 2010. Greywater reuse for irrigation: Effect on soil properties. Science of the Total Environment. 408: 2501-2508.
31- Tufenkji N. 2007. Modeling microbial transport in porous media: Traditional approaches and recent developments. Advances in Water Resources, 30(6), 1455-1469.

Journal of Water and Soil
Vol. 30, No. 6, Jan.-Feb. 2017, p. 1758-1772

نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد 30، شماره 6، بهمن –اسفند 1395، ص. 1772-1758

Modeling of Fecal Coliform Bacteria in Surface Drip Irrigationin Clay Loam Soil

F. Abbasi Teshniz[1*]- M. Kouchakzadeh[2]- F. Abbasi[3]

Received: 05-08-2014
Accepted: 01-08-2016

Introduction: Water for agriculture is one of the most important factors in arid and semi-arid areas and municipal wastewater treatment is an important resource for this purpose. Wastewaters even after treatment may contain many types of microorganisms that are pathogenic to humans and dangerous for theenvironment. Therefore, potential of transfer contaminations is a serious problem regarding use of treated wastewater for agriculture. Due to the risk of transfer contaminations through the use of wastewater, the study of transfer microbes in soil in recent decades has been of interest to researchers. Thereafter various irrigation techniques can be used associated with treated wastewater for agriculture. Accordingly, the present study was conducted on Fecal Coliform in the wastewater treatment in laboratory columns.

Materials and Methods: The present study was conducted in Agriculture Faculty of TarbiatModares University for 62 days in 2013. This study was conducted on Fecal Coliform in the wastewater treatment in laboratory columns, having 30 cm diameter and 60 cm height. They were irrigated using surface drip irrigation system (DI). Samples of the effluent and soil solutions were collected from the experimental columns after each irrigation events. Soil texture was clay-loam that was collected from south of Tehran wastewater treatment plant. Three modelsof one site sorbtion's model, attachment/detachment two kinetic site and attachment/detachment one kinetic site, were used for simulation of Fecal Coliform transport by inverse solution option of the HYDRUS-ID model. For calibration of the model and estimating the model input parameters, soil hydraulic and transport parameters were inversely estimated.Results represented that the HYDRUS-1D with reasonably accurately simulated the outlet flow. To simulatethe transfer of the bacteria in the soil, one site sorption model, two kinetic sites model (particle transport using attachment/detachment) and one kinetic site model were used.

Results and Discussion: The statistic including the root-mean-square error (RMSE), the sum of squares (SSQ), the coefficient of determination (R^2) were used to determine the accuracy of one site sorbtion's model, attachment/detachment two kinetic sites model and attachment/detachment one kinetic site model in soil column. In the simulation of bacterial transfer,one site sorption model had the best fitting on bacteria concentration measured during the experiment and was selected as the proper model for this study. Also the linear adsorptionisotherm was used for modeling. One site sorption model estimated solid-phase growth coefficient (μ_s) about sextuple more than liquid-phase. It showed that deposited cells had a higher division rate compared with the cell in liquid-phase. Due to thereversible adsorptionprocess, in all surveyed models, k_{det} values were higher than k_{att} values. After defining the parameters such as irrigation interval and time to the HYYDRUS-1D model, simulations were run for 25 irrigation events at depth of 30, 60 and 100 cm in soil profile. The calibrated model was used for surveying the effect of various irrigation intervals and irrigation times on bacterial transfer. The results showed that by increasing irrigation times, more bacteria leached out from the soil profile. Also by increasing irrigation intervals, more bacteria observed in the soil profile, due to favorable environmental conditions and food for the bacteria growth. According to the results, the best interval and irrigation times were one day and four hours, respectively. Also, the HYDRUS-1D was used to simulate water flow in soil columns. According to the observed results, it can be concluded the model is able to estimate outflow accurately.

Conclusion: In order to simulate water flow and transfer of Fecal Coliform bacteria in a soil column with a surface-drip irrigation system, the HYDRUS-1D model was used. The results showed the model simulated amount of out outflow well.In the simulation of bacterial transport three models including one site sorption model, attachment/detachment two kinetic site model and attachment/detachment one kinetic site model wasused. In simulation of bacterial transfer,one site sorption's modelwas selected as the best model because it hasthe lowest amount of RMSE and SSQ and the most amount of R^2. One site sorption's model estimated solid-

1 and 2- Master of Science and Associate Professor, Department of Irrigation and Drainage Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
(*- Corresponding Author Email: Foroogh.abbassi@modares.ac.ir)
3– Agricultural Engineering Research Institute (AERI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran

phase growth coefficient (μ_s) about sextuple more than liquid-phase. It showed that deposited cells had a higher division rate compared with the cell in liquid-phase. In surveying effect of various intervals and irrigation times, it was observed that the best interval and irrigation times were one day and four hours, respectively.

Keywords: HYDRUS-1D model, Inverse solution, Lysimeter, One site sorption model