

## حرکت باکتری *اشریشیا کولی* در ستون‌های خاک تحت شرایط جریان و دمای متفاوت

آزاده صفادوست<sup>۱\*</sup>، علی اکبر محبوبی<sup>۱</sup>، محمد رضا مصدقی<sup>۲</sup>، غلام خداکرمیان<sup>۳</sup> و علی حیدری<sup>۳</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۵/۳۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۲/۲۴)

### چکیده

حرکت باکتری *اشریشیا کولی* مقاوم به نالیدیکسیک اسید (*E. coli* NAR) تحت شرایط جریان اشباع و غیراشباع در دو دمای ۵ °C و ۲۰ °C در دو خاک لومرسی و لومشنی مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش‌های آبشویی در ستون‌های بزرگ بازسازی شده با هوادیدگی فیزیکی انجام شد. از دستگاه نفوذسنج مکشی برای برقراری شرایط جریان اشباع و غیراشباع ماندگار استفاده گردید. نمونه برداری از زه آب خروجی از سه عمق ۱۰، ۳۰ و ۴۵ سانتی متر در زمان‌های مشخص انجام شد. شرایط رطوبتی اشباع، دمای ۲۰ °C و خاک لومرسی سبب افزایش غلظت باکتری در زه آب خروجی شدند. ضریب پالایش و شاخص نسبی جذب در خاک لومشنی (میانگین شرایط جریان، دما و عمق خاک) به ترتیب ۳۲٪ و ۲۳٪ بیشتر از خاک لومرسی به دست آمد، که بیانگر توانایی بیشتر خاک لومشنی در پالایش باکتری به دلیل ساختمان ضعیف‌تر و منافذ ریزتر است. به عبارت دیگر باکتری‌ها در منافذ ریز خاک لومشنی به صورت فیزیکی حبس شده و گیر می‌افتند. با افزایش عمق خاک غلظت آلاینده نیز کمتر شد که نشان‌دهنده اثر خاک در پالایش آلاینده‌های میکروبی به عنوان یک فیلتر طبیعی است. کاهش دمای محیط شستشو سبب کاهش شدت جریان و در نتیجه افزایش پالایش باکتری (میانگین شرایط جریان، دما و عمق خاک) به میزان ۱۰۰٪ در خاک لومرسی و ۶۸٪ در خاک لومشنی شد.

واژه‌های کلیدی: باکتری *اشریشیا کولی* مقاوم به نالیدیکسیک اسید، خاک هوادیده، جریان ماندگار، ضریب پالایش، شاخص نسبی جذب

۱. به ترتیب دانشجوی دکتری و استاد خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

۲. دانشیار خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

۳. دانشیار و دانشجوی سابق کارشناسی ارشد گیاه‌پزشکی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

\*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: safadoust@gmail.com

## مقدمه

آنها در طول مسیر حرکتشان تا آب زیرزمینی محدود می‌شود (۱۰، ۱۶، ۲۱ و ۲۹).

توانایی خاک‌های دارای منافذ درشت در پالایش باکتری‌ها به علت سهولت عبور این میکروارگانیسم‌ها از منافذ بزرگ، کم است. در خاک‌های همگن، احتمال انتقال باکتری‌های کوچک، بیشتر از خاک‌های غیرهمگن است؛ در حالی که اگر عمده جریان آب از منافذ درشت صورت گیرد، منافذ ریز خاک از شرکت در انتقال جریان محروم می‌شوند و به این ترتیب انتقال باکتری‌های بزرگ در چنین خاک‌هایی میسر می‌شود. ذرات کوچک‌تر و ردیاب‌های واکنش‌ناپذیر (غیر فعال) مانند یون برمید قادرند همان‌گونه که در منافذ درشت حرکت می‌کنند از منافذ ریز نیز به آسانی انتقال یابند و در نتیجه زمان انتقال کمتری نیز خواهند داشت (۱۵).

خاک در شرایط غیراشباع از هدایت هیدرولیکی کمتری نسبت به شرایط اشباع برخوردار است. هدایت هیدرولیکی نه تنها تابعی از ویژگی‌های خاک است، بلکه تابعی از ویژگی‌های مایع عبورکننده از خاک نیز می‌باشد. هدایت هیدرولیکی خاک رابطه عکس با گرانروی سیال (آب) عبوری دارد. هم‌چنین گرانروی سیال تابعی از دمای آن سیال است. دمای آب اثر زیادی بر گرانروی آب دارد به گونه‌ای که گرانروی آب در دمای صفر درجه سانتی‌گراد هفت برابر مقدار آن در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. بنابراین هدایت هیدرولیکی خاک نیز تابعی از دمای آب خواهد بود. دمای پایین آب در اواخر پاییز در مقایسه با فصل بهار و تأثیر مستقیم دما بر گرانروی آب و در نهایت هدایت هیدرولیکی خاک جریان آب در خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهد. دانسته‌های مربوط به این موضوع مهم بسیار اندک است. بررسی نقش دما در حرکت باکتری‌ای کولای می‌تواند دانش ما را در پاسخ به سؤال که کوددهی در فصل سرد یا گرم سال، کدام‌یک با خطر آلودگی کمتر آب‌های زیرزمینی به باکتری‌های بیماری‌زا همراه است، افزایش دهد؛ تا بتوان با مدیریت متکی بر دانش، خطر آلودگی منابع آب و خاک را کاهش داد. وارنموند و کانوار (۳۲) با بررسی اثر زمان و

استفاده از کودهای حیوانی در کشاورزی پایدار جهت بهبود ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک اجتناب‌ناپذیر است. کودهای حیوانی به عنوان مواد به‌ساز ساختمان خاک و افزایش‌دهنده بارخیزی خاک به شمار می‌روند، اما چنانچه عوامل بیماری‌زای موجود در این مواد به آب آشامیدنی راه پیدا کنند، کاربرد آنها ممکن است باعث تهدید سلامت عمومی جانداران شود. هنگامی که کود روی خاک مصرف می‌شود، خاک به عنوان یک فیلتر (صافی) طبیعی در تصفیه آبی که از آن عبور می‌کند تا هنگامی که به سفره آب‌های زیر زمینی برسد، عمل می‌کند (۲۸).

باکتری‌ها یکی از فراوان‌ترین ریزجانداران موجود در کودهای دامی هستند (۲۸). ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک شامل بافت، ساختمان، میزان مواد آلی، چگالی ظاهری، تخلخل، توزیع اندازه منافذ، هدایت هیدرولیکی، قابلیت انبساط و انقباض، پایداری خاکدانه‌ها، میزان رطوبت، دما، ظرفیت تبادل کاتیونی و شوری، توانایی باکتری‌ها را در عبور از منطقه غیراشباع خاک تحت تأثیر قرار می‌دهد. عوامل خارجی می‌توانند این ویژگی‌ها را در طی زمان تحت تأثیر قرار دهند. این عوامل عبارت‌اند از اقلیم (آب و هوا)، جانوران و گیاهان، توپوگرافی (پستی و بلندی)، مواد مادری و عملیات کشاورزی هستند. اگر چه میزان آیشویی باکتری تا اندازه‌ای تحت تأثیر ویژگی‌های باکتری و خاک قرار می‌گیرد ولی ظاهراً خصوصیات مانند ساختمان، بافت، توزیع و پیوستگی منافذ درشت (مسیرهای ترجیحی) و میزان رطوبت اولیه خاک از اهمیت بیشتری برخوردار می‌باشند (۴، ۹، ۱۶ و ۲۶).

بسیاری از پژوهش‌ها به طور واضح نشان داده‌اند که انتقال آلاینده‌های شیمیایی، ویروس‌ها و باکتری‌ها در محیط متخلخل تحت تأثیر مسیرهای ترجیحی قرار می‌گیرد. احتمالاً مسیرهای ترجیحی خطر آلودگی محیط را افزایش می‌دهند؛ به گونه‌ای که این مسیرها باعث می‌شوند که مواد انتقالی با پیکره خاک تماس کمتری داشته و در نتیجه احتمال جذب و یا تخریب (نابودی)

برداشته شد. بافت خاک به روش هیدرومتر (۸)، مقدار ماده آلی به روش اکسیداسیون تر (۳۱) و مقدار کربنات کلسیم به روش تیتراسیون برگشتی با NaOH (۲۴) اندازه‌گیری شدند.

### ب) روش آماده‌سازی ستون‌های خاک

هر ستون اصلی خاک با ۵ ستون کوچک‌تر که دارای سطح مقطعی برابر با ستون اصلی و به ترتیب از بالا به پایین دارای ارتفاع ۱۰، ۱۰، ۱۰، ۱۰ و ۵ سانتی‌متر بودند، پر شد. نمونه‌های کوچک‌تر طوری برداشت شدند که کمترین تخریب در خاکدانه‌ها صورت گیرد (نمونه‌برداری دست‌نخورده). نمونه‌های برداشت‌شده به آزمایشگاه منتقل شده و چگالی ظاهری مرطوب آنها تعیین شد تا در بازسازی ستون‌های اصلی مورد استفاده قرار گیرد (چگالی ظاهری  $1/36 \text{ Mg m}^{-3}$  برای خاک لوم‌رسی و  $1/55 \text{ Mg m}^{-3}$  برای خاک لوم‌شنی). سپس خاک هر یک از ستون‌های کوچک از الک ۸ میلی‌متری (برای جداکردن سنگ‌های درشت و شکستن کلوخه‌ها) عبور داده شده و به ترتیب عمق از پایین به بالا در ستون‌های اصلی به آهستگی و با مختصر تکان ریخته شد تا ستون خاک پر گردید. به منظور جلوگیری از ریزش خاک از انتهای ستون‌های اصلی، سطح پایینی ستون خاک توسط یک توری محکم بسته شد. پیش از پرکردن ستون‌های خاک، دو نمونه‌گیر به منظور نمونه‌گیری از محلول خاک در عمق‌های ۱۵ و ۳۰ سانتی‌متری به طور افقی و از جداره ستون تعبیه شدند.

سپس ستون‌های خاک در آخر فصل پاییز به منظور انجام هواپدگی فیزیکی به مدت ۹ ماه در شرایط طبیعی تحت تأثیر فرایندهای تر و خشک شدن و یخ و ذوب شدن در مزرعه (مکان نمونه‌برداری) قرار گرفتند تا آماده آزمایش‌های آبشویی شوند. در کل ۳۲ ستون بازسازی شده (به روش فوق) آماده شد.

### ج) آزمایش‌های آبشویی

در این پژوهش از دستگاه نفوذسنج مکشی با قطر دیسک ۲۰ سانتی‌متر برای انجام آزمایش‌های آبشویی در شرایط جریان

میزان کاربرد کود دامی بر آبشویی باکتری‌ها به این نتیجه رسیدند که شدت آلودگی زه‌آب ستون‌های بهاره نسبت به ستون‌های پاییزه بیشتر بود.

ساختمان خاک به عنوان یک ویژگی پویا، می‌تواند تحت تأثیر دوره‌های تر و خشک شدن قرار گیرد؛ دوره‌های تر و خشک شدن می‌تواند مقاومت خاک، چسبندگی ذرات، اندازه خاکدانه‌ها و مقاومت مکانیکی خاکدانه‌ها را تحت تأثیر قرار دهد (۱۹ و ۲۷).

نظر به این که کاربرد نادرست کود حیوانی به عنوان منبع آلوده‌کننده مستقیم محصولات کشاورزی، منابع آبی، جانوران یا انسان‌ها مشخص شده است (۷)، نگرانی در مورد آلودگی منابع آب سطحی و زیر زمینی به ویژه در طی دهه‌های اخیر بیشتر شده و مورد توجه قرار گرفته است.

آگاهی از چگونگی حرکت باکتری / شریشیا کولی در ستون‌های خاک بازسازی‌شده و بررسی تأثیر دما بر چگونگی حرکت آن، ما را در مدیریت استفاده از کودهای حیوانی یاری خواهد کرد. از این رو، این پژوهش با هدف بررسی حرکت باکتری / شریشیا کولی مقاوم به نالیدیکسیک اسید در ستون‌های خاک بازسازی‌شده انجام گرفت.

### مواد و روش‌ها

مراحل انجام این پژوهش در ۴ بند آورده شده است:

#### الف) نمونه‌برداری از خاک و انجام آزمایش‌های اولیه

این پژوهش روی نمونه‌های بازسازی‌شده دو نوع خاک با بافت‌های لوم شنی و لوم رسی در شرایط جریان اشباع و غیراشباع انجام شد. ستون‌های خاک دارای ۲۴ سانتی‌متر قطر درونی و ۴۵ سانتی‌متر ارتفاع بودند. نمونه‌برداری در زمان مناسب از نظر رطوبت خاک از زمین‌های واقع در استان همدان، تحت کشت گندم و پس از برداشت محصول انجام گرفت.

برای اندازه‌گیری برخی ویژگی‌های خاک، نمونه‌های دست‌خورده از لایه‌های ۰-۱۵، ۱۵-۳۰ و ۳۰-۴۵ سانتی‌متری

#### د) تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها

طرح آماری به کار رفته در این پژوهش، آزمایش فاکتوریل با سه فاکتور در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در چهار تکرار بود. نوع خاک به عنوان فاکتور اول (لوم شنی و لوم رسی)، شرایط جریان به عنوان فاکتور دوم (جریان اشباع و غیراشباع) و دما به عنوان فاکتور سوم (۵ درجه سانتی‌گراد و ۲۰ درجه سانتی‌گراد) در نظر گرفته شد. متغیرهای مورد بررسی عبارت از: ضریب پالایش، ضریب پالایش تصحیح‌شده، شاخص نسبی جذب باکتری و شاخص نسبی جذب باکتری تصحیح‌شده بودند. تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS و مقایسه میانگین‌ها به روش LSD انجام گرفت.

پس از اعمال تیمارهای مختلف و تعیین غلظت باکتری در زه‌آب خروجی (C)، منحنی رخنه (Breakthrough curve) (BTC) به صورت لگاریتم غلظت خروجی در برابر زمان با استفاده از نرم افزار Excel رسم شد. ضریب پالایش باکتری بر اساس معادله ماتس و همکاران (۱۴) محاسبه شد:

$$\lambda_f = \ln\left(\frac{C_{0(av)}}{C_{b(av)} - C_{b(av)}}\right) \times \frac{1}{Z} \quad [1]$$

که در این رابطه:  $\lambda_f$  ضریب پالایش باکتری در لایه مورد نظر ( $m^{-1}$ )،  $C_{0(av)}$  میانگین غلظت ورودی باکتری به سطح خاک یا سطح لایه مورد نظر ( $CFU \text{ mL}^{-1}$ )،  $C_{b(av)}$  میانگین غلظت خروجی باکتری از لایه مورد نظر ( $CFU \text{ mL}^{-1}$ )،  $C_{b(av)}$  میانگین غلظت باکتری بومی خاک ( $CFU \text{ mL}^{-1}$ ) که با توجه به وجود نالیدیکسیک اسید در محیط کشت مقدار آن برابر با صفر بود و  $Z$  عمق نمونه‌برداری (m) هستند. برای محاسبه  $C_{0(av)}$  و  $C_{b(av)}$  سطح زیر منحنی غلظت ورودی و منحنی رخنه باکتری بر حجم آب خروجی در طول زمان آبشویی تقسیم شد.

شاخص نسبی جذب باکتری با استفاده از رابطه ۲ محاسبه شد که در برآورد میزان باکتری پالایش‌یافته در طول زمان آبشویی خاک، مورد استفاده قرار گرفت:

اشباع و غیراشباع استفاده شد. جهت برقراری جریان اشباع و غیراشباع، دستگاه به ترتیب در مکش‌های صفر و ۵ سانتی‌متر تنظیم گردید. برخی از ویژگی‌های جریان اشباع و غیراشباع در جدول ۱ آورده شده است.

منبع آلودگی در این پژوهش یک سوسپانسیون دارای  $3/5 \times 10^8 \text{ CFU mL}^{-1}$  باکتری /شریشیاکولی مقاوم به نالیدیکسیک اسید (*E. coli* NAR) بود.

پس از برقراری جریان ماندگار در شرایط جریان موردنظر (اشباع یا غیراشباع)، نمونه شاهد برای اطمینان از فقدان باکتری مورد آزمایش در خاک ستون‌های آزمایش، برداشته شد. جهت انجام آزمایش آبشویی، با برداشتن دیسک نفوذسنج مکشی از روی سطح ستون خاک، سوسپانسیون آماده‌شده به سطح بالایی ستون‌های خاک پاشیده شد. شستشوی ستون‌های خاک به مدت ۲۴ ساعت ادامه یافت و نمونه‌گیری از محلول خاک و زه‌آب در زمان‌های ۷، ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰، ۱۵۰، ۱۸۰، ۲۴۰، ۳۰۰، ۳۶۰، ۴۸۰، ۶۰۰، ۷۲۰، ۸۴۰، ۹۶۰، ۱۰۸۰، ۱۲۰۰ و ۱۴۴۰ دقیقه پس از پاشیدن سوسپانسیون روی خاک ستون‌های آزمایشی به کمک پمپ مکش انجام شد.

سپس غلظت باکتری *E. coli* (C)، در محلول خروجی بر حسب واحد  $CFU \text{ mL}^{-1}$  اندازه‌گیری شد. برای مشخص شدن غلظت باکتری‌ها، نمونه‌های برداشت‌شده در صورت لزوم رقیق شده و حجم مشخصی از آنها برداشته شد. کشت باکتری‌ها به روش پنخس در پلیت و روی محیط کشت اختصاصی اتوزین متیلن بلو (EMB) همراه با نالیدیکسیک اسید انجام گرفت. تعداد کلونی باکتری رشد کرده روی محیط کشت به روش شمارش زنده (شمارش پلیت)، شمارش گردید.

آزمایش‌های آبشویی در دو دمای ۵ و ۲۰ درجه سانتی‌گراد در درون اتاقکی که دمای آن به طور دقیق کنترل شده بود، انجام گرفت. به گونه‌ای که دمای آب مورد استفاده برای شستشو و ستون خاک، دارای دمای مورد نظر در تیمار آزمایشی بودند.

جدول ۱. برخی ویژگی‌های جریان اشباع و غیراشباع

خاک لوم رسی		خاک لوم شنی		ویژگی	
۵ °C	۲۰ °C	۵ °C	۲۰ °C		
<b>جریان اشباع</b>					
۰/۴۷	۰/۴۷	۰/۳۷	۰/۳۷	(cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	رطوبت حجمی خاک
۲/۷۲	۳/۴۶	۱/۶۹	۱/۸۷	(cm h <sup>-1</sup> )	شدت جریان ماندگار
۶۶۸۸ /۲	۶۶۸۸ /۲	۵۲۷۵/۲	۵۲۷۵/۲	(cm <sup>3</sup> )	حجم آب منفذی
<b>جریان غیراشباع</b>					
۰/۴۲	۰/۴۲	۰/۳۲	۰/۳۲	(cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	رطوبت حجمی خاک
۲/۲۸	۲/۷۳	۱/۳۹	۱/۵۴	(cm h <sup>-1</sup> )	شدت جریان ماندگار
۵۹۸۱/۷	۵۹۸۱/۷	۴۵۸۷/۵	۴۵۸۷/۵	(cm <sup>3</sup> )	حجم آب منفذی

باکتری‌ها هستند، در انتخاب مکان نمونه‌برداری سعی گردید تا حد امکان ویژگی‌های ذکر شده در نیم‌رخ خاک یکسان باشند و تنها بافت خاک تفاوت چشم‌گیر داشته باشد تا بتوان از اثر آنها بر حرکت باکتری چشم‌پوشی کرد.

در جدول ۳ تجزیه واریانس اثر بافت خاک، شرایط جریان، دما و اثر متقابل دو به دو آنها در سه لایه مختلف خاک بر  $\lambda_f$  و  $\lambda_{corrected}$  و  $S_{Rcorrected}$  آورده شده است. لازم به ذکر است که از آوردن نتایج اثر متقابل سه‌گانه، به خاطر معنی‌دار نبودن در هیچ کدام از لایه‌ها، خودداری شد.

در لایه‌های اول و دوم تنها اثر بافت خاک بر  $\lambda_f$  معنی‌دار بود ( $P < 0/05$ ). در لایه دوم تنها اثر شرایط جریان ( $P < 0/01$ ) در لایه سوم اثر بافت خاک و شرایط جریان ( $P < 0/01$ ) و برهم‌کنش آنها ( $P < 0/05$ ) معنی‌دار شدند. نتایج تجزیه واریانس نشان می‌دهد که  $\lambda_{corrected}$  در لایه اول تحت تأثیر شرایط جریان ( $P < 0/01$ ) قرار گرفت. هم‌چنین در لایه دوم و سوم اثر تیمارهای بافت خاک ( $P < 0/01$ )، دما ( $P < 0/01$ )، برهم‌کنش بافت خاک و شرایط جریان ( $P < 0/01$ ) و دما ( $P < 0/01$ ) بر  $\lambda_{corrected}$  معنی‌دار بود.

همان‌گونه که مشاهده می‌شود در لایه اول به جز دما اثر متقابل دما و شرایط جریان، سایر تیمارها دارای اثر معنی‌داری

$$SR = \frac{\int_0^{V_{max}} [C_0 - (C - C_b)] dV}{\int_0^{V_{max}} C_0 dV} \quad [2]$$

که در این رابطه:  $S_R$  شاخص نسبی جذب باکتری و  $V_{max}$  حجم تجمعی آب خروجی در طول آزمایش آبتیوی (mL) می‌باشد. برای افزایش دقت محاسبه، سطح بین منحنی ورودی ( $C_0$ ) و منحنی رخنه ( $C$ ) بر سطح زیر منحنی ورودی تقسیم شد. برای اندازه‌گیری سطح زیر منحنی‌های مذکور از روش شبیه‌سازی الگوریتم در برنامه Matlab استفاده شد.

برای بررسی دقیق پالایش در لایه‌های دوم و سوم، غلظت ورودی ( $C_0$ ) هر یک از لایه‌های دوم و سوم، غلظت خروجی لایه بالایی در نظر گرفته شد. بنابراین بر اساس تصحیح  $C_0$  برای عمق‌های دوم و سوم، پارامترهای ضریب پالایش باکتری تصحیح شده ( $\lambda_{corrected}$ ) و شاخص نسبی جذب تصحیح شده ( $S_{Rcorrected}$ ) نیز محاسبه شد.

## نتایج و بحث

برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد بررسی در جدول ۲ آورده شده است. از آنجا که میزان رس، ماده آلی و کربنات کلسیم از ویژگی‌های مؤثر در جذب و نگهداری

جدول ۲. برخی از ویژگی‌های خاک‌های مورد بررسی

کربنات کلسیم	ماده آلی	رس	سیلت	شن	لایه (cm)	بافت خاک
		%				
۱/۱۲	۰/۵۳	۲۶/۸	۲۹/۷	۴۳/۵	۰-۱۵	لومرسی
۰/۹۵	۰/۵۳	۲۸/۹	۳۱/۱	۴۰/۰	۱۵-۳۰	
۰/۸۵	۰/۵۵	۲۸/۳	۳۲/۲	۳۹/۵	۳۰-۴۵	
۰/۸۹	۰/۴۲	۱۳/۵	۸/۳	۷۸/۲	۰-۱۵	لومشنی
۰/۸۲	۰/۴۴	۱۵/۸	۹/۵	۷۴/۷	۱۵-۳۰	
۰/۸۰	۰/۵۰	۱۷/۹	۹/۶	۷۲/۵	۳۰-۴۵	

جدول ۳. تجزیه واریانس اثر تیمارهای آزمایشی بر ضریب پالایش ( $\lambda_f$ )، ضریب پالایش تصحیح شده ( $\lambda_{corrected}$ )، شاخص نسبی جذب ( $S_R$ ) و شاخص نسبی جذب تصحیح شده ( $S_{Rcorrected}$ ) باکتری اشریشیا کولی<sup>۱</sup>

نسبت F				درجه آزادی	منبع تغییر
$S_{Rcorrected}$	$S_R$	$\lambda_{corrected}$	$\lambda_f$		
لایه اول					
۹/۷۲**	۹/۷۲**	۰/۹۷	۰/۹۷	۱	بافت خاک (A)
۱۶/۳۳**	۱۶/۳۳**	۹/۷۱**	۹/۷۱**	۱	شرایط جریان (B)
۸/۳۳	۸/۳۳	۲/۴۷	۲/۴۷	۱	دما (C)
۱۵/۵۸**	۱۵/۵۸**	۲/۵۲	۲/۵۲	۳	A×B
۸/۲۷*	۸/۲۷*	۰/۹۵	۰/۹۵	۲	A×C
۰/۱۹	۰/۱۹	۰/۱۷	۰/۱۷	۱	B×C
لایه دوم					
۱۹/۳۰**	۷/۱۰*	۱۲/۶۸**	۱/۳۱	۱	بافت خاک (A)
۱۰/۲۵*	۱۰/۴۱**	۲/۶۷	۹/۶۰**	۱	شرایط جریان (B)
۴/۶۶	۱۳/۳۰**	۱۰/۹۹**	۰/۵۸	۱	دما (C)
۲۱/۰۱**	۴/۳۵*	۴/۶۲*	۲/۴۳	۳	A×B
۴/۴۳*	۴/۹۳**	۴/۹۴*	۰/۲۰	۲	A×C
۰/۰۱	۰/۳۶	۱/۴۲	۰/۰۱	۱	B×C
لایه سوم					
۵/۹۵*	۱۴/۵۹**	۲۳/۲۴**	۱۴/۲۲**	۱	بافت خاک (A)
۳/۳۹*	۲۳/۹۱**	۲/۶۴	۱۶/۶۸**	۱	شرایط جریان (B)
۱/۳۴	۱۰/۳۰**	۶۸/۵۵**	۲/۳۴	۱	دما (C)
۲/۵۰	۱۲/۵۸**	۱۳/۰۰**	۷/۱۰*	۳	A×B
۰/۴۹	۴/۹۴*	۵۳/۷۳**	۰/۹۲	۲	A×C
۰/۰۰	۰/۰۲	۲/۸۰	۰/۰۱	۱	B×C

<sup>۱</sup> \*\* و \* به ترتیب نشان‌دهنده تأثیر معنی‌دار در سطوح آماری ۱ و ۵ درصد هستند.

مصدقی و همکاران (۱۷) هم‌خوانی دارد. آنها نیز دریافتند که وجود ساختمان بهتر و جریان‌های ترجیحی در خاک‌های ریزبافت سبب افزایش عبور باکتری از این خاک‌ها نسبت به خاک‌های درشت‌بافت گردید.

کاهش دما در هر سه لایه سبب افزایش  $\lambda_f$  گردید (جدول ۴)؛ به گونه‌ای که در هر سه لایه مقدار  $\lambda_f$  در دمای  $5^\circ\text{C}$  بیشتر از  $20^\circ\text{C}$  بود. دلیل این امر را می‌توان اثر معکوس دما بر گرانروی سیال عبوری از خاک دانست. در واقع کاهش دما باعث افزایش گرانروی آب شده و از آنجا که هدایت هیدرولیکی خاک با گرانروی سیال رابطه معکوس دارد، سرعت جریان آب نیز کاهش یافته و در نتیجه باکتری‌ها امکان تماس بیشتری با سطوح جذب‌کننده داشته‌اند. بنابراین کاهش دمای آب و شرایط انجام آزمایش در دمای  $5^\circ\text{C}$  (میانگین تیمارهای بافت خاک و شرایط جریان)، سبب افزایش  $\lambda_f$  تا  $1/63$  برابر در لایه اول،  $2/00$  برابر در لایه دوم و  $1/35$  برابر در لایه سوم نسبت به دمای  $20^\circ\text{C}$  گردید.

سپنیدر و دوتسچ (۲۵) نیز افزایش ۵ تا ۷ برابری سرعت انتقال باکتری‌های را در نتیجه افزایش دمای محیط از  $10^\circ\text{C}$  به  $50^\circ\text{C}$  گزارش کردند. هم‌چنین چو و همکاران (۵) افزایش ۳ برابری هدایت هیدرولیکی خاک را در نتیجه افزایش دما از  $20^\circ\text{C}$  به  $80^\circ\text{C}$  گزارش کردند.

همان‌گونه که انتظار می‌رفت میزان  $\lambda_f$  در شرایط غیراشباع بزرگتر از مقدار آن در شرایط اشباع بود. در شرایط غیراشباع به علت سرعت کمتر آب در منافذ خاک و تجمع باکتری‌ها در سطوح مشترک آب-هوا، باکتری‌ها گرد هم آمده و اجتماع باکتریایی پدید می‌آورند که سبب گرفتادن آنها در منافذ می‌شود. هم‌چنین این مجموعه سبب بسته‌شدن مسیر حرکت باکتری‌های دیگر می‌شود که در نتیجه باکتری بیشتری پالایش می‌شود.

پاولسون و میلز (۲۰) نیز با بررسی حرکت باکتری /شریشیا کولی در ستون‌های شنی در شرایط اشباع و غیراشباع گزارش کردند که میزان باکتری عبوری در شرایط غیراشباع

بر  $S_R$  بودند. اثر دما، شرایط و اثر متقابل جریان و دما و برهم‌کنش سه تیمار بر  $S_R$  معنی‌دار نشد. ولی در لایه‌های دوم و سوم جز آثار متقابل شرایط جریان و دما و سه تیمار، اثر سایر تیمارها و برهم‌کنش آنها بر  $S_R$  معنی‌دار شدند. هم‌چنین جدول ۳ نشان می‌دهد که در لایه اول و دوم به جز دما و اثر متقابل شرایط جریان و دما، اثر سایر تیمارها و اثر متقابل آنها بر  $S_{Rcorrected}$  معنی‌دار بودند. در حالی که در لایه سوم تنها بافت و شرایط ( $P < 0/01$ ) جریان دارای اثر معنی‌داری بر  $S_{Rcorrected}$  بودند.

### اثر بافت خاک، شرایط جریان و دما بر ضریب پالایش ( $\lambda_f$ ) و ضریب پالایش تصحیح شده ( $\lambda_{fcorrected}$ )

ضریب پالایش بیانگر توانایی محیط متخلخل خاک در جذب شیمیایی باکتری‌ها روی سطوح ذرات و گرفتادن آنها در منافذ ریز است. به طور کلی در هر سه لایه، میانگین  $\lambda_f$  در خاک لوم شنی بیشتر از خاک لوم رسی بود (جدول ۴)، به گونه‌ای که در خاک لوم شنی  $\lambda_f$  (میانگین تیمارهای دما و شرایط جریان)  $1/17$ ،  $42\%$  و  $38\%$  بیشتر از  $\lambda_f$  در خاک لوم رسی به ترتیب در لایه‌های اول، دوم و سوم بود. در این پژوهش به علت تشکیل ساختمان خاک و بهبود آن در خاک لوم رسی در حین فرایندهای هوادیدگی فیزیکی، درز و ترک‌هایی ایجاد شده که باعث افزایش سرعت جریان آب و احتمالاً جریان ترجیحی شده است. در این خاک‌ها به علت تشکیل منافذ بزرگ با پیوستگی زیاد، سرعت جریان آب نیز افزایش یافته و در نهایت با وجود زیادبودن میزان سطوح جذب‌کننده و منافذ ریز، پالایش باکتری کمتر انجام شده است.

نتایج به‌دست‌آمده نشان‌دهنده نقش مهم بافت در پیدایش ساختمان خاک است. چنین انتظار می‌رفت که در خاک‌های دارای ذرات کوچک‌تر، پالایش باکتری بیشتر انجام گیرد ( $30^\circ$ )؛ در حالی که تشکیل ساختمان در خاک‌های ریزبافت می‌تواند حتی باعث سرعت بخشیدن به حرکت آلاینده‌ها در این خاک‌ها شود. این نتایج با یافته‌های زندسلیمی (۱)، آنک و گاس ( $30^\circ$ ) و

جدول ۴. مقایسه میانگین اثر بافت خاک، شرایط جریان و دما بر ضریب پالایش ( $\lambda_f$ ) و ضریب پالایش

تصحیح شده ( $\lambda_{corrected}$ ) باکتری اشریشیا کولی<sup>۱</sup>

شرایط جریان				دما (°C)	بافت خاک
غیراشباع	اشباع	غیراشباع	اشباع		
$\lambda_{corrected} (m^{-1})$		$\lambda_f (m^{-1})$			
<b>لایه اول</b>					
۲/۲۰ <sup>ab</sup> (±۰/۹۵)	۱/۸۷ <sup>ab</sup> (±۰/۴۴)	۲/۲۰ <sup>ab</sup> (±۰/۹۵)	۱/۸۷ <sup>ab</sup> (±۰/۴۴)	۵	لومرسی
۱/۳۷ <sup>b</sup> (±۰/۳۹)	۱/۱۱ <sup>bc</sup> (±۰/۳۷)	۱/۳۷ <sup>b</sup> (±۰/۳۹)	۱/۱۱ <sup>bc</sup> (±۰/۳۷)	۲۰	لومرسی
۲/۷۵ <sup>a</sup> (±۰/۱۵)	۱/۹۶ <sup>ab</sup> (±۰/۵۱)	۲/۷۵ <sup>a</sup> (±۰/۱۵)	۱/۹۶ <sup>ab</sup> (±۰/۵۱)	۵	لومشنی
۱/۶۲ <sup>b</sup> (±۰/۴۵)	۱/۲۹ <sup>bc</sup> (±۰/۱۱)	۱/۶۲ <sup>b</sup> (±۰/۴۵)	۱/۲۹ <sup>bc</sup> (±۰/۱۱)	۲۰	لومشنی
<b>لایه دوم</b>					
۴/۴۳ <sup>abc</sup> (±۰/۳۴)	۲/۲۵ <sup>c</sup> (±۰/۰۹)	۲/۹۴ <sup>a</sup> (±۰/۸۲)	۲/۵۱ <sup>a</sup> (±۰/۶۹)	۵	لومرسی
۳/۵۷ <sup>abc</sup> (±۰/۴۴)	۱/۳۲ <sup>c</sup> (±۰/۴۴)	۱/۴۸ <sup>a</sup> (±۰/۴۳)	۱/۱۰ <sup>a</sup> (±۰/۲۱)	۲۰	لومرسی
۶/۰۶ <sup>a</sup> (±۱/۰۶)	۵/۵۷ <sup>ab</sup> (±۱/۵۳)	۳/۴۱ <sup>a</sup> (±۱/۲۳)	۳/۶۰ <sup>a</sup> (±۰/۶۱)	۵	لومشنی
۶/۴۳ <sup>a</sup> (±۱/۴۹)	۲/۷۵ <sup>bc</sup> (±۰/۷۲)	۱/۹۵ <sup>a</sup> (±۱/۲۱)	۱/۷۱ <sup>a</sup> (±۰/۵۵)	۲۰	لومشنی
<b>لایه سوم</b>					
۵/۹۱ <sup>b</sup> (±۱/۲۰)	۲/۴۹ <sup>c</sup> (±۰/۶۱)	۳/۱۵ <sup>abc</sup> (±۰/۷۳)	۲/۷۷ <sup>abc</sup> (±۰/۲۱)	۵	لومرسی
۵/۵۱ <sup>b</sup> (±۰/۲۱)	۱/۴۶ <sup>c</sup> (±۰/۴۴)	۱/۴۹ <sup>c</sup> (±۰/۲۷)	۱/۱۲ <sup>c</sup> (±۰/۳۷)	۲۰	لومرسی
۹/۴۷ <sup>a</sup> (±۰/۲۹)	۵/۰۲ <sup>b</sup> (±۰/۳۵)	۴/۸۱ <sup>a</sup> (±۱/۲۵)	۴/۰۷ <sup>ab</sup> (±۰/۵۱)	۵	لومشنی
۹/۵۸ <sup>a</sup> (±۱/۰۸)	۲/۴۶ <sup>c</sup> (±۰/۲۴)	۳/۳۱ <sup>abc</sup> (±۰/۴۹)	۲/۳۶ <sup>bc</sup> (±۰/۷۲)	۲۰	لومشنی

۱. برای هر ویژگی اندازه‌گیری شده در هر لایه، میانگین‌هایی که دارای حداقل یک حرف مشترک هستند از نظر آماری در سطح ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.

در مقایسه  $\lambda_f$  با  $\lambda_{corrected}$  مشاهده می‌شود که با تصحیح غلظت ورودی در لایه‌های دوم و سوم، نقش لایه‌های دوم و سوم در پالایش باکتری بیشتر از لایه اول است. در واقع وجود منافذ درشت‌تر و پیوستگی بیشتر آنها در لایه اول، نقش این لایه را در پالایش باکتری کم کرده و باعث کم شدن مقادیر  $\lambda_f$  در لایه اول شده است. این نتایج مشابه با نتایج مصدقی و همکاران (۱۸) می‌باشد. آنها نیز کمترین میزان پالایش باکتری را در لایه اول خاک و در شرایط اشباع مشاهده کردند.

کمتر بود که نشان‌دهنده پالایش بیشتر باکتری در آن شرایط جریان است. هم‌چنین این نتایج با یافته‌های زندسلیمی (۱)، صحرایی (۲) و فرهنگ (۳) هم‌خوانی دارد. روند تغییرات  $\lambda_{corrected}$  مشابه روند تغییرهای  $\lambda_f$  بود (جدول ۴)؛ به گونه‌ای که در هر سه لایه  $\lambda_{corrected}$  در خاک لومرسی (میانگین شرایط جریان و دما) کمتر از خاک لومشنی، هم‌چنین در شرایط اشباع (میانگین بافت خاک و دما) کمتر از شرایط غیراشباع و نیز در دمای ۲۰ °C (میانگین بافت خاک و شرایط جریان) کمتر از دمای ۵ °C بود.



جدول ۵. مقایسه میانگین اثر بافت خاک، شرایط جریان و دما بر شاخص نسبی جذب ( $S_R$ ) و شاخص نسبی جذب تصحیح شده ( $S_{Rcorrected}$ ) باکتری اشریشیا کولی<sup>۱</sup>

شرایط جریان				دما (°C)	بافت خاک
غیراشباع	اشباع	غیراشباع	اشباع		
$S_{Rcorrected}$		$S_R$			
<b>لایه اول</b>					
۰/۳۴ <sup>ab</sup> (±۰/۰۲)	۰/۲۲ <sup>cd</sup> (±۰/۰۴)	۰/۳۴ <sup>ab</sup> (±۰/۰۲)	۰/۲۲ <sup>cd</sup> (±۰/۰۴)	۵	لومرسی
۰/۲۷ <sup>bcd</sup> (±۰/۰۲)	۰/۲۰ <sup>d</sup> (±۰/۰۳)	۰/۲۷ <sup>bcd</sup> (±۰/۰۲)	۰/۲۰ <sup>d</sup> (±۰/۰۳)	۲۰	لومرسی
۰/۴۰ <sup>a</sup> (±۰/۰۳)	۰/۳۸ <sup>a</sup> (±۰/۰۱)	۰/۴۰ <sup>a</sup> (±۰/۰۳)	۰/۳۸ <sup>a</sup> (±۰/۰۱)	۵	لومشنی
۰/۲۸ <sup>bc</sup> (±۰/۰۲)	۰/۲۴ <sup>cd</sup> (±۰/۰۱)	۰/۲۸ <sup>bc</sup> (±۰/۰۲)	۰/۲۴ <sup>cd</sup> (±۰/۰۱)	۲۰	لومشنی
<b>لایه دوم</b>					
۰/۳۵ <sup>cd</sup> (±۰/۰۴)	۰/۳۱ <sup>cd</sup> (±۰/۰۱)	۰/۴۴ <sup>ab</sup> (±۰/۰۲)	۰/۲۶ <sup>bc</sup> (±۰/۰۴)	۵	لومرسی
۰/۳۴ <sup>cd</sup> (±۰/۰۵)	۰/۲۸ <sup>d</sup> (±۰/۰۲)	۰/۳۱ <sup>bc</sup> (±۰/۰۲)	۰/۲۰ <sup>c</sup> (±۰/۰۴)	۲۰	لومرسی
۰/۶۲ <sup>a</sup> (±۰/۰۶)	۰/۵۱ <sup>ab</sup> (±۰/۰۳)	۰/۵۳ <sup>a</sup> (±۰/۰۳)	۰/۴۰ <sup>ab</sup> (±۰/۱۰)	۵	لومشنی
۰/۴۱ <sup>bc</sup> (±۰/۰۲)	۰/۳۳ <sup>cd</sup> (±۰/۰۳)	۰/۳۸ <sup>abc</sup> (±۰/۱۰)	۰/۲۸ <sup>bc</sup> (±۰/۰۶)	۲۰	لومشنی
<b>لایه سوم</b>					
۰/۴۹ <sup>a</sup> (±۰/۰۵)	۰/۴۱ <sup>a</sup> (±۰/۱۰)	۰/۴۵ <sup>b</sup> (±۰/۷۳)	۰/۳۹ <sup>b</sup> (±۰/۲۱)	۵	لومرسی
۰/۴۳ <sup>a</sup> (±۰/۰۲۱)	۰/۳۷ <sup>a</sup> (±۰/۰۴۴)	۰/۳۸ <sup>b</sup> (±۰/۰۲۷)	۰/۲۱ <sup>c</sup> (±۰/۰۳۷)	۲۰	لومرسی
۰/۶۸ <sup>a</sup> (±۰/۱۱)	۰/۶۲ <sup>a</sup> (±۰/۰۶)	۰/۶۵ <sup>a</sup> (±۱/۲۵)	۰/۵۱ <sup>ab</sup> (±۰/۵۱)	۵	لومشنی
۰/۵۲ <sup>a</sup> (±۰/۰۴)	۰/۴۵ <sup>a</sup> (±۰/۲۰)	۰/۴۱ <sup>b</sup> (±۰/۰۴۹)	۰/۳۶ <sup>bc</sup> (±۰/۰۷۲)	۲۰	لومشنی

۱. برای هر ویژگی اندازه‌گیری شده در هر لایه، میانگین‌هایی که دارای حداقل یک حرف مشترک می‌باشند از نظر آماری در سطح ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.

شرح داده شد، وجود جریان‌های ترجیحی ناشی از ساختمان‌سازی و پایداری ساختمان خاک در اثر زیاد بودن درصد رس دلیل وجود سرعت جریان بیشتر و در نتیجه جذب کمتر باکتری و انتقال بیشتر آن در خاک لوم رسی است. هم‌چنین با تصحیح غلظت ورودی برای عمق‌های دوم و سوم، مقادیر  $S_{Rcorrected}$  بزرگ‌تر از  $S_R$  به دست آمد (جدول ۵).

کرتشمار و استیچر (۱۲) اثر سرعت جریان بر انتقال کلونیدها در خاک را بررسی کرده و نشان دادند که کاهش سرعت جریان منجر به کاهش انتقال کلونیدها به زه‌آب می‌شود. به دلیل کشش باکتری‌ها به طرف سطوح مشترک هوا-آب در

اثر بافت خاک، شرایط رطوبتی و دما بر شاخص نسبی جذب

( $S_R$ ) و شاخص نسبی جذب تصحیح شده ( $S_{Rcorrected}$ )

شاخص نسبی جذب، میزان نسبی باکتری می‌باشد که در خاک تحت تأثیر فرایندهای جذب و گیرافتادن قرار گرفته است. تأثیر تیمارهای آزمایشی و برهم‌کنش آنها بر شاخص‌های نسبی جذب در جدول ۳ آورده شده است. در جدول ۵ مقایسه میانگین‌های  $S_R$  و  $S_{Rcorrected}$  تحت اثر تیمارهای بافت خاک، شرایط جریان و دما در عمق‌های مختلف نشان داده شده است.

در هر لایه بیشترین مقدار  $S_R$  مربوط به خاک لوم شنی در شرایط غیراشباع و در دمای ۵ °C می‌باشد. همان‌گونه که قبلاً

منافذ ریز خاک است.

هم‌چنین شکل ۱ نشان می‌دهد که برای منحنی رخنه باکتری پس از پشت سر گذاشتن نقطه اوج و حتی پس از گذشت زمان‌های طولانی (پس از انجام آبخویی) نیز باز هم مقدار باکتری به صفر نمی‌رسد و همچنان غلظت باکتری در زه‌آب خروجی مشاهده می‌شود. دلیل این امر را می‌توان آزادشدن باکتری‌های جذب سطحی شده و گیرافتاده‌ای دانست که در طول انجام آبخویی به تدریج آزاد می‌شوند.

هم‌چنین آلودگی در شرایط اشباع در زه‌آب خروجی خیلی سریع‌تر از شرایط غیراشباع مشاهده می‌شود.

اثر دما بر منحنی‌های رخنه باکتری در شکل ۳ نشان داده شده است. در همه لایه‌ها، خاک‌های تحت شرایط دمایی  $20^{\circ}\text{C}$  باکتری بیشتری را از خود عبور داده‌اند. هم‌چنین در این دما، زه‌آب خروجی سریع‌تر به آلاینده آلوده شده است. همان‌گونه که قبلاً شرح داده شد در دمای زیادتر، سرعت حرکت آب نیز بیشتر می‌شود و از آنجا که انتقال آلاینده‌ها بستگی به ویژگی‌های جریان آب دارد (۲۹)، حرکت آلاینده‌ها نیز سریع‌تر می‌شود.

دلیل دیگری که می‌توان به آن اشاره نمود، تأثیر دما بر رشد و ماندگاری باکتری‌هاست. با توجه به این‌که دمای  $20^{\circ}\text{C}$  دمای مناسبی برای رشد و ماندگاری باکتری می‌باشد، می‌توان این‌گونه استنباط کرد که در این دما میزان باکتری‌ها (احتمالاً بر اثر تکثیر) به بیش از میزان  $C_0$  اسمی اولیه افزایش یافته است. فیلیپ و همکاران (۶) دریافتند که باکتری *اشریشیاکولی* می‌تواند برای مدت ۱۰۰ روز در محیط مرطوب خاک در دمای  $10^{\circ}\text{C}$  زنده بماند. هم‌چنین کودوا و همکاران (۱۳) گزارش کردند که باکتری *اشریشیاکولی* در کودهای گاوی و گوسفندی می‌تواند در دمای زیر  $23^{\circ}\text{C}$  مدت زیادتری زنده بماند.

جدول ۶ درصد باکتری عبورکرده از ستون‌های خاک در پایان آزمایش‌های آبخویی را نشان می‌دهد. نتایج جدول دلیلی بر صحت ضرایب محاسبه‌شده (ضریب پالایش و شاخص نسبی جذب) و نتایج ارائه‌شده (منحنی‌های رخنه) است.

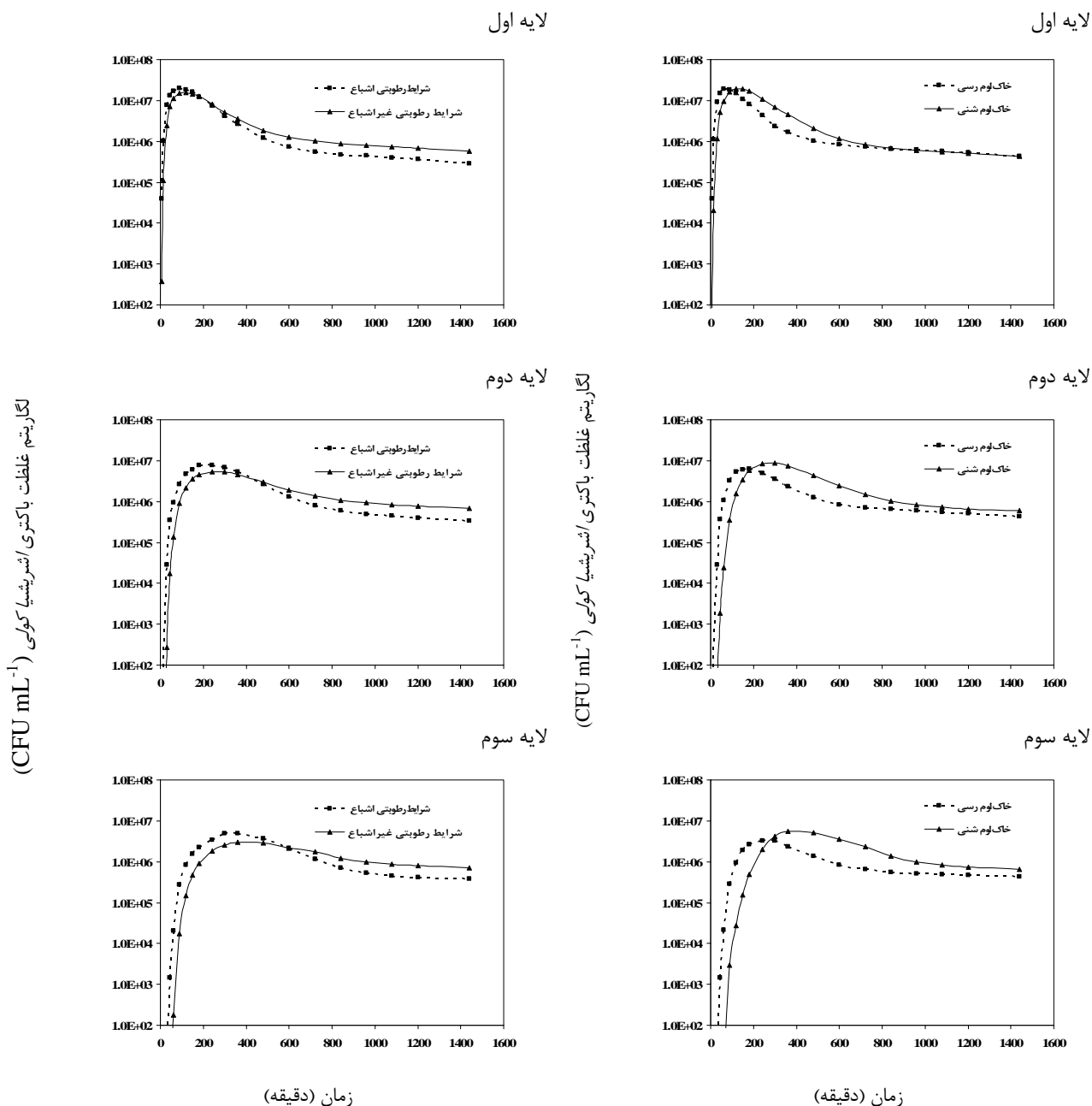
غشای آب اطراف ذرات، انتقال باکتری‌ها در شرایط غیراشباع کاهش می‌یابد (۲۳). هم‌چنین صحرایی (۲) با بررسی اثر ساختمان خاک بر حرکت باکتری *اشریشیاکولی* گزارش کرد که با وجود میزان رس و ماده آلی بیشتر در خاک دارای ساختمان دانه‌ای، باکتری بیشتری در مقایسه با خاک‌های دارای ساختمان‌های منشوری و دانه‌ای از آن عبور کرد. وی دلیل این امر را وجود تخلخل درشت و پیوستگی منافذ بیشتر و جریان‌های ترجیحی در ساختمان دانه‌ای دانست که سبب کاهش سطح و مدت تماس باکتری با ذرات خاک می‌شود.

### اثر بافت خاک، شرایط جریان و دما بر منحنی رخنه باکتری

در شکل‌های ۱، ۲ و ۳ منحنی‌های رخنه باکتری برای تیمارهای بافت خاک، شرایط جریان و دما به صورت لگاریتم غلظت آلاینده در برابر زمان نمونه‌برداری آورده شده است. اثر هر تیمار بر منحنی رخنه با میانگین‌گیری از سایر تیمارها بررسی شد. بدین مفهوم که برای منحنی رخنه مربوط به تأثیر بافت خاک میانگین منحنی‌های رخنه شرایط جریان و دما، برای منحنی رخنه مربوط به تأثیر شرایط جریان میانگین منحنی‌های رخنه دما و بافت خاک و برای منحنی رخنه مربوط به تأثیر دما میانگین منحنی‌های رخنه شرایط جریان و بافت خاک استفاده گردید.

منحنی‌های رخنه نشان می‌دهند که باکتری در حین انتقال، تحت تأثیر تیمارهای بررسی‌شده قرار گرفته‌اند. همان‌گونه که شکل ۱ نشان می‌دهد در خاک لوم‌رسی، وجود جریان ماکروپوری بیشتر، موجب انتقال بیشتر باکتری در این خاک شده است. سرعت انتقال زیاد باکتری در زمان‌های ابتدایی آبخویی (خروج زودهنگام) در ستون‌های خاک لوم‌رسی نشان‌دهنده وجود جریان ترجیحی در این خاک‌هاست. در زمان‌های انتهایی آبخویی، میزان باکتری دیده شده در زه‌آب خروجی برای هر دو خاک تقریباً یکسان می‌باشد.

با افزایش عمق، غلظت باکتری در محلول خاک کم می‌شود؛ که نشان‌دهنده جذب باکتری روی سطوح فعال و گیرافتادن آنها در



شکل ۲. اثر شرایط جریان بر منحنی رخنه باکتری اشریشیا کولی در لایه‌های مختلف خاک

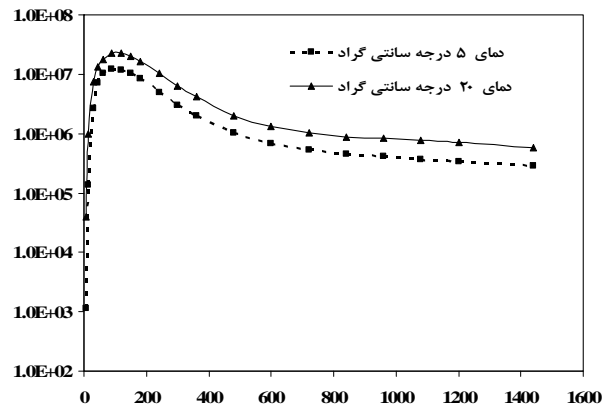
شکل ۱. اثر بافت خاک بر منحنی رخنه باکتری اشریشیا کولی در لایه‌های مختلف خاک

### نتیجه‌گیری

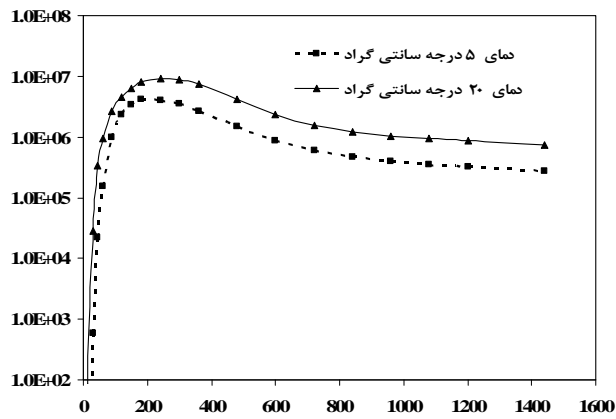
۱) همان‌گونه که دیده شد در همه لایه‌های خاک، باکتری عبور کرده از خاک لوم‌رسی بیشتر از خاک لوم‌شنی بود. بنابراین می‌توان گفت که خاک‌های دارای ساختمان نیاز به مدیریت زراعی بیشتری برای جلوگیری از آلودگی منابع

همان‌گونه که مشاهده می‌شود درصد کل باکتری عبوری از لایه‌های خاک در خاک لوم رسی، شرایط جریان اشباع و دمای ۲۰ °C به ترتیب بیشتر از خاک لوم شنی، شرایط جریان غیر اشباع و دمای ۵ °C است.

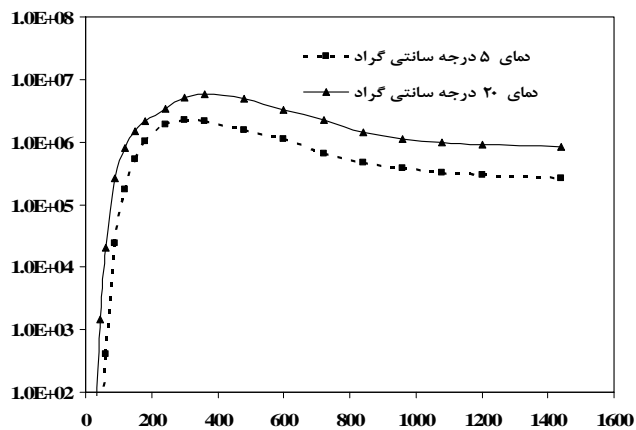
لایه اول



لایه دوم



لایه سوم



زمان (دقیقه)

شکل ۳. اثر دما بر منحنی رخنه باکتری ایشریشیا کولی در لایه‌های مختلف خاک

لگاریتم غلظت باکتری ایشریشیا کولی (CFU mL<sup>-1</sup>)

جدول ۶. درصد کل باکتری اشریشیا کولی عبوری از لایه‌های خاک در تیمارهای مختلف آزمایشی

شرایط جریان		دما (°C)	بافت خاک
غیراشباع	اشباع		
<b>لایه اول</b>			
۵۰/۲۱	۵۹/۲۰	۵	لومرسی
۶۲/۱۱	۷۵/۳۱	۲۰	لومرسی
۲۶/۱۷	۳۴/۷۷	۵	لومشنی
۵۸/۹۲	۶۶/۶۲	۲۰	لومشنی
<b>لایه دوم</b>			
۱۸/۵۳	۳۳/۵۱	۵	لومرسی
۴۱/۹۲	۵۹/۲۵	۲۰	لومرسی
۱۴/۷۰	۲۴/۰۸	۵	لومشنی
۳۸/۳۷	۵۱/۳۷	۲۰	لومشنی
<b>لایه سوم</b>			
۱۰/۲۴	۲۱/۸۸	۵	لومرسی
۳۰/۵۰	۵۳/۶۹	۲۰	لومرسی
۸/۸۵	۱۷/۹۲	۵	لومشنی
۲۵/۳۱	۴۹/۹۹	۲۰	لومشنی

زیرزمینی کم عمق بسیار حساس به آلودگی باکتریایی هستند؛ به گونه‌ای که مصرف جزئی کودها در این مناطق، دشواری‌های زیادی را ایجاد خواهد کرد.

### سپاسگزاری

بدین وسیله از دانشگاه بوعلی سینا به علت تأمین بخشی از هزینه‌های این پژوهش قدردانی می‌شود. هم‌چنین از مسئولین محترم مؤسسه پاستور ایران به خاطر کمک‌های بی‌دریغشان در تهیه باکتری اشریشیا کولی مقاوم به نالیدیکسیک اسید سپاسگزاری می‌شود.

آب زیرزمینی به باکتری‌های بیماری‌زا دارند.

(۲) عبور بیشتر آلاینده‌ها در دمای ۲۰ °C در همه لایه‌های خاک دیده شد. در نتیجه دمای محیط یکی دیگر از ویژگی‌های مهم می‌باشد که در هنگام مصرف کودهای آلی باید به آن توجه کرد.

(۳) در همه تیمارها اختلاف بین آلاینده عبوری در شرایط اشباع و غیراشباع چشم‌گیر بود. از آنجا که شدت جریان آب عامل اصلی در انتقال آلاینده‌هاست، در مناطق مرطوب و پرباران مصرف کودها باید با تدابیر ویژه‌ای انجام شود.

(۴) نتایج نشان داد که عمق خاک در فرایند پالایش باکتری اثرگذار است. همان‌گونه که دیده شد با افزایش عمق خاک میزان آلاینده عبوری از خاک کمتر شد. بنابراین منابع آب

## منابع مورد استفاده

۱. زندسلیمی، س. ۱۳۸۳. بررسی اثر ویژگی‌های فیزیکی خاک و کودهای آلی بر حرکت باکتری‌های آلوده‌کننده آب‌های زیرزمینی در ستون‌های خاک دست‌نخورده. پایان‌نامه کارشناسی ارشد خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، تهران.
۲. صحرایی، ن. ۱۳۸۶. بررسی اثر ساختمان خاک و کود آلی روی حرکت باکتری اشریشیاکولی در ستون‌های خاک دست‌نخورده. پایان‌نامه کارشناسی ارشد خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، تهران.
۳. فرهنگ‌راستی، م. ب. ۱۳۸۷. بررسی حرکت باکتری اشریشیاکولی آزادشده از کود گاوی در خاک مزرعه. پایان‌نامه کارشناسی ارشد خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، تهران.
4. Abu-Ashour, J., D.M. Joy, H. Lee, H.R. Whiteley and S. Zelin. 1998. Movement of bacteria in unsaturated soil columns with macrospore. *Trans. ASAE* 4: 1043–1050.
5. Cho, W.J., J.O. Lee and K.S. Chun. 1999. The temperature effects on hydraulic conductivity of compacted bentonite. *Appl. Soil Sci.* 14: 47–58.
6. Filip, Z., D. Kaddu-Mulindwa and G. Mild. 1988. Survival of some pathogenic and facultative pathogenic bacteria in groundwater. *Water Sci. Technol.* 20: 227–231.
7. Gannon, J., U. Mingelgrin, M. Alexander and R. J. Wagenet. 1991. Bacterial transport through nonhomogenous soil. *Soil Biol. Biochem.* 23: 1155–1160.
8. Gee, G.W. and J.W. Bauder. 1986. Particles size analysis. PP. 383–411. *In: Klute, A. (Ed.), Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods.. Agronomy Monograph 9. 2<sup>nd</sup> ed., SSSA/ASA.*
9. Huysman, F. and W. Veerstraete. 1993. Water-facilitated transport of bacteria in unsaturated soil columns: influence of cell surface hydrophobicity and soil properties. *Soil Biol. Biochem.* 25: 83–90.
10. Jarvis. N.J. and P. J. Leeds-Harrison. 1987. Modeling water movement in drained clay soil. *J. Soil Sci.* 38: 487–498.
11. Jiang, G., M. J. Noonan, G. D. Buchan and N. Smith. 2005. Transport and deposition of *Bacillus subtilis* through an intact soil column. *Aust. J. Soil Res.* 43: 695–703.
12. Kertzschemar, R. and H. Sticher. 1998. Colloid transport in natural porous media: influence of surface chemistry and slow velocity. *Earth Phys. Chem.* 23: 133–139.
13. Kudva, I.T., K. Blanch and C.J. Hovde. 1998. Analysis of *Escherichia coli* O157:H7 in ovine or bovine manure and manure slurry. *Appl. Environ. Microbiol.* 64: 3166–3174.
14. Mathess, G., A. Peckdegger and J. Schroefel. 1988. Persistence and transport of bacteria and viruses in groundwater-a conceptual evaluation. *J. Contamin. Hydrol.* 2: 171–188.
15. McLeod, M., J. Aislabie, J. Ryburn, A. McGill and M. Taylor. 2003. Microbial and chemical tracer movement through two Southland soils, New Zealand. *Aust. J. Soil Res.* 41: 1163–1169.
16. McMurry, S.W., M.S. Coyne and E. Perfect. 1998. Fecal coliform transport through intact soil blocks amended with poultry manure. *J. Environ. Qual.* 27: 86–92.
17. Mosaddeghi, M.R., A.A. Mahboubi, S. Zandsalimi and A. Unc. 2009. Influence of waste type and soil structure on the bacterial filtration rates in unsaturated intact soil columns. *J. Environ. Manag.* 90: 730–739.
18. Mosaddeghi, M.R., A.A. Safari Sinegani, M.B. Farhangi, A.A. Mahboubi and A. Unc. 2010. Saturated and unsaturated transport of cow manure-borne *Escherichia coli* through in situ clay loam lysimeters. *Agric. Ecosys. Environ.* 137: 163–171.
19. Newman, A.C.D. and A.J. Thomasson. 1979. Rothamsted studies of soil structure. III. Pore size distributions and shrinkage processes. *J. Soil Sci.* 30: 415–439.
20. Pawelzone, D.K. and A.L. Mills. 2001. Transport of *Escherichia coli* in sand columns with constant and changing water content. *J. Environ. Qual.* 30: 238–245.
21. Richard, T.L. and T.S. Steenhuis. 1988. Tile drain sampling of preferential flow on a field scale. *J. Contamin. Hydrol.* 3: 307–325.
22. SAS Institute., 1990. *SAS User's Guid: Statistic. Ver. 6a.* SAS Institute Inc., Cary, N.C.
23. Schafer, A., P. Ustohal, H. Harms, F. Stauffer, T. Dracos and A.J. Zehnder. 1995. Transport of bacteria in unsaturated porous media. *J. Contamin. Hydrol.* 33: 149–169.
24. Sims, J. T. 1996. Lime requirement PP. 491. *In: D.L. Sparks (Ed.), Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical Properties. 3<sup>rd</sup> ed., SSSA/ASA. Madison, Wisconsin.*
25. Schneider. W.R. and R.N. Doetsch. 1977. Temperature effects on bacterial movement. *Appl. Environ. Microbiol.* 34(6): 695–700.
26. Tan, Y., W.J. Bond and D.M. Griffin. 1992. Transport of bacteria during unsteady unsaturated soil water flow. *Soil*

- Sci. Soc. Amer. J. 56: 1331–1340.
27. Telfair, D., M.R. Gardner and D. Miars. 1957. The restoration of a structurally degenerated soil. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 21: 131–134.
28. Tim, U.S., S. Mostaghimi and T.A. Dillaha. 1988. Modeling the movement and persistence of bacteria and viruses in porous media. AZO paper No. 88–2627, St. Joseph, MI.
29. Unc, A. and M.J. Goss. 2003. Movement of faecal bacteria through the vadose zone. *Water Air Soil Pollut.* 149: 327–337.
30. Unc, A. and M.J. Goss. 2004. Transport of bacteria from manure and protection of water resources. *Appl. Soil Ecol.* 25: 1–18.
31. Walkly, A. and I. A. Black. 1934. An examination of digestion method for determining soil organic matter and proposed modification of the chromic acid titration. *Soil Sci.* 37: 29–38.
32. Warnemuende, E. A. and R. S. Kanwar. 2002. The effect of swine manure application on bacterial quality of leachate from intact soil columns. *Trans. ASAE* 45(6): 1849-1857.