

مطالعه لایسیمیتری انتقال باکتری فکال کلی فرم در آبیاری قطره‌ای

فروغ عباسی تشنیزی*^۱، فریبرز عباسی^۲، مهدی کوچک‌زاده^۳

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد گروه آبیاری و زهکشی دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس

۲. دانشیار مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی

۳. دانشیار گروه آبیاری و زهکشی دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۲/۸ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۳/۷/۱۵)

چکیده

کمبود منابع آب شیرین یکی از نگرانی‌های رو به فزونی در سراسر جهان است. کمبود آب برای کشاورزی از دغدغه‌های بسیار مهم در نواحی خشک و نیمه‌خشک به شمار می‌رود. فاضلاب‌های شهری تصفیه‌شده منبعی مهم برای این منظورند. فاضلاب حتی پس از تصفیه ممکن است حاوی انواع مختلف میکروارگانیسم‌ها باشد که برای انسان و محیط زیست خطرناک‌اند. بنابراین، پتانسیل انتقال آلودگی مسئله‌ای جدی در زمینه استفاده از فاضلاب تصفیه‌شده برای کشاورزی است. بدین منظور می‌توان از روش‌های نوین آبیاری در ارتباط با فاضلاب تصفیه‌شده برای کشاورزی بهره برد. در این پژوهش انتقال فکال کلی فرم موجود در پساب تصفیه‌شده در ستون‌های آزمایشگاهی به قطر داخلی ۳۰ و ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر، که یکی به سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی (DI) و دیگری به سیستم آبیاری قطره‌ای زیرسطحی (SDI) مجهز بودند، ارزیابی شدند. بدین منظور پس از هر بار آبیاری از زهاب خروجی و محلول خاک در هر ستون نمونه‌برداری شد. نتایج نشان داد در هر دو ستون جمعیت باکتری بیشتر می‌شود. با این حال، تفاوتی معنادار بین میزان باکتری در زهاب خروجی از دو ستون وجود نداشت. همچنین میزان آلودگی لایه ۱۵ سانتی‌متری زیر سطح خاک در ستون SDI نسبت به ستون DI کمتر بود.

کلیدواژگان: آبیاری قطره‌ای زیرسطحی، آبیاری قطره‌ای سطحی، آلودگی میکروبی، ستون خاک.

مقدمه

کمبود منابع آب شیرین یکی از نگرانی‌های رو به فزونی در سراسر جهان، به‌ویژه در خاورمیانه و شمال آفریقا، است. در بسیاری از کشورهای خشک و نیمه‌خشک منابع آب به‌شدت کاهش یافته است. برنامه‌ریزان به هر منبع آبی که ممکن است استفاده اقتصادی داشته باشد توجه کرده و آن را گسترش داده‌اند. با توجه به رشد آگاهی از محدودیت‌های طبیعی در این مناطق، استفاده مجدد از فاضلاب‌ها اهمیت بیشتری پیدا کرده است (Pescod, 1992). استفاده از فاضلاب شهری تصفیه‌شده، به منزله یک منبع آب جایگزین، در سراسر دنیا گسترش یافته و رویکرد جهانی نشان‌دهنده افزایش روزافزون استفاده از این منبع غیر متعارف در کشورهای توسعه‌یافته و در حال توسعه است. از آنجا که فاضلاب‌ها حاوی نمک و ترکیبات فلزی سمی و پاتوژن‌ها هستند، استفاده بدون برنامه از آن‌ها می‌تواند برای خاک و منابع آبی مضر باشد. برای حداقل کردن تأثیر فاضلاب‌های شهری و هم‌زمان استفاده از آن‌ها در کشاورزی باید

تدابیر لازم اندیشیده شود. با توجه به اینکه بسته به نوع روش آبیاری ممکن است مسیرهای مختلفی برای حرکت میکروارگانیسم‌های آب در خاک وجود داشته باشد (Huysman and Verstraete, 1993)، تکنیک‌های مختلف آبیاری می‌توانند در استفاده از فاضلاب تصفیه‌شده به کار روند (Oron et al., 1991). عملکرد بالای سامانه‌های نوین آبیاری، از قبیل آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی^۱ (SDI)، سبب کاهش برخی از این مشکلات می‌شود و راندمان استفاده از آب را نیز نسبت به روش‌های آبیاری سنتی افزایش می‌دهد (Kandelous and Simunek, 2010; Yao et al., 2011). آبیاری زیرسطحی روشی است که در آن آب از طریق نیروی موئینگی به سمت بالا و محیط رشد گیاه حرکت می‌کند. این روش آبیاری مقدار آب مورد نیاز برای تولید گیاهان با کیفیت بالا و تلفات آب و شسته شدن مواد مغذی را در مقایسه با روش‌های آبیاری سنتی کاهش می‌دهد (Schmal et al., 2011; Siyal and Skaggs, 2009). باید توجه داشت حتی بعد از تصفیه نیز ممکن است

رسی^۱ بود که از تصفیه خانه فاضلاب جنوب تهران تهیه شد. خصوصیات شیمیایی و فیزیکی خاک استفاده شده در جدول های ۱ و ۲ می آید. فاضلاب استفاده شده از تصفیه خانه فاضلاب جنوب شهر تهران- واقع در شهرری، اتوبان شهید آوینی، مجاور روستای عمادآور- تأمین شد. برای تهیه ستون های خاک از دو لوله PVC به قطر داخلی ۳۰ و ارتفاع ۷۵ سانتی متر استفاده شد. به منظور زهکشی مناسب ستون خاک، در انتهای هر ستون تا ارتفاع ۵ سانتی متر شن درشت ریخته شد و برای جلوگیری از خروج خاک انتهای لوله ها با توری فلزی بسته شد. لوله های یادشده به صورت قائم، با فاصله ۷۵ سانتی متر از زمین، قرار داده شدند. بدین ترتیب جمع آوری زهاب ستون های خاک به آسانی امکان پذیر شد. به منظور جلوگیری از جریان ترجیحی، با استفاده از ذرات ماسه و چسب، دیواره داخلی ستون زیر و کناره های ستون خاک با استفاده از میله متراکم شد. همچنین برای اینکه ستون های خاک تا حدودی شرایطی مشابه خاک مزرعه داشته باشند با جرم مخصوص ظاهری ($\rho_b = 1.5 \text{ gr/cm}^3$) مشابه خاک مزرعه پر شدند.

برای آبیاری ستون های خاک از پمپی با حداکثر آب دهی ۴۰ لیتر بر دقیقه استفاده شد. به منظور تزریق پساب داخل ستون های خاک از لوله های ۱۶ میلی متری قطره چکان دار استفاده شد. قطره چکان ها از نوع تنظیم کننده فشار، با دبی ۳/۷۸ تا ۴ لیتر بر ساعت و فشار کاری ۰/۵ تا ۲ اتمسفر، بودند. در هر دو ستون قطره چکان در وسط سطح مقطع ستون و در ستونی که از آبیاری قطره ای زیرسطحی استفاده شد، قرار داده شد. لوله نیز در عمق ۲۵ سانتی متری ستون خاک (Kouzentsov *et al*, 2004; Assadian *et al*, 2005) و در ستون دیگر روی سطح خاک قرار داده شد. برای نمونه برداری از آب خاک، در ستون دارای سیستم آبیاری قطره ای زیرسطحی، پس از سوراخ کردن جداره ستون، دو کپسول مکش در عمق ۱۵ سانتی متر زیر و بالای قطره چکان و در ستون دیگر یک کپسول مکش در عمق ۱۵ سانتی متری زیر قطره چکان قرار داده شد. همچنین زهاب خروجی از انتهای ستون ها به روش حجمی اندازه گیری شد.

در آبیاری اول به اندازه کمبود رطوبتی خاک تا ظرفیت زراعی به ستون ها آب داده شد و در ادامه هر یک از ستون های خاک جداگانه و به مدت ۳۰ تا ۴۰ دقیقه آبیاری شدند. دور آبیاری بین ۳ تا ۷ روز متغیر بود؛ به گونه ای که با گذشت زمان و پایین آمدن دمای آزمایشگاه دور آبیاری به تدریج افزایش یافت. در هر بار آبیاری حدود ۲ تا ۳ لیتر پساب مصرف شد.

فاضلاب حاوی انواع مختلفی از میکروارگانیسم ها باشد که برای انسان بیماری زا هستند. بنابراین، پتانسیل انتقال آلودگی مسئله ای جدی در زمینه استفاده از فاضلاب تصفیه شده برای کشاورزی است (Crook, 1998).

سرنوشت و بقای باکتری ها در محیط متخلخل پیچیده تر از انتقال باکتری ها در محلول هاست. فرایندهای مختلف بر این موضوع تأثیر می گذارند. از این فرایندها می توان به فیلتراسیون، پالایش فیزیکی، رسوب، جذب و واجذب، رشد، و کاهش (مرگومیر) اشاره کرد (Simunek *et al*, 2009). به طور کلی می توان این مکانیسم ها را در سه دسته انتقال (جریان توده ای و انتشار)، تبادل بین فاز مایع و جامد (به علت جذب و واجذب) و رشد، غیر فعال شدن و مرگومیر باکتری طبقه بندی کرد (Tufenkji, 2007).

نتایج پژوهش (Kouzentsov *et al* 2004) نشان داد، در مقایسه با آبیاری سطحی، سه میکروارگانیسم فکال کلی فرم، Somatic Coliphage و F-Specific RNA در آبیاری زیرسطحی زودتر می میرند. همچنین آن ها اعلام کردند آبیاری قطره ای زیرسطحی آلودگی کمتری بر خاک ایجاد می کند. Forslund *et al* (2011) وجود ویروس و باکتری را در زهاب خروجی از مخزن های حاوی خاک در آبیاری قطره ای زیرسطحی بررسی کردند. نتایج نشان داد بیست و هفت روز پس از تزریق ویروس و باکتری به آب آبیاری، در زهاب مخزن حاوی شن درشت ویروس وجود دارد؛ در حالی که در زهاب مخزن با خاک لوم شنی ویروس و باکتری مشاهده نمی شود. همچنین آن ها در پایان دوره دویست و دوازده روزه آزمایش هیچ گونه آلودگی در زهاب خروجی از هر دو نوع خاک مشاهده نکردند. Assadian *et al* (2005) مشاهده کردند بیست و هشت روز پس از آخرین آبیاری ستون خاک لوم رسی تحت آبیاری قطره ای زیرسطحی با فاضلاب ویروس در اطراف و بالای قطره چکان وجود دارد.

هدف این پژوهش بررسی انتقال باکتری فکال کلی فرم در ستون های خاک تحت آبیاری قطره ای سطحی و زیرسطحی بود. با توجه به کاربرد روزافزون پساب ها در کشاورزی، مطالعه آلودگی میکروبی خاک و منابع آبی ضروری به نظر می رسد. در این پژوهش، وضعیت باکتری فکال کلی فرم موجود در پساب تصفیه شده در ستون های خاک در دو روش آبیاری قطره ای سطحی و زیرسطحی بررسی شد.

مواد و روش ها

پژوهش حاضر به مدت شصت و دو روز بر ستون های خاک دست خورده به ارتفاع ۶۰ و قطر داخلی ۳۰ سانتی متر، در آزمایشگاه آبیاری دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس، انجام شد. خاک استفاده شده در این پژوهش دارای بافت لوم

جدول ۱. مشخصات شیمیایی خاک استفاده شده در آزمایش

جمع	کاتیون‌ها (meq/L)				جمع	آنیون‌ها (meq/L)				pH	EC (dS/m)	C _{ec} (ug/g)
	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Na ⁺	K ⁺		CO ₃ ⁻²	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ⁻²			
۹۴/۶	۲۰/۷	۴۸/۳	۲۵/۶۰	-	۹۰/۸۹	-	۱۵	۴۵/۵	۳۰/۳۹	۷/۸۲	۸/۹۲	۰-۴۵

جدول ۲. مشخصات فیزیکی خاک استفاده شده در آزمایش

عمق خاک (cm)	درصد شن	درصد رس	درصد سیلت	بافت
۰-۴۵	۳۱	۲۸	۴۱	لوم رسی

یافته‌ها و بحث

بررسی حرکت آب در ستون‌های خاک

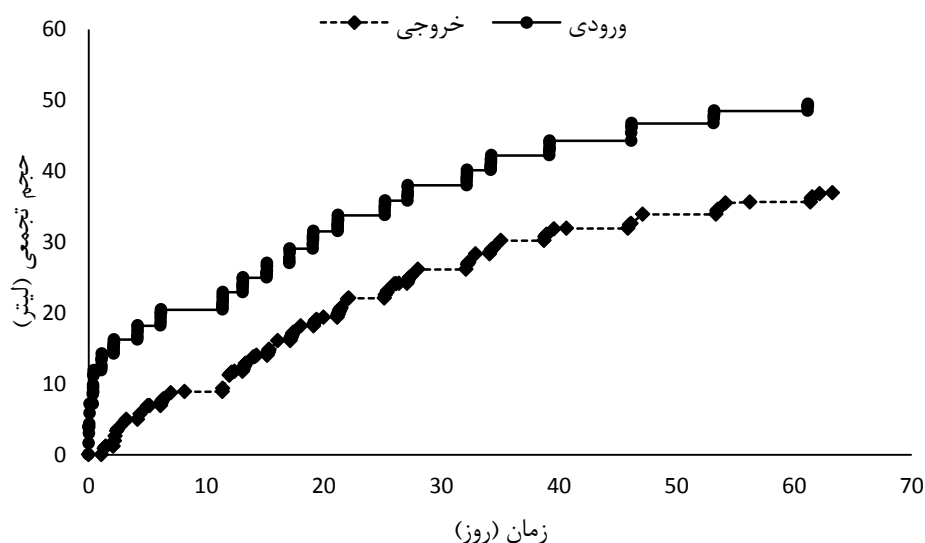
با اندازه‌گیری حجم آب ورودی به ستون‌های خاک و آب خروجی از آن، وضعیت حرکت آب در خاک بررسی شد. حجم پساب ورودی به ستون آبیاری قطره‌ای زیرسطحی در طول دوره شصت و دو روزه آزمایش ۵۰ لیتر (معادل ۷۰ سانتی‌متر) و حجم زهاب خروجی تقریباً ۳۷ لیتر (معادل ۵۲ سانتی‌متر) بود. در طول آزمایش، در چند مورد تجمع آب بر سطح خاک مشاهده شد؛ که احتمالاً به دلیل بیشتر بودن شدت جریان خروجی از قطره‌چکان نسبت به هدایت هیدرولیکی آبی اشباع بوده است. شکل ۱ حجم تجمعی پساب ورودی به ستون خاک و پساب خروجی از آن را نسبت به زمان نشان می‌دهد. نسبت حجم خروجی به ورودی در این ستون تقریباً ۷۴ درصد است. گفتنی است در انتهای دوره آزمایش، به علت گرفتگی قطره‌چکان، مقدار آب خروجی از قطره‌چکان در این ستون قدری کاهش یافت.

حجم پساب ورودی به ستون آبیاری قطره‌ای سطحی در طول دوره آزمایش تقریباً ۵۲ لیتر (معادل ۷۴ سانتی‌متر) و حجم زهاب خروجی از ستون ۳۹ لیتر (معادل ۵۵ سانتی‌متر) بود. نسبت حجم زهاب خروجی به پساب ورودی برابر ۷۴ درصد به دست آمد. برای تخمین مقدار تبخیر از داده‌های تشت تبخیر کلاس A، واقع در گلخانه پلاستیکی در محوطه دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس، استفاده شد. به منظور برآورد تبخیر از سطح ستون‌های خاک داده‌های تبخیر از تشت در ضریب ۱ (ضریب تشت) ضرب شد. همچنین برای برآورد میزان تبخیر از سطح خاک لخت مقادیر به دست آمده از محاسبه فوق دوباره در ضریب ۰/۷ ضرب شد (Ritchie, 1972). عمق آب ذخیره شده در خاک نیز با استفاده از رطوبت اولیه و ظرفیت زراعی خاک تعیین شد:

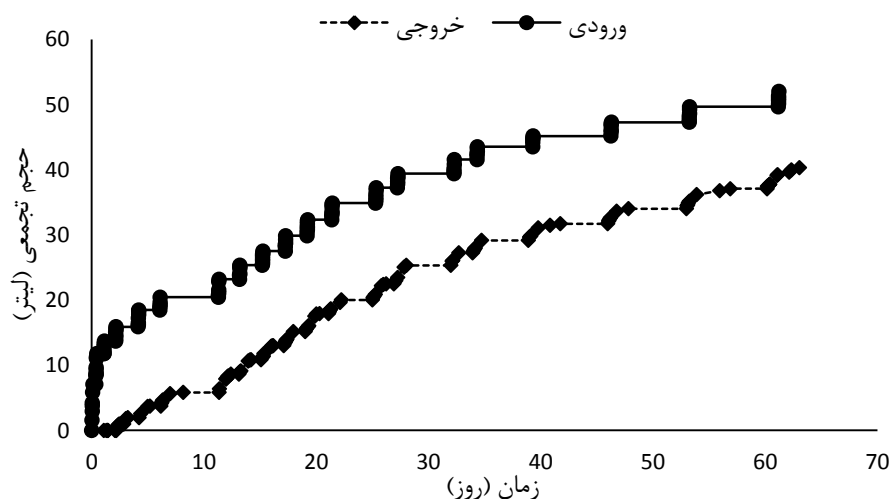
حجم پساب مصرفی در زمان‌های مختلف از شروع آزمایش ثبت شد. به محض مشاهده زهاب خروجی از ستون‌ها در هر آبیاری زمان آن ثبت و حجم زهاب خروجی نیز با زمان اندازه‌گیری شد. باکتری فکال کلی فرم^۱ باکتری شاخص آلودگی آب انتخاب شد. فکال کلی فرم از خانواده باکتری‌های گرم منفی، فاقد اسپور، مقاوم به گرما، بی‌هوازی، و دارای قطر ۰/۳ تا ۱ میکرومتر و طول ۰/۶ تا ۶ میکرومتر است (Horan, 2003; Pang et al, 2008). برای تعیین غلظت باکتری در پساب ورودی، در هر نوبت آبیاری، حجمی حدود ۲۰۰ تا ۲۵۰ میلی‌لیتر از پساب برای تجزیه داخل بطری ریخته و تا زمان انتقال به آزمایشگاه در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد در یخچال نگهداری می‌شد. برای تعیین غلظت باکتری زهاب خروجی ستون‌ها نیز ۱۵۰ تا ۲۰۰ میلی‌لیتر از زهاب خروجی نمونه‌برداری و تا زمان انتقال به آزمایشگاه در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد در یخچال نگهداری می‌شد. در هر بار آبیاری امکان تهیه یک یا دو نمونه از زهاب خروجی ستون‌های مورد مطالعه وجود داشت. برای تعیین غلظت باکتری در محلول آب خاک از عمق‌های ۱۵ سانتی‌متر بالا و زیر قطره‌چکان در ستون زیرسطحی، با استفاده از سرنگ، از کپسول‌های مکش نمونه‌برداری شد. در ستون آبیاری قطره‌ای سطحی از کپسول مکش نصب شده در عمق ۱۵ سانتی‌متری نمونه‌برداری شد. همه نمونه‌های آب تا زمان انتقال به آزمایشگاه برای تجزیه در یخچال نگهداری شدند. در برخی آبیاری‌ها امکان تهیه یک نمونه محلول آب خاک از کپسول‌های مکش میسر بود و در برخی آبیاری‌ها نیز امکان تهیه محلول کافی برای تجزیه باکتری فکال کلی فرم وجود نداشت. هنگام انتقال نمونه‌ها به آزمایشگاه از ظروف حاوی یخ استفاده می‌شد. همه نمونه‌ها در آزمایشگاه معتمد سازمان محیط زیست برای باکتری فکال کلی فرم تجزیه شدند.

آب حجم پساب ورودی به ستون خاک و خروجی از آن می‌آید. خطای بیلان حجم ستون‌های آزمایشی ۸٫۹ درصد بود. یکی از عواملی که در بروز این مقدار خطا نقش دارد قرائت حجم اولیه آب به دلیل نوسان آب در حین پمپاژ است. همچنین میزان تبخیر به صورت مستقیم از سطح خاک آزمایش شده اندازه‌گیری نشد؛ که شاید دلیل دیگری باشد برای این میزان خطا.

(رابطه ۱)
 $d_r = (\theta_{FC} - \theta_i) \times l$
 θ_{FC} رطوبت حجمی در حد ظرفیت زراعی، θ_i رطوبت حجمی اولیه، l طول ستون خاک، و d_r عمق ذخیره بر حسب سانتی‌متر است. رطوبت اولیه خاک آزمایش شده ۵ درصد حجمی اندازه‌گیری شد.
 شکل ۲ حجم تجمعی پسابی را که به ستون وارد و از آن خارج می‌شود، نسبت به زمان، نشان می‌دهد. در جدول ۳ بیلان



شکل ۱. حجم تجمعی پساب ورودی و خروجی از ستون آبیاری قطره‌ای زیرسطحی



شکل ۲. حجم تجمعی ورودی و خروجی از ستون آبیاری قطره‌ای سطحی

جدول ۳. بیلان آب مقادیر اندازه‌گیری شده در دوره آزمایش

پارامتر	پساب ورودی (cm)	زهاب خروجی (cm)	عمق تبخیر (cm)	عمق ذخیره (cm)	خطا (cm)	درصد خطا
مقدار	۷۴	۴۸٫۱	۶٫۷	۱۲٫۶	۶٫۶	۸٫۹

ستون‌های خاک و زهاب خروجی از آن، انتقال باکتری در طول ستون‌های خاک بررسی شد.

بررسی تغییرات غلظت باکتری در ستون‌های خاک با اندازه‌گیری تغییرات غلظت باکتری در پساب ورودی به

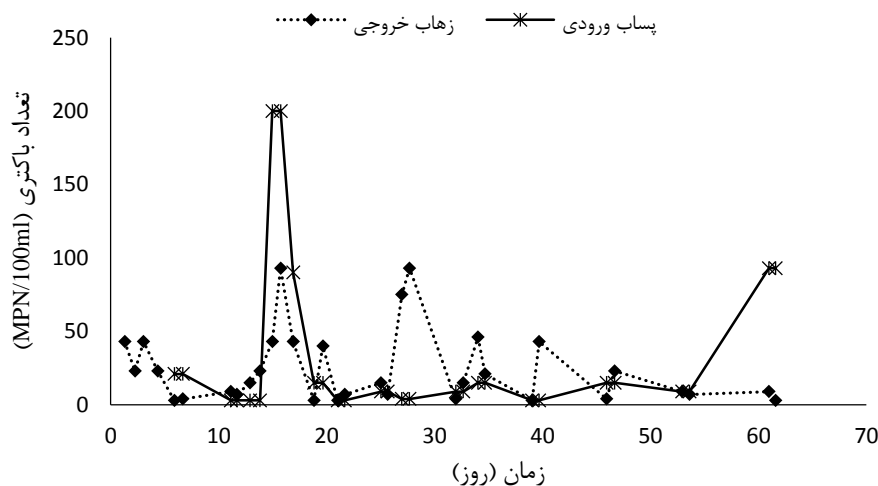
طریق نیروی مویبگی سطح خاک را خیس می‌کند، نتیجه نشان‌دهنده کاهش تعداد باکتری به دلیل سرعت آرام جریان آب و به دنبال آن افزایش مدت زمان تماس باکتری با ذرات خاک در لایه بالایی ستون خاک است. Enriquez *et al.* (2003) در تحقیقی اعلام کردند حرکت باکتریوفاژ MS-2 در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی به سمت پایین بیش از حرکت باکتریوفاژ به سمت بالاست و عمده باکتری‌ها اطراف قطره‌چکان متمرکز شده‌اند. Assadian *et al.* (2005) اعلام کردند در خاک لوم رسی حرکت باکتریوفاژ در لایه‌های بالا و نزدیک قطره‌چکان در ستون‌های با آبیاری قطره‌ای زیرسطحی نسبت به لایه‌های زیرین قطره‌چکان بیشتر است. این مطلب با نتیجه آزمایش حاضر مطابقت ندارد. از علل این تفاوت می‌توان به متفاوت بودن شدت جریان آبیاری اشاره کرد.

اختلاف تعداد باکتری در زهاب خروجی از ستون و محلول خاک عمق ۱۵ سانتی‌متر بالای قطره‌چکان در شکل ۵ می‌آید. با توجه به این نمودار، می‌توان گفت در بیشتر موارد تعداد باکتری در زهاب خروجی بیشتر از تعداد باکتری در محلول خاک بالای قطره‌چکان است. علت این حالت می‌تواند کم‌تر بودن سرعت حرکت آب در لایه بالای قطره‌چکان نسبت به لایه پایین قطره‌چکان باشد؛ که منجر به پلایش و فیلتر بیشتر باکتری در خاک می‌شود. Kouzentsov *et al.* (2004) گزارش کردند در خاک لوم رسی، در ستون‌های آزمایشی تحت آبیاری قطره‌ای زیرسطحی، هفتاد و دو ساعت پس از اتمام آبیاری باکتری فکال کلی فرم فقط در اطراف قطره‌چکان مشاهده شد و در لایه بالایی و زیرین قطره‌چکان تعداد باکتری صفر بود (نتایج لایه ۱۵ سانتی‌متر زیر قطره‌چکان ارائه نشد).

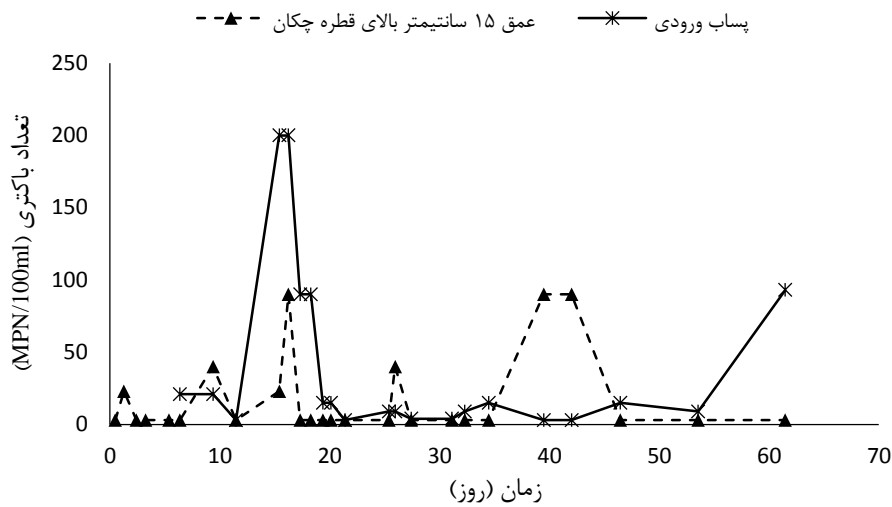
ستون آبیاری قطره‌ای زیرسطحی

همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، در اوایل دوره آزمایش تقریباً غلظت باکتری ورودی بیش از غلظت آن در زهاب خروجی است و این احتمال که باکتری جذب ذرات خاک شده یا بین منافذ خاک گیر افتاده باشد وجود دارد. اما به تدریج غلظت باکتری خروجی بیش از مقدار ورودی به ستون شده است. علت این حالت می‌تواند مناسب بودن شرایط محیط برای رشد باکتری باشد. زیرا در شرایطی که مواد غذایی مورد نیاز باکتری و دما و رطوبت کافی در خاک وجود داشته باشد باکتری شروع به رشد و تکثیر می‌کند. پس از وقوع بیشترین غلظت باکتری در پساب ورودی (روز شانزدهم آزمایش)، در سایر نمونه‌های زهاب خروجی از ستون نیز تعداد باکتری خروجی نسبت به تعداد باکتری پساب ورودی بیشتر شد. Lindqvist *et al.* (1994) و Tan *et al.* (1994) اعلام کردند با افزایش غلظت باکتری ورودی به خاک انتقال باکتری افزایش می‌یابد. آن‌ها علت این موضوع را کاهش مدت زمان اشباع شدن مکان‌های جذب و به عبارتی کمبود مکان برای جذب باکتری‌ها گزارش کردند. همچنین با افزایش غلظت باکتری در خاک میزان جذب کاهش می‌یابد. زیرا سلول‌های جذب شده مانع جذب سلول‌های آزاد موجود در فاز مایع می‌شوند.

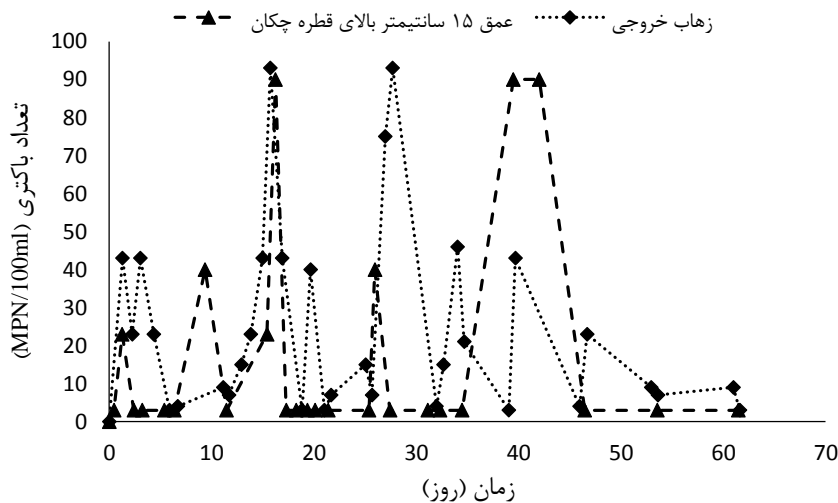
همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود تعداد باکتری در محلول خاک ۱۵ سانتی‌متر بالای قطره‌چکان، به جز در روزهای سی و نهم و چهل و دوم آزمایش (که اختلاف زیادی بین تعداد باکتری در محلول خاک و پساب ورودی وجود دارد)، از تعداد باکتری موجود در پساب ورودی کمتر است. در ستون آبیاری قطره‌ای زیرسطحی، با توجه به اینکه منبع آبیاری در عمق ۲۵ سانتی‌متری سطح خاک قرار دارد و در این روش آب از



شکل ۳. تعداد باکتری در پساب ورودی و زهاب خروجی ستون آبیاری قطره‌ای زیرسطحی



شکل ۴. تعداد باکتری در پساب ورودی و محلول خاک در ۱۵ سانتی متر بالای قطره چکان در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی



شکل ۵. تعداد باکتری در محلول خاک در ۱۵ سانتی متر بالای قطره چکان و زهاب خروجی از ستون آبیاری قطره‌ای زیرسطحی

ستون آبیاری قطره‌ای سطحی

تعداد باکتری فکال کلی فرم موجود در پساب ورودی به ستون آبیاری قطره‌ای سطحی و و زهاب خروجی از آن در شکل ۶ می‌آید. همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود تعداد باکتری در زهاب خروجی بیشتر از پساب ورودی است و خاک در پالایش باکتری نقش چندان مؤثری ندارد. علت افزایش باکتری خروجی نسبت به ورودی می‌تواند مهیابودن شرایط برای رشد باکتری در خاک باشد. از سوی دیگر، با توجه به بالا بودن شدت جریان ورودی به ستون، می‌توان گفت فرصت کافی برای انتقال باکتری از فاز مایع به فاز جامد وجود ندارد. مطالعات and Huysman Verstraete (1993) نیز مؤید این مطلب است.

همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، تعداد باکتری در محلول خاک عمق ۱۵ سانتی متر زیر قطره چکان نسبت به تعداد اولیه باکتری در پساب ورودی نسبتاً زیاد است. با توجه به

وجود مواد غذایی در پساب ورودی به ستون و کم بودن فاصله‌ای که باکتری در خاک طی می‌کند و همچنین نزدیک بودن این نقطه به منبع آبیاری، می‌توان نتیجه گرفت خاک زمان کافی برای پالایش و جذب باکتری نداشته است و به همین علت باکتری زیادی در نمونه محلول خاک مشاهده شده است. Crane *et al* (1981) شدت مرگ‌ومیر فکال کلی فرم را پس از کاربرد کود ۰/۲۹ بر روز اعلام کردند و علت کم بودن شدت مرگ باکتری را وجود مواد غذایی در محیط گزارش کردند.

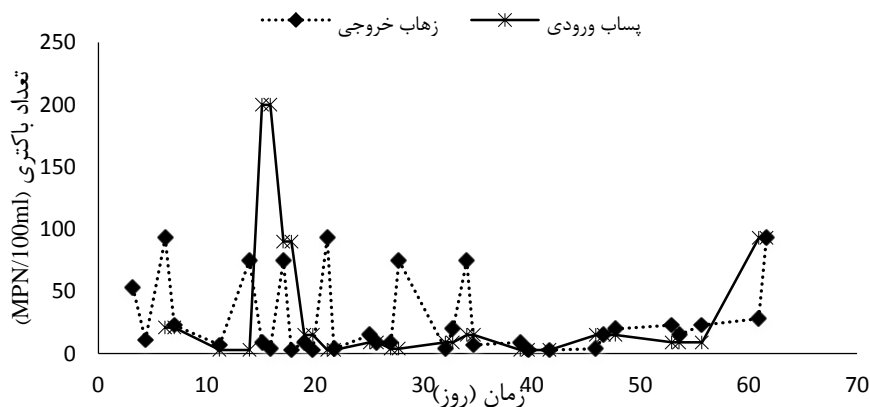
همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود در اوایل دوره آزمایش تعداد باکتری در زهاب خروجی بیشتر از تعداد آن‌ها در محلول خاک در ۱۵ سانتی متر زیر قطره چکان است و باکتری بیشتری از نیم‌رخ خاک عبور کرده است. در یک دوره، بین تعداد باکتری در محلول خاک و زهاب خروجی بی‌نظمی مشاهده شده و از روز سی‌ام آزمایش تعداد باکتری در محلول

سانتی متر بوده است. Kouzentsov *et al.* (2004) در تحقیقات خود اعلام کردند باکتری فکال کلی فرم در آبیاری قطره‌ای سطحی دو و سه روز، پس از اتمام آبیاری، مرگومیر قابل توجهی دارد؛ به گونه‌ای که سه روز پس از پایان آزمایش فکال کلی فرم فقط در لایه ۳ تا ۵ سانتی متری بالای خاک مشاهده شده است.

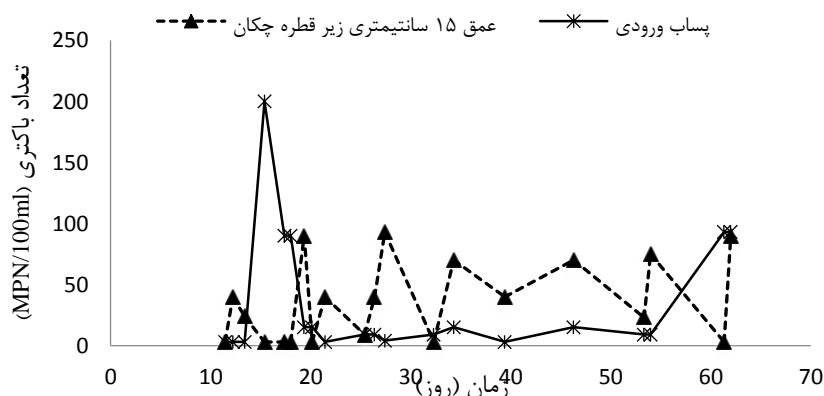
با مقایسه تعداد باکتری‌ها در پساب ورودی، محلول خاک در عمق ۱۵ سانتی متر زیر قطره‌چکان، و زهاب خروجی از ستون می‌توان گفت از اواسط دوره آزمایش تا انتهای آن تعداد باکتری‌ها در زهاب خروجی نسبت به محلول خاک در عمق ۱۵ سانتی متری کمتر است. علت این موضوع می‌تواند حذف باکتری‌ها در طول این مسیر به علت جذب به سطح ذرات خاک و سایر کاتیون‌های موجود در خاک باشد. مشاهده می‌شود که در همین مدت تعداد باکتری موجود در عمق ۱۵ سانتی متری زیر قطره‌چکان از تعداد باکتری در پساب ورودی بیشتر شده است؛ که علت آن می‌تواند رشد و تکثیر باکتری‌ها در این فاصله از ستون خاک باشد. از سوی دیگر، با توجه به اینکه این نقطه نزدیک قطره‌چکان بوده است، تعداد بیشتری باکتری در این عمق وجود داشته است.

خاک عمق ۱۵ سانتی متر زیر قطره‌چکان نسبت به زهاب خروجی بیشتر شده است؛ یعنی در این حالت احتمال حذف باکتری در نیم‌رخ خاک وجود داشته است.

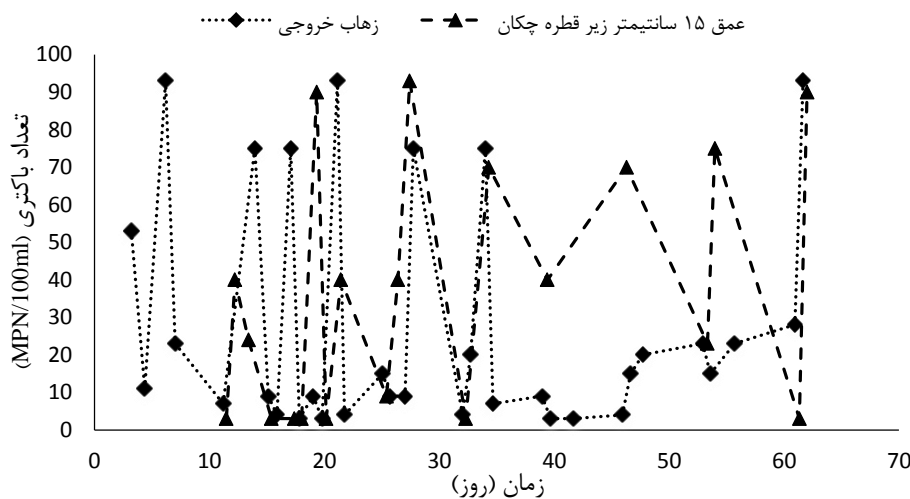
اختلاف سطح زیر دو نمودار محلول خاک در عمق ۱۵ سانتی متر زیر قطره‌چکان و زهاب خروجی از ستون آبیاری قطره‌ای سطحی در اوایل دوره آزمایش نشان‌دهنده عدم حذف باکتری بین دو لایه و به عبارت دیگر رشد و تکثیر باکتری است. اما در ادامه آزمایش مشاهده شد تعداد باکتری در عمق ۱۵ سانتی متری زیر قطره‌چکان نسبت به زهاب خروجی بیشتر می‌شود. این حالت بیانگر حذف و فیلتراسیون باکتری در نیم‌رخ خاک به دلیل جذب و پالایش فیزیکی در فاصله بین دو موقعیت نمونه‌برداری است. به عبارت دیگر، بیشترین میزان حذف باکتری در نیم‌رخ خاک از اواسط دوره آزمایش و تقریباً هم‌زمان با افزایش فاصله بین آبیاری‌ها بوده است. این نتیجه با نتایج Mosaddeghi *et al.* (2010) در جریان اشباع و غیر اشباع در خاک لومی دست‌نخورده مطابق است. Mosaddeghi *et al.* در پژوهش خود به این نتیجه دست یافتند که در فاصله بین دو عمق ۲۰ و ۴۰ سانتی متر پالایش فیزیکی در ستون خاک رخ داده و غلظت باکتری در عمق ۴۰ سانتی متر کمتر از عمق ۲۰



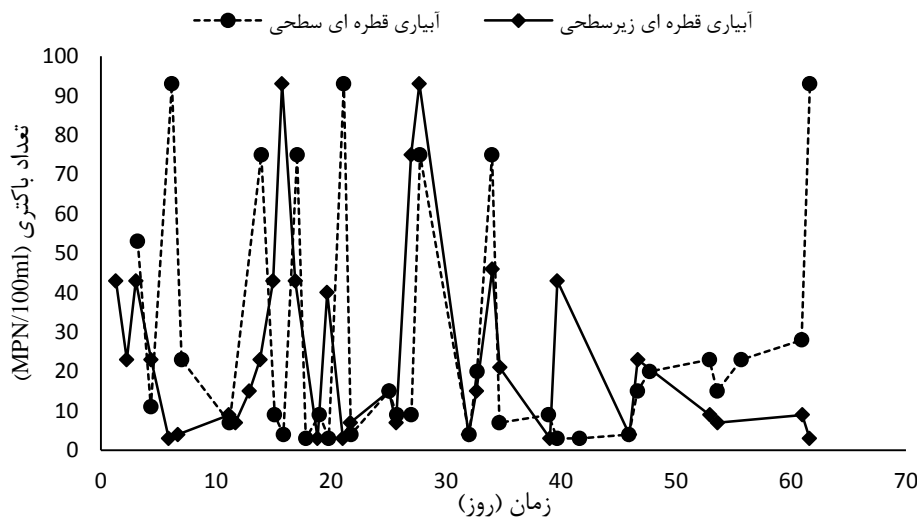
شکل ۶. تعداد باکتری در زهاب خروجی و پساب ورودی در ستون آبیاری قطره‌ای سطحی



شکل ۷. تعداد باکتری در محلول خاک در عمق ۱۵ سانتی متری زیر قطره‌چکان و پساب ورودی در ستون آبیاری قطره‌ای سطحی



شکل ۸. تعداد باکتری در محلول خاک عمق ۱۵ سانتی‌متر زیر قطره‌چکان و زهاب خروجی از ستون آبیاری قطره‌ای سطحی



شکل ۹. تعداد باکتری در زهاب خروجی آبیاری قطره‌ای زیرسطحی و سطحی

اعلام شد. آن‌ها افزایش شدت مرگ‌ومیر باکتری را با افزایش رطوبت در آزمایش‌های پیمان‌های خود نشان دادند و بیان کردند که احتمالاً همین مسئله در آزمایش‌های ستونی نیز رخ داده است. همچنین اظهار کردند که علل عمده حذف باکتری غیرفعال‌سازی و جذب به سطح مشترک آب- هوا بوده است. همان‌گونه که در شکل‌های پیشین مشاهده می‌شود، مقدار باکتری در لایه نزدیک به سطح خاک در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی نسبت به آبیاری قطره‌ای سطحی آلودگی کمتری دارد. همچنین مقایسه تعداد باکتری‌ها در عمق ۰ تا ۱۵ سانتی‌متر دو ستون خاک، با استفاده از آزمون تی استیودنت، نشان داد در سطح ۵ درصد بین آبیاری قطره‌ای زیرسطحی و قطره‌ای سطحی از نظر آلودگی لایه سطحی تفاوتی معنادار وجود دارد.

مقایسه تعداد باکتری در زهاب خروجی و لایه سطحی ستون‌های آزمایشی با مقایسه تعداد باکتری‌های موجود در زهاب خروجی ستون آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی (شکل ۹) با استفاده از آنالیزهای آماری به کمک نرم‌افزار SPSS و آزمون تی استیودنت جفت‌شده^۱ مشاهده شد اختلاف معناداری در سطح ۱ درصد و ۵ درصد بین داده‌ها وجود ندارد. این نتیجه با نتایج آزمایش‌های Kouzentsov *et al* (2004) سازگار نیست. آن‌ها اعلام کردند آبیاری قطره‌ای زیرسطحی نسبت به آبیاری قطره‌ای سطحی توانایی بیشتری برای کاهش تعداد باکتری در خاک دارد. علت این موضوع شدت جریان و مصرف آب بیشتر در این تحقیق

1. Paired Student's t-test

جدول ۴. مقادیر ضریب فیلتراسیون در اعماق مختلف ستون‌های آزمایشی

عمق نمونه برداری (سانتی متر)	آبیاری قطره‌ای سطحی	آبیاری قطره‌ای زیرسطحی
	$\lambda_f (m^{-1})$	
۰-۱۰	-	۷,۳۸
۰-۱۵	-۲,۱۳	-
۱۵-۶۰	۱,۱۵	-
۱۰-۶۰	-	-۰,۶۶
۰-۶۰	۰,۳۹	۰,۴۹

نتیجه‌گیری

در این مطالعه انتقال باکتری فکال کلی فرم در دو ستون آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی مطالعه شد. نتایج نشان داد افت و خیزهای زیادی در تعداد باکتری‌ها در هر دو ستون وجود دارد. از علل اصلی این افت و خیزها می‌توان به مهیابودن شرایط برای رشد باکتری، تغییر در شرایط جریان، جداشدن باکتری‌های جذب شده از سطح ذرات جامد و ورود به فاز محلول، و وجود نقاط مختلف جذب برای باکتری‌ها اشاره کرد. با مقایسه ستون آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی در پژوهش حاضر مشاهده شد اختلاف معناداری بین دو شیوه آبیاری یادشده وجود ندارد. ولی در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی نسبت به آبیاری قطره‌ای سطحی باکتری کمتری در سطح خاک مشاهده شد. از این رو، در صورت آبیاری با پساب در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی سطح خاک کمتر آلوده می‌شود. ولی در هر دو شیوه احتمال آلودگی آب‌های زیرزمینی وجود خواهد داشت. بنابراین، در صورت استفاده از پساب برای آبیاری باید به نوع خاک استفاده شده برای کشاورزی، برنامه آبیاری (دور و مدت آبیاری)، و شدت جریان توجه شود. نامناسب بودن شدت و مدت آبیاری موجب افزایش مقدار آب خاک می‌شود؛ به گونه‌ای که مقدار رطوبت نزدیک شرایط اشباع توانایی خاک را برای نگه‌داشت باکتری‌ها کاهش می‌دهد و سبب انتقال آن‌ها بدون حذف از نیم‌رخ خاک می‌شود. از سویی دیگر، ماندگاری و انتقال باکتری‌ها با جریان آب جای نگرانی دارد و باید تلاش برای بهبود فرایندهای تصفیه فاضلاب‌ها بیشتر شود. همچنین، در صورت استفاده از فاضلاب برای آبیاری لازم است به صورت دوره‌ای خاک از نظر ویژگی‌های کیفی و حاصلخیزی ارزیابی شود تا از سلامت و موفقیت استفاده طولانی مدت از فاضلاب در آبیاری مطمئن شد.

ضریب فیلتراسیون (λ_f)

با استفاده از ضریب فیلتراسیون می‌توان میزان فیلترشدن باکتری را در لایه‌های مختلف خاک تعیین کرد. ضریب فیلتراسیون با رابطه ۲ محاسبه می‌شود (Mosaddeghi et al., 2010):

$$\lambda_f = \ln \left(\frac{C_{0(avg)}}{C_{(avg)}} \right) \times \frac{1}{Z} \quad (\text{رابطه ۲})$$

پساب ورودی و زهاب خروجی (MPN/ml)، ضخامت لایه خاک (m)، و λ_f ضریب فیلتراسیون (m^{-1}) است. در جدول ۴ مقادیر ضریب فیلتراسیون برای دو عمق ۱۵ و ۶۰ سانتی متر در آبیاری قطره‌ای سطحی و ۱۰ و ۶۰ سانتی متر در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی می‌آید. مشاهده می‌شود که بیشترین مقدار ضریب فیلتراسیون در ۱۰ سانتی متر ابتدایی ستون آبیاری قطره‌ای زیرسطحی و کمترین مقدار آن در ۱۵ سانتی متر ابتدای ستون آبیاری قطره‌ای سطحی رخ داده است. مقادیر ضریب فیلتراسیون در جدول ۴ مطالب بخش‌های قبل را تأیید می‌کند. λ_f در ۱۵ سانتی متر ابتدای ستون خاک آبیاری قطره‌ای سطحی کمترین مقدار را دارد. همان گونه که قبلاً هم گفته شد، در این لایه باکتری رشد زیادی داشته است. همچنین مشاهده می‌شود که تفاوت زیادی بین مقادیر λ_f در انتهای دو ستون بررسی شده وجود ندارد. نکته دیگر اینکه بیشترین مقدار باکتری در ۱۰ سانتی متر ابتدای ستون آبیاری قطره‌ای زیرسطحی حذف شده است. همان گونه که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، رشد باکتری در ستون آبیاری قطره‌ای زیرسطحی بعد از ۱۰ سانتی متر ابتدایی رخ داده است. شدت جریان زیاد در مجاورت قطره‌چکان به سرعت باکتری‌ها را به لایه‌های بعدی می‌برد و به همین دلیل پالایش در لایه نزدیک قطره‌چکان حداقل است. این نتیجه با نتایج Mosaddeghi et al (2010) مطابقت دارد. آن‌ها بیان کردند که شدت جریان زیاد به سرعت ذرات کود را منتقل می‌کند و مقدار پالایش در لایه اول را به حداقل می‌رساند. مقادیر منفی ضریب فیلتراسیون در جدول ۳ به این معنی است که رشد باکتری در برابر پالایش و فیلتراسیون آن به گونه‌ای بوده که اثر پالایش و فیلتراسیون در نیم‌رخ خاک نادیده گرفته شده است.

REFERENCES

Assadian, N. W., Di Giovanni, G. D., Enciso, J., Iglesias, J., and Lindemann, W. (2005). The

transport of waterborne solutes and bacteriophage in soil subirrigated with a wastewater blend.

- Agriculture, Ecosystems and Environment, 111, 279-291.
- Crane, S. R., Westerman, P. W., and Overcash, M. R. (1981). Die-off of fecal indicator organisms following land application of poultry manure. *Journal of Environmental Quality*, 9, 531-537.
- Crook, J. (1998). Water Reclamation and Reuse Criteria. In: *Wastewater Reclamation and Reuse* (Ed. Asano T.). Technomic Publishing, Lancaster, 627-703.
- Enriquez, C., Alum, A., Suarez-Rey, E. M., Choi, C. Y., Oron, G., and Gerba, C. P. (2003). Bacteriophages MS2 and PRD1 in turfgrass by subsurface drip irrigation. *Journal of environmental engineering*, 129(9), 852-857.
- Forslund, A., Plauborg, F., Andersen, N. M., Markussen, B., and Dalsgaard, A. (2011). Leaching of human pathogens in repacked soil lysimeters and contamination of potato tubers under subsurface drip irrigation in Denmark. *Water Research*, 45, 4367-4380.
- Horan, N. J. (2003). Faecal Indicator Organisms. *The Handbook of Water and Wastewater Microbiology*, 105-112.
- Huysman, F. and Verstraete, W. (1993). Water-facilitated transport of bacteria in unsaturated soil columns: influence of cell surface hydrophobicity and soil properties. *Soil Biology and Biochemistry*, 25(1), 83-90.
- Kandelous, M. M. and Simunek, J. (2010). Numerical simulations of water movement in a subsurface drip irrigation system under field and laboratory conditions using HYDRUS-2D. *Agricultural Water Manage*, 97, 1070-1076.
- Kouznetsov, M. Y., Pachepky, Y. A., Gillerman, L., and Oron, G. (2004). Microbial transport in soil caused by surface and subsurface drip irrigation with treated wastewater, *Int. Agrophysics*, 18, 239-247.
- 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.
- Mosaddeghi, M., Sinangani, A., Farhangi, M., Mahboubi, A., and Unc, A. (2010). Saturated and unsaturated transport of cow manure-borne *Escherichia coli* through in situ clay loam lysimeters. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 137(1), 163-171.
- Oron, G., DeMalach, Y., Hoffman, Z., Keren, Y., Hartman, H., and Plazner, N. (1991). Wastewater disposal by sub-surface trickle irrigation. *Water Science and Technology*, 23(10-12), 2149-2158.
- Pang, L., McLeod, M., Aislabie, J., Šimunek, 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.
- Pescod, M. B. (1992). Wastewater treatment and use in agriculture—FAO irrigation and drainage. Paper 47. 125 p.
- Ritchie, J. T. (1972). Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. *Water Resources Research*, 8(5), 1204-1213.
- Schmal, J. L., Dumroese, R. K., Davis, A. S., Pinto, J. R., and Jacobs, D. F. (2011). Subirrigation for production of native plants in nurseries: current knowledge, and implementation. *Native Plants Journal*, 12(2), 81-93.
- Simunek, J., Jacques, D., Twarakavi, N. K. 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.
- Siyal, A. A. and Skaggs, T. H. (2009). Measured and simulation soil wetting patterns under porous clay pipe subsurface irrigation. *Agricultural Water Management*, 96, 893-904.
- Tan, Y., Gannon, J., Baveye, P., and Alexander, M. (1994). Transport of bacteria in an aquifer sand: Experiments and model simulations. *Water Resources Research*, 30(12), 3243-3252.
- Tufenkji, N. (2007). Modeling microbial transport in porous media: Traditional approaches and recent developments. *Advances in Water Resources*, 30(6), 1455-1469.
- Yao, W. W., Ma, X. Y., Li, J., and Parkes, M. (2011). Simulation of point source wetting pattern of subsurface drip irrigation. *Irrig Sci*, 29: 331-339.