تحقیقات آب و خاک ایران، دورهٔ ۴۶، شمارهٔ ۱، بهار ۱۳۹۴ (ص ۵۸-۴۹)

مطالعهٔ لایسیمتری انتقال باکتری فکال کلی‌فرم در آبیاری قطره‌ای

فروغ عباسی تشنیزی*[۱]، فریبرز عباسی[۲]، مهدی کوچک‌زاده[۳]

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

۲. دانشیار مؤسسهٔ تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی

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

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۲/۸ـ 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 جدّی در زمینهٔ 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 کلی‌فرم 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 لایهٔ 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 افریقا، است. در بسیاری از کشورهای خشک و نیمه‌خشک منابع آب به‌شدت کاهش یافته است. برنامه‌ریزان به هر منبع آبی که ممکن است استفادهٔ اقتصادی داشته باشد توجه کرده و آن را گسترش داده‌اند. با توجه به رشد آگاهی از محدودیت‌های طبیعی در این مناطق، استفادهٔ مجدد از فاضلاب‌ها اهمیت بیشتری پیدا کرده است (Pescod, 1992). استفاده از فاضلاب شهری تصفیه‌شده، به منزلهٔ یک منبع آب جایگزین، در سراسر دنیا گسترش یافته و رویکرد جهانی نشان‌دهندهٔ 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، استفادهٔ بدون برنامه از آن‌ها می‌تواند برای خاک و منابع آبی مضر باشد. برای حداقل‌کردن 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 مویینگی 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 شسته‌شدن 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

* نویسندهٔ مسئول: foroogh.abbassi@modares.ac.ir

1. Subsurface Drip Irrigation

Archive of SID

www.SID.ir

فاضلاب حاوی انواع مختلفی از میکروارگانیسم‌ها باشد که برای انسان بیماری‌زا هستند. بنابراین، پتانسیل انتقال آلودگی مسئله‌ای جدّی در زمینهٔ استفاده از فاضلاب تصفیه‌شده برای کشاورزی است (Crook, 1998).

سرنوشت و بقای باکتری‌ها در محیط متخلخل پیچیده‌تر از انتقال باکتری‌ها در محلول‌هاست. فرایندهای مختلف بر این موضوع تأثیر می‌گذارند. از این فرایندها می‌توان به فیلتراسیون، پالایش فیزیکی، رسوب، جذب و واجذب، رشد، و کاهش (مرگ‌ومیر) اشاره کرد (Simunek *et al*, 2009). به طور کلی می‌توان این مکانیسم‌ها را در سه دستهٔ انتقال (جریان توده‌ای و انتشار)، تبادل بین فاز مایع و جامد (به علت جذب و واجذب) و رشد، غیر فعال شدن و مرگ‌ومیر باکتری طبقه‌بندی کرد (Tufenkji, 2007).

نتایج پژوهش Kouzentsov *et al* (2004) نشان داد، در مقایسه با آبیاری سطحی، سه میکروارگانیسم فکال کلی‌فرم، Somatic Coliphage، و F-Specific RNA در آبیاری زیرسطحی زودتر می‌میرند. همچنین آن‌ها اعلام کردند آبیاری قطره‌ای زیرسطحی آلودگی کمتری بر خاک ایجاد می‌کند. Forslund *et al* (2011) وجود ویروس و باکتری را در زهاب خروجی از مخزن‌های حاوی خاک در آبیاری قطره‌ای 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 نمی‌شود. همچنین آن‌ها در پایان دورهٔ دویست و دوازده روزهٔ آزمایش هیچ‌گونه 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 قطره‌ای زیرسطحی با فاضلابْ ویروس در اطراف و بالای قطره‌چکان وجود دارد.

هدف این پژوهش بررسی انتقال باکتری فکال کلی‌فرم در ستون‌های خاک تحت آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی بود. با توجه به کاربرد روزافزون پساب‌ها در کشاورزی، مطالعهٔ آلودگی میکروبی خاک و منابع آبی ضروری به نظر می‌رسد. در این پژوهش، وضعیت باکتری فکال کلی‌فرم موجود در پساب تصفیه‌شده در ستون‌های خاک در دو روش آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی بررسی شد.

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر به مدت شصت و دو روز بر ستون‌های خاک دست‌خورده به ارتفاع ۶۰ و قطر داخلی ۳۰ سانتی‌متر، در آزمایشگاه آبیاری دانشکدهٔ کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس، انجام شد. خاک استفاده‌شده در این پژوهش دارای بافت لوم رسی[1] بود که از تصفیه‌خانهٔ فاضلاب جنوب تهران تهیه شد. خصوصیات شیمیایی و فیزیکی خاک استفاده‌شده در جدول‌های ۱و ۲ می‌آید. فاضلاب استفاده‌شده از تصفیه‌خانهٔ فاضلاب جنوب شهر تهران- واقع در شهرری، اتوبان شهید آوینی، مجاور روستای عمادآور- تأمین شد. برای تهیهٔ ستون‌های خاک از دو لولهٔ PVC به قطر داخلی ۳۰ و ارتفاع ۷۵ سانتی‌متر استفاده شد. به منظور زهکشی مناسب ستون خاک، در انتهای هر ستون تا ارتفاع ۵ سانتی‌متر شن درشت ریخته شد و برای جلوگیری از خروج خاکْ انتهای لوله‌ها با توری فلزی بسته شد. لوله‌های یادشده به صورت قائم، با فاصلهٔ ۷۵ سانتی‌متر از زمین، قرار داده شدند. بدین ترتیب جمع‌آوری زهاب ستون‌های خاک به‌آسانی امکان‌پذیر شد. به منظور جلوگیری از جریان ترجیحی، با استفاده از ذرات ماسه و چسب، دیوارهٔ داخلی ستون زبر و کناره‌های ستون خاک با استفاده از میله متراکم شد. همچنین برای اینکه ستون‌های خاک تا حدودی شرایطی مشابه خاک مزرعه داشته باشند با جرم مخصوص ظاهری ($\rho_b = ۱/۵\ gr/cm^3$) مشابه خاک مزرعه پر شدند.

برای آبیاری ستون‌های خاک از پمپی با حداکثر آب‌دهی ۴۰ لیتر بر دقیقه استفاده شد. به منظور تزریق پساب داخل ستون‌های خاک از لوله‌های ۱۶ میلی‌متری قطره‌چکان‌دار استفاده شد. قطره‌چکان‌ها از نوع تنظیم‌کنندهٔ فشار، با دبی ۳٫۷۸ تا ۴ لیتر بر ساعت و فشار کاری ۰٫۵ تا ۲ اتمسفر، بودند. در هر دو ستون قطره‌چکان در وسط سطح مقطع ستون و در ستونی که از آبیاری قطره‌ای زیرسطحی استفاده شد، قرار داده شد. لوله نیز در عمق ۲۵ سانتی‌متری ستون خاک (Kouzentsov *et al*, 2004; Assadian *et al*, 2005) و در ستون دیگر روی سطح خاک قرار داده شد. برای نمونه‌برداری از آب خاک، در ستون دارای سیستم آبیاری قطره‌ای زیرسطحی، پس از سوراخ‌کردن جدارهٔ ستون، دو کپسول مکش در عمق ۱۵ سانتی‌متر زیر و بالای قطره‌چکان و در ستون دیگر یک کپسول مکش در عمق ۱۵ سانتی‌متری زیر قطره‌چکان قرار داده شد. همچنین زهاب خروجی از انتهای ستون‌ها به روش حجمی اندازه‌گیری شد.

در آبیاری اول به اندازهٔ کمبود رطوبتی خاک تا ظرفیت زراعی به ستون‌ها آب داده شد و در ادامه هر یک از ستون‌های خاک جداگانه و به مدت ۳۰ تا ۴۰ دقیقه آبیاری شدند. دور آبیاری بین ۳ تا ۷ روز متغیر بود؛ به گونه‌ای که با گذشت زمان و پایین‌آمدن دمای آزمایشگاه دور آبیاری به‌تدریج افزایش یافت. در هر بار آبیاری حدود ۲ تا ۳ لیتر پساب مصرف شد.

1. Clay Loam

Archive of SID
www.SID.ir

جدول ۱. مشخصات شیمیایی خاک استفاده‌شده در آزمایش

عمق خاک (cm)	pH	EC (dS/m)	آنیون‌ها (meq/L)						کاتیون‌ها (meq/L)					
			SO_4^{-2}	Cl^-	HCO_3^-	CO_3^{-2}	جمع	K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	جمع
۰-۴۵	۷/۸۲	۸/۹۲	۳۰/۳۹	۴۵/۵	۱۵	–	۹۰/۸۹	–	۲۵/۶۰	۴۸/۳	۲۰/۷	۹۴/۶

جدول ۲. مشخصات فیزیکی خاک استفاده‌شده در آزمایش

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

حجم پساب مصرفی در زمان‌های مختلف از شروع آزمایش ثبت شد. به محض مشاهدهٔ زهاب خروجی از ستون‌ها در هر آبیاری زمان آن ثبت و حجم زهاب خروجی نیز با زمان اندازه‌گیری شد. باکتری فکال کلی‌فرم[1] باکتری شاخص آلودگی آب انتخاب شد. فکال کلی‌فرم از خانوادهٔ 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 درجهٔ 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 درجهٔ سانتی‌گراد در یخچال نگهداری می‌شد. در هر بار آبیاری امکان تهیهٔ 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 نصب‌شده در عمق ۱۵ سانتی‌متری نمونه‌برداری شد. همهٔ نمونه‌های آب تا زمان انتقال به آزمایشگاه برای تجزیه در یخچال نگهداری شدند. در برخی آبیاری‌ها امکان تهیهٔ یک نمونهٔ محلول آب خاک از کپسول‌های مکش میسر بود و در برخی آبیاری‌ها نیز امکان تهیهٔ محلول کافی برای تجزیهٔ باکتری فکال کلی‌فرم وجود نداشت. هنگام انتقال نمونه‌ها به آزمایشگاه از ظروف حاوی یخ استفاده می‌شد. همهٔ نمونه‌ها در آزمایشگاه معتمد سازمان محیط زیست برای باکتری فکال کلی‌فرم تجزیه شدند.

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 دورهٔ شصت و دو روزهٔ 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 بیشتربودن 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 دورهٔ 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 دورهٔ 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 گلخانهٔ پلاستیکی در محوطهٔ دانشکدهٔ 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 به‌دست‌آمده از محاسبهٔ فوق دوباره در ضریب ۰/۷ ضرب شد (Ritchie, 1972). عمق آب ذخیره‌شده در خاک نیز با استفاده از رطوبت اولیه و ظرفیت زراعی خاک تعیین شد:

1. Fecal Coliform

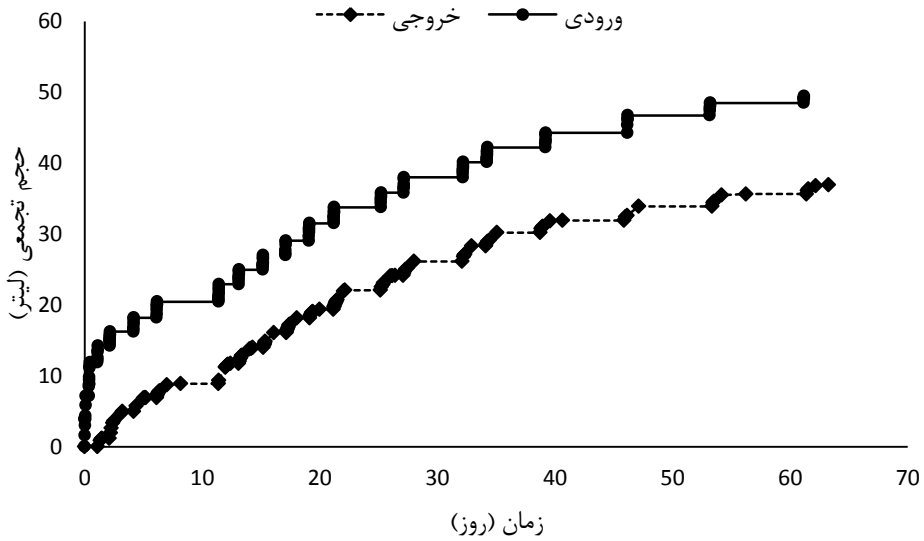
Archive of SID

www.SID.ir

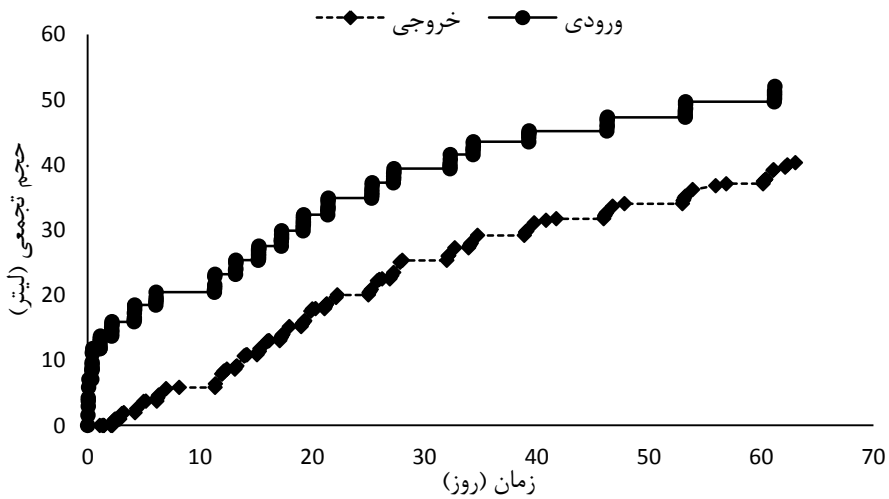
$$d_r = (\theta_{FC} - \theta_i) \times l \quad \text{(رابطهٔ ۱)}$$

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 اولیهٔ خاک آزمایش‌شده 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 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 خطا در قرائت حجم اولیهٔ آب به دلیل نوسان آب در حین پمپاژ است. همچنین میزان تبخیر به صورت مستقیم از سطح خاک آزمایش‌شده اندازه‌گیری نشد؛ که شاید دلیل دیگری باشد برای این میزان خطا.



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 اندازه‌گیری‌شده در دورهٔ 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

بررسی تغییرات غلظت باکتری در ستون‌های خاک

با اندازه‌گیری تغییرات غلظت باکتری در پساب ورودی به ستون‌های خاک و و زهاب خروجی از آن، انتقال باکتری در طول ستون‌های خاک بررسی شد.

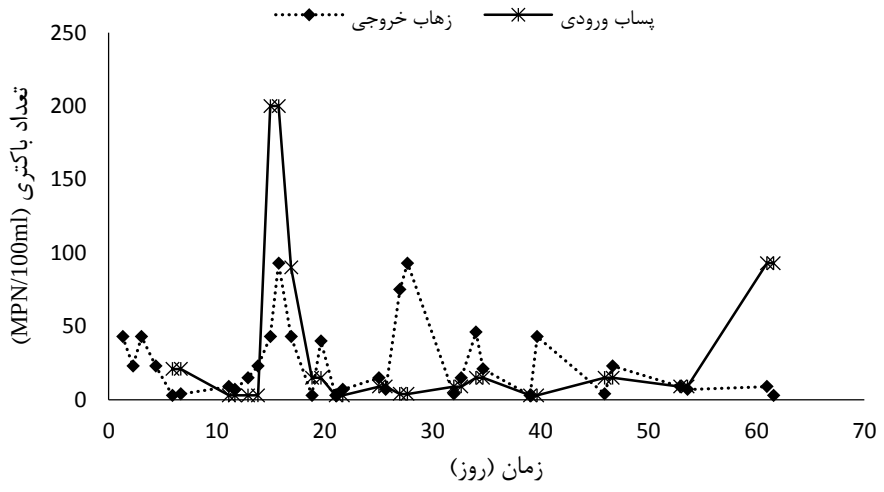
www.SID.ir

ستون آبیاری قطره‌ای زیرسطحی

همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، در اوایل دورهٔ 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 به‌تدریج غلظت باکتری خروجی بیش از مقدار ورودی به ستون شده است. علت این حالت می‌تواند مناسب‌بودن 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 اشباع‌شدن 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 جذب‌شده مانع جذب سلول‌های آزاد موجود در فاز مایع می‌شوند.

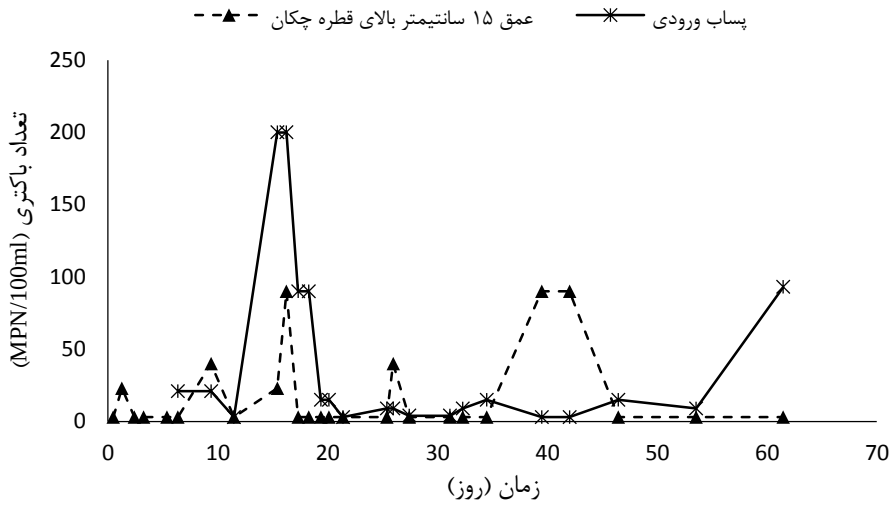
همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود تعداد باکتری در محلول خاک ۱۵ سانتی‌متر بالای قطره‌چکان، به جز در روزهای سی و نهم و چهل و دوم آزمایش (که اختلاف زیادی بین تعداد باکتری در محلول خاک و پساب ورودی وجود دارد)، از تعداد باکتری موجود در پساب ورودی کمتر است. در ستون آبیاری قطره‌ای زیرسطحی، با توجه به اینکه منبع آبیاری در عمق ۲۵ سانتی‌متری سطح خاک قرار دارد و در این روش آب از طریق نیروی مویینگی سطح خاک را خیس می‌کند، نتیجه نشان‌دهندهٔ کاهش تعداد باکتری به دلیل سرعت آرام جریان آب و به دنبال آن افزایش مدت زمان تماس باکتری با ذرات خاک در لایهٔ 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 عمدهٔ 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 نتیجهٔ آزمایش حاضر مطابقت ندارد. از علل این تفاوت می‌توان به متفاوت‌بودن 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 کمتربودن سرعت حرکت آب در لایهٔ بالای قطره‌چکان نسبت به لایهٔ پایین قطره‌چکان باشد؛ که منجر به پالایش 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 کلی‌فرم فقط در اطراف قطره‌چکان مشاهده شد و در لایهٔ بالایی و زیرین قطره‌چکان تعداد باکتری صفر بود (نتایج لایهٔ ۱۵ سانتی‌متر زیر قطره‌چکان ارائه نشد).

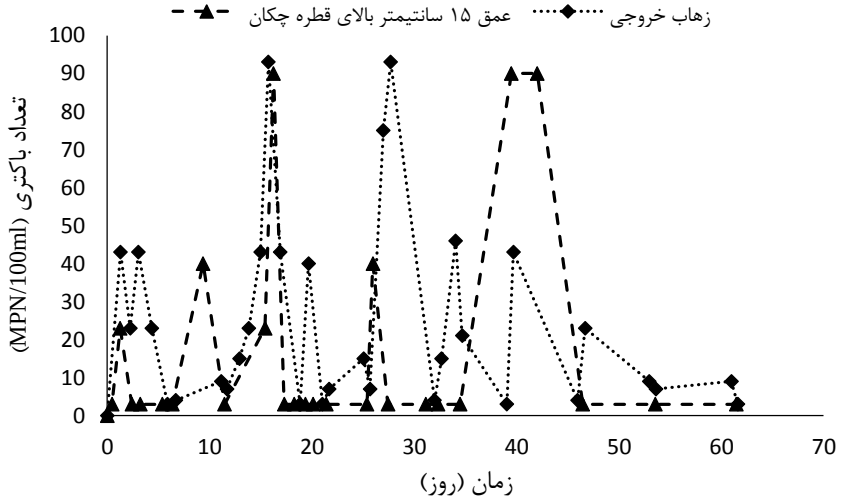


شکل ۳. تعداد باکتری در پساب ورودی و زهاب خروجی ستون آبیاری قطره‌ای زیرسطحی

Archive of SID
www.SID.ir



شکل ۴. تعداد باکتری در پساب ورودی و محلول خاک در ۱۵ سانتی‌متر بالای قطره‌چکان در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی



شکل ۵. تعداد باکتری در محلول خاک در ۱۵ سانتی‌متر بالای قطره‌چکان و زهاب خروجی از ستون آبیاری قطره‌ای زیرسطحی

ستون آبیاری قطره‌ای سطحی

تعداد باکتری فکال کلی‌فرم 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 بالابودن شدت جریان ورودی به ستون، می‌توان گفت فرصت کافی برای انتقال باکتری از فاز مایع به فاز جامد وجود ندارد. مطالعات Huysman and Verstraete (1993) نیز مؤید این مطلب است.

همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، تعداد باکتری در محلول خاک عمق ۱۵ سانتی‌متر زیر قطره‌چکان نسبت به تعداد اولیهٔ باکتری در پساب ورودی نسبتاً زیاد است. با توجه به وجود مواد غذایی در پساب ورودی به ستون و کم‌بودن فاصله‌ای که باکتری در خاک طی می‌کند و همچنین نزدیک‌بودن 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 نمونهٔ محلول خاک مشاهده شده است. Crane *et al* (1981) شدت مرگ‌ومیر فکال کلی‌فرم را پس از کاربرد کود ۰٫۲۹ بر روز اعلام کردند و علت کم‌بودن شدت مرگ باکتری را وجود مواد غذایی در محیط گزارش کردند.

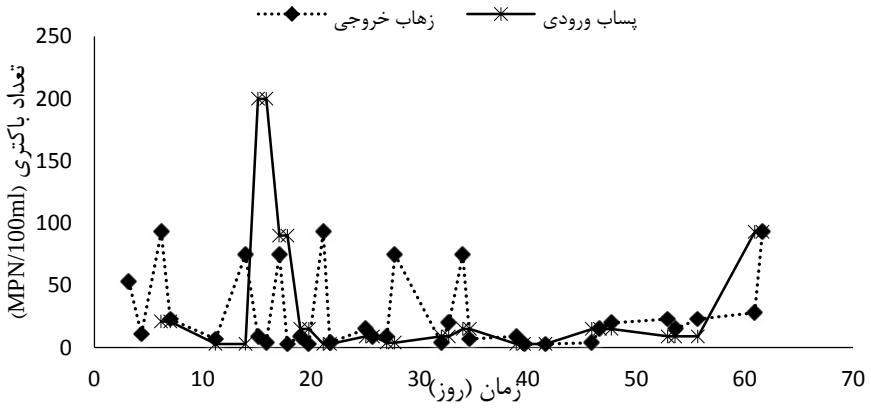
همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود در اوایل دورهٔ آزمایش تعداد باکتری در زهاب خروجی بیشتر از تعداد آن‌ها در محلول خاک در ۱۵ سانتی‌متر زیر قطره‌چکان است و باکتری بیشتری از نیم‌رخ خاک عبور کرده است. در یک دوره، بین تعداد باکتری در محلول خاک و زهاب خروجی بی‌نظمی مشاهده شده و از روز سی‌اُم آزمایش تعداد باکتری در محلول

www.SID.ir

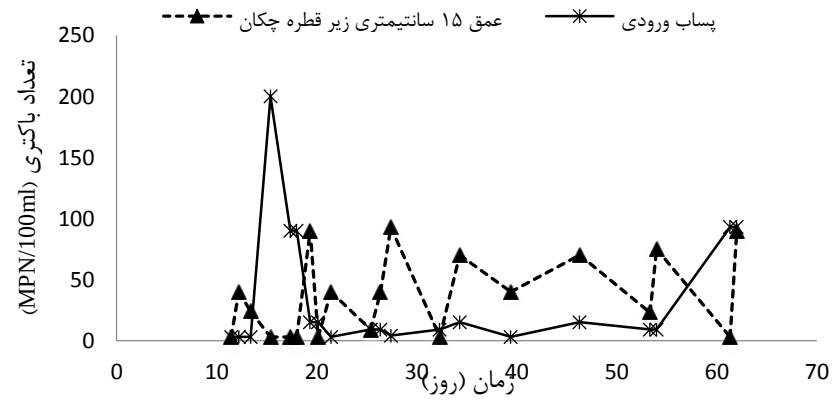
خاک عمق ۱۵ سانتی‌متر زیر قطره‌چکان نسبت به زهاب خروجی بیشتر شده است؛ یعنی در این حالت احتمال حذف باکتری در نیم‌رخ خاک وجود داشته است.

اختلاف سطح زیر دو نمودار محلول خاک در عمق ۱۵ سانتی‌متر زیر قطره‌چکان و زهاب خروجی از ستون آبیاری قطره‌ای سطحی در اوایل دورهٔ آزمایش نشان‌دهندهٔ عدم حذف باکتری بین دو لایه و به عبارت دیگر رشد و تکثیر باکتری است. اما در ادامهٔ آزمایش مشاهده شد تعداد باکتری در عمق ۱۵ سانتی‌متری 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 فاصلهٔ بین دو موقعیت نمونه‌برداری است. به عبارت دیگر، بیشترین میزان حذف باکتری در نیم‌رخ خاک از اواسط دورهٔ آزمایش و تقریباً هم‌زمان با افزایش فاصلهٔ 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 فاصلهٔ بین دو عمق ۲۰ و ۴۰ سانتی‌متر پالایش فیزیکی در ستون خاک رخ داده و غلظت باکتری در عمق ۴۰ سانتی‌متر کمتر از عمق ۲۰ سانتی‌متر بوده است. Kouzentsov *et al* (2004) در تحقیقات خود اعلام کردند باکتری فکال کلی‌فرم 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 کلی‌فرم فقط در لایهٔ ۳ تا ۵ سانتی‌متری بالای خاک مشاهده شده است.

با مقایسهٔ تعداد باکتری‌ها در پساب ورودی، محلول خاک در عمق ۱۵ سانتی‌متر زیر قطره‌چکان، و زهاب خروجی از ستون می‌توان گفت از اواسط دورهٔ آزمایش تا انتهای آن تعداد باکتری‌ها در زهاب خروجی نسبت به محلول خاک در عمق ۱۵ سانتی‌متری 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 سانتی‌متری 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.

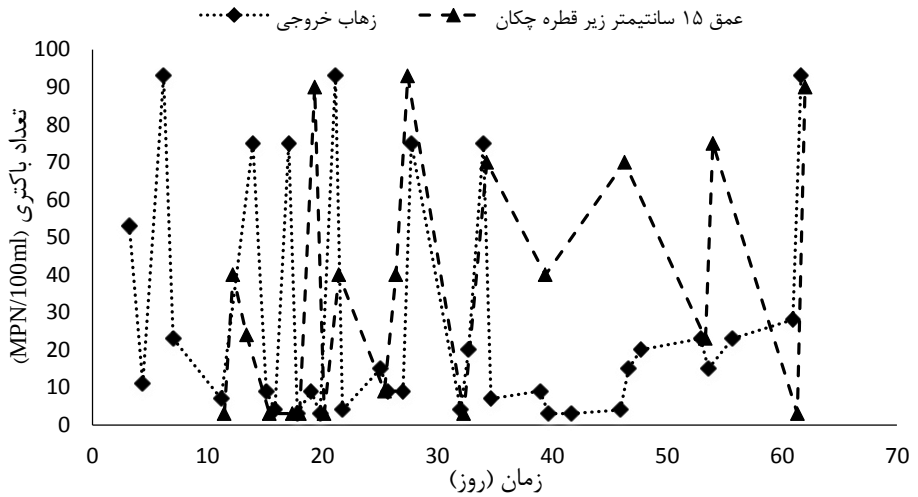


شکل ۶. تعداد باکتری در زهاب خروجی و پساب ورودی در ستون آبیاری قطره‌ای سطحی

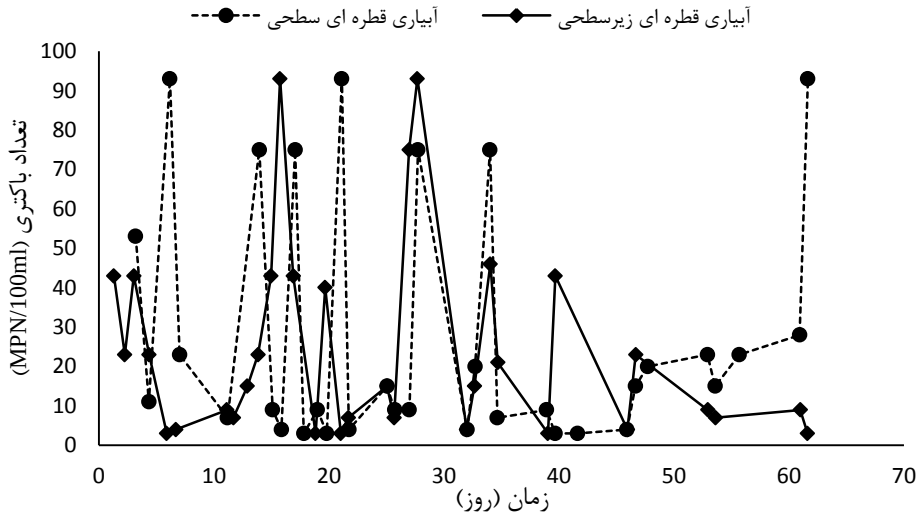


شکل ۷. تعداد باکتری در محلول خاک در عمق ۱۵ سانتی‌متری زیر قطره‌چکان و پساب ورودی در ستون آبیاری قطره‌ای سطحی

www.SID.ir



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

مقایسهٔ تعداد باکتری در زهاب خروجی و لایهٔ سطحی ستون‌های آزمایشی

با مقایسهٔ 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[1] 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 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 عمدهٔ حذف باکتریْ غیرفعال‌سازی و جذب به سطح مشترک آب- هوا بوده است. همان‌گونه که در شکل‌های پیشین مشاهده می‌شود، مقدار باکتری در لایهٔ نزدیک به سطح خاک در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی نسبت به آبیاری قطره‌ای سطحی آلودگی کمتری دارد. همچنین مقایسهٔ 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 لایهٔ سطحی تفاوتی معنادار وجود دارد.

1. Paired Student's t-test

www.SID.ir

ضریب فیلتراسیون (λ_f)

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

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

$C_{0(avg)}$ و $C_{(avg)}$ به ترتیب متوسط غلظت باکتری در پساب ورودی و زهاب خروجی (MPN/ml)، Z ضخامت لایهٔ خاک (m)، و λ_f ضریب فیلتراسیون (m^{-1}) است. در جدول ۴ مقادیر ضریب فیلتراسیون برای دو عمق ۱۵ و ۶۰ سانتی‌متر در آبیاری قطره‌ای سطحی و ۱۰ و ۶۰ سانتی‌متر در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی می‌آید. مشاهده می‌شود که بیشترین مقدار ضریب فیلتراسیون در ۱۰ سانتی‌متر ابتدایی ستون آبیاری قطره‌ای زیرسطحی و کمترین مقدار آن در ۱۵ سانتی‌متر ابتدای ستون آبیاری قطره‌ای سطحی رخ داده است. مقادیر ضریب فیلتراسیون در جدول ۴ مطالب بخش‌های قبل را تأیید می‌کند. λ_f در ۱۵ سانتی‌متر ابتدای ستون خاک آبیاری قطره‌ای سطحی کمترین مقدار را دارد. همان‌گونه 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 بررسی‌شده وجود ندارد. نکتهٔ دیگر اینکه بیشترین مقدار باکتری در ۱۰ سانتی‌متر ابتدای ستون آبیاری قطره‌ای زیرسطحی حذف شده است. همان‌گونه که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، رشد باکتری در ستون آبیاری قطره‌ای زیرسطحی بعد از ۱۰ سانتی‌متر ابتدایی رخ داده است. شدت جریان زیاد در مجاورت قطره‌چکان به‌سرعت باکتری‌ها را به لایه‌های بعدی می‌برد و به همین دلیل پالایش در لایهٔ نزدیک قطره‌چکان حداقل است. این نتیجه با نتایج Mosaddeghi *et al* (2010) مطابقت دارد. آن‌ها بیان کردند که شدت جریان زیاد به‌سرعت ذرات کود را منتقل می‌کند و مقدار پالایش در لایهٔ 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.

جدول ۴. مقادیر ضریب فیلتراسیون در اعماق مختلف ستون‌های آزمایشی

عمق نمونه‌برداری (سانتی‌متر)	آبیاری قطره‌ای سطحی	آبیاری قطره‌ای زیرسطحی
	λ_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 کلی‌فرم در دو ستون آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی مطالعه شد. نتایج نشان داد افت‌وخیزهای زیادی در تعداد باکتری‌ها در هر دو ستون وجود دارد. از علل اصلی این افت‌وخیزها می‌توان به مهیابودن شرایط برای رشد باکتری، تغییر در شرایط جریان، جداشدن باکتری‌های جذب‌شده از سطح ذرات جامد و ورود به فاز محلول، و وجود نقاط مختلف جذب برای باکتری‌ها اشاره کرد. با مقایسهٔ ستون آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی در پژوهش حاضر مشاهده شد اختلاف معناداری بین دو شیوهٔ 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 استفاده‌شده برای کشاورزی، برنامهٔ آبیاری (دور و مدت آبیاری)، و شدت جریان توجه شود. نامناسب‌بودن 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 تصفیهٔ 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 استفادهٔ طولانی‌مدت از فاضلاب در آبیاری مطمئن شد.

Archive of SID

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.

www.SID.ir

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., Sinegani, 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., 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.

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 concepts-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.

Archive of SID

www.SID.ir