تأثیر آبیاری با فاضلاب خانگی خام ورودی و پساب تصفیه ثانویه تصفیه خانه فاضلاب شهرک اکباتان بر میزان انتقال فسفر به زیر عمق توسعه ریشه‌ها

علیرضا حسن‌اقلی[۱] ، عبدالمجید لیاقت[۲] و مهدی میراب زاده[۲]

چکیده

از جمله نتایج به کارگیری فاضلاب خانگی خام و پساب تصفیه شده آن در کشاورزی و آبیاری اراضی زراعی، اضافه شدن انواع ترکیبات شیمیایی به خاک علاوه بر تأمین آب مورد نیاز گیاه می‌باشد. با تدارک عناصر کودی از این طریق به افزایش حاصلخیزی خاک کمک شده و در نتیجهٔ تقلیل مصرف کود، به کاهش هزینه‌های عمدهٔ جاری در فعالیت‌های کشاورزی منجر می‌شود. بنابراین به منظور بررسی کارایی مجموعه خاک و گیاه در جذب املاح و آلاینده‌های موجود در فاضلاب و پساب (از جمله ترکیبات فسفردار) و نیز تعیین میزان و نحوه انتقال آنها به زیر عمق توسعه ریشه‌ها در نتیجه عملیات آبیاری، تحقیق حاضر به انجام رسید. در همین راستا با بهره‌گیری از لایسیمتر به مدت دو سال از فاضلاب خانگی خام ورودی و پساب تصفیه ثانویه خروجی از تصفیه خانه فاضلاب شهرک اکباتان برای آبیاری سبزی‌هایی مانند گوجه فرنگی، جعفری و هویج استفاده شد. این تحقیق با منظور نمودن آب چاه به عنوان تیمار شاهد و بهره گیری از آزمایش آماری فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی به اجرا درآمد. نتایج به‌دست آمده بیانگر آن بود که میزان انتقال فسفر به عمق خاک در نتیجه کاربرد فاضلاب خام بین ۰/۹-۳/۵۶ درصد و در پساب تصفیه شده بین ۱/۰۳- ۴/۱۵ درصد غلظت فسفر ورودی توسط آب آبیاری در نوسان است. با محاسبه بیلان جرمی، میزان حذف فسفر از فاضلاب و پساب توسط مجموعه خاک و گیاه بین ۹۷/۲ تا ۹۹/۹ درصد برآورد گردید. حداکثر غلظت فسفات در طول مدت دو سال آزمایش، در زه‌آب خروجی از لایسیمترهای آبیاری شده با فاضلاب خام و به میزان ۰/۲۱ میلی‌گرم بر لیتر مشاهده شد که این میزان، بسیار کمتر از مقدار فسفات مجاز از نظر استاندارد سازمان حفاظت محیط زیست ایران جهت تخلیه پساب به منابع آب سطحی (۶/۰ میلی‌گرم برلیتر) و تنها در حدود ۳/۵ درصد آن می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: فاضلاب‌خانگی، فاضلاب‌خام، پساب تصفیه ثانویه، فسفر، آبیاری، زه آب، لایسیمتر

مقدمه

به کارگیری فاضلاب‌ها و پساب حاصل از تصفیه آنها در امر آبیاری محصولات کشاورزی، از جمله راه کارهای رویارویی با مسأله بحران آب به شمار آمده که در سطح وسیعی، بخصوص در مناطق خشک و نیمه خشک و درگیر با مشکل کم آبی مورد توجه خاص قرار گرفته است. فاضلاب‌های شهری و خانگی با

۱. استادیار پژوهشی مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، کرج

۲. دانشیاران مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه تهران (پردیس کشاورزی کرج)

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1385.10.4.3.9]

ترکیبی مشتمل بر ۹۹/۹ درصد آب و ۰/۱ درصد مخلوطی از انواع مواد آلی، معدنی و گازها، جزء آب‌های نامتعارف یا آب‌های با کیفیت پایین به شمار می‌آیند. البته این امر دلیلی بر غیر قابل مصرف بودن این نوع آب‌ها نبوده، بلکه خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آنها موجب می‌شود تا ضمن کاربرد، عملیات مدیریتی ویژه‌ای مورد نیاز باشد که در استفاده از آب‌های با کیفیت مناسب معمول نیست (۳، ۴ و ۱۵).

از جمله مهم‌ترین مواد موجود در فاضلاب‌ها می‌توان به عناصر کودی مورد نیاز گیاه (شامل ازت، فسفر و پتاسیم) اشاره نمود. این عناصر علاوه بر تأمین نیاز غذایی محصول، در صورت حضور در غلظت‌های بالا و مازاد بر احتیاج گیاه می‌توانند آثار منفی از خود بر جای گذارند. مواردی مانند افزایش بیش از حد رشد سبزینه‌ای، تأخیر در تولید محصول و یا توقف رشد زایشی گیاه و کاهش کیفیت محصول از آن جمله است. هم‌چنین احتمال خطر آلودگی منابع آب سطحی و زیرزمینی نیز همواره وجود دارد (۳ و ۱۳). تأمین عناصر کودی توسط فاضلاب از آنجا اهمیت می‌یابد که اصلاح اراضی کشاورزی و افزایش حاصلخیزی آنها، از عمده‌ترین هزینه‌های جاری در تمامی فعالیت‌های کشاورزی به شمار می‌آید (۲ و ۶).

فسفر یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر در تغذیه باکتری‌ها و گیاهان است و پس از ازت، دومین عنصر کودی با اهمیت فاضلاب به شمار می‌رود. فسفر معمولاً به دو شکل معدنی و آلی در فاضلاب یافت می‌شود. ترکیبات معروف فسفر در فاضلاب و پساب شامل ارتوفسفات و پلی‌فسفات می‌باشد (۹، ۱۷ و ۱۹). میانگین غلظت فسفر در فاضلاب‌های خانگی در حدود ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر گزارش شده است که نزدیک به ۷۰ درصد آن محلول است. فسفر در مرحلهٔ تصفیه ثانویه فاضلاب‌های شهری، غلظتی بین ۶ تا ۱۵ میلی‌گرم بر لیتر (۱۵ تا ۳۵ میلی‌گرم بر لیتر P_2O_5) را دارا می‌باشد (۱۳، ۱۴ و ۱۸). حدود ۳۰ تا ۵۰ درصد فسفر فاضلاب ناشی از فضولات و ۳۰ تا ۵۰ درصد آن مربوط به مصرف مواد پاک کننده در امور بهداشتی منازل و رستوران‌ها می‌باشد. میانگین دفع سرانه فسفر حدود ۵۰۰ گرم در سال تخمین زده شده و میانگین سالانه فسفر ناشی از مصرف پاک کننده‌های فسفردار برای هر نفر ۱۱۰۰ گرم برآورد شده است (۳ و ۷).

فسفر خاک تقریباً منحصر به ارتوفسفات است که در آن یک اتم مرکزی فسفر به وسیلهٔ چهار اتم اکسیژن احاطه شده و پیوند خورده است. بیشتر فسفات‌های خاک، نمک‌های فسفریک اسید (H_3PO_4) هستند. هم ترکیبات آلی و هم ترکیبات معدنی فسفر در خاک تشخیص داده شده‌اند. فسفات در محلول خاک علاوه بر فسفات‌های آلی محلول، به شکل یون‌های $H_2PO_4^-$ یا HPO_4^{2-} نیز وجود دارد. این موضوع ناشی از تفکیک فسفریک اسید در گسترهٔ pH معمول خاک‌هاست (۸).

اثر مقادیر زیاد فسفر در خاک در مقایسه با عناصر دیگر، تأثیر کمتری را بر رفتار خاک از خود بر جای می‌گذارد، زیرا با اجرای عملیات آبیاری با فاضلاب و پساب ابتدا غلظت فسفر در محلول خاک افزایش یافته، بنابراین در نتیجه جذب سطحی فسفر توسط ذرات خاک (بخصوص رس) و انجام واکنش‌های ترسیبی با آهن، آلومینیم، کلسیم و کربنات‌ها و ایجاد نمک‌های نامحلول، میزان فسفر موجود در محلول خاک به سرعت کاهش می‌یابد. هم‌چنین جذب گیاهی نیز مقدار فسفر موجود در خاک را (البته با سرعت کمتری در مقابل واکنش‌های شیمیایی) کاهش می‌دهد (۸، ۱۰، ۱۵ و ۱۶). البته قابلیت خاک‌های مختلف در نگه‌داری فسفر متفاوت است. آنیون‌های فسفات توسط واکنش‌های جذب سطحی و ترسیب در سیستم خاک نگه‌داری شده و بنابراین خاک‌های ریز بافت‌تر، مقدار فسفر بیشتری در مقایسه با خاک‌های درشت دانه‌تر حفظ می‌کنند (۸ و ۱۶).

فسفر حساس‌ترین عنصر غذایی نسبت به pH خاک است. در محدوده اسیدی، $H_2PO_4^-$ یا یون ارتوفسفات اولیه غالب بوده و در pHهای کمتر از ۵/۵، یون‌های آهن و آلومینیم با فسفات ترکیب شده و به‌صورت رسوبات نامحلول در می‌آیند. در محدوده قلیایی HPO_4^{2-} یا یون ارتوفسفات ثانویه فراوان بوده و در pHهای بالاتر از ۷/۰ که عموماً یون‌های کلسیم و منیزیم فعال فراوانی وجود دارند، ترکیبات نامحلول فسفات‌های کلسیم

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1385.10.4.3.9]

و منیزیم به وجود می‌آید. از آنجا که خاک‌های ایران عمدتاً آهکی می‌باشند، مورد اخیر اهمیت بیشتری دارد (۹ و ۱۶). فعالیت یون‌های فلزی به طور غیر مستقیم به pH و پتانسیل کاکس (یون‌های Fe^{3+})، pH و یا فعالیت سیلیکات (یون‌های Al^{3+}) و فشار جزئی CO_2 و خصلت قلیایی (Ca^{2+}) بستگی دارد (۸). مطالعات نشان داده است که بهترین pH خاک برای جذب فسفر به وسیله گیاه بین ۶-۷ است. در کشور ما، خاک‌هایی با چنین اسیدیته‌ای گسترش چندانی ندارند (۸، ۹ و ۱۶).

بررسی‌ها نشان داده است که معمولاً کمتر از ۳/۰ درصد کل فسفری که سالانه به خاک افزوده می‌شود، به آب‌های زه‌کشی راه می‌یابد. مشکلی که در صورت رسیدن فسفر به آب‌های سطحی اتفاق می‌افتد رشد جلبک‌هاست که در صورت تجاوز از مقدار ۵/۰ میلی‌گرم بر لیتر (بر حسب PO_4-P) می‌تواند آلوده کننده باشد. بنابراین، سوء رفتار خاک در نتیجهٔ زیادی مقدار فسفر، در عمل به امکان وجود غلظت‌های نامطلوب فسفر در آب زه‌کشی شده از نیمرخ خاک محدود می‌شود (۷ و ۸). تحقیقات نشان داده است که در سیستم‌های آبیاری محصولات کشاورزی با فاضلاب، کاربرد آب آبیاری به میزان ۲/۵-۷/۵ سانتی‌متر در هفته منجر به حذف تقریباً کامل فسفر از آب نفوذ یافته به درون خاک شده، بنابراین مقادیری از فسفر در رواناب سطحی باقی مانده است. البته کارایی حذف سیستم بستگی به میزان بار فسفر فاضلاب و خصوصیات خاک منطقه دارد (۱۶). کاردوس و هوک در سال ۱۹۷۶ گزارش کرده‌اند که در دو مزرعه، ذرت مجزا با خاک لوم رسی، آبشویی فسفر به عمق ۱۲۰ سانتی‌متری خاک به‌ترتیب از ۱/۰ و ۰/۱ درصد فسفر به کار رفته کمتر است (۷).

مقدار فسفر کل موجود در خاک بین ۰/۲ تا ۰/۸ گرم در کیلوگرم خاک خشک و یا ۵۰۰ - ۲۰۰۰ کیلوگرم بر هکتار در لایهٔ ۲۰ سانتی‌متری خاک سطحی تغییر می‌کند (۱۵). غلظت فسفر قابل انحلال در آب بر اساس نظر ریدن و پرات بین ۰/۰۳ تا ۳/۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک خشک در نوسان است، ولی عمدهٔ مقادیر مشاهده شده کمتر از ۱/۰ میلی‌گرم فسفر در کیلوگرم خاک گزارش شده است (۱۵). هوک مقدار فسفر موجود در محلول (عصاره) حاصل از خاک‌های عمقی کوددهی نشده را بین ۰/۰۰۱ تا ۰/۱ میلی‌گرم بر لیتر گزارش می‌نماید (۱۵). هوک عقیده دارد که کاربرد طولانی مدت فاضلاب در آبیاری، سمیتی از نظر فسفر ایجاد ننموده و فسفر موجود در فاضلاب به هیچ وجه برای گیاه مضر نخواهد بود (۱۶).

زیادی فسفر در خاک و کاربرد بی‌رویه کودهای فسفاته، رشد گیاه را به طور غیر مستقیم تحت تأثیر قرار می‌دهد. مثلاً علائم کمبود روی در گیاه را می‌توان در مواردی به زیادی فسفر ربط داد که پیامد ناگوار آن، گسترش علائم کمبود روی در انسان است (۵ و ۷). البته این موضوع وقتی صادق است که فسفات‌های نسبتاً حل‌پذیر وجود داشته باشند. از نقطه نظر علمی می‌توان از رسوب $Zn_3(PO_4).4H_2O$ در توضیح علت کمبود روی در خاک‌های شالیزارهای آهکی نام برد (۸).

با توجه به حجم گسترده کاربرد فاضلاب‌های شهری و خانگی در اراضی زراعی اطراف شهرهای بزرگ کشور، امروزه تحقیقات منطقه‌ای در این خصوص و مشاهده جنبه‌های مختلف آبیاری با فاضلاب و پساب از اهمیت بسزایی برخوردار می‌باشد. به دلیل وجود برخی تفاوت‌ها در شرایط اقلیمی، گیاهی، اجتماعی- فرهنگی، کیفیت خاک و سایر عوامل و متغیر بودن خصوصیات فاضلاب از منطقه‌ای به منطقه دیگر، تأکید بر به کارگیری دستور العمل‌های ارائه شده در دیگر مناطق جهان مشکلاتی را به دنبال داشته و در دراز مدت، صدماتی را بر منابع آب و خاک وارد می‌سازد (۳). به همین دلیل در طی یک برنامه تحقیقاتی دو ساله در استان تهران، شاخص‌های عمده در آبیاری با فاضلاب‌های خانگی و پساب حاصل از تصفیه آنها مورد بررسی قرار گرفت که بخشی از نتایج به‌دست آمده، در قالب این مقاله ارائه می‌گردد. هدف در این بخش از تحقیق، بررسی و تعیین میزان فسفر وارد شده به خاک در نتیجه آبیاری با فاضلاب‌های خانگی خام ورودی و پساب تصفیه ثانویه خروجی از تصفیه خانه فاضلاب شهرک اکباتان و نیز مشاهده چگونگی و میزان انتقال فسفر به زیر عمق توسعه ریشه‌ها با

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1385.10.4.3.9]



شکل ۱. مجموعه لایسیمترهای کارگذاری شده در مزرعه

گذشت زمان و در مقایسه با تیمار شاهد (آب چاه) می‌باشد.

مواد و روش‌ها

جهت اجرای این تحقیق، تعدادی لایسیمتر زه‌کش‌دار طراحی و ساخته شد. لایسیمترها به شکل استوانه و از جنس پلی‌اتیلن ضخیم با ارتفاع ۱۰۰ سانتی‌متر و قطر ۶۰ سانتی‌متر بودند. پیش از پر نمودن لایسیمترها از خاک، یک لوله زه‌کش از جنس PVC در بخش تحتانی هر یک از لایسیمترها تعبیه شد و جهت اجتناب از ورود ذرات خاک به درون لوله زه‌کش، از یک لایه صافی ژئوتکستایل مناسب در اطراف آن استفاده گردید. شکل ۱ مجموعه لایسیمترهای آماده بهره‌برداری را نشان می‌دهد.

لایسیمترها از خاک زراعی منطقه با بافت لوم رسی (Clay loam) و بدون اجرای عملیات تراکمی خاص و تنها پس از عبور دادن خاک از الک با قطر روزنه‌های یک سانتی‌متر (به منظور حصول یک‌نواختی بیشتر) پر شدند. لازم به ذکر است که عدم اجرای عملیات تراکم روی خاک مورد استفاده، به نوعی در جهت اطمینان خاطر از نظر عملکرد مناسب مجموعه خاک - گیاه در حذف آلاینده‌ها، در نتیجه ایجاد شرایط بحرانی در اجرای عملیات آبیاری با فاضلاب و پساب می‌باشد. در یک چنین موقعیتی و در صورت حصول نتایج رضایت بخش از نظر کنترل انتقال آلاینده‌ها به عمق خاک، در شرایط طبیعی (با خاک متراکم‌تر و دست نخورده و دانه بندی مشابه و حتی ریزتر) و به جز در مواقع استثنایی، به طور قطع نتایج قابل قبول‌تری حاصل خواهد شد. مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک در جداول ۱ و ۲ قابل مشاهده است.

با عنایت به تنوع گیاهان کشت شده در اطراف شهر تهران و به منظور دخالت دادن شرایط موجود کاربرد فاضلاب‌ها در امر آبیاری در این شهر، اقدام به کشت گیاهانی در لایسیمترها شد که معمولاً به صورت خام مورد استفاده قرار می‌گیرند. به همین منظور سه نوع سبزی خوراکی از قرار: جعفری (سبزی برگی)، هویج (سبزی ریشه‌ای) و گوجه فرنگی (صیفی سالادی) در لایسیمترها کاشته شد. به منظور تأمین فاضلاب خانگی و پساب مورد نیاز، ابتدا بررسی‌های لازم بر چگونگی تولید و جمع‌آوری فاضلاب‌ها در سطح شهر تهران به عمل آمد و در نهایت، تصفیه خانه فاضلاب شهرک اکباتان به عنوان منبع تأمین فاضلاب انتخاب گردید. ضمناً با در نظر گرفتن شرایط فعلی کاربرد فاضلاب‌های خام شهری در جنوب شهر تهران و نیز آینده این منطقه پس از تکمیل شبکه جمع آوری و تصفیه فاضلاب، از هر دو نوع "فاضلاب خام ورودی" و "پساب

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1385.10.4.3.9]

جدول ۱. مشخصات فیزیکی خاک مورد استفاده

درصد ذرات خاک			درصد رطوبت وزنی		جرم مخصوص(g/cm^3)		تخلخل	نفوذپذیری متوسط
رس	سیلت	ماسه	FC	PWP	ظاهری	حقیقی	کل	خاک* (mm/hr)
۳۷/۶	۳۷/۵	۲۴/۹	۱۸/۸۶	۷/۲۰	۱/۱۶	۲/۴۲	۰/۵۲	۳/۱۰

* : متوسط نفوذپذیری خاک پیش از شروع تحقیق، اندازه گیری شده به روش بار ثابت

جدول ۲. مشخصات شیمیایی خاک مورد استفاده

EC_e dS/m	pH	کاتیون‌های محلول (meq/L)				جمع کاتیون‌ها	آنیون‌های محلول (meq/L)				جمع آنیون‌ها	SAR
		K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}		SO_4^{2-}	Cl^-	HCO_3^-	CO_3^{2-}		
۱/۲۵	۷/۲	۰/۳	۲/۹	۸/۰	۶/۰	۱۷/۲	۲/۸	۸/۰	۵/۶	–	۱۶/۴	۱/۰۸

درصد خطا= ۲/۴ درصد، که در محدوده مجاز حداکثر ۵/۰ درصدی (برای مجموع آنیون‌های مابین meq/L ۸۰۰–۱۰) قرار دارد. درصد خطا از رابطه: ۱۰۰×[(مجموع آنیون‌ها + مجموع کاتیون‌ها) / (مجموع آنیون‌ها – مجموع کاتیون‌ها)] = P.D. قابل محاسبه است (۸).

تصفیه ثانویه خروجی" از تصفیه خانه مذکور به عنوان آب آبیاری استفاده شد. جدول ۳ کیفیت انواع آب‌های آبیاری مورد استفاده را نشان می‌دهد.

با توجه به ماهیت تحقیق، این آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح آماری کاملاً تصادفی به اجرا درآمد. تیمارهای موجود عبارت بودند از آب آبیاری در سه منبع: فاضلاب خام، پساب تصفیه ثانویه و آب چاه (به‌عنوان شاهد) و محصول در سه نوع: گوجه فرنگی، هویج و جعفری. به منظور حصول شرایط مناسب آماری، آزمایش در سه تکرار انجام پذیرفت و در مجموع تعداد ۲۷ عدد لایسیمتر طراحی و ساخته شد (طرح آماری۳ × ۳ × ۳) و پس از نصب در محل آزمایش، مورد استفاده قرار گرفت. ضمناً در طول تحقیق از هیچ نوع کودی اعم از شیمیایی یا دامی استفاده نگردید. عملیات آبیاری لایسیمترها مطابق با عرف محلی و به‌طور متوسط دو بار در هفته در دوره حداکثر مصرف آب و یک‌بار در هفته در اواخر فصل زراعی، با عمق آب حدوداً ۷ – ۸ سانتی‌متر در هر آبیاری و به روش سطحی– غرقابی انجام گرفت. بیشترین حجم آب کاربردی سالانه در لایسیمترها در حدود ۱۰۰۰ لیتر و در کشت گوجه فرنگی بود که در این حالت، ارتفاع آب آبیاری بیشتر از مقدار محاسبه شده نیاز آبی ناخالص گیاه می‌باشد. برای هر نوبت آبیاری، فاضلاب خام و تصفیه شده به میزان مورد نیاز از تصفیه خانه شهرک اکباتان به محل اجرای تحقیق حمل می‌شد و بلافاصله از آن برای آبیاری استفاده می‌شد. آب معمولی نیز از یک حلقه چاه در نزدیکی محل اجرای آزمایش تهیه می‌گردید.

اندازه‌گیری‌های انجام شده در مدت اجرای آزمایش شامل تعیین مقادیر ترکیبات معدنی و آلی فسفر موجود در فاضلاب خام، پساب تصفیه شده و آب چاه، در تناوب‌های مناسب در ادوار فصل آبیاری در طول دو سال اجرای تحقیق (سال‌های ۱۳۷۸ و۱۳۷۹) و نیز تعیین این عوامل در زه‌آب‌های خروجی از زه‌کش لایسیمترها بود. نمونه برداری‌ها در طول فصل کشت با فواصل زمانی تقریباً یکسان، از آب‌های مورد استفاده در آبیاری و نیز از زه‌آب خروجی تمامی لایسیمترها صورت پذیرفت. اولین نمونه برداری در ابتدای دومین هفته از شروع فصل کشت و آخرین نمونه برداری نیز در انتهای فصل و پیش از برداشت نهایی محصولات و خاتمه عملیات آبیاری در هر دو

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1385.10.4.3.9]

جدول ۳. کیفیت شیمیایی فاضلاب خام و پساب تصفیه شده شهرک اکباتان و آب چاه مورد استفاده در عملیات آبیاری

پارامتر مورد بررسی	واحد	نوع آب آبیاری		
		فاضلاب خام	پساب	آب چاه
BOD_5	mg/L	۲۰۴/۳۰	۱۳/۳۰	۰/۰۰
COD	mg/L	۳۷۱/۷۰	۲۷/۰۰	۲۰/۰۰
TSS	mg/L	۲۲۹/۸۵	۱۱/۵۰	۲/۸۰
EC_W	dS/m	۰/۷۷	۰/۵۹	۰/۶۶
pH	–	۷/۱۲	۶/۹۹	۷/۵۱
Na^+	meq/L	۲/۴۵	۲/۳۳	۱/۶۹
Ca^{2+}	meq/L	۴/۵۰	۳/۵۰	۳/۰۰
Mg^{2+}	meq/L	۴/۰۰	۲/۰۰	۴/۰۰
K^+	meq/L	۰/۵۳	۰/۴۳	ناچیز
Cl^-	meq/L	۲/۱۲	۱/۸۵	۱/۹۸
HCO_3^-	meq/L	۵/۸۰	۳/۲۰	۳/۲۵
SO_4^{2-}	meq/L	۳/۳۰	۳/۴۰	۲/۸۶
SAR	$(meq/L)^{0.5}$	۱/۱۹	۱/۴۱	۰/۹۰
Total N	mg/L	۴۷/۰۲	۱۵/۴۴	۵/۹۲
Total P	mg/L	۷/۹۱	۴/۶۱	۰/۰۷۳

سال اجرای تحقیق انجام پذیرفت. کلیه آزمایش‌ها در آزمایشگاه آب، خاک و فاضلاب مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی و آزمایشگاه شیمی فاضلاب تصفیه خانه شهرک اکباتان و مطابق با استاندارد APHA (American Public Health Association) به انجام رسیده است (۱۲).

نتایج و بحث

مقدار فسفر موجود در فاضلاب خام، پساب تصفیه ثانویه و آب چاه کاربردی

مقادیر متوسط فسفر کل و فسفر معدنی (بر حسب PO_4-P) موجود در فاضلاب خام، پساب تصفیه شده و آب چاه کاربردی در مدت اجرای آزمایش‌ها و دامنه تغییرات هر یک از آنها بر حسب نوع آب آبیاری، در جدول ۴ قابل مشاهده است.

از بررسی ارقام موجود در متن جدول ۴ می‌توان چنین نتیجه‌گیری نمود که در حین فرایند تصفیه فاضلاب در تصفیه خانه شهرک اکباتان، به‌طور متوسط در حدود ۵۵ درصد فسفات و ۵۸/۳ درصد فسفر کل فاضلاب خام از آن جدا می‌شود. عواملی چند در این کاهش دخالت دارند، بدین طریق که مقادیری از فسفر موجود در فاضلاب در حین فرایند تصفیه توسط باکتری‌ها به مصرف می‌رسد. بخشی از فسفر نیز به همراه سایر مواد و بخصوص مواد آلی، در حوضچه‌های ته‌نشینی رسوب نموده و یا در نتیجه جمع آوری مواد شناور از سطح حوضچه‌ها (به‌صورت کف) از پساب جدا می‌گردد (۱۷ و ۱۸). هم‌چنین از نظر کمیّت انواع ترکیبات فسفر، به طور متوسط در حدود ۶۳ درصد فسفر موجود در فاضلاب خام از نوع فسفاته است. این نسبت در پساب به‌طور متوسط ۵۹/۷ درصد و در آب چاه ۹۰/۴ درصد می‌باشد.

سازمان کشاورزی و خواربار جهانی – فائو (FAO) حد

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1385.10.4.3.9]

جدول ۴. دامنه تغییرات فسفر کل و فسفات موجود در فاضلاب خام و پساب تصفیه ثانویه شهرک اکباتان و آب چاه مورد استفاده طی سال‌های اجرای تحقیق

ردیف	نوع فسفر	فاضلاب خام (mg/L)		پساب تصفیه شده (mg/L)		آب چاه (mg/L)	
		متوسط	دامنه تغییرات	متوسط	دامنه تغییرات	متوسط	دامنه تغییرات
۱	فسفر فسفاتی (PO_4-P)	۴/۹۸	۲/۸۲–۸/۰۸	۲/۷۵	۱/۰۶–۴/۵۳	۰/۰۶۶	۰/۰۶۱–۰/۰۷۵
۲	فسفرکل(Total P)	۷/۹۱	۵/۶۱–۱۲/۸۷	۴/۶۱	۲/۳۱–۷/۲۹	۰/۰۷۳	۰/۰۶۴–۰/۰۸۱

مجاز فسفات موجود در پساب تصفیه ثانویه کاربردی جهت آبیاری را تا ۴/۱۰ میلی‌گرم بر لیتر تعیین نموده است، لیکن برای فسفر کل میزانی را ارائه نمی‌نماید (۳ و ۷)، ضمن این‌که استاندارد ایران مقداری را در این خصوص ارائه نمی‌دهد (۲). همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد مقدار متوسط فسفات پساب خروجی از تصفیه خانه شهرک اکباتان کمتر از حد مجاز ارائه شده توسط FAO می‌باشد، بنابراین برخی از مقادیر اندازه‌گیری شده تا حدودی به آن نزدیک می‌شود. میزان متوسط فسفات فاضلاب خام شهرک اکباتان تا حدودی بیش از مقدار مجاز FAO می‌باشد و تعداد این‌گونه مشاهده‌ها نیز قابل توجه است.

بررسی میزان ترابری فسفر به عمق خاک

نتایج حاصل از تجزیه نمونه‌های آب آبیاری و زه‌آب جمع آوری شده از نظر میزان فسفر کل، مربوط به دو سال اجرای آزمایش در جداول ۵ و ۶ ارائه شده است. این جداول مشتمل بر متوسط نتایج به‌دست آمده از هر سه لایسیمتر مشابه در هر نمونه برداری (از نظر نوع آب آبیاری و نوع گیاه) بوده که از طریق آنها می‌توان تغییرات نسبی و درصد انتقال فسفر به زیر عمق توسعه ریشه‌ها را در مقایسه با مقدار اولیه ورودی به خاک ملاحظه نمود.

از بررسی مقادیر به‌دست آمده چنین نتیجه‌گیری می‌شود که بیشترین میزان فسفر انتقال یافته به عمق نصب زه‌کش‌ها، در زه آب لایسیمترهای تحت آبیاری با فاضلاب خام و کمترین مقادیر نیز در لایسیمترهای تحت آبیاری با آب چاه اتفاق افتاد. فسفر اندازه‌گیری شده در اولین نمونه برداری از زه‌آب تمامی لایسیمترها در سال نخست اجرای آزمایش بسیار نزدیک به هم و مستقل از نوع آب آبیاری بود که دلالت بر حضور مقادیر یکسانی از فسفر قابل انحلال در خاک تمامی لایسیمترها داشت که در ابتدای تحقیق و به همراه زه‌آب از آنها خارج می‌شد. هرچند در اولین نمونه برداری در ابتدای فصل و علی‌رغم این‌که لایه فوقانی خاک لایسیمترها قادر بود تا با قابلیت بالایی فسفر موجود در فاضلاب و پساب را در خود نگه داشته و مانع از نفوذ آن به عمق شود، ولی چون برای پر نمودن لایسیمترها از خاک زراعی استفاده شد که خود دارای مقادیری فسفر قابل انحلال می‌باشد، بنابراین با حرکت آب در نیمرخ خاک، این بخش از فسفر (بخصوص از خاک قرار گرفته در بخش تحتانی لایسیمترها و در مجاورت زه‌کش‌ها) به همراه زه آب از راه لوله‌های زه‌کش از لایسیمترها خارج شده و این وضعیت مستقل از نوع آب آبیاری و در تمامی لایسیمترها اتفاق افتاد. البته چنین شرایطی در هیچ یک از نمونه برداری‌های بعدی از زه‌آب لایسیمترها تکرار نشد.

با تداوم عملیات آبیاری لایسیمترها توسط انواع آب مورد استفاده، به‌تدریج تفاوت‌ها از نظر میزان انتقال فسفر به عمق خاک آشکار شد. ملاحظه روند و نحوه تغییرات مقادیر فسفر موجود در زه آب لایسیمترها نشان داد که در سال نخست آزمایش، با تداوم فصل کشت و اجرای عملیات آبیاری، مقدار فسفر اندازه‌گیری شده در زه آب لایسیمترهای تحت آبیاری با

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1385.10.4.3.9]

جدول ۵. میزان فسفر کل (mg/L) در انواع فاضلاب و آب مورد استفاده جهت آبیاری و متوسط آن در زه آب خروجی از زه‌کش لایسیمترها طی سال اول اجرای تحقیق

ردیف	نوع گیاه[a]	نوع آب[b]	نمونه برداری ۱۳۷۸/۲/۱۳			نمونه برداری ۱۳۷۸/۵/۱۰			نمونه برداری ۱۳۷۸/۸/۱۷		
			(۱)	(۲)	(۳)	(۱)	(۲)	(۳)	(۱)	(۲)	(۳)
۱	To.	R	۷/۷۱	۰/۰۷	۰/۹۱	۶/۰۲	۰/۱۶۸	۲/۷۹	۵/۸۲	۰/۱۲	۲/۰۶
۲	To.	T	۴/۴۱	۰/۰۶۶	۱/۵	۳/۷۷	۰/۱۱۴	۳/۰۲	۳/۴۹	۰/۰۹۵	۲/۷۲
۳	To.	N	۰/۰۷۶	۰/۰۵۹	۷۷/۶۳	۰/۰۶۵	۰/۰۱۹	۲۹/۲۳	۰/۰۷	۰/۰۱	۱۴/۲۹
۴	Pa.	R	۷/۷۱	۰/۰۶۸	۰/۸۸	۶/۰۲	۰/۱۴۸	۲/۴۶	۵/۸۲	۰/۱۰۵	۱/۸
۵	Pa.	T	۴/۴۱	۰/۰۶۲	۱/۴۱	۳/۷۷	۰/۰۹۴	۲/۴۹	۳/۴۹	۰/۰۷۲	۲/۰۶
۶	Pa.	N	۰/۰۷۶	۰/۰۶۷	۸۸/۱۶	۰/۰۶۵	۰/۰۱۷	۲۶/۱۵	۰/۰۷	۰/۰۰۷	۱۰
۷	Ca.	R	۷/۷۱	۰/۰۷۱	۰/۹۲	۶/۰۲	۰/۱۸۵	۳/۰۷	۵/۸۲	۰/۱۳۸	۲/۳۷
۸	Ca.	T	۴/۴۱	۰/۰۶	۱/۳۶	۳/۷۷	۰/۱۲۱	۳/۲۱	۳/۴۹	۰/۱۰۶	۳/۰۴
۹	Ca.	N	۰/۰۷۶	۰/۰۶۴	۸۴/۲۱	۰/۰۶۵	۰/۰۲۱	۳۲/۳۱	۰/۰۷	۰/۰۱۱	۱۵/۷۱

a) نوع گیاه : .To = گوجه فرنگی ، .Pa = جعفری ، .Ca = هویج

b) نوع آب آبیاری کاربردی : R = فاضلاب خام ، T = پساب تصفیه شده ، N = آب چاه (معمولی)

(۱). میزان فسفر کل ورودی، mg/L، در نتیجه به‌کارگیری انواع آب آبیاری

(۲). میزان فسفر کل خروجی، mg/L، اندازه گیری شده در زه آب لایسیمترها

(۳). درصد انتقال، نشان دهنده مقدار فسفر کل مشاهده شده در زه آب زهکش‌ها در مقایسه با مقادیر ورودی توسط آب آبیاری در هر نمونه‌برداری می‌باشد.

جدول ۶. میزان فسفر کل (mg/L) در انواع فاضلاب و آب مورد استفاده جهت آبیاری و متوسط آن در زه آب خروجی از زه‌کش لایسیمترها طی سال دوم اجرای تحقیق

ردیف	نوع گیاه[a]	نوع آب[b]	نمونه برداری ۱۳۷۹/۲/۱۰			نمونه برداری ۱۳۷۹/۵/۸			نمونه برداری ۱۳۷۹/۸/۱۱		
			(۱)	(۲)	(۳)	(۱)	(۲)	(۳)	(۱)	(۲)	(۳)
۱	To.	R	۹/۴۴	۰/۱۴۶	۱/۵۵	۵/۶۷	۰/۱۵۷	۲/۷۷	۱۲/۸	۰/۱۳۱	۱/۰۲
۲	To.	T	۵/۶	۰/۱۰۴	۱/۸۶	۳/۱۸	۰/۱۲۱	۳/۸۱	۷/۲۱	۰/۰۹۲	۱/۲۸
۳	To.	N	۰/۰۸	۰/۰۱۲	۱۵	۰/۰۷۵	۰/۰۱۱	۱۴/۶۷	۰/۰۷۲	۰/۰۰۹	۱۲/۵
۴	Pa.	R	۹/۴۴	۰/۰۸۵	۰/۹	۵/۶۷	۰/۱۴۲	۲/۵	۱۲/۸	۰/۱۱۹	۰/۹۳
۵	Pa.	T	۵/۶	۰/۰۶۸	۱/۲۱	۳/۱۸	۰/۱	۳/۱۴	۷/۲۱	۰/۰۷۴	۱/۰۳
۶	Pa.	N	۰/۰۸	۰/۰۱	۱۲/۵	۰/۰۷۵	۰/۰۰۸	۱۰/۶۷	۰/۰۷۲	۰/۰۰۵	۶/۹۴
۷	Ca.	R	۹/۴۴	۰/۱۵۹	۱/۶۸	۵/۶۷	۰/۲۰۲	۳/۵۶	۱۲/۸	۰/۱۷۴	۱/۳۶
۸	Ca.	T	۵/۶	۰/۱۲	۲/۱۴	۳/۱۸	۰/۱۳۲	۴/۱۵	۷/۲۱	۰/۱۱۲	۱/۵۵
۹	Ca.	N	۰/۰۸	۰/۰۱۷	۲۱/۲۵	۰/۰۷۵	۰/۰۱۴	۱۸/۶۷	۰/۰۷۲	۰/۰۱۱	۱۵/۲۸

a) نوع گیاه : .To = گوجه فرنگی ، .Pa = جعفری ، .Ca = هویج

b) نوع آب آبیاری کاربردی : R = فاضلاب خام ، T = پساب تصفیه شده ، N = آب چاه (معمولی)

(۱). میزان فسفر کل ورودی، mg/L ، در نتیجه به‌کارگیری انواع آب آبیاری

(۲). میزان فسفر کل خروجی، mg/L ، اندازه گیری شده در زه آب لایسیمترها

(۳). درصد انتقال، نشان دهنده مقدار فسفر کل مشاهده شده در زه آب زه‌کش‌ها در مقایسه با مقادیر ورودی توسط آب آبیاری در هر نمونه‌برداری می‌باشد.

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1385.10.4.3.9]

فاضلاب خام و پساب افزایش یافت، ولی با نزدیک شدن به انتهای فصل زراعی تا حدودی از میزان آن کاسته شد. دلیل اصلی این امر را می‌توان در کاهش دفعات و حجم آب آبیاری کاربردی و توسعه سیستم ریشه‌ای و جذب گیاهی جستجو نمود. در آب چاه یک روند نزولی پیوسته از ابتدا تا انتهای فصل کشت قابل مشاهده بود که در اثر ناچیز بودن مقدار فسفر موجود در آب چاه و نگه‌داشت آن توسط خاک و مصرف گیاه به‌وقوع پیوست.

در اولین نمونه برداری انجام شده از زه آب لایسیمترها در سال دوم، افزایش ناچیزی در میزان فسفر اندازه‌گیری شده در زه آب‌ها، در مقایسه با آخرین نمونه برداری سال اول مشاهده شد. این امر می‌تواند به دلیل تجزیه بقایای گیاهی باقی‌مانده از سال اول در خاک و نیز تجزیه و تبدیل مقادیری از فسفر آلی افزوده شده به خاک در نتیجه آبیاری با فاضلاب و پساب به فسفر معدنی و انتقال آن به عمق اتفاق افتاده باشد. البته روند تغییرات میزان فسفر اندازه‌گیری شده در زه آب لایسیمترها و فراز و نشیب‌های آن همانند سال اول اجرای آزمایش‌ها بود و مقادیر به‌دست آمده، تفاوت‌های چشمگیری را از خود نشان نمی‌داد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که مجموعه خاک و گیاه از قابلیت بالایی در نگه‌داشت فسفر و حذف آن از آب آبیاری در طول دو سال اجرای تحقیق برخوردار بوده است. ملاحظه ارقام فسفر اندازه گیری شده در زه آب حاصل از لایسیمترهای تحت آبیاری با فاضلاب‌های خام و تصفیه شده و دامنه تغییرات آنها نشان می‌دهد که حداکثر و حداقل میزان فسفر در زه‌آب حاصل از آبیاری با فاضلاب خام برابر ۰/۲۶ و ۰/۰۸۷ میلی‌گرم بر لیتر و در زه‌آب حاصل از پساب برابر ۰/۱۵۵ و ۰/۰۵۹ میلی‌گرم بر لیتر بوده است.

بر اساس مشاهدات هوک در سال ۱۹۸۳، به‌کارگیری پساب تصفیه ثانویه با غلظت فسفر بین ۴-۱۶ میلی‌گرم بر لیتر، می‌تواند موجبات نفوذ فسفر به لایه‌های زیرین خاک را تا حدودی فراهم آورد. اگرچه هوک تغییرات بسیار جزئی را در غلظت فسفر موجود در لایه‌های زیرین خاک مزارع آبیاری شده با پساب (با مقدار آب کاربردی بین ۵۰۰ - ۵۰۰۰ میلی‌متر در سال) گزارش نموده است (۱۵). معمولاً میزان فسفر قابل انحلال در آب در اغلب تحقیقات انجام شده روی خاک‌های عمقی واقع در زیر اراضی کشاورزی تحت آبیاری با پساب تصفیه شده و زه آب‌های حاصل از آنها، بین ۰/۰۲ - ۰/۱۱ میلی‌گرم بر لیتر در نوسان است (۱۵). مقادیر فوق با دامنه به‌دست آمده برای پساب در نتیجه اجرای این تحقیق همخوانی قابل قبولی داشته، با این تفاوت که حداقل و حداکثر مشاهده شده با اندکی افزایش روبه‌رو بوده است.

از بررسی درصدهای انتقال فسفر به عمق خاک و یا به عبارتی، نسبت فسفر موجود در زه‌آب به فسفر ورودی توسط انواع آب آبیاری به هر لایسیمتر چنین مشاهده می‌شود که علی‌رغم اندازه‌گیری بیشترین غلظت فسفر در زه آب لایسیمترهای آبیاری شده با فاضلاب خام، کمترین درصد انتقال در این شرایط اتفاق افتاد (بین ۰/۹ تا ۳/۵۶ درصد)، ضمن این‌که از نظر نوع گیاه نیز عمدتاً جعفری کمترین درصد انتقال و هویج بیشترین مقدار را از خود نشان دادند. در پساب هرچند کاهش مقدار فسفر موجود در زه آب لایسیمترها در مقام مقایسه با زه آب حاصل از فاضلاب خام مشاهده شد، لیکن درصد انتقال به مقدار جزئی افزایش یافت (بین ۱/۰۳ تا ۴/۱۵ درصد) که این امر به دلیل کاهش قابل توجه مقدار فسفر ورودی توسط پساب (به‌ویژه فسفر آلی) به لایسیمترهای تحت آبیاری بوده است که باعث افزایش مقدار عددی این نسبت می‌شود. به هر حال نتایج نشان دهنده انتقال ناچیز فسفر به عمق خاک در هر دو این حالات می‌باشد و عملاً بین ۹۶ تا ۹۹ درصد فسفر موجود در فاضلاب خام و پساب تصفیه شده، توسط مجموعه خاک و گیاه از آنها جدا می‌شود. در این خصوص نتایج تحقیقات دیگران نیز نشان از قابلیت سیستم خاک - گیاه در حذف فسفر از فاضلاب داشته است. بر طبق مشاهدات بیک، اثر توأم جذب گیاهی فسفر و نگه داشت آن در خاک قادر است تا ۹۳ درصد فسفر موجود در فاضلاب را در عمق ۹۰ سانتی‌متری خاک حذف نماید (۱۶).

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1385.10.4.3.9]

بیک و دوهان به سال ۱۹۷۴ نیز از آبیاری بلند مدت علفزارهای مرتع دائمی با فاضلاب خام شهری به نتایج مشابهی دست یافته‌اند. آنها چنین نظر دادند که مکانیسم پیوند فسفات در خاک از تناوب واکنش‌های جذب سطحی و رسوب تشکیل شده است. بین کاربردهای متوالی فاضلاب، یون‌های فسفات از حالت جذب سطحی به صورت رسوب در می‌آیند و باعث ایجاد محل‌های جدیدی برای جذب سطحی و خروج فسفات از فاضلاب در زمان غرقاب بعدی می‌شوند. هم‌چنین مقدار کل فسفری که در دراز مدت می‌تواند در لایه معینی از خاک ذخیره شود به مقدار کل کلسیم، آهن یا آلومینیم قابل استفاده برای رسوب فسفر به عنوان فاز حل ناپذیر بستگی دارد (۸).

در خصوص آب چاه وضعیت اندکی متفاوت است، زیرا علی‌رغم حضور مقادیر بسیار جزئی فسفر در زه آب لایسیمترهای تحت آبیاری، در نتیجه ناچیز بودن میزان فسفر ورودی توسط آب آبیاری به خاک، درصد انتقال بالاتری مشاهده می‌گردد. به‌جز اولین نمونه برداری در سال نخست اجرای تحقیق که مقدار فسفر اندازه‌گیری شده در زه آب‌ها تابع میزان فسفر قابل انحلال موجود در خاک بوده و مستقل از نوع آب آبیاری است، درصد انتقال در سایر اندازه گیری‌های انجام شده در زه آب این لایسیمترها بین ۶/۹ الی ۳۲/۳ درصد در نوسان بود. به هر حال مقایسه غلظت فسفر اندازه گیری شده در زه آب لایسیمترهای آبیاری شده توسط آب چاه با دیگر انواع آب آبیاری مورد استفاده در تحقیق، نشان از این حقیقت دارد که مقادیر فسفر در چنین شرایطی، چند ده برابر کمتر از میزان فسفر اندازه گیری شده در زه آب حاصل از فاضلاب خام و پساب تصفیه ثانویه می‌باشد.

از نظر ترکیبات فسفردار موجود در زه آب لایسیمترها و انواع آب آبیاری مورد استفاده، ملاحظه می‌گردد که در فاضلاب خام ۶۳ درصد فسفر از نوع فسفات و بقیه آن از نوع آلی بوده که این نسبت در زه‌آب حاصل از زه‌کش این‌گونه لایسیمترها، به‌طور متوسط برابر ۹۷ درصد فسفات و در حدود ۳/۰ درصد فسفر آلی می‌باشد. میزان فسفات در پساب تصفیه شده و آب چاه به ترتیب برابر ۵۹/۷ و ۹۰/۴ درصد بود که در زه‌آب حاصل از لایسیمترهای تحت آبیاری با آنها، تقریباً تمامی فسفر مشاهده شده از نوع فسفاته بوده است.

هنگامی که تخلیه زه آب‌های حاصل از زه‌کش‌های زیرزمینی به منابع آب سطحی و در شرایطی مشابه با این تحقیق مد نظر باشد، فسفر فسفاته و میزان آن به عنوان عاملی مهم در وقوع پدیده اوتریفیکاسیون، نباید از حدود مجاز تعیین شده در استانداردها فزونی یابد. بر اساس استاندارد سازمان حفاظت محیط زیست ایران، حداکثر مقدار فسفات مجاز جهت تخلیه انواع پساب (و یا زه آب در این شرایط) به منابع آب سطحی برابر ۶/۰ میلی‌گرم بر لیتر است (۳)، در حالی که در بدترین شرایط فسفات اندازه‌گیری شده در زه آب خروجی از لایسیمترها از ۰/۲۱ میلی‌گرم بر لیتر تجاوز ننمود که بسیار کمتر از حد مجاز (در حدود ۳/۵ درصد آن) می‌باشد. قابل ذکر است که به دلیل استفاده از روش آبیاری غرقابی (کرتی)، رواناب سطحی در این آزمایش به‌وجود نیامد.

تجزیه و تحلیل آماری داده‌های فسفر

تجزیه و تحلیل آماری داده‌های به‌دست آمده از اندازه‌گیری فسفر در مدت دو سال اجرای آزمایش، بر اساس طرح آماری انتخابی و با استفاده از برنامه رایانه‌ای SAS انجام پذیرفت که نتایج به دست آمده در جدول ۷ به صورت خلاصه ارائه گردیده است.

با توجه به نتایج به دست آمده چنین نتیجه‌گیری می‌شود که اثر سال اجرا (در سطح پنج درصد)، نوع گیاه، نوع آب آبیاری و زمان نمونه برداری، بر مقدار فسفر اندازه گیری شده در زه آب لایسیمترها از لحاظ آماری در سطح یک درصد دارای تفاوت معنی دار بوده است. بر طبق نتایج آزمون دانکن که در جدول ۸ ارائه شده، می‌توان چنین بیان نمود که:

الف) اثر سال

میانگین فسفر اندازه گیری شده در زه آب حاصل از زه‌کش

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1385.10.4.3.9]

جدول ۷. نتایج تجزیه و تحلیل آماری داده‌های فسفر در مدت دو سال اجرای تحقیق

منابع تغییر	درجه آزادی	مجموع مربعات (SS)	میانگین مربعات (MS)
سال اجرا	۱	۰/۰۰۲	۰/۰۰۲ *
نوع گیاه	۲	۰/۰۱۸	۰/۰۰۹ **
نوع آب آبیاری	۲	۰/۳۵۲	۰/۱۷۶ **
زمان نمونه برداری	۲	۰/۰۲	۰/۰۱ **

* : اختلاف در سطح پنج درصد معنی دار بوده است ؛ ** : اختلاف در سطح یک درصد معنی دار بوده است.

جدول ۸. نتایج آزمون دانکن (میانگین‌ها) مربوط به داده‌های فسفر در مدت دو سال اجرای تحقیق

گروه‌بندی	سال اجرا		نوع آب آبیاری		نوع گیاه		گروه‌بندی	زمان نمونه برداری	
دانکن	سال	میانگین	نوع آب[a]	میانگین	گیاه[b]	میانگین	دانکن	ترتیب	میانگین
A	دوم	۰/۰۸۶	R	۰/۱۳۳	Ca.	۰/۰۹۵	A	دوم	۰/۰۹۸
B	اول	۰/۰۷۹	T	۰/۰۹۵	To.	۰/۰۸۴	B	سوم	۰/۰۷۷
C	–	–	N	۰/۰۲۱	Pa.	۰/۰۶۹	B	اول	۰/۰۷۳

a) نوع آب آبیاری : R = فاضلاب خام ، T = پساب تصفیه شده ، N = آب چاه (معمولی).

b) نوع گیاه : .To = گوجه فرنگی ، .Pa = جعفری ، .Ca = هویج.

لایسیمترها، در سال دوم بالاتر از میانگین سال اول قرار گرفت و تفاوت معنی داری را نشان داد. این امر بیانگر افزایش مقدار فسفر انتقال یافته به عمق ستون خاک در سال دوم اجرای عملیات آبیاری، در مقایسه با سال اول بوده است. وضعیت مذکور می‌تواند تا حدودی در اثر کاهش ظرفیت نگه‌داشت فسفر در خاک در نتیجه افزایش ذخیره فسفر به‌وقوع پیوسته باشد. اضافه شدن مداوم فسفر به خاک در اثر آبیاری با فاضلاب و پساب و تجزیه باقی‌مانده‌های گیاهی در خاک و آزاد شدن فسفر آنها می‌تواند در نهایت به کاهش قدرت ذخیره و افزایش انتقال فسفر به عمق نصب زه‌کش‌ها منجر شود.

ب) اثر نوع آب آبیاری

میانگین فسفر موجود در زه آب زه‌کشی شده از لایسیمترهای تحت آبیاری با فاضلاب خانگی خام، بالاتر از میانگین فسفر در زه آب حاصل از پساب تصفیه ثانویه قرار داشته و هر دو این موارد نیز دارای میانگینی بیشتر از فسفر موجود در زه آب حاصل از لایسیمترهای تحت آبیاری با آب چاه بود وتفاوت معنی‌داری ازنظر تأثیر نوع آب آبیاری برمقدار فسفر انتقال یافته به‌عمق زه‌کش‌ها مشاهده شد. به علت غلظت بالاتر مقدار فسفر در فاضلاب خام در مقایسه با پساب تصفیه شده و وضعیت این دو در مقایسه با آب چاه، چنین شرایطی قابل انتظار است. بنابراین نکته مهم، انتقال مقادیر ناچیز فسفر به عمق نصب زه‌کش‌ها در مدت دو سال و در شرایط اجرای تحقیق می‌باشد.

ج) اثر نوع گیاه

میانگین فسفر اندازه گیری شده در زه آب لایسیمترهای تحت کشت گیاه هویج، بالاتر از میانگین فسفر در زه آب حاصل از لایسیمترهای دارای کشت گوجه فرنگی و هر دو آنها در مرتبه

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1385.10.4.3.9]

بالاتر از گیاه جعفری قرار گرفت و تفاوت معنی‌داری را بین سه نوع گیاه از نظر انتقال میزان فسفر به عمق خاک از خود نشان داد. فیزیولوژی گیاهی و میزان گسترش ریشه و نیاز گیاه به فسفر می‌تواند در این امر مؤثر باشد.

د) اثر زمان نمونه برداری

میانگین فسفر موجود در آب زه‌کشی شده به ترتیب روند نزولی، از نمونه برداری دوم به سوم و سپس اول می‌باشد. میانگین فسفر معمولاً در نمونه برداری دوم، به‌طور معنی داری از مابقی نمونه‌ها بالاتر بود، ولی میزان آن در نمونه‌برداری‌های اول و سوم، تفاوت معنی‌داری را با یکدیگر از خود نشان نمی‌داد. بنابراین در اواسط فصل و با افزایش میزان آب کاربردی جهت آبیاری، مقادیر بیشتری از فسفر به عمق ستون خاک منتقل می‌گردد.

بیلان جرمی فسفر در لایسیمترها

آنچه تا کنون بیان شد در برگیرنده مقایسه‌ای بین مقادیر فسفر اندازه گیری شده در واحد حجم آب‌های آبیاری و زه آب‌های زه‌کشی شده بود (مقایسه غلظت‌ها)، لیکن توجه به این نکته نیز ضروری است که حجم آب خروجی از زه‌کش لایسیمترها بسیار کمتر از حجم آب ورودی به آنها در نتیجه عملیات آبیاری است. نسبت حجم آب خروجی از زه‌کش‌ها به حجم آب مورد استفاده جهت آبیاری لایسیمترها بین ۰/۱ تا ۰/۰۵ (یک بیستم) تغییر می‌کند، بنابراین جالب خواهد بود که از برقراری بیلان جرمی بین میزان ماده وارد شده به یک لایسیمتر و خروجی از آن جهت نتیجه‌گیری تکمیلی بهره گرفته شود. بدین منظور میانگین فسفر ورودی توسط هر یک از انواع آب‌های آبیاری و نیز متوسط فسفر خروجی از زه‌کش‌ها در طول فصل کشت (بدون منظور داشتن نوع گیاه) محاسبه گردید و با داشتن حجم آب مورد استفاده در هر نوبت آبیاری و حجم آب زه‌کشی شده از لایسیمترها، متوسط جرم ماده ورودی و خروجی به یک لایسیمتر از حاصل‌ضرب غلظت فسفر در حجم آب به‌دست آمد. نتایج حاصله در جدول ۹ ارائه شده است. از روی جدول می‌توان ملاحظه نمود که درصدهای حذف جرمی یا در حقیقت بازده حذف جرمی فسفر بین ۹۷/۲ تا ۹۹/۹ درصد تغییر می‌کند که نشان از قابلیت بالای مجموعه خاک و گیاه در حذف فسفر و در تمامی انواع آب آبیاری مورد استفاده در مدت اجرای آزمایش دارد.

میزان فسفر مورد نیاز گیاهان کشت شده در این آزمایش از قرار: گوجه فرنگی در حدود ۱۵۰–۲۰۰ کیلوگرم فسفر در هکتار بر حسب P_2O_5 (یا ۱۰۰–۱۳۵ کیلوگرم فسفر بر حسب PO_4) و جعفری و هویج در حدود ۸۰ کیلوگرم در هکتار فسفر بر حسب P_2O_5 (یا ۵۴ کیلوگرم فسفر بر حسب PO_4) می‌باشد (۱). از روی ارقام فسفر ورودی به خاک در جدول ۹ چنین به نظر می‌رسد که در مجموع، میزان فسفر ورودی به خاک توسط فاضلاب خام و پساب تصفیه شده در طول فصل زراعی بیش از ارقام مورد نیاز تمامی انواع گیاهان کشت شده می‌باشد. در خصوص آب چاه و به دلیل میزان ناچیز فسفر موجود، انتظار می‌رود که نیاز گیاهان برآورده نشود.

نکته مهم این‌که به دلیل ترسیب و جذب سطحی مقادیر قابل توجهی از فسفر ورودی و ظرفیت بالای خاک جهت یک چنین واکنشی و نیز به علت ورود تدریجی مقادیر ناچیزی از فسفر به خاک در هر مرحله آبیاری با فاضلاب و پساب، امکان عدم تأمین فسفر مورد نیاز گیاه بخصوص در مراحل بحرانی رشد محتمل است. نتایج برخی تحقیقات نشان از آن دارد که مقدار فسفر موجود در خاک اراضی تحت آبیاری با فاضلاب شهری ناچیز بوده و معمولاً کمتر از آن است که قادر به تأمین فسفر مورد نیاز جهت جذب گیاهی باشد (۱۶). البته فسفر در گیاه بسیار پویاست و وقتی که کمبود آن رخ دهد، فسفری که در بافت‌های مسن‌تر وجود دارد به نواحی مریستمی فعال منتقل می‌شود. به دلیل اثر مشخصی که کمبود این عنصر بر به تأخیر انداختن رشد سرتاسری دارد، ممکن است علائم برگی ناشی از کمبود عناصر دیگری مانند ازت و پتاسیم دیده نشود. لیکن بر میزان رشد گیاهی و توسعه سیستم ریشه‌ای و به دنبال آن کیفیت محصول تا حدودی اثر می‌گذارد (۱۱).

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1385.10.4.3.9]

جدول ۹. متوسط مقدار نهایی جرم فسفر ورودی و خروجی در لایسیمترها

ردیف	سال آزمایش	نوع آب[a]	آب ورودی به لایسیمترها			زه آب لایسیمترها			نسبت جرمی[b]	درصد حذف‌جرمی
			(۱)	(۲)	(۳)	(۱)	(۲)	(۳)		
۱	۱۳۷۸	R	۸/۴۹	۹/۸۵	۳۴۸/۱	۰/۱۱۹	۰/۰۰۸۷	۰/۳۱	۰/۰۰۰۹	۹۹/۹۱
۲	۱۳۷۸	T	۵/۲۹	۶/۱۴	۲۱۷	۰/۰۸۸	۰/۰۰۶۴	۰/۲۳	۰/۰۰۱	۹۹/۹
۳	۱۳۷۸	N	۰/۰۷	۰/۰۸۱	۲/۸۶	۰/۰۳۱	۰/۰۰۲۳	۰/۰۸	۰/۰۲۸	۹۷/۱۶
۴	۱۳۷۹	R	۸/۶۳	۹/۱۵	۳۲۳/۳	۰/۱۴۶	۰/۰۱	۰/۳۵	۰/۰۰۱۱	۹۹/۸۹
۵	۱۳۷۹	T	۴/۴	۴/۶۶	۱۶۴/۷	۰/۱۰۳	۰/۰۰۷۱	۰/۲۵	۰/۰۰۱۵	۹۹/۸۵
۶	۱۳۷۹	N	۰/۰۷۶	۰/۰۸۱	۲/۸۶	۰/۰۱۱	۰/۰۰۰۸	۰/۰۳	۰/۰۰۹۹	۹۹/۰۱

a) نوع آب آبیاری کاربردی : R = فاضلاب خام ، T = پساب تصفیه شده ، N = آب چاه (معمولی)

b) نسبت جرمی عبارت است از نسبت جرم تجمعی خروجی به جرم تجمعی ورودی به لایسیمتر

(۱) . متوسط فسفر کل به میلی‌گرم بر لیتر، (۲) . جرم تجمعی فسفر ورودی به لایسیمتر یا خروجی از آن به گرم، (۳) . جرم تجمعی ورودی یا خروجی به کیلوگرم در هکتار، با لحاظ کل ارتفاع آب آبیاری کاربردی در طول آزمایش.

سپاسگزاری

اجرای تحقیق حاضر با مساعدت مالی کمیسیون آب شورای پژوهش‌های علمی کشور و همکاری مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، گروه آبیاری دانشکده آب و خاک دانشگاه تهران (پردیس کشاورزی کرج)، معاونت عملیات و بهره برداری شرکت فاضلاب استان تهران و تصفیه خانه فاضلاب شهرک اکباتان میسر گردیده که بدین وسیله صمیمانه تشکر و قدردانی می‌گردد.

منابع مورد استفاده

۱. پیوست، غ. ۱۳۸۱. *سبزیکاری*. چاپ دوم، انتشارات نشر علوم کشاورزی، گرگان.

۲. توکلی، م. و م. طباطبایی. ۱۳۷۸. آبیاری با فاضلاب تصفیه شده. مجموعه مقالات همایش جنبه‌های زیست محیطی استفاده از پساب‌ها در آبیاری. وزارت نیرو، کمیته ملی آبیاری و زه‌کشی ایران، ۱۱ آذر ماه ۱۳۷۸، تهران. صفحات: ۱ الی ۲۶.

۳. حسن‌اقلی، ع. ۱۳۸۲. استفاده از فاضلاب‌های خانگی و پساب تصفیه خانه‌ها در آبیاری محصولات کشاورزی. گزارش پژوهشی نهایی طرح تحقیقاتی مصوب، مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، شماره ثبت ۸۳/۸۰۶، ۲۳۱ صفحه.

۴. حسن‌اقلی، ع.، ع. لیاقت، م. میراب زاده، م. وثوقی و ح. فرداد. ۱۳۸۲. بررسی اثرات آبیاری با فاضلاب‌های خانگی بر انتقال مواد به عمق خاک و کیفیت زه آب‌های خروجی از لایسیمتر. مجموعه مقالات یازدهمین همایش کمیته ملی آبیاری و زه‌کشی ایران. ۳ و ۴ دی ماه ۱۳۸۲، صفحات ۳۱۷ الی ۳۳۴، تهران.

۵. روزنامه همشهری. ۱۳۸۱. اراضی کشاورزی ایران به فلزات سنگین آلوده هستند (مصاحبه با دکتر ملکوتی، رئیس مؤسسه تحقیقات خاک و آب وزارت جهاد کشاورزی). سال دهم، شماره ۲۸۵۱، صفحه ۸، ۴ مهرماه ۱۳۸۱.

۶. شریعتی، م. ۱۳۷۵. ارزیابی کیفیت شیمیایی فاضلاب و استفاده از آن در آبیاری. آب و خاک و محیط زیست ۱۰: ۵۱- ۵۵.

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1385.10.4.3.9]

۷. علیزاده، ا. ۱۳۷۴. استفاده از پساب تصفیه شده خانگی در آبیاری سبزیجاتی که به‌صورت خام مصرف می‌شوند. معاونت امور آب و فاضلاب شهری، گزارش نهایی طرح پژوهشی، شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور، تهران.

۸. کریمیان، ن. ۱۳۷۱. *شیمی خاک*. جلد اول: مبانی (ترجمه). مرکز نشر دانشگاهی، تهران.

۹. ملکوتی، م. ج. و م. همایی. ۱۳۷۳. *حاصلخیزی خاک‌های مناطق خشک* (مشکلات و راه حل‌ها). انتشارات دانشگاه تربیت مدرس، تهران.

۱۰. ملکوتی، م. ج. و م. نفیسی. ۱۳۷۳. *مصرف کود در اراضی زراعی، فاریاب و دیم* (ترجمه). انتشارات دانشگاه تربیت مدرس، تهران.

۱۱. ملکوتی، م. ج. و س. ع. ریاضی همدانی. ۱۳۷۰. *کودها و حاصلخیزی خاک* (ترجمه). مرکز نشر دانشگاهی، تهران.

12. Anon. 1995. Standards Method for the Examination of Water and Wastewater. 19th ed., American Pub. Health Association (APHA), USA.
13. Anon. 1990. Irrigation with reclaimed municipal wastewater - a guidance manual. California State Water Resourses Control Board. Edited by: G. Stuart Pettygrove and Takashi Asano. Prepared by: Department of Land, Air and Water Resources. University of California, Davis Pub., Lewis Publishers Inc., Canada.
14. Anon. 1992. Wastewater treatment and use in agriculture. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome.
15. Feigin, A., I. Ravina and J. Shalhevet. 1991. Irrirgation with Treated Sewage Effluent. Springer- Verlag Pub., Berlin.
16. Gohil, M. B. 2005. Land Treatment of Wastewater. New Age International Pub., New Delhi.
17. McGhee, T. J. 1991. Water Supply and Sewerage. 6th ed., McGraw-Hill Inc., USA.
18. Metcaff & Eddy Inc. 1991. Wastewater Engineering: Treatment, Disposal, Reuse. 3rd ed., Metcaff Eddy Inc. Pub., USA.
19. Ritter, W. F. and A. Shirmohammadi. 2001. Agricultural Nonpoint Source Pollution. Lewis pub., CRC Press, USA.

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1385.10.4.3.9]