ارزیابی برخی شاخص‌های کیفیت شیمیایی و بیولوژیکی خاک اراضی فضای سبز مجتمع فولاد مبارکه آبیاری شده با آب چاه و پساب صنعتی

وحید مرادی نسب[۱*]، مهران شیروانی[۱]، مرضیه شمسایی[۱] و محمدرضا بابایی[۲]

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱۰/۲۰ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۷/۲۶)

چکیده

با توجه به کمبود آب و جهت جلوگیری از آلودگی‌های زیست محیطی، مجتمع فولاد مبارکه از پساب حاصل از تصفیه فاضلاب صنعتی به‌منظور آبیاری فضای سبز استفاده می‌نماید. این مطالعه برای آگاهی از تأثیر پساب صنعتی بر کیفیت خاک اراضی فضای سبز این مجتمع انجام گرفت. تیمارها شامل اراضی آبیاری شده به‌مدت ۲، ۶ و ۱۸ سال با پساب صنعتی، اراضی آبیاری شده با آب چاه و خاک بدون آبیاری بودند. سیستم آبیاری در تمام اراضی تحت آبیاری قطره‌ای بود. نمونه‌های خاک از سه عمق مختلف ناحیه پیاز رطوبتی حاصل از قطره چکان‌ها تهیه و به آزمایشگاه منتقل شد. سپس ویژگی‌های شیمیایی خاک‌ها شامل pH، هدایت الکتریکی، درصد ماده آلی، ظرفیت تبادل کاتیونی، نیتروژن کل، فسفر قابل جذب، پتاسیم قابل جذب و ویژگی‌های بیولوژیکی خاک‌ها شامل تنفس پایه میکروبی و شدت آمونیفیکاسیون آرجنین در آنها اندازه‌گیری شدند. نتایج نشان داد pH خاک در اراضی آبیاری شده با پساب نسبت به تیمار شاهد کمتر است. درصد ماده آلی و ظرفیت تبادل کاتیونی خاک‌های تحت آبیاری به‌دلیل تشکیل جنگل مصنوعی افزایش معنی‌داری نشان داد. شوری خاک نیز در تیمارهای آبیاری شده با پساب با افزایش زمان آبیاری نسبت به تیمار بدون آبیاری دارای روند افزایشی بود. تنفس پایه میکروبی و آمونیفیکاسیون آرجنین به‌دلیل استقرار پوشش گیاهی افزایش معنی‌داری را در مقایسه با تیمار شاهد نشان داد. به‌طورکلی مدیریت آبیاری و جنگل‌کاری در اراضی فضای سبز مجتمع فولاد مبارکه موجب بهبود کیفیت خاک این اراضی شده ولی در مورد برخی از ویژگی‌های خاک از جمله شوری پایش و بهبود شرایط خاک ضروری است.

کلمات کلیدی: کیفیت خاک، آبیاری با پساب، ویژگی‌های شیمیایی خاک، فعالیت میکروبی خاک

۱ . گروه خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

۲. شرکت فولاد مبارکه اصفهان

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی:vahidmoradinasab@yahoo.com

مقدمه

کیفیت خاک بر ظرفیت آن در حفظ و تداوم باروری بیولوژیک، حفظ کیفیت زیست محیطی و افزایش سلامتی گیاه، انسان و حیوان دلالت دارد. مدیریت اراضی به درجات مختلف بر کیفیت خاک مؤثر بوده و هرگونه مدیریت نادرست می‌تواند منجر به تخریب کیفیت خاک گردد. تأثیر فعالیت‌های مدیریتی بر کیفیت خاک را می‌توان با کنترل شاخص‌های کیفیت خاک ارزیابی نمود. بنابراین، سنجش این شاخص‌ها به‌عنوان یک ابزار مناسب به‌منظور پایش نقش‌های خاک و پایداری یک اکوسیستم به‌کار می‌رود. همچنین، ارزیابی کیفیت خاک ابزاری است که مدیران می‌توانند از آن برای بررسی مشکلات خاک در کوتاه‌مدت استفاده کرده و راه‌کارهای مدیریتی مناسبی را برای حفظ کیفیت خاک در بلند مدت اتخاذ نمایند (۲).

در ارزیابی کیفیت خاک، برخی خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک اندازه‌گیری می‌شود. براساس خصوصیات اندازه‌گیری شده، خواصی از خاک که کارکرد آن‌را محدود می‌کنند، شناسایی شده و همچنین نحوه تأثیر تغییر مدیریت بر عملکرد خاک مشخص می‌گردد. قدم‌های اولیه در این ارزیابی، شناسایی اهداف مدیریت (نظیر تولید غذا و الیاف یا حفظ محیط زیست) و تعیین وظایف و نقش‌هایی از خاک است که در راستای اهداف مورد نظر هستند (۲ و۴).

بحران کمبود آب یکی از مشکلاتی است که اکثر مناطق جهان را تحت تأثیر قرار داده است. این محدودیت منابع آب در سال‌های اخیر توجه محققان را به استفاده از آب‌های شور و پساب‌های صنعتی و شهری معطوف نموده است. آبیاری با پساب می‌تواند اثرات مثبت یا منفی بر خاک و گیاهان و در حالت کلی بر اکوسیستم داشته باشد. کاربرد پساب‌ها در آبیاری می‌تواند بر شاخص‌های کیفیت خاک اراضی نیز مؤثر باشد. این اثرات می‌تواند بر خواص شیمیایی خاک مثل غلظت فلزات سنگین، عناصر غذایی، شوری و pH، خواص فیزیکی خاک مثل نفوذپذیری، پایداری ساختمان و هدایت هیدرولیکی و ویژگی‌های بیولوژیک خاک مانند زی‌توده میکروبی و فعالیت آنزیم‌ها اعمال شود (۲۳، ۲۶ و ۳۰).

در اغلب کشورهای پیشرفته، فاضلاب‌های تصفیه شده با رعایت استانداردهای مربوطه برای کاربردهای مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند، اما در کشورهای درحال توسعه از جمله ایران، فاضلاب‌های خام نیز در برخی مناطق برای مصارف مختلف از جمله کشاورزی به مصرف رسیده که می‌تواند پیامدهای بهداشتی و زیست محیطی زیادی داشته باشد(۵). با این حال، تحقیقات انجام گرفته در مورد کاربرد پساب‌ها در آبیاری اراضی کشاورزی در سطح کشور نشان می‌دهد که استفاده از پساب، عملکرد محصولات را افزایش داده و تأثیر منفی بر ویژگی‌های خاک و نفوذپذیری آن ندارد (۵). استفاده از پساب تصفیه شده در آبیاری اراضی، علاوه‌بر تأمین آب گیاهان زینتی و درختان فضای سبز، موجب اضافه شدن انواع مواد آلی و عناصر غذایی مورد نیاز گیاه به خاک شده و از این طریق به افزایش حاصلخیزی خاک و در نتیجه تقلیل مصرف کود کمک می‌کند (۲۹). لوگان و همکاران (۲۲) گزارش نمودند که آبیاری دراز مدت یک خاک شنی با پساب تصفیه شده از نظر افزایش ذخیره آب و عناصر غذایی خاک و کاتیون‌های تبادلی بسیار مفید است.

آبیاری با پساب شهری در مدت طولانی ممکن است سبب افزایش شوری خاک و تجمع سدیم گردد. هنگامی که میزان کل املاح موجود در پساب خیلی زیاد باشد تجمع نمک در ناحیه ریشه و پدیده شور شدن خاک اتفاق می‌افتد. به‌عنوان نمونه، صابر (۳۲) گزارش کرد نمک‌های محلول در خاک‌های آبیاری شده با فاضلاب شهر قاهره در لایه صفر تا ۲۰ سانتی‌متری پس از ۶۰ سال آبیاری با پساب به ۳۲۵۶ میلی‌گرم در لیتر (EC_e نزدیک به ۵ دسی‌زیمنس بر متر) رسید که این میزان نزدیک به ۳ برابر خاک‌های آبیاری نشده بود. در تحقیقی که توسط اندای و همکاران (۲۸) در کانادا در مورد تأثیر و مقایسه کاربرد آبیاری با پساب وآب چاه بر خاکی با بافت شنی‌لومی صورت گرفت، مشاهده شد که EC_e خاک در هر دو تیمار افزایش یافت، ولی این افزایش باعث ایجاد مسئله‌ای از نظر شوری و قلیائیت نشد.

این درحالی‌است که کیان و مکام (۳۰) گزارش کردند که استفاده از پساب تصفیه شده شهری در دراز مدت می‌تواند سبب افزایش میزان شوری و تجمع سدیم در خاک شود. با افزایش تجمع سدیم، میزان پایداری خاکدانه‌ها و هدایت هیدرولیکی خاک کاهش می‌یابد، اگرچه ادرورو و همکاران (۱۰) گزارش نمودند که حضور کلسیم و منیزیم در پساب می‌تواند سبب کاهش اثر تخریبی سدیم گردد. وینتن و همکاران (۳۸) نیز بیان نمودند که استفاده از پساب سبب افزایش درصد سدیم تبادلی(ESP) و تخریب منافذ خاک می‌شود.

ویژگی‌های میکروبیولوژیکی و بیوشیمیایی خاک نیز به تنش‌های محیطی و تغییرات برنامه‌های مدیریتی حساس هستند و به‌همین دلیل می‌توانند شاخصی برای نشان‌دادن کیفیت خاک باشند (۲۸). فعالیت آنزیمی خاک به‌دلیل ارتباط با فرآیندهای بیوشیمیایی خاک، اندازه‌گیری آسان و پاسخ سریع به تغییرات مدیریتی خاک به‌عنوان شاخص کیفیت خاک پیشنهاد شده است (۱۶، ۱۷ و ۲۰). مطالعات ماسیاندرو و همکاران (۲۴) نشان داد که آنزیم‌های خاک می‌توانند شاخصی برای نشان‌دادن آلودگی، حاصلخیزی و یا سلامت خاک باشند. مطالعاتی در مورد تأثیرآبیاری با پساب بر ویژگی‌های بیولوژیکی و به‌ویژه فعالیت آنزیمی خاک‌ها انجام شده است. به‌عنوان نمونه، شیپر و همکاران (۳۳)، هیچ‌گونه تغییری در پارامترهای بیولوژیکی و بیوشیمیایی خاک بعد از سه سال آبیاری با پسابی با سه مرحله تصفیه مشاهده نکردند، درحالی‌که چن و همکاران (۱۵) دریافتند که آبیاری با پساب تصفیه شده شهری بعد از ۱۰ سال سبب افزایش فعالیت آنزیم‌های خاک شد.

الف و کلینر (۱۱) پیشنهاد نمودند که تحت شرایط خاص، شدت آرجنین آمونیفیکاسیون می‌تواند نماینده زیست‌توده میکروبی خاک باشد. در مطالعه این محققین، زیست‌توده میکروبی در خاک‌های تحت آبیاری با پساب تصفیه شده بسیار بیشتر از خاک‌هایی بود که تحت آبیاری نبودند. آنها گزارش نمودند اختلاف شدیدی در فعالیت آنزیم بتا- گلوکوزیداز و الکالین فسفاتاز بین تیمارهای تحت آبیاری با پساب و سایر خاک‌ها وجود دارد که این اختلاف‌ها می‌تواند مربوط به تأثیر آبیاری با پساب باشد. فیلیپ و همکاران (۱۸) نیز فعالیت آنزیمی شدید در خاک‌هایی که بیش از ۱۰۰ سال با پساب آبیاری شده بودند در مقایسه با خاک‌های بکر اندازه‌گیری کردند.

همچنین، چن و همکاران (۱۵) و فینوچیارو و همکاران (۱۹) بیان نمودند که اثر مثبت آبیاری با پساب تصفیه شده بر بیومس میکروبی و فعالیت آنزیم‌ها می‌تواند مربوط به تجمع موادآلی سریع تجزیه شونده و مواد غذایی در خاک باشد. برززینسکا وهمکاران (۱۳) و ترو و همکاران (۳۷) نیز گزارش کردند که افزایش محسوسی در فعالیت آنزیم آلکالین فسفاتاز در خاک‌هایی که در مدت کوتاهی (۳ یا ۴ سال) با پساب تصفیه شده آبیاری شده بودند، وجود داشت.

براساس مطالعه عرفانی و همکاران (۷)، یکی از اثرات مثبت آبیاری با پساب، تأثیر آن بر زیست‌توده میکروبی خاک و فعالیت‌های هم‌زیستی میکروب‌ها است که می‌تواند سبب تجزیه مواد آلی قابل تجزیه وآزاد شدن عناصر غذایی گردد. البته با توجه به وجود برخی عناصر سمی به‌ویژه فلزات سنگین در پساب‌های صنعتی، سمیت این گونه عناصر نگرانی هایی را در رابطه با کاربرد پساب بر جوامع میکروبی خاک ایجاد می‌کند. بانرجی و همکاران (۱۲) گزارش کردند که پساب‌های صنعتی علاوه‌بر عناصر غذایی و مواد آلی حاوی عناصر سنگین هستند که می‌توانند برای مدت طولانی در خاک باقیمانده و با گذشت زمان فعالیت بیولوژیکی خاک را تحت تأثیر قرار دهد (۶ و ۳۴).

استفاده از پساب در آبیاری فضای سبز از مهم‌ترین برنامه‌های مجتمع فولاد مبارکه در جهت استفاده از آب و توسعه پایدار است. با توجه به این‌که بخش عمده آبیاری فضای سبز ۱۵۰۰ هکتاری مجتمع فولاد مبارکه با پساب صورت می‌پذیرد، این تحقیق به‌منظور آگاهی از تأثیر کوتاه مدت (۲سال)، میان مدت (۶ سال) و دراز مدت (۱۸ سال) کاربرد پساب بر برخی ویژگی‌های شیمیایی و بیولوژیکی خاک‌های اراضی این مجتمع انجام گرفت.

مواد و روش‌ها

مجتمع فولاد مبارکه که در قسمت جنوب غربی شهرستان مبارکه قرار گرفته است دارای فضای سبزی به وسعت بیش از ۱۵۰۰ هکتار می‌باشد. آبیاری فضای سبز مجتمع در ابتدا با آب چاه بوده است ولی در زمان کنونی به‌دلیل محدودیت شدید آبی که در استان اصفهان وجود دارد، به‌منظور پایدار نگه داشتن فضای سبز مجتمع، استفاده بهینه از منابع آبی موجود و جلوگیری از آلودگی محیط زیست به‌سبب رها نمودن فاضلاب خام، علاوه‌بر آب چاه از پساب حاصل از تصفیه فاضلاب صنعتی نیز برای آبیاری اراضی فضای سبز استفاده می‌شود.

در این مطالعه نمونه‌برداری خاک از نواحی تحت ۱۸، ۶ و ۲ سال آبیاری با پساب، ۱۸ سال آبیاری با آب چاه و بدون آبیاری (خاک بکر) انجام گرفت. به‌دلیل وجود خاک‌های متنوع در محدوده اراضی فضای سبز، نمونه‌برداری در مکان‌هایی انجام شد که خاک‌های نسبتاً مشابهی داشته باشند تا تأثیر تنوع خاک منطقه مورد مطالعه کاهش یابد. پس از بررسی ویژگی‌های خاک نواحی مختلف، از هر ناحیه چند نقطه (به‌طوری‌که ویژگی‌های عمومی و رده بندی خاک نقاط در حد فامیل یکسان باشند) جهت نمونه‌برداری انتخاب شد.

با توجه به وجود سیستم آبیاری قطره‌ای در اراضی مورد مطالعه، نمونه‌برداری خاک از محدوده پیاز رطوبتی ایجاد شده توسط قطره چکان‌ها انجام گرفت. در مطالعات ایوبی و همکاران (۲) نشان داده شد که در محدوده ۶۰ تا ۹۰ سانتی‌متری از سطح خاک منطقه، یک انقطاع به صورت یک لایه شنی وجود دارد که محدود کننده رشد ریشه بوده و مشاهده شد که بخش عمده ریشه‌ها در خاک بالایی این لایه فعالیت دارند. بنابراین، خاک ناحیه صفر تا۶۰ سانتی‌متری به‌عنوان ناحیه دارای بیشترین فعالیت ریشه درختان، تجمع مواد آلی و عناصر غذایی و تمرکز جمعیت میکروبی جهت نمونه‌برداری انتخاب شد. نمونه‌برداری مرکب از خاک از سه عمق صفر تا ۲۰، ۲۰ تا ۴۰ و ۴۰ تا ۶۰ سانتی‌متری از پیاز رطوبتی حاصل از قطره چکان‌های تعبیه شده در هر نقطه انجام شد. در مجموع، نمونه‌برداری خاک از ۲۸ نقطه در نواحی تحت آبیاری قطره‌ای با پساب، ۱۱ نقطه در نواحی تحت آبیاری با آب چاه و ۵ نقطه به‌عنوان خاک بکر (شاهد) (جمعاً ۱۳۲ نمونه) صورت گرفت.

پس از انجام نمونه‌برداری، خاک‌ها هوا خشک و از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند. سپس pH خاک در عصاره اشباع به‌وسیله الکترود شیشه‌ای، هدایت الکتریکی خاک در عصاره اشباع با استفاده از دستگاه هدایت سنج، درصد کربن آلی به روش والکی و بلاک، غلظت یون‌های کلسیم و منیزیم در عصاره اشباع خاک به روش کمپلکسومتری از طریق تیتر کردن باEDTA، غلظت سدیم عصاره اشباع خاک توسط روش فلیم فوتومتری، ظرفیت تبادل کاتیونی خاک (CEC) به‌روش استات آمونیوم در pH=۸/۲، ازت کل خاک‌ها به روش تقطیر، فسفر قابل جذب به‌روش عصاره‌گیری با بیکربنات سدیم، پتاسیم قابل جذب خاک با استفاده از روش استات آمونیم در pH=۷ اندازه‌گیری شدند (۸). تنفس پایه میکروبی با استفاده از ظروف سربسته و به‌روش تیتراسیون برگشتی سود باقی‌مانده و شدت آمونیفیکاسیون اسید آمینه آرجینین به‌روش آلف و همکاران (۱۱) و پتانسیل فعالیت آنزیم فسفاتاز خاک‌ها به‌روش طباطبایی (۳۵) اندازه‌گیری شد.

تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها به‌منظور بررسی تأثیر تیمارهای آبیاری در دوره‌های زمانی مختلف (۲، ۶ و ۱۸ سال) در مقایسه با تیمار بدون آبیاری (بکر) بر شاخص‌های کیفیت خاک توسط نرم‌افزار SAS انجام پذیرفت. از طرح تجزیه مرکب بلوک‌های کاملاً تصادفی در چند مکان استفاده شد و مقایسه میانگین‌ها با کمک آزمون دانکن صورت گرفت.

نتایج و بحث

کیفیت آب آبیاری

کیفیت پساب مورد استفاده در آبیاری اراضی مجتمع به‌صورت دوره‌ای طی یک سال، هر ۳ ماه یکبار مورد پایش قرار گرفته که

جدول ۱. میانگین درازمدت برخی خصوصیات آب چاه و پساب تصفیه شده مجتمع فولاد مبارکه مورد استفاده در آبیاری اراضی فضای سبز

پارامتر	واحد	پساب صنعتی	آب چاه
pH	–	۸/۰۶	۷/۵
هدایت الکتریکی (EC_W)	(dS/m)	۳/۲	۳/۴
نسبت جذب سدیم(SAR)	$(meq/L)^{۱/۲}$	۳	۱۰/۷
آهن	(mg/L)	n.d	n.d
منگنز	(mg/L)	n.d	n.d
مس	(mg/L)	n.d	n.d
روی	(mg/L)	n.d	n.d
نیکل	(mg/L)	n.d	n.d
سرب	(mg/L)	n.d	n.d
کرم	(mg/L)	n.d	n.d
کادمیوم	(mg/L)	n.d	n.d

n.d: غیر قابل تشخیص توسط دستگاه طیف‌سنج جذب اتمی شعله‌ای

جدول ۲. مقایسه میانگین برخی شاخص‌های شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه تحت تیمارهای مختلف آبیاری

تیمار آبیاری	pH	EC (dS/m)	SOM (٪)	CEC ($cmol_+/kg$)	Total N (٪)	Available P (mg/kg)	Available K (mg/kg)	SAR $(meq/L)^{۱/۲}$
۱۸ سال پساب	۷/۸۵^{b}	۳/۵۴^{a}	۱/۲۸^{a}	۲۸/۸^{a}	۰/۰۴۵^{ab}	۲۹/۷۲^{a}	۳۴۹^{a}	۱۱/۶^{a}
۶ سال پساب	۷/۹۶^{ab}	۲/۹۸^{ab}	۱/۲۷^{a}	۳۲/۵۳^{a}	۰/۰۴۶^{a}	۲۸/۹۶^{a}	۳۱۵^{a}	۳/۲^{b}
۲ سال پساب	۷/۹۷^{ab}	۱/۹۱^{bc}	۰/۸^{bc}	۲۸/۲۶^{a}	۰/۰۳۵^{ab}	۲۷/۷۱^{a}	۲۶۷^{ab}	۲/۵^{b}
آب چاه	۸/۱۲^{a}	۳/۴۶^{a}	۱/۱۸^{ab}	۲۶/۵۲^{a}	۰/۰۴۴^{ab}	۲۶/۸۱^{a}	۱۹۱^{b}	۱۱/۴۲^{a}
بکر	۷/۹۱^{b}	۰/۷۴^{c}	۰/۵۶^{c}	۱۷/۸۷^{b}	۰/۰۲۴^{b}	۲۲/۰۸^{a}	۳۱۹^{a}	۲/۹^{b}

میانگین‌های دارای حروف مشترک فاقد تفاوت معنی‌دار هستند

نتایج آن در جدول ۱ ارائه شده است. مقدار pH پساب براساس استاندارد کیفیت آب آیرس و وسکات در حد بحران قرار دارد (۳). میانگین هدایت الکتریکی پساب نیز بیشتر از مقدار توصیه شده (۳ دسی‌زیمنس بر متر) برای آبیاری است (۳). نسبت جذب سدیم پساب براساس استاندارد فاقد محدودیت بوده (۳) و غلظت فلزات سنگین آهن، روی، مس، منگنز، سرب، کروم و کادمیوم توسط دستگاه جذب اتمی برحسب میلی‌گرم در لیتر غیرقابل تشخیص بود.

تغییرات شاخص‌های شیمیایی کیفیت خاک‌ها

جدول ۲ نشان‌دهنده تغییرات pH، شوری، درصد ماده آلی، ظرفیت تبادل کاتیونی، درصد ازت کل، فسفر و پتاسیم قابل دسترس و نسبت جذب سدیم خاک در نتیجه تیمارهای مختلف آبیاری با پساب و آب چاه است. بیشترین مقدار pH مربوط به خاک تحت آبیاری با آب چاه و کمترین مقدار مربوط به تیمار ۱۸ سال آبیاری با پساب بود. به‌طورکلی آبیاری با پساب و آب چاه تأثیر چندانی بر pH خاک نداشت که این امر می‌تواند ناشی

از نزدیک بودن مقادیر pH آب‌های آبیاری و خاک و همچنین ظرفیت بافری خاک‌ها در اثر وجود کربنات کلسیم باشد. در مقایسه تأثیر پساب و آب چاه بر pH خاک، فقط بین تیمار ۱۸ سال پساب و آب چاه تفاوت معنی‌داری در سطح ۵ درصد مشاهده شد. تأثیر آبیاری با پساب بر pH خاک بسته به ویژگی‌های پساب مصرفی و نوع خاک دارد. به‌عنوان مثال، وثوقی وهمکاران (۹) نشان دادند که pH یک خاک جنگلی بعد از آبیاری با پساب پالایشگاه تهران نسبت به شرایط قبل از شروع آبیاری افزایش پیداکرد، درحالی‌که ادرورو و همکاران (۱۰) نشان دادند که آبیاری با پساب سبب کاهش ۰/۶ واحدی pH خاک گردید.

به‌جز در مورد تیمار آبیاری با پساب به‌مدت ۲ سال، آبیاری موجب افزایش معنی‌دار شوری خاک‌های فضای سبز مجتمع فولاد مبارکه نسبت به خاک بکر شده است. از تیمارهای پساب، تیمار ۱۸ سال و ۶ سال آبیاری با پساب در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنی‌داری با یکدیگر داشتند. بیشترین میزان شوری خاک مربوط به تیمار ۱۸ سال و کمترین آن مربوط به خاک بکر بود (جدول ۲). با توجه به این‌که میانگین هدایت الکتریکی پساب و آب چاه به‌ترتیب ۳/۲ و ۳/۴ دسی‌زیمنس بر متر بود می‌توان نتیجه گرفت کیفیت پساب تصفیه شده جهت آبیاری برای فضای سبز از نظر شوری دارای محدودیت بوده و باعث افزایش غلظت املاح خاک‌ها شده است. مرمود و همکاران (۲۶) نیز گزارش کردند شوری خاک به‌واسطه آبیاری با پساب افزایش یافت که این اثرات تا عمق ۶۰ سانتی‌متری سطح خاک نیز مشهود بود.

بیشترین مواد آلی خاک در تیمار ۱۸ سال آبیاری با پساب (۱/۲۸ درصد) و کمترین آن در تیمار بدون آبیاری (۰/۵۶ درصد) مشاهده گردید. تیمار بدون آبیاری با تیمارهای آبیاری با آب چاه و آبیاری با پساب به‌مدت ۶ و ۱۸ سال، از نظر محتوای کربن آلی خاک دارای تفاوت معنی‌دار بود ولی با تیمار ۲ سال آبیاری با پساب تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد نداشت. بین تیمارهای آبیاری با پساب (دوره‌های زمانی متفاوت) و تیمار آب چاه نیز تفاوت معنی‌داری از نظر تأثیر بر ماده آلی خاک مشاهده نشد (جدول ۲). با توجه به نوع پساب (صنعتی)، احتمال افزوده شدن مواد آلی به خاک‌ها از طریق آب آبیاری کم بوده و تغییرات مشاهده شده بین تیمارها با خاک بکر عمدتاً به‌دلیل تشکیل پوشش جنگلی در طی سال‌هاست که باعث اضافه گشتن بقایا و به‌دنبال آن افزایش ماده آلی خاک شده است. آدرورو و همکاران (۱۰) نیز مشاهده نمودند که آبیاری با پساب تصفیه شده شهری به‌مدت ۲۰ سال سبب افزایش ماده آلی خاک‌ها شد. همچنین، صابر (۳۲) نشان داد که ماده آلی خاک‌هایی که به مدت ۶۰ سال با پساب آبیاری شده بودند نسبت به شاهد افزایش یافت.

از نظر ظرفیت تبادل کاتیونی خاک، بین تیمارهای آبیاری و خاک بکر تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد مشاهده شد، ولی تیمار آبیاری با آب چاه با تیمارهای آبیاری با پساب فاقد تفاوت معنی‌دار بود (جدول ۲). با توجه به این‌که بافت خاک‌های مورد مطالعه تقریباً مشابه بود، بنابراین درصد رس نمی‌تواند سبب افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی تیمارهای آبیاری نسبت به تیمار بدون آبیاری گردد، ولی درصد ماده آلی خاک در خاک‌های تحت آبیاری با آب چاه و پساب (به‌جزء تیمار ۲ سال پساب) نسبت به تیمار خاک بدون آبیاری دارای تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد بودند، بنابراین افزایش معنی‌دار ظرفیت تبادل کاتیونی خاک در تیمارهای تحت آبیاری نسبت به تیمار بدون آبیاری عمدتاً ناشی از اثرات ماده آلی خاک می‌باشد که بر اثر احداث جنگل مصنوعی ایجاد شده است. این نتایج با نتایج مطالعات صابر (۳۲) در مصر نیز مطابقت دارد.

تغییرات ازت کل خاک در اثر آبیاری با پساب و آب چاه در مقایسه با خاک بکر در سطح احتمال ۵ درصد فاقد تفاوت معنی‌دار بود، هر چند کمترین مقدار در تیمار خاک بکر مشاهده شد. نتایج مطالعات انجام گرفته در مورد تأثیر آبیاری با پساب

بر ازت کل خاک بسته به منشأ پساب مورد استفاده متضاد بوده است. برای مثال، کیزیاوغلو و همکاران (۲۱) نشان دادند ازت کل و ماده آلی خاک در اثر آبیاری با پساب تصفیه شده شهری شدیداً کاهش یافت. درحالی‌که رامیرز–فونتز و همکاران (۳۱) نشان دادند که آبیاری با پساب سبب افزایش میزان ازت کل خاک شد. بنابراین، تأثیر پساب بر ازت خاک بستگی به نوع پساب و درصد ماده آلی خاک دارد.

از نظر مقدار فسفر قابل دسترس خاک، در بین تیمارهای آبیاری در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنی‌داری وجود نداشت، هرچند بیشترین مقدار فسفر قابل دسترس در تیمار ۱۸ سال آبیاری با پساب وکمترین مقدار در تیمار خاک بکر تعیین گردید (جدول ۲). محمد و همکاران (۲۷) و ماندال و همکاران (۲۳) نیز گزارش کردند فسفر قابل جذب در اثر آبیاری با پساب افزایش می‌یابد. این درحالی‌است که آدرورو (۱۰) بیان نمود که آبیاری با پساب اثری برروی فسفر قابل دسترس نداشته و مقدار آن در حدود خاکی بود که با پساب آبیاری نشده بود.

بین تیمارآبیاری با آب چاه و خاک بدون آبیاری در مورد پتاسیم قابل دسترس خاک در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنی‌داری وجود داشت، ولی بین تیمارهای آبیاری با پساب در زمان‌های مختلف از این نظر تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد (جدول ۲). از نظر کمیت پتاسیم قابل جذب خاک، تیمار ۱۸ سال آبیاری با پساب دارای بیشترین و تیمار آبیاری با آب چاه دارای کمترین کمیت پتاسیم قابل جذب بودند. رامیرز– فونتز و همکاران (۳۱) نیز دریافتند که آبیاری با پساب سبب افزایش در میزان پتاسیم قابل جذب خاک می‌شود.

نحوه اثرگذاری تیمارهای آبیاری بر SAR خاک‌ها به‌گونه‌ای بوده است که خاک تحت ۱۸ سال آبیاری با پساب دارای بیشترین SAR می‌باشد. بین دو تیمار ۱۸ سال آبیاری با پساب و آب چاه با خاک بکر تفاوتی در سطح احتمال ۵ درصد از نظر SAR خاک مشاهده شد. اگرچه SAR پساب تصفیه شده مجتمع فولاد در محدوده مجاز برای آبیاری است اما استفاده دراز مدت از آن باعث افزایش SAR خاک نسبت به خاک بکر شده است. مرمود و همکاران (۲۶) نیز دریافتند در اثر استفاده از پساب صنعتی به‌مدت ۲ سال، نسبت جذب سدیم خاک افزایش یافت. همچنین کیان و مکام (۳۰) بیان داشتند استفاده طولانی از پساب می‌تواند باعث افزایش SAR خاک‌ها گردد. نسبت جذب سدیم یک فاکتور تأثیرگذار برای استفاده از پساب‌ها است، به‌طوری‌که اگر این نسبت بین ۱۲ تا ۱۵ باشد، سبب بروز مشکلات جدی فیزیکی خاک‌ها می‌گردد، ولی در خاک‌های اراضی فضای سبز مجتمع فولاد مبارکه به‌دلیل بافت درشت و درصد سنگریزه زیاد احتمال ایجاد محدودیت‌های فیزیکی ناشی از سدیم بسیار کم است.

تغیرات شاخص‌های بیولوژیکی کیفیت خاک‌ها

مقایسات میانگین اثر تیمارهای آبیاری بر تنفس پایه میکروبی خاک نشان داد که تمام تیمارها نسبت به خاک بکر در سطح احتمال ۵ درصد دارای تنفس میکروبی بیشتری می‌باشند (جدول ۳). این تفاوت می‌تواند به‌علت استقرار پوشش گیاهی و افزوده شدن بقایای گیاهی باشد که سبب افزایش فعالیت میکروبی در خاک‌ها گردیده است. هیچ‌یک از خاک‌های تحت آبیاری با یکدیگر دارای تفاوت معنی‌داری از نظر تنفس میکروبی خاک نبودند، بنابراین می‌توان چنین احتمال داد که آبیاری با پساب حتی در طی ۱۸ سال تأثیر منفی معنی‌داری بر فعالیت میکروبی خاک ایجاد نکرده است. نتایج مطالعات دیگر نیز بر افزایش تنفس خاک بر اثر مصرف پساب دلالت دارد. به‌عنوان نمونه، ملی و همکاران (۲۵) گزارش کردند که تنفس میکروبی در خاک‌های آبیاری شده با پساب افزایش معنی‌دار داشت. آنها افزایش عناصر غذایی مورد نیاز رشد میکروبی بر اثر افزودن پساب را عامل تحریک فعالیت میکروبی و افزایش خروج دی‌اکسیدکربن از خاک دانستند.

مقایسه میانگین تیمارها از نظر فعالیت آنزیم آلکالین فسفاتاز نشان داد که فعالیت این آنزیم در خاک‌های تحت آبیاری بیشتر ازخاک بکر بود، ولی از بین تیمارها، فقط تیمار آبیاری ۶ سال

جدول ۳. مقایسه میانگین برخی شاخص‌های بیولوژیکی خاک‌های مورد مطالعه تحت تیمارهای مختلف آبیاری

تیمار آبیاری	تنفس پایه میکروبی (mg CO_2/kg soil day)	فعالیت آنزیم فسفاتاز (mg PNP/kg h)	شدت آرجنین آمونیفیکاسیون (mg N-NH_3/kg soil)
۱۸ سال پساب	۱۲۸ [a]	۳۷ [ab]	۲/۴ [a]
۶ سال پساب	۱۵۷ [a]	۸۰ [a]	۲/۷۱ [a]
۲ سال پساب	۱۳۵ [a]	۴۰ [ab]	۲/۵۶ [a]
آب چاه	۱۱۳ [a]	۵۳ [ab]	۲/۹۵ [a]
بکر	۴۸ [b]	۲۲ [b]	۱/۳ [b]

میانگین‌های دارای حروف مشترک فاقد تفاوت معنی‌دار هستند

پساب با خاک بکر در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف معنی‌داری نشان داد (جدول ۳). تأثیر آبیاری با پساب بر فعالیت آنزیمی خاک بستگی به نوع پساب مصرفی متفاوت است. به‌عنوان مثال، تم (۳۶) اظهار کرد که آبیاری با پساب، تغییری در فعالیت آنزیم آلکالین فسفاتاز خاک نسبت به تیمار شاهد ایجاد نکرد، درحالی‌که آدرورو (۱۰) تأثیر افزایش آبیاری با پساب تصفیه شده شهری به‌مدت ۲۰ سال و ترو و همکاران (۳۷) آبیاری کوتاه مدت (۳ تا ۴ سال) بر فعالیت آنزیم آلکالین فسفاتاز در خاک نسبت به تیمار شاهد را افزایش معنی‌دار گزارش کردند. با توجه به این‌که فعالیت آنزیم آلکالین فسفاتاز به عنوان شاخصی برای پایش سمیت فلزات سنگین یا سایر آلاینده‌ها استفاده می‌شود، می‌توان چنین نتیجه گرفت که کیفیت پساب تصفیه شده مجتمع فولاد مبارکه به‌گونه‌ای بوده است که فعالیت این آنزیم در خاک تحت آبیاری با پساب به مدت ۲ و ۱۸ سال اختلاف معنی‌داری در مقایسه با خاک بکر و تحت آبیاری با آب چاه ایجاد نکرده است. در واقع افزایش فعالیت آنزیم فسفاتاز در خاک‌های تحت جنگل مصنوعی مجتمع فولاد مبارکه نسبت به خاک بکر نشان‌دهنده افزایش کیفیت بیولوژیکی خاک این اراضی می‌باشد.

مقایسه میانگین تیمارهای مختلف برای شدت معدنی شدن آرجنین نشان می‌دهد که تیمارهای مختلف آبیاری از این نظر در مقایسه با تیمار خاک بکر در سطح احتمال ۵ درصد دارای تفاوت معنی‌داری بودند، اما خاک تحت تیمار آب چاه با تیمارهای پساب از این نظر فاقد تفاوت معنی‌داری بود (جدول ۳). تم (۳۶) از میزان آرجینی که تبدیل به آمونیوم می‌شود به‌عنوان شاخصی از اثرات آلاینده‌ها بر فعالیت میکروارگانیزم‌ها استفاده کرد. با توجه به این‌که در مطالعه حاضر اختلاف معنی‌داری از نظر شدت معدنی شدن آرجنین در خاک‌های تحت آبیاری با آب چاه و پساب وجود نداشت، می‌توان نتیجه گرفت میزان آلاینده‌ها در پساب تصفیه شده به میزانی نبوده است که اثر بازدارنده بر فعالیت فعالیت میکروبی خاک داشته باشد. بیشتر بودن شدت آمونیفیکاسیون آرجنین در خاک اراضی جنگل مصنوعی مجتمع فولاد نشان دهنده افزایش فعالیت میکروبی در خاک این اراضی در نتیجه جنگل‌کاری و افزایش مواد آلی خاک می‌باشد.

نتیجه‌گیری

به‌طورکلی آبیاری خاک‌های فضای سبز مجتمع فولاد مبارکه به پساب تصفیه شده و آب چاه از طریق ایجاد جنگل مصنوعی موجب بهبود برخی شاخص‌های کیفیت شیمیایی خاک منطقه مانند درصد ماده آلی خاک و ظرفیت تبادل کاتیونی شده است، هرچند به‌دلیل شوری نسبتاً زیاد آب و پساب مورد استفاده و شیوه آبیاری قطره‌ای، شوری خاک‌ها در ناحیه پیاز رطوبتی نیز افزایش یافته که نیاز به مدیریت ویژه جهت جلوگیری از تجمع بیشتر املاح در مجاورت ریشه درختان دارد.

شاخص‌های کیفیت بیولوژیکی خاک‌های مورد مطالعه مانند

تنفس میکروبی، فعالیت آنزیم فسفاتاز و شدت معدنی شدن آرجینین نیز در اثر آبیاری با پساب و آب چاه نسبت به خاک بکر منطقه افزایش یافته است که نشان دهنده اثر مثبت آبیاری بر رشد درختان و بهبود کیفیت خاک این اراضی است.

منابع مورد استفاده

۱. ایوبی، ش.، ح. خادمی، ح. شریعتمداری، و ا. مللی. ۱۳۹۲. بررسی محدودیت‌ها و تعیین قابلیت و استعداد خاک‌های فضای سبز فعلی محدوده شرکت فولاد مبارکه. شرکت فولاد مبارکه، اصفهان.

۲. بنایی، م. ح.، ع. مومنی، م. بای‌بوردی و م. ج. ملکوتی. ۱۳۸۳. خاک‌های ایران. موسسه تحقیقات خاک وآب.

۳. حاج رسولی‌ها، ش. (مترجم). ۱۳۶۴. *کیفیت آب برای کشاورزی*. تألیف آیرزووسکات. مرکزنشردانشگاهی.

۴. سازمان حفاظت محیط زیست ایران .۱۳۹۲. استانداردهای کیفیت منابع خاک و راهنماهای آن.

۵. شرکت مهندسین مشاور یکم. ۱۳۸۹. ضوابط زیست محیطی استفاده مجدد از آب‌های برگشتی و پساب‌ها. نشریه شماره ۵۳۵.

۶. صفری سنجانی، ع. ۱۳۷۴. پیامدآبیاری با پساب بر برخی از ویژگی‌های شیمیایی خاک‌های ناحیه برخوار اصفهان و انباشتگی برخی عناصر درگیاه یونجه. پایان‌نامه کارشناسی ارشد خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان.

۷. عرفانی، ع.، غ. حق نیا و ا. علیزاده. ۱۳۸۱. تأثیر آبیاری با فاضلاب بر عملکرد و کیفیت کاهو و برخی ویژگی‌های خاک. مجله علوم و فنون کشاورزی ومنابع طبیعی ۱: ۹۲-۷۱.

۸. موسسه تحقیقات خاک و آب. ۱۳۷۸. دستورالعمل تجزیه‌های آزمایشگاهی نمونه‌های خاک و آب. نشریه ۴۶۷.

۹. وثوقی، م.، ح. ر. طاهری و ف. مشهون. ۱۳۷۵. بررسی استفاده مجدد از فاضلاب پالایشگاه تهران در آبیاری درختان جنگلی. دومین کنگره ملی مسایل آب وخاک کشور، ۳۳۱-۳۲۱.

10. Adrover, M., E. G. Farrús and J. Vadell. 2012. Chemical properties and biological activity in soils of Mallorca following twenty years of treated wastewater irrigation. Environ. Manage. 95: 188-192.

11. Alef, K. and D. Kleiner. 1987. Applicability of arginine ammonification as indicator of microbial activity in different soils. Biol. Fert. Soils 5: 148-151.

12. Baberjee, M. R., D. L. Barton and S. Depoe. 1997. Impact of sewage sludge application on soil biological characteristics. Agr. Ecosyst. Environ. 66: 241-249.

13. Brzezinska, M., S. Tiwari, Z. Stepniewska, M. Nosalewicz, R. Bennicelli and A. Samborska. 2006. Variation of enzyme activities, CO_2 evolution and redox potential in an Eutric Histosol irrigated with wastewater and tap water. Biol. Fert. Soils 43: 131-135.

14. Chang, A., J. Warneke, A. Page and L. Lund. 1984. Accumulation of heavy metals in sewage sludge-treated soils, J. Environ. Qual. 13: 87-91.

15. Chen, S. K., C. A. Edwards and S. Subler. 2003. The influence of two agricultural biostimulants on nitrogen transformations, microbial activity, and plant growth in soil microcosms, Biology and Fertility of Soils 35: 9-19.

16. Deng, S. and M. Tabatabai. 1997. Effect of tillage and residue management on enzyme activities in soils: III. Phosphatases and arylsulfatase. Biol. Fert. Soils 24: 141-146.

17. Dodor, D. E. and M. A.Tabatabai. 2005. Glycosidases in soils as affected by cropping systems. J. Plant Nutr. Soil Sci. 168: 749-758.

18. Filip, Z., S. Kanazawa and J. Berthelin. 1999. Characterization of effects of a long-term wastewater irrigation on soil quality by microbiological and biochemical parameters. J. Plant Nutr. Soil Sci. 162: 409-413.

19. Finocchiaro, R. G. and R. J. Kremer. 2010. Effect of municipal wastewater as a wetland water source on soil microbial activity. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 41: 1974-1985.

20. Jordan, D., R. Kremer, W. Bergfield, K. Kim and V. Cacnio. 1995. Evaluation of microbial methods as potential indicators of soil quality in historical agricultural fields, Biol Fert. Soils 19: 297-302.

21. Kiziloglu, F., M. Turan, U. Sahin, Y. Kuslu and A. Dursun. 2008. Effects of untreated and treated wastewater

irrigation on some chemical properties of cauliflower *Brassica olerecea* L. var. botrytis and red cabbage *Brassica olerecea* L. var. rubra grown on calcareous soil in Turkey. Agric. Water Manage. 95:716-724.
22. Logan, T. J. and R. Chaney. 1983. Utilization of municipal wastewater and sludge on land: metals. PP. 235-326. *In*: Page, A. L., Gleason III, T. L., Smith, J. E., Iskandar, I. K. and Sommers, L. E. (Eds.), Workshop on Utilization of Municipal Wastewater and Sludge on Land, University of California Riverside, CA.
23. Mandal, U. K., D. Warrington, A. Bhardwaj, A. Bar-Tal, L. Kautsky, D. Minz and G. Levy. 2008. Evaluating impact of irrigation water quality on a calcareous clay soil using principal component analysis. Geoderma 144: 189-197.
24. Masciandaro, G., B. Ceccanti and J. Gallardo-Lancho. 1998. Organic matter properties in cultivated versus set-aside arable soils. Agr. Ecosyst. Environ. 67: 267-274.
25. Meli, S., M. Porto, A. Belligno, S. A. Bufo, A. Mazzatura and A. Scopa. 2002. Influence of irrigation with lagooned urban wastewater on chemical and microbiological soil parameters in a citrus orchard under Mediterranean condition. Sci. Total Environ. 285: 69-77.
26. Mermoud, A., H. Yacouba and P. Boivin. 2013. Impacts of irrigation with industrial treated wastewater on soil properties. Geoderma 200: 31-39.
27. Mohammad, M. J. and N. Mazahreh. 2003. Changes in soil fertility parameters in response to irrigation of forage crops with secondary treated waste water. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 34: 1281-1294.
28. Ndiaye, E., J. Sandeno, D. McGrath and R. Dick. 2000. Integrative biological indicators for detecting change in soil quality. Am. J. Alternative Agr. 15: 26-36.
29. Neilsen, G., D. Stevenson, J. Fitzpatrick and C. Brownlee. 1991. Soil and sweet cherry responses to irrigation with wastewater. Can. J. Soil Sci. 71: 31-41.
30. Qian, Y. and B. Mecham. 2005. Long-term effects of recycled wastewater irrigation on soil chemical properties on golf course fairways. Agron. J. 97: 717-721.
31. Ramirez-Fuentes, E., C. Lucho-Constantino, E. Escamilla-Silva and L. Dendooven. 2002. Characteristics, and carbon and nitrogen dynamics in soil irrigated with wastewater for different lengths of time. Bioresource Technol. 85: 179-187.
32. Saber, M. 1986. Prolonged effect of land disposal of human wastes on soil conditions. Water Sci. Technol. 18: 371-374.
33. Schipper, L. A., J. Williamson, H. Kettles and T. Speir. 1996. Impact of land-applied tertiary-treated effluent on soil biochemical properties. J. Environ. Qual. 25: 1073-1077.
34. Shi, Z., Y. Lu, Z. Xu and S. Fu. 2008. Enzyme activities of urban soils under different land use in the Shenzhen city, China. Plant Soil Environ. 54: 341-346.
35. Tabatabai, M. 1994. Soil enzymes. PP. 775-833. *In*: Weaver, R. W., Angle, J. S., Bottomley, P. S. (Eds.), Methods of Soil Analysis: Part 2-Microbiological and Biochemical Properties, American Society of Agronomy, Madison, WI.
36. Tam, N. 1998. Effects of wastewater discharge on microbial populations and enzyme activities in mangrove soils. Environ Pollut. 102: 233-242.
37. Truu, M., J. Truu and K. Heinsoo. 2009. Changes in soil microbial community under willow coppice: the effect of irrigation with secondary-treated municipal wastewater. Ecol Eng. 35: 1011-1020.
38. Vinten, A., U. Mingelgrin and B. Yaron. 1983. The effect of suspended solids in wastewater on soil hydraulic conductivity: II. Vertical distribution of suspended solids. Soil Sci. Soc. Am. J. 47: 408-412.