تأثیر آبیاری بلند مدت با فاضلاب تصفیه شده شهری کرمانشاه بر برخی خصوصیات فیزیکی خاک

میلاد فرمانی‌فرد[۱]*، هوشنگ قمرنیا، مقداد پیرصاحب و نظیر فتاحی

فارغ التحصیل دکتری گروه مهندسی آب پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه رازی.
Milad.farmanifard@gmail.com
استاد گروه مهندسی آب پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه رازی.
hghamarnia@yahoo.co.uk
استاد گروه مهندسی بهداشت محیط دانشکده بهداشت دانشگاه علوم پزشکی کرمانشاه.
mpirsaheb@yahoo.com
استادیار مرکز تحقیقات عوامل محیطی موثر بر سلامت دانشگاه علوم پزشکی کرمانشاه.
nazirfatahi@yahoo.com

چکیده

در کشورهای خشک و نیمه‌خشک، کمبود منابع آب تجدیدپذیر از یک سو و بالا رفتن حجم تقاضا برای دستیابی به آب باکیفیت خوب از سوی دیگر، در حال افزایش است. بنابراین، لازم است آب با کیفیت بالاتر برای مصارف شهری و آشامیدن حفظ شده و منابع آب با کیفیت پایین‌تر (همچون فاضلاب تصفیه شده) برای مصارف دیگر نظیر کشاورزی و صنعت بکار گرفته شوند. در این شرایط، در اختیار داشتن اطلاعات کافی و محلی ضروری است. از این رو؛ هدف این تحقیق بررسی اثرات آبیاری بلند مدت با فاضلاب تصفیه شده شهری (پساب) در مقایسه با آب چاه (به عنوان تیمار شاهد)، بر خصوصیات فیزیکی خاک بوده است. به این منظور، خصوصیات خاک شامل: هدایت هیدرولیکی اشباع، منحنی مشخصه رطوبتی و نقاط رطوبتی، جرم مخصوص حقیقی و ظاهری و تخلخل خاک در سه لایه تا عمق ۹۰ سانتی‌متری، در قالب طرح تجزیه مرکب دو ساله و آزمایش کرت‌های خرد شده در سه تکرار بررسی شد. نتایج به‌دست آمده از تحلیل‌های آماری نشان داد که روند یکسانی بین پارامترهای مختلف وجود ندارد و تأثیرپذیری پارامترهای خاک از تیمارهای آبیاری در اعماق مختلف متفاوت می‌باشد. مثلاً، مقادیر اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی اشباع خاک اراضی تحت آبیاری با پساب نسبت به آب چاه به ترتیب برای اعماق ۳۰-۰، ۶۰-۳۰ و ۹۰-۶۰ سانتی‌متر به اندازه ۱۰۹٪، ۲۵٪ و ۷۵٪ افزایش یافت. اضافه بر این؛ بکارگیری پساب باعث افزایش محتوای رطوبتی خاک در نقاط ظرفیت زراعی و پژمردگی دائم شد، اما مقدار آب در دسترس را کاهش داد. تحت تأثیر آبیاری با پساب، جرم مخصوص ظاهری لایه سطحی خاک کاهش و جرم مخصوص حقیقی آن افزایش یافت. همچنین، تخلخل کل خاک در لایه‌های اول و دوم نسبت به تیمار شاهد کمتر بود، ولی در لایه ۹۰-۶۰ سانتی‌متری افزایش نشان داد. در مجموع می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از پساب تا حدودی باعث بهبود شرایط فیزیکی خاک گردید، اما استفاده از فاضلاب تصفیه نشده و پساب برای آبیاری محصولات خوراکی توصیه نمی‌شود.

واژه‌های کلیدی: بحران منابع آب، تخلخل خاک، جرم مخصوص حقیقی، جرم مخصوص ظاهری، منحنی مشخصه رطوبتی، هدایت هیدرولیکی اشباع.

---

۱ – آدرس نویسنده مسئول: کرمانشاه، گروه مهندسی آب پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه رازی.
*– دریافت: مهر ۱۳۹۵ و پذیرش: اسفند ۱۳۹۵

Archive of SID
www.SID.ir

مقدمه

در کشورهای واقع در مناطق خشک و نیمه خشک دنیا، یکی از مهمترین مشکلات پیشرو در بخش کشاورزی به عنوان مصرف کننده اصلی منابع آب، یافتن منابع آب جدید و قابل اتکاء برای آبیاری می‌باشد (همیلتون و همکاران، ۲۰۰۷). استفاده از پساب جهت آبیاری در کشاورزی در مناطق مواجه با تنش و کمبود آب، باعث کاهش فشار بر منابع آب موجود شده و اجازه می‌دهد تا منابع آب با کیفیت جهت مصارف دیگر و توسعه زیر ساخت‌های امنیت و سلامت اختصاص یابد (ساچت و مارچنر، ۲۰۱۵). از اینرو؛ با توجه به خشکسالی‌های اخیر و کمبود و کاهش منابع آب با کیفیت در ایران، آبیاری با فاضلاب تصفیه شده یا اصطلاحاً پساب به یک عمل معمول و رایج تبدیل شده است (رینولدز و همکاران، ۲۰۰۹)، اما باید توجه داشت علیرغم اینکه استفاده از پساب برای آبیاری یک استراتژی ارزشمند جهت بالابردن منابع آب در دسترس محسوب می‌شود، اما کیفیت و شرایط این آب می‌تواند چالش‌هایی را در کشاورزی ایجاد نماید (حسن و همکاران، ۲۰۱۵).

آبیاری با فاضلاب شهری می‌تواند باعث ایجاد تغییر در خصوصیاتی از خاک شود که نقش مهمی را در انتقال، نگهداری و حرکت مواد مغذی موجود در پساب مورد استفاده ایفا می‌کنند. به ویژه خصوصیات فیزیکی خاک نظیر بافت، ساختمان، تخلخل و هدایت هیدرولیکی که در بلند مدت بر محتوای رطوبتی و تهویه خاک تأثیر می‌گذارند (ماگسن و همکاران، ۱۹۹۸). با توجه به علاقه رو به رشد در استفاده از پساب جهت آبیاری و با توجه به اثرات احتمالی آن بر خاک، محققین مختلفی اثرات آبیاری با پساب بر خواص فیزیکی و شیمیایی خاک را مطالعه کرده‌اند (آییلو و همکاران، ۲۰۰۷؛ کلی و همکاران، ۲۰۱۰ و حسن و همکاران، ۲۰۱٤). در ایران نیز اثرات پساب و فاضلاب مناطق مختلف بر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک بررسی شده است. عابدی کوپایی و همکاران (۲۰۰۱) بیان کردند که هدایت هیدرولیکی خاک در اثر آبیاری با فاضلاب تصفیه شده شهری تغییر معنی-داری نداشته است، ولی در اثر آبیاری با آب زیرزمینی کاهش معنی‌داری از خود نشان داده است. روحانی شهرکی و همکاران (۱۳۸٤) اعلام داشتند که پساب در خاک به عنوان یک ماده شیمیایی اصلاح کننده عمل کرده و موجب تغییر خواص فیزیکی خاک شده و بر اثر آن هدایت هیدرولیکی اشباع افزایش می‌یابد. مطالعه اثر آبیاری ۳۰ ساله فاضلاب بر لایه سطحی (۲۰-۰ سانتی‌متر) خاک‌های منطقه ورامین در تهران با اقلیم نیمه خشک توسط ملاحسینی، (۲۰۱۳) نشان داد که هدایت هیدرولیکی خاک دست نخورده در نتیجه آبیاری بلند مدت از ۲۹/٤ میلی‌متر در ساعت به ۱۳/۵ میلی‌متر در ساعت رسیده است؛ اما با افزایش عمق خاک مقدار هدایت هیدرولیکی تغییر روند داده و در لایه زیرسطحی (٤۰-۲۰ سانتی‌متری) افزایش یافته است. همچنین، زادهوش و فرداد (۱۳۷۵)، با کاربرد پساب در اصفهان در خاک رسی، گزارش کردند که جرم مخصوص ظاهری خاک و درصد رطوبت در ظرفیت مزرعه در مدت یک سال روند خاصی را دنبال نمی‌کند؛ اما در یک مقایسه مشخص شد که اراضی آبیاری شده به مدت نه سال با پساب دارای جرم مخصوص ظاهری کمتر، درصد رطوبت در ظرفیت مزرعه بیشتر و نفوذ نهایی کمتر نسبت به مزرعه آبیاری نشده با پساب بود. همچنین، اخیراً نیز خدادادی و همکاران، (۱۳۹٤)، با بررسی اثر آبیاری با پساب‌های شهری و صنعتی (به مدت هشت سال) و آب رودخانه (بیست سال) بر برخی ویژگی‌های فیزیکی خاک در زمین‌های کشاورزی منطقه زرین‌شهر لنجان گزارش کردند که آبیاری با پساب‌های شهری و صنعتی موجب افزایش جرم مخصوص ظاهری و همچنین، باعث کاهش هدایت هیدرولیکی خاک، نفوذپذیری و دوکوهانه شدن منحنی رطوبتی خاک گردیده است.

مطابق گزارش لادو و بن‌هوور (۲۰۰۹)، اثرات مستقیم و غیر مستقیم آبیاری با فاضلاب بر خصوصیات

Archive of SID

www.SID.ir

هیدرولیکی خاک تا حد زیادی در ارتباط با هر دو عامل فاضلاب و خصوصیات خاک می‌باشد. کاربرد فاضلاب در خاک، قابلیت نگهداری آب خاک را افزایش داده و می‌تواند مقادیر حجم خلل و فرج و هدایت هیدرولیکی اشباع را کاهش دهد (داوس، ۲۰۰۴). کوپولا و همکاران، (۲۰۰۴) گزارش نمودند که کاهش هدایت هیدرولیکی خاک در اثر کاربرد پساب، تنها در نتیجه نفوذ عمقی آب در نیمرخ خاک نیست، بلکه می‌تواند متأثر از حرکت افقی آب در خاک نیز باشد. باید دقت داشت که مسدود شدن منافذ و خلل و فرج خاک در بیشتر مواقع لایه‌های بالایی و سطحی خاک رخ می‌دهد. چرا که در اثر آبیاری با فاضلاب استحکام خاکدانه‌ها کم شده و در نتیجه خاک متراکم گردیده و هوادهی و نفوذ هوا درون خاک کاهش می‌یابد (ماگسن، ۲۰۰۱).

بررسی تحقیقات قبلی حاکی از آن است که استفاده از فاضلاب تصفیه شده، در سرتاسر جهان رایج و معمول است؛ اما آنچه اهمیت دارد راهکارها، نحوه استفاده و بومی سازی آن برای هر منطقه بر اساس محصولات مورد استفاده و شرایط فیزیکی و شیمیایی خاک آن محل است. در حال حاضر در بسیاری از شهرهای ایران، فاضلاب‌های شهری و رواناب‌های سطحی که از شهرها خارج می‌شوند، در زمین‌های کشاورزی پایین‌دست استفاده می‌گردد. در این ارتباط، ضرورت دارد در مورد اثرات آبیاری با پساب تأثیرپذیری خاک از ابعاد مختلف فیزیکی و شیمیایی در قیاس با شرایط آبیاری با آب با کیفیت مناسب مطالعه و ارزیابی شده و نتایج حاصله از آزمایشات با استانداردهای موجود و دست آوردهای تحقیقات پیشین مقایسه گردد. لذا، هدف از این تحقیق بررسی اثرات آبیاری بلند مدت با پساب شهری بر روی خصوصیات فیزیکی خاک شامل: جرم مخصوص ظاهری و حقیقی، هدایت هیدرولیکی اشباع، منحنی مشخصه، نقاط رطوبتی و تخلخل خاک و مقایسه آن با آب چاه به عنوان شاهد می‌باشد.

مواد و روش‌ها

تصفیه‌خانه فاضلاب شهرکرمانشاه با مساحتی در حدود ۷۸ هکتار، در جنوب غربی شهر و به مختصاتی به طول جغرافیایی "۲۷ ′۱۸ °۳٤ و عرض "۱۸ ′۰۸ °٤۷ واقع شده است. این تصفیه‌خانه برای جمعیتی برابر ٤۰۰ هزار نفر طراحی و از اواسط پائیز ۱۳۸٤ مورد بهره‌برداری قرار گرفته است. فرآیند تصفیه در این تصفیه‌خانه به روش لجن فعال از نوع متعارف می‌باشد که شامل مراحل تصفیه‌های مقدماتی، اولیه و ثانویه و نهایتاً گندزدایی پساب است. مقدار پساب خروجی معادل ۷۰۰ لیتر در ثانیه و ٦۰۰۰۰ مترمکعب در شبانه روز است.

این تحقیق در شرایط واقعی انجام شده و در طی آن سعی گردید که تمام شرایط مزرعه بر آزمایشات حاکم باشد. اراضی منتخب در پایین‌دست تصفیه‌خانه واقع گردیده‌اند که به روش سطحی و سنتی قریب ۱۰ سال با پساب خروجی تصفیه‌خانه آبیاری شده‌اند. همچنین نمونه‌های شاهد (که از سال‌های دور با آب چاه آبیاری شده و می‌شوند) نیز دقیقاً در اراضی روبروی این منطقه واقع شده اند که هر یک مساحتی قریب پنج هکتار را شامل می‌گردند. دور آبیاری در فصل بهار نه روزه و در تابستان هفت روزه بود. کشت غالب در کل منطقه مورد مطالعه و اراضی اطراف آن گندم، جو، ذرت و بامیه است که جهت شباهت حداکثری و عدم ایجاد اختلاف در نتایج، نمونه‌برداری از خاک به نحوی صورت پذیرفت که هر دو نمونه خاک تحت تیمارهای مختلف از اراضی تحت کشت یک محصول یکسان جمع‌آوری گردد. همچنین، به دلیل امکان تأثیر گیاه و سیستم ریشه، نمونه‌برداری از سه لایه خاک ۳۰ سانتی‌متری از قسمت‌های مختلف مزرعه در سه تکرار انجام شد. در این مطالعه از دو تیمار آب، یکی پساب خروجی تصفیه‌خانه فاضلاب و دیگری چاه به عنوان شاهد استفاده شد. برای آزمایشات آب، قبل از شروع آبیاری یعنی اوائل اردیبهشت و در پایان برداشت محصول و قبل از بارندگی سال زراعی بعد، یعنی اوائل شهریور اقدام به نمونه‌برداری از پساب

Archive of SID

www.SID.ir

خروجی از تصفیه‌خانه و آب چاه جهت انجام آزمایشات شیمیایی گردید و این کار به مدت دو سال تکرار شد که نتایج آن در ادامه ارائه می‌گردد.

در مورد خاک، در پایان هر فصل زراعی و به مدت دو سال (۹۲ و ۹۳) نمونه‌های خاک تحت تیمار پساب و آب چاه و در سه تکرار از سه لایه (عمق‌های ۳۰-۰، ۶۰-۳۰ و ۹۰-۶۰ سانتی‌متری) برداشت شد. در مجموع ۳۶ نمونه خاک مورد آزمایشات فیزیکی قرار گرفت. این آزمایشات شامل جرم مخصوص ظاهری و حقیقی، هدایت هیدرولیکی اشباع و نقاط پتانسیل رطوبتی و منحنی مشخصه رطوبتی خاک بود. بعد از برداشت نمونه‌ها، آن‌ها را در مجاورت هوا قرار داده تا به طور کامل خشک شوند. پس از خشک شدن نمونه‌ها را خرد کرده و از الک دو میلی‌متری عبور داده شدند. ویژگی‌های فیزیکی خاک، شامل جرم مخصوص حقیقی به روش آزمایشگاهی با استفاده از پیکنومتر (کلوت و دیرکون، ۱۹۸۶)، جرم مخصوص ظاهری به روش نمونه‌برداری دست نخورده و توزین پس از خشک شدن (کلوت و دیرکون، ۱۹۸۶)، رطوبت در نقطه ظرفیت زراعی و رطوبت در نقطه پژمردگی دائم به روش مزرعه‌ای (علیزاده و همکاران، ۱۳۸۲)، میزان آب قابل دسترس از تفاضل مقادیر FC و PWP، اندازه‌گیری شدند. برای اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی اشباع خاک از روش بار افتان استفاده شد (کلوت و دیرکون، ۱۹۸۶). منحنی دانه‌بندی خاک به روش الک (با شماره‌های ۴، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۶۰، ۱۰۰، ۱۷۰ و ۲۰۰) ترسیم شد. جهت اندازه‌گیری منحنی مشخصه، دستگاه صفحات فشاری که دارای دو مخزن مجزا یکی تا فشار پنج بار (مدل 1600) و دیگری تا فشار ۱۵ بار (مدل 1500F1) مورد استفاده قرار گرفت. برای اندازه-گیری منحنی مشخصه خاک، محتوی رطوبتی خاک در فشارهای تقریبی ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۳، ۰/۵، ۱، ۳، ۵، ۷، ۹، ۱۱، ۱۳ و ۱۵ بار اندازه‌گیری شد (لی و بودر، ۱۹۸۶). تخلخل خاک نیز با استفاده از جرم مخصوص ظاهری و جرم مخصوص حقیقی و روابط موجود محاسبه گردیدند.

این پژوهش در قالب یک طرح تجزیه مرکب دو ساله با آزمایش کرت‌های خرد شده (برای دو تیمار آبیاری با پساب و آب چاه) و در سه تکرار، در مدت دو سال برای هریک از پارامترهای فیزیکی خاک انجام شد. پارامترهای اندازه‌گیری شده با استفاده از نرم افزارهای آماری SAS 9.1 و MSTATC تحلیل و ارزیابی شدند. آزمون نرمال بودن داده‌ها بر اساس روش کولموگورف-اسمیرنف[1] صورت گرفت. آزمون مقایسه میانگین نیز در سطوح احتمالی ۱٪ و ۵٪ بر اساس روش دانکن انجام گردید.

نتایج و بحث

بافت خاک با استفاده از هیدرومتر تعیین و بر اساس طبقه‌بندی USDA در هر سه لایه، بافت خاک لوم ماسه‌ای به‌دست آمد که نتایج آن در جدول (۱) ارائه شده است. جهت بررسی وضعیت شیمیایی منابع آب و خاک، نمونه‌های برداشت شده با استانداردهای رایج و معتبر FAO و سازمان حفاظت محیط زیست ایران (جهت استفاده از پساب برای مصارف کشاورزی) مقایسه شده‌اند. مطابق نتایج جدول (۲)، غلظت برخی از پارامترها در نمونه‌های پساب تصفیه‌خانه بیشتر از حدود مجاز به‌دست آمده است. این روند در نمونه‌های شهریورماه بیشتر و محسوس‌تر می‌باشد. غلظت فلزاتی نظیر منیزیم، آهن، منگنز و غلظت کلسیم و نیترات و فسفات و مقدار هدایت الکتریکی اکثر نمونه‌های پساب و حتی در برخی موارد معدود آب چاه، بیشتر از حدود پیشنهادی و مجاز جهت آبیاری است که باید مورد توجه و بررسی بیشتر قرار گیرد. همچنین، بررسی خصوصیات شیمیایی تیمارهای خاک آبیاری شده پساب و آب چاه نشان می‌دهد که در مواردی که حدود مجاز پیشنهادی ارائه شده است، تمامی مقادیر در هر دو تیمار، در محدوده مجاز بوده و همچنین اختلاف معنی‌داری نیز در اکثر موارد بین تیمارهای پساب و آب چاه مشاهده می‌گردد؛ اما غلظت بالای برخی از فلزات مانند، آهن، روی، منگنز و کادمیوم و همچنین

[1] Kolmogorov-Smirnov

Archive of SID

www.SID.ir

پتاسیم در تیمارهای خاک آبیاری شده با آب چاه جای تأمل دارد که که می‌تواند ناشی از کیفیت پایین این منبع آبی وقرارگیری منابع آب زیرزمینی تحت تأثیر منابع آلودگی باشد. با توجه به اینکه هدف اصلی از انجام این تحقیق، بررسی و ارزیابی تأثیرات بلند مدت آبیاری با پساب شهری تصفیه شده بر خصوصیات و شرایط فیزیکی خاک و مقایسه آن با آبیاری با آب چاه می‌باشد. لذا نتایج بصورت متوسط دو ساله تکرارهای مختلف ارائه شده است؛ اما جهت بررسی جامع و کامل نتایج، اثر سال و تکرارها نیز در تحلیل آماری محاسبه و ارائه شده است.

نتایج تحلیل آماری

نتایج تحلیل آماری تجزیه مرکب دو ساله تأثیر تیمارهای آبیاری بر خصوصیات فیزیکی خاک در اعماق مختلف ۳۰-۰، ۶۰-۳۰ و ۹۰-۶۰ سانتی‌متر در جدول (۳) ارائه شده است. نتایج به‌دست آمده از تحلیل‌های آماری نشان می‌دهد که روند یکسانی بین پارامترهای مختلف وجود ندارد و تأثیر تیمارهای آبیاری بر پارامترهای فیزیکی خاک در اعماق مختلف متفاوت می‌باشد. بر اساس نتایج به‌دست آمده، اثر همزمان سال و تیمارهای آبیاری بر روی همه پارامترهای فیزیکی خاک، از نظر آماری معنی‌دار نبوده است. این نتایج در مورد اثر همزمان سال در اعماق مختلف خاک نیز صادق می‌باشد. اثر کیفیت آب آبیاری نیز بر روی پارامترهای هدایت هیدرولیکی و رطوبت نقطه پژمردگی دائم در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار شده است. همچنین، پارامترهای جرم مخصوص ظاهری و حقیقی و رطوبت ظرفیت زراعی کمترین تأثیرپذیری را داشته‌اند. به‌طوریکه اثر کلیه عوامل حتی در سطح احتمال پنج درصد نیز معنی‌دار نشده‌اند، اما هدایت هیدرولیکی نمونه‌های خاک بیشترین تأثیرپذیری را نشان داده است. همچنین اثر سه-گانه سال در آبیاری در اعماق مختلف خاک فقط برای این دو پارامتر در سطح پنج درصد معنی‌دار گردیده است. ضریب تغییرات به‌دست آمده برای پارامترهای مختلف نیز نشان می‌دهد که تنوع و تغییرات بین داده‌ها قابل قبول و کم بوده است، به‌طوریکه؛ کمترین ضریب تغییرات برای جرم مخصوص حقیقی برابر با ۳/۳۸ درصد و بیشترین آن برای تخلخل و برابر با ۱۹/۷۷ درصد به‌دست آمد.

نتایج آزمون مقایسه میانگین به روش دانکن در سطح احتمال پنج درصد برای خصوصیات فیزیکی اعماق مختلف خاک در جدول (٤) نشان داده شده است. بدلیل اثر مستقیم و غیر مستقیم عوامل مختلف، نتایج این مقایسه میانگین شامل اثر تیمارهای کیفیت آب (A)، اثر متقابل کیفیت آب و لایه‌های خاک (A*B) و اثر متقابل سه گانه سال، کیفیت آب و لایه‌های خاک (Y*A*B) در جدول (٤) ارائه شده است. مطابق نتایج آزمون مقایسه میانگین، اثر جداگانه و متقابل هیچ یک از عوامل فوق الذکر بر جرم مخصوص حقیقی، رطوبت قابل دسترس و ظرفیت زراعی خاک در سطوح یک و پنج درصد معنی‌دار نشده است. همچنین برای پارامتر تخلخل کل خاک، فقط لایه-های خاک معنی‌دار (احتمالاً تحت تأثیر عملیات زراعی) شده است. از طرفی نیز، پارامترهای هدایت هیدرولیکی، جرم مخصوص ظاهری و نقطه پژمردگی دائم، بیشترین تأثیرپذیری از عوامل مختلف بر آزمایش داشته‌اند که با نتایج گزارشات قبلی نیز همخوانی دارد (ماگسن، ۲۰۰۱).

جدول ۱- مشخصات بافت خاک در لایه‌های عمقی مختلف

تیمار آبیاری	لایه خاک (سانتی‌متر)	درصد ماسه	درصد سیلت	درصد رس	کلاس بافت خاک
پساب	۰ – ۳۰	۶۱/۶	۲۲/۰	۱۶/۴	Sandy Loam
	۳۰ – ۶۰	۵۹/۶	۲۲/۳	۱۸/۱	Sandy Clay Loam
	۶۰ – ۹۰	۶۳/۶	۱۴/۰	۲۲/۴	Sandy Loam
آب چاه	۰ – ۳۰	۷۲/۱	۱۵/۴	۱۲/۴	Sandy Loam
	۳۰ – ۶۰	۷۵/۲	۱۳/۴	۱۱/۴	Sandy Loam
	۶۰ – ۹۰	۶۸/۲	۱۵/۴	۱۶/۴	Sandy Loam

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ۲- نتایج آزمایشات شیمیایی و فلزات سنگین آب و خاک و مقایسه با استانداردها جهت استفاده در آبیاری

متغیر	آب					خاک				
	واحد	پساب	آب چاه	[3]FAO	سازمان حفاظت محیط زیست	واحد	تیمار پساب	تیمار آب چاه	[2]EU	[1]WHO
مس (Cu)	mg/l	۰/۱۱	۰/۰	۰/۲	۰/۲	mg/kg	۴۱/۶	۲۱/۱	۱۴۰	۱۰۰
آهن (Fe)	mg/l	۳۶/۲	۱/۰۶	۵	۳	mg/kg	۳۱۲۴	۲۰۴۱	NA	-
روی (Zn)	mg/l	۰/۱۱	۰/۰۷	۱	۲	mg/kg	۲۳۳	۱۷۹	۳۰۰	۳۰۰
منگنز (Mn)	mg/l	۱۱/۱	۰/۰۲	۰/۲	۱	mg/kg	۹۴۲	۷۵۳	NA	NA
کادمیوم (Cd)	mg/l	۰/۳۵	۰/۰۶	–	۰/۰۵	mg/kg	۱/۸۵	۰/۶۷	۳	۴
سدیم (Na)	mg/l	۲۶/۲	۳۲/۶	۶۹	–	mg/l	۲۹۰	۱۲۴	-	-
کلسیم (Ca)	mg/l	۳۱۸/۵	۱۰۸/۲	۲۰۰	–	mg/l	۱۷/۲۵	۱۰/۵	-	-
منیزیم (Mg)	mg/l	۱۶۸/۳	۵۴/۱	۲۵	۱۰۰	mg/l	۶/۸۹	۴/۱۸	-	-
پتاسیم (K)	mg/l	۱۹/۸	۸/۵	–	–	mg/l	۹۳/۵	۸۴/۴	-	-
کلر (Cl^-)	mg/l	۵۸/۳	۲۱/۵	۱۰۰	۶۰۰	mg/l	۱۵/۳	۱۲/۶	-	-
نسبت جذب سدیم (SAR)	-	۱۷/۰	۳/۶۱	–	–	-	۴/۹۲	۵/۷۰	-	-
کل ذرات محلول (TDS)	mg/l	۱۱۸۶	۳۶۸	–	–	mg/l	۷۳/۶	۷۰/۸	-	-
هدایت الکتریکی (EC)	dS/m	۰/۹۶	۱/۴۱	۰/۷	–	dS/m	۰/۱۲	۰/۱۱	-	-
اسیدیته (pH)	-	۷/۶۸	۷/۰	۶/۵–۸/۴	۶–۸/۵	-	۷/۳۸	۷/۰۶	-	-

جدول ۳- نتایج تحلیل آماری تجزیه مرکب دوساله تأثیر تیمارهای آبیاری بر خصوصیات فیزیکی لایه‌های خاک

منابع تغییرات	درجه آزادی	Ks (mm hr^{-1})	ρ_b (g cm^{-3})	ρ_a (g cm^{-3})	η (%)	θ_{Fc} (%)	θ_{pwp} (%)	AW (%)
Y	۱	۳۶/۱۳۴**	۰/۱۷۷۲**	۰/۰۱۸۱ ns	۲۹/۵۳۴*	۱۱/۸۵۱ ns	۱۷/۹۰۰*	۹/۰۷۸ ns
R(Y)	۴	۱۲/۸۱۱**	۰/۰۸۳۵*	۰/۰۰۸۱ ns	۶۷/۹۲۳ ns	۱۳/۷۳۴ ns	۱۷/۰۳۰ ns	۰/۱۸۶*
A	۱	۱۳۲/۷۱*	۰/۰۸۹۴ ns	۰/۰۰۸۱ ns	۲۴/۱۹۷**	۱۳/۳۸۲ ns	۱/۱۶۲*	۶/۶۵۹**
Y*A	۱	۹۲/۱۴۰ ns	۰/۰۴۸۱ ns	۰/۰۱۱۰ ns	۷۱/۹۱۹ ns	۳/۱۳۲ ns	۱۰/۹۲۷ ns	۰/۲۵۱*
R*A(Y)	۴	۱۸/۱۴۹ ns	۰/۰۳۵۰ ns	۰/۰۰۷۴ ns	۴۳/۷۹۷ ns	۱۶/۰۹۴ ns	۱۴/۵۶۷ ns	۱/۰۷۷ ns
Error A	۱۶	۱۸/۱۴۹	۰/۰۳۵۰	۰/۰۰۷۴	۴۳/۷۹۷	۱۶/۰۹۴	۱۴/۵۶۷	۱/۰۷۷
B	۲	۸/۷۱۱ ns	۰/۰۰۶۱ ns	۰/۰۰۶۹ ns	۲۵/۸۱۹ ns	۷/۸۱۳*	۸/۷۶۰ ns	۰/۱۰۸ ns
Y*B	۲	۹۷/۴۷۸ ns	۰/۰۰۰۳ ns	۰/۰۱۰۳ ns	۴۷/۷۹۳ ns	۵/۴۹۱ ns	۸/۴۶۴ ns	۱/۱۴۳ ns
A*B	۲	۹۷/۴۷۸**	۰/۰۰۰۳ ns	۰/۰۱۰۳ ns	۴۷/۷۹۳ ns	۵/۴۹۱ ns	۸/۴۶۴ ns	۱/۱۴۳ ns
Y*A*B	۲	۱۸/۱۴۹*	۰/۰۳۵۰ ns	۰/۰۰۷۴ ns	۴۳/۷۹۷ ns	۱۶/۰۹۴ ns	۱۴/۵۶۷ ns	۱/۰۷۷ ns
Error B	۲	۲۴/۱۷۹	۰/۰۹۳۰	۰/۰۱۸۲	۱۵۵/۴۰	۶۵/۴۴۴	۴۸/۰۸۷	۱/۳۷۷
ضریب تغییرات (٪)		۱۴/۶۷	۱۰/۹۲	۳/۳۸	۱۹/۷۷	۱۳/۰۰	۱۸/۶۱	۱۰/۰۴

*معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد، **معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد و ns عدم وجود تفاوت معنی‌دار.

Y: سال، R: تکرار، A: تیمار آب و B: لایه خاک،Ks: هدایت هیدرولیکی اشباع، pb: جرم مخصوص ظاهری، pa: جرم مخصوص حقیقی، n: تخلخل، θ_{FC}: ظرفیت زراعی، θ_{PWP}: نقطه پژمردگی دایم، AW: آب در دسترس

[1] World Health Organization
[2] European Union
[3] Food and Agriculture Organization of United Nations

Archive of SID

www.SID.ir

هدایت هیدرولیکی اشباع خاک

متوسط مقادیر هدایت هیدرولیکی اشباع نمونه-های خاک اندازه‌گیری شده در مدت اجرای تحقیق در شکل (۱) نشان داده شده است. تفاوت محسوس و زیادی در بین تیمارهای آبیاری آب چاه و پساب مشاهده می‌شود و در مجموع متوسط هدایت هیدرولیکی به‌دست آمده در اعماق مختلف خاک برای تیمارهای تحت آبیاری با پساب تصفیه شده بیشتر بود. چرا که؛ بیشترین مقدار هدایت هیدرولیکی برای تیمار آبیاری شده با پساب در لایه سطحی خاک و برابر با ۳۸/۰۲ میلی‌متر در ساعت و کمترین مقدار این پارامتر نیز در همین لایه و برای خاک آبیاری شده با آب چاه برابر با ۱۸/۱۹ میلی‌متر در ساعت به‌دست آمده است.

به دلیل وجود مقادیر بالای ماده آلی و عناصر غذایی موجود در پساب که موجب افزایش رشد گیاه و گسترش سیستم ریشه می‌گردد، منافذ خاک افزایش و بهبود یافته و منجر به افزایش هدایت هیدرولیکی خاک تحت آبیاری می‌گردد (رضاپور و همکاران، ۲۰۱۲ و رزاقی و همکاران، ۲۰۱۵). مورالس و همکاران (۲۰۰۷) دریافتند که در اثر آبیاری با پساب، هدایت هیدرولیکی اشباع خاک در لایه ۴۵ سانتیمتری بالای خاک افزایش یافت. در یک بررسی تغییری در هدایت هیدرولیکی غیر اشباع بعد از پنج سال آبیاری با فاضلاب تصفیه شده بر روی دو نوع خاک در نیوزیلند مشاهده نشد (ماگسن و همکاران، ۲۰۰۰).

جدول ۴- نتایج آزمون مقایسه میانگین تأثیر تیمارهای آبیاری بر خصوصیات فیزیکی اعماق مختلف خاک

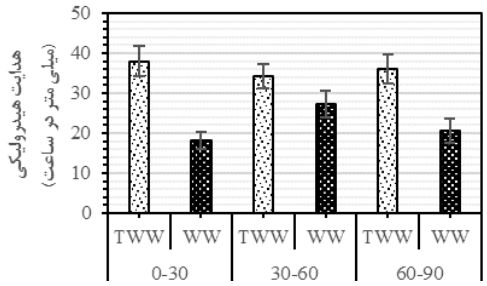
تیمار	Ks (mm hr^{-1})	ρ_b (g cm^{-3})	ρ_a (g cm^{-3})	η (%)	θ_{Fc} (%)	θ_{pwp} (%)	AW(%)
A1	۳۶/۱ a	۱/۶۷ a	۲/۵۶ a	۳۷/۸ a	۳۱/۶ a	۲۲/۲ a	۱۰/۱ a
A2	۲۲/۰ b	۱/۷۶ a	۲/۵۴ a	۲۹/۱ a	۳۰/۱ a	۱۸/۹ b	۱۰/۶ a
A1*B1	۳۸/۰ a	۱/۶۴ d	۲/۵۶ a	۴۲/۲ a	۳۳/۲ a	۲۳/۶ a	۱۰/۳ a
A1*B2	۳۴/۲ a	۱/۷۰ c	۲/۶۲ a	۳۷/۸ a	۲۸/۹ a	۱۹/۹ ab	۹/۸۳ a
A1*B3	۳۶/۱ a	۱/۶۷ cd	۲/۵۰ a	۳۵/۵ a	۳۲/۷ a	۲۳/۰ a	۱۰/۲ a
A2*B1	۱۸/۲ a	۱/۵۸ e	۲/۵۲ a	۳۲/۶ a	۳۲/۸ a	۲۱/۲ a	۱۰/۹ a
A2*B2	۲۷/۲ a	۱/۸۰ b	۲/۵۷ a	۳۱/۲a	۲۷/۸ a	۱۶/۹ b	۱۰/۱ a
A2*B3	۲۰/۶ a	۱/۸۸ a	۲/۵۴ a	۲۳/۵ a	۲۹/۷ a	۱۸/۵ ab	۱۰/۷ a
Y1*A1*B1	۵۹/۲ a	۱/۴۹ a	۲/۵۳ a	۴۰/۹ a	۳۴/۶ a	۲۵/۱ a	۹/۵۱ a
Y1*A1*B2	۵۰/۴ ab	۱/۵۱ a	۲/۵۷ a	۴۱/۱ a	۲۹/۰ a	۱۹/۹ab	۹/۱۴ a
Y1*A1*B3	۵۵/۵ a	۱/۴۹a	۲/۵۶ a	۴۱/۷ a	۳۴/۴ a	۲۴/۱ a	۱۰/۳ a
Y1*A2*B1	۲۹/۵ cd	۱/۵۴ a	۲/۵۴ a	۳۰/۷ a	۳۱/۵ a	۲۰/۴ ab	۹/۶۰a
Y1*A2*B2	۴۴/۸ ab	۱/۷۰ a	۲/۶۰ a	۳۷/۴ a	۲۷/۶ a	۱۷/۰ b	۸/۹۰ a
Y1*A2*B3	۳۷/۰ bc	۱/۸۱ a	۲/۵۶ a	۲۴/۶ a	۳۰/۸ a	۲۰/۷ ab	۹/۲۵ a
Y2*A1*B1	۱۶/۹ de	۱/۷۹ a	۲/۵۹ a	۳۹/۵ a	۳۱/۷ a	۲۲/۱ a	۱۱/۱ a
Y2*A1*B2	۱۸/۰ de	۱/۸۹ a	۲/۶۶ a	۳۴/۵ a	۲۸/۸ a	۱۹/۹ a	۱۰/۶ a
Y2*A1*B3	۱۶/۶ de	۱/۸۵ a	۲/۴۴ a	۲۹/۲ a	۳۱/۱ a	۲۱/۸ a	۱۰/۱ a
Y2*A2*B1	۶/۹۳ e	۱/۶۳ a	۲/۴۹ a	۳۴/۵ a	۳۴/۱ a	۲۱/۹ a	۱۲/۲ a
Y2*A2*B2	۹/۵۴ e	۱/۹۰ a	۲/۵۴ a	۲۵/۳ a	۲۸/۰ a	۱۶/۸ b	۱۱/۳ a
Y2*A2*B3	۴/۲۳ e	۱/۹۶ a	۲/۵۲ a	۲۲/۳ a	۲۸/۶ a	۱۶/۴ b	۱۲/۲ a

*معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد، **معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد و ns عدم وجود تفاوت معنی‌دار.

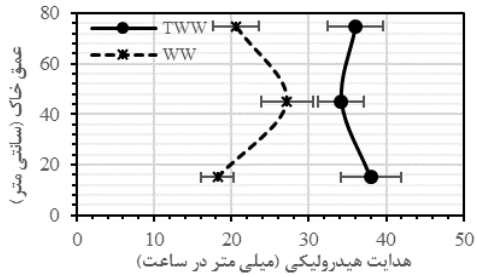
Y: سال، R: تکرار، A: تیمار آب و B: لایه خاک، Ks: هدایت هیدرولیکی اشباع، pb: جرم مخصوص ظاهری، pa: جرم مخصوص حقیقی، n: تخلخل، θ_{FC}: ظرفیت زراعی، θ_{PWP}: نقطه پژمردگی دایم، AW: آب در دسترس

Archive of SID

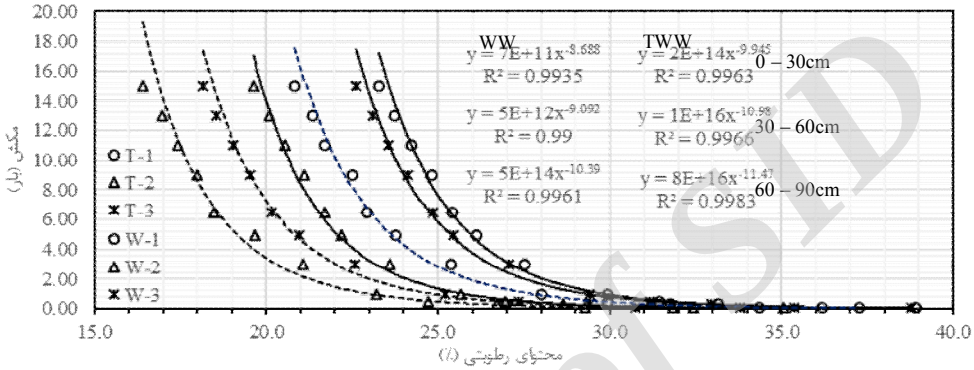
www.SID.ir



شکل ۱ - متوسط مقدار هدایت هیدرولیکی (K_s) در اعماق مختلف خاک تحت تیمارهای آبیاری



شکل ۲ - متوسط تغییرات عمقی هدایت هیدرولیکی (K_s) خاک تحت تیمارهای آبیاری



شکل ۳ - منحنی مشخصه رطوبتی لایه‌های مختلف خاک تحت تیمارهای آبیاری

منحنی رطوبتی و نقاط پتانسیل رطوبتی خاک

اندازه‌گیری خصوصیات رطوبتی خاک از مهمترین شاخص‌های ارزیابی شرایط فیزیکی خاک به شمار می‌رود. چرا که این خصوصیات هم قابلیت نگهداشت و ذخیره آب و هم حالت تهویه و زهکشی خاک را نشان می‌دهند. همچنین می‌تواند جهت بررسی اندازه خلل و فرج و توزیع آن در خاک‌های غیر متورم[1] مفید باشد (ریوه و کارتر، ۱۹۹۱). منحنی مشخصه رطوبتی تحت تأثیر عوامل متعددی مانند ساختار، بافت، درصد رس و محتوای مواد آلی خاک قرار می‌گیرد (لیپسوس، ۲۰۰۲). وجود مواد آلی در خاک باعث نگهداری آب خاک شده و مقدار آنرا افزایش می‌دهد (اسکات، ۲۰۰۰). همچنین، وجود سدیم در خاک بر روی محتوا و نگهداشت رطوبتی خاک تأثیر گذاشته و آنرا افزایش می‌دهد. در این تحقیق محتوی رطوبتی خاک در حالت آبیاری (مرطوب کردن خاک خشک) در ۱۵ مکش مختلف اندازه‌گیری شد. شکل (۳) منحنی رطوبتی استخراج شده برای دو تیمار آبیاری با آب چاه و پساب در لایه‌های مختلف خاک را نمایش می‌دهد. نتایج به‌دست آمده نشانگر آن است که در یک مکش ثابت، مقدار محتوی رطوبتی خاک در تیمارهای آبیاری شده با پساب بیشتر بوده است. همچنین کمترین نگهداشت رطوبتی در لایه‌های زیر سطحی خاک تحت آبیاری با آب چاه به‌دست آمده است. به‌طوری‌که؛ در نقاط رطوبتی مختلف، محتوی رطوبتی خاک تحت شرایط مختلف در حدود هفت درصد اختلاف نشان می‌دهد. عموماً در خاک‌های ماسه‌ای و یا حاوی ماسه، بدلیل خلل و فرج بزرگ‌تر و بیشتر، در مکش‌های پایین، مقدار رطوبت بیشتری تخلیه می‌گردد (ریوه و کارتر، ۱۹۹۱). استفاده از پساب موجب ورود مواد آلی به خاک شده و مواد آلی بر ساختمان و ویژگی‌های جذبی خاک اثر می‌گذارد و در نتیجه نگهداری آب در خاک را تحت تاثیر قرار می‌دهد. تاثیر مواد آلی بر منحنی رطوبتی مانند رس است و مواد آلی موجب می-

[1] Non-swelling

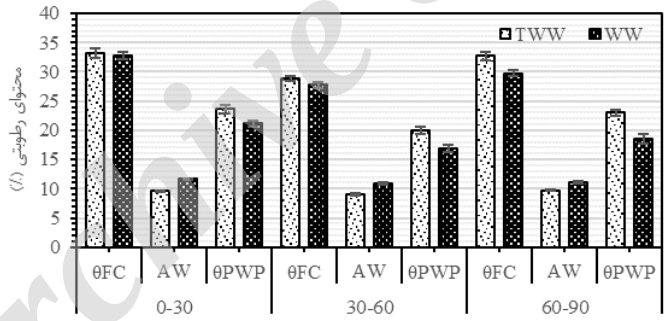
Archive of SID

www.SID.ir

شوند که شیب منحنی رطوبتی به تدریج تغییر کرده و در یک مکش معین مقدار آب نگهداری شده افزایش یابد. آبیاری با پساب ممکن است با تغییر ویژگی‌های خاک مانند ماده آلی، بهبود ساختمان و افزایش تخلخل خاک در اثر افزایش ماده آلی منجر به تغییر شکل منحنی رطوبتی شود (منیر و همکاران، ۲۰۰۷).

منحنی مشخصه رطوبتی به‌دست آمده برای لایه‌های خاک تحقیق حاضر نشان می‌دهد که در مکش-های بالاتر، خاک‌های آبیاری شده با پساب نگهداشت رطوبتی بیشتری داشته‌اند. بر اساس بررسی‌های صورت گرفته، تعداد معدودی آزمایش بر روی تأثیر آبیاری با پساب و فاضلاب بر روی نقاط و منحنی رطوبتی خاک انجام و گزارش شده است. بررسی تأثیر دو تیمار فاضلاب شهری (با کیفیت‌های متفاوت) بر خصوصیات رطوبتی خاک ماسه‌ای نشان داد که عمده محتوی رطوبتی خاک در مکش کمتر از دو بار خارج می‌شود. همچنین، اختلاف معنی‌داری بین تیمار شاهد و تیمار تحت آبیاری با فاضلاب در خاک سطحی (و حتی زیرسطحی)، در مکش-های کمتر از ۰/۵ بار مشاهده نشد (ماگسن، ۲۰۰۱). در مکش‌های بالاتر نیز، خاک تحت آبیاری با فاضلاب نگهداشت رطوبتی زیادتری نشان داد که می‌تواند ناشی از افزایش مواد آلی خاک باشد (مباگوو، ۱۹۹۲). همانطورکه مشخص است، نتایج به‌دست آمده از تحقیقات پیشین (ماگسن، ۲۰۰۱) همخوانی کامل و بالایی با نتایج تحقیق حاضر دارد. در آزمایشاتی دیگر؛ آبیاری کوتاه مدت با پساب (در گلخانه با خاک بافت سیلت کلی لوم و مزرعه با بافت خاک کلی لوم) تأثیر معنی‌داری بر منحنی مشخصه رطوبتی و اندازه خلل و فرج خاک نداشته است (حسن و همکاران، ۲۰۱٤).

محتوی رطوبتی در نقاط مهم رطوبتی خاک تیمارهای مورد آزمایش شامل نقطه ظرفیت زراعی (θ_{FC}) و نقطه پژمردگی دائم (θ_{PWP}) و همچنین میزان رطوبت قابل دسترس (θ_{AW}) مطابق شکل (٤) به‌دست آمده است.



شکل ۴ - نقاط رطوبتی و مقدار رطوبت قابل استفاده لایه‌های مختلف خاک تحت تیمارهای آبیاری

نتایج و روند به‌دست آمده نشان می‌دهد که از طرفی مقدار محتوی در هر دو نقطه رطوبتی θ_{FC} و θ_{PWP} در خاک‌های تحت تیمار آبیاری با پساب بیشتر و بالاتر از خاک‌های آبیاری شده با آب چاه می‌باشد. همچنین از طرف دیگر، با افزایش عمق خاک، اختلاف میان دو تیمار در هر دو نقطه رطوبتی بیشتر شده است. بعبارت دیگر؛ در نتیجه تأثیر آبیاری بلند مدت با پساب و نفوذ عمقی و تجمع مواد معدنی و آلی در عمق خاک، محتوای رطوبتی خاک افزایش یافته است. به‌طوری که بیشترین مقدار رطوبت حجمی در نقطه ظرفیت زراعی برابر با ۳۳/۲ درصد و در نقطه پژمردگی دائم برابر با ۲۳/٦ درصد در لایه سطحی خاک (۳۰-۰ سانتی‌متر) آبیاری شده با پساب به‌دست آمده است. کاربرد فاضلاب در خاک، قابلیت نگهداری آب خاک را افزایش داده و می‌تواند مقادیر حجم خلل فرج و هدایت هیدرولیکی اشباع را کاهش دهد (داووس، ۲۰۰٤).

روند به‌دست آمده برای رطوبت قابل دسترس (AW) تا حدی بر خلاف انتظار می‌باشد. چراکه مطابق نتایج ارائه شده (شکل ٤)، مقدار این پارامتر در تیمارهای تحت آبیاری پساب، کمتر از تیمار شاهد به‌دست آمده

Archive of SID

www.SID.ir

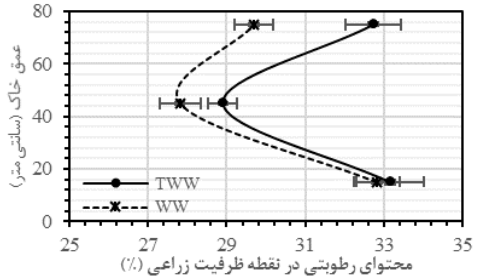
است. می‌توان دلیل این روند را در کاهش مقدار θ_{PWP} در تیمارهای تحت آبیاری با پساب دانست. بطور متوسط مقدار محتوای رطوبتی در دسترس در اعماق مختلف تقریباً برابر و در تیمارهای آبیاری شده با پساب برابر با ۹/۵ درصد و برای تیمارهای شاهد برابر با ۱۱/۲ درصد محاسبه شد است. باید توجه داشت که خاکی با آب قابل استفاده بیشتر از ۰/۲ در رده بسیار مطلوب و بین ۰/۲۰- ۰/۱۵ (m^3m^{-3}) در رده مطلوب قرار می‌گیرد (رینولدز و همکاران، ۲۰۰۹). طباطبایی و همکاران، (۲۰۰۷) با به کاربردن سه تیمار مختلف (آب معمولی، ۵۰ درصد پساب صنعتی کارخانه چغندرقند و ۵۰ درصد آب معمولی و ۱۰۰ درصد پساب صنعتی) دریافتند که با افزایش مقدار پساب کاربردی در هر آبیاری، علیرغم افزایش محتوای رطوبتی در نقاط θ_{FC} و θ_{pwp}، محتوای رطوبت قابل دسترس خاک کاهش یافته است که این روند با نتایج تحقیق حاضر همخوانی کامل دارد. نتایج آزمایشات پیشین نشان می‌دهد که مقدار کل آب قابل دسترس (AW) اندازه‌گیری شده در لایه زیر سطحی خاک (۲۰-۱۰ سانتی‌متری) تحت آبیاری فاضلاب تغییر چندانی نشان نداده است، اما محتوی رطوبت در دسترس خاک سطحی بطور معنی‌داری کاهش یافت. همچنین در تیمارهای شاهد (آبیاری با آب غیر شور) مقدار آب قابل دسترس خاک سطحی بیشتر از لایه زیرین گزارش شد که احتمالاً ناشی از مقدار زیاد مواد آلی و پایین بودن جرم مخصوص لایه خاک سطحی باشد (ماگسن، ۲۰۰۱). استفاده از فاضلاب برای آبیاری و کمپوست فاضلاب شهری نیز موجب افزایش میزان رطوبت در نقطه ظرفیت زراعی می‌گردد (چانگ و همکاران، ۱۹۸٤ و گلیک و همکاران، ۲۰۰٤). همچنین عنابی و همکاران، (۲۰۰۷) گزارش کردند که استفاده از کمپوست فاضلاب شهری، ظرفیت نگهداری آب در خاک را افزایش می‌دهد.

مقدار θ_{FC} اندازه‌گیری شده در خاک تحت آبیاری با پساب نسبت به آب چاه به ترتیب برای اعماق ۳۰-۰، ٦۰-۳۰ و ۹۰-٦۰ سانتی‌متر ۱/۵، ٤ و ۱۰ درصد افزایش یافته است (شکل ۵). مطابق روند به‌دست آمده با افزایش عمق لایه‌های خاک مقدار محتوی رطوبتی در حد ظرفیت زراعی (θ_{FC}) در خاک آبیاری شده با پساب نسبت به آب چاه افزایش یافته است. این روند برای نقطه پژمردگی دائم (θ_{pwp}) نیز صادق بوده است (شکل ٦). به طوری که در نتیجه افزایش عمق خاک به ترتیب ۱۱، ۱۸ و ۲٤ درصد اختلاف و افزایش در محتوی رطوبتی خاک، میان تیمارهای آبیاری شده با پساب و آب چاه بوجود آمده است.

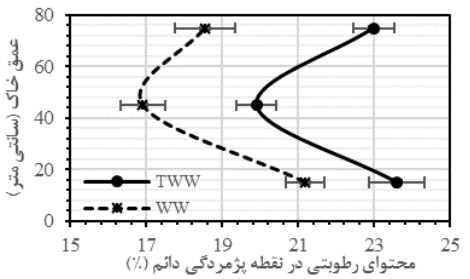
از آنجا که شدت تغییرات θ_{FC} و θ_{pwp} در خاک-های سبک (ماسه‌ای و لوم ماسه‌ای) کم می‌باشد، آبیاری با فاضلاب موجب بهتر شدن خصوصیات رطوبتی خاک در این نقاط می‌شود (طباطبایی و همکاران، ۲۰۰۷). این مقایسه و نتایج به‌دست آمده می‌تواند ناشی و حاکی از تأثیر آبیاری بلند مدت باشد که باعث نهادینه شدن اثر املاح و مواد معدنی و آلی بر ساختمان خاک در نتیجه شسته شدن املاح از لایه‌های سطحی خاک به سمت لایه-های پایین‌تر باشد. بر اساس نتایج به‌دست آمده از آزمایشات طباطبایی و همکاران در اصفهان، در اثر اعمال تیمارهای آبیاری با ترکیب درصدهای مختلف آب معمولی و پساب (تیمار آب معمولی به عنوان شاهد، تیمار ۵۰ درصد پساب کارخانه قند و ۵۰ درصد آب معمولی و تیمار پساب کارخانه قند)، ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی به ترتیب از ۳۵ و ۱۵ درصد به ۳۷ و ۱۸/۷ درصد رسیده است. آنها معتقدند که اگرچه θ_{FC} و θ_{pwp} افزایش یافته‌اند، اما شدت افزایش θ_{pwp} بیشتر از θ_{FC} بوده است. بدین معنا که افزایش مواد آلی خاک، با تغییر وضعیت منحنی رطوبتی خاک، از عوامل اصلی این افزایش بوده است. همچنین درحالیکه درصد رطوبت ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی افزایش یافته ولی مقدار کل آب قابل نگهداری خاک از ۲۰ درصد به ۱۸/۵ درصد کاهش یافته است (طباطبایی و همکاران، ۱۳۸٤).

Archive of SID

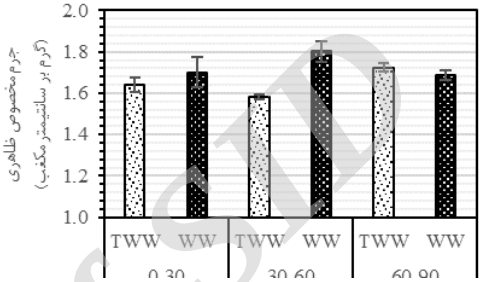
www.SID.ir



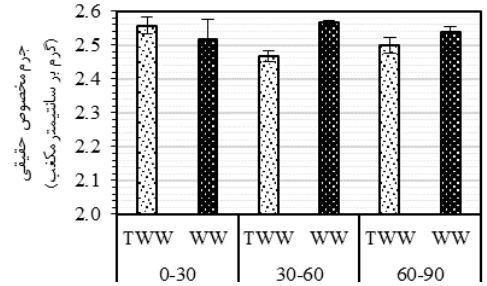
شکل ۵ - متوسط تغییرات عمقی درصد رطوبت در نقطه ظرفیت زراعی (θ_{FC}) خاک تحت تیمارهای آبیاری



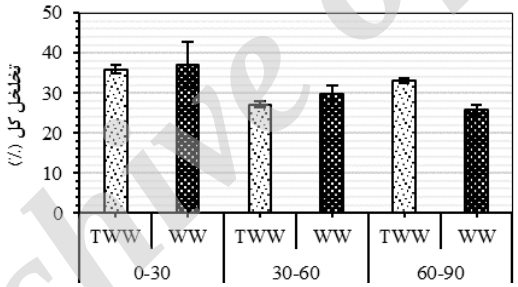
شکل ۶ - متوسط تغییرات عمقی درصد رطوبت در نقطه ظرفیت زراعی (θ_{pwp}) خاک تحت تیمارهای آبیاری



شکل ۷ - متوسط جرم مخصوص ظاهری (ρ_b) در اعماق مختلف خاک تحت تیمارهای آبیاری



شکل ۸ - متوسط مقدار جرم مخصوص حقیقی (ρ_a) در اعماق مختلف خاک تحت تیمارهای آبیاری



شکل ۹ - متوسط مقدار تخلخل کل (η) در اعماق مختلف خاک تحت تیمارهای مختلف آبیاری

جرم مخصوص ظاهری و حقیقی خاک

جرم مخصوص خاک از پارامترهای مهم و مؤثر در شناخت ساختار خاک است. در تحقیق حاضر، پس از انجام آزمایشات مختلف مقدار جرم مخصوص ظاهری و حقیقی لایه‌های مختلف خاک تحت تیمارهای آبیاری اندازه‌گیری و تحلیل گردید (شکل ۷ و ۸). نتایج به‌دست آمده روند مشخصی را برای دو پارامتر نشان نمی‌دهد. به‌طوری که؛ در لایه‌های سطحی خاک مقدار جرم مخصوص ظاهری اندازه‌گیری شده در تیمارهای تحت آبیاری با پساب تا حد زیادی کمتر از تیمارهای آبیاری شده با آب چاه بوده است که در تحقیقی مشابه نیز این کاهش جرم مخصوص ظاهری خاک، پس از نه سال آبیاری با پساب گزارش شده است (روحانی شهرکی و همکاران، ۱۳۸٤)؛ اما در لایه ۹۰-٦۰ سانتی‌متری این روند معکوس شده است. چنین روندی قبلاً نیز گزارش شده است و جرم مخصوص ظاهری خاک تحت آبیاری ۳۰ ساله با پساب در لایه سطحی از ۱/۳ به ۱/٤ گرم بر سانتی‌متر مکعب رسیده است با افزایش عمق مقدار آن بدون تغییر به‌دست آمده است (ملاحسینی، ۲۰۱۳).

با مقایسه دو مزرعه با بافت خاک لوم سیلتی و شنی که به ترتیب به مدت ۱۲ و ۲۲ سال با پساب آبیاری

Archive of SID

www.SID.ir

شده بودند مشخص شد که ورن مخصوص ظاهری خاک، در تیمارهای آبیاری با پساب نسبت به تیمار شاهد آب چاه کاهش یافته است. در آزمایشی دیگر نیز، مقدار جرم مخصوص ظاهری خاک لایه‌های ۱۰-۰ و ۲۰-۱۰ سانتی-متری خاک تحت آبیاری با پساب (با درجه تصفیه اولیه) نسبت به آب چاه کاهش یافت (ماگسن، ۲۰۰۱). نتایج مشابهی نیز برای خاک لوم ماسه‌ای به‌دست آمد که دلیل این کاهش و تأثرپذیری در بالا بودن BOD و مواد معلق موجود در پساب شهری بود (متهن، ۱۹۹٤). همچنین گزارش شده که با افزایش حجم فاضلاب به آب آبیاری روزانه، مقدار جرم مخصوص ظاهری لایه سطحی خاک (۲۰-۰ سانتی‌متری) تحت آبیاری از ۱/۳۸ گرم بر سانتی-متر مکعب به ۱/۳۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب کاهش یافته است که این روند را ناشی از افزایش محتوای ماده آلی خاک دانسته‌اند (مجیری، ۲۰۱۱). به کارگیری کودهای آلی در خاک نیز، با افزایش درصد منافذ خاک، باعث کاهش جرم مخصوص ظاهری می‌شود (ماریناری و همکاران، ۲۰۰۰). همچنین باید دقت نمود که در تحقیق حاضر، بیشترین و کمترین مقدار جرم مخصوص ظاهری در لایه ٦۰-۳۰ سانتی‌متری برای خاک تحت تیمار آبیاری با آب چاه و پساب و به ترتیب برابر با ۱/۸۰ و ۱/۵۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب به‌دست آمده است.

مقادیر جرم مخصوص حقیقی اندازه‌گیری شده در شکل (۸) نشان داده شده است. به طور کلی در اغلب خاک‌های معدنی، متوسط جرم مخصوص حقیقی ذرات خاک در محدوده ۲/۷ -۲/٦ ۲/۵۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب می‌باشد که این مقدار نزدیک به جرم مخصوص کوارتز است که اغلب در خاک‌های ماسه‌ای مشاهده می‌گردد (هیلل، ۱۹۸۰). عموماً، جرم ویژه حقیقی خاک همواره ثابت بوده و تحت تاثیر عوامل خارجی تغییری نمی‌کند (رینولدز و همکاران، ۲۰۰۹) و به عبارت دیگر؛ جرم مخصوص حقیقی خاک تابع نوع ذرات و کانی‌های خاک است ولی در شرایط فراوانی ماده آلی و استفاده از فاضلاب این ویژگی تحت تاثیر قرار گرفته و کاهش می-یابد (علیزاده، ۱۳۸۲ و ماریناری و همکاران، ۲۰۰۰). در تحقیق حاضر، متوسط مقدار جرم مخصوص حقیقی اندازه‌گیری شده برای خاک‌های تحت تیمار پساب و آب چاه به ترتیب در محدوده ۲/٤۷ تا ۲/۵٦ گرم بر سانتی‌متر و ۲/۵۲ تا ۲/۵۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب به‌دست آمده است که با نتایج پیشین (ماگسن، ۲۰۰۱) نیز مشابهت دارد. نتایج آزمایشات دیگری نیز بر روی جرم مخصوص حقیقی خاک‌های تحت آبیاری با پساب در قیاس با تیمارهای آب چاه، تفاوت معنی‌دار آماری و مقداری را نشان نداد و بطور متوسط مقدار جرم مخصوص حقیقی لایه سطحی (۳۰-۰ سانتی‌متری) خاک لوم سیلتی مورد آزمایش ۲/۱۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب به‌دست آمد (بیگی هرچگانی و بنی طالبی، ۱۳۹۲). همچنین، همانطور که مشخص است، نسبت به جرم مخصوص ظاهری روند این پارامتر در لایه‌های سطحی‌تر معکوس گردیده است (شکل ۷) چراکه جز در لایه ۳۰-۰ سانتی‌متری، در دو لایه زیرین مقدار جرم مخصوص حقیقی خاک آبیاری شده با پساب نسبت به تیمار آب چاه، کاهش یافته است. این روند کاهشی جرم مخصوص حقیقی در لایه‌های زیر سطحی احتمالاً می‌تواند ناشی از تأثیر و تجمع مواد آلی در لایه‌های زیرین خاک، در نتیجه آبیاری با پساب باشد (هیلل، ۱۹۸۰).

نتایج تحقیقات و آزمایشات مشابه بر روی دو لایه خاک لوم ماسه‌ای منطقه غزه در فلسطین موافقت بالایی با نتایج به‌دست آمده از تحقیق حاضر دارد (خیری صبری، ۲۰۱۳). از نظر آماری تفاوت معنی‌داری میان جرم مخصوص ظاهری و حقیقی تیمارها گزارش نشده است. همچنین بدلیل کوتاه مدت بودن آزمایشات، تأثیرپذیری جرم مخصوص ظاهری و حقیقی خاک تحت آبیاری با پساب نسبت به آب چاه محسوس نبوده است. به‌طوری که جرم مخصوص ظاهری خاک سطحی (۳۰-۰ سانتی-متری) بدون تغییر بوده است؛ اما مقدار جرم مخصوص حقیقی خاک نسبتاً تغییرات بیشتری داشته و در لایه

Archive of SID

www.SID.ir

سطحی مقدار این پارامتر در تیمار آبیاری شده با پساب کاهش و در لایه زیرسطحی افزایش نسبی داشته است.

تخلخل کل خاک

پس از اندازه‌گیری مقدار جرم مخصوص ظاهری و حقیقی، اقدام به محاسبه و رسم نمودار درصد تخلخل مؤثر نمونه‌ها شد که در شکل (۹) نشان شده است. نتایج بیانگر آن است که مقدار تخلخل خاک تحت تیمارهای مختلف از ۲۶ تا ۳۷ درصد متغیر بود که بیشینه آن مربوط به لایه سطحی (۳۰-۰ سانتی) و کمینه آن مربوط به لایه ۹۰-۶۰ سانتی بوده است. گزارش شده است که تخلخل در خاک‌های آبیاری شده با فاضلاب بیشتر است (متهن، ۱۹۹٤). همچنین، استفاده مجدد از فاضلاب به‌جای آب آبیاری موجب بهبود نفوذپذیری، افزایش تخلخل و توسعه ساختمان اسفنجی در خاک می‌شود (ماهیدا، ۱۹۸۱). علاوه بر این، پساب شهری به علت دارا بودن ماده آلی، در مقایسه با آب چاه که ماده آلی آن ناچیز است. با بهبود ساختمان خاک، منجر به کاهش جرم مخصوص ظاهری و افزایش تخلخل می‌شود (درچسل و همکاران، ۲۰۱۰).

همچنین، مطابق نتایج به‌دست آمده از این تحقیق که با افزایش عمق خاک، تأثیر آبیاری با پساب بیشتر شده و تخلخل خاک آبیاری شده با پساب در اعماق پایینی بیشتر از تیمار شاهد بوده است که می‌تواند ناشی از نهادینه شدن و تجمع مواد آلی در لایه‌های عمقی خاک باشد و از طرفی نیز تغییر خصوصیات لایه سطحی خاک تحت تأثیر عملیات زراعی و کشت و کار، باید از اثر مستقیم کاربرد پساب آبیاری تفکیک گردد. روند تغییرات مشابهی برای خاک لوم ماسه‌ای گزارش شده است. اگرچه به دلیل آبیاری کوتاه مدت با پساب، تأثیر عمقی کمتری داشته است (خیری صبری، ۲۰۱۳).

نتیجه‌گیری

در کشورهای واقع در مناطق خشک و نیمه خشک دنیا، یکی از مهمترین مشکلات در بخش کشاورزی به عنوان مصرف کننده اصلی منابع آب، یافتن منابع آب نامتعارف و جایگزین و قابل اتکاء برای آبیاری می‌باشد. به نظر می‌رسد که پساب یا بازیافت شده تنها منبع آبی است که علیرغم کاهش حجم منابع دیگر، در حال افزایش است. در سال‌های اخیر یکی از گزینه‌های مناسب جهت صرفه‌جویی در مصرف منابع آب، بازیافت پساب فاضلاب شهری و صنعتی برای آبیاری می‌باشد که به عنوان یک عمل مشترک در مناطق مختلف دنیا رواج دارد اما در صورتی که استفاده از پساب فاضلاب برای آبیاری به‌درستی مدیریت نشود ممکن است باعث ایجاد مشکلات زیست محیطی شود. چراکه؛ آبیاری با پساب می‌تواند باعث ایجاد تغییر در خصوصیات خاک، به‌ویژه خصوصیات فیزیکی خاک نظیر بافت، ساختمان، تخلخل و هدایت هیدرولیکی شود که در بلند مدت بر محتوای رطوبتی و تهویه خاک تأثیر می‌گذارند.

در این پژوهش تأثیر آبیاری با پساب بر این پارامترهای فیزیکی خاک در سه لایه عمقی ۳۰ سانتی‌متری (تا عمق ۹۰ سانتی‌متر) بررسی شد. نتایج کلی این تحقیق نشان داد که در نتیجه بالا بودن مقدار مواد آلی و معدنی در پساب و نهادینه شدن آن در خاک با گذشت زمان، متوسط هدایت هیدرولیکی، محتوای رطوبتی ظرفیت زراعی، نقطه پژمردگی و تخلخل لایه ۹۰ سانتی‌متری خاک به ترتیب ٤۸٪، ۹٪، ۱۹٪ و ۲۰٪ افزایش یافت و در مقابل، مقدار کل رطوبت در دسترس ۹٪ و جرم مخصوص ظاهری خاک نیز ۱۱٪ کاهش نشان داد، اما جرم مخصوص واقعی تغییر چندانی نداشت. در مجموع می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از پساب باعث بهبود شرایط فیزیکی خاک گردید، اما با توجه به نتایج بدست آمده از آزمایشات شیمیایی و فلزات سنگین آب و خاک، استفاده از فاضلاب تصفیه نشده و پساب برای آبیاری محصولات خوراکی توصیه نمی‌شود.

Archive of SID

www.SID.ir

فهرست منابع

۱. بنی طالبی، گ. ۱۳۹۱. اثرات دراز مدت آبیاری با پساب شهری بر برخی از ویژگی‌های خاک و خطر سلامتی فلزات سنگین در منطقه طاقانک. پایان‌نامه کارشناسی ارشد گروه علوم خاک دانشکده کشاورزی دانشگاه شهرکرد. ص ۱۰۲.

۲. بیگی هرچگانی، ح. و بنی طالبی، گ. ۱۳۹۲. اثر رژیم‌های کاربرد دراز مدت پساب شهری بر شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک (مطالعه موردی: مزارع طاقانک شهرکرد). نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی): (۵)۲۷، ۱۰۴٦-۱۰۵٦.

۳. خدادادی، ن.، قربانی دشتکی، ش. و کیانی، ش. ۱۳۹٤. تاثیر کیفیت آب آبیاری بر برخی ویژگیهای فیزیکی خاک در اراضی تحت کشت برنج (*Oryza Sativa*). نشریه حفاظت منابع آب و خاک، (۳)٤، ۱۵-۲۸.

٤. روحانی شهرکی، ف.، مهدوی، ر. و رضایی، م. ۱۳۸٤. اثر آبیاری با پساب بر برخی خواص فیزیکی و شیمیایی. مجله آب و فاضلاب، (۱)۱٦. ۲۳-۲۹.

۵. زادهوش، ع. و فرداد، ح. ۱۳۷۵. بررسی اثرات آبیاری با پساب بر خاک و گیاه. پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران.

٦. طباطبایی، س.ح.، نجفی، پ و امینی، ح. ۱۳۸٤. بررسی تاثیر آبیاری با فاضلاب کارخانه قند اصفهان بر نقاط مهم رطوبتی خاک. دومین کنفرانس سراسری آبخیزداری و مدیریت منابع آب و خاک، کرمان، انجمن مهندسی آبیاری و آب ایران.

۷. علیزاده، ع. ۱۳۸۲. فیزیک خاک. انتشارات دانشگاه امام رضا. ص ۲٦۷.

8. Abedi- Koupai, J., M. Afyuni., B. Mostafazadeh., and M.R. Bagheri 2001. Influence of treated wastewater and irrigation systems on soil physical properties in Isfahan province. ICID International Workshop on Wastewater Reuse Management.
9. Aiello, R., L. Cirelli., and S. Consoli. 2007. Effects of reclaimed wastewater irrigation on soil and tomato fruits: A case study in Sicily (Italy), Agric.Water Manage. 93: 65-72.
10. Annabi, M., S. Houot., F. Francou., M. Poitrenaud., and Y. Le Bissonnais. 2007. Soil aggregate stability improvement with urban composts of different maturities. Soil Sci. Soc. Am. J. 71(2):413-423.
11. Chang, A.C., J E. Warneke., A.L. Page., and L.J. Lund. 1984. Accumulation of heavy metal in sewage sludge treated soils. J. Environ. Qual. 13: 87-90.
12. Coppola, A., A. Santini., P. Botti., S. Vacca., V. Comegna., and G. Severino. 2004. Methodological approach for evaluating the response of soil hydrological behavior to irrigation with treated municipal wastewater. J. Hydrology. 292: 114-134.
13. Dawes, L. 2004. Assessing changes in soil physical and chemical properties under long term effluent disposal. The Society for Engineering in Agriculture, Food and Biological System, USA.
14. Drechsel, P., Ch. Ascott., L. Raschid-sally., M. Redwood., and A. Bahri. 2010. Wastewater Irrigation and Health Assessing and Mitigating Risk in Low-income Countries. Earthscan, London.
15. EU, (2006) Commission regulation (EC) No. 1881/2006, setting maximum levels for certain contaminants in foodstuffs. Official Journal of the European Union, 364: 5-24.
16. Gelik, I., I. Ortas. and S. Kilik. 2004. Effect of compost, Mycorhiza, Mnure and fertilizer on some physical properties of Chromoxerert soil. Soil. Till. Res. 78: 59-67.
17. Hamilton, A.J., F. Stagnitti., X. Xiong., S.L. Kreidl., K.K. Benke., and P. Maher. 2007. Wastewater Irrigation: The State of Play Vadose Zone. 6(4): 823-840.
18. Hasan, H., A. Battikhi., and M. Qrunfleh. .2014. Impacts of Treated Wastewater Reuse on Some Soil Properties and Production of *Gladiolus communis*. J. Horticulture 1: 111. doi:10.4172/horticulture.1000111

Archive of SID

www.SID.ir

19. Hasan, H.I., M. Anwar., M. Battikhi., and M. Qrunfleh. 2015. Impacts of Treated Wastewater Reuse on Some Soil Properties and Production of *Gladiolus Communis*. Jordan J. Agri Sci. 11(4):1103-1118.
20. Hillel, D. 1980. Fundamentals of Soil Physics. Academic Press. New York.
21. Khayri Sabri, A. 2013. Effect of Irrigation with Reclaimed Wastewater on Soil Properties and Groundwater Quality in Zaiton area, Gaza, Palestine. Msc Thesis, Al-Azhar University, Studies & Scientific Research, Institute of Water & Environment.
22. Klay, S., A. Charef., A. Ayed., B. Houman., and F. Rezgu. 2010. Effect of irrigation with treated wastewater on geochemical properties (saltiness, C, N and heavy metals) of isohumic soils (*Zaouit Sousse perimeter, Oriental Tunisia*). Desalination. 253:180-187.
23. Klute, A. and C. Dirkwen. 1986. Hyraulic conductivity and Dffusivity: Laboratory methods. P 687-734. In: A. Klute (Ed.), Method of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods. Monogr. 9, ASA and SSSA, Madison, WI.
24. Lado, M. and M. Ben-Hur. .2009. Treated domestic sewage irrigation effects on soil hydraulic properties in arid and semiarid zones: A review. Soil. Till. Res. 106, 152-163.
25. Lee, G.W. and J.W. Bauder. 1986. Particle Size Analysis. In: Methods of Soil Analysis, A. Klute (Ed). Part1 (snd Edn.) Agro. Monger. 9, ASA and SSSA, Madison, WS, USA, 383-411.
26. Lipsius, K. 2002. Estimating Available Water Capacity from Basic Soil Physical Properties, A comparison of Common Pedotransfer Functions, GSF-National Research Centre for Environment and Health, Department of Geoecology, Braunschweig Technical University.
27. Magesan, G.N., C.D.A. Mclay., and V.V. Lal. 1998. Nitrate leaching from a freely-draining volcanic soil irrigated with municipal sewage effluent in New Zealand. Agri. Ecosys Environ. 70:181-187.
28. Magesan G.N .2001. Changes in soil physical properties after irrigation of two forested soils with municipal wastewater. New Zealand J. Foresty Sci. 31(2): 188-195.
29. Magesan, G.N., J.C. Williamson., G.W. Yeates., and A.R.H. Lloyd- Jones. 2000. Wastewater C:N ratio effects on soil hydraulic conductivity and potential mechanisms for recovery, Bioresource. Technol. 71: 21-27.
30. Mahida, N.U. 1981. Water Pollution and Disposal of Wastewater on Land. Tata McGraw-Hill Puplishing Company limited, New Dehli, 325.
31. Marinari, S., B. Masciandro., and S. Grego. 2000. Influence of organic and mineral fertilizer on soil physical properties. Geoderma. 72:9-17.
32. Mathan, K. K. 1994. Studies ofthe influence of long-term municipal sewage-effluent irrigation on soil physical properties. Biores Tech. 48: 275-276.
33. Mojiri, A. 2011. Effects of Municipal Wastewater on Physical Properties of Saline Soil. J. Biol. Environ. Sci. 5(14): 71-76.
34. Mollahoseini, H. 2013. Long-term effects of municipal wastewater irrigation on some properties of a semiarid region soil of Iran. Int J. Agron Plant. Production. 4(5): 1023-1028.
35. Morales, A., G.L. Clup. and P.R. Johnson. 2007. The soil hydrological behavior to irrigation with drainage water. pp. 129-134.
36. Munir, J., M. Rusan., S. Hinnawi., and L. Rousan. 2007. Long-term effect of wastewater irrigation of forage crops on soil and plant quality parameters. Soil Sci. Soc. Am. J. 215:143-152.
37. Reeve, M.J. and A.D. Carter .1991. Water release characteristic. *In* Smith, K.A.; Mullins, C.E. (Ed.) "Soil Analysis: Physical Methods". Marcel Dekker Inc. New York.
38. Reynolds, W.D., C.F. Drury., C.S. Tan., C.A. Fox. and X. Yang . 2009. Use of indicators and pore volume function characteristics to quantify physical quality. Geoderma. 152: 252-263.
39. Schacht, K., and B. Marschner. 2015. Treated wastewater irrigation effects on soil hydraulic conductivity and aggregate stability of loamy soils in Israel. J. Hydrol. Hydromech. 63(1): 47–54. DOI: 10.1515/johh-2015-0010.
40. Scott, H.D. 2000. Soil Physics Agricultural and Environmental Application. Towa State University Press/Ames.

Archive of SID

www.SID.ir

41. Tabatabaei, S.H., P. Najafi., and H. Amin. 2007. Assessment of Change in Soil Water Content Properties Irrigated with Industrial Sugar Beet Wastewater. Pakistan J. Biol Sci. 10(10): 1649-1654.

Archive of SID

www.SID.ir