نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۲۷، شماره ۵، آذر - دی ۱۳۹۲، ص. ۱۰۵۶-۱۰۴۶

Journal of Water and Soil
Vol. 27, No. 5, Nov.-Dec. 2013, p. 1046-1056

اثر رژیم‌های کاربرد درازمدت پساب شهری بر شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک (مطالعه‌ی موردی: مزارع طاقانک شهرکرد)

حبیب بیگی هرچگانی[1*]- گلنوش بنی‌طالبی[2]

تاریخ دریافت:۱۳۹۲/۲/۲۰
تاریخ پذیرش:۱۳۹۲/۷/۳۰

چکیده

به منظور ارزیابی اثرات آبیاری درازمدت با پساب (۱۳ و ۲۳ سال) بر بعضی شاخص‌های فیزیکی کیفیت خاک، چهار مزرعه در منطقه‌ی طاقانک با تاریخچه‌های متفاوت آبیاری با پساب شهری و آب چاه انتخاب شد. در این مزارع، تغییرات شاخص‌های مرسوم فیزیکی خاک (کربن آلی، جرم ویژه‌ی ظاهری و میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها) و نیز شاخص‌های مستخرج از منحنی رطوبتی (شاخص S دکستر، تخلخل منافذ درشت، گنجایش هوایی، آب قابل استفاده‌ی گیاه و گنجایش نسبی آب) بررسی شدند. پساب کربن آلی را از ۱۱ به ۲۰ گرم بر کیلوگرم و تخلخل خاک را از ۰/۴۰ به حداقل ۰/۵۰ افزایش و جرم ویژه‌ی ظاهری را از ۱/۲۵ به ۱ مگاگرم بر مترمکعب کاهش داد (p<۰/۰۵). آبیاری با پساب شاخص Sدکستر را از ۰/۰۶۴ به ۰/۰۷۷ افزایش داد ومنجر به افزایش دو برابری تخلخل موثر خاک از ۰/۰۸ به ۰/۱۶ و افزایش۰/۰۶ درصدی گنجایش هوایی از ۰/۱۳ به ۰/۱۹ و افزایش ۴درصدی آب قابل استفاده‌ی گیاه شد (p<۰/۰۵). شاخص Sدکستر هم‌بستگی مثبت و معنی‌داری (p<۰/۰۵) با تخلخل کل(r=۰/۵۷)، رطوبت اشباع (r=۰/۷۲)، تخلخل موثر (r=۰/۶۳)، آب قابل استفاده‌ی گیاه (r=۰/۷۴) و گنجایش هوایی (r=۰/۸۱) و هم‌بستگی منفی و معنی‌داری (p<۰/۰۵) با جرم ویژه‌ی ظاهری (r=-۰/۵۱) و گنجایش نسبی آب (r=-۰/۶۴) داشت. آبیاری با پساب شهری، کیفیت فیزیکی خاک را بهبود بخشیده است. این بهبود، بر اساس شاخص‌های گوناگون،پس از ۱۳ سال و یا پس از ۲۳ سال آبیاری با پساب رخ داده است. آبیاری مجدداً با آب تازه بعضی شاخص‌های فیزیکی از قبیل تخلخل موثر، گنجایش هوایی و گنجایش نسبی را به مقدار شاهد در مزرعه‌ی ۱ (خاک آبیاری شده با آب چاه) بر می‌گرداند.

واژه‌های کلیدی: شاخص S دکستر، تخلخل موثر، گنجایش نسبی آب، گنجایش هوایی، آب قابل استفاده‌ی گیاه

مقدمه

تعریف یا انتخاب شاخص‌های ارزیابی کیفی خاک که به انواع عملیات مدیریتی حساس باشند برای تصمیم‌گیری و مدیریت بهتر خاک مفید است (۱ و ۸). استفاده از شاخص‌ها به جای ویژگی‌های منفرد و مجرد خاک برای بیان کمی کیفیت خاک ارجح است زیرا شاخص‌ها نمایان‌گر اثرات تجمعی یا برآیند ویژگی‌های خاک هستند (۳۶).

قبل از این شاخص‌های مرسوم فیزیکی چون جرم ویژه‌ی ظاهری (۳۷)، کربن آلی (۳۵)، پایداری خاکدانه‌ها (۱ و ۲۵)، مقاومت فروروی خاک (۱۷ و ۲۷) و قابلیت هدایت الکتریکی (۴۱) برای تشخیص کیفیت فیزیکی خاک ومحدودیت‌های فراهمش آب و رشد ریشه مورد استفاده قرارگرفته است. اثر عوامل خارجی: کاربرد کود دامی (۲۶)، کاربرد لجن فاضلاب (۲۸)، کابرد پساب و عملیات زراعی (۴۱) بر این شاخص‌ها نیز به طور گسترده مورد بررسی قرار گرفته است (۲۶، ۲۸ و ۴۱). با این حال تعریف و ارائه‌ی شاخص‌های مرکب که برآیندی از ویژگی‌های خاک بوده و اثرات تجمعی عوامل خارجی را منعکس کنند روندی جدید در مطالعات علوم خاک است. بنابراین تعداد شاخص‌های ترکیبی زیادی می‌توان برای عوامل خارجی در نظر گرفت و به همین تعداد هم شاخص ترکیبی نیاز خواهد بود.

دکستر (۲۱) با توجه به تاثیرپذیری عمیق منحنی رطوبتی از اندازه و آرایش منافذ خاک به این نتیجه رسید که شیب منحنی رطوبتی در نقطه عطف آن می‌تواند منعکس‌کننده‌ی جنبه‌های مختلف کیفیت فیزیکی خاک از قبیل نفوذ (آب، هوا و ریشه) و تراکم باشد. دکستر، اخیراً شاخص S را براساس مدل منحنی رطوبتی ون‌گنوختن (۳۹)

۱ و ۲- به ترتیب استادیار و دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد
(*- نویسنده مسئول: Email: beigi.habib@gmail.com)

استخراج و معرفی کرده است.

هر عامل خارجی که شکل منحنی رطوبتی و به ویژه شیب بخش اول سمت چپ این منحنی را تحت تاثیر قرار دهد، احتمالاً بر شاخص S دکستر نیز اثر خواهد گذاشت. از جمله‌ی این عوامل می‌توان به کاربرد کود دامی و کود فسفاته (۲۹)، ماده‌ی آلی (۱۲)، فوق جاذب‌های پلیمری (۵)، کربنات کلسیم (۱۳) و زئولیت (۳ و ۶) اشاره کرد. این عوامل معمولا با تاثیر مثبت بر ساختمان خاک می‌توانند باعث افزایش شاخص S دکستر بشوند. بنابراین می‌توان انتظار داشت که برای مثال تغییرات تراکم و یا جرم ویژه‌ی ظاهری، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها و مقدار ماده‌ی آلی که بر اثر افزودن این اصلاح کننده‌های آلی و معدنی به خاک حاصل می‌شود در شاخص S دکستر منعکس شوند (۱). اوبیا (۲۹) دریافت که بیشترین مقدار شاخص S دکستر، ۰/۰۵۹، مربوط به خاکی بود که در آن از کود حیوانی استفاده شده بود در حالی که مقدار این شاخص در خاک شاهد که در آن کود دامی به کار نرفته بود ۰/۰۳۸ بود که نشان‌دهنده‌ی افزایش شاخص S دکستر در اثر افزایش کود دامی است.

شاخص‌های دیگر کیفیت فیزیکی خاک مانند تخلخل درشت (MacPOR)، گنجایش هوایی (AC)، ظرفیت آب قابل استفاده‌ی گیاه (PAWC)، گنجایش نسبی آب (RWC) و تخلخل موثر (Φ_{eff}) که مستخرج از منحنی رطوبتی هستند توسط پژوهشگران مختلفی پیشنهاد و صحت کاربردشان بررسی شده است. رینولدز و همکاران (۳۱) گزارش کرده‌اند که برخلاف دو شاخص تخلخل کل خاک و ظرفیت آب قابل استفاده‌ی گیاه که در خاک‌های ریزبافت به مدیریت پاسخی نمی‌دهند، شاخص‌های گنجایش هوایی و گنجایش نسبی آب به مدیریت‌های مختلف در تمام بافت‌ها پاسخ خوبی می‌دهند. با این حال، آرتور و همکاران (۱۴) گزارش دادند که از شاخص گنجایش هوایی نمی‌توان به عنوان شاخص مناسبی برای تعیین کیفیت خاک در خاک شنی که به آن کمپوست اضافه شده بود، استفاده کرد. تخلخل موثر یکی از مهم‌ترین مولفه‌های مورد نیاز برای شبیه‌سازی فرآیندهای مرتبط با آبیاری، زهکشی، هیدرولوژی و آبشویی به شمار می‌آید (۱۰) و از آن در برآورد هدایت آبی اشباع خاک استفاده شده است (۱۹).

درمناطق نیمه‌خشک کمبود آب عامل محدودکننده‌ی رشد گیاهان بوده و استفاده از پساب را حداقل برای بعضی موارد توجیه‌پذیر کرده است (۱۱). پساب می‌تواند در خاک به عنوان یک ماده شیمیایی اصلاح کننده عمل نموده و منجر به تغییر خواص فیزیکی خاک گردد و بر اثر آن هدایت آبی اشباع خاک افزایش یابد (۷). تاکنون اثر پساب بر بعضی شاخص‌های فیزیکی مرسوم خاک از قبیل قابلیت هدایت الکتریکی، کربن آلی، تخلخل و جرم ویژه‌ی ظاهری مورد ارزیابی قرار گرفته است ولی بنابر اطلاع نویسندگان اطلاعات چندان زیادی در مورد اثر درازمدت آبیاری با پساب بر شاخص S دکستر و شاخص‌های فیزیکی مشتق از منحنی رطوبتی در دست نمی‌باشد. هدف اصلی این پژوهش بررسی تاثیر کاربرد درازمدت پساب بر (۱) شاخص‌های فیزیکی کیفیت خاک (قابلیت هدایت الکتریکی، کربن آلی، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها و جرم ویژه‌ی ظاهری)؛ و (۲) شاخص S دکستر و شاخص‌های فیزیکی مستخرج از منحنی رطوبتی (تخلخل موثر، تخلخل کل، گنجایش هوایی، آب قابل استفاده‌ی گیاه و گنجایش نسبی آب) در چهار مزرعه‌ی طاقانک (شهرکرد) تحت رژیم‌های کاربرد درازمدت پساب و مدت آن است.

مواد و روش‌ها

چهار مزرعه هر یک با مساحتی حدود دو هکتار در منطقه‌ی طاقانک در۱۷کیلومتری جنوب شهرکرد انتخاب شد. این منطقه دارای اقلیم نیمه‌معتدل با میانگین درجه حرارت و بارش سالانه به ترتیب ۱۱/۵درجه‌ی سلسیوس و ۲۵۰ میلی‌متر بوده ودر ارتفاع ۲۰۳۰ متری ازسطح دریا قرار دارد. این چهار مزرعه نزدیک به یکدیگر واقع شده (شکل ۱) و اثر اقلیم بر آن‌ها یکسان است واز لحاظ تناوب زراعی و شیوه‌ی کشت مشابه یکدیگر ولی از لحاظ تاریخچه‌ی آبیاری با پساب متفاوت هستند: مزرعه‌ی اول فقط باآب چاه، مزرعه‌ی دوم در ۱۳ سال اخیر فقط با پساب شهری و مزرعه‌ی سوم در ۲۳ سال اخیر فقط با پساب شهری آبیاری شده‌اند. مزرعه‌ی چهارم که قبلاً به مدت ۱۰ سال با پساب آبیاری می‌شده در ۱۵ سال اخیر فقط با آب چاه آبیاری شده است. در تابستان سال ۱۳۹۰ از هر یک از مزارع فوق الذکر ۱۵ نمونه از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری خاک به طور تصادفی برداشت و در هر نمونه توزیع اندازه‌ی ذرات، جرم ویژه‌ی حقیقی به روش پیکنومتر (۱۵)، کربن آلی به روش سوزاندن تر (۱۱)، پی‌اچ (pH) و قابلیت هدایت الکتریکی (EC) در عصاره‌ی ۱:۵ آب به خاک (۳۳) به وسیله‌ی الکترود تعیین شد. در محل برداشت هر نمونه، نمونه‌ی دست نخورده‌ای با استوانه‌ی فلزی برای تعیین جرم ویژه‌ی ظاهری برداشت شد. منحنی رطوبتی خاک در ۱۰ نقطه از همان ۱۵ نقطه نمونه‌برداری شده از هر مزرعه تعیین شد.

تعیین بافت خاک: توزیع اندازه‌ی ذرات (اجزای کوچک‌تر از ۲ میلی‌متر) به روش هیدرومتری با استفاده از هیدرومتر ۱۵۲H با حذف ماده‌ی آلی توسط آب اکسیژنه‌ی ۳۷ درصد و افزودن کلگان ۵درصد تعیین شد (۲۳). بعد فرکتال بافت نمونه‌های خاک نیز تعیین شد که جزئیات آن در منبع (۲) آمده است.

میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها: میانگین وزنی قطرخاکدانه‌ها به روش الک خشک و با استفاده از چهار الک با قطر ۲، ۱، ۰/۵ و ۰/۲۵ میلی‌متر تعیین و به کمک رابطه ۱ میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها محاسبه شد:

شکل۱- کروکی چهار مزرعه واقع شده در منطقه طاقانک. علامت ● بیانگر نقاط نمونه‌برداری است.

$$MWD = \sum_{i=1}^{n} x_i w_i \qquad (۱)$$

که در آن: x_iمتوسط قطر یا اندازه‌ی خاکدانه‌ها در هر کلاس به میلی-متر و w_i نسبت وزن خاکدانه‌ها بر روی هر الک به وزن کل خاک است.

منحنی رطوبتی: درصد وزنی رطوبت در مکش های (۰، ۲، ۵، ۱۰ و ۲۰) کیلوپاسکال به وسیله‌ی ستون‌های آویزان و در مکش‌های ۳۰ (FC)، ۵۰، ۱۰۰، ۵۰۰، ۸۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ (PWP) کیلوپاسکال با استفاده از محفظه‌ی فشاری تعیین و با ضرب در جرم ویژه‌ی ظاهری به رطوبت حجمی تبدیل شد. آب قابل استفاده از تفاضل FC و PWP به دست آمد.

محاسبه‌ی شاخص S دکستر: به منظور محاسبه‌ی شاخص S دکستر، ابتدا در محیط RETC (۳۰) تابع ون‌گنوختن (۳۹) به شکل زیر بر داده‌های مکش-رطوبت برازش داده شد:

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[1 + \left(\frac{h}{h_g}\right)^n\right]^{-\left(1-\frac{1}{n}\right)} \qquad (۳)$$

که در آن: θ_s رطوبت اشباع خاک (m^3/m^3)، θ رطوبت خاک (m^3/m^3) و h مکش ماتریک بر حسب (cm) است. در این تابع h_g پارامتر مقیاس و n ضریب تجربی است که هر دو شکل منحنی رطوبتی را تعیین می‌کنند. شاخص S دکستر از رابطه‌ی زیر برای هر نمونه خاک هر مزرعه استخراج شد (۳۲):

$$S = \left| -n(\theta_s - \theta_r).\left[\frac{2n-1}{n-1}\right]^{\frac{1}{n}-1} \right| \qquad (۴)$$

در این معادله اجزاء همان تعاریف رابطه‌ی ۳ را دارند و | | علامت قدر مطلق است.

محاسبه‌ی تخلخل خاک و تخلخل موثر: تخلخل خاک (f) با استفاده از رابطه‌ی زیر محاسبه شد:

$$f = 1 - \frac{BD}{PD} \qquad (۵)$$

که در آن: BD جرم ویژه‌ی ظاهری و PD جرم ویژه‌ی حقیقی خاک (هر دو به Mg/m^3) است. تخلخل موثر (Φ_{eff}) از رابطه‌ی زیر به دست آمد:

$$\Phi_{eff} = \theta_s - \theta_{FC} \qquad (۶)$$

که در آن:Θ_{FC} رطوبت حجمی در نقطه‌ی گنجایش زراعی است.

شاخص‌های MacPOR، AC، PAWC و RWC: شاخص MacPOR حجم منافذ درشت خاک (قطر بزرگ‌تر از ۰/۳ میلی‌متر) از تفاضل نقطه‌ی اشباع و رطوبت حجمی خاک در مکش ۱۰ سانتی‌متر به دست آمد (۳۱). شاخص‌های AC از تفاضل رطوبت خاک در نقطه‌ی ظرفیت زراعی و اشباع وPAWC از تفاضل رطوبت در نقاط ظرفیت زراعی و پژمردگی دائم به دست آمد. شاخص RWC نسبت رطوبت ظرفیت زراعی به رطوبت اشباع است (۲۹).

اندازه‌گیری هدایت آبی اشباع به روش نفوذسنج مکشی: هدایت آبی اشباع خاک با استفاده از نفوذسنج مکشی در ۱۰ نقطه از هر مزرعه تعیین شد (۱۲). جزئیات اندازه‌گیری و محاسبه در (۲) آمده است.

کلیه‌ی تجزیه و تحلیل‌های آماری از جمله مقایسه‌ی اثرات با تجزیه‌ی واریانس، آزمون ال‌اس‌دی و هم‌بستگی در سطح اطمینان ۵ درصد در محیط استاتیستیکای ۱۰ انجام شد (۳۸).

نتایج و بحث

برخی از ویژگی‌های شیمیایی پساب و آب چاه مورد استفاده در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- میانگین بعضی ویژگی‌های شیمیایی پساب و آب چاه مورد استفاده در آبیاری مزارع مورد مطالعه
(برگرفته از منبع۳)

ویژگی	واحد	پساب	آب چاه
پاچ (pH)	–	۷/۹	۷/۶
قابلیت هدایت الکتریکی (EC)	dS/m	۰/۷	۰/۵
غلظت کل جامدات حل شده (TDS)	mg/L	۵۵۰	۳۱۰
غلظت کل جامدات معلق (TSS)	mg/L	۳۲	۸۴
اکسیژن خواهی بیولوژیکی (BOD)	mg/L	۱۷	۰
اکسیژن خواهی شیمیایی(COD)	mg/L	۴۵	۰
نسبت جذب سدیم (SAR)	$(mmol/L)^{1/2}$	۲/۳	۰/۷

پهاش آب چاه و پساب در محدوده‌ی استاندارد (۳۸) جهت آبیاری است. به طور کلی پساب شورتر (EC وTDS بیشتر) از آب چاه بوده و حاوی مقداری ماده آلی است که با BOD و COD نشان داده می‌شود. نسبت جذب سدیم (SAR) پساب سه برابر بیشتراز آب چاه است که انتظار می‌رود در درازمدت تاثیر کاهنده‌ای بر هدایت آبی اشباع خاک داشته باشد. با این حال این اثر منفی پساب ممکن است با افزایش ماده آلی پساب به خاک جبران شود.کل جامدات معلق (TSS) آب چاه سه برابر بیشتر از پساب بود که انتظار می‌رود تاثیر کاهنده‌ای بر هدایت آبی اشباع خاک آبیاری شده با آب چاه داشته باشد.

میانگین برخی از ویژگی‌های پایه در چهار مزرعه مورد مطالعه در جدول ۲مقایسه شده است. به طور میانگین، خاک هر مزرعه ۷۰ درصد سیلت و ۲۰ درصد رس دارد و کلاس بافت خاک چهار مزرعه لوم سیلتی است. جرم ویژه‌ی حقیقی خاک چهار مزرعه مشابه یکدیگر است ($p>0/05$). عموماً، جرم ویژه‌ی حقیقی خاک همواره ثابت بوده و تحت تاثیر عوامل خارجی تغییری نمی‌کند (۳۲). بین بعد فرکتال بافت خاک چهار مزرعه تفاوتی وجود ندارد (جدول ۲، $p>0/05$).

هدایت آبی اشباع در مزرعه‌ی ۲ و ۳ بیشتر از مزرعه‌ی ۱ بود ($p<0/05$، جدول ۲). طبق گزارش دریچزل و همکاران (۲۲) بیستو پنج سال آبیاری سطحی با پساب شهری در هند منجر به افزایش ۳۰ درصدی هدایت آبی اشباع خاک نسبت به آب چاه شد. در مطالعه‌ی حاضر حداقل ۱۳ سال آبیاری سطحی با پساب شهری موجب افزایش ۳۰ درصدی هدایت آبی اشباع شد (۳). علت افزایش هدایت آبی را می‌توان به اثر پساب بر افزایش ماده آلی و بهبود ساختمان خاک (افزایش میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها) نسبت داد (جدول ۳). هدایت آبی اشباع مزرعه‌ی ۴ در حال برگشت به مقدار اولیه در مزرعه‌ی ۱ است. یادآوری می‌شود که مزرعه‌ی ۴ قبلا به مدت ۱۰ سال با پساب آبیاری می‌شد ولی در مدت ۱۵ سال (تا نمونه‌برداری در سال ۱۳۹۱) با آب تازه آبیاری می‌شود. یادآوری می‌شود با توجه به یکسان بودن اقلیم حاکم بر هر چهار مزرعه اثر اقلیم در مقایسه با اثر پساب قابل حذف است. زیرا این چهار مزرعه مجاور در یک محدوده‌ی کوچک چند هکتاری واقع هستند (شکل ۱) و ثانیاً آبیاری با پساب فقط در فصل رشد صورت می‌گیرد که در طی آن در شهرکرد معمولا بارشی رخ نمی‌دهد.

جدول ۲- میانگین برخی ویژگی‌ها در خاک‌های چهار مزرعه‌ی طاقانک که با الگوهای زمانی متفاوتی با پساب شهری آبیاری شده‌اند

ویژگی	واحد	مزرعه‌ی ۱ آبیاری فقط با آب چاه	مزرعه‌ی ۲ آبیاری با پساب به مدت ۱۳ سال	مزرعه‌ی ۳ آبیاری با پساب به مدت ۲۳ سال	مزرعه‌ی ٤ آبیاری با آب چاه در مدت ۱۵ سال اخیر
سنگریزه	٪	۲۷/۸ b	۱۴/۶ a	۲۸/۷ b	۱۷/۳ a
شن	٪	۷/۸ a	۱۰/۰ a	۱۱/۹ a	۸/۷ a
سیلت	٪	۷۲/۶ a	۶۹/۱ a	۶۸/۶ a	۷۳/۱ a
رس	٪	۱۹/۶ a	۲۰/۹ a	۱۹/۵ a	۱۸/۲ a
بعد فرکتال بافت§	–	۲/۸۲ a	۲/۸۱ a	۲/۸۱ a	۲/۸۳ a
کلاس بافت خاک	–	لوم‌سیلتی (SiL)	لوم‌سیلتی (SiL)	لوم‌سیلتی (SiL)	لوم‌سیلتی (SiL)
جرم ویژه‌ی حقیقی	Mg/m^3	۲/۱۱ a	۲/۱۵ a	۲/۱۱ a	۲/۱۰ a
هدایت آبی اشباع§	cm/hr	۰/۷ a	۲/۲۰ b	۲/۱۲ b	۰/۹۲ a

حروف کوچک متفاوت انگلیسی در هر سطر نشان دهنده‌ی معنی‌دار بودن تفاوت است ($p<0/05$). § بر گرفته از منبع (۳)

جدول ۳- مقایسه‌ی میانگین برخی از شاخص‌های فیزیکی اندازه‌گیری شده و استخراج شده‌ی کیفیت خاک در مزارع مورد مطالعه که با الگوهای زمانی متفاوتی با پساب شهری آبیاری شده‌اند

شاخص	واحد	مزرعه‌ی ۱*		مزرعه‌ی ۲		مزرعه‌ی ۳		مزرعه‌ی ٤	
		میانگین و خطای معیار		میانگین و خطای معیار		میانگین و خطای معیار		میانگین و خطای معیار	
شاخص‌های اولیه (تعداد نمونه: ۱۵)									
کربن آلی (OC)	g/kg	۱۱/۵ (۰/۱۲)	a	۲۳/۱ (۰/۲۴)	b	۲۰/۴ (۰/۱۶)	b	۱۸/۵ (۰۲۶)	b
جرم ویژه‌ی ظاهری (BD)	Mg/m^3	۱/۲۵ (۰/۰۵)	b	۰/۹ (۰/۰۴)	a	۱/۰۴ (۰/۰۴)	a	۱/۰ (۰/۰۳)	a
تخلخل کل (f)	–	۴۰/۵ (۲/۶۰)	a	۵۵/۹ (۱/۷۳)	b	۵۰/۳ (۲/۰۷)	b	۵۲/۸ (۱/۹۴)	b
میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD)	mm	۰/۵۴ (۰/۰۷)	a	۰/۷۱ (۰/۰۹)	ab	۰/۹۳ (۰/۰۶)	c	۰/۷۹ (۰/۰۲)	b
قابلیت هدایت الکتریکی (EC)	dS/m	۰/۳۶ (۰/۰۲)	a	۰/۳۰ (۰/۰۳)	a	۰/۲۳ (۰/۰۱)	b	۰/۳۵ (۰/۰۱)	a
شاخص‌های مستخرج از منحنی رطوبتی (تعداد نمونه: ۱۰)									
شاخص دکستر (S)	-	۰/۰۶۴ (۰/۰۳)	a	۰/۰۶۳ (۰/۰۱)	a	۰/۰۷۷ (۰/۰۱)	b	۰/۰۸۶ (۰/۰۱)	b
تخلخل موثر (Φeff)	m^3/m^3	۰/۰۸ (۰/۰۳)	a	۰/۲۲ (۰/۰۴)	b	۰/۱۶ (۰/۰۲)	ab	۰/۱۶ (۰/۰۳)	ab
رطوبت اشباع (Θ_s)	m^3/m^3	۰/۴۵ (۰/۰۱)	a	۰/۵۳ (۰/۰۲)	b	۰/۵۳ (۰/۰۲)	b	۰/۵۱ (۰/۰۲)	b
تخلخل درشت (MacPOR)	m^3/m^3	۰/۰۰۸ (۰/۰۶)	a	۰/۰۱ (۰/۰۱)	a	۰/۰۰۹ (۰/۰۱)	a	۰/۰۰۹ (۰/۰۱)	a
گنجایش نسبی آب (RWC)	-	۰/۷۱ (۰/۰۲)	a	۰/۶۲ (۰/۰۶)	b	۰/۶۶ (۰/۰۳)	ab	۰/۶۴ (۰/۰۰۸)	ab
آب قابل استفاده‌ی گیاه (PAWC)	m^3/m^3	۰/۱۷ (۰/۰۱)	a	۰/۱۸ (۰/۰۱)	a	۰/۲۱ (۰/۰۱)	b	۰/۱۹ (۰/۰۲)	a
گنجایش هوایی (AC)	m^3/m^3	۰/۱۳ (۰/۰۱)	a	۰/۱۹ (۰/۰۳)	b	۰/۱۹ (۰/۰۲)	b	۰/۱۵ (۰/۰۱)	ab

*- حروف کوچک متفاوت انگلیسی در هر ردیف نشان‌دهنده‌ی تفاوت معنی‌دار بین مزارع است ($p<0/05$). اعداد داخل پرانتز خطای معیار میانگین است.
تعاریف مزارع در جدول ۲ آورده شده است.

میانگین برخی از شاخص‌های فیزیکی اندازه‌گیری شده و استخراج شده‌ی کیفیت خاک در مزارع مورد مطالعه که با الگوهای زمانی متفاوتی با پساب شهری آبیاری شده‌اند در جدول ۳ ارائه شده است. آبیاری با پساب کربن آلی خاک را افزایش داده است ($p<0/05$) زیرا پساب بر خلاف آب تازه حاوی مقداری کربن آلی است (جدول ۱). دریچزل و همکاران (۲۲) نیز نشان دادند که آبیاری با پساب شهری به مدت ۲۵ سال منجر به افزایش کربن آلی خاک شده است. علاوه بر این، آبیاری درازمدت با پساب شهری به علت دارا بودن ماده آلی (BOD و COD به ترتیب ۱۷ و ۴۵ میلی‌گرم بر لیتر، جدول ۱، در مقایسه با آب چاه که ماده‌ی آلی آن ناچیز است) با بهبود ساختمان خاک، منجر به کاهش جرم ویژه‌ی ظاهری و افزایش تخلخل شده است ($p<0/05$). مصرف پساب در کشاورزی می‌تواند به دلیل افزایش ماده‌ی آلی و تشدید فعالیت میکروبی جرم ویژه‌ی ظاهری خاک را کاهش و پایداری خاکدانه‌ها را افزایش دهد (۱۷). روحانی‌شهرکی و همکاران (۷) نیز کاهش جرم ویژه‌ی ظاهری خاک را پس از ۹ سال آبیاری با پساب گزارش کرده‌اند. ایضاً بیشترین میانگین شاخص‌های تخلخل و میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها به ترتیب در مزارع ۲ و ۳ حاصل شده است. آبیاری با پساب موجب کاهش معنی‌دار قابلیت هدایت الکتریکی خاک شده است (جدول ۲، $p<0/05$). کاهش هدایت الکتریکی خاک در اثر کاربرد پساب با گزارش پژوهشگران دیگر نیز هم‌خوانی دارد (۷ و ۹) و ایضاً می‌تواند تغییری مثبت قلمداد شود زیرا به مفهوم کاهش پتانسیل اسمزی خاک و افزایش آب قابل استفاده‌ی گیاه است (۳۴).

دکستر (۲۰) و رینولدز (۳۲) شاخص S دکستر کمتر از ۰/۰۲ و بالاتر از ۰/۰۵ را به ترتیب برای وضعیت‌های بسیار ضعیف و بسیار خوب کیفیت فیزیکی خاک و مقدار ۰/۰۳۵ را مرز وضعیت خوب و ضعیف ساختمان خاک در نظر گرفتند (۳۲). میانگین شاخص S دکستر در مزرعه‌ی ۱ از حد بحرانی ۰/۰۳۵ بالاتر بوده و آبیاری با پساب باز هم آن را افزایش داده است (جدول ۳، $p<0/05$). بالاتر بودن شاخص S دکستر از حد ۰/۰۳۵ بیانگر آن است که این خاک‌ها از ساختمان خوبی برخوردار هستند. ساختمان ضعیف خاک باعث کاهش آب قابل استفاده گیاه می‌شود، زیرا در حالت مرطوب با کاهش تهویه خاک و در حالت خشک با افزایش مقاومت، رشد ریشه را محدود می‌نماید (۲). بیشترین میانگین شاخص S دکستر اختصاص به مزرعه‌ی ۳ داشت که به مدت ۲۳ سال با پساب آبیاری شده بود. وقتی اوبیا از کود دامی در دوسطح ۷۵ و ۱۵۰ مگاگرم بر هکتار استفاده کرد علاوه بر بهبود شاخص‌های مرسوم کیفیت فیزیکی، شاخص S نیز در مقایسه با شاهد (۰/۰۳۸) به ترتیب به ۰/۰۵۲ و ۰/۰۵۹ افزایش یافت که نشان‌دهنده‌ی اثر مثبت کودهای دامی بر کیفیت فیزیکی خاک است. این اثر مثبت به طور مستقیم (نگهداری آب) و غیرمستقیم

(پیامدهای فعالیت میکربی) بر خاک اعمال می‌شود. میانگین این شاخص برای مزرعه‌ی ۴ تفاوتی با مزرعه‌ی ۱ نداشت ($p>۰/۰۵$). به عبارت دیگر برگشت به آبیاری با آب تازه، پس از ۱۰ سال آبیاری این مزرعه با پساب، شاخص S دکستر را به مقدار اولیه در مزرعه شاهد ۱متمایل کرده است.

آبیاری با پساب منجر به افزایش دو تا سه برابری مقدار تخلخل موثر خاک شده است (جدول ۳، $p<۰/۰۵$). یکی از اثرات افزایش تخلخل موثر افزایش هدایت آبی اشباع در مزارع ۲ و ۳ بوده است. نتایج نشان داد ادامه‌ی آبیاری مزرعه‌ی ۴ با آب تازه منجر به برگشت مقدار هدایت آبی اشباع آن به مزرعه‌ی ۱خواهد شد (جدول ۱). دامنه‌ی مطلوب برای شاخص گنجایش نسبی آب (RWC) بین ۰/۶ تا ۰/۷ گزارش شده است (۳۲). برای تمامی مزارع مقدار این شاخص در این دامنه‌ی مطلوب قرار داشت پس الگوی استفاده از پساب تاثیری بر آن ندارد. مقدار گنجایش نسبی آب (RWC) برای مزرعه‌ی ۱ در حداکثری این دامنه (۰/۷) قرار داشت که بیان‌کننده‌ی توانایی خاک برای نگه‌داشت و ذخیره آب و هوا با توجه به حجم منافذ تشکیل دهنده‌ی خاک است. اوبیا (۲۹) با کاربرد دو سطح از کود حیوانی نشان داد که مقدار RWC تحت تاثیر تیمارهای کودی قرار گرفته و بیشترین مقدار این شاخص تحت کاربرد کود حیوانی ۰/۷۰ بوده که بیان‌کننده‌ی بهبود ساختمان خاک در اثر اعمال این تیمار است. با این حال آبیاری با پساب تمایل به کاهش این شاخص داشته است. از آن‌جایی که شاخص RWC از نسبت رطوبت در نقطه‌ی ظرفیت زراعی و اشباع محاسبه می‌شود علت کاهش این شاخص را می‌توان به افزایش قابل توجه هشت درصدی رطوبت اشباع (جدول ۳، $p<۰/۰۵$) و افزایش جزئی سه درصدی رطوبت در نقطه‌ی ظرفیت زراعی (اطلاعات آن در اینجا آورده نشده است) ربط داد.

خاکی با آب قابل استفاده‌ی بیشتر از ۰/۲ در رده‌ی بسیار مطلوب و بین ۰/۲–۰/۱۵ (m^3/m^3) در رده‌ی مطلوب قرار می‌گیرد (۳۲). بنابراین، از این نظر مزرعه‌ی ۳ در حد بسیار مطلوب و دیگر مزارع در حد مطلوب قرار دارند. کاربرد ۲۳ ساله‌ی پساب آب قابل استفاده‌ی گیاه (PAWC) را ۴ درصد افزایش داده است ($p<۰/۰۵$) اگرچه کاربرد ۱۳ ساله پساب اثر افزایشی معنی‌داری نداشته است. مقادیر گنجایش هوایی (AC) بزرگ‌تر از ۰/۱۴ (m^3/m^3) در خاک‌هایی با بافت لومی شنی تا لوم‌رسی برای تهویه و رشد ریشه‌ی گیاه ضروری است (۱۶). شاخص گنجایش هوایی در مزرعه‌ی ۱ اختلاف ناچیزی با این حد دارد، ولی گنجایش هوایی در سه مزرعه‌ی دیگر در اثر کاربرد پساب به ۰/۱۹ افزایش یافته است ($p<۰/۰۵$). مقدار این شاخص در مزرعه‌ی ۴ کاهش یافته است. با توجه به نتایج، آبیاری مجدد با آب چاه باعث کاهش گنجایش هوایی و تمایل مقدارآن به مزرعه‌ی یک (شاهد) شده است.

نتایج آزمون هم‌بستگی اسپیرمن بین شاخص‌های فیزیکی اندازه‌گیری شده‌ی کیفیت خاک در جدول ۴ آورده شده است. شاخص S دکستر هم‌بستگی مثبت و معنی‌داری با تخلخل کل خاک ($r=۰/۵۷$)، رطوبت اشباع ($r=۰/۷۲$)، تخلخل موثر ($r_=۰/۶۳$)، آب قابل استفاده‌ی گیاه ($r=۰/۷۴$) و گنجایش هوایی ($r=۰/۸۱$) و هم‌بستگی منفی و معنی‌داری با جرم ویژه‌ی ظاهری خاک ($r=-۰/۵۱$) و گنجایش نسبی آب ($r=-۰/۶۴$) داشت. این نتایج با نتایج امامی و همکاران (۱) در ۲۵ نمونه خاک دست‌نخورده از مشهد و با نتایج ابیا (۲۹) به دنبال کاربرد کود دامی همسو است. به ویژه، امامی و همکاران (۱) گزارش کردند که بین شاخص S و آب قابل استفاده‌ی گیاه هم‌بستگی مثبت و معنی‌داری ($r=۷۹/۰^*$) وجود داشته است ($p<۰/۰۱$).

جدول ٤- نتایج آزمون هم‌بستگی اسپیرمن بین شاخص‌های فیزیکی کیفیت خاک در ۳مزرعه‌ی آبیاری شده با آب چاه و پساب به مدت ۱۳ و ۲۳ سال (مجموعا ۳۰ نمونه، از هر مزرعه۱۰ نمونه)

	S	OC	BD	f	MWD	θ_s	Φ_{eff}	PAWC	RWC	AC	MacPOR	K_s
OC	۰/۳۰											
BD	-۰/۵۱*	-۰/۳۹*										
f	۰/۵۷*	۰/۴۴*	-۰/۹۱*									
MWD	-۰/۱۶	-۰/۳۶	۰/۰۵	-۰/۱۰								
θ_s	۰/۷۲*	۰/۲۶	-۰/۶۶*	۰/۷۸*	-۰/۱۴							
Φ_{eff}	۰/۶۳*	۰/۴۸*	-۰/۸۳*	۰/۸۲*	-۰/۲۲	۰/۵۵*						
PAWC	۰/۷۴*	۰/۱۰	-۰/۳۶*	۰/۵۰*	-۰/۱۳	۰/۷۳*	۰/۳۲					
RWC	-۰/۶۴*	-۰/۳۱	۰/۳۱	-۰/۲۴	۰/۱۸	-۰/۳۶	-۰/۵۴*	-۰/۲۰				
AC	۰/۸۱*	۰/۳۶	-۰/۵۳*	۰/۵۱*	-۰/۲۲	۰/۷۱*	۰/۶۴*	۰/۴۷*	-۰/۹۰*			
MacPOR	۰/۱۰	۰/۱۰	-۰/۰۰۲	۰/۰	۰/۱۰	۰/۱۲	۰/۲۱	-۰/۱۴	-۰/۳۷	۰/۳۰		
K_s	۰/۶۰*	۰/۵۰*	-۰/۵۲*	۰/۵۲*	۰/۴۴*	۰/۵۰*	۰/۵۲*	۰/۳۲	-۰/۴۰*	۰/۵۴	۰/۴۰*	

*- در $\alpha<۰/۰۵$ معنی‌دار است.

شاخص S رابطه‌ای با کربن آلی خاک نشان نداد. اگرچه بیشتر افزایشS بایستی به طور غیرمستقیم اثر تغییر کربن آلی خاک در اثر کاربرد پساب باشد. کربن آلی ریز موجود در پساب شهری (۱۱) بر خلاف کربن آلی درشت و اسفنجی موجود در کودهای دامی (۲۹) تاثیر مستقیم چندانی بر نگه‌داری آب ندارد و احتمالا فقط با تاثیر غیرمستقیم منجر به کاهش جرم ویژه‌ی ظاهری (r= −۰/۵۱) و افزایش تخلخل کل (r=۰/۵۷) و تخلخل موثر (r=۰/۶۳) شده، شاخص‌های مستخرج از منحنی رطوبتی را بهبود می‌بخشد (۲۹) و هدایت آبی اشباع را افزایش می‌دهد.

کاهش جرم ویژه‌ی ظاهری به معنای افزایش تخلخل خاک است (جدول ۴، r= −۰/۹۱) اما نشان‌دهنده‌ی توزیع اندازه‌ی منافذ خاک نیست واحتمالاً با کاهش جرم ویژه‌ی ظاهری در این خاک‌ها درصد منافذ درشت ساختمانی افزایش یافته و باعث افزایش شاخص S می‌شود (۱). هم‌بستگی منفی بین این دو (r= −۰/۵۱) نیز این ارتباط را تایید می‌کند. نتایج مشابهی توسط دکستر (۲۱) و امامی و همکاران (۱) گزارش شده است. در حالی که هم‌بستگی کربن آلی با جرم ویژه-ی ظاهری، تخلخل و خاکدانه‌ها معنی‌دار است (p<۰/۰۵)، هم‌بستگی کربن آلی با شاخص Sدکستر و شاخص‌های مستخرج از منحنی رطوبتی معنی‌دار نیست (p>۰/۰۵). شاید یک علت آن اثر غیرمستقیم کربن آلی پساب شهری بر کیفیت فیزیکی خاک باشد. کربن آلی پساب عموما از مولکول‌های ریزی تشکیل شده‌اند که اثر مستقیم چندانی در جذب و نگهداری آب و بنابراین ویژگی‌های رطوبتی خاک ندارند (۱۱) ولی می‌توانند فعالیت میکربی خاک (از جمله قارچ‌ها) را افزایش و ساختمان خاک را بهبود بخشند (۲۹). احتمالا افزایش رطوبت اشباع خاک از طریق افزایش تخلخل خاک به واسطه‌ی کاهش جرم ویژه‌ی ظاهری عامل اصلی افزایش آب قابل استفاده و گنجایش هوایی است (جدول ۳). هم‌بستگی منفی بین جرم ویژه‌ی ظاهری و گنجایش هوایی (r= −۰/۵۳) نیز حاکی از این ارتباط است.

هم‌بستگی مثبت و معنی‌داری بین هدایت آبی اشباع با شاخص‌های دکستر (r=۰/۶۰)، کربن آلی (r=۰/۵۰)، تخلخل (r=۰/۵۲)، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (r= ۰/۴۴)، رطوبت اشباع (r=۰/۵۰)، تخلخل موثر (r=۰/۵۲) و تخلخل درشت (r=۰/۴۰)؛ وهم‌بستگی منفی و معنی‌داری با جرم ویژه‌ی ظاهری (r= −۰/۵۲) و گنجایش نسبی آب (r= −۰/۴۰) مشاهده شد. افزایش ماده‌ی آلی خاک منجر به بهبود ساختمان خاک، کاهش جرم ویژه‌ی ظاهری، افزایش تخلخل خاک و تخلخل موثر و در نهایت افزایش هدایت آبی اشباع خاک شده است (جدول ۳). خاک‌هایی با ساختمان بهتر (تخلخل درشت و موثر بیشتر و میانگین بزرگ‌تر قطر خاکدانه‌ها) دارای قابلیت هدایت آبی بیشتر بوده و بنابراین انتظار می‌رود که با همگام با افزایش شاخص S دکستر، هدایت آبی اشباع خاک نیز افزایش یابد. قبلاً نیزهم‌بستگی مثبت و معنی‌داری بین هدایت آبی اشباع باشاخص S دکستر (r=۰/۸۴) و کربن آلی (r=۰/۹۵) و هم‌بستگی منفی و معنی‌داری بین هدایت آبی اشباع با جرم ویژه‌ی ظاهری خاک (r=−۶۰) مشاهده شده است (۲۸).

به منظور بررسی بیشتر اثر کاربرد پساب، هم‌بستگی شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک در دو مزرعه‌ی مرجع و مزرعه‌ی ۳ محاسبه و در جدول ۵ارائه شده است. طبیعی است که دامنه‌ی تغییرات متغیرها در داخل مزرعه‌ی ۱ و مزرعه‌ی ۳ کوچک‌تر بوده و بعضی از هم‌بستگی‌های معنی‌دار کلی بین متغیرها (جدول ۴) در هریک از این دو مزرعه حاکم نباشد. در مقابل هم‌بستگی معنی‌دار متغیرها در هر مزرعه حاکی از قدرت بیشتر رابطه‌ی معنی‌دار آن‌ها باشد.

با کاربرد پساب به مدت ۲۳ سال (مزرعه‌ی ۳) هم‌بستگی شاخص S دکستر با تخلخل موثر و گنجایش نسبی آب افزایش یافته است (p<۰/۰۵) ولی هم‌بستگی آن با آب قابل استفاده و گنجایش هوایی ثابت مانده است. افزایش شاخص S در مزرعه‌ی ۳ مقارن با افزایش تخلخل موثر و گنجایش نسبی آب و کاهش هم‌بستگی آن با رطوبت اشباع بوده که به معنی بهبود ساختمان خاک به دلیل کاربرد پساب و تخلخل درشت خاک است (جدول ۴).

به طور کلی آبیاری با پساب هم‌بستگی منفی جرم ویژه‌ی ظاهری با تخلخل ریز و رطوبت اشباع، هم‌بستگی مثبت رطوبت اشباع با گنجایش هوایی و تخلخل درشت؛ و هم‌بستگی آب قابل استفاده با گنجایش هوایی و گنجایش نسبی آب را تقویت نموده است. تغییرات PAWC در مزرعه‌ی ۳ مرتبط با تغییرات شاخص S، رطوبت اشباع و تخلخل موثر بوده در حالی که در مزرعه‌ی ۱ تحت تاثیر تغییرات شاخص S، رطوبت اشباع و تخلخل کل است. این بدان مفهوم است که آبیاری با پساب هم‌بستگی آب قابل استفاده با تخلخل موثر را افزایش داده است. این تغییر احتمالاً ناشی از افزایش رطوبت در گنجایش زراعی و افزایش شیب در نقطه‌ی عطف منحنی رطوبتی (یا شاخص Sدکستر) باشد. احتمالا بیشتر تغییرات جرم ویژه‌ی ظاهری با افزایش رطوبت اشباع و تخلخل موثرترین است. دلیل هم‌بستگی این مولفه‌ها را می‌توان به اثر پساب بر ساختمان خاک و به ویژه تخلخل موثر عنوان نمود (۳۲). در مزرعه‌ی ۳ و با کاربرد پساب، نه تنها هم‌بستگی جرم ویژه‌ی ظاهری با تخلخل خاک تقویت شده بلکه هم‌بستگی آن با رطوبت اشباع و تخلخل موثر نیز معنی‌دار شده است (p<۰/۰۵). به عبارت دیگر، بیشترین اثر کاربرد پساب بر ساختمان خاک، تخلخل درشت خاک و حوالی نقطه‌ی اشباع بوده است.

نتیجه‌گیری

کاربرد پساب شهری کیفیت فیزیکی خاک ریزبافت مزارع ناحیه‌ی طاقانک را بهبود داده است.

جدول ۵- نتایج آزمون هم‌بستگی اسپیرمن بین شاخص‌های فیزیکی اندازه‌گیری شده‌ی کیفیت خاک در مزرعه‌ی ۱ (شاهد) و مزرعه‌ی ۳

مزرعه‌ی ۱- آبیاری با آب چاه

	S	OC	BD	f	MWD	θ_s	Φ_{eff}	PAWC	RWC	AC
OC	۰/۲۴									
BD	۰/۱۵	۰/۴۰								
f	۰/۴۴	−۰/۱۶	−۰/۷۳*							
MWD	۰/۴۲	−۰/۲۷	−۰/۲۰	۰/۰۶						
θ_s	۰/۷۳*	−۰/۱۰	۰/۰۳	۰/۶۰	۰/۰۴					
Φ_{eff}	۰/۴۱	۰/۱۱	−۰/۵۲	۰/۹۰*	۰/۲۶	۰/۵۰				
PAWC	۰/۸۴*	۰/۱۱	−۰/۱۳	۰/۶۸*	۰/۱۶	۰/۹۳*	۰/۶۱			
RWC	−۰/۲۴	−۰/۳۶	−۰/۳۵	۰/۲۵	−۰/۲۸	۰/۳۰	۰/۰۱	۰/۱۴		
AC	۰/۶۶*	۰/۲۲	۰/۳۹	۰/۰۳	۰/۳۹	۰/۲۵	۰/۲۱	۰/۳۳	−۰/۸۴*	
MacPOR	−۰/۰۵	۰/۰۳	۰/۳۹	−۰/۲۷	۰/۳۵	−۰/۲۷	۰/۲۴	−۰/۲۷	−۰/۷۷*	۰/۶۰

مزرعه‌ی۳- آبیاری با پساب به مدت ۲۳ سال

	S	OC	BD	f	MWD	θ_s	Φ_{eff}	PAWC	RWC	AC
OC	۰/۰۲									
BD	−۰/۴۲	−۰/۱۳								
f	۰/۱۵	۰/۱۱	−۰/۹۱*							
MWD	−۰/۰۹	−۰/۱۳	−۰/۳۷	۰/۳۰						
θ_s	۰/۴۵	−۰/۲۶	−۰/۶۶*	۰/۷۱*	−۰/۲۷					
Φ_{eff}	۰/۶۷*	−۰/۱۰	−۰/۸۹*	۰/۷۳*	۰/۰۷	۰/۵۵				
PAWC	۰/۸۷*	−۰/۱۰	−۰/۴۹	۰/۳۷	−۰/۳۳	۰/۷۳*	۰/۷۰*			
RWC	۰/۹۰*	۰/۱۰	۰/۳۶	−۰/۱۴	۰/۳۰	−۰/۵۰	−۰/۵۷	−۰/۷۸*		
AC	۰/۸۸*	−۰/۱۳	−۰/۴۵	۰/۳۲	−۰/۴۴	۰/۷۱*	۰/۶۶*	۰/۹۴*	−۰/۹۰*	
MacPOR	۰/۰۳	۰/۰۰۶	−۰/۳۵	۰/۴۸	−۰/۴۷	۰/۶۸*	۰/۲۱	۰/۳۹	−۰/۰۳	۰/۳۵

*- در $\alpha < ۰/۰۵$ معنی‌دار است. در هر مزرعه، تعداد نمونه‌ی چهار شاخص اولیه ۱۵ و تعداد شاخص‌های مستخرج از منحنی رطوبتی ۱۰ بود.

این بهبود براساس افزایش شاخص‌های S دکستر، تخلخل کل، افزایش اندازه‌ی خاکدانه‌ها، تخلخل موثر قابل و کاهش جرم ویژه‌ی ظاهری قابل درک است؛ مدت کاربرد پساب نیز بر کیفیت خاک موثر بود: بعضی شاخص‌ها پس از ۱۳ سال کاربرد پساب و بعضی دیگر (مانند شاخص S دکستر و آب قابل استفاده‌ی گیاه) در مدت طولانی‌تر (۲۳ سال) تغییر معنی‌داری پیدا کرده‌اند؛ آبیاری مزارع با پساب به مدت ۱۰ سال و سپس قطع آن و ادامه‌ی آبیاری با آب تازه در ۱۵ سال اخیر اثرات متفاوتی بر شاخص‌های اندازه‌گیری‌شده داشته است. بعضی از شاخص‌ها (مانند شاخص S دکستر، گنجایش نسبی، گنجایش هوایی و تخلخل موثر) به مقادیر اولیه‌ی خود برگشته یا در حال برگشت به مقادیر اولیه‌ی خود هستند.

از شاخص S دکستر می‌توان به عنوان شاخص فیزیکی مناسبی برای مدیریت کیفیت خاک تحت پساب شهری استفاده کرد زیرا نه تنها به مدیریت پساب و تغییرات حاصل از آن در خاک پاسخ می‌دهد بلکه هم‌بستگی معنی‌داری نیز با بسیاری دیگر از شاخص‌های فیزیکی از جمله هدایت آبی اشباع خاک نشان می‌دهد. آبیاری با پساب هم‌بستگی شاخص S را با دیگر ویژگی‌ها یا شاخص‌ها تحت تاثیر قرار داد؛ شاید تخلخل درشت خاک شاخص فیزیکی مناسبی برای ارزیابی کیفیت فیزیکی خاک‌های این منطقه نباشد زیرا به مدیریت کاربرد پساب شهری پاسخی نمی‌دهد. علت آن احتمالا پاسخ کم خاک ریزبافت (۳) مزارع این ناحیه به میزان کم ماده‌ی آلی و نوع ریز موجود آن در پساب شهری تصفیه‌شده (۱۱) باشد.

منابع

۱- امامی ح.، لکزیان ا. و مهاجرپور م. ۱۳۸۹. رابطه‌ی بین شیب منحنی رطوبتی و بعضی از ویژگی‌های فیزیکی کیفیت خاک. مجله آب و خاک، ۲۴(۵): ۱۰۳۵-۱۰۲۷.

۲-برزگر ع.ا. ۱۳۸۰. مبانی فیزیک خاک. چاپ سوم.انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز، ایران، صفحات ۹۰-۸۸.
۳-بنی‌طالبی گ. ۱۳۹۱. اثرات درازمدت آبیاری با پساب شهری بر برخی از ویژگی‌های خاک و خطر سلامتی فلزات سنگین در منطقه طاقانک. پایان‌نامه‌ی کارشناسی‌ارشد گروه علوم خاک دانشکده کشاورزی دانشگاه شهرکرد. ۱۰۲ صفحه.
۴- بیگی ح. و حق‌شناس م. ۱۳۹۱. اثر متقابل زئولیت میانه و پلیمر طراوت A200 بر ظرفیت نگه‌داری و ضرایب مدل منحنی رطوبتی در یک بافت خاک سبک. فصل‌نامه علمی-پژوهشی تحقیقات مرتع و بیابان ایران، ۱۹(۴): ۶۹۲-۶۷۹.
۵- حق‌شناس م. و بیگی ح. ۱۳۸۹. اثر ژئولیت میانه بر ظرفیت نگه‌داری و ضرایب مدل‌های منحنی رطوبتی دو بافت خاک شنی و لوم‌رسی. مجله پژوهش آب ایران، ۴(۶): ۴۲-۳۵.
۶- حق‌شناس م. و بیگی ح. ۱۳۸۹. اثر پلیمر طراوت A200بر ضرایب دو مدل منحنی رطوبتی در دو بافت خاک. دومین همایش ملی اثرات خشکسالی و مدیریت آن. ۳۰ تا ۳۱ اردیبهشت ۱۳۸۸، اصفهان. ص ۶-۱.
۷- روحانی ف.، مهدوی ر. و رضایی م. ۱۳۸۴. اثر آبیاری با پساب بر برخی خواص فیزیکی و شیمیایی. مجله آب و فاضلاب، ۱۶(۱): ۲۹-۲۳.
۸- شالیکار ا.، ایوبی ش.، خرمالی ف. و نصرآبادی ر. ۱۳۸۷. ارزیابی شاخص‌های مختلف کیفیت خاک درتناوب‌های زراعی با کشت برنج در منطقه دشت‌سرآمل. مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی، ۱۵(۶): ۱۲-۱.
۹- صفری‌سنجانی ع. ۱۳۷۴. پیامد آبیاری با پساب بر برخی ویژگی‌های شیمیایی خاک ناحیه برخوار اصفهان و انباشتگی برخی عناصر در گیاه یونجه. پایان‌نامه کارشناسی ارشد خاکشناسی، دانشکده کشاورزی. دانشگاه صنعتی اصفهان.
۱۰- عزیزپور س.، فتحی پ. و نوبخت‌وکیلی ک. ۱۳۹۱. برآورد توام هدایت هیدرولیکی اشباع خاک و تخلخل موثر با استفاده از مساله‌ی رویکرد مساله معکوس هوشمند. مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی، ۱۶(۶۰): ۲۲-۱۳.
۱۱- مرادمند م. و بیگی ح. ۱۳۸۸. اثر آبیاری با پساب تصفیه شده شهری بر توزیع سرب و نیکل در اندام فلفل سبز. مجله پژوهش آب در ایران، ۳(۵): ۷۰-۶۳.
۱۲- مرادی م. ۱۳۸۷. انتخاب بهترین مدل منحنی رطوبتی خاک و تخمین ضرایب آن با استفاده از داده‌های زود یافت خاک در خاک‌های دشت فارسان و شهرکرد. پایان‌نامه کارشناسی ارشد گروه علوم خاک دانشکده کشاورزی دانشگاه شهرکرد. ص ۹۰-۴۵
۱۳-نبی‌زاده ا. ۱۳۸۷. اثر حذف کربنات کلسیم بر بافت و مدل‌های توزیع اندازه‌ی ذرات خاک و تخمین ضرایب منحنی رطوبتی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد گروه علوم خاک دانشکده کشاورزی دانشگاه شهرکرد. ص ۱۴۸-۱۴۶
14- Arthur E., Cornelis W.M., Vermang J. and De Rocker E. 2011. Amending a loamy sand soil with three compost types: impact on soil quality. Soil Use and Management, British Society of Soil Science, 27: 116–123.
15- Blake G.R. and Hartge K.H. 1986.Bulk density. In: Methods of Soil Analysis. Part 1. Second ed. ASA and SSSA, Madison, WI. pp: 363-375.
16- Carter M.R. 1988. Temporal variability of soil macro porosity in a fine sandy loam undermoldboard ploughing and direct drilling. Soil & Tillage Research, 12: 37–51
17- Chan K.Y. 1995. Strength characteristics of a potentially hard-setting soil under pasture and conventional tillage inthe semi-arid region of Australia.Soil Tillage Research, 34:105-113.
18- Chaney K. and Swift R.S. 1984. Study on aggregate stability reformation of soil aggregate. Soil Science Societyof AmericanJournal, 37: 335-399.
19- Chapuis R.P. 2012. Predicting the saturated hydraulic conductivity of soils: a review. Engineering Geological Environment, 1:401–434.
20- Dexter A.R. 1988. Advances in characterization of soil structure. Soil Tillage Research, 11:199–238.
21- Dexter A.R. 2004. Soil physical quality. Part I: Theory; effects of soil texture, density, organic matter and effects on root growth. Geoderma, 120: 201–214.
22- Drechsel P., Ascott C.h., Raschid-sally L., Redwood M. and Bahri A. 2010. Wastewater Irrigation and Health Assessing and Mitigating Risk in Low-income Countries. Earthscan, London.
23. Gee G.W. and Bauder J.W. 1986. Particle size analysis. In: Klute A. (ed.), Methods of Soil Analysis. Part 2.2nd ed. Agron.Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison, WI. pp: 383-411.
24- Ghanbarian-Alavijeh B.and Millán H. 2009. The relationship between surface fractal dimension and soil water content at permanent wilting point. Geoderma, 151: 224–232
25- Karlen D.L., Eash N.S.and Unger P.W. 1992.Soil and crop management effects on soil quality indicators. American Journal of Alternative Agriculture, 7:48-55
26- Mahida U.N. 1981. Water Pollution and Disposal of Wastewater on Land.McGrowHill Pub. New Delhi. 323 pp.
27-Mullins C.E., MacLeodD.A., NorthcoteK.H., TisdallJ.M. and YoungI.M. 1990. Hard-setting soils: behavior, occurrence, and management. In: Lal R., Stewart B.A., (Eds.), Soil Degradation. Advanced Soil Science, 11: 37–108.

28- Munir J., Rusan M., Hinnawi S. and Rousan L. 2007. Long term effect of wastewater irrigation of forage crops on soil and plant quality parameters. Soil Science Society of American Journal, 215: 143-152.
29- Obia A. 2011.Use of soil amendments as adaptation strategy for global climate change.MSc thesis.University of Ghent, Belgium.
30-RETC for windows. 1998. Version 6.02. Downloadable from www.PC-Progress.com.
31- Reynolds W.D., Drury C.F., Yang X.M., Fox C.A., Tan C.S. and Zhang T.Q. 2007. Land management effects on the near-surface physical quality of a clay loam soil. SoilandTillageResearch, 96: 316–330.
32- Reynolds W.D., Drury C.F., Tan C.S., Fox C.A. and Yang X.M. 2009. Use ofindicators and pore volume function characteristics to quantify physical quality. Geoderma, 152: 252-263.
33-Rhoades J.D. 1982. Soluble salinity.In: A. Klute (ed.), Methods of Soil Analysis.Part2.2nd ed. Agron.Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison,WI. pp: 167-178.
34- Scott D. 2000. Soil Physics, Agricultural and Environmental Applications.Iowa University Press. Ames Iowa.
35- Shukla M.K., Lal R. and Ebinger M. 2006. Determining soil quality indicators by factor analysis. Soil and Tillage Research,87:194–204.
36- Singh M.J. and Khera K.L. 2009. Physical indicators of soil quality in relation to soilerodibility under different land uses. Arid Land Research and Management, 23:152-167.
37- Sparling G.P. and Schipper L.A. 2002. Soil quality at a national scale in New Zealand. Journal of Environmental Quality, 31:1848–1857.
38- StatSoft, Inc. 2011. STATISTICA (data analysis software system), version 10. www.statsoft.com.
39- Van Genuchten M.Th., Leij F.J. and Yates S.R. 1991. The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils. Research Report No, 600/2-91/065. USDA, ARS, Salinity Research Laboratory. Riverside, CA.
40- World Health Organization, (regional office for the easternMediterranean, CEHA, regional center for environmental health activities). 2006. A compendium of standards for wastewater reuse in easternMediterranean region.
41- Xu J., Wu L., Chang A.C.and Zhang Y. 2010. Impact of long term reclaimed wastewater irrigation on agricultural soils: A preliminary assessment. Journal of Hazardous Materials, 183:780-786.

Journal of Water and Soil
Vol. 27, No. 5, Nov.-Dec. 2013, p. 1046-1056

نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۲۷، شماره ۵، آذر - دی ۱۳۹۲، ص. ۱۰۵۶-۱۰۴۶

The Effect of Long-Term Application of Municipal Wastewater on Soil Physical Quality Indices: A Case Study in the Taqanak Farms, Shahrekord

H. Beigi Harchegani[1*]- G. Banitalebi[2]

Received:10-05-2013
Accepted:22-10-2013

Abstract

To investigate the long-term effect (13 and 23 years) of wastewater irrigation on soil physical quality indices in Taqanak, Shahrekord, four homogenous fields but with long and different history of treated municipal wastewater application were selected. The changes in conventional soil physical indicators (organic carbon, bulk density, mean diameter of aggregates) as well as retention-curve derived indices: Dexter's S index, Macro pore porosity (MacPOR), air capacity (AC), plant available water content (PAWC) and relative water capacity (RWC) were investigated in these farms.Irrigation with wastewater significantly increased ($p<0.05$) organic carbon from 11 to 20 g kg^{-1}, porosity from 0.40 to 0.50, and bulk density from 1.25 to 1 Mg m^{-3} ($p<0.05$). Irrigation with wastewater, in addition to significantly increasing S index from 0.064 to 0.077 and air capacity from 0.13 to 0.19, doubled the effective porosity from 0.08 to 0.16 and increased the PAWC by 4% (all at $p<0.05$). Dexter's S positively and significantly ($p<0.05$) correlated with total porosity ($r=0.57$), saturation moisture content ($r=0.72$), effective porosity ($r=0.63$), plant available water content ($r=0.74$), air capacity ($r=0.81$) while negatively and significantly ($p<0.05$) correlated with the RWC ($r=-0.64$) and bulk density ($r=-0.51$). Municipal wastewater has improved soil physical quality. The improvement has occurred either after 13 years or after 23 years irrigation with wastewater. Re-irrigation with freshwater, tends to return some physical indices to the default values at control Farm 1.

Keywords: Air capacity, Effective porosity, Dexter's S index, Plant available water, Relative water content

1,2- Assistant Professor and Graduate MSc, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Shahrekord, Respectively
(*- Corresponding Author Email: beige.habib@gmail.com)