

## اثر آبیاری دراز مدت با پساب شهری تصفیه شده بر هدایت آبی اشباع یک خاک لوم سیلتی و برآورد آن - مطالعه موردی

گلنوش بنی طالبی<sup>۱</sup>، حبیب بیگی هرچگانی<sup>۱\*</sup> و مهدی قبادی نیا<sup>۲</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۶/۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۳/۲۲)

### چکیده

افزایش هدایت آبی در خاک‌های سنگین بافت مطلوب است. کاربرد پساب معمولاً ساختمان، تخلخل و به دنبال آن هدایت آبی اشباع خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهد. اهداف اصلی این پژوهش بررسی اثر آبیاری دراز مدت با پساب شهری تصفیه شده بر هدایت آبی اشباع و برآورد آن با تابع انتقالی براساس بعد فرکتال بافت در خاک (لوم سیلتی) ناحیه طاقانک شهرکرد بود. به همین منظور، سه مزرعه با بافت یکسان ولی تاریخچه‌های متفاوت کاربرد پساب (آبیاری فقط با آب چاه، آبیاری با پساب شهری به مدت ۱۳ و یا ۲۳ سال) انتخاب شدند. هدایت آبی اشباع ( $K_s$ ) به روش نفوذسنج مکشی اندازه‌گیری شد. آبیاری با پساب به مدت ۱۳ سال مقدار  $K_s$  خاک را از ۷ میلی‌متر بر ساعت به سه برابر افزایش داده است در حالی که آبیاری ۲۳ سال با پساب این مشخصه را بیشتر افزایش نداده است. بعد فرکتال بافت از طریق سه رابطه خطی شده جرم- زمان، جرم- قطر، و کرچنکو- ژانگ محاسبه و با جاگذاری در تابع انتقالی راولز- همکاران هدایت آبی اشباع برآورد شد. مقادیر برآورد شده بر پایه بعد فرکتال حاصل از روش‌های جرم- قطر و کرچنکو- ژانگ تفاوت معنی‌داری با مقادیر اندازه‌گیری شده با نفوذسنج مکشی نداشت و قادر بود اثر کاربرد پساب را بر هدایت آبی اشباع منعکس سازد.

واژه‌های کلیدی: اندازه‌گیری و تخمین، بعد فرکتال بافت، تخلخل، تابع انتقالی، راولز، نفوذسنج مکشی، طاقانک شهرکرد

۱. گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد

۲. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد

\*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: beigi.habib@gmail.com

## مقدمه

محدوده  $h_0 > 20$  - سانتی متر مورد استفاده قرار می‌گیرند (۱۱ و ۱۳). نشان داده است که هدایت آبی اشباع اندازه‌گیری شده به روش نفوذسنج مکشی برای خاک‌های اتی‌سول شهرکرد مناسب است (۹).

به‌منظور گریز از مشکلات اندازه‌گیری صحرایی (مانند هزینه و وقت، محدودیت در تعداد اندازه‌گیری) هدایت آبی اشباع خاک را می‌توان برآورد کرد (۴، ۱۲ و ۲۹) اگر چه برآورد هدایت آبی اشباع ممکن است خطای بیشتری داشته باشد. یکی از اساسی‌ترین متغیرها برای برآورد هدایت آبی اشباع ( $K_s$ ) تخلخل ( $f$ ) است که معمولاً به شکل یک رابطه توانی ( $K_s = m.f^n$ ) در توسعه روابط جدید به‌کار رفته است (۱۲). راولز و همکاران (۳۰) بعد فرکتال ذرات جامد خاک را جایگزین مقدار  $n$  در رابطه توانی قبلی نمودند. بنابراین رابطه راولز-همکاران هدایت آبی اشباع خاک را به تخلخل (اثر ساختمان) و بعد فرکتال بافت (اثر بافت) مرتبط می‌سازد. طبق رابطه راولز-همکاران، هدایت آبی اشباع خاک تحت تأثیر تخلخل، بعد فرکتال و مکش در نقطه ورود هوا است. اگرچه بعد فرکتال ذرات خاک تحت تأثیر کاربرد پساب قرار نمی‌گیرد، ولی کاربرد پساب ممکن است، با اثر بر تخلخل، هدایت آبی اشباع خاک را تغییر دهد. اگرچه تابع انتقالی راولز-همکاران همیشه نتایج قابل قبولی تولید نمی‌کند (۳۱) اما کاربردی بودن این رابطه در بازه نسبتاً وسیعی از خاک‌های با بافت متفاوت تأیید گردیده است (۱۹).

بعد فرکتال بافت خاک را می‌توان با استفاده از روابط متفاوتی محاسبه نمود (۶). بعد فرکتال خاک یکی از ویژگی‌های مستخرج از بافت خاک است که در بازه  $0-3$  قرار می‌گیرد (۱۷ و ۱۸). نتایج مطالعات حاکی از آن است که بعد فرکتالی توزیع اندازه ذرات خاک ابزار مناسبی برای برآورد رابطه بافت خاک با ویژگی‌های مرتبط با آن از جمله هدایت آبی است (۱۹). برای تعیین بعد فرکتال بافت خاک باید اساساً، داده‌های منحنی جرم-زمان (نتایج هیدرومتری) یا جرم-قطر (منحنی دانه‌بندی خاک) در دست باشد. با برازش منحنی به دو روش خطی و

هدایت آبی اشباع خاک نقش تعیین‌کننده‌ای در انتقال آب و حرکت املاح در خاک دارد. هدایت آبی اشباع متأثر از بافت و ساختمان خاک است (۱۲)، ولی عملیات زراعی از قبیل کاربری اراضی، عملیات خاک‌ورزی و به‌ویژه کیفیت آب آبیاری نیز از طریق تأثیر بر ساختمان و درنهایت توزیع اندازه منافذ بر هدایت آبی اشباع خاک اثر می‌گذارند (۱، ۲، ۳ و ۲۰). این ویژگی معمولاً دارای تغییرپذیری مکانی شدیدی است و مقادیر آن در یک مزرعه یا دشت حتی کوچک ممکن است در یک بازه وسیع تغییر کند (۱۵، ۲۱ و ۲۶). از این‌رو، تعداد اندازه‌گیری مورد نیاز به‌ویژه در پروژه‌های اجرایی گاهی زیاد است. برای اندازه‌گیری هدایت آبی اشباع خاک می‌توان از روش‌های مختلف آزمایشگاهی و ترجیحاً صحرایی استفاده نمود (۲۷) اگر چه اندازه‌گیری هدایت آبی اشباع در شرایط مزرعه دشوار است. انتخاب روش مناسب اندازه‌گیری هدایت آبی اشباع بستگی به آزمایش، هدف و منابع قابل دسترس دارد. از روش‌های صحرایی می‌توان استوانه‌های منفرد و دوگانه، چاهک، نفوذسنج گولف و نفوذسنج مکشی را نام برد (۱۱، ۱۳ و ۲۷). اندازه‌گیری در مزرعه بر اندازه‌گیری در آزمایشگاه برتری دارد، با این حال اندازه‌گیری صحرایی زمانبر و پرهزینه بوده و ابزارهای بیشتری را می‌طلبد (۲۷). به همین دلیل تعداد اندازه‌گیری صحرایی معمولاً محدود می‌شود.

اخیراً روش‌های جدیدتری برای اندازه‌گیری صحرایی هدایت آبی اشباع ابداع شده‌اند که هزینه، حجم آب لازم و زمان اندازه‌گیری را کاهش داده و موجب کمترین دست‌خوردگی خاک می‌شوند. اندازه‌گیری با نفوذسنج مکشی تحت بار ثابت یکی از این روش‌ها است که علاوه بر ویژگی‌های فوق به دلیل ایجاد جریان شبه پایدار نسبتاً سریع در اکثر خاک‌ها و به‌ویژه خاک‌های سنگین بافت روش مناسبی است (۱۱ و ۱۳). انواع نفوذسنج‌های مکشی از یک صفحه متخلخل گرد سرامیکی، تور نایلونی یا مواد مشابه، یک منبع آب و یک لوله حباب ساخته شده‌اند و برای پتانسیل‌هایی در

شده به وسیله نفوذ سنج مکشی و (ج) تعیین مناسب ترین روش تعیین بعد فرکتال بافت خاک برای کاربرد در تابع انتقالی راولز- همکاران براساس هیدرومتری در خاک های بخشی از دشت شهرکرد (ناحیه طاقانک) است.

### مواد و روش ها

ناحیه طاقانک در بخش جنوبی دشت شهرکرد واقع و دارای میانگین درجه حرارت و بارش سالانه به ترتیب ۱۱/۵ درجه سلسیوس و ۲۵۰ میلی متر بوده و در ارتفاع ۲۰۳۰ متری از سطح دریای آزاد قرار دارد. بافت خاک ناحیه مانند دشت شهرکرد و همه استان چهارمحال، سنگین یا نسبتاً سنگین بوده و در نتیجه هدایت آبی خاک کم تا نسبتاً کم است. برای بررسی پیامدهای دراز مدت آبیاری با پساب بر هدایت آبی اشباع خاک، سه مزرعه هر یک به مساحت تقریبی دو هکتار در منطقه طاقانک در ۴۰ کیلومتری جنوب شهرکرد انتخاب شدند. این سه مزرعه نزدیک یکدیگر واقع شده (شکل ۱) و از لحاظ بافت خاک و شیوه کشت مشابه ولی از لحاظ تاریخچه آبیاری با پساب متفاوت هستند: مزرعه اول فقط با آب چاه آبیاری شده در حالی که مزرعه دوم با پساب شهری به مدت ۱۳ سال و مزرعه سوم با پساب شهری به مدت ۲۳ سال آبیاری شده اند.

### نمونه برداری

از هر یک از مزارع فوق الذکر ۱۵ نمونه به طور تصادفی برداشت و پس از هواخشک شدن و کوبیدن، از الک ۲ میلی متری عبور داده شدند. توزیع اندازه ذرات، جرم ویژه حقیقی، کربن آلی، pH و قابلیت هدایت الکتریکی خاک در آنها اندازه گیری شد. با گرفتن یک نمونه دست نخورده به وسیله یک استوانه فلزی از محل برداشت هر نمونه، جرم ویژه ظاهری اندازه گیری شد. شش نمونه از پساب و شش نمونه از آب چاه مورد استفاده در مزارع برداشت شد.

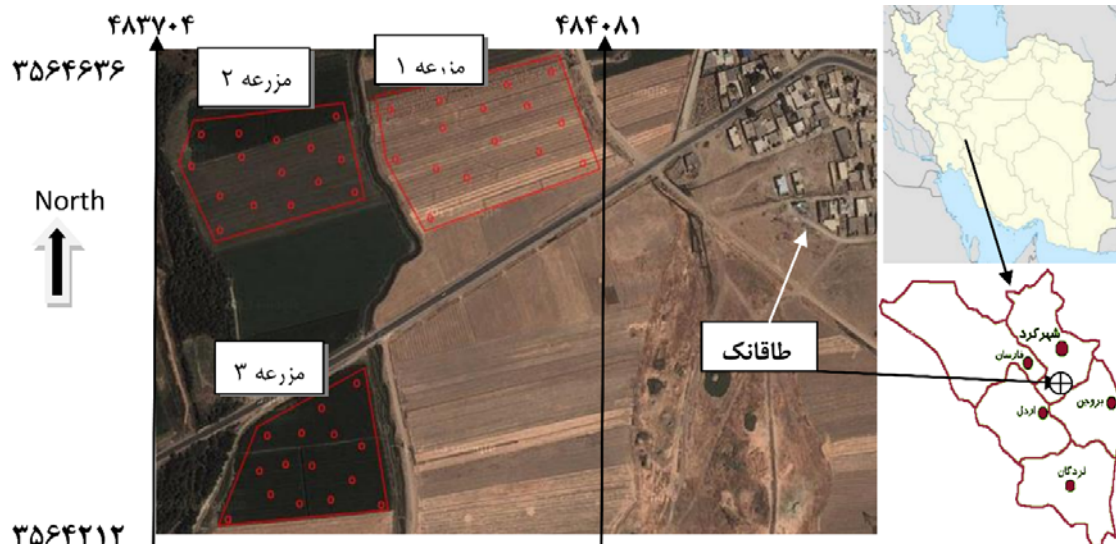
### تعیین ویژگی های عمومی خاک، آب و پساب

کربن آلی خاک به روش اکسایش تر، و pH و قابلیت هدایت

غیرخطی مقدار بعد فرکتال استخراج می شود.

کاربرد پساب به علت کمبود منابع آب برای آبیاری و نیز دفع پساب در ایران و خارج رایج است (۱، ۱۶ و ۲۵). بسیاری از پژوهش ها حاکی از آن است که تغییر ویژگی های هیدرولیکی خاک از جمله هدایت آبی اشباع خاک تحت تأثیر مدت زمان آبیاری با پساب، غلظت و ویژگی های پساب قرار می گیرد (۱، ۳، ۵، ۲۰ و ۲۵). هدایت آبی اشباع تحت تأثیر کاربرد پساب در مواردی افزایش (۳ و ۱۳) و در مواردی کاهش یافته است (۲۰ و ۳۳). از جمله این ویژگی های مهم غلظت ماده آلی، غلظت نسبی سدیم، شوری و بار معلق است. انتظار می رود ماده آلی و شوری بیشتر با بهبود ساخت خاک و افزایش تخلخل هدایت آبی را در خاک های سنگین بافت افزایش دهد (۱ و ۲۴) و برعکس، بار معلق و سدیم زیاد با انسداد مسیرهای عبور و سدیم بیشتر پساب با تخریب ساخت خاک هدایت آبی را کاهش دهد (۱۳ و ۳۳). شاید علت نتیجه گیری های بعضاً متضاد از کاربرد پساب بر هدایت آبی خاک نحوه تعامل و برهمکنش این ویژگی های متغیر و متعارض در محیط خاک باشد.

تاکنون اثرات دراز مدت آبیاری با پساب شهری بر هدایت آبی اشباع خاک در منطقه طاقانک، شهرکرد مورد بررسی قرار نگرفته است ولی گزارش شده است که کاربرد پساب تخلخل خاک را در کرت های آزمایشی در محوطه تصفیه خانه شهرکرد کاهش داده است (۸). با توجه به ویژگی های مثبت تر (بار معلق کمتر و ماده آلی بیشتر) یا منفی تر (نسبت جذب سدیم بیشتر) پساب شهری شهرکرد در مقایسه با آب زیرزمینی منطقه، معلوم نیست در نهایت کاربرد پساب شهری تصفیه شده شهرکرد چه تأثیری بر هدایت آبی اشباع داشته باشد. علاوه بر این، ارزیابی کارایی مدل راولز- همکاران برای برآورد این ویژگی، به منظور صرفه جویی در وقت و هزینه، مفید است. هدف از پژوهش حاضر (الف) بررسی اثر مدت زمان کاربرد پساب شهری تصفیه شده بر هدایت آبی اشباع خاک؛ (ب) مقایسه برآورد هدایت آبی اشباع خاک به روش راولز- همکاران با مقادیر اندازه گیری



شکل ۱. موقعیت طاقانک، کروکی مزارع سه گانه و نقاط نمونه برداری

مساوی، میزان افت سطح آب برابر باشد (۱۳). همین مراحل در اندازه گیری های دیگر تکرار شد. سپس با استفاده از روابط زیر هدایت آبی خاک ( $K_s$ ) به دست آمد:

$$\alpha_{x,y} = \ln(q_x / q_y) / (\psi_x - \psi_y) \quad (1)$$

$$K_s = G_d \cdot \alpha_{x,y} q_x / [\tau (1 + \alpha / 25 \alpha_{x,y} \Pi r) (q_x^p / q_y)] \quad (2)$$

که در این روابط:  $\alpha$  عکس طول درشت مویبگی است (که به ساختمان خاک وابسته است)،  $q$  شدت نفوذ شبه پایدار (افت سطح آب درون مخزن در فواصل ۳ دقیقه ای آخر)،  $\psi$  پتانسیل ماتریک، اندیس های  $x$  و  $y$  به ترتیب نمایانگر مکش های اعمال شده (۱- و ۳- سانتی متر)،  $\tau$  شعاع دیسک نفوذسنج مکشی، و

$$p = \psi_x / (\psi_x - \psi_y) \text{ است}$$

### تعیین توزیع اندازه ذرات خاک

توزیع اندازه ذرات (اجزای کوچکتر از ۲ میلی متر) هر نمونه با حذف ماده آلی توسط آب آکسیژنه ۳۷ درصد و تیمار با کالگان ۵ درصد، با استفاده از هیدرومتر ۱۵۲H در زمان های ۰/۶۷، ۱، ۲، ۵، ۱۵، ۳۰، ۶۰، ۱۸۰، ۱۴۴۰ و ۲۸۸۰ دقیقه قرائت و نسبت به دما و کلگان تصحیح شد (۲۲). داده های هیدرومتری با استفاده از جرم ویژه حقیقی نمونه ها و دما به داده های کسر جرم جمععی-

الکتریکی خاک هر دو در عصاره ۵:۱ خاک به آب تعیین شد (۲۸). در شش نمونه از پساب و آب چاه مورد استفاده در مزارع ویژگی های مرتبط مطابق منبع (۱۰) تعیین شد.

### اندازه گیری جرم ویژه ظاهری، جرم ویژه حقیقی و محاسبه تخلخل خاک

جرم ویژه ظاهری خاک درجا و با استفاده از استوانه فلزی و جرم ویژه حقیقی نمونه های خاک بدون حذف ماده آلی و با استفاده از پیکنومتر در آزمایشگاه تعیین شد (۲۲). تخلخل کل خاک با استفاده از جرم ویژه ظاهری و جرم ویژه حقیقی آن به دست آمد.

### اندازه گیری هدایت آبی اشباع با استفاده از نفوذسنج مکشی

هدایت آبی اشباع خاک در ۱۰ نقطه از هر مزرعه تعیین شد. اندازه گیری دبی ثابت خروجی در ۲ مکش ثابت ۳- سانتی متر و ۱- سانتی متر انجام شد. در هر اندازه گیری افت سطح آب درون مخزن در فواصل ۳ دقیقه ای قرائت شد. اندازه گیری اول تا زمانی ادامه یافت که در سه یا چهار فاصله زمانی متوالی و

پرهیز می شود. سپس برای محاسبه بعد فرکتال از رابطه زیر استفاده شد (۱۸):

$$\log M(r < R) / M_T = (3 - D) \cdot \log(R / R_U) \quad (6)$$

که در آن:  $M(r < R)$  جرم ذرات خاک با شعاع کمتر از  $R$ ،  $M_T$  جرم کل ذرات خاک با شعاع کمتر از  $R_U$ ،  $R_U$  بالاترین شعاع ذرات با رفتار فراکتالی،  $L$  و  $B$  ثابت،  $t$  زمان و  $D$  بعد فرکتالی ذرات است. برای محاسبه بعد فرکتال با استفاده از رابطه کرچنکو- ژانگ (۲۳) نیز از داده های جرم- قطر استفاده و از رابطه زیر استفاده شد:

$$\ln [M(r < R) / M_T] = \ln C + \left( \frac{rD^2 - 13D + 14}{D^2 - 5D + 4} + 1 \right) \cdot \ln R \quad (7)$$

که در آن:  $M(r < R)$  جرم تجمعی ذرات خاک با شعاع کمتر از  $R$ ،  $M_T$  جرم کل ذرات خاک،  $R$  شعاع ذرات خاک،  $C$  ثابت و  $D$  بعد فرکتال است.

### برآورد هدایت آبی اشباع

هدایت آبی اشباع ( $K_s$ ) با استفاده از بعد فرکتال با تابع راولز- همکاران (۳۰) تخمین زده شد:

$$K_s = 44/1 * 10^7 (0/148/h_b)^2 (\Theta)^{1/33} / 1/86 D^{5/34} \quad (8)$$

که در آن:  $\Theta$  تخلخل کل (مترمکعب بر مترمکعب)،  $D$  بعد فرکتال بافت خاک،  $h_b$  میانگین هندسی مکش در نقطه ورود هوا است که مقدار آن برای بافت لوم سیلتی  $0/208$  متر در نظر گرفته شد (۲۶). واحد  $K_s$  برحسب میلی متر بر ساعت است.

نمونه برداری و اندازه گیری های صحرائی در تابستان و پاییز ۱۳۹۰ انجام شد. برای مقایسه های دوتایی از آزمون تی با اطمینان ۹۵ درصد و برای مقایسه اثر مدت آبیاری با پساب بر هدایت آبی از تجزیه واریانس و پس آزمون  $LSD_{\alpha=0/05}$  استفاده شد. در تجزیه واریانس، سه مزرعه به عنوان کرت آزمایشی در نظر گرفته شدند.

### نتایج و بحث

میانگین توزیع اندازه ذرات کوچکتر از ۲ میلی متر در برابر

قطر تبدیل شدند (۶). سپس منحنی دانه بندی خاک با برازش رابطه زیر به داده های جرم- قطر هر نمونه رسم شد (۱۱):

$$F(d) = \left[ 1 + \left( \frac{D_g}{d} \right)^N \right]^{-M}, \quad M = 1 - \frac{2}{N} \quad (3)$$

که در آن:  $F(d)$  کسر تجمعی ذرات (بین صفر تا ۱)،  $d$  قطر ذرات به میلی متر و  $D_g$ ،  $N$  و  $M$  ضرایب معادله است. درصد های شن، رس و سیلت هر نمونه خاک طبق تعریف وزارت کشاورزی امریکا از این منحنی استخراج شد.

### محاسبه بعد فرکتال

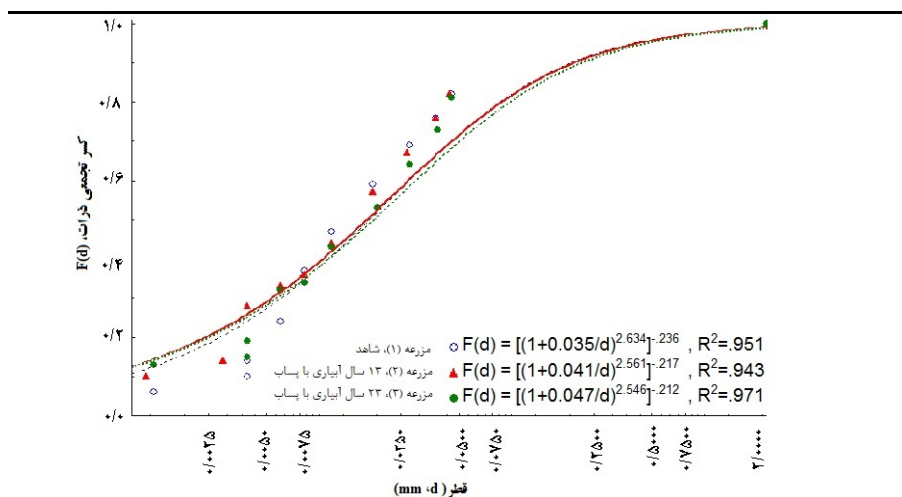
بعد فرکتال خاک با برازش خطی روابط جرم- زمان، جرم- قطر، و کرچنکو- ژانگ تعیین شد. برای این امر ابتدا داده های هیدرومتری (قرائت- زمان) به داده های کسر تجمعی جرم- زمان و جرم- قطر تبدیل شدند (۶) و سپس از رگرسیون خطی برای برازش روابط استفاده شد. برای محاسبه بعد فرکتال به روش جرم- زمان از رابطه تقریبی زیر استفاده شد (۶ و ۱۷):

$$\log [M(r < R) / M_T] = \log \left( 2 \cdot L^{((3-D)/2)} / (5-D) B^{((3-D)/2)} \cdot R_U^{3-D} \right) + (D-3) / 2 \cdot \log(t) \quad (4)$$

که در آن:  $M(r < R)$  جرم ذرات خاک با شعاع کمتر از  $R$ ،  $M_T$  جرم کل ذرات خاک با شعاع کمتر از  $R_U$ ،  $R_U$  بالاترین شعاع ذرات با رفتار فراکتالی،  $L$  و  $B$  ثابت،  $t$  زمان و  $D$  بعد فرکتالی ذرات است. برای تعیین بعد فرکتال به روش جرم- قطر ابتدا داده های هیدرومتری به داده های کسر تجمعی جرم- قطر تبدیل شد. قطر ذرات در زمان های قرائت هیدرومتر از رابطه زیر محاسبه شد:

$$d = [(30 \cdot u \cdot L) / (980 \cdot (PD - \rho_w) \cdot t)]^{2/5} \quad (5)$$

که در آن:  $d$  قطر ذره به میلی متر،  $L$  عمق موثر هیدرومتر به سانتی متر،  $u$  ویسکوزیته به سانتی پواز،  $PD$  جرم ویژه حقیقی خاک به گرم بر سانتی مترمکعب،  $\rho_w$  چگالی آب به گرم بر سانتی مترمکعب و  $t$  زمان ته نشینی به دقیقه است. مشروح محاسبات این روش در (۶) آمده است و در این جا از تکرار آن



شکل ۲. منحنی توزیع اندازه‌های ذرات خاک‌های سه مزرعه مورد بررسی. منحنی‌ها با برازش معادله  $F(d) = [1 + (Dg/d)^N]^{-m}$   $m = (1 - 2/N)$  به میانگین توزیع داده‌های بافت هر مزرعه رسم شده‌اند.

جدول ۱. میانگین درصد اجزای بافت و کلاس بافت خاک سه مزرعه مورد بررسی و مقایسه آنها

ویژگی	مزرعه ۱	مزرعه ۲	مزرعه ۳
شن (%)	۷/۸ <sup>a</sup>	۱۰/۵ <sup>a</sup>	۱۱/۹ <sup>a</sup>
سیلت (%)	۷۲/۶ <sup>a</sup>	۶۹/۱ <sup>a</sup>	۶۸/۶ <sup>a</sup>
رس (%)	۱۹/۶ <sup>a</sup>	۲۰/۹ <sup>a</sup>	۱۹/۵ <sup>a</sup>
کلاس بافت خاک	لوم سیلتی (SiL)	لوم سیلتی (SiL)	لوم سیلتی (SiL)

حروف کوچک یکسان انگلیسی در هر سطر نشان دهنده عدم معنی دار بودن تفاوت میانگین‌ها است ( $P > 0.05$ ). اندازه

نمونه در هر مزرعه: ۱۵

برازش شده است. به‌طور میانگین خاک هر مزرعه ۷۰ درصد سیلت و ۲۰ درصد رس دارد و کلاس بافت خاک هر سه مزرعه لوم سیلتی است. شباهت ویژگی‌های بافتی خاک سه مزرعه در پژوهش حاضر مهم است زیرا با قطعیت بیشتر، هر گونه تغییر در هدایت آبی خاک را می‌توان به تغییرات ساختی تحت کاربرد پساب نسبت داد. به عبارت دیگر سه مزرعه در این پژوهش حکم سه کرت بزرگ را دارند که در یک طرح آزمایشی به سه تیمار پساب نسبت داده شده‌اند. برخی از ویژگی‌های شیمیایی پساب و آب چاه مورد استفاده در جدول (۲) ارائه شده است. pH آب چاه و پساب در

میانگین قطر خاک‌های سه مزرعه در شکل (۲) ارائه و تابعی به آن برازش شده است. کیفیت برازش تابع به داده‌های هیدرومتری براساس  $R^2$  بسیار خوب بود. مشاهده می‌شود که منحنی‌های هر سه مزرعه برهم منطبق هستند که به معنی مشابه بودن توزیع ذرات خاک‌های این سه مزرعه است. بنابراین می‌توان گفت که توزیع اندازه ذرات بافت خاک این سه مزرعه مشابه است. میانگین درصد اجزای بافت خاک مزارع مورد بررسی که از منحنی هر نمونه استخراج شده در جدول (۱) ارائه شده است. درصد هر جزء بافت در سه مزرعه نیز مشابه است ( $P > 0.05$ ) که تایید کننده نتیجه‌گیری قبلی از منحنی‌ها

جدول ۲. برخی از ویژگی های شیمیایی پساب شهری تصفیه شده و آب چاه مورد استفاده در آبیاری

ویژگی	واحد	آب چاه	پساب شهری
بی اچ (pH)	-	۷/۶ <sup>a</sup>	۷/۹ <sup>b</sup>
قابلیت هدایت الکتریکی (EC)	mg/L	۰/۵ <sup>a</sup>	۰/۷ <sup>b</sup>
غلظت کل جامدات حل شده (TDS)	mg/L	۳۱۰ <sup>a</sup>	۵۵۰ <sup>b</sup>
غلظت کل جامدات معلق (TSS)	mg/L	۸۴ <sup>a</sup>	۳۲ <sup>b</sup>
اکسیژن خواهی زیستی (BOD)	mg/L	۰ <sup>a</sup>	۱۷ <sup>b</sup>
اکسیژن خواهی شیمیایی (COD)	mg/L	۰ <sup>a</sup>	۴۵ <sup>b</sup>
نسبت جذب سدیم (SAR)	(mmol/L) <sup>۱/۲</sup>	۰/۷ <sup>a</sup>	۲/۳ <sup>b</sup>

حروف متفاوت انگلیسی در هر سطر نشان دهنده معنی دار بودن تفاوت میانگین ها است ( $\alpha = 0/05$ ).

اندازه نمونه: ۶

جدول ۳. میانگین برخی از ویژگی های اندازه گیری شده در خاک های سه مزرعه مورد بررسی

ویژگی	واحد	مزرعه ۱ آبیاری با آب چاه شاهد	مزرعه ۲ آبیاری با پساب به مدت ۱۳ سال	مزرعه ۳ آبیاری با پساب به مدت ۲۳ سال
جرم ویژه حقیقی	Mg/m <sup>۳</sup>	۲/۱۱ <sup>a</sup>	۲/۱۵ <sup>a</sup>	۲/۱۱ <sup>a</sup>
جرم ویژه ظاهری	Mg/m <sup>۳</sup>	۱/۲۵ <sup>a</sup>	۰/۹۰ <sup>c</sup>	۱/۰۴ <sup>b</sup>
تخلخل	درصد	۴۲/۸ <sup>a</sup>	۵۷/۹ <sup>c</sup>	۵۰/۳ <sup>b</sup>
کربن آلی	g/kg	۱۱/۵ <sup>a</sup>	۲۳/۱ <sup>b</sup>	۲۰/۴ <sup>b</sup>
میانگین قطر خاکدانه ها	Mm	۰/۵۴ <sup>a</sup>	۰/۷۱ <sup>b</sup>	۰/۹۳ <sup>c</sup>
pH	-	۷/۹۹ <sup>a</sup>	۷/۹۱ <sup>b</sup>	۷/۸۰ <sup>c</sup>
قابلیت هدایت الکتریکی	dS/m	۰/۳۶ <sup>b</sup>	۰/۳۰ <sup>b</sup>	۰/۲۳ <sup>a</sup>

حروف متفاوت انگلیسی در هر سطر نشان دهنده معنی دار بودن تفاوت میانگین ها است ( $\alpha = 0/05$ ). اندازه نمونه در هر مزرعه: ۱۵

ساخت و هدایت آبی خاک بگذارد. کل جامدات معلق (TSS) آب چاه سه برابر بیشتر از پساب است و این ویژگی معمولاً تأثیر کاهنده ای بر هدایت آبی اشباع خاک سطحی به ویژه در بافت های غیرشنی دارد (۲۶). نشان داده شده است که بین کاهش هدایت آبی اشباع و مقدار کل جامدات معلق رابطه مستقیمی وجود دارد (۲۶). بنابر آن چه گفته شد بعضی ویژگی های پساب شهری شهرکرد ممکن است در جهت افزایش و بعضی در جهت کاهش هدایت آبی خاک عمل کنند. پس تنها اندازه گیری هدایت آبی اشباع خاک برآیند اثرات مثبت و منفی پساب بر این ویژگی را روشن خواهد ساخت. به منظور ارزیابی چگونگی تأثیر پساب بر افزایش هدایت آبی خاک میانگین ویژگی های اندازه گیری شده در سه مزرعه مورد بررسی در جدول ۳ ارائه شده است. جرم

محدوده مجاز برای آبیاری است (۱۶). پساب شورتر (دارای EC و TDS بیشتر) از آب چاه بوده و برخلاف آب چاه حاوی مقداری ماده آلی است (BOD و COD آب چاه صفر ولی از آن پساب بزرگتر از صفر است)، پس پساب ممکن است با افزودن ماده آلی به خاک و بهبود شاخص های ساختی خاک هدایت آبی خاک را افزایش دهد. از طرف دیگر، نسبت جذب سدیم (SAR) پساب سه برابر بیشتر از آب چاه است (جدول ۲) که انتظار می رود به خاطر محتوای بیشتر سدیم در مقایسه با کلسیم و منیزیم در دراز مدت تأثیر کاهنده ای بر هدایت آبی اشباع خاک داشته باشد (۲۰). شوری معمولاً ساخت خاک را بهبود می بخشد ولی چون شوری پساب عمدتاً ناشی از غلظت بیشتر سدیم آن است انتظار نمی رود کاربرد پساب از ناحیه شوری آن اثر مثبتی بر

جدول ۳. میانگین برخی از ویژگی‌های اندازه‌گیری شده در خاک‌های سه مزرعه مورد بررسی

مزرعه ۳	مزرعه ۲	مزرعه ۱	واحد	ویژگی
آبیاری با پساب به مدت ۲۳ سال	آبیاری با پساب به مدت ۱۳ سال	آبیاری با آب چاه شاهد		
۲/۱۱ <sup>a</sup>	۲/۱۵ <sup>a</sup>	۲/۱۱ <sup>a</sup>	Mg/m <sup>۳</sup>	جرم ویژه حقیقی
۱/۰۴ <sup>b</sup>	۰/۹۰ <sup>c</sup>	۱/۲۵ <sup>a</sup>	Mg/m <sup>۳</sup>	جرم ویژه ظاهری
۵۰/۳ <sup>b</sup>	۵۷/۹ <sup>c</sup>	۴۲/۸ <sup>a</sup>	درصد	تخلخل
۲۰/۴ <sup>b</sup>	۲۳/۱ <sup>b</sup>	۱۱/۵ <sup>a</sup>	g/kg	کربن آلی
۰/۹۳ <sup>c</sup>	۰/۷۱ <sup>b</sup>	۰/۵۴ <sup>a</sup>	Mm	میانگین قطر خاکدانه‌ها
۷/۸۰ <sup>c</sup>	۷/۹۱ <sup>b</sup>	۷/۹۹ <sup>a</sup>	-	pH
۰/۲۳ <sup>a</sup>	۰/۳۰ <sup>b</sup>	۰/۳۶ <sup>b</sup>	dS/m	قابلیت هدایت الکتریکی

حروف متفاوت انگلیسی در هر سطر نشان‌دهنده معنی‌دار بودن تفاوت میانگین‌ها است ( $\alpha = 0/05$ ). اندازه نمونه در هر مزرعه: ۱۵

کاربرد پساب است (جدول ۳،  $P < 0/05$ ). این نتیجه با گزارش محققین مختلف در مورد متخلخل و اسفنجی شدن خاک‌های آبیاری شده با پساب سازگار است (۵). پس، اثر مثبت پساب بر هدایت آبی اشباع خاک از طریق بهبود ویژگی‌های ساختی خاک (استحکام و افزایش قطر خاکدانه‌ها، کاهش جرم ویژه ظاهری و افزایش تخلخل) بوده است.

آبیاری با پساب موجب یک روند کاهش pH و قابلیت هدایت الکتریکی خاک شده است ( $P < 0/05$ ) هرچند که pH و هدایت الکتریکی پساب بیشتر از آب چاه بوده است (جدول ۲؛  $p < 0/05$ ). کاهش هدایت الکتریکی خاک با کاربرد پساب قبلاً هم گزارش شده است (۳). علت کاهش شوری خاک در این مورد احتمالاً مصرف حجم بیشتری از پساب در مقایسه با آب چاه برای آبیاری است. علت روند کاهش pH خاک را می‌توان به افزایش ماده آلی خاک و اکسایش این مواد در دراز مدت نسبت داد (۱). کاهش شوری خاک در مزارع ۲ و ۳ حاکی از عدم سهم این عامل بر بهبود ساخت خاک و در نتیجه هدایت آبی آن است.

میانگین مقادیر بعد فرکتال تعیین شده در سه مزرعه مورد بررسی به سه روش کرچنکو-ژانگ، جرم-زمان و جرم-قطر در جدول (۴) آورده شده است. در هر روش، میانگین بعد فرکتال خاک سه مزرعه مشابه است ( $P > 0/05$ ) و با توجه به شکل (۲) چنین نتیجه‌ای دور از انتظار نیست. از آنجایی که در

ویژه حقیقی خاک سه مزرعه همانند بافت آنها مشابه است (جدول ۳،  $P > 0/05$ ). تشابه این ویژگی حاکی از یکسانی کانی‌های اولیه و ثانویه خاک سه مزرعه است (۲۴) که با توجه به مجاورت مزارع و عدم وجود پستی و بلندی یا عوارض فیزیوگرافی دیگر در ناحیه (شکل ۱) قابل انتظار است. عموماً مانند بافت، جرم ویژه حقیقی خاک در مدت زمان طولانی هم نیز نسبتاً ثابت می‌ماند (۲۴). نشان داده شده است که جرم ویژه حقیقی خاک مورد آزمایش قبل و بعد از آبیاری با پساب ثابت مانده است (۷). برخلاف جرم ویژه حقیقی، آبیاری دراز مدت با پساب شهری موجب افزایش میانگین قطر خاکدانه‌ها (بهبود ساختمان خاک)، و کاهش جرم ویژه ظاهری گردیده است (جدول ۳،  $P < 0/05$ ).

آبیاری با این پساب شهری کربن آلی خاک را حدود دو برابر کرده است (جدول ۳،  $P < 0/05$ ) زیرا این پساب برخلاف آب تازه حاوی مقداری کربن آلی است (اکسیژن‌خواهی بزرگتر از صفر پساب در جدول ۲ را ببینید). مصرف پساب در کشاورزی می‌تواند به دلیل افزایش ماده آلی و تشدید فعالیت میکروبی جرم ویژه ظاهری خاک را کاهش و پایداری خاکدانه‌ها را افزایش دهد (۵). کاهش جرم ویژه ظاهری خاک را پس از ۹ سال آبیاری با پساب نیز گزارش شده است (۵). عدم تغییر جرم ویژه حقیقی و کاهش جرم ویژه ظاهری به معنی افزایش ۷ الی ۱۵ درصدی تخلخل خاک تحت تأثیر



جدول ۴. میانگین هاس بعد فرکتال بافت خاک به سه روش کرچنکو-ژانگ، جرم-زمان و جرم-قطر

میانگین سه مزرعه	مزرعه ۳ آبیاری با پساب به مدت ۲۳ سال	مزرعه ۲ آبیاری با پساب به مدت ۱۳ سال	مزرعه ۱ آبیاری با آب چاه-شاهد	روش
۲/۴۵ A	۲/۴۴ <sup>a</sup>	۲/۴۷ <sup>a</sup>	۲/۵۱ <sup>a</sup>	جرم-زمان
۲/۸۲ B	۲/۸۲ <sup>a</sup>	۲/۸۲ <sup>a</sup>	۲/۸۱ <sup>a</sup>	جرم-قطر
۲/۷۹ B	۲/۸۱ <sup>a</sup>	۲/۷۹ <sup>a</sup>	۲/۷۷ <sup>a</sup>	کرچنکو-ژانگ (جرم-قطر)

حروف کوچک مشابه انگلیسی در هر سطر نشان دهنده عدم وجود تفاوت است ( $P > 0/05$ ) و حروف بزرگ متفاوت انگلیسی در ستون مسانگین خلاصه آماری نشان دهنده تفاوت در بین روش های تعیین بعد فرکتال است ( $P < 0/05$ ). اندازه نمونه در هر مزرعه: ۱۵

خواهد بود. در مزرعه ۱ (مرجع یا شاهد) مقدار هدایت آبی اشباع خاک بین ۴ تا ۱۰ میلی متر بر ساعت با میانگین ۷ میلی متر بر ساعت اندازه گیری شده است که بسیار به میانگین جدول رزتا نزدیک است (۳۲).

اندازه گیری با نفوذسنج مکشی هم نشان داد که کاربرد پساب هدایت آبی اشباع خاک را افزایش داده است ( $P < 0/05$ ، جدول ۵). کاربرد پساب به مدت ۱۳ سال هدایت آبی اشباع خاک را سه برابر از ۷ میلی متر بر ساعت به ۲۱ میلی متر بر ساعت افزایش داده است ولی با گذشت بیشتر زمان کاربرد پساب هدایت آبی اشباع دیگر افزایش نیافته است. این افزایش را می توان به افزودن ماده آلی به خاک (جدول ۳) از طریق پساب ( $P < 0/05$ ) و بهبود ویژگی های ساختی خاک (افزایش قطر خاکدانه ها و افزایش تخلخل) (جدول ۳) نسبت داد. گزارش شده است آبیاری با پساب به مدت ۲۵ سال منجر به افزایش ۳۰ درصدی هدایت آبی اشباع خاک نسبت به آب چاه شده (۱۴) و پساب خانگی به عنوان یک ماده اصلاحی موجب تغییر خواص فیزیکی خاک و موجب افزایش هدایت آبی اشباع خاک شده است (۳). در پژوهش حاضر، آبیاری با پساب موجب افزایش سه برابری هدایت آبی اشباع شده است ( $P < 0/05$ ، جدول ۵). در حالی که برخی از پژوهشگران گزارش کرده اند که آبیاری با پساب باعث کاهش هدایت آبی اشباع خاک شده است. از جمله علل ذکر شده برای کاهش هدایت آبی اشباع خاک به بسته شدن

هر روش تفاوت معنی داری بین بعد فرکتال در سه مزرعه مشاهده نمی شود، میانگین توام بعد فرکتال بافت خاک سه مزرعه با استفاده از سه روش نیز در جدول ۴ داده شده است. در عین حال، روش تعیین بعد فرکتال بر مقدار آن موثر است (جدول ۴،  $P < 0/05$ ). در هر مزرعه، روش کرچنکو-ژانگ و روش جرم-قطر مقدار بعد فرکتال را بیشتر و روش جرم-زمان مقدار بعد فرکتال ذرات جامد را کمتر به دست می دهند (جدول ۴). مقدار بعد فرکتال در این دو روش حدود ۰/۳۴ با یکدیگر اختلاف دارند. دامنه مقادیر محاسبه شده بعد فرکتال در سه روش در محدوده (۲/۴۴-۲/۹۳) قرار دارد. این نتیجه نه تنها با نظریه فرکتال در علوم خاک سازگار است بلکه با یافته های تجربی (۶، ۱۷ و ۱۸) نیز مطابقت دارد.

آنچه در پژوهش حاضر مهم است تشابه ویژگی های بافتی (جرم ویژه حقیقی، بافت، توزیع اندازه ذرات و بعد فرکتال) و تفاوت تخلخل در سه مزرعه است که انتظار می رود اثر کاربرد پساب بر هدایت آبی اشباع خاک را بهتر آشکار سازد (۱۲) و (۳۰). در جدول (۵)، کمینه، بیشینه و میانگین مقادیر اندازه گیری شده هدایت آبی اشباع خاک سه مزرعه مقایسه شده است. هدایت آبی اشباع خاک مزارع از ۷ تا ۲۲ میلی متر بر ساعت تغییر می کند. هدایت آبی متوسط یک خاک لوم سیلتی طبق جدول نرم افزار رزتا ۷/۶ میلی متر بر ساعت با انحراف معیار ۲/۳ میلی متر بر ساعت است (۳۲). به عبارت دیگر در ۶۸٪ موارد هدایت آبی یک خاک لوم سیلتی بین ۵ تا ۱۰ میلی متر بر ساعت

جدول ۵. خلاصه آماری برآورد هدایت آبی اشباع (میلی متر بر ساعت) به روش راولز- همکاران (۲۹) و مقایسه آن با مقادیر اندازه گیری شده به روش نفوذسنج مکشی در سه مزرعه مورد بررسی

مزرعه ۱			مزرعه ۲			مزرعه ۳		
آبیاری با آب چاه- شاهد			آبیاری با پساب به مدت ۱۳ سال			آبیاری با پساب به مدت ۲۳ سال		
کمیته	میانگین	بیشینه	کمیته	میانگین	بیشینه	کمیته	میانگین	بیشینه
اندازه گیری با:								
۴	aA	۷	۱۰	۱۴	bA	۲۲	۳۱	۳۷
برآورد با بعد فرکتال حاصل از روش های:								
جرم- زمان	۲۲	aB	۴۷	۱۴۴	۳۰	aB	۱۰۶	۱۵۴
جرم- قطر	۹	aA	۱۰	۱۹	۱۷	bA	۲۴	۴۰
کرچنکو-ژانگ (جرم- قطر)	۷	aA	۱۱	۲۰	۱۸	bA	۲۵	۳۱

حروف انگلیسی کوچک در هر سطر نشان دهنده تفاوت معنی دار آماری میانگین هدایت آبی در سه مزرعه و حروف بزرگ انگلیسی بزرگ در هر ستون نشان دهنده تفاوت برآورد میانگین هدایت آبی در هر روش تخمین و در مقایسه با اندازه گیری در هر مزرعه است ( $p < 0/05$ ). اندازه نمونه اندازه گیری در هر مزرعه: ۱۰. اندازه ی نمونه برآورد در هر مزرعه: ۱۵

طبیعی است که هدایت آبی اشباع در روش های جرم- قطر بزرگتر از روش جرم- زمان باشد. در مقابل، برآورد هدایت آبی اشباع با استفاده از بعد فرکتال حاصل از روش کرچنکو- ژانگ و روش جرم- قطر نتایج نزدیکتری به روش نفوذسنج مکشی نشان می دهد (جدول ۴)، به طوری که برآورد به این دو روش در هر مزرعه، تفاوت معنی داری با مقادیر نظیر اندازه گیری شده ندارد ( $P > 0/05$ ). علاوه بر این، برآورد تابع راولز- همکاران که در آن از بعد فرکتال حاصل از این دو روش استفاده می شود تفاوت ناشی از کاربرد پساب را در سه مزرعه منعکس می سازد. با آن که ویژگی های بافتی خاک در هر مزرعه در دامنه نسبتاً باریکی تغییر می کنند (جدول های ۱، ۳ و ۴) با این حال مقادیر کمیته و بیشینه اندازه گیری و برآورد هدایت آبی اشباع در هر مزرعه در حدود ۲ تا ۴ برابر تفاوت دارند. این مقدار تغییرات برای هدایت آبی اشباع حتی در یک مزرعه کوچک چند هکتاری دور از انتظار نیست (۱۵ و ۲۶) و احتمالاً بیشتر این تغییرات ناشی از تغییرات ویژگی های ساختی خاک در یک

منافذ بین خاکدانه ای با مواد معلق آلی و معدنی از قبیل رس های کلوئیدی (۲۶) و تخریب ساختمان خاک به خاطر زیاد بود سدیم (۲۰) اشاره شده است. با توجه به جدول ۲، مقدار کل جامدات معلق موجود در پساب شهری شهرکرد کمتر از آب چاه و کمتر از ۴۰ میلی گرم بر لیتر بوده (۲۶) و بنابراین انتظار هم نمی رفت که جامدات معلق موجود موجب کاهش هدایت آبی اشباع خاک شود (۲۶).

خلاصه آماری برآورد هدایت آبی اشباع خاک سه مزرعه که با تابع انتقالی راولز- همکاران (رابطه ۸) محاسبه شده است در جدول ۵ آورده و با مقادیر اندازه گیری شده نفوذسنج مکشی مقایسه شده است. برآورد هدایت آبی اشباع با استفاده از بعد فرکتالی به روش جرم- زمان بسیار بیشتر از مقدار اندازه گیری شده است ( $P < 0/05$ ) و ظاهراً به نتایج غیر واقعی منجر شده است. هدایت آبی اشباع با بعد فرکتال خاک نسبت عکس دارد (رابطه ۸). با توجه به این که مقدار بعد فرکتال در روش جرم- زمان کوچکتر از روش های جرم- قطر است (جدول ۴) بنابراین

(جدول ۲) بنابراین علت اصلی تغییرات فیزیکی افزایش کربن آلی خاک از گذر کاربرد پساب بوده است. نتایج نشان می‌دهد که (الف) سیزده سال آبیاری با پساب شهری شهرکرد هدایت آبی اشباع خاک‌های ناحیه طاقانک را سه برابر افزایش داده است؛ ولی احتمالاً، (ب) آبیاری طولانی‌تر با این پساب هدایت آبی اشباع را از این حد فراتر نخواهد برد؛ علاوه بر این (ج) در این مورد، مدل راولز- همکاران توانست برآورد هدایت آبی اشباع خاک را در منطقه مورد بررسی با موفقیت انجام دهد به شرطی که بعد فرکتال مورد استفاده در آن به روش‌های قطر-جرم و رابطه کرچنکو- ژانگ به دست آید. بنابراین روش تعیین بعد فرکتال تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر برآورد هدایت آبی اشباع از طریق تابع انتقالی راولز- همکاران خواهد داشت و در نهایت (د) در این مورد، تابع انتقالی راولز- همکاران توانست تأثیر کاربرد دراز مدت پساب بر هدایت آبی اشباع خاک را منعکس سازد. ارزیابی بیشتر تابع انتقالی راولز- همکاران در خاک‌های دیگر و در شرایط متفاوت بافت و ماده آلی توصیه می‌شود. علی‌رغم اثر مثبت پساب بر هدایت آبی و دیگر شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک، نباید خسارات بهداشتی آن به خاک و محصولات زراعی را نادیده گرفت یا توجیه کرد. یادآوری می‌شود که این مطالعه مصرف پساب ترویج نمی‌کند و اثرات منفی کاربرد پساب در این دشت بعداً منتشر خواهد شد.

مزرعه باشد (۲۱). در عین حال، مقادیر نسبت بیشینه به کمینه هدایت آبی اشباع خاک هر سه مزرعه مشابه است (جدول ۵) و تغییرات برآوردها در هر مزرعه نیز روند مشابهی نشان می‌دهد. در تابع انتقالی مورد بحث، اثر کاربرد پساب، به طور بالقوه، از طریق دو ورودی تابع یعنی تخلخل و نقطه مکش ورود هوا برای برآورد به کار می‌رود. کاربرد پساب با تغییر ماده آلی خاک ممکن است این دو مقدار را تحت تأثیر قرار دهد (۲ و ۵). نکته مثبت در پژوهش حاضر این است که مقدار ورودی سوم تابع (بعد فرکتال) در سه مزرعه مشابه بود و از آنجایی که مقدار نقطه مکش با توجه به بافت از منابع استخراج و یکسان در نظر گرفته شد از اینرو، بررسی بیشتر کارایی این تابع تحت بازه‌ای از تخلخل و نقطه مکش ورود هوا می‌تواند هدف پژوهش‌های جدید باشد.

### نتیجه گیری

کاربرد پساب شهری تصفیه شده منجر به تغییرات فیزیکی مثبتی در خاک لوم- سیلتی مزارع شده است که از جمله آنها می‌توان به افزایش قطر خاکدانه، کاهش جرم ویژه ظاهری و افزایش تخلخل خاک اشاره کرد. به نظر می‌رسد برآیند این تغییرات افزایش هدایت آبی این خاک نسبتاً سنگین بافت است. از آن جایی که این تغییرات همراه با کاهش شوری خاک بوده است

### منابع مورد استفاده

- ۱- بیگی، ح و گ. بنی طالبی. ۱۳۹۲. اثر رژیم‌های کاربرد دراز مدت پساب شهری بر شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک، مطالعه موردی: مزارع طاقانک شهرکرد. مجله آب و خاک مشهد ۲۷(۵): ۱۰۵۶-۱۰۴۶.
- ۲- بهمنی، م. ۱۳۹۱. اثرات دراز مدت آبیاری با پساب شهری بر برخی از ویژگی‌های خاک در منطقه شهرکرد. پایان‌نامه کارشناسی ارشد گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.
- ۳- حسن اقلی، ع، ع. لیاقت و م. میراب زاده. ۱۳۸۴. بررسی چگونگی تغییرات هدایت هیدرولیکی اشباع خاک در نتیجه اجرای عملیات آبیاری با فاضلاب خانگی و پساب تصفیه شده آن. مجله علمی پژوهشی علوم کشاورزی ۱۱(۴): ۱۰۹-۹۹.
- ۴- رسول‌زاده، ع، س. رضوی و م. ر. نیشابوری. ۱۳۹۱. ارزیابی دقت روش‌های برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع برای خاک‌های مختلف. مجله پژوهش آب در کشاورزی ۲۶(۳): ۳۱۶-۳۰۳.
- ۵- روحانی، ف، ر. مهدوی و م. رضایی. ۱۳۸۴. اثر آبیاری با پساب بر برخی خواص فیزیکی و شیمیایی. مجله آب و فاضلاب

۱۶(۱): ۲۹-۲۳.

- ۶- سرشوق، م. ۱۳۸۸. اثر جهت و موقعیت شیب بر تعدادی از ویژگی‌های مورفولوژی، فیزیکی، شیمیایی و کانی‌شناسی خاک‌های منطقه چلگرد استان چهارمحال. پایان‌نامه کارشناسی ارشد خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.
- ۷- طاهری‌سودجانی، ه. ۱۳۹۱. بررسی تأثیر استفاده از پساب و ذرات میکرو زئولیت بر برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک دانشگاه شهرکرد. پایان‌نامه کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.
- ۸- عالی‌نژادیان، ا. ۱۳۹۱. تعیین توابع تولید آب- عملکرد ذرت علوفه‌ای در آبیاری با پساب شهری و تأثیر آن بر برخی خصوصیات خاک. پایان‌نامه دکترای خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.
- ۹- مرادی‌بصری، ح. ۱۳۹۰. مقایسه روش‌های تک استوانه‌ای، بار افتان ساده‌سازی شده و نفوذسنج مکشی در اندازه‌گیری پارامترهای نفوذ آب به خاک‌های درز و ترک‌دار. پایان‌نامه کارشناسی ارشد خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.
- 10- American Public Health Association. 2012. Standard methods for the examination of water and wastewater. 22<sup>nd</sup> Version.
- 11- Bagarello, V., G. Provenzano and A. Sgroi. 2009. Fitting particle size distribution models to data from Burundian soils for the BEST procedure and other purposes. *J. Biosystems Eng.* 104(3): 435-441.
- 12- Chapuis, R. P. 2012. Predicting the saturated hydraulic conductivity of soils: a review. *Bull. Eng. Geol. Environ.* 71(3): 401-434.
- 13- Clothier, B. E. and I. White. 1981. Measurement of sorptivity and soil water diffusivity in the field. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45(2): 241-245.
- 14- Drechsel, P., C. h. Ascott, L. Raschid-sally, M. Redwood and A. Bahri. 2010. Wastewater irrigation and health assessing and mitigating risk in low- income countries, a primer: Earthscan with the International Development Research Centre (IDRC) and the International Water Management Institute (IWMI) in the UK and USA.
- 15- Duffera, M., J. G. White and R. Weisz. 2007. Spatial variability of Southeastern US Coastal Plain soil physical properties: Implications for site- specific management. *Geoderma* 137(3): 327-339.
- 16- FAO/WHO. 1984. List of contaminants and their maximum levels in foods. Codex Alimentarius Commission. Available at <http://www.codexalimentarius.org>. (visited on 10 November 2012).
- 17- Filgueira, R. R., Y. A. Pachepsky and L. L. Fournier. 2003. Time- mass scaling in soil texture analysis. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67(6): 1703-1706.
- 18- Filgueira, R. R., L. L. Fournier, I. C. Cecilia, P. Gelati and M. G. Garcia. 2006. Particle size distributions in soils: a critical study of the fractal model validation. *Geoderma* 134(3-4): 327-334.
- 19- Gimenez, D., E. Perfect, W. J. Rawls and Ya. Pachepsky. 1997. Fractal models for predicting soil hydraulic conductivity: a review. *Engineering Geology* 48(3-4): 161-183.
- 20- Gonçalves, R., M. V. Folegatti, T. V. Gloaguen, P. L. Libardi, C. R. Montes, Y. Lucas, C. T. S. Dias and A. J. Melfi. 2007. Hydraulic conductivity of a soil irrigated with treated sewage effluent. *Geoderma* 139(1): 241-248.
- 21- Iqbal, J., J. A. Thomasson, J. N. Jenkins, P. R. Owens and F. D. Whisler. 2005. Spatial variability analysis of soil physical properties of alluvial soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69(4): 1338-1350.
- 22- Klute, A. 1986. Methods of soil analysis, Part 1: Physical and Mineralogical Methods. 2<sup>nd</sup> edition. Soil Sci. Soc. Am. Inc. Madison, Wisconsin.
- 23- Kravchenko, A. and R. Zhang. 1998. Estimating the soil water retention from particle size distribution: a fractal approach. *Soil Sci.* 163(3): 171-179.
- 24- Lal, R. and M. K. Shukla. 2004. Principles of Soil Physics. Marcel Dekker, Inc, CRC Press.
- 25- Magesan, G. N., J. C. Williamson, G. P. Sparlig, L. A. Schipper and A. R. Llyod- Jones. 1999. Hydraulic conductivity in soils irrigated with wastewater of deferring strengths: Field and laboratory studies. *Aust. J. Soil. Res.* 37(2): 391-402.
- 26- Moosavi, A. A. and A. R. Sepaskhah. 2012. Spatial variability of physico- chemical properties and hydraulic characteristics of a gravelly calcareous soil. *Arch. of Agro. and Soil Sci.* 58(6): 631-656.
- 27- Oosterbaan R. J. and H. J. Nijland. 1994. Determining the saturated hydraulic conductivity. Chapter 12 in: H. P. Ritzema (Ed.), *Drainage Principles and Applications*. International Institute for Land Reclamation and Improvement (ILRI), Publication 16, second revised edition, 1994, Wageningen, The Netherlands. ISBN 90 70754 3 39. Downloadable from [www.waterlog.info](http://www.waterlog.info).
- 28- Page, A. L. (editor). 1982. Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties. 2<sup>nd</sup> edition. Soil Science Society of America, Inc. Madison, Wisconsin.

- 29-Rasoulzadeh, A. 2011. Estimating hydraulic conductivity using pedotransfer functions. INTECH Open Access Publisher.
- 30- Rawls, W. J., D. L. Brakensiek and S. D. Logesdon. 1993. Predicting saturated hydraulic conductivity utilizing fractal principles. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57(5): 1193-1197.
- 31-Regalado, C. M. and R. Munoz- Carpena. 2004. Estimating the saturated hydraulic conductivity in a spatially variable soil with different permeameters: a stochastic Kozeny–Carman relation. *Soil & tillage Res.* 77: 189- 202.
- 32-Schaap, M. G., Leij F. J. and M. T. van Genuchten. 2001. Rosetta: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *J. Hydrol.* 251(3-4): 163-176.
- 33-Sepaskhah, A. R. and-M. Sokoot. 2010. Effects of wastewater application on saturated hydraulic conductivity of different soil textures. *J. Plant. Nutr. Soil Sci.* 173(4): 510-516.

## The Effect of Long- Term Irrigation with Municipal Treated Wastewater on the Saturated Hydraulic Conductivity of a Silt Loam Soil and its Estimation- a Case Study

G. Banitalebi<sup>1</sup>, H. Beigi Harchegani<sup>1\*</sup> and M. Ghobadina<sup>2</sup>

(Received: Nov. 21-2012 ; Accepted: Sept. 21-2016)

### Abstract

Treated wastewater may influence soil structure, porosity and as a consequence, soil saturated hydraulic conductivity. This study aims to assess the effect of wastewater on saturated hydraulic conductivity; and to determine the suitable soil solids fractal dimension to incorporate into the pedotransfer function by Rawls et al (1993) for estimation of saturated hydraulic conductivity (Ks). Soil saturated hydraulic conductivity was measured by disc permeameter. Soil particle fractal dimension was calculated from linearized forms of mass- time, mass- diameter and mass- diameter as modified by Kravchenko- Zhang (1998) relations. Wastewater irrigation for 13 years increased the saturated hydraulic conductivity three times, from 7 mm/hour to 21 mm/hour, but longer application of wastewater did not further increase it. Rawls et al (1993) pedotransfer produced acceptable and relatively close saturated hydraulic conductivity values to that of disc permeameter when fractal dimension obtained from the linearized forms of mass- diameter and Kravchenko- Zhang relations were used. Therefore, Rawls et al (1993) pedotransfer was capable of reflecting the effect of wastewater application on soil saturated hydraulic conductivity.

**Keywords:** Disc permeameter, Fractal dimension, Measurement, Porosity, Rawls Pedotransfer function, Shahrekord Plain, Taqanak

---

1. Dept. of Soil Sci., Faculty of Agric., Shahrekord Univ., Shahrekord, Iran.

2. Dept. of Water Eng. Faculty of Agric., Shahrekord Universty, Shahrekord, Iran.

\*: Corresponding Author, Email: beigi.habib@gmail.com