تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۴۵، شماره ۱، بهار ۱۳۹۳ (ص ۱۷-۱۱)

بررسی تأثیر انتشار کربن فعال بر خصوصیات هیدرودینامیکی محیط متخلخل ماسه‌ای

مهسا جمشیدی*[۱]، پیمان دانش‌کار آراسته[۲] و عباس ستوده‌نیا[۳]

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)

۲، ۳. استادیاران دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۹/۳- تاریخ تصویب: ۱۳۹۳/۲/۶)

چکیده

استفاده از فاضلاب تصفیه‌شده در آبیاری به‌عنوان یکی از منابع آب نامتعارف به‌واسطهٔ محدودیت منابع آب در کشور در حال گسترش است. در فرایندهای تصفیه یکی از افزودنی‌های پرکاربرد، کربن فعال بوده است که به هنگام ورود به محیط متخلخل امکان ایجاد تغییر در خصوصیات هیدرولیکی خاک و تخریب آن را به‌دنبال دارد. در این پژوهش، اثر میزان کربن فعال ورودی به انحای مختلف بر خصوصیات هیدرودینامیکی خاک نوع ماسه از طریق مدل‌سازی هیدرولیکی بررسی شد. ارتباط هدایت هیدرولیکی اشباع، چگالی ظاهری و تخلخل یک خاک ماسه‌ای طی دو مرحله آزمایش شامل عبور آب از مخلوط خاک-کربن با غلظت ۱ تا ۷ درصد جرمی و عبور مخلوط آب- کربن با غلظت‌های ۰/۵ تا ۲ درصد از نمونه خاک بررسی شد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که هدایت هیدرولیکی اشباع ماسه به‌ازای غلظت خاک- کربن ۷درصد از ۰/۰۶ به ۰/۰۱۴ سانتی‌متر بر ثانیه (با حدود ۸۰درصد کاهش) و تخلخل از ۰/۴۴ به ۰/۴۲۶ کاهش یافت و چگالی ظاهری از ۱/۵ به ۱/۵۰۷ گرم بر سانتی‌مترمکعب افزایش پیدا کرد. همچنین، مشاهده شد که با عبور مخلوط آب- کربن از نمونه ماسه با غلظت ۲ درصد جرمی، هدایت هیدرولیکی و تخلخل به‌ترتیب ۹۱/۵درصد و حدود ۶درصد کاهش و چگالی ظاهری ۰/۷۱ درصد افزایش یافته است.

کلیدواژگان: مدل هیدرولیکی، هدایت هیدرولیکی.

مقدمه

ازآنجا که آب از عوامل اصلی در توسعهٔ کشاورزی است و کشور با محدودیت شدید منابع آب مواجه است، رعایت اصول توسعهٔ پایدار در مصرف آن ضروری است و باید مورد توجه قرار گیرد. براساس گزارش مؤسسهٔ بین‌المللی مدیریت منابع آب[۱] در سال ۱۹۵۰ ، تعداد ۱۲ کشور با جمعیتی حدود ۲۰ میلیون نفر با کمبود آب مواجه بوده‌اند که این رقم در سال ۱۹۹۰ به ۲۶ کشور با جمعیتی معادل ۳۰۰ میلیون نفر رسیده و پیش‌بینی می‌شود در سال ۲۰۵۰ تعداد ۶۵ کشور جهان با جمعیتی بالغ بر ۷ میلیارد نفر با کمبود شدید آب مواجه شوند که ایران را نیز شامل می شود. این بدین معنی است که حتی با بالاترین راندمان و بهره‌وری ممکن در مصرف آب، این کشورها برای تأمین نیازهای آبی خود، آب کافی در اختیار نخواهند داشت (Keshavarz and Dehghani Sanij, 2009).

از سوی دیگر، افزایش جمعیت و تمرکز آن در شهرهای بزرگ، موجب افزایش تولید فاضلاب‌های خانگی و شهری شده است. کمبود آب و افزایش نیاز به مواد غذایی منجر به استفاده از پساب‌ها در تولیدات کشاورزی در اراضی حاصل‌خیز پیرامون شهرها شده است(Bouwer, 1994) . استفاده از فاضلاب‌های شهری و خانگی در آبیاری و تولید محصولات کشاورزی، به‌عنوان منبعی سرشار از آب و عناصر مغذی مورد نیاز گیاه، از دیرباز در بسیاری از نقاط دنیا رواج داشته است. (Hassanoghli *et al*., 2002) در ایران که جزء کشورهای خشک و نیمه‌خشک جهان به حساب می‌آید، میزان مصرف آب در بخش کشاورزی بیشترین درصد را در مقایسه با سایر مصارف به خود اختصاص می‌دهد (حدود ۹۳/۵درصد) و این در شرایطی است که در بسیاری از نقاط کشور، کمبود آب و تشدید آن در اثر خشکسالی‌های اخیر به آن‌چنان وضعیت حاد و بحرانی‌ای رسیده است که برنامه‌ریزان و مدیران منابع آب را مجبور ساخته تا در برنامه‌ریزی‌های توسعهٔ منابع آبی، به کلیهٔ منابع متعارف و غیرمتعارف آب ازجمله فاضلاب‌های شهری و خانگی که بتواند به نحو مؤثر و اقتصادی در اختیار قرار گیرد، توجه کنند (Monzavi, 1993).

* نویسنده مسئول: mahsa_jamshidi67@yahoo.com

1. International Water Management Institute (IWMI)

بنا به تعریف، آب‌های نامتعارف آب‌هایی هستند که برخی از خصوصیات کیفی محدودکننده را دارند که ممکن است اثر معکوس روی خصوصیات خاک، کمّیت و کیفیت محصول، کیفیت آب‌های سطحی و زیرزمینی داشته و یا تهدیدی برای سلامت انسان یا حیوان باشند (Tanji, 1997). فاضلاب‌ها ازجمله آب‌های نامتعارفی هستند که کیفیت‌های مختلفی دارند و واکنش خاک نسبت به آبیاری با فاضلاب، بستگی کاملی به کیفیت فاضلاب مصرفی دارد. کیفیت فاضلاب نیز به نوبهٔ خود از منبع تولید آن تأثیر می‌پذیرد (Shariati, 1996).

در بهره‌برداری از فاضلاب و پساب در آبیاری محدودیت‌هایی وجود دارد که عموماً متأثر از جنبه‌های بهداشتی آن است. بنابراین، پیش پالایش و پالایش فاضلاب‌ها جزء لاینفک بهره‌برداری از این نوع آب نامتعارف در آبیاری و تولید محصولات کشاورزی است.

در تصفیهٔ فاضلاب مراحل مختلفی وجود دارد و بسته به اینکه منشاء این فاضلاب چیست، این مراحل متفاوت خواهد بود. یکی از موادی که در تصفیهٔ بسیاری از آلاینده‌ها از فاضلاب استفاده می‌شود، کربن فعال است. کربن فعال به‌دلیل مساحت گسترده، ساختار منفذی، ظرفیت جذب بالا و قابلیت فعال‌سازی مجدد سطح در این راستا به‌عنوان یک مادهٔ منحصربه‌فرد شناخته شده است و به‌دلیل چنین ویژگی‌های منحصربه‌فرد و همچنین قیمت پایین در مقایسه با جاذب‌های غیرآلی مانند زئولیت، اهمیت ویژه‌ای در صنایع مختلف دارد. از کربن فعال برای جداسازی بسیاری مواد از پساب استفاده می‌شود تا آن پساب آمادهٔ مصرف در کشاورزی شود. از آنجا که بخشی از موادی که برای تصفیه استفاده می‌شود به محیط برمی‌گردد و این بقایا عموماً اثراتی بر محیط بر جای می‌گذارند که ممکن است گاهی مخرب و ناخواسته باشد، پژوهش پیرامون این اثرات ثانویه نامطلوب به تصمیم‌گیری در خصوص چگونگی بهره‌گیری از آن‌ها کمک می‌کند. در زمینهٔ به‌کارگیری کربن فعال در فرایند تصفیه، تجربیات جهانی حاکی از اثرات متفاوت آن بر خصوصیات هیدرولیکی محیط متخلخل پذیرندهٔ آب خروجی از تصفیه‌خانه است.

Saber (1986) ضمن بررسی ویژگی‌های فیزیکی خاک‌های شنی در اراضی پیرامون شهر قاهره، نشان داد که با کاربرد فاضلاب به روش غرقابی طی ۶۰ سال، ظرفیت نگهداری آب خاک بهبود یافته است. Magesan (2011) گزارش کرد که آبیاری با فاضلاب در مدت ۴ سال برای یک خاک شنی، چگالی حقیقی و ظاهری و هدایت هیدرولیکی غیراشباع را کاهش و خلل و فرج درشت و نفوذپذیری خاک را افزایش داده است. وی بیان داشت که علت آن می‌تواند افزایش مواد آلی باشد. وی همچنین اعلام کرد که در خاک‌های شنی و آتشفشانی، خلل و فرج درشت به‌طور محسوس افزایش یافته که مرتبط با افزایش فرایندهای بیولوژیکی است. Aiello *et al.* (2007) با کاربرد فاضلاب تصفیه‌شده در مدت یک فصل رشد در مزارع گوجه‌فرنگی با خاک شنی و روش آبیاری قطره‌ای، کاهش هدایت هیدرولیکی، خلل و فرج و ظرفیت نگهداشت آب و افزایش چگالی ظاهری در لایه ۰-۳۰ سانتی‌متر خاک نسبت به مقدار اولیه را گزارش کردند.

Al-Othman (2009) در پژوهشی بر سه نوع خاک ماسه‌ای، لایه‌دار و رسی در اطراف ریاض نشان داد که خصوصیات فیزیکی این خاک‌ها در معرض استفاده درازمدت فاضلاب خانگی و شهری بدون تغییر باقی مانده است. Levy *et al.* (2011) گزارش کردند، اثرات ترکیبی شوری، سدیمی و حضور مواد آلی محلول در فاضلاب تصفیه‌شده بر هدایت هیدرولیکی خاک بسیار پیچیده است و بستگی به کیفیت فاضلاب تصفیه‌شده، خصوصیات خاک و شرایط موجود در خاک دارد. Mollahoseini (2013) در بررسی خاک‌های منطقهٔ ورامین دریافت که طی ۲۹ سال آبیاری با فاضلاب شهری خصوصیات فیزیکی خاک شامل چگالی ظاهری و هدایت هیدرولیکی اشباع به‌شدت تغییر کرده است. وی افزایش چگالی ظاهری و کاهش هدایت هیدرولیکی اشباع خاک را گزارش کرد.

Rohani Shahraki (2005) اثر مواد جامد معلق را بر هدایت هیدرولیکی سه نوع خاک مطالعه و گزارش کردند که کاهش نفوذپذیری در خاک سیلتی لوم به مراتب بیشتر از شنی و لوم شنی است. آن‌ها معتقد بودند که با یک مدیریت صحیح، مشکل نفوذپذیری خاک قابل حل است. Vagharfard (2001) در یک ستون شن، محلولی از کربن تزریق کرد وگزارش کرد بیشتر کربن (۶۹درصد کربن) در چند سانتی‌متر اول خاک باقی‌مانده و هدایت هیدرولیکی اشباع در این محدوده تا ۹۹درصد کاهش پیدا کرده است. وی همچنین اشاره کرد که حدود ۹۸درصد از کل کربن تزریق شده در ستون در ۳ سانتی‌متر اول تجمع پیدا کرده و بعد از ۶ سانتی‌متر اول هیچ کربنی در ستون پیدا نشد. Fronczyk *et al.* (2012) ضمن بررسی نحوهٔ تصفیهٔ پساب نفوذ یافته جاده‌ها در خاک از طریق پرده آب‌بند از جنس کربن فعال و مقایسه با مواد دیگر نشان دادند که کربن فعال بهترین ماده برای تصفیه بوده ولی به‌شدت منجر به کاهش هدایت هیدرولیکی اشباع خاک می‌گردد.

با توجه به آنچه ذکر شد و نیاز روزافزون به استفاده از پساب تصفیه‌شده در آبیاری به نظر می‌رسد بررسی اثر کربن فعال بر روی خصوصیات هیدرودینامیک خاک ضرورت داشته، بنابراین هدف این پژوهش بررسی نحوهٔ تأثیر انتشار این ماده در خاک و چگونگی تغییر در خصوصیات هیدرودینامیکی خاک به‌وسیلهٔ مطالعه بر مدل هیدرولیکی است.

مواد و روش‌ها

برای بررسی اثر کربن فعال روی محیط متخلخل، اندازه‌گیری پارامترهای فیزیکی خاک مانند چگالی ظاهری، تخلخل و هدایت هیدورلیکی اشباع مد نظر قرار گرفت. برای این کار از خاکی با بافت شنی و کربن فعال گرانولی دارای دانه‌بندی مشابه خاک استفاده شد (جدول۱).

جدول۱. مشخصات اولیه خاک و کربن فعال استفاده‌شده

	هدایت هیدرولیکی (متر بر ثانیه)	هدایت هیدرولیکی (سانتی‌متر بر ثانیه)	تخلخل	چگالی ظاهری (گرم بر سانتی‌مترمکعب)	چگالی حقیقی (گرم بر سانتی‌مترمکعب)
خاک	۰/۰۰۰۶	۰/۰۶۱	۰/۴۸	۱/۵	۲/۶۹
کربن	۰/۰۰۰۰۳	۰/۰۰۲۶	۰/۰۸۴	۰/۹۹	۱/۹۶

	هدایت هیدورلیکی اشباع (سانتی‌متر بر ثانیه)	تخلخل	چگالی ظاهری (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	چگالی حقیقی (گرم بر سانتی‌متر مکعب)
خاک	۰/۰۶۱۱	۰/۴۷۷	۱/۵۰۷	۲/۶۸۸
کربن	۰/۰۰۲۵۹	۰/۰۸۴۷	۰/۹۹۳	۱/۹۶۳

برای اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی به روش بار ثابت از دستگاهی شامل هشت سیلندر که به‌صورت موازی در کنار هم قرار گرفته‌اند و بار هیدرولیکی روی هر سیلندر به‌وسیلهٔ پیزومترهایی در ورودی آن‌ها اندازه‌گیری می‌شود، استفاده شد. دستگاه مزبور در گروه مهندسی آب دانشکدهٔ فنی و مهندسی دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره) طراحی و ساخته شده است. برای ثابت نگه‌داشتن بار هیدرولیکی ورودی قبل از ورود سیال به نمونه از یک پمپ و دو مسیر تخلیه استفاده شد تا با چرخش سیال در مدار، بار ورودی در مخزن دستگاه که حدوداً ۳۰ سانتی‌متر بالاتر از سیلندرها قرار داشت، ثابت نگه داشته شود. شکل۱ الف و ب دستگاه مورد نظر و سیلندر استفاده‌شده را در این آزمایش نشان می‌دهند.

الف) ب)

شکل۱. میز هیدرولیکی استفاده‌شده در آزمایش نفوذپذیری (الف) و سیلندر هدایت هیدرولیکی (ب)

در این پژوهش، آزمایش‌ها به دو گروه مستقل تقسیم شد. در بخش اول، کربن با درصدهای ۱ تا ۷ با گام یک درصد جرمی با خاک مخلوط شد و با تراکم مشخصی معادل چگالی ظاهری ۱/۵ گرم بر سانتی‌مترمکعب، سیلندرها به‌وسیلهٔ مخلوط خاک وکربن پرشد. بعد از آماده‌سازی نمونه‌ها و ثابت‌شدن بار آبی در مخزن ورودی، شیر ورودی هر کدام از نمونه‌ها باز و در فواصل زمانی مشخص میزان خروجی آب از نمونه و ارتفاع پیزومترها به‌منظور اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی اشباع قرائت شد.

برای تعیین ارتباط بین هدایت هیدرولیکی و غلظت کربن فعال از رابطهٔ زیر که توسط Vagharfard (2001) پیشنهاد شده است، استفاده گردید.

$$K = K_0.e^{-wc'} \quad \text{(رابطه ۱)}$$

در این رابطه: c'، کسر جرم، معادل جرمی از ریزذرات (کربن فعال) بر مجموع جرم خاک و ریزذرات (بی بعد)؛ K، هدایت هیدرولیکی اشباع (L/T)؛ K_0، هدایت هیدرولیکی اشباع اولیه (L/T) و w، مقدار ثابت تجربی (بی بعد) هستند. در رابطهٔ ۱:

$$c' = c.n/1000.p_b \quad \text{(رابطه ۲)}$$

که در این رابطه: c، غلظت ذرات متوقف‌شده (g/L)؛ n، تخلخل مجموع منافذ مخلوط خاک و ریزذرات (بی‌بعد)؛ ρ_b، چگالی ظاهری مخلوط خاک و ریزذرات (M/L^3) هستند.

اگر معادلهٔ۲ در معادلهٔ۱ جایگزین شود و همهٔ پارامترهای ثابت در پارامتری به نام γ تجمع یابد، رابطهٔ۳ به دست می‌آید:

$$K = K_0.e^{-\gamma.c} \quad \text{(رابطه ۳)}$$

تخلخل خاک متأثر از غلظت ذرات درون آب است. وقتی ذرات در منافذ بزرگ قرار می‌گیرد، تخلخل کاهش می‌یابد. برای اندازه‌گیری تغییرات تخلخل به‌عنوان تابعی از غلظت ریزذرات از رابطهٔ زیر استفاده می‌شود.

$$n = \frac{V_v}{V_b} \quad \text{(رابطه ۴)}$$

که در آن: V_v، حجم منافذ خاک و V_b، حجم ظاهری نمونه درون سیلندر است. در این رابطه، حجم منافذ از تفاضل حجم ظاهری از حجم ذرات جامد خاک به دست می‌آید و حجم ذرات جامد خاک از تفاضل حجم ذرات جامد کل (خاک و کربن فعال) از حجم ریزذرات کربن فعال تعیین می‌شود.

با قراردادن متغیرهای جرم و چگالی حقیقی به جای حجم در رابطهٔ ۴ خواهیم داشت:

$$n = 1 - \frac{m_s}{\rho_b.V_b} - \frac{m_f}{\rho_f.V_b} \quad \text{(رابطه ۵)}$$

که در آن: m_s، جرم خاک؛ m_f، جرم ذرات کربن فعال؛ ρ_p، چگالی حقیقی ذرات خاک و ρ_f، چگالی حقیقی کربن فعال است. رابطهٔ ۵ برای اندازه‌گیری درصد مختلفی از ریز ذرات (کربن فعال) و تخمین پارامتر μ در معادلهٔ ۶ استفاده می‌شود. رابطهٔ زیر برای شبیه‌سازی تغییرات تخلخل با غلظت ذرات متوقف شده، استفاده می‌شود.

$$n = n_0 - \mu.c \quad \text{(رابطه ۶)}$$

که در آن: n، تخلخل مجموع ذرات خاک و ریزذرات (بی‌بعد) و n_0، تخلخل اولیه ذرات خاک (بی بعد) است.

چگالی ظاهری خاک با افزایش غلظت به‌واسطهٔ توقف ذرات در منافذ خاک، افزایش می‌یابد. فرمول زیر رابطهٔ بین چگالی ظاهری و غلظت ذرات متوقف‌شده در منافذ خاک را نشان می‌دهد.

$$\rho_b = \rho_0 + \eta.c \quad \text{(رابطه ۷)}$$

که در آن: ρ_b، چگالی ظاهری ذرات خاک به همراه ریزذرات (g/cm^3)؛ ρ_0 ، چگالی ظاهری ذرات خاک (g/cm^3) و η، پارامتر ثابت (L/cm^3) است.

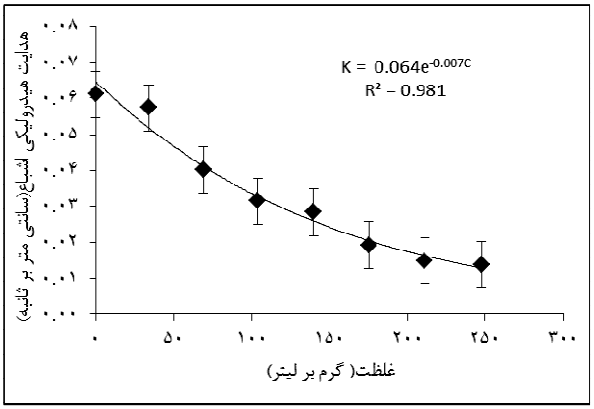
ضرایب ثابت ارائه‌شده فوق در مرحلهٔ آزمایش تعیین شده و در مرحلهٔ دوم آزمایش به کار گرفته می‌شوند.

در بخش دوم آزمایش، درصدهای ۰/۵ تا ۲ از کربن با گام ۰/۵ درصد جرمی وارد آب گردید و مخلوط آب و کربن با غلظت مورد نظر از نمونه‌ها عبور داده شد. هدایت هیدرولیکی به‌صورت مستقیم از دستگاه به دست آمد و با توجه به غلظت آب-کربن نهشته شده در هر نمونه براساس روابط فوق، مقادیر تخلخل و چگالی ظاهری به دست آمد و به دنبال آن با استفاده از رابطهٔ ۳ ارتباط بین غلظت و هدایت هیدولیکی تعیین شد.

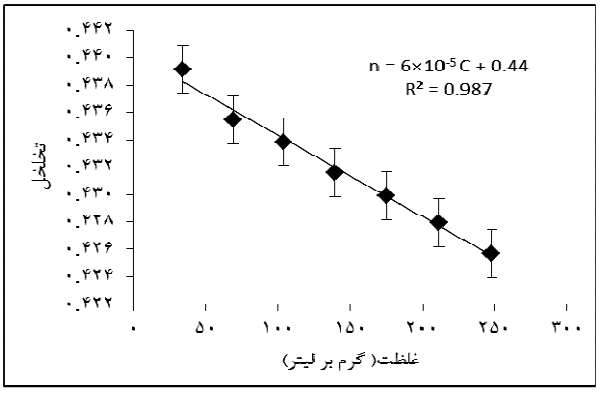
نتایج و بحث

همان‌طور که ذکر شد در بخش اول، نمونه‌ها را با درصد مشخصی از کربن با خاک مخلوط کرده و آب از میان آن عبور داده شد. نتایج به‌دست‌آمده در شکل‌های ۲ تا ۴ ارائه شده است. همین طور برای به دست آوردن ضرایب ثابت معادلات، از نرم‌افزار data fit استفاده شد. مقادیر به‌دست‌آمده برای ضرایب همراه با مقادیر بالا و پایین آن‌ها در جدول‌های ۲ تا ۴ همراه با حدود اطمینان مشخص شده است. چنانچه در شکل‌های ۲ تا ۴ ملاحظه می‌شود، هدایت هیدرولیکی با افزایش غلظت کربن فعال به‌صورت نمایی کاهش می‌یابد و تخلخل و چگالی ظاهری ماسه با افزایش غلظت کربن فعال به‌کاررفته به‌صورت خطی به‌ترتیب کاهش و افزایش می‌یابند. در شکل ۲ ملاحظه می‌شود

که نمونهٔ شاهد یعنی ماسه به‌تنهایی هدایت هیدرولیکی اشباعی معادل ۰/۰۶ سانتی‌متر در ثانیه داشت و با افزودن ذرات گرانوله کربن فعال به‌تدریج از مقدار آن کاسته شده است که در آزمایش‌های انجام‌شده به‌ترتیب میزان کاهش به‌ازای غلظت‌های ۱ تا ۷ درصد جرمی عبارت بودند از: ۶/۵، ۳۴/۴، ۴۹/۲، ۵۴/۱، ۶۸/۸، ۷۷/۰ و ۷۸/۷ درصد. چنانچه در شکل‌های ۳ و ۴ ملاحظه می‌شود با توجه به شیب خطوط (ضرایب غلظت) نرخ تغییرات تخلخل و چگالی ظاهری بسیار ناچیز است. در شکل۳ ملاحظه می‌شود که به‌ازای غلظت صفر یا شاهد تخلخل نمونه ماسه معادل ۴۴ درصد حجمی بوده که به‌ازای افزایش درصد



شکل۲. رابطهٔ بین هدایت هیدرولیکی اشباع ماسه با غلظت کربن فعال



شکل۳. رابطهٔ بین تخلخل ماسه با غلظت کربن فعال

جدول۲. مقدار ضریب ثابت معادالهٔ ۳

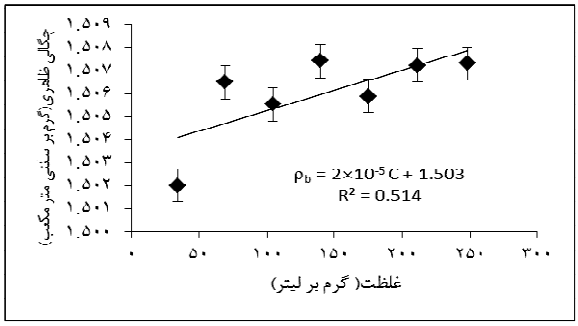
سطح اطمینان ۹۵٪			
متغیر	مقدار	حد پایین	حد بالا
δ	-6.69E-02	-2.97E-01	0.1629028

سطح اطمینان ۹۵٪			
متغیر	مقدار	حد پایین	حد بالا
δ	-۰/۰۰۷	-۰/۰۲۹	۰/۱۶۲

جدول۳. مقدار ضریب ثابت معادلهٔ ۶

سطح اطمینان ۹۵٪			
متغیر	مقدار	حد پایین	حد بالا
μ	-5.79E-05	-1.37E-04	2.14E-05

سطح اطمینان ۹۵ ٪			
متغیر	مقدار	حد پایین	حد بالا
μ	-۰/۰۰۰۶	-۰/۰۰۱۴	۰/۰۰۰۲۱



شکل۴. رابطهٔ بین چگالی ظاهری ماسه با غلظت کربن فعال

جدول۴. مقدار ضریب ثابت معادلهٔ ۷

سطح اطمینان ۹۵٪			
متغیر	مقدار	حد پایین	حد بالا
η	2.05E-05	8.52E-06	3.25E-05

سطح اطمینان ۹۵٪			
متغیر	مقدار	حد پایین	حد بالا
η	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۰۰۰۸	۰/۰۰۰۳۲

اختلاط از ۱ تا ۷ درصد جرمی این تخلخل به‌ترتیب: ۰/۲۳، ۱/۱۴، ۱/۶۰، ۱/۸۲، ۲/۲۷، ۲/۷۳ و ۳/۱۸ درصد کاهش یافته است. به همین منوال چگالی ظاهری ماسه از حدود ۱/۵ گرم در سانتی‌مترمکعب به‌ازای افزایش درصد اختلاط با کربن فعال از ۱ تا ۷ درصد جرمی به‌ترتیب به میزان: ۰/۰۷، ۰/۳۳، ۰/۲۷، ۰/۴۰، ۰/۳۳، ۰/۴۰ و ۰/۴۰ درصد افزایش یافته است.

در بخش دوم آزمایش، مقادیر ۰/۵، ۱/۰، ۱/۵ و ۲/۰ درصد جرمی از کربن وارد آب شد و مخلوط آب- کربن با غلظت‌های اشاره‌شده از نمونه خاک عبور داده شد. نتایج حاصل در جدول۵ آمده است.

ضرایب به‌دست‌آمده از این پژوهش با نتایج پژوهش vagharfard (2001) مطابقت خوبی داشت. شایان ذکر است در پژوهش وقارفرد از خاکی با دانه‌بندی متفاوت و کربن فعال پودری و سیستم پمپاژ استفاده شده بود.

جدول۵. مقادیر هدایت هیدرولیکی، تخلخل و چگالی ظاهری در غلظت‌های مختلف کربن

K(cm/s)		c(g/l)	n	ρb
۰	۰/۰۶۱۰۸۲	۰	۰/۴۷۶۸۶۷	۱/۵۰۷۵۱۶
۰/۰۰۵	۰/۰۲۱۲۰۲	۱۹۰/۵۵۶۱	۰/۴۲۸۵۶۷	۱/۵۰۶۸۱۱
۰/۰۱	۰/۰۱۴۵۹۵	۲۶۶/۱۹۱	۰/۴۲۴۰۲۹	۱/۵۰۸۳۲۴
۰/۰۱۵	۰/۰۰۹۴۰۲	۳۲۶/۱۷۴۲	۰/۴۲۰۴۲	۱/۵۰۹۵۲۲
۰/۰۲	۰/۰۰۵۲۵۲	۴۲۹/۸۷۷۲	۰/۴۱۴۲۰۷	۱/۵۱۱۵۹۸

ادامه جدول ۵

چگالی ظاهری (گرم بر سانتی‌مترمکعب)	تخلخل (بی‌بعد)	غلظت کربن در خاک (گرم بر لیتر)	هدایت هدرولیکی اشباع (سانتی‌متر بر ثانیه)	غلظت کربن در آب (بی‌بعد)
۱/۵۰۶۸	۰/۴۲۸	۱۹۰/۵۵۶	۰/۰۲۱۲	۰/۰۰۵
۱/۵۰۸۳	۰/۴۲۴	۲۶۶/۱۹۱	۰/۰۱۴۵۹	۰/۰۱۰
۱/۵۰۹۵	۰/۴۲۰۴	۳۲۶/۱۷۴	۰/۰۰۹۴	۰/۰۱۵
۱/۵۱۱۶	۰/۴۱۴	۴۲۹/۸۷۷	۰/۰۰۵۲	۰/۰۲۰

نتایج آزمایش مرحلهٔ دوم نشان داد که هدایت هیدرولیکی اشباع خاک از ۰/۰۶ سانتی‌متر در ثانیه به ۰/۰۰۵ سانتی‌متر بر ثانیه به‌ازای غلظت ۲درصد جرمی مخلوط آب- کربن کاهش یافته است. در این ارتباط به‌ازای غلظت‌های به‌کاررفته از ۰/۵ تا ۲ درصد به‌ترتیب ۶۵/۲، ۷۳/۱، ۸۴/۶ و ۹۱/۵ درصد کاهش در هدایت هیدرولیکی اشباع در نمونه‌ها دیده شد. درخصوص تخلخل شایان ذکر است که تخلخل از ۴۴درصد حجمی به ۴۱/۴درصد حجمی کاهش یافت. میزان کاهش تخلخل در مرحلهٔ دوم آزمایش با افزایش غلظت به‌ترتیب: ۲/۷، ۳/۶، ۴/۵ و ۵/۹ درصد کاهش نشان داده است. دربارهٔ چگالی ظاهری با افزایش غلظت مقدار آن به‌ترتیب: ۰/۳۹، ۰/۴۹، ۰/۵۷ و ۰/۷۱ درصد افزایش یافت. چنانکه ملاحظه می‌شود، میزان تغییر در خصوصیات هیدرودینامیکی خاک به هنگام عبور مخلوط آب- کربن به مراتب بیشتر از هنگامی است که آب از مخلوط خاک- کربن عبور می‌کند که علت آن گرفتگی منافذ و آب‌بندی لایه‌های سطحی نمونه به‌دلیل نهشته‌شدن ذرات کربن گرانوله در منافذ خاک است.

در این پژوهش با اینکه انتظار می‌رفت مقدار گرفتگی کربن گرانولی نسبت به پودری کمتر باشد ولی میزان آن قابل توجه بود به‌طوری‌که به‌ازای دو درصد کربن در آب مقدار کاهش هدایت هیدرولیکی به ۹۱/۵درصد رسید وتأییدی بر پژوهش وقارفرد است.

یافته‌های فوق بدین معنی است که با ورود کربن به خاک و قرارگرفتن آن در سطح خاک از ورود آب به خاک شدیداً جلوگیری می‌شود و عملاً نفوذ آب در خاک متوقف می‌شود. بنابراین، در صورتی که با پساب تصفیه‌خانه با چنین مقداری از غلظت اقدام به آبیاری شود، علاوه بر تخریب خصوصیات هیدرولیکی خاک، ظرفیت نگهداری آب خاک نیز کاهش خواهد یافت.

در پژوهش حاضر با توجه به کاربرد کربن گرانولی در تصفیهٔ فاضلاب از این نوع ماده استفاده شد. در صورتی که کربن پودری استفاده شود به نظر می‌رسد که میزان و شدت گرفتگی منافذ افزایش خواهد یافت. البته بررسی میزان تغییرات آن نیاز به پژوهش مستقلی دارد که پیشنهاد می‌شود در ادامه بررسی و مطالعه می‌شود.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش مشاهده شد که با افزایش غلظت کربن در خاک از ۱ تا ۷ درصد جرمی، هدایت هیدرولیکی اشباع ماسه کاهش یافت و مقدار آن از ۰/۰۶ به ۰/۰۱۴ سانتی‌متر بر ثانیه کاهش یافت. در همین ارتباط، تخلخل ماسه از ۴۴درصد حجمی به ۴۲/۶درصد حجمی کاهش یافت. درخصوص چگالی ظاهری مشاهده شد که مقدار آن از ۱/۵ گرم بر سانتی‌مترمکعب به ۱/۵۰۷ گرم بر سانتی‌مترمکعب افزایش یافته است. نتایج نشان داد به هنگام عبوردادن مخلوط آب- کربن از نمونه ماسه، این تغییرات بسیار شدیدتر است و در درصدهای جرمی کمتری، تغییر در خصوصیات هیدرولیکی خاک مشاهده می‌شود. در این

ارتباط، غلظت‌های ۰/۵ تا ۲ درصد جرمی کربن منجر به تغییر هدایت هیدرولیکی اشباع ماسه از ۰/۰۶ به ۰/۰۰۵ سانتی‌متر بر ثانیه و تخلخل از ۴۴درصد حجمی به ۴۱/۴درصد حجمی کاهش نشان داد. درحالی‌که چگالی ظاهری از ۱/۵ گرم بر سانتی‌مترمکعب به ۱/۵۱۲ گرم بر سانتی‌مترمکعب افزایش یافت. نتایج پژوهش نشان داد که با ورود کربن گرانولی به خاک هدایت هیدرولیکی به‌شدت کاهش یافته و درنتیجه کاهش تخلخل خاک عملاً ظرفیت نگهداری آب خاک نیز خواهد شد. بدین ترتیب در استفاده از پساب خروجی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب به‌واسطهٔ احتمال تخریب خصوصیات خاک باید با احتیاط بیشتری عمل کرد.

سپاسگزاری

مؤلفان بر خود لازم می‌دانند از همکاری بی‌دریغ کارشناس گروه مهندسی آب دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره) آقای مهندس غلامرضا بابایی و زحمات سرکار خانم مهندس الهام نوروزپور اصل در انجام عملیات آزمایشگاهی صمیمانه تشکر و قدردانی کنند.

REFERENCES

Aiello, R., Cirelli, G.L. and Consoli, S. (2007). Effects of reclaimed wastewater irrigation on soil and tomato fruits: A case study in Sicily, Italy. *Journal of Agricultural Water Management*, 93(3), 65-72.

Al-Othman, A.A. (2009). Effect of treated domestic wastewater on physical and chemical characteristics of soils. *Journal of Applied Sciences,* 9(5), 901-908.

Bouwer, H. (1994). Irrigation and global water outlook. *Journal of Agricultural Water Management*, 25, 221 – 231.

Fronczyk, J., Pawluk, K. and Garbulewski, K. (2012). Multilayer PRBs - Effective Technology for Protection of Groundwater Environment in Traffic Infrastructure. *Chemical Engineering Transactions*, ISBN 978-88-95608-19-8.

Hasanoghli, A.R., liaghat, A. and Mirabzadeh, M. (2002). Result of changes in soil organic matter in the waste water and its purification. *Journal of Water and Wastewater*, 42, 2-11. (In Farsi)

Keshavarz, A., and Dehghani Sanij, H. (2009). Soil structure and water policy reform and artistic possibilities. In: *Proceedings of the Twelfth Conference IRNCID on Irrigation Management in Iran, Challenges and perspectives,* 5-6 Mar., Tehran, Iran, pp. 17-28. (In Farsi)

Levy, G.J., Fine, P. and Bar-tal A. (2011) *Treated Wastewater in Agriculture: Use and Impacts on the Soil Environment and Crops* (1st Ed.). Wiley-Blackwell, Inc. ISBN 978-1-4051-4862-7.

Magesan, G.N. (2001). Changes in soil physical properties following irrigation of municipal wastewater on two forested soils. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 31, 188-195.

Mollahoseini, H. (2013). Long term effects of municipal wastewater irrigation on some properties of a semiarid region soil of Iran. *International Journal of Agronomy and Plant Production*, 4(5), 1023-1028.

Monzavi, M.T. (1993). *Urban Sewage. Volume II. Wastewater treatment* (4th Ed.). Tehran University Press. (In Farsi)

Rohani Shahraki, F., Mahdavi, R. and Rezayi , M. (2005). Effect of irrigation treatments on some soil physical and chemical properties. *Journal of Water and Wastewater*, 53, 23-29. (In Farsi)

Shariati, M.R. (1996). Evaluation of the chemical quality of water used in irrigation. *Journal of Magazine water, soil and Environment*, 10, 51-55. (In Farsi)

Saber, M.S.M. (1986). Prolonged effect of land disposal of human wastes on soil conditions. *Journal of Water Science and Technology*, 18(7-8), 371-374.

Tanji, K. (1997). Irrigation with marginal quality waters. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 123(3), 165-169.

Vagharfard, H. (2001). Permeability reduction in porous media due to suspended particles. Ph.D. dissertation. University of Colorado, Fort Collins.