10.22092/ijsr.2019.122958.385

اثر بیوچارهای کود گاوی و بقایای نخل تهیه شده در دماهای مختلف بر هدایت هیدرولیکی اشباع و ضرایب انتقال یون کلر در یک خاک لوم شنی

سید علی اکبر موسوی[1]، ادریس گویلی و فاطمه مسعودی

دانشیار بخش علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز؛ aamousavi@gmail.com

دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد بخش علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز؛ edris_gavili@yahoo.com

دانش‌آموخته کارشناسی بخش علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز؛ fatemeh.masoudi70@gmail.com

دریافت: 97/7/2 و پذیرش: 97/10/10

چکیده

ضریب پخشیدگی –پراکندگی و سایر ضرایب انتقال املاح از ویژگی‌های مهم در فرایند انتقال مواد در خاک هستند که می‌تواند تحت تأثیر عوامل متعددی از جمله افزودن اصلاح‌کننده‌ها و مواد آلی قرار گیرند. بنابراین این پژوهش با هدف بررسی اثرات بیوچارهای تهیه شده از کود گاوی و بقایای نخل در دماهای مختلف بر ضریب پخشیدگی پراکندگی یون کلر، هدایت هیدرولیکی اشباع، میزان آب غیرمتحرک و ضریب تبادل جرمی یون کلرید در یک خاک لوم شنی انجام شد. تیمارها عبارت بودند از: شاهد، بیوچار کود گاوی (CMB_{400} و CMB_{600}) و بیوچار بقایای نخل (PRB_{400} و PRB_{600}) تهیه شده در دماهای 400 و 600 درجه سلسیوس (هریک در سه سطح 0/5%، 1%و 2 درصد وزنی). آزمایش در قالب طرح کاملا تصادفی با سه تکرار در شرایط آزمایشگاه و در ستون های خاک به مدت 70 روز انجام شد. کاربرد مقادیر 0/5%، 1% و 2 درصد PRB_{400} و PRB_{600} به‌ترتیب سبب افزایش معنی‌دار ضریب پخشیدگی-پراکندگی کلر به میزان 89%، 80%، 44% و 39%، 141% و 139 درصد در مقایسه با شاهد شد. همچنین کاربرد مقادیر 0/5%، 1% و 2 درصد CMB_{400} و همچنین 1% و 2 درصد CMB_{600} به‌ترتیب سبب افزایش معنی‌دار ضریب پخشیدگی به مقدار 95%، 48%، 95%، 81% و 159 درصد در مقایسه با شاهد شد. در حالی‌که کاربرد 1 درصد CMB_{600} در مقایسه با شاهد اثر معنی‌داری بر ضریب پخشیدگی- پراکندگی یون کلر نداشت. همچنین کاربرد مقادیر 0/5% و 1 درصد CMB_{400} و کاربرد 2 درصد CMB_{600} به‌ترتیب سبب افزایش معنی‌دار هدایت هیدرولیکی اشباع به‌میزان 24%، 18% و 29 درصد در مقایسه با شاهد شد و کاربرد مقدار 0/5 درصد PRB_{400} و همچنین مقادیر 1% و 2 درصد PRB_{600} به‌ترتیب سبب افزایش معنی‌دار هدایت هیدرولیکی اشباع به‌میزان 24%، 20% و 18 درصد در مقایسه با شاهد شدند. به طور کلی کاربرد بیوچار تولید شده از بقایای نخل و کود گاوی سبب افزایش میزان نسبت آب غیر متحرک و ضریب تبادل جرمی یون کلرید در خاک مورد مطالعه شد. در این پژوهش تفاوت آماری معنی‌داری بین اثر بیوچارهای تولید شده از کود گاوی و بقایای نخل و همچنین دماهای 400 و 600 درجه سلسیوس (به جز در مورد اثر بیوچار بقایای نخل بر ضریب پخشیدگی-پراکندگی کلر) بر ویژگی‌های هیدرولیکی در خاک وجود نداشت. نتایج نشان داد علی‌رغم اینکه بیوچار ممکن است اثرات مثبت قابل ملاحظه‌ای بر ویژگی‌های مختلف خاک داشته باشد ولی کاربرد هر دو نوع بیوچار مورد مطالعه در این پژوهش می‌تواند با افزایش ضرایب هیدرولیکی و ضرایب انتقال املاح اندازه‌گیری شده، سبب تسریع در انتقال نمک‌ها و ترکیبات کلریدی به منابع آبی و به‌ویژه آب‌های زیرزمینی شود و این موضوع بایستی در کاربرد این اصلاح کننده‌ها در خاک مدنظر قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: ضریب انتشارپذیری-پراکندگی، منحنی رخنه، زغال زیستی، آب غیر متحرک، ضریب تبادل جرمی

---

[1]. نویسنده مسئول، آدرس: شیراز، بخش علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز

مقدمه

نفوذ آب به خاک یکی از مهم‌ترین پدیده‌هایی است که چرخه آب در طبیعت را تحت تأثیر قرار می‌دهد. دست‌یابی به مدیریت صحیح آبیاری، ذخیره رطوبت در خاک، عملکرد زراعی قابل‌قبول، مقدار رواناب و مدیریت پایدار خاک‌ها در گرو مد نظر قرار دادن نفوذپذیری آب در خاک‌ها است (میرزایی و همکاران، 2014). ویژگی‌های هیدرولیکی و فیزیکی خاک مانند ظرفیت نگهداری آب خاک و هدایت هیدرولیکی اشباع اطلاعات کلیدی برای پیش‌بینی فرآیندهای جریان آب و انتقال املاح و مواد شیمیایی در خاک ارائه می‌کنند (ژانگ، 1997). برای بررسی فرایند انتقال املاح و غلظت املاح در نیمرخ خاک از یک منحنی استاندارد به نام منحنی دررو یا منحنی رخنه استفاده می‌شود. هنگامی‌که مایعی با ترکیب یا غلظتی متفاوت با مایع موجود در خاک، به ستون خاک اضافه شود و جریان خروجی از انتهای ستون اندازه‌گیری و تجزیه شود مشاهده می‌شود که با جایگزینی مایع جدید با مایع قدیمی، ترکیب آب خروجی با زمان تغییر می‌کند. اگر این دو مایع در یکدیگر قابل حل نباشند به این فرایند جابجایی اختلاط ناپذیر می‌گویند. از طرف دیگر اگر دو مایع، مانند بسیاری از محلول‌های متداول (از جمله آب شور و غیرشور) کاملاً با هم مخلوط شوند فرایند را جابجایی اختلاط پذیر می‌نامند. نمودار ترکیب محلول خارج شده در مقابل زمان یا در مقابل دبی تجمعی به منحنی رخنه معروف است.

در واقع منحنی رخنه از ترسیم نسبت غلظت املاح خروجی از خاک به غلظت املاح ورودی به خاک در مقابل حجم آب خروجی، زمان و یا تعداد حجم منفذی آب خروجی حاصل می‌شود (هیلل، 1998). پدیده‌های جابجایی اختلاط‌پذیر و منحنی‌های رخنه صرفا از بعد علمی اهمیت ندارند بلکه برای حل مسائلی در دنیای واقعی چون شستشوی املاح اضافی از خاک‌های شور، توزیع عناصر غذایی و آلودگی احتمالی آب‌های زیرزمینی توسط املاح گوناگون با منشاء معدنی شامل زباله‌های رادیواکتیو، مواد شیمیایی سمی، آفت‌کش‌ها و بقایای کودهای شیمیایی نیز کاربرد دارند (بیگار و نیلسن، 1976 و کوتیلیک و نیلسن، 1994). انتقال مواد شیمیایی از خاک به آب‌های زیرزمینی تحت تأثیر ویژگی‌های خاک، مدیریت خاک، مدت زمان آبشویی وسرعت فرآیندهای انتقال است (گوئیس کوئیانی و همکاران، 1995).

بهره‌گیری از اصلاح‌کننده‌های آلی ارزان قیمت مانند کودهای دامی، لجن‌های صنعتی و ورمی‌کمپوست از جمله شیوه‌های مدیریتی برای کاهش محدودیت‌های خاک در مناطق خشک و نیمه خشک می‌باشد (تاجیک، 1383). علی‌رغم این که برخی از محققان کاهش هدایت هیدرولیکی اشباع (در خاک لوم شنی) در اثر اضافه کردن اصلاح‌کننده‌های مصنوعی (پلی اکریل آمید) را گزارش کرده‌اند (آجوا و تروت، 2006)، برخی نیز افزایش هدایت هیدرولیکی اشباع (در خاک لوم شنی) در اثر افزودن اصلاح‌کننده‌های مصنوعی مانند پلی اکریل‌آمید (نادلر و همکاران، 1996) و طبیعی مانند کود دامی (صفادوست و همکاران، 1386) را گزارش نموده‌اند. افزودن ترکیبات آلی اصلاح‌کننده می‌توانند بر ویژگی‌های هیدرولیکی و پارامترهای انتقال املاح در خاک مؤثر باشد؛ به‌طوری‌که فهدعلی و علی‌عبدالحسین (2002) نشان دادند که خوابانیدن خاک با 1/5 درصد ماده نفتی در زمان‌های صفر، 1، 2، 4 و 6 ماه در دمای 20 تا 25 درجه سانتی‌گراد و رطوبت 33 کیلو پاسکال در مقایسه با شاهد سبب جابجایی شکل منحنی رخنه کلرید به سمت چپ شاهد و در نتیجه افزایش ضریب پخشیدگی (انتشار) و کاهش عدد پکلت شد. پژوهش‌های نقوی و همکاران (1384) نشان داد که افزودن 60 تن کود گاوی در هکتار به یک خاک لوم‌شنی در مزرعه، سه ماه پس از شروع آزمایش در مقایسه با شاهد سبب جابجایی منحنی رطوبتی به سمت بالا (افزایش نگهداشت رطوبت در مکش‌های مختلف) و کاهش معنی‌دار انتقال یون بروميد به اعماق پایین خاک شد.

نتایج به دست آمده از آزمایش‌های مزرعه‌ای صفادوست و همکاران (1386) نشان داد که اضافه کردن 30 و 60 تن در هکتارکود گاوی به یک خاک لوم شنی زیرکشت ذرت، سبب افزایش معنی‌دار میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها، تخلخل کل خاک، میزان منافذ بزرگتر از 30 میکرون (منافذ بزرگ و متوسط)، منافذ کوچکتر از 30 میکرون و هدایت هیدرولیکی اشباع خاک شد. اصغری و همکاران (2011) در یک پژوهش گلخانه‌ای گزارش نمودند که استفاده از لجن پتروشیمی تبریز در مقادیر 5 و 10 تن در هکتار به یک خاک لوم شنی پس از شش ماه خوابانیدن اگرچه سبب کاهش ضریب انتشارپذیری در مدل‌های انتقال-انتشار و روان - ساکن شد ولی اثر معنی‌داری بر رطوبت ساکن و ضریب تبادل نمک بین نواحی ساکن و روان در خاک نداشت. آنان دلیل عدم تأثیر معنی‌دار لجن استفاده شده بر ویژگی‌های هیدرولیکی مذکور را زیاد بودن ضریب تغییرات این ویژگی‌ها عنوان کردند. براساس گزارش نیامانگارا و همکاران (2001) استفاده از 37/5 تن در هکتار کود گاوی در یک خاک شنی سبب افزایش معنی-دار پایداری خاکدانه‌ها در آب و ظرفیت نگه‌داری آب خاک در محدوده مکش‌های 5 تا 200 کیلو پاسکال شد. پاگیلای و همکاران (1981) گزارش نمودند که استفاده از لجن فاضلاب و کمپوست به‌مقدار 150 تن در هکتار در یک خاک لوم شنی سبب افزایش معنی‌دار پایداری خاکدانه‌های

1-2 میلی‌متر (اندازه‌گیری شده به روش الک تر) و همچنین افزایش معنی‌دار تخلخل کل خاک از طریق افزایش تعداد منافذ 50-30 و 500-50 میکرون و کاهش تعداد منافذ بزرگتر از 500 میکرون شد.

بخش عمده کشور ایران دارای اقلیم خشک و نیمه‌خشک است. در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک، عدم وجود پوشش گیاهی کافی و مناسب سبب کاهش بازگشت بقایای گیاهی به خاک و در نتیجه فقر ماده آلی خاک می‌شود (تات، 2000). به همین دلیل کشاورزان تلاش می‌کنند تا با بازگرداندن بقایای آلی به خاک، تولید محصول را تا حد امکان افزایش دهند (ماری و همکاران، 1996). مدیریت سنتی بقایا (سوزاندن بقایا) و همچنین تجزیه کودهای حیوانی اضافه شده به خاک اغلب منجر به تولید گازهای گلخانه‌ای (مانند متان و اکسیدهای نیتروژن) شده که پتانسیل آنها در تغییر اقلیم چندین برابر بیشتر از دی‌اکسیدکربن است (فورستر و همکاران، 2007). دفن بقایا نیز پرهزینه بوده و خطرات متعددی (ازجمله ورود نیترات و سایر آلاینده‌ها به آب‌های زیرزمینی) برای محیط‌زیست و سلامت انسان به همراه دارد. همچنین با توجه به اینکه کودهای حیوانی از جمله کود گاوی دارای مقدار زیادی نیتروژن و فسفر به شکل‌های قابل دسترس می‌باشند افزودن آنها به خاک ممکن است خطر آبشویی عمقی و خروج این ترکیبات همراه با رواناب از انتهای مزارع و درنتیجه آلودگی آب‌های سطحی و زیرزمینی را افزایش دهد. کودهای گاوی علی رغم مزیت‌های زیاد مانند تأمین غذا و انرژی برای ریزجانداران خاک، تأمین برخی عناصر مورد نیاز گیاه و اصلاح ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک (گویلی و همکاران، 1395؛ گویلی و همکاران، 2018 و 2019)، می‌توانند سبب انتشار پاتوژن‌های خطرناک و ورود آنها به رواناب‌ها و آب‌های سطحی شده و برای انسان خطرآفرین باشند. به‌علاوه در سال‌های اخیر، نیاز به افزایش محصولات دامی منجر به تراکم زیادی از دام‌ها در مزارع کوچک شده که به نوبه خود حجم زیادی از فضولات و کودهای دامی که بسیار بیشتر از توان مزارع توسعه یافته برای کاربرد و مصرف آنها می‌باشد تولید می‌شود که علاوه بر مشکلات گفته شده، اشغال فضا و محدود بودن زمین‌های مناسب برای دفن فضولات دامی، وجود پاتوژن‌ها، تصاعد متان و ایجاد بوی نامطبوع و همچنین آلودگی‌های زیست محیطی را به دنبال داشته است (کلی و همکاران، 2015). بنابراین به دلایل ذکر شده امروزه تمایل به استفاده از کودهای دامی و بقایای تازه و فرایند نشده کاهش یافته است.

در سال‌های اخیر از بیوچار (زغال زیستی) به‌عنوان اصلاح‌کننده خاک (منبع کربن آلی) و روشی برای ترسیب کربن در خاک‌های کشاورزی استفاده شده است (گویلی و همکاران، 1395). بیوچار، زغال تهیه شده از ضایعات گیاهی و کشاورزی (مانند کاه و کلش گندم، سبوس برنج، ذرت، و تفاله نیشکر) است که طی فرآیند ترموشیمیایی گرماکافت (پیرولوسیس) تولید می‌شود، این فرآیند، سوختن تدریجی و کند مواد آلی در شرایط نبود یا کمبود اکسیژن است (گلاسر و بیرک، 2012). با تبدیل ضایعات کشاورزی و حیوانی به بیوچار درواقع نه‌تنها انرژی آزاد شده بلکه حجم و وزن مواد زائد و اثرات نامطلوب شیرابه تا حد قابل‌توجهی کاهش می‌یابد (لهمان و جوزف، 2009). بیوچار تولیدی ضمن برخورداری از محاسن گفته شده و کاهش مشکلات مرتبط با بقایای گیاهی یا کودهای دامی تازه می‌تواند به‌عنوان یک اصلاح‌کننده برای بهبود کیفیت خاک استفاده شود. این ماده در خاک می‌تواند بر ویژگی‌های مختلف شیمیایی مانند پ‌هاش و ظرفیت تبادل کاتیونی (لیانگ و همکاران، 2006) و فیزیکی (مانند ظرفیت نگهداری آب و هدایت هیدرولیکی (ماجور و همکاران، 2010) خاک مؤثر باشد.

افزودن بیوچار به دلیل افزایش فراهمی و دسترسی مواد آلی خاک، افزایش ظرفیت نگهداری آب و جذب عناصر غذایی می‌تواند موجب افزایش فعالیت‌های میکروبی و در نتیجه افزایش تشکیل و ثبات خاکدانه‌ها شود (داونی و همکاران، 2009). گلاسر و همکاران (2002) گزارش کردند که شکل‌گیری کمپلکس بیوچار با مواد معدنی، در نتیجه تعامل بین گروه‌های کربوکسیلیک اسید اکسید شده در سطح ذرات بیوچار، باید مسئول افزایش پایداری خاکدانه‌های خاک باشد. گزارش شده افزودن بیوچار به خاک می‌تواند منجر به افزایش میزان ماده آلی و همچنین افزایش پایداری خاکدانه‌های خاک شود (کیمیتیو و لهمان، 2010؛ تجدا و گونزالس، 2007؛ ترومپوسکی و همکاران، 2005) که به نوبه خود می‌تواند بر ویژگی‌های هیدرولیکی و انتقال املاح مؤثر باشد. ماجور و همکاران (2010) نشان دادند که بیوچار تولید شده از درخت انبه هدایت هیدرولیکی اشباع را در یک خاک لوم رسی شنی افزایش داد.

با توجه به اینکه تاکنون پژوهشی در زمینه تأثیر بیوچار بر پارامترهای انتقال املاح وجود ندارد، این پژوهش با هدف بررسی تأثیر مقادیر مختلف بیوچار حاصل از کود گاوی و بقایای نخل تهیه شده در دماهای مختلف به عنوان اصلاح‌کننده ارزان قیمت و سهل‌الوصول بر ضریب پخشیدگی- پراکندگی یون کلرید و برخی ضرایب انتقال کلرید و هدایت هیدرولیکی اشباع در یک خاک آهکی لوم شنی انجام شد.

مواد و روش‌ها

تهیه و آماده‌سازی خاک

خاک مورد آزمایش از عمق صفر تا 20 سانتی خاک آهکی سری کوی اساتید (Loamy-skeletal over fragmental, carbonatic, mesic, Fluventic Xerorthents) با بافت لوم شنی در ایستگاه تحقیقات کشاورزی در دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز واقع در منطقه باجگاه در 12 کیلومتری شمال‌شرقی شیراز (در ارتفاع 1810 متری از سطح دریای آزاد و در محدوده طول جغرافیایی 52 درجه و 32 دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی 29 درجه و 36 دقیقه **شمالی)** جمع‌آوری شد و پس از هوا خشک شدن، برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی با استفاده از روش‌های استاندارد معمول تعیین شد (جدول 1).

جدول 1- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و بیوچارهای مورد استفاده

ویژگی	خاک	بیوچار کود گاوی (CMB)		بیوچار بقایای نخل (PRB)	
		دمای تهیه بیوچار (درجه سانتی‌گراد)			
		400	600	400	600
شن (درصد)	55	-	-	-	-
سیلت (درصد)	30	-	-	-	-
رس (درصد)	15	-	-	-	-
کلاس بافت	لوم شنی	-	-	-	-
ماده آلی (درصد)	0/49	-	-	-	-
پ‌هاش	7/9	9/2	10/0	7/8	9/8
قابلیت هدایت الکتریکی (دسی زیمنس بر متر)	0/45	15/0	14/0	12/6	14/9
کربنات کلسیم معادل (درصد)	37	-	-	-	-
نسبت جذبی سدیم	0/9	-	-	-	-
سدیم قابل تبادل (درصد)	1/89	-	-	-	-
ظرفیت تبادل کاتیونی (سانتی مول بار در کیلوگرم)	10/7	-	-	-	-
نیتروژن کل (درصد)	0/11	1/95	1/92	0/24	0/25
فسفر قابل استخراج با بی کربنات سدیم (میلی گرم در کیلوگرم)	16/5	486	552	46	48

*EC، OM ، pH و به‌ترتیب قابلیت هدایت الکتریکی، میزان ماده آلی و پ‌هاش می‌باشند (مقادیر EC و pH بیوچارهای مورد مطالعه به‌ترتیب در عصاره و سوسپانسیون 1:10 بیوچار به آب و در مورد خاک به‌ترتیب در عصاره اشباع و خمیر اشباع اندازه‌گیری شده است).

تهیه و آماده‌سازی بیوچار

برای تهیه بیوچار از کود گاوی و بقایای نخل استفاده شد. کود گاوی از ایستگاه دامپروری دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز و بقایای نخل از شهرستان جهرم تهیه و پس از آسیاب و عبور از الک 2 میلی‌متری در ورقه‌های آلومنیومی بسته‌بندی و به مدت 4 ساعت در دماهای 400 و 600 درجه سلسیوس در داخل کوره الکتریکی قرار داده شدند تا فرایند پیرلوسیس در دماهای مذکور انجام شد. برخی ویژگی‌های بیوچار حاصل از کود گاوی و بقایای نخل تهیه شده در دماهای مختلف نیز با استفاده از روش‌های استاندارد معمول تعیین شد (جدول 1).

طرح و اجرای آزمایش

این پژوهش به صورت دو آزمایش فاکتوریل و در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار به شرح زیر انجام شد: تیمارهای مورد استفاده عبارت بودند از: شاهد، تیمارهای کاربرد 0/5، 1 و 2 درصد وزنی بیوچار تهیه شده از کود گاوی (CMB^2) و بقایای نخل (PRB^3) در دماهای 400 و 600 درجه سلسیوس (که به‌ترتیب با CMB_{400}، CMB_{600}، PRB_{400} و PRB_{600} نشان داده خواهند شد). آزمایش در لوله‌هایی از جنس پی‌وی‌سی به ارتفاع 30 و قطر 8 سانتی‌متر انجام شد. به این ترتیب که ابتدا مقدار خاک مورد نیاز برای تهیه ستون‌هایی از خاک به ارتفاع 30 سانتی‌متر و با جرم مخصوص ظاهری 1/3 گرم بر سانتی متر مکعب در کیسه‌های پلاستیکی با مقدار لازم از بیوچار مخلوط شده و کاملا به هم زده شد تا اختلاط به‌طور کامل انجام شود. مخلوط‌های خاک و بیوچار پس از اختلاط به لوله‌های پی‌وی‌سی گفته شده که انتهای آن‌ها به‌وسیله دو لایه توری پلاستیکی پوشیده شده بود منتقل شد. ستون‌های خاک به مدت 70 روز در محل آزمایشگاه در دمای 30-25

1. Cattle manure biochar
2. Palm residue biochar

درجه سلسیوس و در محدوده رطوبتی ظرفیت مزرعه نگه‌داری شدند.

تئوری آزمایش

معادله انتقال غیر همگام مواد خنثی و غیرجذبی که روی کلوئیدهای خاک جذب نمی‌شوند (مانند کلر) و در خاک نیز رسوب نمی‌کنند در شرایط یک بعدی به صورت زیر است:

(1)

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_{sh} \frac{\partial^2 C_s}{\partial x^2}$$

که در آن C، t، x و D_{sh} به‌ترتیب غلظت ماده مورد نظر (جرم در واحد حجم محلول خاک)، بعد زمان، بعد مکان (طول) و ضریب پخشیدگی- پراکندگی ماده مورد نظر در خاک (مجذور طول در واحد زمان) می‌باشند.

در شرایطی که غلظت زیادی از یک ماده خنثی و غیرجذبی به خاکی با غلظت ناچیز از آن ماده وارد شود، شرایط اولیه و مرزی برای حل معادله انتقال ماده در شرایط اختلاطی به شکل زیر خواهد بود:

(2)

$$C(x,t) = C_0, \text{ for } x < 0,\ t = 0$$
$$C(x,t) = 0, \text{ for } x > 0,\ t = 0$$
$$\mathrm{Lim}(x,t) = 0$$

حل رابطه (1) با شرایط گفته شده (رابطه 2) منجر به جواب که غلظت نسبی ماده در عمق x و زمان t (و یا حجم منفذی) می‌باشد خواهد شد (رابطه 3):

(3)

$$\frac{C}{C_0} = 0.5\left\{1 - \mathrm{erf}\left[\frac{x - vt}{2(D_{sh}t)^{0.5}}\right]\right\}$$

که در آن C و C_0 به ترتیب غلظت ماده در آب زهکشی شده از انتهای ستون خاک و غلظت اولیه ماده در محلول غلیظ روی ستون خاک، v میانگین سرعت حرکت آب در روزنه‌های خاک و erf تابع خطا می‌باشند.

منحنی دررو می‌تواند با استفاده از رابطه (3) به‌صورت تئوری ترسیم شود. از طرفی با انجام آزمایش و اندازه‌گیری غلظت لحظه‌ای ماده (کلر) در زه‌آب خروجی از انتهای یک ستون خاک اشباع که بار ثابتی از آب با غلظت مشخص از آن ماده (کلر) روی آن قرار گرفته می‌توان منحنی دررو را به صورت آزمایشگاهی ترسیم نمود. با توجه به اینکه اندازه‌گیری کلر مشکل است و از طرفی نسبت قابلیت هدایت الکتریکی محلول خروجی از ستون خاک به قابلیت هدایت الکتریکی محلول ورودی ($\frac{EC}{EC_0}$) همبستگی مستقیم و کاملی با نسبت غلظت کلر در محلول خروجی از ستون خاک به غلظت کلر در محلول ورودی به خاک ($\frac{C}{C_0}$) دارد، بنابراین مشابه با آنچه سعادت و همکاران (2012) گزارش **کردند** می‌توان نسبت $\frac{EC}{EC_0}$ را به جای $\frac{C}{C_0}$ در مقابل حجم منفذی آب خروجی از خاک ترسیم نمود تا منحنی دررو حاصل شود.

چنانچه مدل مناسب به منحنی رخنه برازش داده شود و شیب منحنی در نقطه عطف در حجم منفذی یک (S) تعیین شود می‌توان ضریب پخشیدگی- پراکندگی (D_{sh}) ماده مورد نظر (یون کلر) را با استفاده از رابطه (4) به صورت زیر تعیین نمود (کرکهام و پاور، 1972):

(4)

$$D_{sh} = \frac{vL}{4\pi S^2}$$

که در آن D_{sh}، L، S، V و π به‌ترتیب ضریب پخشیدگی- پراکندگی یون کلر ($L^2\ T^{-1}$)، ارتفاع ستون خاک (L)، شیب منحنی رخنه، میانگین سرعت حرکت آب در روزنه‌های خاک ($L\ T^{-1}$) و عدد نپر (3/14) می‌باشد.

شیب خط رگرسیونی بین حجم تجمعی آب خروجی در واحد سطح مقطع خاک در برابر زمان معادل شدت جریان (فلاکس) دارسی (q) خواهد بود. با تقسیم فلاکس دارسی بر تخلخل کل (n) خاک (رطوبت اشباع)، میانگین سرعت حرکت آب در روزنه‌های خاک محاسبه خواهد شد.

هدایت هیدرولیکی اشباع خاک (K) نیز از تقسیم سرعت دارسی (q) به گرادیان هیدرولیکی (i) محاسبه شد (رابطه 5):

(5)

$$K = \frac{q}{i}$$

پس از گذشت 70 روز از شروع آزمایش، ابتدا بر اساس نمودارهای موجود در هندبوک 60 آزمایشگاه شوری ایالات متحده آمریکا (ریچاردز، 1954)، از مخلوط نمک‌های کلرید کلسیم و سدیم (با نسبت اکی‌والانی 1:1) محلولی با قابلیت هدایت الکتریکی 5 دسی زیمنس بر متر (EC_0) تهیه شد. سپس ستون‌های خاک به مدت 24 ساعت در ظرف آب قرار داده و اشباع شدند. ستون‌های خاک اشباع روی سه پایه قرار داده و آب شور تهیه شده با بار ثابت آبی 10 سانتی‌متر از بالا روی خاک قرار داده شد. آب شور درون خاک حرکت کرده و با محلول خاک مخلوط شده و قطره قطره از انتهای ستون خاک خارج می‌شود. با شروع خروج آب از ستون خاک، زمان و حجم آب خروجی نسبت به زمان اندازه‌گیری شد (اندازه‌گیری‌ها در حجم‌های معادل با 0/1 حجم منفذی انجام شد). در هر زمان نیز مقداری از حجم محلول خروجی برداشته شده و با دستگاه هدایت‌سنج الکتریکی، قابلیت هدایت الکتریکی (EC) اندازه‌گیری شد. آزمایش تا زمانی ادامه یافت که EC خروجی از ستون خاک با EC محلول ورودی (EC_0) یکسان شد. سپس در یک دستگاه مختصات مقادیر نسبت EC/EC_0 که در واقع موید غلظت نسبی یون کلر (C/C_0)

می‌باشد در مقابل حجم آب منفذی (Pore volume) خروجی از خاک ترسیم **و با استفاده از نرم‌افزار اکسل** بهترین معادله به آن برازش داده شد (منحنی دررو یا رخنه) و با استفاده از تحلیل‌های گفته شده و روابط (4) و (5) به ترتیب مقادیر ضریب پخشیدگی پراکندگی یون کلر و هدایت هیدرولیکی اشباع خاک محاسبه شد.

مدل متحرک-غیرمتحرک برای انتقال املاح به‌صورت زیر توسط وان‌گنوختن و وییرنگا (1976) ارائه شده است:

$$\theta_m \frac{\partial C_m}{\partial t} + \theta_{im} \frac{\partial \theta_{im}}{\partial t} = D_{sh}\theta_m \left(\frac{\partial^2 C_m}{\partial z^2} \right) - q_m \frac{\partial C_m}{\partial z} \quad (6)$$

$$\theta_{im} \frac{\partial \theta_{im}}{\partial t} = \alpha (C_m - C_{im}) \quad (7)$$

$$\theta_{im} + \theta_m = \theta \quad (8)$$

$$\ln\left(1 - \frac{C}{C_0}\right) = -\frac{\alpha}{\theta_{im}} t + \ln\left(\frac{\theta_{im}}{\theta}\right) \quad (9)$$

که در آن t، z، C_m، C_{im}، θ_m و θ_{im} به‌ترتیب نشان دهنده زمان، مکان، غلظت ماده در آب متحرک، غلظت ماده در آب غیر متحرک، آب متحرک و آب غیر متحرک می‌باشند. q_m و α نیز به‌ترتیب شدت جریان آب متحرک و ضریب تبادل جرمی ماده (یون کلرید) بین بخش آب متحرک و غیرمتحرک در خاک می‌باشند.

جینز و همکاران (1995) روش ساده‌ای را برای تخمین پارامترهای مدل متحرک-غیرمتحرک برای املاح غیرواکنش‌گر مانند یون کلرید پیشنهاد کردند. در این روش با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده در آزمایش آبشویی یون کلرید، منحنی $\ln\left(1-\frac{EC}{EC_0}\right)$ که برابر با $\ln\left(1-\frac{C}{C_0}\right)$ است در مقابل زمان در یک دستگاه مختصات رسم شد. سپس بهترین خط رگرسیونی به داده‌ها برازش داده شده و شیب و عرض از مبدأ خط تعیین و با استفاده از رابطه زیر مقادیر حجمی آب غیرمتحرک در خاک (θ_{im}) و ضریب تبادل جرمی (α) یون کلرید محاسبه شد:

که در آن C_0 و C به‌ترتیب غلظت اولیه ماده در محلول غلیظ روی ستون خاک و غلظت ماده در آب زهکشی شده از انتهای ستون خاک می‌باشد.

تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها

تحلیل آماری داده‌ها با استفاده از نرم افزار SAS انجام شد و میانگین‌های مربوط به تیمارهای مختلف با آزمون چند دامنه دانکن در سطح 5 درصد مقایسه شدند.

نتایج و بحث

ضریب پخشیدگی-پراکندگی یون کلرید

نتایج نشان داد کاربرد CMB_{400} و CMB_{600} پس از حدود 70 روز ضریب پخشیدگی-پراکندگی یون کلرید را به‌طور معنی‌داری در مقایسه با شاهد افزیش داد. به طوری که کاربرد 0/5، 1 و 2 درصد وزنی CMB_{400} به‌ترتیب سبب افزایش معنی‌دار ضریب پخشیدگی-پراکندگی به میزان 95، 48 و 95 درصد در مقایسه با شاهد شدند. همچنین کاربرد 1 و 2 درصد CMB_{600} به‌ترتیب سبب افزایش معنی‌دار ضریب پخشیدگی-پراکندگی به میزان 81 و 159 درصد در مقایسه با شاهد شدند. در حالی‌که کاربرد 0/5 درصد CMB_{400} در مقایسه با شاهد اثر معنی‌داری بر ضریب پخشیدگی کلر نداشت. به طور کلی نتایج نشان داد کاربرد 0/5، 1 و 2 درصد وزنی بیوچار تهیه شده از کود گاوی بدون در نظر گرفتن دمای تولید، میانگین ضریب پخشیدگی-پراکندگی یون کلرید را در خاک مورد مطالعه در مقایسه با شاهد به‌طور معنی‌داری به‌ترتیب به‌میزان 39، 65 و 127 درصد افزایش داد. نتایج همچنین نشان داد در خاک‌های تیمار شده با بیوچار کود گاوی، بیش‌ترین و کم‌ترین میزان ضریب پخشیدگی-پراکندگی به‌ترتیب به میزان 10/82 و 3/45 سانتی مترمربع در دقیقه به‌ترتیب با کاربرد 2 و 0/5 درصد CMB_{600} حاصل شد (جدول 2).

کاربرد PRB_{400} و PRB_{600} پس از حدود 70 روز ضریب پخشیدگی- پراکندگی یون کلر را به‌طور معنی‌داری افزیش داد به گونه‌ای که کاربرد مقادیر 0/5، 1 و 2 درصد PRB_{400} به‌ترتیب سبب افزایش معنی‌دار ضریب پخشیدگی-پراکندگی یون کلرید به میزان 89، 80 و 44 درصد در مقایسه با شاهد شد. کاربرد مقادیر ذکر شده از PRB_{600} نیز به‌ترتیب سبب افزایش معنی‌دار ضریب پخشیدگی-پراکندگی یون کلرید به میزان 39، 141 و 139 درصد در مقایسه با شاهد شد.

جدول 2- اثر بیوچار تهیه شده از منابع متفاوت و در دماهای مختلف بر ضریب پخشیدگی- پراکندگی کلر (متر مربع بر روز) در خاک مورد مطالعه

بیوچار	سطوح (درصد وزنی)	دمای تهیه بیوچار (درجه سانتی‌گراد)		
		400	600	میانگین
بیوچار کود گاوی CMB (میانگین = 6/59 A)	0	4/18 d	4/18 d	4/18C
	0/5	8/15 b	3/45 d	5/80B
	1	6/22 c	7/55 bc	6/89B
	2	8/14 b	10/82 a	9/48A
	میانگین	6/74 A	6/44 A	
بیوچار برگ نخل PRB (میانگین = 6/97A)	0	4/18 d	4/18 d	4/18D
	0/5	7/92 b	5/82 c	6/86C
	1	7/54 b	10/09 a	8/82A
	2	6/03 c	10/01 a	8/02B
	میانگین	6/48 B	7/46 A	

*. در مورد هر اصلاح کننده میانگین‌هایی که در هر ردیف یا ستون دارای حداقل یک حرف مشترک هستند از نظر آماری با استفاده از آزمون دانکن در سطح 5 درصد تفاوت معنی‌دار ندارند.

به طور کلی نتایج نشان داد کاربرد 0/5، 1 و 2 درصد بیوچار تهیه شده از بقایای نخل بدون در نظر گرفتن دمای تولید، میانگین ضریب پخشیدگی-پراکندگی یون کلرید را در خاک مورد مطالعه در مقایسه با شاهد به‌طور معنی‌داری به ترتیب به میزان 63، 111 و 92 درصد افزایش داد. نتایج همچنین نشان داد در خاک‌های تیمار شده با بیوچار بقایای نخل، بیش‌ترین و کم‌ترین میزان ضریب پخشیدگی-پراکندگی یون کلرید به‌ترتیب به‌میزان 09/ 10 و 4/18 سانتی مترمربع در دقیقه با کاربرد 1 درصد PRB_{600} و در شرایط بدون کاربرد بیوچار حاصل شد (جدول 2). همان‌گونه که نتایج نشان می‌دهد اثر کاربرد 1 درصد بیوچار بقایای نخل بر ضریب پخشیدگی-پراکندگی یون کلرید در مقایسه با کاربرد 2 درصد این ماده بیشتر است که ممکن است به دلایل احتمالی زیر باشد: الف) اثر بیشتر تیمار 2 درصد بیوچار بر شوری خاک و کاهش رشد و فعالیت ریزجانداران درخاک و درنتیجه اثرات کمتر ریزجانداران بر فرایندهای ساختمان سازی و نهایتاً افزایش کمتر ضریب پخشیدگی-پراکندگی یون کلرید و ب) به دام افتادن بیشتر یون کلرید در خاک‌های تیمار شده با مقادیر بیشتر بیوچار.

نتایج همچنین نشان داد به طور کلی تفاوت آماری معنی‌داری بین میانگین ضریب پخشیدگی پراکندگی یون کلرید در خاک‌های تیمار شده با بیوچارهای تهیه شده از کود گاوی و بقایای نخل وجود نداشت (جدول 2).

به‌نظر می‌رسد کاربرد بیوچارهای حاصل از کود گاوی و بقایای نخل سبب افزایش خاکدانه‌سازی و افزایش نسبت خلل و فرج درشت در مقایسه با خلل و فرج ریز و در نتیجه افزایش هدایت هیدرولیکی اشباع (جدول 3) و ضریب پخشیدگی-پراکندگی یون کلر در خاک شده است. با توجه به اینکه تاکنون اثر بیوچار بر ضریب پخشیدگی-پراکندگی ترکیبات مختلف از جمله یون کلرید در خاک بررسی نشده، بنابراین نتایج با یافته‌های سایر پژوهش‌ها که اثر سایر ترکیبات آلی را بررسی نموده‌اند مقایسه می‌شود. در این ارتباط نتایج این پژوهش با یافته‌های فهدعلی و علی‌عبدالحسین (2002) که نشان دادند خوابانیدن خاک با 1/5 درصد ماده نفتی در زمان‌های صفر، 1، 2، 4 و 6 ماه در دمای 20 تا 25 درجه سانتی‌گراد و رطوبت 33 کیلو پاسکال در مقایسه با شاهد سبب جابجایی شکل منحنی رخنه کلرید به سمت چپ شاهد و در نتیجه افزایش ضریب پخشیدگی (انتشار) و کاهش عدد پکلت شده همخوانی دارد. در حالی که نتایج با یافته‌های نقوی و همکاران (1384) که بیان کردند افزودن کود آلی از طریق تغییر توزیع اندازه خلل و فرج خاک بر حرکت آب در خاک موثر بوده و کاربرد کود دامی سبب افزایش سهم خلل و فرج ریز در حرکت آب در خاک شده و در نتیجه هدایت هیدرولیکی و انتقال برماید در خاک را کاهش می‌دهد هم‌خوانی ندارد و همچنین با نتایج موسوی و همکاران (1393) که بیان کردند افزودن ورمی‌کمپوست سبب می‌شود تا نمک‌ها و ترکیبات کلریدی با سرعت کمتری در نیمرخ خاک حرکت کنند هم‌خوانی ندارد. نتایج همچنین با یافته‌های اصغری و همکاران (2011) که در یک تحقیق گلخانه‌ای گزارش نمودند استفاده از لجن پتروشیمی تبریز در مقادیر 5 و 10 تن در هکتار به یک خاک لوم شنی پس از شش ماه خوابانیدن

سبب کاهش ضریب انتشارپذیری در مدل‌های انتقال-انتشار و روان- ساکن شد همخوانی ندارد. عدم همخوانی نتایج با یافته‌های پژوهشگران مذکور می‌تواند به دلایل احتمالی تفاوت در نوع و ویژگی‌های مواد آلی مورد استفاده، تفاوت در نوع و ویژگی‌های خاک‌های مورد استفاده، تفاوت در نوع و ویژگی‌های یون مورد بررسی و تفاوت در شرایط آزمایشی مانند رطوبت، دما و مدت زمان خوابانیدن باشد.

هدایت هیدرولیکی اشباع

کاربرد مقادیر 0/5، 1 و 2 درصد CMB_{400} سبب افزایش هدایت هیدرولیکی اشباع خاک به‌ترتیب به‌میزان 24، 18 و 7 درصد در مقایسه با شاهد شد. کاربرد مقادیر ذکر شده از CMB_{600} نیز سبب افزایش هدایت هیدرولیکی اشباع خاک به‌ترتیب به‌میزان 2، 2 و 29 درصد در مقایسه با شاهد شد (هرچند افزایش‌های 7 و 2 درصد از نظر آماری در سطح احتمال 5 درصد معنی‌دار نبود). به طور کلی نتایج نشان داد کاربرد 0/5، 1 و 2 درصد بیوچار تهیه شده از کود گاوی بدون در نظر گرفتن دمای تولید، میانگین هدایت هیدرولیکی اشباع خاک مورد مطالعه را در مقایسه با شاهد به‌طور معنی‌داری به‌ترتیب به‌میزان 13، 9 و 18 درصد افزایش داد. نتایج همچنین نشان داد در خاک‌های تیمار شده با بیوچار کود گاوی، بیش‌ترین و کم‌ترین میزان هدایت هیدرولیکی اشباع به‌ترتیب به میزان 0/58 و 0/45 متر در روز به‌ترتیب با کاربرد 40 تن در هکتار (2 درصد) از CMB_{600} و در شرایط بدون کاربرد بیوچار حاصل شد (جدول 3).

نتایج نشان داد کاربرد مقادیر 0/5، 1 و 2 درصد PRB_{400} سبب افزایش معنی‌دار هدایت هیدرولیکی اشباع خاک به‌ترتیب به‌میزان 24، 13 و 13 درصد در مقایسه با شاهد شد. کاربرد مقادیر ذکر شده از PRB_{600} نیز سبب افزایش معنی‌دار هدایت هیدرولیکی اشباع خاک به‌ترتیب به‌میزان 13، 20 و 18 درصد در مقایسه با شاهد شد. به طور کلی نتایج نشان داد کاربرد 0/5، 1 و 2 درصد بیوچار تهیه شده از بقایای نخل بدون در نظر گرفتن دمای تولید، میانگین هدایت هیدرولیکی اشباع خاک مورد مطالعه را در مقایسه با شاهد به‌طور معنی‌داری به‌ترتیب به‌میزان 20، 18 و 16 درصد افزایش داد. همان‌گونه که نتایج نشان می‌دهد افزایش هدایت هیدرولیکی در اثر کاربرد مقادیر 1 و 2 درصد بیوچار بقایای نخل بر میانگین هدایت هیدرولیکی خاک در مقایسه با کاربرد 0/5 درصد این ماده کمتر است که ممکن است به دلایل احتمالی زیر باشد: الف) اثر بیشتر تیمارهای 1 و 2 درصد بیوچار بر شوری خاک و کاهش رشد و فعالیت ریزجانداران درخاک و درنتیجه اثرات کمتر ریزجانداران برفرایندهای ساختمان‌سازی و نهایتاً افزایش کمتر میانگین هدایت هیدرولیکی خاک و ب) نگهداشت بیشتر و درنتیجه انتقال کمتر رطوبت در خاک‌های تیمار شده با مقادیر زیاد بیوچار که منجر به کاهش در میزان افزایش هدایت هیدرولیکی خاک خواهد شد.

نتایج همچنین نشان داد در خاک‌های تیمار شده با بیوچار بقایای نخل، بیش‌ترین و کم‌ترین میزان هدایت هیدرولیکی اشباع به‌ترتیب به میزان 0/56 و 0/45 متر در روز به‌ترتیب با کاربرد 0/5 درصد PRB_{400} و در شرایط بدون کاربرد بیوچار حاصل شد (جدول 3).

نتایج همچنین نشان داد به طور کلی تفاوت آماری معنی‌داری بین میانگین هدایت هیدرولیکی اشباع در خاک‌های تیمار شده با بیوچارهای تهیه شده از کود گاوی و بقایای نخل وجود نداشت (جدول 3).

نتایج مربوط به افزایش هدایت هیدرولیکی در پاسخ به افزودن بیوچار به خاک با نتایج ماجور و همکاران (2010) که در پژوهشی در کلمبیا نشان دادند افزودن 11/6، 23/2 و 116/1 تن در هکتار بیوچار تولید شده از درخت انبه هدایت هیدرولیکی اشباع را در یک خاک اکسی‌سولز با بافت لوم رسی شنی افزایش داد همخوانی دارد.

دونی و همکاران (2009) نیز بیان کردند همراه با افزودن بیوچار فراهمی و در دسترس بودن مواد آلی خاک، افزایش ظرفیت نگهداری آب و جذب عناصر غذایی به طور قابل توجهی می‌تواند موجب افزایش فعالیت‌های میکروبی و در نتیجه تشکیل و ثبات خاکدانه‌ها شود. گلاسر و همکاران (2012) نیز گزارش کردند شکل‌گیری کمپلکس بیوچار با مواد معدنی، در نتیجه تعامل بین گروه‌های کربوکسیلیک اسید اکسید شده در سطح ذرات بیوچار سبب افزایش پایداری خاکدانه‌های خاک می‌شود. سایر پژوهشگران (کیمیتیو و لهمان، 2010؛ تجدا و گونزالس، 2007؛ ترومپوسکی و همکاران، 2005) نیز بیان کردند افزودن بیوچار به خاک می‌تواند منجر به افزایش میزان ماده آلی و همچنین افزایش پایداری خاکدانه‌های خاک شود.

جدول 3- اثر بیوچار تهیه شده از منابع و در دماهای متفاوت بر هدایت هیدرولیکی اشباع (متر بر روز) در خاک مورد مطالعه

بیوچار	سطوح (درصد وزنی)	دمای تهیه بیوچار (درجه سانتی‌گراد)		
		400	600	میانگین
بیوچار کود گاوی CMB (میانگین = 0/50 A)	0	0/45 c	0/45 c	0/45 B
	0/5	0/56 a	0/46 bc	0/51 A
	1	0/53 ab	0/46 c	0/49 A
	2	0/48 bc	0/58 a	0/53 A
	میانگین	0/51 A	0/48 A	
بیوچار برگ نخل PRB (میانگین = 0/51 A)	0	0/45 c	0/45 c	0/45 B
	0/5	0/56 a	0/51 ab	0/54 A
	1	0/51 ab	0/54 ab	0/53 A
	2	0/51 bc	0/53 ab	0/52 A
	میانگین	0/51 A	0/51 A	

*. در مورد هر اصلاح کننده میانگین‌هایی که در هر ردیف یا ستون دارای حداقل یک حرف مشترک هستند از نظر آماری با استفاده از آزمون دانکن در سطح 5 درصد تفاوت معنی‌دار ندارند.

نسبت آب غیر متحرک خاک

کاربرد بیوچار تهیه شده از کود گاوی سبب افزایش نسبت آب غیر متحرک در خاک در مقایسه با شاهد شد، ولی افزایش‌ها به‌جز در مورد کاربرد 2 درصد وزنی CMB_{600} که نسبت آب غیر متحرک را در مقایسه با شاهد به‌طور معنی‌داری (63 درصد) افزایش داد که از نظر آماری معنی‌دار نبودند. نتایج نشان داد به‌طور کلی کاربرد بیوچار تهیه شده از کود گاوی بدون در نظر گرفتن دمای تولید نیز سبب افزایش میانگین نسبت آب غیر متحرک در خاک در مقایسه با شاهد شد ولی افزایش‌ها به‌جز در مورد کاربرد 2 درصد CMB_{600} که نسبت آب غیر متحرک خاک را در مقایسه با شاهد به‌طور معنی‌داری به‌میزان 44 درصد افزایش داد، از نظر آماری در سطح احتمال 5 درصد معنی‌دار نبودند. نتایج همچنین نشان داد در خاک‌های تیمار شده با بیوچار کود گاوی، بیش‌ترین و کم‌ترین میزان نسبت آب غیر متحرک به‌ترتیب به میزان 26 و 13 درصد، به‌ترتیب با کاربرد 2 و 0/5 درصد وزنی CMB_{600} حاصل شد (جدول 4).

نتایج نشان داد هرچند کاربرد بیوچار تهیه شده از بقایای نخل سبب افزایش نسبت آب غیر متحرک در خاک در مقایسه با شاهد شد ولی افزایش‌ها به‌جز در مورد کاربرد 0/5 درصد PRB_{400} که نسبت آب غیر متحرک خاک را در مقایسه با شاهد به‌طور معنی‌داری به‌میزان 50 درصد افزایش داد، از نظر آماری در سطح احتمال 5 درصد معنی‌دار نبودند. نتایج نشان داد به‌طور کلی کاربرد 0/5، 1 و 2 درصد بیوچار تهیه شده از بقایای نخل بدون در نظر گرفتن دمای تولید، نسبت آب غیر متحرک خاک را در مقایسه با شاهد به‌طور معنی‌داری به ترتیب به‌میزان 25، 31 و 31 درصد افزایش داد. نتایج همچنین نشان داد در خاک‌های تیمار شده با بیوچار بقایای نخل، بیش‌ترین و کم‌ترین میزان نسبت آب غیر متحرک به‌ترتیب به میزان 24 و 16 درصد به‌ترتیب با کاربرد 2 و 0/5 درصد PRB_{400} حاصل شد (جدول 4).

نتایج همچنین نشان داد به طور کلی تفاوت آماری معنی‌داری بین میانگین نسبت آب غیر متحرک در خاک‌های تیمار شده با بیوچارهای تهیه شده از کود گاوی و بقایای نخل وجود نداشت (جدول 4).

با توجه به اینکه بخش متحرک آب در فرایند انتقال مواد با هر دو مکانیسم جریان توده‌ای و پخشیدگی نقش ایفا می‌کند ولی بخش غیرمتحرک تنها در انتقال مواد از طریق پخشیدگی نقش دارد (البته در مورد آنیون‌ها مانند کلر دفع آنیونی نیز می‌تواند موثر باشد)، در خاک مورد مطالعه به‌ویژه در شرایط تیمار با بیوچار، بخش‌های بیشتری از منافذ خاک در فرایند انتقال کلر (مواد) در خاک نقش ایفا می‌کنند و فرایند انتقال با استفاده از هر دو مکانیسم جریان توده‌ای و پخشیدگی انجام می‌شود. همچنین نتایج نشان داد نسبت آب متحرک به کل آب موجود در خاک نسبت به موارد گزارش شده به وسیله محمودالحسن و همکاران (2008 و 2011) که با انجام آزمایش‌های آبشویی نیترات در ستون‌های تهیه شده از خاک‌های مختلف، نسبت آب غیر متحرک را بین 24 تا 86 درصد گزارش کردند، کمتر است.

جدول 4- اثر بیوچار تهیه شده از منابع متفاوت و در دماهای مختلف بر میزان آب غیر متحرک ($cm^3\ cm^{-3}$) در خاک مورد مطالعه

بیوچار	سطوح (درصد وزنی)	دمای تهیه بیوچار (درجه سانتی‌گراد)		
		400	600	میانگین
بیوچار کود گاوی CMB (میانگین = 0/19 A)	0	0/16 b	0/16 b	0/16 B
	0/5	0/21 ab	0/13 b	0/17 B
	1	0/19 ab	0/19 ab	0/19 AB
	2	0/20 ab	0/26 a	0/23 A
	میانگین	0/19 A	0/19 A	
بیوچار برگ نخل PRB (میانگین = 0/20 A)	0	0/16 b	0/16 b	0/16 B
	0/5	0/24 a	0/17 b	0/20 A
	1	0/19 ab	0/22 ab	0/21 A
	2	0/20 ab	0/21 ab	0/21 A
	میانگین	0/20 A	0/19 A	

*. در مورد هر اصلاح کننده میانگین‌هایی که در هر ردیف یا ستون دارای حداقل یک حرف مشترک هستند از نظر آماری با استفاده از آزمون دانکن در سطح 5 درصد تفاوت معنی‌دار ندارند.

البته نتایج با یافته‌های سعادت و همکاران (2012) و همچنین فولادی دورهانی و سپاسخواه (2017) که میزان آب غیر متحرک را در سه خاک با بافت مختلف بین 0/002 تا 0/21 سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب گزارش کردند مطابقت دارد. ارساهین و همکاران (200) بیان کردند کم بودن سرعت منفذی آب درخاک که ناشی از کم بودن مسیرهای جریان ترجیحی در خاک است می‌تواند منجر به کاهش آب غیر متحرک در خاک شود. سایر پژوهشگران نیز زیاد بودن آب غیرمتحرک خاک را به وجود ساختمان‌های توده ای (احمد و همکاران، 1986 به نقل از محمودالحسن و همکاران، 2011) و یکنواختی زیاد توزیع اندازه منافذ خاک (لی و قدرتی، 1994) نسبت دادند.

ضریب تبادل جرمی یون کلرید

نتایج نشان داد هرچند کاربرد 0/5، 1 و 2 درصد CMB_{400} سبب افزایش ضریب تبادل جرمی یون کلرید در مقایسه با شاهد، به‌ترتیب به‌میزان حدود 38، 20 و 27 درصد، شد ولی افزایش‌ها از نظر آماری در سطح احتمال 5 درصد معنی‌دار نبودند (جدول 5). همچنین نتایج نشان داد کاربرد 0/5، 1 و 2 درصد CMB_{600} سبب افزایش ضریب تبادل جرمی یون کلرید در مقایسه با شاهد، به‌ترتیب به‌میزان حدود 4، 11 و 51 درصد، شد (هرچند تنها افزایش 51 درصدی حاصل از کاربرد 2 درصد وزنی CMB_{600} از نظر آماری معنی‌دار بود). به‌طور کلی کاربرد بیوچار تهیه شده از کود گاوی بدون در نظر گرفتن دمای تولید نیز سبب افزایش میانگین ضریب تبادل جرمی یون کلرید، به‌ترتیب به‌میزان حدود 2، 16 و 49 درصد، در مقایسه با شاهد شد؛ ولی افزایش‌ها به‌جز در مورد افزایش 49 درصدی حاصل از کاربرد 2 درصد CMB_{600}، از نظر آماری در سطح احتمال 5 درصد معنی‌دار نبودند. نتایج همچنین نشان داد در خاک-های تیمار شده با بیوچار کود گاوی، بیش‌ترین و کم‌ترین ضریب تبادل جرمی یون کلرید به‌ترتیب به‌میزان 0/0068 و 0/0045 بر دقیقه به‌ترتیب با کاربرد 2 درصد CMB_{600} و در شرایط بدون کاربرد بیوچار حاصل شد (جدول 5).

نتایج نشان داد هرچند کاربرد PRB_{400} و PRB_{600} سبب افزایش ضریب تبادل جرمی یون کلرید در مقایسه با شاهد شد، ولی افزایش‌ها از نظر آماری در سطح احتمال 5 درصد معنی‌دار نبودند. به‌طور کلی کاربرد 0/5، 1 و 2 درصد بیوچار تهیه شده از بقایای نخل بدون در نظر گرفتن دمای تولید، میانگین ضریب تبادل جرمی یون کلرید را به-ترتیب به‌میزان حدود 31، 42 و 33 درصد، در مقایسه با شاهد افزایش داد ولی افزایش‌ها به‌جز در مورد افزایش 42 درصدی حاصل از کاربرد 1درصد بیوچار تهیه شده از بقایای نخل، از نظر آماری در سطح احتمال 5 درصد معنی‌دار نبودند. تغییرات ضریب تبادل جرمی در خاک‌های تیمار شده با سطوح مختلف بیوچار و عدم تبعیت از روند افزایشی یا کاهشی مشخص با سطوح بیوچار مورد استفاده، ممکن است به دلایل احتمالی ذکر شده برای ضریب پخشیدگی-پراکندگی یون کلر و همچنین هدایت هیدرولیکی خاک در بخش‌های قبلی مربوط باشد. نتایج همچنین نشان داد در خاک‌های تیمار شده با بیوچار بقایای نخل، بیش‌ترین و کم‌ترین ضریب تبادل جرمی یون کلرید به‌ترتیب به‌میزان 0/0069 و 0/0045 بر دقیقه به‌ترتیب با کاربرد 1 درصد PRB_{600} و در شرایط بدون کاربرد بیوچار حاصل شد (جدول 5).

جدول 5- اثر بیوچار تهیه شده از منابع متفاوت و در دماهای مختلف بر ضریب تبادل جرمی (min^{-1}) یون کلرید در خاک مورد مطالعه

بیوچار	سطوح (درصد وزنی)	دمای تهیه بیوچار (درجه سانتی‌گراد)		
		400	600	میانگین
بیوچار کود گاوی CMB (میانگین = 0/0055 A)	0	0/0045 b	0/0045 b	0/0045 B
	0/5	0/0062 ab	0/0047 b	0/0054 AB
	1	0/0054 ab	0/0050 b	0/0052 AB
	2	0/0057 ab	0/0068 a	0/0067 A
	میانگین	0/0055 A	0/0054 A	
بیوچار برگ نخل PRB (میانگین = 0/0058 A)	0	0/0045 a	0/0045 a	0/0045 B
	0/5	0/0068 a	0/0050 a	0/0059 AB
	1	0/0059 a	0/0069 a	0/0064 A
	2	0/0062 a	0/0059 a	0/0060 AB
	میانگین	0/0059 A	0/0056 A	

*. در مورد هر اصلاح کننده میانگین‌هایی که در هر ردیف یا ستون دارای حداقل یک حرف مشترک هستند از نظر آماری با استفاده از آزمون دانکن در سطح 5 درصد تفاوت معنی‌دار ندارند.

نتایج نشان داد به طور کلی تفاوت آماری معنی-داری بین میانگین ضریب تبادل جرمی یون کلرید در خاک-های تیمار شده با بیوچارهای تهیه شده از کود گاوی و بقایای نخل وجود نداشت (جدول 5).

به طور کلی به نظر می‌رسد افزودن بیوچار به خاک سبب افزایش پیچیدگی ساختار منافذ خاک و در نتیجه افزایش آب غیر متحرک و ضریب تبادل جرمی یون کلرید در خاک مورد مطالعه شده است. لی و همکاران (2000) نیز گزارش کردند که با پیچیده‌تر شدن ساختار منافذ در اثر افزایش رس در خاک، میزان آب غیر متحرک و ضریب تبادل جرمی خاک افزایش می‌یابد. سعادت و همکاران (2012) و فولادی دورهانی و سپاسخواه (2017) نیز گزارش کردند به دلیل زیادتر بودن سرعت آب منفذی در خاک‌های درشت بافت، میزان آب غیر متحرک و ضریب تبادل جرمی در خاک‌های درشت بافت در مقایسه با خاک-های ریزبافت کمتر است. آنان همچنین همبستگی مثبت معنی‌داری بین میزان آب غیرمتحرک و ضریب تبادل جرمی در خاک گزارش کردند.

نتیجه‌گیری

یافته‌ها نشان داد به طور کلی کاربرد بیوچار تولید شده از بقایای نخل و کود گاوی سبب افزایش هدایت هیدرولیکی اشباع، ضریب پخشیدگی- پراکندگی یون کلرید، میزان نسبت آب غیر متحرک و ضریب تبادل جرمی یون کلرید در خاک مورد مطالعه شد. همچنین یافته‌ها نشان داد در این پژوهش تفاوت آماری معنی‌داری بین اثر بیوچارهای تولید شده در دماهای 400 و 600 درجه سانتی-گراد بر ویژگی‌های هیدرولیکی در خاک مورد مطالعه وجود نداشت. نتایج حاصل از این پژوهش همچنین نشان داد علی رغم اینکه (همان‌گونه که در منابع مختلف اشاره شده) بیوچار ممکن است از جنبه‌های کشاورزی و زیست محیطی اثرات مثبت قابل ملاحظه‌ای بر ویژگی‌های مختلف فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک داشته باشد ولی کاربرد هر دو نوع بیوچار مورد مطالعه در این پژوهش می‌توانند با افزایش ضرایب هیدرولیکی و ضرایب انتقال املاح اندازه-گیری شده، سبب تسریع در انتقال نمک‌ها و ترکیبات کلریدی به منابع آبی و به‌ویژه آب‌های زیرزمینی شوند که این موضوع بایستی در کاربرد این اصلاح کننده‌ها در خاک مدنظر قرار گیرد.

فهرست منابع:

1. تاجیک، ف. 1383. ارزیابی پایداری خاکدانه‌ها در برخی مناطق ایران. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، جلد 8، صفحات 125 تا 134.

2. صفادوست، آ.، م. ر. مصدقی، ع. ا. محبوبی، ع. نوروزی و ق. اسدیان.1386. تأثیر کوتاه‌مدت خاک‌ورزی و کود دامی بر ویژگی‌های ساختمانی خاک. نشریه علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، جلد 11، صفحات 91 تا 101.
3. گویلی، ا.، ع. ا. موسوی و ع. ا. کامگارحقیقی. 1395. اثر بیوچار کود گاوی و تنش رطوبتی بر ویژگی‌های رشد و کارایی مصرف آب اسفناج در شرایط گلخانه ای. نشریه پژوهش آب در کشاورزی، جلد 30، صفحات 243 تا 259.
4. موسوی، ع. ا. و ا. گویلی. 1393. اثر کاربرد کود گاوی و ورمی کمپوست بر ضریب پخشیدگی کلر در یک خاک لوم شنی. دومین همایش ملی مدیریت آب در مزرعه، موسسه تحقیقات آب و خاک، کرج، مهرماه 1393.
5. نقوی، ه.، م. ع. حاج عباسی و م. افیونی. 1384. تاثیرکود گاوی بر برخی خصوصیات فیزیکی و ضرایب هیدرولیکی و انتقال برومایدد ریک خاک لوم شنی در کرمان. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، جلد 9، صفحات 93 تا 103.
6. Ahmad, M., M. Akram, S. Baig, M.Y. Javed, and R. Riaz-ul-Amin. 1986. Proceeding of XII International Forum on Soil Taxonomy and Agrotechnology Transfer. 2nd Volume: Field Excursion, p. 315. Soil Survey of Pakistan, Lahore.
7. Ajwa, H. A. and T. J. Trout. 2006. Polyacrylamide and water quality effects on infiltration in sandy loam soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 70: 643-650.
8. Asghari, Sh., F. Abbasi, and M. R. Neyshabouri. 2011. Effects of soil conditioners on physical quality and bromide transport properties in a sandy loam soil. Biosyst. Eng., 109: 90-97.
9. Biggar, J. W. and D. R. Nielsen.1976. Spatial variability of the leaching characteristics of a fieldsoil.Water Resour. Res., 12: 78-84.
10. Cely, P., G. Gasco, J. Paz-Ferreiro, and A. Mendez. 2015. Agronomic properties of biochars from different manure wastes. J. Anal. Appl. Pyrol., 111: 173–182.
11. Downie, A.,A.Crosky and P. Munroe. 2009. Physical properties of biochar. In: J. Lehmann and S. Joseph, (Eds), Biocharfor Environmental Management: Science and Technology, Earthscan, London. pp:13-29.
12. Ersahin, S., I. R. Papendick, J. L. Smith, C. K. Keller, and V. M. Manoranjan. 2002. Macropore transport of bromide as influenced by soil structure differences. Geoderma, 108: 207–223.
13. Fahad Ali, A. and W. Ali Abdul-Hussein. 2002. Mobile fraction of water and transport parameters in modified structure soil. Transactions 17th Inter. Congress of Soil Sci. Symp. No. 1, P. No. 511. Bangkok. Thailand.
14. Fooladi Dorhani, M. and A. R. Sepaskhah. 2017. Estimation of zeolite application effect on solute transport parameters at different soils using HYDRUS-1D model. Iran Agric. Res., 36: 1-10.
15. Forster, P., V. Ramaswamy, P. Artaxo, T. Berntsen, R. Betts, D. W. Fahey, J. Haywood, J. Lean, D. C. Lowe, and G. Myhre. 2007. Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing. Chapter 2, Climate Change . The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor, and H. L. Miller (Eds.)]. Cambridge University Press, pp. 129-234.
16. Gavili, E., A. A. Moosavi, and A. A. Kamgar Haghighi. 2019. Does biochar mitigate the adverse effects of drought on the agronomic traits and yield components of soybean? Indus. Crops Prod., 128: 445–454.
17. Gavili, E., A. A. Moosavi, and F. Moradi Choghamarani. 2018. Cattle manure biochar potential for ameliorating soil physical characteristics and spinach response under drought. Arch. Agron. Soil Sci., 64: 1714- 1724.
18. Giusquiani, P. L., M. Pagliai, G.Gigliotti, D.Businelli, and A.Beneti. 1995. Urban wastecompost effects on physical, chemical, biological soil properties. J. Environ, Qual. 24: 175-182.

19. Glaser, B. and J. J. Birk. 2012. State of the scientific knowledge on properties and genesis of Anthropogenic Dark Earths in Central Amazonia (terra preta de Índio). Geochimica et Cosmochimica Acta, 82: 39-51.
20. Glaser, B., J. Lehmann, and W. Zech. 2002. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoa a review. Biol. Fert. Soils. 35(4): 219-230.
21. Hillel, D. 1998. Environmental Soil Physics. Academic Press. USA, pp. 249-250.
22. Jaynes, D. B., S. D. Logsdon, and R. Horton. 1995. Field method of measuring mobile/immobile water content and solute transfer rate coefficient. Soil Sci. Soc. Am. J., 59: 352–356.
23. Kimetu, J. M. and J. Lehmann. 2010. Stability and stabilisation of biochar and green manure in soil with different organic carbon contents. Aust. J. Soil Res., 48: 577–585.
24. Kirkham, D. and W. L. Powers. 1972. Advanced Soil Physics. Wiley--Interscience, Wiley, New York, N.Y., 408 p.
25. Kutilek, M. and D. Nielsen.1994. Soil Hydrology. Catena Verlag, Cremlingen-Destedt, Germany.
26. Lee, J., D. B. Jaynes, and R. Horton. 2000. Evaluation of a simple method for estimating solute transport parameters: Laboratory studies. Soil Sci. Soc. Am. J., 64: 492–498.
27. Lehmann, J. and S. Joseph. 2009. Biochar for environmental management. In: J. Lehmann and S. Joseph (Eds.). Biochar for Environmental Management: Science and Technology. 3rd Ed, London, Earthscan, 405 p.
28. Li, Y. and M. Ghodrati.1994. Preferential flow of nitrate through soil columns containing root channels. Soil Sci. Soc. Am. J., 58: 653–659.
29. Liang, B., J. Lehmann, D. Solomon, J. Kinyangi, J. Grossman, B. O'Neill, J. O. Kjemstad, J. Thies, F. J. Luiza, J. Petersen, and E. G. Neves. 2006. Black carbon increases cation exchange capacity in soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 70: 1719-1730.
30. Mahmood-ul-hassan, M., M. Rashid, and E. Rafique. 2011. Nutrients transport through variably structured soils. Soil Sci. Plant Nutr., 57: 331-340.
31. Mahmood-ul-Hassan, M., M. S. Akhtar, and G. Nabi. 2008. Boron and zinc transport through intact columns of calcareous soils. Pedosphere, 18: 524–532.
32. Major, J., J. Lehmann, M. Rondon, and C. Goodale. 2010. Fate of soil-applied blackcarbon:downward migration, leaching and soil respiration. Global Change Biol., 16: 1366-137.
33. Mary, B., S. Recous, D. Darwis, and D. Robin. 1996. Interactions between decomposition of plant residues and nitrogen cycling in soil. Plant Soil, 181: 71-82.
34. Mirzaee, S., A. A. Zolfaghari, M. Gorji, M. Dyck, and S. Ghorbani Ashtaki. 2013. Evaluation of infiltration models with different numbers of fitting parameters in different soil texture classes. Arch. Agron. Soil Sci., 60: 681-693.
35. Nadler, A., E. Perfect and D. Kay. 1996. Effect of polyacrylamide applicationon the stability of dry and wet aggregates. Soil Sci. Soc. Am. J., 60: 555-561.
36. Nyamangara, J., J. Gotosa, and S. E. Mpofu. 2001. Cattle manure effects on structural stability and water retention capacity of a granitic sandy soil in Zimbawe. Soil Till. Res., 62: 157-162.
37. Pagliai, M., G. Guidi, M. Lamarca, M. Giachetti, and P. Lucamante. 1981. Effects of sewage sludges and composts on soil porosity and aggregation. J. Environ. Qaul., 10: 556-561.
38. Richards, L. A. 1954. Handbook No. 60: Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils. Soil and Water Conservation Research Branch Agricultural Research Service, Soil Salinity Laboratory, USA.
39. Saadat, S., A. R. Sepaskhah, and S. Azadi. 2012. Zeolite effects on immobile water content and mass exchange coefficient at different soil textures. Comm. Soil Sci. Plant Anal., 43: 2935-2946.

40. Tate, R. L. 2000. Soil Microbiology. John Wily and Sons. New York, USA.
41. Tejada, M., and J. L. Gonzalez. 2007. Influence of organic amendments on soil structure and soil loss under simulated rain. Soil Till. Res., 93: 197–205.
42. Trompowsky, P. M., V. M. Benites, B. E. Madart, A. S. Pimenta, W. C. Hockasday, and P. G. Hatcher. 2005. Characterization of humic like substances obtained by chemical oxidation of eucalyptus charcoal. Organic Geochem., 36: 1480–1489.
43. van Genuchten, M. T. and P. J. Wierenga. 1976. Mass transfer studies in sorbing porous media. I. Analytical solutions. Soil Sci. Soc. Am. J., 40: 473-481.
44. Zhang, R. 1997. Determination of soil sorptivity and hydraulic conductivity from the disc infiltrometer. Soil Sci. Soc. Am. J., 61: 1024-1030.

Effect of Cattle Manure and Palm Residue Biochars Produced at Different Pyrolysis Temperatures on Saturated Hydraulic Conductivity and the Coefficients of Chloride Transportation in a Sandy Loam Soil

A. A. Moosavi[1], E. Gavili, and F. Masoudi

Associate Professor, Department of Soil Science, College of Agriculture, Shiraz University;
E-mail: aamousavi@gmail.com
M.Sc. Graduate, Department of Soil Science, College of Agriculture, Shiraz University;
E-mail: edris_gavili@yahoo.com
B.Sc. Graduate, Department of Soil Science, College of Agriculture, Shiraz University;
E-mail: fatemeh.masoudi70@gmail.com

Received: September, 2018 and Accepted: December, 2018

Abstract

Diffusion-dispersion and the other parameters of solute transport are important characteristics in material transportation within soil that can be influenced by several factors including addition of soil amendments and organic materials. Therefore, this research aimed to evaluate the effects of cattle manure and palm residue biochars produced at different pyrolysis temperatures on the diffusion-dispersion coefficient (D) of chloride, saturated hydraulic conductivity (K), immobile water content (θ_{im}), and mass exchange coefficient (α) of chloride in a sandy loam soil. Treatments consisted of control, cattle manure (CMB), and palm residue (PRB) biochar produced at 400 and 600 ˚C (CMB_{400}, CMB_{600}, PRB_{400}, and PRB_{600}, respectively). Each biochar type was applied at three levels of 0.5, 1, and 2 % wt. The experiment was conducted using a completely randomized design with three replications on soil columns under laboratory condition after 70 days incubation. Application of 0.5,1 and 2% PRB_{400}, and PRB_{600} increased D parameter by 89%, 80%, 40%; and 39%, 141%, 139% as compared to that of control, respectively. Furthermore, application of 0.5%, 1%, and 2% CMB_{400} and 1% and 2% CMB_{600} significantly increased D parameter by nearly 95%, 48%, 95%; and 81% and 159% as compared to the control, respectively. On the contrary, application of 1% CMB_{600} had no significant effect on D parameter as compared to the control. Besides, application of 0.5% and 1% CMB_{400} and application of 2% CMB_{600} resulted in significant increases by 24%, 18%, and 29% in K as compared to the control. Application of 0.5% PRB_{400} and 1% and 2% PRB_{600} increased K by 24%, 20%, and 18% as compared to the control, respectively. In general, application of CMB and PRB increased the θ_{im} and α in the studied soil. In the present study, there were no significant differences between the effect of CMB and PRB and the applied temperatures (except for the effect of PRB on D parameter) on the studied hydraulic characteristics of the soil. Results suggest that although biochar may have positive effects on different soil properties, application of both studied biochars may intensify transportation of the solute and chloride and their entrance into water resources, particularly ground waters, by increasing the hydraulic and solute transportation coefficients. This point should be considered in the application of these soil amendments.

Keywords: Diffusion-dispersion coefficient, Break through curve, Immobile water, Mass exchange coefficient

[1] Corresponding author: Department of Soil Science, College of Agriculture, Shiraz University, Shiraz.