

کاربرد پسماندهای آلی مختلف و بیوچار آن‌ها برای اصلاح یک خاک شور - سدیمی

ملیحه فولادی دورهانی^{۱*}، محمد شایان‌نژاد^۲، حسین شریعتمداری^۳ و محمدرضا مصدقی^۴

چکیده

شوری و سدیمی بودن خاک یکی از مشکلات مهم جهانی در زمین‌های فاریاب در نواحی خشک و نیمه‌خشک است؛ بنابراین ارزیابی روش‌های کارآمد در اصلاح خاک‌های شور-سدیمی اهمیت دارد. در این پژوهش، تأثیر بیوچارهای تولیدی در دماهای پیرولیز ۳۰۰ و ۵۰۰ درجه سلسیوس و پسماند در مقایسه با شاهد و سوپرچادز بر آبشویی نمک‌ها از خاک و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد بررسی قرار گرفت. پژوهش حاضر در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار در آزمایشگاه آبیاری دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان در سال ۱۳۹۶ به اجرا درآمد. خاک شور-سدیمی (لوم سیلت) از لایه ۳۰-۰ سانتی‌متری مرکز تحقیقات شوری خاک رودشت در شرق اصفهان، ایران جمع‌آوری شد. پنج ترکیب مختلف از باگاس نیشکر، شلتوک برنج، کود گاوی و سرشاخه‌های درخت کاج به‌عنوان اصلاح‌کننده‌های آلی در نظر گرفته شد. ۱۷ تیمار با سه تکرار برای بررسی آبشویی انتخاب شد؛ شاهد (CT)، پنج ترکیب پسماند و بیوچارهای ساخته‌شده از این ترکیبات در دماهای ۳۰۰ و ۵۰۰ درجه سلسیوس و همچنین سوپرچادز استاکوزورب (SA). مواد اصلاح‌کننده در نمونه‌های خاک اعمال شده و در رطوبت ۸۰ درصد حد خمیری به مدت ۴۰ روز نگهداری شدند. سپس ستون‌های آزمایشی با خاک تیمار شده پر شده و با ۴ حجم آب منفذی آبشویی انجام شد. هدایت هیدرولیکی اشباع خاک و شوری زه‌آب خروجی در مدت زمان آبشویی اندازه‌گیری شد. در یک زمان یکسان، ترکیب باگاس نیشکر، سرشاخه‌های هرس درخت کاج و پوسته شلتوک برنج (BWR) مقدار شوری زه‌آب کمتری نسبت به سایر ترکیب‌ها داشت، که نشان‌دهنده کاهش شوری بیشتر در این تیمار بود. هدایت هیدرولیکی اشباع خاک با کاربرد همه اصلاح‌کننده‌ها به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافت. با تبدیل پسماند به بیوچار، نسبت Mg^{2+}/Ca^{2+} در محلول خاک کاهش یافته و در نتیجه پایداری خاک افزایش یافت. به‌طور کلی نتایج این پژوهش نشان داد که کاربرد اصلاح‌کننده، بیوچار ترکیب باگاس نیشکر، سرشاخه‌های هرس درخت کاج و پوسته شلتوک برنج در دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس (BWR300) و سوپرچادز استاکوزورب، تیمارهای مناسب برای اصلاح خاک‌های شور-سدیمی در مناطق خشک و نیمه‌خشک هستند. پژوهش‌های بیشتری برای تعیین مقدار ماده اصلاح‌کننده در درازمدت و برای کاربرد در مقیاس بزرگ برای کیفیت‌های آب و بافت‌های خاک متفاوت در شرایط شور-سدیمی مورد نیاز است.

واژه‌های کلیدی: آب شور، اصلاح‌کننده‌های آلی، آبشویی، خاک شور-سدیمی، هدایت هیدرولیکی اشباع.

ارجاع: فولادی دورهانی م. شایان‌نژاد م. شریعتمداری ح. و مصدقی م. ر. ۱۴۰۱. کاربرد پسماندهای آلی مختلف و بیوچار آن‌ها برای اصلاح یک خاک شور - سدیمی. مجله پژوهش آب ایران. ۴۵: ۱۱۹-۱۲۸. <https://dx.doi.org/10.22034/iwrj.2022.13797.2387>

۱- دانش‌آموخته دکتری گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان.

۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان.

۲- استاد گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان.

۳- استاد گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان.

* نویسنده مسئول: malihe_foladi@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۲/۰۶

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۲/۲۴

مقدمه

تخریب خاک به دلیل شوری، یکی از عمده‌ترین نگرانی‌های زیست‌محیطی و تهدیدکننده پایداری تولیدات کشاورزی جهان و رایج در مناطق خشک و نیمه‌خشک است (مانچاندا و گارگ، ۲۰۰۸). شوری خاک‌ها و منابع آب، یکی از عوامل محدودکننده تولید محصول‌های زراعی در مناطق خشک و نیمه‌خشک کشور است. با توجه به موارد فوق، امروزه اصلاح خاک‌های شور-سدیمی و شور مورد توجه خاص پژوهشگران قرار گرفته‌است (محمدی، ۱۳۷۰).

شوری خاک به تجمع نمک در ناحیه توسعه ریشه گیاه به اندازه‌ای که رشد گیاه را کاهش دهد، اشاره دارد (رنگاسامی، ۲۰۰۶). غلظت زیاد نمک در خاک، بر فعالیت میکروبی و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک تأثیر منفی دارد و در نتیجه بهره‌وری خاک را کاهش می‌دهد (مانچاندا و گارگ، ۲۰۰۸؛ وانگ و همکاران، ۲۰۱۵). دسته‌بندی خاک‌های شور براساس رسانایی الکتریکی عصاره اشباع (EC_e)، نسبت جذب سدیم (SAR) و درصد سدیم تبادلی (ESP) است. براساس این معیارها، خاک‌ها به شور، شور-سدیمی و سدیمی طبقه‌بندی می‌شوند (ریچاردز، ۱۹۵۴). خاک‌های شور-سدیمی به دلیل آثار شوری و سدیمی، همزمان بر ویژگی‌های خاک و رشد گیاه بیشترین تأثیر مخرب را دارند (رنگاسامی، ۲۰۰۲). خاک‌های شور-سدیمی دارای مقادیر زیاد سدیم هم در محلول و هم در مکان‌های تبادلی هستند.

سدیم زیاد خاک، باعث پراکندگی خاک به دلیل ساختمان خاک ضعیف می‌شود و آثار مخرب آن در کاهش توانایی خاک برای انتقال آب و خاک نمایان می‌شود. با توجه به موارد اشاره‌شده، جوانه‌زنی، استقرار و رشد گیاه تحت تأثیر قرار می‌گیرد و باعث کاهش پتانسیل تولید خاک می‌شود (نلسون و همکاران، ۱۹۹۸). خاک‌های دارای شوری و سدیم زیاد، از لحاظ مقدار ماده آلی دارای کمبود هستند (نلسون و همکاران، ۱۹۹۶). اصلاح خاک‌های شور-سدیمی یکی از فعالیت‌های مدیریتی در کشاورزی به‌منظور تأمین غذای مورد نیاز است. هدف از اصلاح، تبدیل خاک شور-سدیمی به خاک قابل کشت با کاهش سدیم تبادلی است (گاندل و دلوکا، ۲۰۰۶).

بیوچار (Biochar) یک ماده بسیار متخلخل با کربن زیاد است که در طی پیرولیز زیست‌توده در دمای کمتر از ۷۰۰

درجه سلسیوس در شرایط بدون اکسیژن یا اکسیژن کم تولید می‌شود (لیانگ و همکاران، ۲۰۰۶). بیوچار به‌صورت بالقوه می‌تواند بر ویژگی‌های فیزیکی خاک مانند ساختمان، تخلخل و چگالی ظاهری تأثیرگذار باشد که این ویژگی‌های فیزیکی بر هوای خاک، گنجایش نگهداشت آب خاک و فعالیت میکروبی مؤثرند. همچنین بیوچار زیستگاه ریزجانداران خاک و ریشه‌های گیاه را بهبود می‌دهد (اتکینسون و همکاران، ۲۰۱۰) که باعث افزایش نگهداشت رطوبت در خاک‌های درشت‌بافت و اصلاح سرعت نفوذ و زهکشی در خاک‌های ریزبافت می‌شود.

محمودآبادی و همکاران (۲۰۱۳) اثر مواد اصلاحی مختلف در توزیع مجدد کاتیون‌ها در نیم‌رخ خاک پس از اصلاح خاک در ستون‌های آزمایشگاهی را بررسی کردند. تیمارهای در نظر گرفته‌شده شامل بقایای پسته، کود دامی، گچ، ترکیب این مواد و تیمار آب و اسید سولفوریک بود. نتایج نشان داد که غلظت کاتیون‌ها، EC و SAR در سطح ۵ درصد بین مواد اصلاح‌کننده دارای تفاوت معناداری بود. در غیاب اسید سولفوریک، بقایای پسته بیشترین تأثیر را در کاهش EC و SAR خاک داشت.

همچنین در پژوهشی تأثیر اصلاح‌کننده‌های آلی و شیمیایی بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد بررسی قرار گرفت. تیمارهای در نظر گرفته‌شده، گچ، کمپوست، بیوچار و ترکیب گچ با بیوچار و کمپوست بودند. مقدار اصلاح‌کننده ۷۵ تن در هکتار به‌کار برده شد. ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خاک مانند، پایداری خاک دانه‌ها، هدایت هیدرولیکی، مقادیر تجمعی کلسیم، منیزیم و سدیم، SAR ، EC_e و ESP بررسی شد. نتایج نشان داد که کاربرد ترکیب بیوچار و کمپوست با اصلاح ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی در اصلاح خاک شور-سدیمی مؤثر است (چاگانتی و همکاران، ۲۰۱۵).

در پژوهشی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مانند پایداری خاک‌دانه‌ها، هدایت هیدرولیکی اشباع، تجمع سدیم، کلسیم و منیزیم، EC_e ، SAR و ESP بررسی شد. تیمارهای در نظر گرفته‌شده در دو حالت استریلیزه با اشعه گاما و بدون آن بود. نتایج نشان داد که استریلیزه کردن تنها بر ویژگی‌های فیزیکی خاک در تیمار کمپوست تأثیر داشت. استریلیزه کردن بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک تیمار شده با بیوچار تأثیری نداشت (چاگانتی و کرون، ۲۰۱۵).

بررسی اثر استفاده همزمان از آب با کیفیت پایین همراه با اصلاح‌کننده‌ها برای اصلاح خاک شور-سدیمی ضروری است. بدین‌منظور اثر تعدادی پسماند آلی و بیوچار آن‌ها بر آبشویی یک خاک شور-سدیمی مورد آزمایش قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

ویژگی‌های خاک و آب آبیاری

خاک شور-سدیمی (۳۰-۰ سانتی‌متری) از مرکز تحقیقات شوری خاک رودشت در شرق اصفهان، ایران جمع‌آوری شد (32°29'19.47"N, 52°11'24.35"E). آب آبیاری از چاه در نزدیکی دانشگاه صنعتی اصفهان تهیه شد. نتایج توزیع اندازه ذرات خاک با روش‌های الک و پیپت تعیین شد (جدول ۱). بافت خاک لوم سیلت و دارای چگالی ظاهری ۱/۱۵ مگاگرم بر مترمکعب بود. رسانایی الکتریکی (EC_e) و pH خاک در عصاره اشباع اندازه‌گیری شد. غلظت کاتیون‌های دوظرفیتی (کلسیم و منیزیم) و تک‌ظرفیتی (سدیم و پتاسیم) در عصاره اشباع خاک به‌ترتیب با روش تیتراسیون با EDTA و فلیم‌فتمتری اندازه‌گیری شد (ریچاردز، ۱۹۵۴). ویژگی‌های عصاره اشباع خاک و آب آبیاری در جدول ۲ گزارش شده‌است.

کاتیون‌های دوظرفیتی مانند کلسیم و منیزیم برای جایگزینی سدیم در مکان‌های تبادل‌ی خاک شور-سدیمی ضروری هستند. بیوچار منبعی از کلسیم و منیزیم است و می‌تواند در اصلاح خاک شور-سدیمی مؤثر قرار گیرد. از طرفی کلسیم و منیزیم، فراوان‌ترین کاتیون‌های دوظرفیتی در خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک هستند و بررسی کمی جذب این کاتیون‌ها در خاک مهم است.

ویژگی‌های فیزیکی نامناسب خاک‌های شور-سدیمی در مناطق خشک و نیمه‌خشک باعث محدودکردن رشد ریشه گیاه و کاهش بازده محصول می‌شود. رشد گیاه و جوانه‌زنی به‌دلیل کمبود آب و ساختمان ضعیف خاک در شرایط شور-سدیمی، دارای محدودیت است؛ بنابراین برای بهبود ویژگی‌های فیزیکی خاک، یک مدیریت ویژه لازم است. با وجود اهمیت هدایت هیدرولیکی اشباع در پویایی و جریان آب در خاک، پژوهش‌های محدودی در خاک‌های شور-سدیمی با کاربرد بیوچار انجام شده‌است. از طرفی با توجه به کمبود منابع آب شیرین، حفظ پایداری منابع آب به‌عنوان یک اولویت است. رشد روزافزون جمعیت و نیازهای غذایی، یک فشار بی‌سابقه بر منابع آب شیرین تحمیل کرده‌است. با توجه به شورشیدن منابع آبی، باید یک راه‌حل برای استفاده همزمان آب شور و جلوگیری از شورشیدن خاک به‌دلیل کاربرد آن اتخاذ کرد؛ بنابراین

جدول ۱- توزیع اندازه ذرات، چگالی ظاهری، ماده آلی و گنجایش تبادل کاتیونی خاک

کلاس بافت خاک	رس	سیلت	شن	چگالی ظاهری	ماده آلی	گنجایش تبادل کاتیونی
		-----g kg ⁻¹ -----		Mg m ⁻³	g kg ⁻¹	cmol ₍₊₎ kg ⁻¹ soil
لوم سیلت	۲۱۰	۶۱۰	۱۸۰	۱/۱۵	۱۵۶	۱۳/۷۵

جدول ۲- برخی ویژگی‌های شیمیایی خاک و آب آبیاری کاربردی

ویژگی	سدیم	پتاسیم	کلسیم + منیزیم	نسبت جذب سدیم	pH	EC
	cmol kg ⁻¹ -----			(meq L ⁻¹) ^{0.5}	-	dS m ⁻¹
عصاره اشباع خاک	۱۲۴/۲	۱۰۳/۷	۱۱/۷	۲۳۰	۶/۴	۱۹۲/۴
آب آبیاری	۴/۸	۰/۸	۱/۳	۱۳/۷	۸/۱	۶/۲

مواد اصلاح‌کننده مورد استفاده در آزمایش

پسماندهای مختلف آلی مورد استفاده قرار گرفتند. سرشاخه‌های هرس درخت کاج (از فضای سبز دانشگاه صنعتی اصفهان)، باگاس نیشکر (از مزارع نیشکر در اهواز)، پوسته شلتوک برنج (از مزارع گیلان) و کود گاوی پوسیده (از چهارمحال و بختیاری) در نسبت‌های مختلف به‌صورت

خام و همچنین بیوچار در دو دمای ۳۰۰ و ۵۰۰ درجه سلسیوس استفاده شدند. پسماندها ابتدا در دمای ۷۰ درجه سلسیوس به‌مدت ۲۴ ساعت در آون خشک شدند. سپس کوبیده و از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شده و در نسبت‌های مختلف با هم ترکیب شدند (جدول ۳). به‌منظور ساخت بیوچار از پسماندها، از یک کوره الکتریکی

در شرایط عدم حضور اکسیژن در دماهای ۳۰۰ و ۵۰۰ درجه سلسیوس، استفاده شد. سوپرجاذب استاکوزورب (Stockosorb® 660) ساخت کشور آلمان نیز در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفت. برخی ویژگی‌های

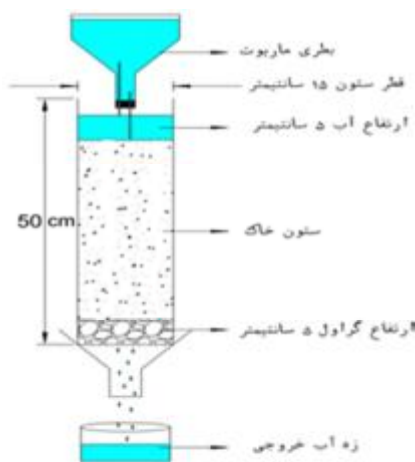
جدول ۳- نسبت جرمی ترکیب پسماندهای مختلف آلی در تیمارهای مورد بررسی

نام مخفف ترکیب	نسبت‌های پسماندها			
	کود گاوی	سرشاخه‌های هرس درخت کاج	پوسته شلتوک برنج	باگاس نیشکر
BWM	۳۰٪	۳۰٪	-	۴۰٪
RWM	۳۰٪	۳۰٪	۴۰٪	-
WM	۵۰٪	۵۰٪	-	-
BWMR	۲۰٪	۲۰٪	۳۰٪	۳۰٪
BWR	-	۲۰٪	۴۰٪	۴۰٪

مدت زمان آبشویی اندازه‌گیری شد. آب منفذی (Pore volume, PV) هر ستون از حجم خاک در هر ستون (V_t) و تخلخل (n) آن به صورت زیر محاسبه شد (کرخه‌ام، ۲۰۱۴):

$$PV = V_t \times n \quad (1)$$

در مرز ورودی (بالایی) در کل زمان آبشویی، آب با ارتفاع ثابت ۵ سانتی‌متر روی سطح خاک قرار داشت. برای تعیین هدایت هیدرولیکی از معادله داری استفاده شد (کرخه‌ام، ۲۰۱۴). سپس خاک ستون‌ها هواخشک شده و ویژگی‌های شیمیایی (Ca^{2+} , Mg^{2+}) آن اندازه‌گیری شد. پس از بررسی و تحلیل نتایج شوری زه‌آب خروجی، ویژگی‌های شیمیایی خاک و همچنین هدایت هیدرولیکی اشباع خاک در مدت آبشویی، ماده اصلاحی مناسب انتخاب شد.



شکل ۱- شماتیک ستون‌های آبشویی

آزمایش‌های آبشویی و بررسی اثر اصلاح‌کننده‌ها بر خاک

به منظور بررسی اثر تیمارها بر آبشویی خاک، ابتدا خاک هوا-خشک شده و از الک هشت میلی‌متری عبور داده شد. ۱۷ تیمار با سه تکرار برای آزمایش‌های آبشویی انتخاب شد: شاهد بدون ماده اصلاحی (CT)، پنج ترکیب بیوچار دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس (BWM500, RWM500, WM500, BWMR500 و BWR500)، پنج ترکیب بیوچار دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس (BWM300, RWM300, WM300, BWMR300 و BWR300) و پنج ترکیب پسماند آلی (BWM, RWM, WM, BWMR, BWR) به نسبت دو درصد وزنی و سوپرجاذب استاکوزورب (SA) به نسبت یک درصد وزنی در خاک اعمال شدند. از لوله‌های پلی‌اتیلن به قطر ۱۵ سانتی‌متر و طول ۵۰ سانتی‌متر برای تهیه ستون خاک استفاده شد (شکل ۱). نمونه‌های خاک با مواد اصلاح‌کننده ترکیب شده و در رطوبت ۸۰ درصد حد خمیری در دمای آزمایشگاه ($25 \pm 1^\circ C$) به مدت ۴۰ روز نگهداری شدند (دکستر و بیرد، ۲۰۰۱؛ مصدقی و همکاران، ۲۰۰۹). سپس ستون‌ها با خاک تیمار شده به صورت لایه‌لایه پر شده، تا چگالی ظاهری آن برابر مقدار آن در مزرعه تنظیم شود. چگالی ظاهری هر تیمار با در نظر گرفتن چگالی مواد اصلاحی و چگالی خاک تعیین شد. به منظور آزمایش‌های آبشویی، از آب با رسانایی الکتریکی ۶/۲ دسی‌زیمنس بر متر استفاده شد. چهار حجم آب منفذی برای آبشویی در نظر گرفته شد. هدایت هیدرولیکی اشباع ستون و رسانایی الکتریکی آب خروجی ستون‌ها در ۱۲ زمان (پس از هر یک سوم آب منفذی) در

جدول ۴- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی تیمارهای اصلاحی

اصلاح کننده	ویژگی‌های شیمیایی						ویژگی‌های فیزیکی	
	گنجایش تبادل کاتیونی	C/N	pH	رسانایی الکتریکی	تخلخل کل	چگالی ظاهری	چگالی حقیقی	
	$\text{cmol}_{(+)}\text{kg}^{-1}$	-	-	dS m^{-1}	%	Mg m^{-3}	Mg m^{-3}	
BWM	۳۰/۵	۱۱۶/۸	۷/۵	۰/۸۶۷	۸۰/۹	۰/۲۲۹	۱/۲۰	
BWM300	۲۰/۲	۷۴/۸	۸/۰	۰/۱۷۵	۸۳/۲	۰/۲۳۲	۱/۳۸	
BWM500	۱۶/۸	۶۶/۷	۹/۲	۰/۳۳۲	۸۳/۵	۰/۲۴۴	۱/۴۷	
RWM	۲۹/۱	۸۰/۴	۷/۷	۰/۶۸۵	۷۶/۹	۰/۳۱۴	۱/۳۶	
RWM300	۲۱/۲	۶۴/۲	۷/۸	۰/۴۷۸	۷۷/۸	۰/۲۹۲	۱/۳۱	
RWM500	۱۶/۳	۵۱/۷	۹/۰	۰/۳۲۶	۷۷/۹	۰/۳۰۴	۱/۳۷	
WM	۳۹/۰	۷۸/۴	۷/۸	۰/۶۵۷	۷۲/۰	۰/۴۰۵	۱/۴۵	
WM300	۲۲/۲	۵۵/۷	۷/۹	۰/۵۷۵	۷۳/۲	۰/۴۰۱	۱/۴۹	
WM500	۱۷/۷	۴۷/۹	۹/۱	۰/۳۲۶	۷۴/۹	۰/۳۹۰	۱/۵۶	
BWMR	۲۶/۵	۱۱۴/۰	۷/۵	۰/۸۸۶	۸۲/۲	۰/۲۲۱	۱/۲۴	
BWMR300	۲۰/۹	۸۳/۶	۷/۸	۰/۴۸۰	۸۴/۸	۰/۱۹۸	۱/۳۱	
BWMR500	۱۴/۵	۹۱/۲	۹/۳	۰/۳۴۴	۸۳/۰	۰/۲۲۸	۱/۳۵	
BWR	۱۹/۱	۲۲۰/۰	۷/۰	۰/۶۱۷	۸۰/۸	۰/۲۰۶	۱/۰۸	
BWR300	۱۴/۰	۱۳۳/۱	۷/۹	۰/۳۰۶	۸۴/۹	۰/۱۷۸	۱/۱۸	
BWR500	۱۲/۳	۱۶۰/۳	۹/۳	۰/۳۲۶	۸۴/۰	۰/۱۸۳	۱/۱۴	
SA	۴۰۰/۰	-	۷/۷	۱۳/۲۱	۵۲/۲	۰/۶۵	۱/۳۶	

تجزیه و تحلیل آماری

در ابتدا، آنالیز نرمال و همگن بودن واریانس داده‌ها با روش Shapiro-Wilk and Brown Forsythe انجام شد. تجزیه آماری با Proc GLM نرم‌افزار SAS نسخه ۹/۴ و مقایسه میانگین با آزمون LSD در سطح احتمال آماری ۵ درصد انجام گردید. نمودارها با نرم‌افزار Excel نسخه ۲۰۱۰ ترسیم شد.

نتایج و بحث

رسانایی الکتریکی (EC) زه‌آب خروجی

میانگین شوری زه‌آب تیمارهای مختلف در زمان خروج ۱/۳ حجم آب منفذی در شکل ۲ نشان داده شده‌است. بیشترین و کمترین مقدار شوری زه‌آب خروجی به ترتیب در تیمار شاهد و ترکیب BWR مشاهده شد. شوری کمتر، نشان‌دهنده خروج سریع‌تر نمک‌ها از داخل ستون خاک است. در همه ترکیب‌ها غیر از WM، مقدار شوری در تیمار پسماند کمتر از بیوجار بود. تیمار WM تفاوت قابل‌توجهی از نظر شوری زه‌آب خروجی در تیمار پسماند نسبت به سایر ترکیب‌ها داشت. مقدار شوری در همه ترکیب‌ها غیر از BWM و BWR، در تیمار بیوجار دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس کمتر از بیوجار دمای ۵۰۰ درجه

هدایت هیدرولیکی اشباع خاک

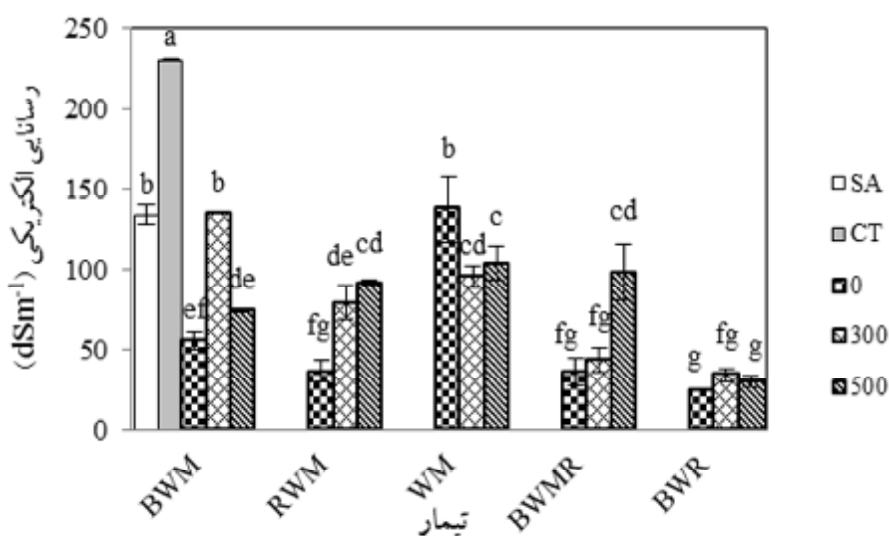
میانگین هدایت هیدرولیکی اشباع (K_s) خاک در طول مدت زمان آبیاری در شکل ۳ نمایش داده شده‌است. هر حجم آب منفذی به سه قسمت مساوی تقسیم شد و K_s در ۱۲ زمان محاسبه شد. مقدار K_s به‌طور معنی‌داری در همه خاک‌های تیمار شده با مواد اصلاحی افزایش یافت. در طول زمان آبیاری، مقدار K_s تقریباً ثابت باقی ماند و نشان‌دهنده این است که جریان آب در ستون‌های خاک به حالت ماندگار پس از آبیاری با یک حجم آب منفذی رسیده‌است (شکل ۳). کمترین مقدار K_s در تیمار شاهد مشاهده شد. یکی از دلایل کم‌تر بودن K_s در تیمار شاهد را می‌توان به تبادل سدیم بین محلول و مکان‌های تبادلی، افزایش آماس و پراکندگی خاک به دلیل جذب سدیم در مکان‌های تبادلی نسبت داد (میس و امرهین، ۲۰۰۱).

BWR500 > RWM500 > BWM500 > BWMR500 > WM500

در تیمار پسماند، بیشترین و کمترین مقدار افزایش K_s نسبت به شاهد برابر با ۱۲۵/۱ درصد و ۱۰۱/۸ درصد به ترتیب در تیمارهای BWR و WM مشاهده شد. همچنین بیشترین و کمترین درصد افزایش K_s در بیوچار برابر با ۱۱۷/۶ و ۳۳/۴ در تیمارهای BWR300 و WM500 مشاهده شد. درصد افزایش K_s در تیمار سوپرچاذب نسبت به شاهد برابر با ۱۴۸/۸ مشاهده شد. کارایی اصلاح‌کننده‌های آلی در مقابل تیمار سوپرچاذب در افزایش K_s کمتر بود.

همچنین K_s در تیمار BWR300 نسبت به سایر ترکیب‌ها در دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس اختلاف معنی‌داری داشت. با تبدیل پسماند به بیوچار، دامنه K_s بین ترکیب‌ها افزایش یافت. بیوچار باعث افزایش K_s نسبت به تیمار شاهد شد که با بهبود تخلخل و در نتیجه افزایش نفوذپذیری خاک توجیه می‌شود (آگلیدس و لوندرا، ۲۰۰۰؛ چاگانتی و همکاران، ۲۰۱۵؛ فلتن و علی، ۱۹۹۲). ترتیب مقادیر K_s در ترکیب‌های مختلف پسماند و بیوچارها به ترتیب زیر بود:

BWR > BWM > BWMR > RWM > WM
BWR300 > BWM300 > RWM300 $\approx$ WM300 > BWMR300



شکل ۲- مقایسه میانگین رسانایی الکتریکی زه آب خروجی از ستون‌های خاک در تیمار پسماند و بیوچارهای تولیدی در دماهای ۳۰۰ و ۵۰۰ درجه سلسیوس در مقایسه با شاهد (CT) و سوپرچاذب (SA) در زمان خروج ۱/۳ حجم آب منفذی، (میانگین $\pm$ خطای معیار). حروف غیرمشابه نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار بین تیمارها است ($p < 0.05$, LSD).

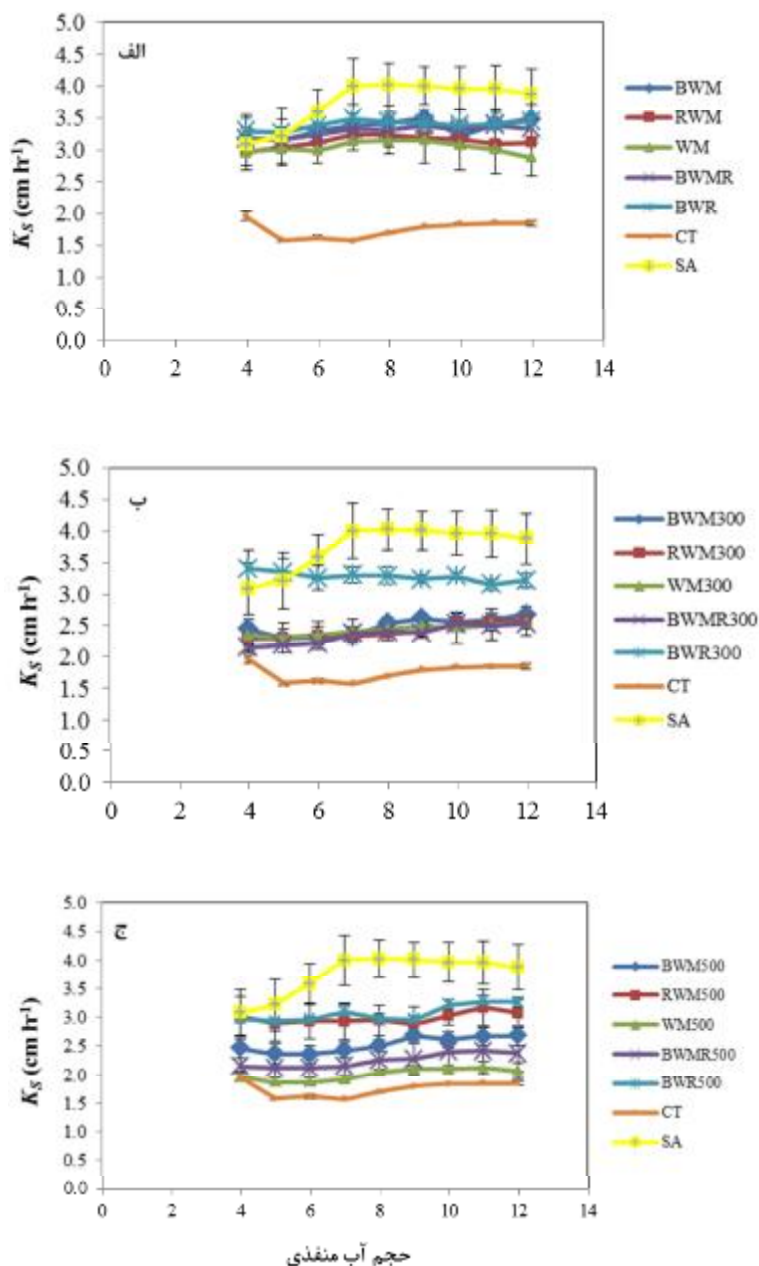
کاهش در تیمار بیوچار مشاهده شد. خاک تیمار شده با پسماند دارای مقدار منیزیم محلول بیشتری نسبت به سایر تیمارها بود که منجر به افزایش نسبت منیزیم به کلسیم شد (شکل ۴). اگر این نسبت از یک بیشتر شود، احتمال کاهش پایداری خاک‌دانه‌ها با افزایش پراکندگی وجود دارد. بیشترین و کمترین نسبت منیزیم به کلسیم، به ترتیب برابر با ۳/۵ و ۱/۶ در تیمارهای BWR و RWM مشاهده شد. با تبدیل پسماند به بیوچار و ترکیب آن با خاک و آبشویی آن، نسبت منیزیم به کلسیم کاهش یافت که نشان‌دهنده بهبود ساختمان خاک و نفوذ آب به خاک و افزایش آبشویی است. بیشترین مقدار کاهش نسبت

نسبت یون منیزیم به کلسیم محلول خاک

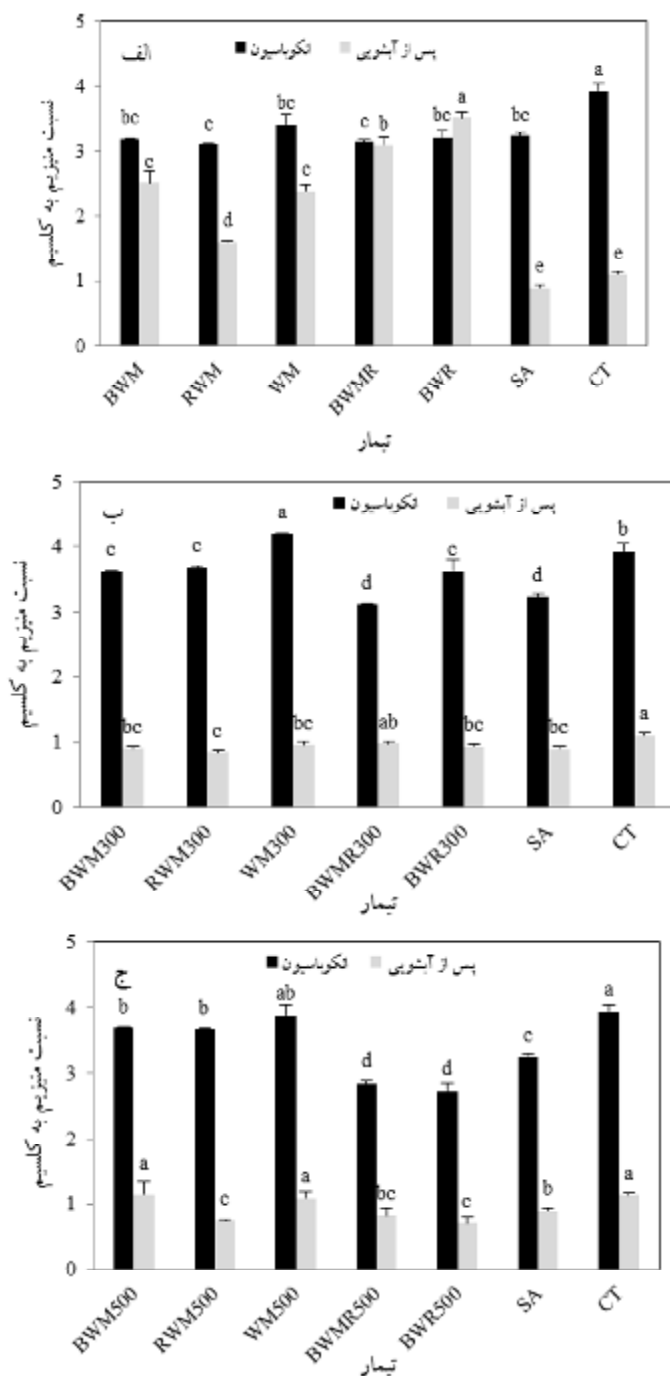
یون کلسیم نقش اساسی در اتصال مواد آلی و ذرات رس ایفا کرده و باعث بهبود ساختمان خاک می‌شود. اصلاح‌کننده‌های آلی نقش اساسی در بهبود پایداری خاک‌دانه‌ها، افزایش تخلخل، هدایت هیدرولیکی و گنجایش نگهداشت آب خاک ایفا می‌کنند. همه این تغییرات مثبت، در نتیجه باعث افزایش سرعت نفوذ آب و آبشویی نمک‌ها در خاک می‌شود (چاگانتی و همکاران، ۲۰۱۵، لئوگراند و ویتی، ۲۰۱۹). نسبت منیزیم به کلسیم در همه ترکیب‌ها، در تیمار پسماند و بیوچار پس از آبشویی نسبت به انکوباسیون کاهش یافت که بیشترین

BWR500 در بیوچار ۵۰۰ درجه سلسیوس مشاهده شد. در بیشتر این ترکیب‌ها، نسبت منیزیم به کلسیم کمتر از یک بود. همچنین مقدار آن در تیمار سوپرجاذب برابر با ۰/۸۹ و کمتر از یک مشاهده شد (۱۸/۵ درصد کاهش نسبت به شاهد).

منیزیم به کلسیم در ترکیب BWR با تبدیل پسماند به بیوچار مشاهده شد. بیشترین و کمترین نسبت منیزیم به کلسیم، به ترتیب برابر با ۰/۸۹ و ۰/۸۴ در تیمارهای BWMR300 و RWM300 در بیوچار ۳۰۰ درجه سلسیوس و ۱/۱۴ و ۰/۷۱ در تیمارهای BWM500 و



شکل ۳- میانگین هدایت هیدرولیکی اشباع خاک (K_s) در برابر ۱/۳ های حجم آب منفذی در مدت آبیاری در تیمارهای مختلف: الف - پسماند، ب - بیوچار دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس، ج - بیوچار دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس در مقایسه با شاهد (CT) و سوپرجاذب (SA)



شکل ۴ - مقایسه میانگین نسبت منیزیم به کلسیم محلول خاک (Mg^{2+}/Ca^{2+}) پس از آبشویی و انکوباسیون در تیمارهای مختلف: الف - پسماند، ب - بیوچار دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس، ج - بیوچار دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس در مقایسه با شاهد (CT) و سوپرجاذب (SA) (میانگین $\pm$ خطای استاندارد)؛ حروف غیرمشابه نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح آماری ۵ درصد براساس آزمون LSD است.

ارزیابی اصلاح‌کننده‌های خاک

کیفیت خاک تحت تأثیر ویژگی‌های فیزیکی اصلاح‌کننده قرار می‌گیرد (جین، ۲۰۱۹). بهترین اصلاح‌کننده باید چگالی ظاهری، شوری و pH کم و چگالی حقیقی،

نیتروژن، تخلخل و نسبت کربن به نیتروژن زیاد داشته باشد. مقدار بهینه pH برای خاک در محدوده ۵/۸-۷/۵ است؛ بنابراین بیوچار تولیدشده در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس برای کاربرد به‌عنوان اصلاح‌کننده دارای

نتیجه‌گیری

بیشترین نسبت منیزیم به کلسیم خاک در تیمار پسماند مشاهده شد. با تبدیل پسماند به بیوچار، پایداری ساختمان افزایش یافت (کاهش نسبت منیزیم به کلسیم). ترکیب BWR (باگاس نیشکر، سرشاخه‌های هرس درخت کاج و پوسته شلتوک برنج) نسبت به سایر ترکیب‌ها در زمان کمتری به تعادل رسید و خروج نمک‌ها با سرعت بیشتری رخ داد که می‌توان با افزایش هدایت هیدرولیکی اشباع خاک و پایداری ساختمان (Mg^{2+}/Ca^{2+}) توجیه کرد. همچنین ترکیب BWR اختلاف معنی‌داری از نظر هدایت هیدرولیکی اشباع خاک نسبت به سایر ترکیب‌ها داشت که ناشی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی پسماند و بیوچار آن است. با در نظر گرفتن ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی اصلاح‌کننده‌ها و ویژگی‌های خاک پس کاربرد اصلاح‌کننده‌ها، تیمار BWR300 (بیوچار باگاس نیشکر، سرشاخه‌های هرس درخت کاج و پوسته شلتوک برنج در دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس) به‌عنوان بهترین تیمار پیشنهاد شد. با این حال آزمایش‌های بیشتر مزرعه‌ای برای پیشنهاد کاربردی لازم است.

سپاسگزاری

از حمایت‌های مالی دانشگاه صنعتی اصفهان در انجام این تحقیق کمال تشکر و قدردانی را داریم.

منابع

۱. محمدی ج. ۱۳۷۰. مقایسه دو روش آبشویی در خاک‌های شور-قلیا واقع در منطقه رودشت اصفهان. پایان‌نامه کارشناسی ارشد علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۴۱ ص.
2. Aggelides S. and Londra P. 2000. Effects of compost produced from town wastes and sewage sludge on the physical properties of a loamy and a clay soil. *Bioresource Technology*. 71: 253-259.
3. Atkinson C. J. Fitzgerald J. D. and Hipps N. A. 2010. Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: a review. *Plant and Soil*. 337: 1-18.
4. Bossuyt H. Denef K. Six J. Frey S. Merckx R. and Paustian K. 2001 Influence of microbial populations and residue quality on aggregate stability. *Applied Soil Ecology*.

محدودیت است. با توجه به موارد فوق، ترکیب BWR (باگاس نیشکر، سرشاخه‌های هرس درخت کاج و پوسته شلتوک برنج) کمترین مقدار شوری و pH در مقایسه با سایر ترکیب‌ها را داشت (جدول ۴). همچنین ترکیب BWR دارای کمترین مقدار چگالی ظاهری بود؛ از این رو سبب هوادهی بهتر و بهبود کیفیت فیزیکی خاک شد. ترکیب BWR و BWMR (باگاس نیشکر، کود گاوی، سرشاخه‌های هرس درخت کاج و پوسته شلتوک برنج) بیشترین مقدار تخلخل را داشته و باعث افزایش تخلخل خاک و گنجایش نگهداشت آب شده‌است. ترکیب BWR تفاوت قابل‌توجهی از نظر نسبت کربن به نیتروژن داشت که می‌تواند شرایط مناسبی برای رشد قارچ‌ها فراهم کند (بوسویت و همکاران، ۲۰۰۱) و باعث تجزیه ترکیبات پلیمری شود که نقش مهمی در خاک‌دانه‌سازی ایفا می‌کند (دی‌گریز و همکاران، ۲۰۰۵)؛ بنابراین مقدار K_s در ترکیب BWR نسبت به سایر ترکیب‌ها افزایش یافت. ترکیب WM (سرشاخه‌های هرس درخت کاج و کود گاوی) دارای مقدار گنجایش تبادل کاتیونی (CEC) بیشتری در مقایسه با ترکیب BWR بود؛ در نتیجه مقدار CEC خاک در ترکیب WM افزایش یافت. مقدار CEC کمتر سبب افزایش K_s می‌شود (لی و زانگ، ۲۰۱۳). کمترین نسبت منیزیم به کلسیم خاک در تیمار BWR500 (بیوچار باگاس نیشکر، سرشاخه‌های هرس درخت کاج و پوسته شلتوک برنج در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس) مشاهده شد. با تبدیل پسماند به بیوچار، دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس کاهش شدیدی در نسبت منیزیم به کلسیم برای ترکیب BWR (حدود ۴ برابر کاهش) مشاهده شد. کاهش نسبت منیزیم به کلسیم، سبب بهبود ساختمان خاک و افزایش آبشویی و K_s می‌شود. ترکیب BWR در یک زمان یکسان، مقدار شوری زه‌آب خروجی کمتری نسبت به سایر ترکیب‌ها داشت و نشان‌دهنده خروج سریع نمک‌ها از داخل ستون خاک است که با افزایش پایداری ساختمان (Mg^{2+}/Ca^{2+}) و K_s خاک قابل‌توجه است. با توجه به موارد فوق، ترکیب BWR به‌عنوان اصلاح‌کننده خاک پیشنهاد می‌شود. همچنین با در نظر گرفتن هزینه انرژی مورد نیاز، بیوچار دمای ۳۰۰ درجه، اصلاح‌کننده مناسب‌تری نسبت به بیوچار ۵۰۰ درجه خواهد بود.

- Redistribution of soluble cations within the soil profile. *Agricultural Water Management*. 120: 30–38.
18. Manchanda G. and Garg N. 2008. Salinity and its effects on the functional biology of legumes. *Acta Physiologiae Plantarum*. 30: 595–618.
 19. Mosaddeghi M. Morshedizad M. Mahboubi A. Dexter A. and Schulin R. 2009. Laboratory evaluation of a model for soil crumbling for prediction of the optimum soil water content for tillage. *Soil & Tillage Research*. 105: 242–250.
 20. Nelson P. Ladd J. and Oades J. 1996. Decomposition of ^{14}C -labelled plant material in a salt-affected soil. *Soil Biology and Biochemistry*. 28: 433–441.
 21. Nelson P. Baldock J. and Oades J. 1998. Changes in dispersible clay content, organic carbon content, and electrolyte composition following incubation of sodic soil. *Soil Research*. 36: 883–898.
 22. Rengasamy P. 2002. Transient salinity and subsoil constraints to dryland farming in Australian sodic soils: an overview. *Australian Journal of Experimental Agriculture*. 42: 351–361.
 23. Rengasamy P. 2006. World salinization with emphasis on Australia. *Journal of Experimental Botany*. 57: 1017–1023.
 24. Richards L. A. 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. *Agricultural Handbook No. 60*. Riverside, CA: U.S. Salinity Laboratory.
 25. Wang X. Yang J. Liu G. Yao R. and Yu S. 2015. Impact of irrigation volume and water salinity on winter wheat productivity and soil salinity distribution. *Agricultural Water Management*. 149: 44–54.
 - 16: 195–208.
 5. Chaganti V. N. and Crohn D. M. 2015. Evaluating the relative contribution of physiochemical and biological factors in ameliorating a saline-sodic soil amended with composts and biochar and leached with reclaimed water. *Geoderma* 259: 45–55.
 6. Chaganti V. N. Crohn D. M. and Šimůnek J. 2015. Leaching and reclamation of a biochar and compost amended saline-sodic soil with moderate SAR reclaimed water. *Agricultural Water Management*. 158: 255–265.
 7. De Gryze S. Six J. Brits C. and Merckx R. 2005. A quantification of short-term macroaggregate dynamics: influences of wheat residue input and texture. *Soil Biology and Biochemistry*. 37: 55–66.
 8. Dexter A. R. and Bird N. 2001. Methods for predicting the optimum and the range of soil water contents for tillage based on the water retention curve. *Soil & Tillage Research*. 57: 203–212.
 9. Felton G. and Ali M. 1992. Hydraulic parameter response to incorporated organic matter in the B-horizon. *Transactions of the ASAE*. 35: 1153–1160.
 10. Jien S. H. 2019. Physical characteristics of biochar and their effects on soil physical properties. *Biochar from Biomass and Waste* 21–35.
 11. Gundale M. J. and Deluca T. H. 2006. Temperature and source material influence ecological attributes of ponderosa pine and Douglas-fir charcoal. *Forest Ecology and Management*. 231: 86–93.
 12. Kirkham M. B. 2014. *Principles of Soil and Plant Water Relations*. Academic Press.
 13. Lei O. and Zhang R. 2013. Effects of biochars derived from different feedstocks and pyrolysis temperatures on soil physical and hydraulic properties. *Journal of Soils and Sediments*. 13: 1561–1572.
 14. Leogrande R. and Vitti C. 2019. Use of organic amendments to reclaim saline and sodic soils: a review. *Arid Land Research and Management*. 33: 1–21.
 15. Liang B. Lehmann J. Solomon D. Kinyangi J. Grossman J. O'Neill B. Skjemstad J. Thies J. Luizao F. and Petersen J. 2006. Black carbon increases cation exchange capacity in soils. *Soil Science Society of America Journal*. 70: 1719–1730.
 16. Mace J. and Amrhein C. 2001. Leaching and reclamation of a soil irrigated with moderate SAR waters. *Soil Science Society of America Journal*. 65: 199–204.
 17. Mahmoodabadi M. Yazdanpanah N. Sinobas L. R. Pazira E. and Neshat A. 2013. Reclamation of calcareous saline sodic soil with different amendments (I):