

اثرات بایوچارهای طبیعی و کمپوست زباله شهری بر پارامترهای هیدرولیکی خاک ماسه بادی

- ❖ علی یزدان پناهی؛ دانشجوی کارشناسی ارشد مدیریت مناطق بیابانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران
- ❖ خالد احمدالی*؛ استادیار دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران
- ❖ سلمان زارع؛ استادیار دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران
- ❖ تورج شعبانی عمران؛ کارشناس مسئول دفتر امور بیابان، سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور

چکیده

هدایت هیدرولیکی اشباع یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های فیزیکی خاک است که در مدل‌سازی حرکت آب، انتقال املاح و آلاینده‌ها در محیط‌های متخلخل، تعیین، مقدار و سرعت نفوذ، طراحی زهکش‌ها و دیگر فرآیندهای هیدرولوژیکی کاربرد زیادی دارد. در این مطالعه با افزایش سطوح مختلف (۱، ۳ و ۵ درصد) بایوچار طبیعی و بایوچار کمپوست زباله شهری به خاک جمعاً ۱۶ نوع خاک تهیه شد و اثر افزایش این مواد بر ضریب هدایت هیدرولیکی اشباع بررسی شد. برای این منظور هدایت هیدرولیکی خاک‌ها در آزمایشگاه و به روش بار ثابت اندازه‌گیری شد. سپس مدل‌سازی منحنی مشخصه رطوبتی (SMC) با استفاده از مدل ون‌گونوختن-معلم (VGM) برای همه خاک‌ها انجام گردید و پارامترهای این مدل شامل رطوبت باقی‌مانده (θ_r)، رطوبت اشباع (θ_s)، پارامترهای α ، m و n و نیز هدایت هیدرولیکی اشباع با استفاده از داده‌های زودپافت خاک نظیر درصد ذرات خاک (شن، سیلت، و رس)، چگالی ظاهری و مقادیر ظرفیت زراعی و پژمردگی دائم با نرم‌افزارهای ROSETTA و RETC از طریق مدل‌سازی معکوس تعیین شد. نتایج نشان داد که افزایش بایوچار کمپوست زباله و بایوچار طبیعی سبب کاهش هدایت هیدرولیکی آب در خاک گردید و تیمار ۱۱ که دارای خاک +۵ درصد بایوچار طبیعی +۱ درصد بایوچار زباله شهری بوده با ۶۴ درصد و بعد از آن تیمار ۱۳ با کاهش ۶۱ درصدی بیشترین کاهش K_s شده است. بیشترین و کمترین مقدار K_s مربوط به تیمارهای ۱ و ۱۱ به ترتیب برابر ۷۰۷/۹ و ۲۵۴/۸ سانتیمتر بر روز بود. همچنین اثر تیمارهای مختلف بر همه پارامترهای مدل VGM (θ_r ، θ_s ، m ، n ، α) معنی‌دار بود و در اکثر تیمارهای به‌کاررفته با افزایش درصد بایوچار در خاک پارامترهای θ_r ، n و m افزایش و پارامترهای θ_s ، α و K_s کاهش یافتند.

کلید واژگان: هدایت هیدرولیکی اشباع، بار ثابت، مواد افزودنی طبیعی، خاک شنی

۱. مقدمه

موجب کاهش هدایت هیدرولیکی می‌شود. مواد آلی نقش قابل‌ملاحظه‌ای در بهبود ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و تأمین برخی از عناصر غذایی موردنیاز گیاه داشته و می‌توان از آن‌ها برای اصلاح ویژگی‌های نامطلوب خاک و افزایش پایدار محصول استفاده کرد [۲۳]. در سال‌های اخیر برای بالا بردن میزان ماده آلی خاک از مواد پایداری مانند بایوچارها استفاده می‌شود که در مقابل تجزیه میکروبی بسیار مقاوم است [۱۲]. بایوچار یک محصول غنی از کربن است که از طریق سوختن زیست‌توده در غیاب اکسیژن به دست می‌آید [۱۵]. بایوچارها بسته به مواد اولیه و پارامترهای فرآیند (دما، زمان اقامت، و غیره)، ساختارهای فیزیکی و شیمیایی مختلفی را می‌توانند ایجاد کند که این ساختارها توانایی تغییر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک را دارد [۸ و ۱۸]. بایوچارها دارای خواص مهمی از جمله: سطح ویژه و تخلخل زیاد، چگالی ظاهری کم، محتوای مواد مغذی زیاد، پایداری بالا، ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) و محتوای کربن بالا هستند [۱۵]. همچنین بایوچار باعث بهبود ویژگی‌های خاک مانند ظرفیت نگهداری آب، نفوذ آب به خاک، هوادهی خاک، رشد ریشه، هم‌آوری خاک و ظرفیت نگهداری مواد مغذی می‌گردد [۷ و ۳۳].

در تحقیقات اخیر روش‌های مختلفی نظیر استفاده از انواع مختلف اصلاح‌کننده‌های طبیعی و مصنوعی از جمله بایوچار و کودهای آلی برای اصلاح و یا تقویت ساختمان خاک‌های درشت‌بافت (ماسه‌ای و شنی) پیشنهاد شده است که در ادامه به برخی از آن‌ها اشاره می‌گردد. نتایج به‌کارگیری اصلاح‌کننده ژلهایی با نام تجاری ژالما در غلظت ۰/۴ درصد در یک خاک شنی نشان داد که این ژله‌ها، باعث کاهش پارامتر α از ۰/۰۰۴۳ به ۰/۰۰۳۹ و نیز کاهش K_s به میزان ۷۰ درصد نسبت به شاهد گردید [۲].

مسئله هیدرودینامیک یا حرکت آب در خاک، یکی از مسائل مهم در پروژه‌های نشت آب در سازه‌های خاکی و ایجاد فرسایش درونی^۱ (رگاب)، فشار نشت آب بر سطوح شیب‌دار خاکی و دیوارهای حائل، زهکشی اراضی زراعی و فرودگاه‌ها، انتقال املاح (آلاینده‌ها و یا نمک‌ها)، برآورد نیاز آبی گیاهان، تعیین مقدار آب قابل‌استفاده برای رشد گیاهان، کنترل شوری، مدیریت و برنامه‌ریزی آبیاری و اصلاح خاک‌ها است [۳ و ۲۲]. یک خاک خوب برای رشد گیاهان، خاکی است که در عین حال که مقدار قابل‌توجهی آب در خود ذخیره می‌کند، آب نیز به آسانی از یک نقطه به نقطه دیگر حرکت کند [۳]. هدایت هیدرولیکی از ویژگی‌های مهم فیزیکی خاک است که در علوم آب و خاک اهمیت زیادی دارد. بیان کمی این ویژگی برای برآورد نیاز آبی گیاهان، تعیین مقدار آب قابل‌استفاده برای رشد گیاهان، کنترل شوری، مدیریت و برنامه‌ریزی آبیاری اهمیت دارد. هدایت هیدرولیکی، توانایی خاک برای انتقال آب است [۱۴]. هدایت هیدرولیکی به دو عامل نفوذپذیری ذاتی خاک^۲ و سیالیت^۳ آب بستگی دارد. نفوذپذیری ذاتی خاک به دو عامل شکل ذرات و اندازه قطر ذرات بستگی دارد. سیالیت آب با چگالی آن نسبت مستقیم و با لزوجت آن نسبت معکوس دارد. در اراضی زراعی و عرصه‌های طبیعی عوامل مهم تأثیرگذار بر هدایت هیدرولیکی عبارتند از تراکم و انبساط خاک، پایداری و مقدار مواد آلی خاک [۳ و ۱۰]. در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک که قسمت عمده کشور ایران را نیز شامل می‌شود، عدم وجود پوشش گیاهی کافی و مناسب، عدم مدیریت صحیح استفاده از بقایای گیاهان و همچنین کاهش بازگشت بقایای گیاهی به خاک سبب کمبود مواد آلی شده که این کاهش پایداری خاکدانه‌ها و ساختمان ضعیف خاک،

^۱ Intrinsic permeability^۲ Fluidity^۳ Piping

تأثیر تیمارها کاهش یافت و مقدار آن از ۲/۱۹ سانتیمتر بر ساعت در تیمار رسید [۱۳]. نتایج بررسی اثر بایوچار تهیه شده از کنوکارپوس بر ویژگی‌های هیدرولیکی خاک آهکی با سطوح مصرفی ۱۵ گرم بر کیلوگرم خاک برای ذرات ماسه با اندازه‌های کمتر از ۰/۵، ۱-۰/۵ و ۲-۱ میلی‌متر و در اعماق ۰-۲، ۴-۶ و ۸-۱۰ سانتیمتر نشان داد که بیشترین کاهش ضریب آبگذری در اندازه کمتر از ۰/۵ میلی‌متر و در اعماق ۴-۶ و ۸-۱۰ سانتیمتر اتفاق افتاد [۱۲]. اثرات دینامیکی اندازه و غلظت بایوچار بر خواص هیدرولیکی ماسه نشان داد که مخلوط بایوچار و شن بسته به اندازه ذرات بایوچار می‌تواند هم سبب افزایش و هم سبب کاهش تخلخل و در نتیجه کاهش یا افزایش ضریب آبگذری گردد [۲۸]. بررسی اثر بایوچار حاصل از پوسته بادام‌زمینی بر ضریب آبگذری خاک رس کائولین با تیمارهای ۰، ۵ و ۲۰ درصد وزنی نشان داد که سطوح ۵ و ۲۰ درصد بایوچار ضریب آبگذری را افزایش داد و سبب اصلاح این خاک گردید [۳۴]. در واقع آگاهی از ویژگی‌های فیزیکی خاک خصوصاً هدایت هیدرولیکی خاک در کارهای مربوط به بهسازی خاک‌ها و حاصلخیزی آن‌ها (آهک دادن، اصلاح ساختمان و اصلاح بافت خاک)، بهره‌برداری از منابع آب و اراضی زراعی (اصلاح اراضی، زهکشی، آبیاری، جلوگیری از فرسایش، حفاظت از چشمه‌ها، کانال‌های فاضلاب، سدهای دفنی، حفاظت از رودخانه‌ها، کنترل جریان آب‌های آلوده، ظرفیت تغذیه آب‌های زیرزمینی، تعیین حدود بهره‌برداری از آب‌ها) و تأسیسات مناطق روستایی (کانال‌ها، ایستگاه‌های پمپاژ، چاه‌ها و راه‌های ارتباطی) بسیار حائز اهمیت است. با توجه به مرور منابع ملاحظه می‌گردد که تاکنون مطالعات چندانی در ارتباط با تأثیر بایوچار طبیعی و کمپوست زباله شهری بر هدایت هیدرولیکی خاک‌های ماسه‌بادی که خاک غالب در عرصه‌های طبیعی بیابانی است، انجام نشده است، لذا تحقیق حاضر با هدف بررسی اثرات بایوچار طبیعی و کمپوست زباله شهری بر پارامترهای هیدرولیکی

استفاده از ۳۷/۵ تن در هکتار کمپوست کود گاوی در یک خاک شنی باعث افزایش معنی‌دار پایداری خاکدانه‌ها و ظرفیت نگهداری آب خاک در فاصله مکش‌های ۲۰۰-۵ کیلوپاسکال گردید [۲۰]. به‌کارگیری اصلاح‌کننده‌های پلی‌آکریل‌آمید (PAM)، پومیس و کاه و کلش بر روی لایه سطحی (۵-۰ سانتیمتر) یک خاک لوم شنی باعث کاهش معنی‌دار جرم مخصوص ظاهری ($P < 0.01$) و افزایش معنی‌دار تخلخل کل (به‌طور عمده میکروپروزیته) و در نتیجه کاهش تشکیل سله گردید [۲۵]. نتایج تحقیق اثرات ۴ اصلاح‌کننده آلی (پلی‌آکریل‌آمید، کود دامی، ورمی‌کمپوست و لجن بیولوژیکی) خاک بر پارامترهای هیدرولیکی و انتقال املاح در یک خاک لوم شنی نشان داد که PAM و کود دامی نسبت به سایر اصلاح‌کننده‌ها در سطوح مصرفی به‌کاررفته، به میزان بیشتری در بهبود شرایط فیزیکی خاک مؤثر بودند [۴]. بایوچار کود گاوی باعث افزایش آب قابل‌دسترس گیاه و کاهش هدایت هیدرولیکی اشباع در یک خاک شنی می‌شود [۲۹]. مصرف سطوح مختلف (۰، ۳ و ۶ درصد وزنی) بایوچار حاصل از درخت بلوط تحت فرآیند پیرولیز با دمای حدود ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد، سبب افزایش ظرفیت نگهداری رطوبت خاک به میزان ۲۳ درصد گردید [۵]. نتایج حاصل از افزایش بایوچار حاصل از شلتوک برنج در سطوح ۰، ۲ و ۶ درصد وزنی به یک خاک رسی و به مدت ۱۸۰ روز، نشان داد که در نمونه‌های حاوی بایوچار در مقایسه با تیمار شاهد (بدون بایوچار) ظرفیت نگهداری رطوبت به ترتیب ۲۰، ۱۲، ۳۱ درصد افزایش پیدا می‌کند [۱۷]. نتیجه افزودن لجن فاضلاب شهری با نسبت‌های ۰، ۵۰، ۱۰۰، ۵۰ و ۸۰ به ۲۰ (گرم لجن فاضلاب به گرم خاک) با درجات آبگریزی متفاوت بر ویژگی‌های هیدرولیکی خاک آهکی با بافت لوم سیلتی رسی نشان داد که پارامترهای رابطه ون گنوختن تحت تأثیر آبگریزی خاک قرار گرفتند و با افزایش درجه آبگریزی پارامترهای m و α کاهش و پارامترهای θ_s و m افزایش یافتند. همچنین، هدایت هیدرولیکی اشباع تحت

حاضر، خاک مورد بررسی از ماسه‌های روان بیابان ریگ‌بلند کاشان، برداشت و به پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران جهت انجام آزمایش انتقال داده شد. نمونه خاک پس از خشک شدن در مجاورت هوا، آسیاب و از الک ۲ میلی‌متری جهت انجام آزمایشات عبور داده شد. آزمایش‌های مختلف فیزیکی و شیمیایی شامل تعیین بافت خاک به روش هیدرومتری [۹]، هدایت الکتریکی (EC متر) [۲۴]، واکنش خاک در عصاره اشباع (pH متر) [۱۶]، مقدار ماده آلی به روش اکسیداسیون با اسید کرومیک و سپس تیتراژ کردن توسط فروآمونیم سولفات [۱۹]، نیتروژن کل به روش کج‌لدال [۶]، آهک به روش خنثی‌سازی با اسید کلریدریک [۱۶] و فسفر قابل استفاده توسط عصاره‌گیری با بیکربنات سدیم ۰/۵ نرمال [۲۱] بر روی خاک انجام شد. مشخصات اندازه‌گیری شده خاک مورد مطالعه، در جدول (۱) آمده است.

در یک خاک شنی انجام شد. بررسی اثر افزایش سطوح مختلف بایوچار طبیعی و بایوچار کمپوست زباله شهری به خاک بر ضریب هدایت هیدرولیکی اشباع و مدل‌سازی منحنی مشخصه رطوبتی با استفاده از مدل ون‌گنوختن-معلم^۱ با نرم‌افزارهای ROSETTA و RETC از طریق مدل‌سازی معکوس می‌باشد.

۲. روش شناسی

۱.۲. تهیه خاک

ماسه‌های بادی وسعت زیادی از بیابان‌های کشور را دربر گرفته است که اغلب تپه‌های ماسه‌ای و مناطق درگیر با گردوغبار نیز دارای خاک ماسه‌بادی هستند. به همین دلیل کارهای لازم در اصلاح این‌گونه خاک‌ها جهت استقرار پوشش گیاهی و متعاقباً کنترل گردوغبار و کاهش فرسایش بادی در کشور بسیار مهم است؛ لذا در مطالعه

جدول ۱. خصوصیات اولیه خاک مورد مطالعه

ردیف	ویژگی	واحد	مقدار
۱	اسیدیته	-	۷/۲۷
۲	هدایت الکتریکی	(dS/m)	۱/۳
۳	ماسه	(درصد)	۹۲/۵۶
۴	رس	(درصد)	۷/۴۴
۵	سیلت	(درصد)	۰
۶	کلاس بافت خاک	-	ماسه‌ای
۷	نیتروژن	(درصد)	۲/۶۳
۸	فسفر قابل جذب	(ppm)	۰/۴۲
۹	آهک	(درصد)	۱۵/۹۷
۱۰	ماده آلی	(درصد)	۰/۳۳

شد. برای تهیه بایوچار کمپوست زباله شهری، مواد اولیه کمپوست زباله از بزرگ‌ترین مجتمع دفع و پردازش پسماندهای شهر تهران، مجتمع آرادکوه واقع در جنوب

۲.۲. تهیه بایوچار

در این مطالعه از دو نوع بایوچار یکی بایوچار حاصل از کمپوست زباله شهری و دیگری بایوچار طبیعی استفاده

^۱ Van Genuchten - Mualem

خاک به‌علاوه ۳ درصد بایوچار طبیعی، تیمار هفت: خاک به‌علاوه ۳ درصد بایوچار طبیعی به‌علاوه ۱ درصد بایوچار زباله شهری، تیمار هشت: خاک به‌علاوه ۳ درصد بایوچار طبیعی به‌علاوه ۳ درصد بایوچار طبیعی به‌علاوه ۵ درصد بایوچار زباله شهری، تیمار ۱۰: خاک به‌علاوه ۵ درصد بایوچار طبیعی، تیمار ۱۱: خاک به‌علاوه ۵ درصد بایوچار طبیعی به‌علاوه ۱ درصد بایوچار زباله شهری، تیمار ۱۲: خاک به‌علاوه ۵ درصد بایوچار طبیعی، تیمار ۱۳: خاک به‌علاوه ۵ درصد بایوچار طبیعی به‌علاوه ۵ درصد بایوچار زباله شهری، تیمار ۱۴: خاک به‌علاوه ۱ درصد بایوچار زباله شهری، تیمار ۱۵: خاک به‌علاوه ۳ درصد بایوچار زباله شهری و تیمار ۱۶: شامل خاک به‌علاوه ۵ درصد بایوچار زباله شهری بود. پس از تهیه سطوح ۱۶ گانه خاک، آزمایش‌های اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی با سه تکرار، مطابق زیر انجام گرفت.

۴.۲. اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی اشباع

(K_s) به روش بار ثابت

پارامترهای لازم برای محاسبه هدایت هیدرولیکی اشباع به روش بار ثابت با استفاده از دستگاهی که شماتیک آن در شکل (۱) نشان داده شده، اندازه‌گیری شد.

سپس مقدار هدایت هیدرولیکی اشباع از رابطه (۱) محاسبه شد [۲۶].

$$K = \frac{\Delta V \times L}{A \times \Delta h \times \Delta t} \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن ΔV : حجم آب عبوری از ستون خاک (m^3) در بازه زمانی Δt (s)، K : هدایت هیدرولیکی اشباع (ms^{-1})، A : سطح مقطع ستون خاک (m^2)، Δh : اختلاف گرادیان هیدرولیکی بین نقطه خروجی و سطح

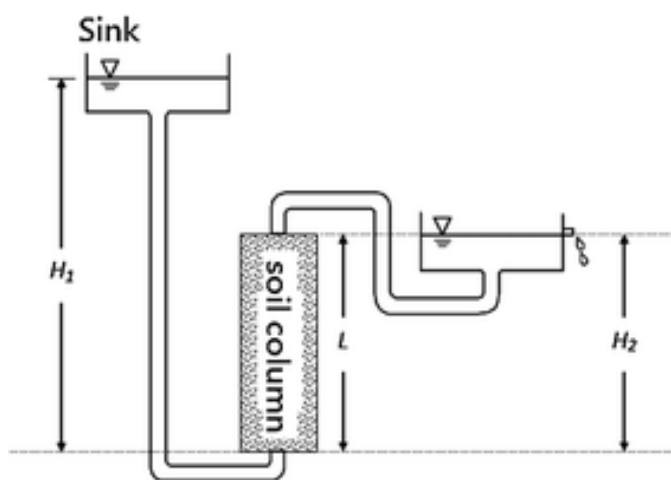
شهر کهریزک و در ابتدای جاده قدیم تهران - قم تهیه گردید. پس از گذشت هفت روز از پهن کردن کمپوست‌های زباله شهری در گلخانه و خشک شدن آن، اقدام به جمع‌آوری آن‌ها گردید. سپس جهت یکنواخت کردن، ذرات خرد شده و از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند. تولید بایوچار در مرکز تحقیقات حفاظت خاک و آب دانشگاه تهران واقع در کوهین به این صورت انجام شد که ابتدا مواد اولیه کمپوست زباله شهری در داخل باکس فلزی به ابعاد 50×30 سانتی‌متر قرار داده شد. سپس جهت حذف اکسیژن موجود، شمعی روشن روی مواد اولیه کمپوست درون باکس قرار داده شد. در ادامه کوره الکتریکی در دمای 550 درجه سانتیگراد تنظیم شده و مواد اولیه به مدت سه ساعت درون دستگاه در معرض حرارت قرار داده شد. همچنین بایوچار طبیعی از یک معدن واقع در شهرستان کوهبنان واقع در استان کرمان تهیه شد. این بایوچار کاملاً طبیعی بوده و بر اساس مطالعات زمین‌شناسی، در فرآیندی طبیعی در طول 650 میلیون سال پیش تشکیل گردیده است. پس از تهیه بایوچارهای کمپوست زباله شهری و بایوچار طبیعی با اختلاط نسبت‌های مختلف این مواد با خاک، تیمارهای مختلف بستر ایجاد گردید.

۳.۲. تیمارهای آزمایش

تیمارهای مختلف خاک شامل ۱۶ سطح، حاصل از اختلاط نسبت‌های ۰، ۱، ۳ و ۵ درصد بایوچارهای مذکور به خاک، به‌صورت زیر است: تیمار اول: شاهد (خاک بدون مواد افزودنی)، تیمار دوم: خاک به‌علاوه ۱ درصد بایوچار طبیعی، تیمار سوم: خاک به‌علاوه ۱ درصد بایوچار طبیعی به‌علاوه ۱ درصد بایوچار زباله شهری، تیمار چهار: خاک به‌علاوه ۱ درصد بایوچار طبیعی به‌علاوه ۳ درصد بایوچار زباله شهری، تیمار پنجم: خاک به‌علاوه ۱ درصد بایوچار طبیعی به‌علاوه ۵ درصد بایوچار زباله شهری، تیمار ششم:

¹ Saturated hydraulic conductivity

آن بسته شد. پس از قرائت ارتفاع ستون خاک و قطر استوانه، یک هد ثابت آب روی ستون خاک ایجاد شد و حجم آب عبوری از ستون خاک در بازه‌های زمانی مشخص اندازه‌گیری شد.



شکل ۱. شماتیک و تصویر دستگاه اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی در روش بار افتان [۳۲]

آب ثابت شده روی ستون خاک (m) و L: طول ستون خاک (m)، است. جهت اندازه‌گیری پارامترهای رابطه (۱) برای هر کدام از سطوح ۱۶ گانه خاک‌های مورد مطالعه، ابتدا استوانه دستگاه را با خاک مورد نظر پر کرده و درب



زراعی و پژمردگی دائم، و در نرم‌افزار ROSETTA و RETC برآورد شد.

۶.۲. تحلیل آماری

بررسی اثرات هر تیمار از طریق محاسبه جدول تجزیه واریانس (ANOVA) و مقایسه میانگین‌ها از طریق آزمون دانکن ($P < 0.01$) و با استفاده از نرم‌افزار SPSS 22.0، مورد ارزیابی قرار گرفت.

۳. نتایج

در جدول (۱) برخی ویژگی‌های اولیه خاک مورد آزمایش آورده شده است. بر اساس این جدول مشاهده می‌شود که خاک از نظر شوری با EC پایین فاقد مشکل شوری بوده و دارای اسیدیتته قلیایی کم می‌باشد. خاک مورد استفاده دارای ماده آلی کم و ماسه بسیاری بوده و در کلاس بافت ماسه‌ای قرار می‌گیرد. همچنین نتایج

۵.۲. تعیین پارامترهای هیدرولیکی

از مدل‌های مختلفی برای برازش داده‌های مربوط به منحنی مشخصه رطوبتی و هدایت هیدرولیکی استفاده می‌شود که بهترین مدل تا به امروز مدل ون‌گنوختن-معلم (۱۹۸۰) است که در این تحقیق نیز از این مدل (رابطه ۲) استفاده گردید [۳۰].

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha h)^n]^m} & \forall h < 0 \\ \theta_s & \forall h \geq 0 \end{cases} \quad \text{رابطه (۲)}$$

در این رابطه $(L^3 L^{-3}) \theta_s, (L^3 L^{-3}) \theta_r, (L^3 L^{-3}) \theta(h)$ به ترتیب رطوبت در مکش h، رطوبت باقیمانده و رطوبت اشباع، $\alpha (L^{-1})$ عکس نقطه ورود هوا، m و n پارامترهای شکل می‌باشند که شش ویژگی مستقل شامل رطوبت باقی‌مانده (θ_r) ، رطوبت اشباع (θ_s) ، پارامترهای α, m, n و هدایت هیدرولیکی اشباع با استفاده از داده‌های زود یافت خاک نظیر درصد ذرات خاک (شن، سیلت، و رس)، چگالی ظاهری و مقادیر رطوبت نقاط ظرفیت

زباله شهری و بایوچار طبیعی به خاک بر کلیه پارامترهای مدل ون گنوختن - معلم در سطح یک درصد اثر معنی دار داشت.

حاصل از تجزیه واریانس اثرات مواد افزودنی به خاک (بایوچار کمپوست زباله شهری و بایوچار طبیعی) بر پارامترهای مدل ون گنوختن-معلم در جدول (۲) آورده شده است. نتایج نشان می دهد افزودن بایوچار کمپوست

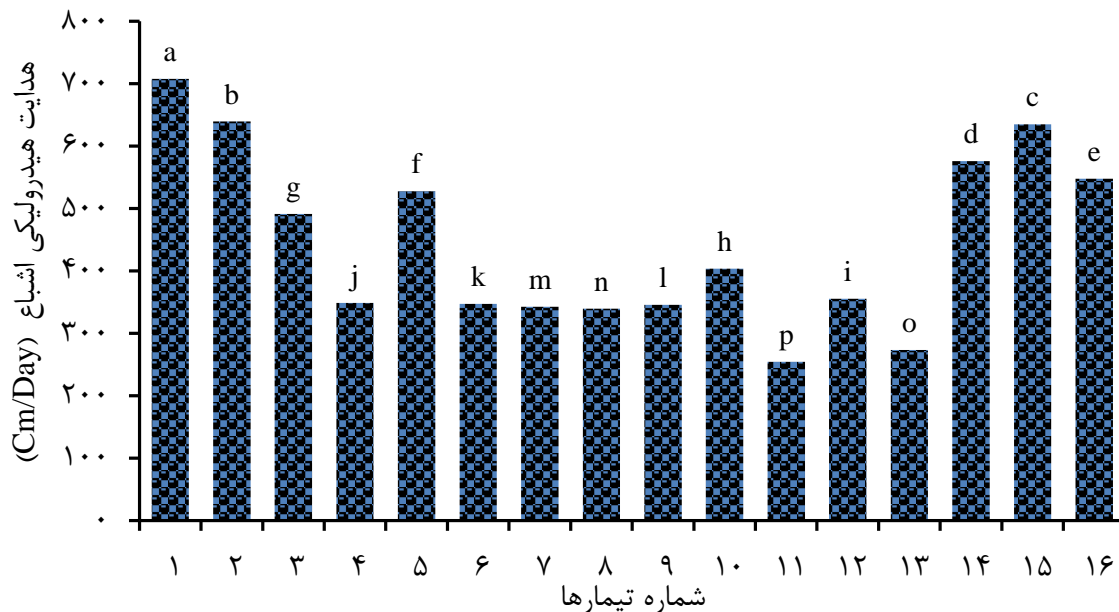
جدول ۲. تجزیه واریانس نتایج مربوط به اثرات بایوچار بر پارامترهای مختلف مدل ون گنوختن-معلم

میانگین مربعات						df	منبع تغییر
Ks (cmday ⁻¹)	m	n	α (L ⁻¹)	θ_s (L ³ L ⁻³)	θ_r (L ³ L ⁻³)		
۶۱۰۴۴**	۰/۰۰۰۱**	۰/۰۰۱**	۰/۰۰۰۱**	۰/۰۰۲**	۰/۰۰۰۱۷**	۱۵	تیمار
۰/۰۰۰۱	۰/۱۳×۱۰ ^{-۷}	۰/۸۳×۱۰ ^{-۶}	۰/۰۴×۱۰ ^{-۵}	۰/۳۲×۱۰ ^{-۶}	۰/۶۴×۱۰ ^{-۱۰}	۲	تکرار
۰/۰۰۱	۰/۵۹×۱۰ ^{-۸}	۰/۱۳×۱۰ ^{-۶}	۰/۱۴×۱۰ ^{-۵}	۰/۱۲×۱۰ ^{-۶}	۰/۹۷×۱۰ ^{-۱۰}	۳۰	خطا
						۴۸	کل

** معنی داری در سطح یک درصد

درصد بایوچار زباله شهری) بیشترین کاهش (۶۴ درصد) را به دنبال داشته است. البته باید ذکر کرد که تیمار ۱۳ نیز تفاوت چندانی با تیمار ۱۱ نداشته و سبب کاهش ۶۱ درصدی Ks شده است. بیشترین و کمترین مقدار Ks مربوط به تیمارهای ۱ و ۱۱ به ترتیب برابر ۷۰۷/۹ و ۲۵۴/۸ سانتیمتر بر روز بود.

با توجه به شکل (۲) ملاحظه می شود که افزودن بایوچار طبیعی و بایوچار کمپوست زباله به خاک، اثر معکوس و معنی داری بر هدایت هیدرولیکی اشباع خاک (Ks) داشت، به طوری که با افزایش درصد بایوچارهای کمپوست زباله و بایوچار طبیعی، مقدار Ks خاک کاهش یافت. تیمار ۱۱ (خاک + ۵ درصد بایوچار طبیعی + ۱



شکل ۲. اثر تیمارهای مختلف مواد افزودنی به خاک بر هدایت هیدرولیکی اشباع

همچنین بر اساس جدول (۳) ملاحظه می‌گردد که مقدار رطوبت باقی‌مانده خاک (θr) در تیمارهای ۱۳ و ۶ به ترتیب برابر ۲/۶۸ و ۱/۹۲ درصد، بیشترین و کمترین مقدار را داشتند که به ترتیب افزایش ۲۹ درصدی و کاهش ۷ درصدی را به دنبال داشت. اثر مواد افزودنی (بایوچارهای طبیعی و کمپوست زباله) در همه تیمارها به جز تیمارهای ۵، ۹، ۱۰، ۱۱، ۱ و ۷، ۴، ۲ و ۳ و ۸ بر θr در سطح ۱ درصد معنی‌دار بود. نتایج مقایسه میانگین در جدول (۳) نشان می‌دهد که بیشترین کمترین مقدار θs به ترتیب مربوط به تیمارهای ۱۵ و ۱۱ بود که به ترتیب افزایش ۶ درصدی و کاهش ۱۱ درصدی نسبت به تیمار شاهد داشتند. همچنین اثر مقدار مواد افزودنی در تمام تیمارها به جز تیمارهای ۸، ۱۰ و ۱۳ بر θs معنی‌دار بود.

آزمایشات نشان داد که تیمارهایی که محتوی درصد بایوچار کمپوست زباله بالایی بودند در ابتدا نسبت به نفوذ آب مقاومت نشان دادند (در لحظات اولیه تماس آب با خاک نیروی پیوستگی بین مولکول‌های آب بیشتر از نیروی چسبندگی بین مولکول‌های آب و ذرات خاک است) و سرعت نفوذ اولیه آب در آن‌ها کم بود اما بعد از خیس شدن ذرات سطحی خاک و نفوذ آب به داخل خاک، نسبت به تیمارهای با مقدار بایوچار کمپوست زباله کمتر، آب بیشتری در ماتریکس خاک جذب کرده و K_s کمتری نسبت به تیمار شاهد و تیمارهای با درصد کمتر بایوچار داشتند.

بیشترین و کمترین میزان رطوبت ظرفیت زراعی مربوط به تیمارهای ۵ و ۱ و این مقادیر برای نقطه پژمردگی دائم مربوط به تیمارهای ۱۶ و ۶ می‌باشد.

جدول ۳. مقایسه میانگین‌های ضرایب معادلات منحنی مشخصه رطوبتی در تیمارهای مختلف با آزمون دانکن

شماره تیمار	θr	θs	α	n	m	K_s
۱	۰/۰۲۰۷ h	۰/۵۳۷ r	۰/۰۵۵۰ a	۱/۲۶۵ h	۰/۲۰۹ h	۷۰۷/۹ a
۲	۰/۰۲۰۴ i	۰/۵۲۷ f	۰/۰۵۱۲ b	۱/۲۶۸ g	۰/۲۱۱ g	۶۳۹/۴ b
۳	۰/۰۲۰۲ ij	۰/۵۲۲ g	۰/۰۳۸۳ g	۱/۲۶۸ g	۰/۲۱۱ g	۴۹۱/۹ g
۴	۰/۰۲۰۸ h	۰/۴۹۵ k	۰/۰۳۱۴ j	۱/۲۸۷ d	۰/۲۲۳ d	۳۴۸/۱ j
۵	۰/۰۲۱۱ g	۰/۵۶۵ b	۰/۰۳۳۸ i	۱/۲۴۶ k	۰/۱۹۷ k	۵۲۷/۵ f
۶	۰/۰۱۹۲ k	۰/۴۸۸ m	۰/۰۳۰۷ j	۱/۲۹۱ b	۰/۲۲۶ b	۳۴۷/۹ k
۷	۰/۰۲۰۷ h	۰/۵۰۱ j	۰/۰۲۸۶ m	۱/۲۸۶ e	۰/۲۲۲ e	۳۴۲/۵ m
۸	۰/۰۲۰۱ j	۰/۴۹۳ l	۰/۰۲۹۸ kl	۱/۲۸۹ c	۰/۲۲۴ c	۳۳۹/۸ n
۹	۰/۰۲۱۳ g	۰/۵۰۹ h	۰/۰۲۶۶ n	۱/۲۸۵ e	۰/۲۲۲ e	۳۴۵/۶ l
۱۰	۰/۰۲۴۲ d	۰/۴۹۳ l	۰/۰۴۸۷ c	۱/۲۸۳ f	۰/۲۲۰ f	۴۰۳/۶ h
۱۱	۰/۰۲۴۲ d	۰/۴۷۶ n	۰/۰۳۰۶ jk	۱/۳۰۱ a	۰/۲۳۱ a	۲۵۴/۸ p
۱۲	۰/۰۲۵۴ c	۰/۵۰۵ i	۰/۰۳۶۰ h	۱/۲۸۲ f	۰/۲۲۰ f	۳۵۵/۲ i
۱۳	۰/۰۲۶۸ a	۰/۴۹۴ l	۰/۰۲۹۶ l	۱/۲۹۲ b	۰/۲۲۶ b	۲۷۳/۷ o
۱۴	۰/۰۲۱۶ f	۰/۵۴۴ d	۰/۰۴۱۶ f	۱/۲۵۶ i	۰/۲۰۴ i	۵۷۶/۱ d
۱۵	۰/۰۲۲۸ e	۰/۵۷۰ e	۰/۰۴۳۸ e	۱/۲۴۰ l	۰/۱۹۳ l	۶۳۴/۷ c
۱۶	۰/۰۲۶۱ b	۰/۵۴۹ c	۰/۰۴۴۷ d	۱/۲۵۴ j	۰/۲۰۳ j	۵۴۷/۷ e

*میانگین‌های مربوط به هر ستون که دارای حروف لاتین مشترک هستند در سطح احتمال ۱٪ تفاوت معنی‌داری با یکدیگر ندارند.

۱۱ و ۱۲ تفاوت معنی‌داری نداشت، ولی در بین بقیه تیمارها تفاوت معنی‌دار بود. پارامتر α در تیمار شاهد

همچنین بر اساس نتایج مقایسه میانگین‌ها (جدول ۳)، ملاحظه می‌شود که پارامتر α بین تیمارهای ۴، ۶، ۸،

و ۵ درصد) بر ضریب هدایت هیدرولیکی اشباع بررسی شد. همچنین مدل سازی منحنی مشخصه رطوبتی با استفاده از مدل ون گنوختن-معلم برای ۱۶ سطح خاک انجام گردید و پارامترهای این مدل شامل رطوبت باقی مانده (θ_r)، رطوبت اشباع (θ_s)، پارامترهای n ، m ، α و هدایت هیدرولیکی اشباع با استفاده از داده‌های زود یافت خاک نظیر درصد ذرات خاک (ماسه، سیلت، و رس)، چگالی ظاهری و مقادیر رطوبت نقاط ظرفیت زراعی و پژمردگی دائم، و نرم افزار ROSETTA و RETC از طریق مدل سازی معکوس برای هر ۱۶ نوع خاک تعیین شد. نتایج نشان داد که افزایش بایوچار کمپوست زباله و بایوچار طبیعی موجب کاهش هدایت هیدرولیکی و نگهداشت بیشتر آب در خاک گردید و با افزایش سطح مصرف بایوچار در خاک، کاهش بیشتری در هدایت هیدرولیکی اتفاق افتاده است. به طوری که، در تیمار ۱۱ (خاک + ۵ درصد بایوچار طبیعی + ۱ درصد بایوچار زباله شهری) بیشترین کاهش (۶۴ درصد) را به دنبال داشته است. البته باید ذکر کرد که تیمار ۱۳ نیز تفاوت چندانی با تیمار ۱۱ نداشته و سبب کاهش ۶۱ درصدی K_s شده است. بیشترین و کمترین مقدار K_s مربوط به تیمارهای ۱ و ۱۱ به ترتیب برابر $707/9$ و $254/8$ سانتیمتر بر روز بود که این امر را می توان به درصد ماده آلی بیشتر این تیمارها مرتبط دانست که این یافته با نتایج [۱، ۴، ۱۲، ۱۳، ۲۸، ۳۴]، که همگی به مطالعات مشابهی در زمینه تأثیر افزودنی آلی بر خاک پرداخته‌اند، مطابقت دارد. همچنین اثر تیمارهای مختلف بر همه پارامترهای مدل ون گنوختن-معلم (α ، n ، m ، θ_s ، θ_r) معنی دار بود. در اکثر تیمارهای به کار رفته با افزایش درصدهای مصرفی بایوچار در خاک پارامترهای θ_r ، n و m افزایش و پارامترهای α ، θ_s و K_s کاهش یافتند، که این کاهش و یا افزایش با نتایج حاصل از پژوهش [۲، ۴، ۱۳ و ۳۱]، که تأثیر افزودن مواد آلی و اصلاح کننده‌ها بر پارامترهای هیدرولیکی را گزارش کردند، همخوانی دارد. در نتیجه وجود ذرات معدنی و آلی موجود

بیشترین (0.55 cm^{-1}) و در تیمار ۹ کمترین (0.27 cm^{-1}) مقدار را داشت. افزایش مقدار بایوچار مصرفی در خاک، باعث کاهش پارامتر α از طریق کاهش قطر درشت‌ترین منافذ و در نتیجه افزایش مکش ورود هوا در خاک نسبت به تیمار شاهد گردید. به نظر می‌رسد تیمارهای حاوی بایوچار با کاهش درصد منافذ ماکرو و افزایش منافذ میکرو نسبت به تیمار شاهد باعث کاهش قطر درشت‌ترین منافذ (منفذ متناظر با مکش ورود هوا در خاک) و در نتیجه کاهش پارامتر α شده است. اثر تیمارهای مواد افزودنی به خاک بر پارامتر n در همه تیمارها به جز ۶ و ۱۳، ۹ و ۷، ۱۲ و ۱۰، ۳ و ۲ معنی دار بود. بیشترین مقدار n ، در تیمار ۱۱ و کمترین در تیمار ۱۵ بوده که به ترتیب افزایش ۲/۷ درصدی و کاهش ۲ درصدی به دنبال داشته‌اند. مقدار پارامتر m در بین تمامی تیمارها به جز ۶ و ۱۳، ۹ و ۷، ۱۲ و ۱۰، ۳ و ۲ اثر معنی داری داشت (جدول ۳). همچنین با افزایش بایوچار در خاک مقدار پارامتر m ، در تیمارهای ۵، ۱۴، ۱۵ و ۱۶ کاهش یافت.

اتلاف آب و عناصر غذایی در اثر آبشویی در خاک‌های شنی و ماسه‌ای زیاد است. استفاده از اصلاح کننده‌ها نظیر افزودن بایوچار طبیعی و بایوچار کمپوست زباله شهری در سطوح مختلف به این گونه خاک‌ها، از طریق ایجاد خاکدانه‌های به نسبت پایدار و کم کردن خلل و فرج درشت، باعث کاهش معنی دار K_s نسبت به خاک شنی و ماسه‌ای می‌گردد. استفاده از این افزودنی‌ها علاوه بر منافع اقتصادی که از طریق کاهش استفاده از کودها (به دلیل کاهش آبشویی عناصر از ماتریکس خاک)، سبب کاهش آلودگی سفره‌های آب زیرزمینی و حفظ محیط زیست نیز می‌شود.

۴. بحث و نتیجه گیری

در این مطالعه اثر افزایش سطوح مختلف بایوچار طبیعی و بایوچار کمپوست زباله شهری در سطوح (۱، ۳

سیاسگزاری

نویسندگان این مقاله بر خود لازم می‌دانند که از پشتیبانی صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور در تأمین اعتبار این پژوهش تشکر و قدردانی نمایند.

در بایوچار کمپوست زباله و بایوچار طبیعی موجب پر شدن خلل و فرج درشت خاک شده که منجر به افزایش نگهداشت میزان نفوذ آب به درون خاک و کاهش هدایت هیدرولیکی آن گردید.

References

- [1] Abbasi, F. (2017). *Advanced Soil Physics*, 4th Edition, University of Tehran press, 320pp.
- [2] Al-Darby, A.M. 1996. The hydraulic properties of a sandy soil treated with gelforming soil conditioner. *Soil Technology*, 9: 15-28.
- [3] Alizadeh, A. (2013). *Soil Physics*, 6th Edition, University of Imam Reza, 568pp.
- [4] Asghari, Sh., Abbasi, F., Neyshabouri, M.R., Oustsan, Sh, and Aliasgharzad, A. (2011). Effects of Four Organic Soil Conditioners on Some Hydraulic and Solute Transport Parameters in a Sandy Loam Soil. *Journal of Water and Soil Conservation*, Vol. 18(2), 177-194.
- [5] Basso, A. S. 2012. Effect of fast pyrolysis biochar on physical and chemical properties of a sandy soil. Master's Thesis, Iowa State University, Ames, 69 pp.
- [6] Bremner, J., Sparks, D., Page, A., Helmke, P., Loeppert, R., Soltanpour, P., Sumner, M. (1996). Nitrogen-total. *Methods of soil analysis. Part 3-Chemical methods*. 1085-1121.
- [7] Downie, A., & Van Zwieten, L. (2013). Biochar: A Coproduct to Bioenergy from Slow-Pyrolysis Technology *Advanced Biofuels and Bioproducts* (pp. 97-117): Springer.
- [8] Downie, A., Crosky, A. and Munroe, P. 2009. Physical properties of biochar. In Lehmann, J., and S. Joseph (eds) *Biochar for Environmental Management - Science and Technology*. p. 13-32.
- [9] Gee, G. W., & Bauder, J. W. (1986). Particle-size analysis1. *Methods of soil analysis: Part 1—Physical and mineralogical methods (methodsofsoilan1)*, 383-411.
- [10] Ghazan Shahi, j. (1995). *Soil Physics*. 1th Edition, University of Tehran press, 467pp.
- [11] Glaser, B., Lehmann, J. and Zech, W. 2002. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal—a review. *Biology and Fertility of Soils*, 35: 219-230
- [12] Ibrahim, A., Usman, A. R. A., Al-Wabel, M. I., Nadeem, M., Ok, Y. S., & Al-Omran, A. (2017). Effects of conocarpus biochar on hydraulic properties of calcareous sandy soil: influence of particle size and application depth. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 63(2), 185-197.
- [13] Karimian, N., Ghorbani Dashtaki, Sh., and Tabatabaei, H. (2016). Hydraulic properties under different water repellency levels, *Journal of Water and Soil Resources conservation*, vol 6(1), 75-86. Klute, A. (1986) *Methods of Soil Analysis. Part 1, Physical and Mineralogical Methods*. Madison, Wisconsin, USA.
- [14] Lehmann, J., & Joseph, S. (2015). *Biochar for environmental management: science, technology and implementation*: Routledge.
- [15] Loeppert, R.H., and Suarez. L. 1996. Carbonate and gypsum. P 437-474. In: Sparks, D.L., A.L. Page, P.A. Helmke and R.H. Loeppert, (Eds.), *Methods of soil analysis, Part 3*, Soil Science Society of America, Madison, WI.
- [16] Lu, S. G., Sun, F. F., & Zong, Y. T. (2014). Effect of rice husk biochar and coal fly ash on some physical properties of expansive clayey soil (Vertisol). *Catena*, 114, 37-44.
- [17] Major, J., Lehmann, J., Rondon, M., & Goodale, C. (2010). Fate of soil-applied black carbon: downward migration, leaching and soil respiration. *Global Change Biology*, 16(4), 1366-1379.

- [18] Nelson, D., & Sommers, L. E. (1982). Total carbon, organic carbon, and organic matter1. *Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties (methodsofsoilan2)*, 539-579.
- [19] Nyamangara, J., Gotosa, J., and Mpfu, S.E. 2001. Cattle manure effects on structural stability and water retention capacity of a granitic sandy soil in Zimbabwe. *Soil Till. Res.* 62: 157-162.
- [20] Olsen, S. R. (1954). Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. United States Department of Agriculture; Washington. Rahimi, H. (). *Soil Mechanics*, 3th Edition, Danesh and Fan of press, 622pp.
- [21] Razzaghi, F., and Rezaie, N. (2017). Effects of different levels of biochar on soil physical properties with different textures, *Journal of Water and Soil Resources conservation*. Vol 7(1), 75-88.
- [22] Rhoades, J. D. (1996). Salinity: Electrical conductivity and total dissolved solids. *Methods of Soil Analysis Part 3—Chemical Methods, (methodsofsoilan3)*, 417-435.
- [23] Sadeghian, N., Neyshabouri, M.R., Jafarzadeh, A.A., and Turchi, M. 2006. Effects of three soil conditioners on the physical properties of soil surface layer. *Iranian J. Agric. Sci.* 37: 2. 351-341. (In Persian)
- [24] Stibinger, J. (2014). Examples of Determining the Hydraulic Conductivity of Soils: Theory and Applications of Selected Basic Methods: *University Handbook on Soil Hydraulics*. Jan Evangelista Purkyně University, Faculty of the Environment.
- [25] Thomas, G. W. (1996). Soil pH and soil acidity. *Methods of Soil Analysis Part 3—Chemical Methods, (methodsofsoilan3)*, 475-490.
- [26] Trifunovic, B., Gonzales, H. B., Ravi, S., Sharratt, B. S., & Mohanty, S. K. (2018). Dynamic effects of biochar concentration and particle size on hydraulic properties of sand. *Land Degradation & Development*.
- [27] Uzoma, K.C., Inoue, M. Andry, H. Fujimaki, H. Zahoor, A. and Nishihara, E. 2011. Effect of cow manure biochar on maize productivity under sandy soil condition. *Soil use and Management*, 27: 205-212.
- [28] Van Genuchten, M.Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of American Journal*, 44: 892-898
- [29] Vervoort, R.W., Radcliffe, D.E., and West, L.T. 1999. Soil structure development and preferential solute flow. *Water Resources Research*, 35: 913-928.
- [30] Wang, T. Y., Lin, L. L., & Tsai, Y. Z. (2017). Effect of Gravel Content on Saturated Hydraulic Conductivity in Sand. In *Geotechnical Hazards from Large Earthquakes and Heavy Rainfalls* (pp. 163-169). Springer, Tokyo.
- [31] Wong, J. T. F., Chen, Z., Chen, X., Ng, C. W. W., & Wong, M. H. (2017). Soil-water retention behavior of compacted biochar-amended clay: a novel landfill final cover material. *Journal of soils and sediments*, 17(3), 590-598.
- [32] Wong, J. T. F., Chen, Z., Wong, A. Y. Y., Ng, C. W. W., & Wong, M. H. (2018). Effects of biochar on hydraulic conductivity of compacted kaolin clay. *Environmental Pollution*, 234, 468-472.

