نشریه دانش آب و خاک / جلد۲۴ شماره۴ صفحه‌های ۱۶۹ تا ۱۸۳/ سال ۱۳۹۳

اثرات لجن فاضلاب شهری اردبیل بر برخی خصوصیات فیزیکی و هیدرولیکی یک خاک درشت بافت زیر کشت گندم

سولماز فتح العلومی[۱] و شکراله اصغری*[۲]

تاریخ دریافت: ۹۲/۰۶/۳۱ تاریخ پذیرش: ۹۲/۱۱/۱۲

[۱]- دانشجوی سابق کارشناسی ارشد گروه علوم خاک، دانشکده فناوری کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی

[۲]- استادیار گروه علوم خاک، دانشکده فناوری کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: sh_asghari2005@yahoo.com

چکیده

خاک‌های درشت بافت عموماً دارای ماده آلی ناچیز و ساختمان ناپایدار هستند. استفاده از مواد زائد ارزان قیمت مثل لجن فاضلاب یکی از روش‌های رفع یا کاهش مشکلات خاک‌های مذکور می‌باشد. هدف از تحقیق حاضر بررسی تأثیر لجن فاضلاب شهری اردبیل بر برخی خصوصیات فیزیکی و هیدرولیکی یک خاک لوم شنی منتخب از دشت اردبیل زیر کشت گندم بود. آزمایش گلخانه‌ای به صورت طرح بلوک‌های کامل تصادفی در ۵ تیمار و ۴ تکرار اجرا گردید. تیمارها شامل مقادیر ۰ (شاهد)، ۱۱/۵، ۲۳، ۴۶ و ۶۹ گرم لجن هواخشک در کیلوگرم خاک هوا خشک که به ترتیب معادل صفر، ۳۰، ۶۰، ۱۲۰ و ۱۸۰ تن لجن در هکتار بودند. پس از اختلاط لجن با خاک، بذر گندم بهاره در گلدان‌ها کشت گردید. اندازه‌گیری پارامترها ۴ ماه بعد از اختلاط لجن با خاک و پس از برداشت گندم انجام گرفت. نتایج نشان داد که کلیه مقادیر مصرفی لجن از ۳۰ تا ۱۸۰ تن در هکتار به ترتیب و به طور معنی‌دار باعث کاهش جرم مخصوص ظاهری به میزان ۳/۳۴ تا ۹/۸۸ درصد، جرم مخصوص حقیقی به میزان ۱/۳۲ تا ۴/۴۳ درصد، منافذ ماکرو ($> 75\ \mu m$) به میزان ۹/۱۲ تا ۱۴۵/۸ درصد و هدایت هیدرولیکی اشباع به میزان ۱۲۹/۳ تا ۴۴۰/۵ درصد نسبت به شاهد گردید. کاربرد لجن در مقادیر ۳۰ تا ۱۸۰ تن در هکتار، کربن آلی را به میزان ۲۱/۹۴ تا ۱۷۶ درصد، میانگین وزنی قطر خاکدانه (MWD) را به میزان ۶۴/۷۸ تا ۲۳۳ درصد، تخلخل کل را به میزان ۱/۲۴ تا ۶ درصد، رطوبت ظرفیت مزرعه را به میزان ۱/۹۱ تا ۱۵/۱۴ درصد، رطوبت نقطه پژمردگی دائم را به میزان ۱/۳ تا ۱۵/۸۵ درصد، رطوبت قابل استفاده گیاه را به میزان ۲/۲۲ تا ۱۴/۹۸ درصد، منافذ میکرو ($< 30\ \mu m$) را به میزان ۱/۵۶ تا ۲۴/۱۹ درصد و منافذ مزو ($75\ \mu m$ تا ۳۰) را به میزان ۱۰/۷ تا ۲۹ درصد به‌ترتیب و به طور معنی‌دار نسبت به شاهد افزایش داد. با توجه به نتایج تحقیق حاضر، امکان استفاده از لجن فاضلاب شهری اردبیل به منظور ارتقای کیفیت فیزیکی خاک‌های درشت بافت به ویژه در شرایط زیر کشت گیاه وجود دارد.

واژه‌های کلیدی: پایداری خاکدانه، توزیع اندازه منافذ، خاک لوم شنی، رطوبت قابل استفاده، لجن فاضلاب شهری، هدایت هیدرولیکی

Effects of Ardabil Municipal Sewage Sludge on Some Physical and Hydraulic Properties of a Coarse-Textured Soil under Wheat Cultivation

S Fathololomi[1] and SH Asghari[*2]

Received: 22 September 2013, Accepted: 1 December 2014
[1-] Former M.Sc. Student, Dept. of Soil Sci., Faculty of Agric. Tech. and Natur. Res., Univ. of Mohaghegh Ardabili, Iran
[2-] Assist. Prof., Dept. of Soil Sci., Faculty of Agric. Tech. and Natur. Res., Univ. of Mohaghegh Ardabili, Iran
[*]Corresponding author email: sh_asghari2005@yahoo.com

Abstract

Coarse-textured soils have generally low organic matter and unstable structure. Using cheap waste materials such as sewage sludge is one of the solutions for their associated problems. The purpose of this study was to investigate the effects of Ardabil municipal sewage sludge on some physical and hydraulic properties of a sandy loam soil selected from Ardabil plain under cultivation of spring wheat. A greenhouse experiment was done as randomized complete block design with 5 treatments and 4 replications. The treatments were zero (control), 11.5, 23, 46, 69 g of air dried sludge per kg of air dried soil equivalent to zero, 30, 60, 120 and 180 tons of sludge/ha, respectively. After mixing the sludge with the soil, the spring wheat seeds were sown in pots. Parameters were measured after wheat harvest, 4 months after mixing the sludge with the soil. The results showed that the all rates of sludge from 30 to 180 ton/ha significantly decreased soil bulk density, particle density macropores (> 75 μm) and saturated hydraulic conductivity, relative to the control, in the ranges of 3.34 to 9.88, 1.32 to 4.43, 9.12 to 145.8 and 12.93 to 44.05 percents, respectively. Also application of the sludge at rates 30 to 180 ton/ha, increased organic carbon, mean weight diameter of aggregates, total porosity, field capacity, permanent wilting point, available water capacity, micropores (< 30 μm), and mesopores (30-75 μm), as compared with the control, within the ranges of 1.24 to 6, 1.91 to 15.14, 1.3 to 15.85, 2.22 to 14.98, 1.56 to 24.19, 10.7 to 29 percents, respectively. According to the findings of the present research, Ardabil municipal sewage sludge can be used to improve the physical quality of coarse-textured soils especially under plant cultivation.

Keywards: Aggregate stability, Available water, Hydraulic conductivity, Municipal sewage sludge, Pore size distribution, Sandy loam soil

مقدمه

خاک‌های مناطق خشک و نیمه خشک، اغلب دارای کمتر از یک درصد ماده آلی می‌باشند. افزایش مقدار ماده آلی خاک‌های این مناطق باعث بهبود ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و حاصلخیزی آن‌ها شده و سطح باروری این اراضی را به مقدار چشمگیری ارتقا می‌بخشد (بهره‌مند و همکاران ۱۳۸۱).

از مشکلات خاک‌های درشت بافت به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک می‌توان به پایین بودن ظرفیت نگهداری آب و عناصر غذایی (هیل ۱۹۹۸، وگلر و همکاران ۲۰۰۶) به‌علت فراوانی منافذ درشت و نیز پایداری ضعیف خاکدانه‌ها (اصغری ۱۳۹۰، نقوی و همکاران ۱۳۸۴) به علت کمبود کربن آلی و رس (عوامل اصلی خاکدانه‌سازی) اشاره نمود. محققان روش‌های مختلفی را برای اصلاح و یا تقویت ساختمان این نوع خاک‌ها به‌منظور برطرف کردن یا کاهش محدودیت‌های ذکر شده در آن‌ها، پیشنهاد کرده‌اند که استفاده از انواع مختلف اصلاح کننده‌های آلی طبیعی و مصنوعی از جمله آن‌ها است. با عنایت به اینکه منابع تأمین مواد آلی برای خاک‌های زیر کشت ایران بسیار محدود بوده و عمدتاً شامل کودهای دامی، بقایای گیاهی و انواع کمپوست می‌باشد که جواب‌گوی نیاز روزافزون بخش کشاورزی به کودهای آلی نیست، بنابراین کاربرد لجن فاضلاب به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک که مواد آلی خاک کمتر از ۱/۷ درصد است (کلباسی ۱۳۷۵) باعث افزایش مواد آلی و ارتقای کیفیت فیزیکی، بیوشیمیایی و حاصلخیزی خاک شده و مفید می‌باشد. در سال‌های اخیر کاربرد لجن فاضلاب شهری و صنعتی در خاک‌های کشاورزی، از یک‌طرف به‌عنوان یک کود آلی و سرشار از عناصر غذایی مختلف مثل نیتروژن و فسفر و از طرف دیگر به‌عنوان یک بهساز برای اصلاح ساختمان خاک مورد توجه قرار گرفته است. البته در کاربرد لجن فاضلاب لازم است رعایت مقدار و دفعات مصرف لجن نیز از نظر کنترل آلودگی خاک به فلزات سنگین احتمالی موجود در آن مد نظر قرار گیرد.

اصغری و همکاران (۲۰۰۹) گزارش نمودند که اگرچه افزودن ۵ و ۱۰ تن در هکتار لجن بیولوژیکی پتروشیمی تبریز به یک خاک لوم شنی (بدون کشت گیاه) طی شش ماه زمان انکوباسیون (۷ ، ۳۰ ، ۶۰ ، ۱۲۰ و ۱۸۰ روز) باعث کاهش معنی‌دار تعداد ماکروپورها گردید ولی تأثیر مقادیر مصرفی لجن بر پایداری خاکدانه‌ها در آب معنی‌دار نشد. نامبردگان علت این موضوع را به مقادیر مصرفی کم لجن و نیز درشت بافت بودن خاک نسبت دادند. آنجین و یاقان اوغلو (۲۰۱۱) مقادیر ۰، ۴۰، ۸۰ و ۱۲۰ تن در هکتار لجن فاضلاب را در یک خاک لوم شنی زیر کشت جو استفاده کردند. نتایج نشان داد در تمام مقادیر کاربرد لجن فاضلاب، جرم مخصوص ظاهری به‌طور معنی‌دار نسبت به شاهد کاهش یافت اما اثرگذاری لجن در طول سه سال با گذشت زمان کاهش یافت که علت آن به معدنی شدن ماده آلی حاصل از لجن با زمان نسبت داده شد. بر اساس گزارش نامبردگان در تمام سال‌ها تیمار ۱۲۰ تن در هکتار، مؤثرترین تیمار بر پارامتر مذکور بود که جرم مخصوص ظاهری را به‌ترتیب به میزان ۸/۹ درصد، ۷/۹۱ درصد و ۶/۰۲ درصد در سال‌های ۲۰۰۵، ۲۰۰۶ و ۲۰۰۷ نسبت به شاهد کاهش داد. بر اساس گزارش بهره‌مند و همکاران (۱۳۸۱) مصرف لجن فاضلاب در مقادیر ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ تن در هکتار در یک خاک لوم رسی سیلتی زیر کشت گندم، باعث افزایش معنی‌دار پایداری خاکدانه‌ها در مقایسه با شاهد در انتهای فصل زراعی گردید. زیتن و باران (۲۰۰۳) گزارش کردند که با به کارگیری ۲۵ تن کمپوست در هکتار در یک خاک لوم رسی، میزان تخلخل از ۶۲/۵ به ۸۷/۲ درصد افزایش پیدا کرده است.

نتایج به‌دست آمده از تحقیقات انجام شده در مناطق مختلف نشان داده است که به‌دلیل وجود برخی تفاوت‌ها در شرایط اقلیمی، گیاهی، اجتماعی، فرهنگی، کیفیت خاک و سایر عوامل و متغیر بودن خصوصیات فاضلاب از منطقه‌ای به منطقه دیگر و حتی در طول زمان در یک محل (شایان جزی و همکاران ۱۳۸۹)، در هر منطقه باید بررسی، تحقیق و کنترل در اراضی

کشاورزی تحت تأثیر لجن فاضلاب صورت گیرد (محمدزاده ۱۳۸۵) و هر کشوری نمی‌تواند صرفاً با بهره‌گیری از نتایج مطالعات سایر کشورها در برنامه‌ریزی‌های خود موفق باشد (دانش و علیزاده ۱۳۸۷). علی رغم اینکه تصفیه‌خانه فاضلاب اردبیل چند سالی است فعالیت خود را شروع کرده است ولی تاکنون اثر لجن فاضلاب شهری اردبیل به‌عنوان یک ماده زائد اصلاح کننده آلی بر خصوصیات فیزیکی خاک‌های دشت اردبیل بررسی نگردیده است، لذا این تحقیق به منظور بررسی تأثیر مصرف این لجن بر خصوصیات فیزیکی و هیدرولیکی یک خاک درشت بافت زیر کشت گندم اجرا گردید.

مواد و روش‌ها

تهیه و آماده‌سازی خاک و لجن

خاک مورد آزمایش از یک زمین بایر در دشت اردبیل (طول جغرافیایی ′۲۲ و° ۴۸ و عرض جغرافیایی ′ ۱۴ و°۳۸) و از عمق ۰ تا ۳۰ سانتی متری زمین برداشته شد. لجن مورد استفاده، از تصفیه‌خانه فاضلاب شهرستان اردبیل (سیستم تصفیه از نوع لاگون هوادهی) تهیه و پس از هوا خشک کردن، به وسیله آسیاب برقی در اندازه‌ی کوچک‌تر از نیم میلی‌متر خرد شد. برخی ویژگی‌های مهم خاک و لجن، مطابق روش‌های معمول ارائه شده در منبع پیج (۱۹۸۲) و کلوت (۱۹۸۶) و همچنین غلظت برخی فلزات سنگین سمی شامل کادمیوم، نیکل، کروم و سرب در خاک و لجن اندازه‌گیری شدند (جونز ۲۰۰۱) (جدول ۱).

گلدان‌های پلاستیکی به قطر ۲۰ و ارتفاع ۲۵ سانتی‌متر و به تعداد ۲۰ عدد مورد استفاده قرار گرفت. لجن هوا خشک به مقادیر ۰، ۱۱/۵، ۲۳، ۴۶ و ۶۹ گرم در کیلوگرم خاک هوا خشک، معادل صفر (شاهد)، ۳۰، ۶۰، ۱۲۰ و ۱۸۰ تن در هکتار (با احتساب حدود ۲۶۰۰ تن برای جرم یک هکتار خاک زراعی به جرم مخصوص ظاهری ۱/۳۹ گرم در سانتی‌متر مکعب و عمق ۱۸/۷ سانتی‌متر) مورد استفاده قرار گرفت. دامنه مقادیر مصرفی لجن بر اساس منبع بوستانی و رونقی (۱۳۹۰) انتخاب شد. خاک هوا خشک گذرانده شده از الک ۴/۷۵ میلی متری پس از اختلاط با لجن در مقادیر فوق‌الذکر، بر اساس جرم مخصوص ظاهری مزرعه (۱/۳۹ گرم در سانتی‌متر مکعب) و به صورت لایه به لایه در گلدان‌ها پر گردید سپس رطوبت خاک گلدان‌ها به ۷۵ درصد ظرفیت مزرعه (FC) رسانده شد. بذر گندم بهاره، رقم آتیلا ۴، ضد عفونی و به تعداد ۲۰ بذر در هر گلدان کشت و پس از جوانه زدن، تعداد آنها به ۱۰ عدد در هر گلدان کاسته شد. گلدان‌ها در گلخانه با دمای ۲۲±۴ °C به‌مدت ۱۲۰ روز نگهداری شدند. کنترل رطوبت خاک گلدان‌ها در طی دوره رشد در دامنه ۶۰ تا ۸۰ درصد رطوبت FC و به روش وزنی و از طریق آبیاری سطحی صورت گرفت.

اندازه‌گیری خصوصیات خاک

پس از برداشت گندم، از عمق ۱۰ تا ۱۵ سانتی‌متری هر گلدان یک نمونه خاک دست نخورده با استفاده از استوانه‌های فولادی به قطر و ارتفاع ۵ سانتی‌متر و یک نمونه خاک دست خورده (با حداقل دست خوردگی و احتیاط کامل) به وزن حدود یک کیلوگرم برداشته شد. کربن آلی به روش والکلی بلک (نلسون و سامرز ۱۹۸۲)، جرم مخصوص ظاهری خاک به روش استوانه دست نخورده (بلک و هارتگ ۱۹۸۶a)، جرم مخصوص حقیقی به روش پیکنومتر (بلک و هارتگ ۱۹۸۶b)، تخلخل کل (n) با استفاده از جرم مخصوص ظاهری (D_b) و حقیقی (D_p) خاک محاسبه گردید (دانیلسون و سوترلند ۱۹۸۶). اندازه‌گیری رطوبت خاک در مکش‌های صفر و ۴۰ سانتی‌متر با دستگاه ستون آب آویزان و در مکش ۱۰۰ سانتی‌متر با دستگاه صفحات فشاری در نمونه‌های خاک دست نخورده (استوانه‌ها) و رطوبت خاک در مکش ۱۵۰۰۰ سانتی‌متر در نمونه‌های خاک دست خورده با استفاده از دستگاه صفحات فشاری به روش وزنی (گاردنر ۱۹۸۶) انجام گرفت. رطوبت ظرفیت مزرعه (FC)، رطوبت معادل مکش ۱۰۰ سانتی‌متر (با توجه به کلاس بافت خاک که لوم شنی بود) و رطوبت پژمردگی دائم (PWP) رطوبت معادل مکش ۱۵۰۰۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. اختلاف بین رطوبت FC و PWP به عنوان آب قابل

استفاده (AWC) در نظر گرفته شد (بیور و بلک ۱۹۹۲).

درصد منافذ خاک در محدوده کلاس‌های ذکر شده توسط انجمن علوم خاک آمریکا (بی نام ۱۹۹۷) از روی داده‌های منحنی رطوبتی در مکش‌های صفر یا اشباع، ۴۰ سانتی‌متر، ۱۰۰ سانتی‌متر تعیین گردید. برای این منظور قطر منفذ متناظر با هر مکش از رابطه کاپیلاری ($h = 0.3/d$، h مکش و d قطر متناظر با آن مکش هر دو بر حسب سانتی‌متر) محاسبه شد. درصدهای منافذ موجود در هر محدوده (منافذ ماکرو $d > ۷۵\ \mu m$، منافذ مزو $d = ۳۰-۷۵\ \mu m$ و منافذ میکرو $d < ۳۰\ \mu m$) از روی داده های رطوبت در مکش های فوق الذکر محاسبه شد (دانیلسون و سوترلند ۱۹۸۶). میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD)[1] به کمک دستگاه الک تر در خاکدانه‌های کوچک‌تر از ۴/۷۵ mm (تصحیح شده به جرم ذرات شن) با استفاده از سری الک ها به قطر روزنه ۲، ۱، ۰/۵، ۰/۲۵ و ۰/۱۰۶ mm مطابق روش کمپر و روسنو (۱۹۸۶) و هدایت هیدرولیکی اشباع (K_s) به روش بار ثابت (کلوت و دیرکسون ۱۹۸۶) در استوانه ها اندازه‌گیری شد.

تحلیل‌های آماری

آزمایش در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با ۵ تیمار لجن مصرفی و در ۴ تکرار اجرا شد. علت انتخاب طرح بلوک، غیر یکنواختی در تابش نور دریافتی به گلخانه بود. پس از اطمینان از نرمال بودن توزیع داده‌ها، تجزیه واریانس داده‌های حاصل از آزمایش با استفاده از نرم افزار MSTATC و مقایسه میانگین داده‌ها با آزمون دانکن و رسم نمودارها با استفاده از نرم افزار Excel صورت گرفت.

نتایج و بحث

خصوصیات خاک و لجن

جدول ۱ برخی خصوصیات خاک و لجن مورد آزمایش را نشان می‌دهد. با توجه به جدول ۱، خاک مورد آزمایش دارای کلاس بافت لوم شنی بوده و ۷۰ درصد شن دارد. خاک‌های با این کلاس بافت در گروه خاک‌های درشت بافت قرار دارند. در این خاک به‌علت کمی کلوئیدهای رسی و هوموس، پایداری خاکدانه‌ها ضعیف است (MWD= ۰/۰۸۶ mm). همچنین ظرفیت نگهداری رطوبت آن در نقطه FC (۱۲/۴۲ درصد وزنی) نسبت به خاک های متوسط و ریز بافت پایین می‌باشد (علیزاده ۱۳۷۸). بنابراین انتظار می‌رود بخش اعظم آب آبیاری در این خاک در اثر نیروی ثقل خارج گردیده و باعث اتلاف آب و عناصر غذایی و نیز آلودگی آب‌های زیرزمینی به عناصر غذایی محلول مثل نیترات و سایر آلاینده‌ها گردد (خاوازی و ملکوتی ۱۳۸۰). همچنین ملاحظه می‌گردد در خاک مورد آزمایش به‌علت میزان کم رس (۱۲ درصد)، مقدار رطوبت پژمردگی دائم احتمالاً به‌دلیل کم بودن سطح ویژه کل ذرات خاک پایین است (PWP= ۴/۱۸ ٪). علاوه بر آن، پایین بودن میزان کربن آلی و رس خاک باعث گردیده میزان رطوبت PWP و در نتیجه آب قابل استفاده (۸/۲۳ درصد وزنی) در این خاک کم باشد. خاک‌های آهکی عموماً دارای ۶ درصد و یا بیشتر کربنات کلسیم هستند (محمودی و حکیمیان ۱۳۸۰) بنابراین خاک مورد مطالعه یک خاک آهکی و نسبتاً قلیایی به‌شمار می‌رود (متقی ۱۳۷۷) و به احتمال قوی جذب عناصر غذایی مثل فسفر و آهن در آن با مشکل مواجه خواهد بود.

جدول ۱ نشان می دهد لجن فاضلاب مورد استفاده حاوی ۲۰/۵۴ درصد کربن آلی بوده که از خصوصیات مطلوب این لجن است و می‌تواند نقش مهمی در اصلاح خاک از نظر خواص فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی ایفا نماید. مقایسه مقادیر فلزات سنگین سمی شامل نیکل، کادمیوم، سرب و کروم موجود در لجن فاضلاب مورد استفاده با استانداردهای آژانس حفاظت محیط زیست آمریکا (USEPA) (بی نام ۱۹۸۵) نشان می‌دهد که غلظت فلزات سمی مذکور در این لجن پایین‌تر از حد مجاز است. نتایج به دست آمده از اندازه گیری میزان جذب فلزات سنگین توسط گیاه گندم در تحقیق حاضر (در این مقاله آورده نشده است) نیز حاکی از آن بود که مقادیر مصرفی لجن فاضلاب شهری اردبیل از ۳۰ تا ۱۸۰ تن در هکتار نتوانست غلظت فلزات مذکور را در دانه و کاه و کلش گندم نسبت به شاهد به طور معنی دار افزایش دهد.

[1]- Mean weight diameter

جدول ۱- برخی خصوصیات خاک (شاهد) و لجن مورد مطالعه.

ویژگی	واحد	خاک	لجن	غلظت مجاز استاندارد USEPA (بی نام ۱۹۸۵)
pH*	–	۷/۷۴	۷/۰۴	–
*هدایت الکتریکی (EC)	(dS/m)	۲/۴۵	۳/۴	–
کربن آلی	(%)	۱/۱۷	۲۰/۵۴	–
کربنات کلسیم معادل	(%)	۷/۲۵	–	–
شن	(%)	۷۰	–	–
سیلت	(%)	۱۸	–	–
رس	(%)	۱۲	–	–
کلاس بافت	–	لوم شنی	–	–
جرم مخصوص ظاهری	(g/cm^3)	۱/۳۹	–	–
جرم مخصوص حقیقی	(g/cm^3)	۲/۴۵	–	–
تخلخل کل	(%)	۴۳/۴۲	–	–
میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها	(mm)	۰/۰۸۶	–	–
رطوبت معادل مکش ۱۵ بار (PWP)	(% w/w)	۴/۱۸	–	–
رطوبت معادل مکش ۰/۱ بار (FC)	(% w/w)	۱۲/۴۲	–	–
رطوبت قابل استفاده (AWC)	(% w/w)	۸/۲۳	–	–
هدایت هیدرولیکی اشباع	(cm/min)	۰/۴۵	–	–
نیکل قابل استخراج	(mg/kg)	۰/۴۳	۰/۵۵۳	۴۲۰
کادمیوم قابل استخراج	(mg/kg)	۰/۰۱۹	۰/۲	۸۵
سرب قابل استخراج	(mg/kg)	۰/۷۱	۰/۸۶۹	۸۴۰
کروم قابل استخراج	(mg/kg)	۰/۲۹	۰/۱۵۹	۳۰۰۰

* pH و EC خاک در عصاره گل اشباع و لجن در عصاره ۱ به ۵ (لجن به آب) اندازه گیری شد.

اثر لجن بر خصوصیات فیزیکی و هیدرولیکی خاک

جدول ۲ تجزیه واریانس پارامترهای اندازه گیری شده در تحقیق را نشان میدهد.

جدول ۲- تجزیه واریانس (مقادیر F) پارامترهای اندازه گیری شده در تحقیق.

منابع تغییر	درجه آزادی	OC	D_b	D_p	n	FC	PWP
بلوک	۳	۲/۵۴ ns	۱/۲۲ns	۱/۱۳ns	۱/۵۴ns	۰/۳۱ns	۲/۵۱ns
مقادیر لجن	۴	۱۵۳/۸**	۶/۶۶**	۲۲/۵۷**	۹/۳۳**	۷/۶۲**	۵/۶۳**
اشتباه	۱۲	–	–	–	–	–	–
ضریب تغییرات	–	۶/۸۱	۲/۶۴	۰/۷۳	۱/۵۳	۴/۷۵	۶/۲۵

OC: کربن آلی؛ D_b: جرم مخصوص ظاهری؛ D_p: جرم مخصوص حقیقی؛ f: تخلخل کل؛ FC: رطوبت ظرفیت مزرعه؛ PWP: رطوبت پژمردگی دائم
ns، * و **، به‌ترتیب غیر معنی‌دار، معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد.

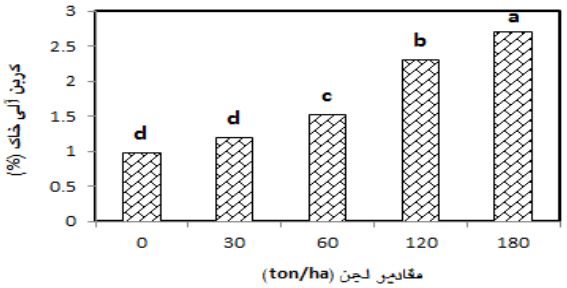
ادامه جدول ۲- تجزیه واریانس (مقادیر F) پارامترهای اندازه گیری شده در تحقیق.

منابع تغییر	درجه آزادی	MWD	AWC	K_s	منافذ ماکرو	منافذ مزو	منافذ میکرو
تکرار	۳	۰/۵۴ ns	۰/۰۳ns	۰/۶۵ns	۰/۰۸ns	۱/۳۴ns	۰/۲۵ns
مقادیر لجن	۴	۰/۷۹ **	۳/۳۳*	۶۸/۸۷**	۴۲/۰۴**	۴/۸*	۲۱/۲**
اشتباه	۱۲	–	–	–	–	–	–
ضریب تغییرات	–	۳۴/۷۳	۷/۲۶	۱۸/۶۷	۱۰/۸۶	۸/۷۷	۴/۲۷

MWD: میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها؛ AWC: رطوبت قابل استفاده؛ K_s: هدایت هیدرولیکی اشباع.
ns، * و **، به‌ترتیب غیر معنی‌دار، معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد.

کربن آلی خاک

اگرچه کربن آلی یک پارامتر فیزیکی خاک نیست ولی به دلیل آنکه همه پارامترهای فیزیکی خاک به نحوی متأثر از تغییرات کربن آلی خاک هستند لذا در تحقیق حاضر تأثیر مقادیر مصرفی لجن فاضلاب شهری اردبیل بر کربن آلی خاک نیز بررسی گردید. مقایسه میانگین‌ها در شکل ۱ نشان می‌دهد که با افزایش مقدار لجن مصرفی، کربن آلی خاک زیر کشت گندم در تیمارهای ۶۰، ۱۲۰ و ۱۸۰ تن لجن در هکتار نسبت به شاهد به‌طور معنی‌دار ($P < ۰/۰۱$) افزایش یافت. میزان افزایش نسبت به شاهد در تیمارهای مذکور به ترتیب حدود ۵۶، ۱۳۴/۹۷ و ۱۷۶ درصد بود. با توجه به درصد قابل ملاحظه کربن آلی در لجن مورد استفاده (۲۰/۵۴)، همچنان‌که انتظار می‌رفت، بکارگیری مقادیر مختلف آن در خاک باعث افزایش کربن آلی خاک گردید. این تأثیر در ابتدا کم بوده و بعد شیب اثر مصرف لجن بر کربن آلی خاک زیاد شده است یعنی افزایش مقدار کربن آلی خاک در نتیجه‌ی مصرف لجن فاضلاب در تحقیق حاضر غیر خطی است. وانگ و همکاران (۲۰۰۸) در یک تحقیق مزرعه‌ای با بکار بردن مقادیر ۰، ۱۵، ۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰و ۱۵۰ تن در هکتار لجن فاضلاب گزارش کردند که با افزایش مقادیر لجن مصرفی، کربن آلی خاک از ۳/۴۴ درصد در تیمار شاهد به ۶/۲۲ درصد در تیمار ۱۵۰ تن در هکتار افزایش یافت. اصغری (۱۳۹۰) در یک آزمایش گلخانه‌ای، اثر مصرف لجن فاضلاب پتروشیمی تبریز را در پنج سطح (۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ تن در هکتار) بر روی یک خاک لوم به مدت شش ماه بررسی کرد. نتایج نشان داد که اضافه نمودن لجن فاضلاب در کلیه مقادیر، کربن آلی خاک را در مقایسه با تیمار شاهد افزایش داد. نتایج مشابهی توسط سایر محققان مثل بهره مند و همکاران (۱۳۸۱)، شیرانی و همکاران (۱۳۸۹) و همت و همکاران (۲۰۱۰) به دست آمده است.



شکل ۱- اثر لجن فاضلاب بر کربن آلی خاک. حروف غیرمشابه بیانگر اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد می‌باشند (آزمون دانکن).

جرم مخصوص ظاهری و حقیقی

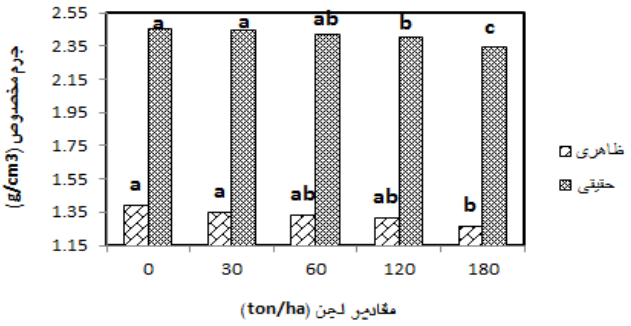
افزودن لجن فاضلاب به خاک در کلیه تیمارها سبب کاهش جرم مخصوص ظاهری خاک شد. البته این کاهش فقط در تیمار ۱۸۰ تن در هکتار لجن نسبت به شاهد معنی‌دار بود ($P < ۰/۰۱$) (شکل ۲). جرم مخصوص ظاهری در تیمار مذکور به‌میزان ۹/۹ درصد نسبت به شاهد کاهش یافت. دلیل این کاهش، محتوای بالای کربن آلی لجن (جدول ۱) می‌باشد و به علت جرم مخصوص کمتر مواد آلی نسبت به خاک، انتظار می‌رود جرم مخصوص مخلوط خاک و مواد آلی کمتر از جرم مخصوص ظاهری خاک اولیه باشد حتی اگر تأثیر بخصوصی بر ساختمان خاک نداشته باشد. احتمال می‌رود بخشی از کاهش جرم مخصوص ظاهری خاک ناشی از افزایش پایداری خاکدانه‌ها (شکل ۴) و در

نتیجه بهبود ساختمان خاک در پی کاربرد لجن فاضلاب باشد. البته بهبود شرایط رشد ریشه‌های گندم بعد از افزودن لجن فاضلاب به خاک و ترشحات آلی ریشه نیز در این قضیه بی تأثیر نیست. همت و همکاران (۲۰۱۰) نیز با مطالعه اثرات افزودن لجن فاضلاب بر یک خاک لوم رسی سیلتی دریافتند که در تیمارهای ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ مگا گرم در هکتار لجن، جرم مخصوص ظاهری خاک کاهش معنی‌دار داشت. گارسیا اورنز و همکاران (۲۰۰۵) در تحقیقی گلخانه‌ای در یک منطقهٔ خشک در دو خاک شور و غیر شور ملاحظه کردند که همبستگی بین جرم مخصوص ظاهری و کربن آلی خاک منفی و در سطح احتمال ۹۹/۹ درصد معنی‌دار شد. به‌عبارت دیگر جرم مخصوص ظاهری خاک به علت افزایش میزان کربن آلی خاک کاهش یافت. این نتایج با یافته های شیرانی و همکاران (۱۳۸۹) و آنجین و یاقان اوغلو (۲۰۱۱) نیز مطابقت دارد.

خاک شاهد (بدون لجن فاضلاب) به‌علت داشتن کربن آلی کم‌تر دارای جرم مخصوص حقیقی بالاتری (۲/۴۵ گرم در سانتی‌متر مکعب) بود (جدول ۱). افزودن لجن فاضلاب، جرم مخصوص حقیقی خاک را در تمام مقادیر مصرفی در مقایسه با تیمار شاهد کاهش داد ولی این روند کاهشی تنها در تیمار ۱۲۰ و ۱۸۰ تن لجن در هکتار نسبت به شاهد معنی‌دار ($P < ۰/۰۱$) بود (شکل ۲) به‌طوری‌که مقدار جرم مخصوص حقیقی به‌ترتیب به ۲/۴ و ۲/۳۴ گرم در سانتی‌متر مکعب در این تیمارها تنزل یافت. لجن فاضلاب به‌علت داشتن کربن آلی زیاد (جدول ۱) ذاتاً دارای جرم مخصوص حقیقی کمی خواهد بود لذا افزودن آن به خاک از طریق افزایش سهم ذرات آلی نسبت به معدنی در فاز جامد خاک (هیلل ۱۹۹۸) باعث کاهش جرم مخصوص حقیقی خاک گردید. افزایش ترشحات آلی میکروب‌ها و ریشه گیاه در اثر افزودن لجن فاضلاب، ممکن است دلیل دیگری برای کاهش جرم مخصوص حقیقی خاک باشد. جرم مخصوص حقیقی خاک تابع نوع ذرات و کانی‌های خاک است ولی در شرایط فراوانی ماده آلی این ویژگی تحت تأثیر قرار گرفته و کاهش می‌یابد (بهره‌مند و همکاران ۱۳۸۱). احمد آبادی و قاجار سپانلو (۱۳۹۱) نیز کاهش معنی‌دار جرم مخصوص حقیقی یک خاک رسی سیلتی را در نتیجه کاربرد ۲۰ و ۴۰ تن در هکتار لجن فاضلاب گزارش کردند. آنجین و یاقان اوغلو (۲۰۱۱) با کاربرد مقادیر ۰، ۴۰، ۸۰ و ۱۲۰ تن در هکتار لجن فاضلاب در خاک لوم شنی با ۶۹/۴ درصد شن که زیر کشت گیاه جو بود، کاهش جرم مخصوص حقیقی در کلیه تیمارها را گزارش نمودند.

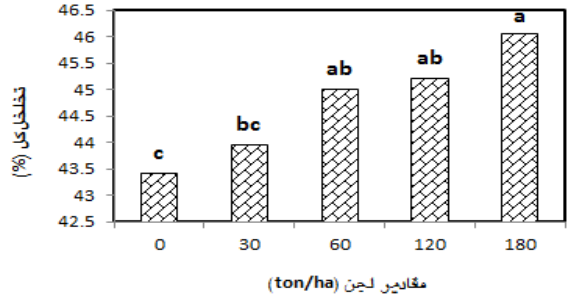
تخلخل کل

کاربرد لجن فاضلاب میزان تخلخل کل را به‌ترتیب حدود ۳/۶۲، ۴/۰۸ و ۶/۰۸ درصد در تیمارهای ۶۰، ۱۲۰ و ۱۸۰ تن لجن در هکتار نسبت به شاهد به‌طور معنی‌دار ($P < ۰/۰۱$) افزایش داد (شکل ۳). تخلخل، حجمی از خاک است که به وسیله منافذ خالی اشغال شده و با جرم مخصوص ظاهری خاک نسبت عکس دارد. بنابراین مقادیر مصرفی لجن به علت کاهش بیشتر جرم مخصوص ظاهری نسبت به جرم مخصوص حقیقی در خاک (شکل ۲) باعث افزایش تخلخل کل گردید. تخلخل و جرم مخصوص ظاهری به عنوان شاخصی برای ارزیابی خواص فیزیکی دیگر خاک مثل تراکم، نفوذ آب، هوا و ریشه در خاک به‌کار می‌رود. بنابراین انتظار می رود با کاهش تخلخل و جرم مخصوص ظاهری خاک در اثر افزودن لجن، خواص مذکور نیز بهبود یابند.



شکل ۲- اثر لجن فاضلاب بر جرم مخصوص ظاهری و حقیقی خاک. حروف غیرمشابه بیانگر اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد می‌باشند (آزمون دانکن).

ماریناری و همکاران (۲۰۰۰) کمپوست حاصل از چند نوع لجن فاضلاب را با لایهٔ ۱۵ سانتی‌متر سطحی یک خاک لوم رسی شنی مخلوط کرده و تأثیر آن را بر میزان تخلخل بررسی نمودند. نتایج نشان داد که در تمام تیمارها تخلخل افزایش یافت. آنجین و یاقان اوغلو (۲۰۱۱) طی تحقیقی بر روی یک خاک لوم شنی زیر کشت جو با تخلخل کل اولیه‌ی ۴۶/۷۳ درصد، مقادیر ۰، ۴۰، ۸۰ و ۱۲۰ تن در هکتار لجن فاضلاب را به‌مدت سه سال به‌کار بردند. بر اساس گزارش این محققان تخلخل کل در تیمارهای ۴۰، ۸۰ و ۱۲۰ تن در هکتار به‌ترتیب به‌مقدار ۳/۲۷، ۴/۷۵ و ۵/۵۳ درصد افزایش یافت.

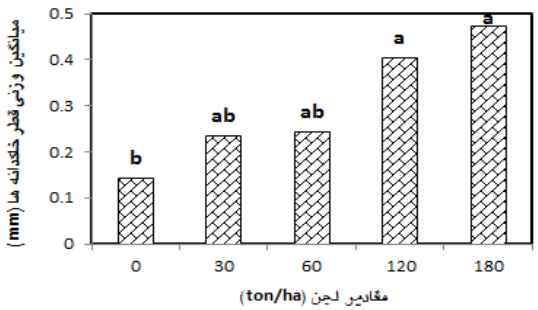


شکل ۳- اثر لجن فاضلاب بر تخلخل کل خاک. حروف غیرمشابه بیانگر اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد می‌باشند (آزمون دانکن).

میانگین وزنی قطر (MWD) خاکدانه‌ها

مطابق جدول ۱ در خاک لوم شنی برداشته شده از زمین بایر به‌علت کمبود عوامل سیمانی کننده رس و کربن آلی، پایداری خاکدانه‌ها ضعیف بود (MWD = ۰/۰۸۶ mm) ولی اعمال تیمار کشت گندم و نیز دوره‌های خشک و مرطوب شدن متوالی باعث افزایش MWD به حدود ۰/۱۴۲ میلی‌متر حتی در تیمار شاهد (بدون مصرف لجن) گردید (شکل ۴). کاربرد لجن فقط در مقادیر ۱۲۰ و ۱۸۰ تن در هکتار توانست میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها را از ۰/۱۴۲ میلی‌متر در تیمار شاهد به ترتیب به ۰/۴۰۳ و ۰/۴۷۳ میلی‌متر افزایش دهد. بین تیمارهای ۳۰ و ۶۰ تن در هکتار لجن با وجود روند افزایشی، نسبت به شاهد تفاوت معنی‌دار مشاهده نشد (شکل ۴). افزایش مقدار کربن آلی (جدول ۱) در پی افزودن لجن فاضلاب به خاک، سبب ایجاد پیوند بین ذرات اولیه خاک شد و در نتیجه پایداری خاکدانه‌ها افزایش یافت البته افزایش ترشحات آلی ریشه گندم و فعالیت میکروبی خاک در اثر افزودن لجن به خاک نیز

می تواند مزید بر علت در امر خاکدانه سازی باشد. به طور مثال، اصغری (۱۳۹۰) عدم تأثیر معنی دار افزودن ۳۰ تا ۱۰۰ تن در هکتار لجن فاضلاب بر MWD یک خاک لوم را پس از ۶ ماه انکوباسیون در شرایط عدم کشت گیاه گزارش نمود. مواد آلی در طی تبدیل شدن به ترکیبات هوموسی، مواد مورد نیاز برای تشکیل و پایداری خاکدانه‌ها را فراهم می‌سازند (بهره‌مند و همکاران ۱۳۸۱). فورر و استافر (۱۹۸۳) گزارش کردند که با اضافه کردن لجن فاضلاب به مدت ۴ سال، در مجموع به میزان ۶۱ تن در هکتار به یک خاک رسی، خاکدانه‌های پایدار در آب به‌میزان ۲ درصد افزایش یافتند. دبوز و همکاران (۲۰۰۲) نشان دادند که یازده ماه پس از افزودن ۴/۲ تن در هکتار لجن فاضلاب به یک خاک لوم شنی در مزرعه، پایداری خاکدانه‌ها در آب به‌میزان ۱۰/۷۵ درصد افزایش یافت.

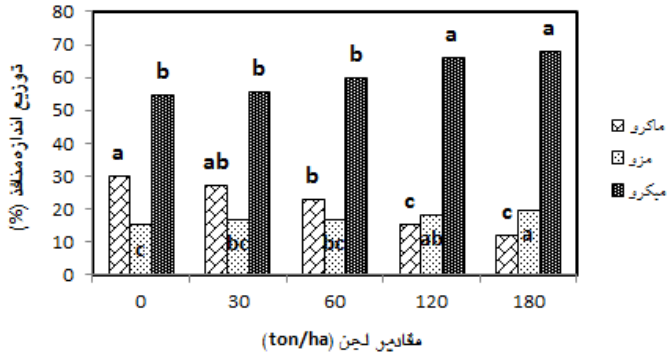


شکل ۴- اثر لجن فاضلاب بر میانگین وزنی قطر (MWD) خاکدانه‌ها. حروف غیرمشابه بیانگر اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد می‌باشند (آزمون دانکن).

توزیع اندازه منافذ

کاربرد لجن فاضلاب در کلیه مقادیر باعث کاهش منافذ ماکرو در خاک لوم شنی گردید ولی این کاهش فقط در تیمارهای ۶۰، ۱۲۰ و ۱۸۰ تن لجن در هکتار نسبت به شاهد معنی‌دار ($P < ۰/۰۱$) بود (شکل ۵). منافذ ماکرو در خاک درشت بافت به‌ترتیب ۹/۱۲، ۳۰/۲۷، ۹۳/۳۶ و ۱۴۵/۷۹ درصد در تیمارهای ۳۰، ۶۰، ۱۲۰ و ۱۸۰ تن در هکتار لجن نسبت به شاهد کاهش یافت. کاربرد لجن فاضلاب منافذ مزو (شکل ۵) را در کلیه تیمارها افزایش داد اگرچه این افزایش فقط در تیمارهای ۱۲۰ و ۱۸۰ تن در هکتار لجن و به ترتیب به میزان ۲۰/۴۴ و ۲۹ درصد نسبت به شاهد معنی‌دار ($P < ۰/۰۵$) بود. منافذ میکرو نیز در تیمارهای لجن نسبت به شاهد افزایش یافت که این افزایش فقط در تیمارهای ۱۲۰ و ۱۸۰ تن در هکتار لجن و به ترتیب به میزان ۲۰/۶ و ۲۴/۲ درصد نسبت به شاهد معنی‌دار ($P < ۰/۰۱$) بود. تغییر در توزیع اندازه منافذ خاک از طریق افزایش منافذ میکرو، مزو و کاهش منافذ ماکرو در خاک درشت بافت مورد آزمایش می‌تواند به‌دلیل بهبود ساختمان خاک و تشکیل خاکدانه‌های پایدار (شکل ۴) و در نتیجه افزایش منافذ درون خاکدانه‌ای (منافذ مزو و میکرو) در مقایسه با منافذ بین خاکدانه‌ای (منافذ ماکرو) ناشی از افزایش مواد آلی در خاک (شکل ۱) رخ داده باشد. زیرا جرم مواد آلی حدود پنج برابر سبک تر از مواد معدنی خاک است و مقدار اندک مواد آلی تأثیر شدیدی روی فضای منافذ خاک دارد (گلچین ۱۳۸۴). با اندازه‌گیری آب قابل نگهداری در مکش ۱۰ کیلو پاسکال، مشاهده شده است که حجم منافذ با قطر کمتر از ۳۰ میکرومتر (منافذ میکرو)، رابطه خطی با درصد کربن آلی خاک دارد (گلچین ۱۳۸۴). با توجه به اینکه خاک‌های درشت بافت به‌دلیل وجود منافذ درشت فراوان با مشکل ظرفیت نگهداری ضعیف آب و نیز آبشویی عناصر غذایی مواجه هستند لذا کاهش سهم منافذ ماکرو در نتیجه‌ی کاربرد لجن فاضلاب در این خاک ها می‌تواند به عنوان

یک نتیجه مهم تلقی شود. این موضوع از نظر کنترل آلودگی محیط زیست به آلاینده ها نیز اهمیت دارد. اصغری و همکاران (۲۰۰۹) اثر لجن بیولوژیک را بر توزیع اندازه منافذ در یک خاک لوم شنی در شرایط گلخانه‌ای مطالعه کردند. نتایج نشان داد که مقدار ۳/۴ گرم لجن در کیلوگرم خاک تنها سبب کاهش درصد مزوپورها و افزایش تعداد میکروپورها گردید ولی تأثیر معنی داری بر منافذ ماکرو نداشت.



شکل ۵- اثر لجن فاضلاب بر توزیع اندازه منافذ خاک. حروف غیرمشابه بیانگر اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد برای منافذ ماکرو و میکرو و پنج درصد برای منافذ مزو می‌باشند (آزمون دانکن).

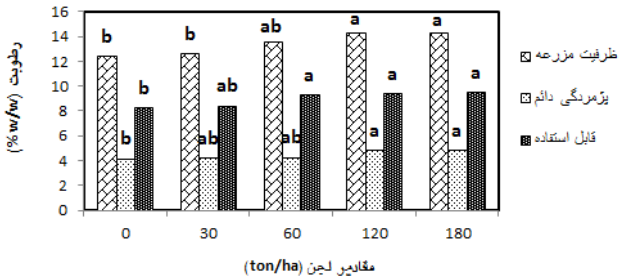
رطوبت های ظرفیت مزرعه (FC)، پژمردگی دائم (PWP) و قابل استفاده (AWC)

نتایج نشان داد که کاربرد لجن فاضلاب رطوبت ظرفیت مزرعه (FC) را افزایش داد. مقایسه میانگین‌ها در شکل ۶ نشان می‌دهد که این افزایش فقط در تیمارهای ۱۲۰ و ۱۸۰ تن در هکتار لجن نسبت به شاهد معنی‌دار ($P < ۰/۰۱$) و به ترتیب حدود ۱۴/۹۳ و ۱۵/۱۴ درصد نسبت بود. افزایش رطوبت FC می‌تواند ناشی از افزایش منافذ میکرو و مزو و نیز کاهش منافذ ماکرو (شکل ۵) در تیمارهای لجن فاضلاب نسبت به شاهد باشد. به‌عبارت دیگر بر اساس رابطه کاپیلاری ($h = 0.3/d$ ، d قطر منافذ و h مکش خاک) با ریزتر شدن منافذ خاک، مکش آب در خاک افزایش یافته و جلوی خروج آب زیاد از خاک در اثر نیروی ثقل گرفته می‌شود و در نتیجه رطوبت ظرفیت مزرعه (FC) افزایش می‌یابد (واریک ۲۰۰۲). آنجین و یاقان اوغلو (۲۰۱۱) با کاربرد مقادیر ۰، ۴۰، ۸۰ و ۱۲۰ تن در هکتار لجن فاضلاب، افزایش معنی‌دار رطوبت ظرفیت مزرعه را در تیمارهای لجن نسبت به شاهد گزارش کردند. به‌طوری‌که رطوبت ظرفیت مزرعه به‌ترتیب به مقدار ۲۶/۴۲، ۳۰/۵۹ و ۳۴/۴۷ درصد در تیمارهای ۴۰، ۸۰ و ۱۲۰ تن در هکتار نسبت به شاهد افزایش یافت و بیشترین افزایش مربوط به بالاترین مقدار کاربردی لجن (۱۲۰ تن در هکتار) بود. نامبردگان مقدار زیاد ماده آلی موجود در لجن و افزایش منافذ ریز را دلیل این نتایج گزارش شد.

کاربرد لجن فاضلاب، رطوبت نقطه پژمردگی دائم (PWP) را افزایش داد. کم‌ترین مقدار رطوبت PWP در تیمار شاهد و به‌مقدار ۴/۱۸ درصد و بیشترین مقدار آن ۴/۸۴ درصد و در تیمار ۱۲۰ تن در هکتار لجن حاصل شد. البته اختلاف رطوبت PWP در تیمارهای ۳۰، ۶۰، ۱۲۰ و ۱۸۰ تن لجن در هکتار معنی دار نشد (شکل ۶). کاربرد لجن فاضلاب، میزان رطوبت PWP را در تیمار ۱۲۰ تن در هکتار لجن حدود ۱۵/۸ درصد نسبت به شاهد به طور معنی دار ($P<۰/۰۱$) افزایش داد. در توجیه این افزایش می‌توان گفت که با کاربرد لجن فاضلاب به‌علت افزایش کربن آلی خاک (شکل ۱)، جمعیت میکروب‌ها و نیز فعالیت آن‌ها به‌ویژه قارچ‌ها

افزایش یافت و در نتیجه‌ی ترشحات میکروارگانیسم ها و نیز ریشه گیاه، سطح تماس کل ذرات خاک با یکدیگر افزایش و در نتیجه آب جذب سطحی شده یا همان رطوبت معادل مکش ۱۵ بار (PWP) افزایش یافت (واریک، ۲۰۰۲). گلیک و همکاران (۲۰۰۴) نیز با به کارگیری کود شیمیایی، ۲۵ تن کمپوست زباله شهری در هکتار و ۲۵ تن کود دامی در هکتار، بیشترین میزان افزایش در مقدار رطوبت ظرفیت زراعی را به تیمار ۲۵ تن کمپوست در هکتار نسبت دادند که نسبت به شاهد ۱۶/۶ درصد افزایش داشت. امرسون و همکاران (۱۹۹۴) نشان دادند که با افزایش مقدار کربن آلی، ظرفیت نگهداری رطوبت در اثر تشکیل ژل‌های حاصل از تجزیه بقایای آلی و ترشحات میکروبی افزایش می‌یابد.

مقایسه میانگین‌ها در شکل ۶ نشان می‌دهد که تیمارهای ۶۰، ۱۲۰ و ۱۸۰ تن لجن در هکتار باعث افزایش معنی‌دار ($P<0/05$) آب قابل استفاده (AWC) نسبت به شاهد گردیدند. مقدار AWC در تیمارهای مذکور به‌ترتیب ۱۳، ۱۴/۵ و ۱۴/۹۸ درصد نسبت به شاهد افزایش یافت. افزایش رطوبت قابل استفاده در نتیجه‌ی کاربرد لجن فاضلاب به‌دلیل افزایش کربن آلی (شکل ۱) در خاک بود. مواد آلی خاکدانه سازی را افزایش داده و با بهبود ساختمان خاک و افزایش آب جذب سطحی شده، روی ظرفیت آب قابل دسترس گیاه تأثیر می‌گذارد. به نظر می‌رسد مقادیر مصرفی لجن از طریق افزایش بیشتر رطوبت FC در مقایسه با PWP (شکل ۶) منجر به افزایش رطوبت AWC گردید و همان طور که در بالا اشاره گردید درصدهای افزایش رطوبت FC در اثر کاربرد لجن بیشتر از رطوبت PWP بود. همچنین کاهش منافذ ماکرو (شکل ۵) نیز می‌تواند دلیل افزایش AWC باشد. با کاهش منافذ ماکرو در خاک‌های درشت بافت، آب ثقلی کاهش، رطوبت FC افزایش و در نتیجه رطوبت AWC افزایش می‌یابد (هیلل ۱۹۹۸). نتایج مشابهی در اثر کاربرد لجن فاضلاب بر روی AWC در خاک های با کلاس بافتی مختلف توسط بهره مند و همکاران (۱۳۸۱) و شیرانی و همکاران (۱۳۸۹) گزارش شده است.

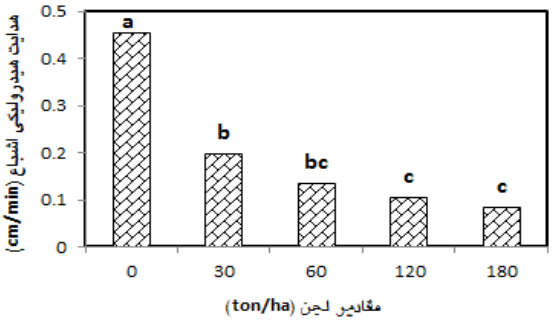


شکل ۶- اثر لجن فاضلاب بر رطوبت خاک. حروف غیرمشابه بیانگر اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد برای رطوبت های ظرفیت مزرعه و پژمردگی دائم و پنج درصد برای رطوبت قابل استفاده می‌باشند (آزمون دانکن).

هدایت هیدرولیکی اشباع (K_s)

هدایت هیدرولیکی اشباع (K_s) خاک لوم شنی مورد آزمایش (تیمار شاهد) حدود ۰/۴۵ سانتی‌متر در دقیقه بود و با کاربرد لجن فاضلاب در تیمارهای ۳۰، ۶۰، ۱۲۰ و ۱۸۰ تن در هکتار به ترتیب حدود ۱۲۹/۳، ۲۴۱/۳۵، ۳۳۲/۴ و ۴۴۰/۵ درصد و به طور معنی‌دار کاهش یافت (شکل ۷). اثر مثبت لجن بر خاکدانه سازی از طریق تشکیل خاکدانه‌های درشت و پایدار (شکل ۴) باعث کاهش سهم منافذ بین خاکدانه‌ای یا ماکرو و افزایش سهم منافذ درون خاکدانه‌ای یا میکرو (شکل ۵) و در نتیجه کاهش K_s در خاک درشت بافت گردید که می‌تواند یکی از نتایج مهم این تحقیق باشد. بنابراین انتظار می‌رود از شستشوی عناصر غذایی و آلاینده‌ها و آلودگی آبهای زیرزمینی منطقه در خاک های درشت بافت تیمار شده با لجن فاضلاب شهری اردبیل جلوگیری شود. به عبارت دیگر هدایت هیدرولیکی،

قابلیت مسیر خاک را در انتقال آب و املاح از خود نشان می‌دهد و به مقدار زیادی به توزیع اندازه منافذ خاک بستگی دارد (هیلل ۱۹۹۸). اصغری و همکاران (۲۰۱۱) نیز گزارش کردند که به کارگیری مقادیر ۵ و ۱۰ تن در هکتار لجن فاضلاب پتروشیمی تبریز در یک خاک لوم شنی با ۷۰ درصد شن و ماده آلی ناچیز باعث کاهش هدایت هیدرولیکی اشباع خاک گردید. کاهش هدایت هیدرولیکی اشباع در اثر افزودن پسماندهای آلی توسط بهره‌مند و افیونی (۱۳۷۸) نیز گزارش شده است.



شکل ۷- اثر لجن فاضلاب بر هدایت هیدرولیکی اشباع خاک. حروف غیرمشابه بیانگر اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد می‌باشند (آزمون دانکن).

نتیجه گیری کلی

نتایج نشان داد که استفاده از لجن فاضلاب شهری اردبیل باعث افزایش کربن آلی، تخلخل کل، پایداری خاکدانه، منافذ مزو و میکرو و ظرفیت آب قابل استفاده و نیز کاهش منافذ ماکرو و هدایت هیدرولیکی اشباع در خاک درشت بافت گردید. بهترین نتایج مربوط به تیمارهای ۱۲۰ و ۱۸۰ تن لجن در هکتار بود. بنابراین امکان استفاده از لجن مذکور برای رفع محدودیت خاک های درشت بافت به ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک بدون نگرانی از آلودگی خاک به فلزات سمی وجود دارد ولی جهت اظهار نظر دقیق در این زمینه انجام آزمایش های مزرعه ای چند ساله توصیه می گردد.

منابع مورد استفاده

احمد آبادی ز و قاجار سپانلو م، ۱۳۹۱. تأثیر کاربرد کودهای آلی روی برخی خواص فیزیکی خاک، مجله پژوهش های حفاظت آب و خاک، جلد ۱۹، شماره ۲. صفحه‌های ۹۹ تا ۱۱۶.

اصغری ش، ۱۳۹۰. اثرات لجن فاضلاب پتروشیمی تبریز بر کربن آلی، شاخص های پایداری خاکدانه و حدود پایایی یک خاک منطقه نیمه خشک، نشریه آب و خاک، جلد ۲۵، شماره ۳. صفحه‌های ۵۳۰ تا ۵۳۹.

بوستانی ح ر و رونقی ع م، ۱۳۹۰. مقایسه اثر کاربرد لجن فاضلاب و کود شیمیایی بر عملکرد و غلظت برخی عناصر غذایی در گیاه اسفناج (*Spinosa olerace* L.) در سه بافت یک خاک آهکی، مجله علوم و فنون کشت‌های گلخانه‌ای، سال دوم، شماره ۶. صفحه‌های ۶۵ تا ۷۳.

بهره‌مند م، افیونی م، حاج عباسی م و رضایی نژاد ی، ۱۳۸۱. اثر لجن فاضلاب بر برخی ویژگی‌های فیزیکی خاک، مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، جلد ۶، شماره ۴. صفحه‌های ۱ تا ۸ .

بهره‌مند م ر و افیونی م، ۱۳۷۸. اثر لجن فاضلاب، کمپوست و کود گاوی بر خواص فیزیکی خاک. صفحه‌های ۲۸۸ تا ۲۸۹، مجموعه مقالات ششمین کنگره علوم خاک ایران، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد.

خاوازی ک و ملکوتی م، ۱۳۸۰. ضرورت تولید صنعتی کودهای بیولوژیک (مجموعه مقالات) سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، نشر آموزش.

دانش ش و علیزاده ا، ۱۳۸۷. کاربرد پساب در کشاورزی، فرصت‌ها و چالش‌ها. صفحه‌های ۱ تا۱۲. اولین سمینار ملی جایگاه آب‌های بازیافتی و پساب در مدیریت منابع آب. ۱ تا ۲ خرداد، مشهد.

شایان جزی م، قربانی ه و فیضی م، ۱۳۸۹. تأثیر استفاده از پساب در کشاورزی بر برخی خواص شیمیایی خاک. صفحه‌های ۱ تا ۶. دومین سمینار ملی جایگاه آب های بازیافتی و پساب در مدیریت منابع آب- کاربردها در کشاورزی و فضای سبز. ۲۸ مهر، مشهد.

شیرانی ح، حاج عباسی م ع، افیونی م و دشتی ح، ۱۳۸۹. اثر تجمعی لجن فاضلاب بر برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، مجله آب و فاضلاب، شماره ۳. صفحه‌های ۲۸ تا ۳۶.

علیزاده ا، ۱۳۷۸. رابطه آب و خاک و گیاه، انتشارات دانشگاه امام رضا.

کلباسی م، ۱۳۷۵. وضعیت مواد آلی در خاکهای ایران و نقش کود کمپوست، صفحه‌های ۱ تا ۵. خلاصه مقالات پنجمین کنگره علوم خاک ایران، ۱۰ تا ۱۳ شهریور، آموزشکده کشاورزی کرج، کرج.

گلچین ا، ۱۳۸۴. تأثیر مواد آلی برمیزان ظرفیت تبادل کاتیونی، ظرفیت نگهداری آب و میزان آب قابل استفاده گیاه در چند خاک بکر وکشت شده. صفحه‌های ۱ تا ۳. نهمین کنگره علوم خاک ایران، ۶ تا ۹ شهریور، مرکز تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری کشور، تهران.

متقی م م، ۱۳۷۷. راهنمای شناسایی خاک (ترجمه). انتشارات سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی.

محمدزاده ا، ۱۳۸۵. بررسی اثر مصرف پساب های تصفیه شده خانگی بر رشد و عملکرد گندم و ویژگی‌های خاک. صفحه‌های ۱۳۱ تا ۱۳۲، همایش خاک، محیط زیست و توسعه پایدار، کرج.

محمودی ش و حکیمیان م، ۱۳۸۰. مبانی خاکشناسی (ترجمه). انتشارات دانشگاه تهران.

نقوی ه، حاج عباسی م ع و افیونی م، ۱۳۸۴. تأثیر کود گاوی بر برخی خصوصیات فیزیکی و ضرایب هیدرولیکی و انتقال برماید در یک خاک لوم شنی در کرمان، مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، سال ۹، شماره ۳. صفحه‌های ۹۳ تا ۱۰۲.

Angin I and Yaganoglu V, 2011. Effects of sewage sludge application on some physical and chemical properties of a soil affected by wind erosion. Journal of Agriculture Science and Technology 13: 757-768.

Anonymous, 1985. Summary of Environmental Profiles and Hazards Indices for Constituents of Municipal Sludges. USEPA, Washington, DC.

Anonymous, 1997. Glossary of Soil Science Terms. Soil Science Society of America. Madison, WI.

Asghari S, Abbasi F and Neyshabouri MR, 2011. Effects of soil conditions on physical quality and bromide transport properties in a sandy loam soil. Biosystems Engineering 109: 90-97.

Asghari S, Neyshabouri MR, Abbasi F, Aliasgharzad N and Oustan S, 2009. The effects of four organic soil conditioners on aggregate stability, pore size distribution and respiration activity in a sandy loam soil. Turkish Journal of Agriculture and Forestry 33: 47-55.

Bauer A and Blak AL, 1992. Organic carbon effects on available water capacity of three soil textural groups. Soil Science Society of America Journal 56: 248-254.

Blake GR and Hartge KH, 1986a. Bulk density. Pp. 363-375. In: Klute A (ed). Methods of Soil Analysis Part 1, Physical and Mineralogical Methods. 2nd ed. American Society of Agronomy, Madison, WI.

Blake GR and Hartge KH, 1986b. Particle density. Pp. 377-381. In: Klute A (ed). Methods of Soil Analysis Part 1, Physical and Mineralogical Methods. 2nd ed. ASA and SSSA, Madison, WI.

Danielson RE and Sutherland PL, 1986. Porosity. Pp. 443-461. In: Klute A (ed). Methods of Soil Analysis. Part 1, 2nd. Agronomy Monograph. 9. ASA and SSSA, Madison, WI.

Deboz K, Peterson SO, Kure LK and Ambus P, 2002. Evaluating effects of sewage sludge and household compost on soil physical, chemical and microbiological properties. Applied Soil Ecology 19: 237-248.

Emerson WW, Foster RC, Tisdal JM and Weissmann D, 1994. Carbon content and bulk density of irrigated natrixeralf in relation to their root growth and orchard management. Australian Journal of Soil Research 13: 31-39.

Furrer OJ and Stauffer W, 1983. Influence of sewage sludge application on physical properties of soil and its contribution to the humus balance. Pp. 256-271. In: Chen Y and Avnimelech Y (eds). The Role of Organic Matter in Agriculture. Developments in Plant and Soil Science. Martinus Nijhoff Pub. Dordrecht. The Netherlands.

Gardner WH, 1986. Water content. Pp. 493-544. In: Klute A (ed). Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods. 2nd ed. ASA and SSSA, Madison, WI.

Garsia-Orenes F, Guerrero C, Mataix-Solera J, Navarro-Pedreno J, Gomez I and Mataix-Beneyto J, 2005. Factors controlling the aggregate stability and bulk density in two different degraded soils amended with biosolids, Soil & Tillage Research 82: 65-76.

Gelik I, Ortas I and Kilik S, 2004. Effect of compost, mycorrhizae, manure and fertilizer on some physical properties of chromoxerert soil. Soil and Tillage Research 78: 59-67.

Hemmat A, Aghilinategh N, Rezainejad Y and Sadeghi M, 2010. Long-term impacts of municipal solid waste compost, sewage sludge and farmyard manure application on organic carbon, bulk density and consistency limits of a calcareous soil in center Iran. Soil and Tillage Research 108: 43-50.

Hillel D, 1998. Environmental Soil Physics. Academic Press. New York, USA.

Jones JB, 2001. Laboratory Guide for Conduction Soil Tests and Plant Analysis. USA: CRC Press LLC.

Kemper A and Rosenau RC, 1986. Aggregate stability and size distribution. Pp. 425. In: Klute A (ed). Methods of Soil Analysis. Part 1, 2 nd ed. Agronomy Monograph. 9. ASA and SSSA, Madison, WI.

Klute A, 1986. Methods of Soil Analysis. Physical and Mineralogical Methods. Part 1. ASA and SSSA, Madison, WI.

Klute A and Dirksen C, 1986. Hydraulic conductivity and diffusivity: Laboratory methods. Pp. 687-734. In: Klute A (ed). Methods of Soil Analysis. Part 1, Physical and Mineralogical Methods, 2nd ed. ASA and SSSA,, Madison, WI.

Marinari S, Masciandaro G, Ceccanti B and Grego S, 2000. Influence of organic and mineral fertilizers on soil biological and physical properties. Bioresource Technology 72 (1): 9-17.

Nelson DW and Sommers LE, 1982. Total carbon, organic carbon and organic matter. Pp. 539-579. In: Page AL (ed). Method of Soil Analysis, Chemical and Microbiological Methods, Part 2. ASA and SSSA, Madison, WI.

Page AL, 1982. Methods of Soil Analysis. ASA and SSSA, Madison, WI.

Vogeler I, Green SR, Mills T and Clothier NE, 2006. Modeling nitrate and bromide leaching from sewage sludge. Soil and Tillage Research 89 (2): 177-184.

Wang X, Chen T, Ge Y and Jia Y, 2008. Studies on land application of sewage sludge and its limiting factors. Journal of Hazardous Materials 160: 554-558.

Warrick AW, 2002. Soil Physics Companion. CRC Press. New York.

Zeytin S and Baran B, 2003. Influences of composted hazelnut husk on some physical properties of soils. Bioresource Technology 88: 241-244.