نشریه پژوهش‌های خاک (علوم خاک و آب) / الف / جلد 30 / شماره 3 / 1395
DOI: http://dx.doi.org/10.22092/ijsr.2016.107372

اثر کاربرد لجن فاضلاب بر تغییرات زمانی حدود خمیرایی و پایداری خاکدانه‌ها در یک نمونه خاک آهکی

فاطمه سادات علوی، عبدالمجید ثامنی و سید علی اکبر موسوی[1]

دانشجوی سابق کارشناسی‌ارشد، بخش علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز؛ **fatemesadat_alavi3546@shirazu.ac.ir**

دانشیار بخش علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز؛ **asameni@hotmail.com**

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

دریافت: **94/6/4** و پذیرش: **95/6/8**

چکیده

کمبود ماده آلی در خاک‌های مناطق‌خشک و نیمه‌خشک سبب کاهش کیفیت فیزیکی و افزایش رواناب و فرسایش خاک می‌شود. کاربرد ترکیبات‌آلی (لجن فاضلاب) در این مناطق می‌تواند سبب بهبود ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک شود. در این تحقیق اثر کاربرد سطوح مختلف (صفر، 30 و 60 تن‌درهکتار) لجن فاضلاب در سه زمان 30، 60 و120 روز پس از خوابانیدن بر کربن آلی، پایداری خاکدانه‌ها (میانگین وزنی و هندسی قطر خاکدانه‌ها) و حدود خمیرایی (رطوبت حد بالا و پایین خمیرایی و شاخص خمیرایی) خاک بررسی شد. کربن‌آلی خاک با افزایش سطوح کاربردی لجن فاضلاب افزایش یافت، اما با گذشت زمان در مقایسه با شاهد به طور معنی‌داری کاهش یافت. پایداری خاکدانه‌ها با کاربرد لجن‌فاضلاب به‌طور معنی‌داری افزایش یافت ولی با گذشت 60 روز پس ازخوابانیدن به‌طور معنی-داری نسبت به 30 روز کاهش یافت این درحالی است‌که پس از 120 روز تفاوت معنی‌داری با خوابانیدن به مدت 30 روز نداشت. رطوبت حد بالای خمیرایی خاک با کاربرد سطوح مختلف لجن فاضلاب افزایش یافت و با گذشت زمان، ابتدا افزایش و سپس کاهش یافت. در حالی‌که رطوبت حد پایین خمیرایی با افزایش سطوح کاربرد لجن فاضلاب افزایش یافت و با گذشت زمان به‌طور معنی‌داری تغییر نیافت. شاخص خمیرایی خاک به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر سطوح کاربرد لجن فاضلاب قرار نگرفت، اما در طول زمان ابتدا افزایش و سپس کاهش یافت. به طور کلی نتایج نشان داد افزودن لجن فاضلاب علاوه بر اینکه توانست سبب افزایش ماده آلی خاک و ظرفیت نگهداری آب خاک شود امکان شخم و عملیات خاک‌ورزی را در رطوبت‌های بیشتر و بدون فشردگی خاک فراهم آورد. البته بایستی در کاربرد لجن فاضلاب علاوه بر در نظر گرفتن اثرات مثبت لجن بر بهبود ویژگی‌های فیزیکی خاک، مسائل اقتصادی و اثرات نامطلوب حاصل از کاربرد مقادیر زیاد لجن و خطرات زیست محیطی نیز مورد توجه قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: میانگین وزنی و هندسی قطر خاکدانه‌ها، حدود آتربرگ، کربن آلی، حد بالا و پایین خمیرایی، شاخص خمیرایی

---

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

مقدمه

اهمیت و جایگاه منابع طبیعی و معضل از بین رفتن و تغییر آن برکسی پوشیده نیست. اغلب خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران دارای کمتر از یک درصد ماده آلی هستند که این مسئله سبب کاهش کیفیت فیزیکی خاک به‌ویژه از نظر پایداری ساختمان (مصدقی و همکاران، 2000؛ شیرانی و همکاران، 2002) و موجب مستعد شدن این خاک‌ها برای انواع فرسایش آبی و بادی می‌شود و بسیاری از مسایل و مشکلات عمده بهداشتی و اجتماعی جامعه بشری را به وجود خواهد آورد. یکی از روش‌های ارتقای کیفیت فیزیکی خاک، استفاده از اصلاح کننده‌های آلی ارزان قیمت و سهل‌الوصول مانند لجن فاضلاب شهری و یا صنعتی می‌باشد که در مقایسه با کود دامی و کاه و کلش می‌تواند مقرون به صرفه‌تر باشد و همچین استفاده از لجن‌های فاضلاب به عنوان یک اصلاح‌کننده خاک می‌تواند سبب رهایی از مشکلات بهداشتی مرتبط با وجود لجن‌های فاضلاب در مناطق شهری و صنعتی شود (استیهاور، 2003).

اگرچه کربن آلی یک ویژگی فیزیکی خاک محسوب نمی‌شود (رینولد و همکاران، 2002). ولی اکثر شاخص‌های کیفی فیزیکی خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهد. بنابراین لجن فاضلاب نیز به دلیل دارا بودن مقدار زیادی ماده آلی می‌تواند بر برخی ویژگی‌های فیزیکی خاک از قبیل پارامترهای منحنی رطوبتی، جرم مخصوص ظاهری، تخلخل کل (فتون، 1995)، میانگین وزنی و هندسی قطر خاکدانه‌ها (علوی و همکاران، 1391a)، آبگریزی خاک (علوی و همکاران، 1391b) و حدود خمیرایی (رینولد و همکاران، 2002) تأثیر مطلوب داشته باشد. همچنین نتایج تحقیقات انجام شده حاکی از آن است که لجن فاضلاب تأثیر مثبتی بر پایداری خاکدانه‌ها دارد (اسپین، 1997؛ شیرانی و همکاران 1389؛ اصغری و همکاران، 2009). شیرانی و همکاران (1389) گزارش کردند با افزایش سطح لجن فاضلاب، هدایت هیدرولیکی اشباع خاک، نفوذپذیری و پایداری خاکدانه‌های خاک افزایش یافته است در حالی که جرم مخصوص ظاهری خاک کاهش یافت. بهره‌مند و همکاران (1381) گزارش کردند که با افزایش میزان لجن فاضلاب افزوده شده به خاک پایداری خاکدانه‌ها به طور معنی‌داری افزایش یافت و بیشترین پایداری خاکدانه‌ها مربوط به تیمار کاربرد 100 تن لجن فاضلاب در هکتار بود.

ایشان معتقد است که برای تأثیر لجن فاضلاب بر پایداری خاکدانه‌ها مدت زمان ویژه‌ای نیاز است به طوری‌که حداکثر پایداری خاکدانه‌ها در 148 روز پس از افزودن لجن‌فاضلاب در تیمار 50 و 17 تن در هکتار مشاهده شد و در 221 روز به حالت اول برگشت. حدود خمیرایی خاک نیز از ویژگی‌های مهم خاک به ویژه خاک‌های ریزدانه (متوسط و ریز بافت) به شمار می‌آید به گونه‌ای که رفتار و یا مقاومت خاک را در مقابل نیروهای وارده بر آن در یک محدوده رطوبتی نشان می‌دهد و این حالت تحت تأثیر مقدار ماده آلی، نوع و مقدار رس در خاک قرار می‌گیرد (دیجانگ و همکاران، 1990؛ همت و همکاران ، 2010). این محدوده‌های رطوبتی که به آنها حدود آتربرگ نیز گفته می‌شود شامل حد بالای خمیرایی، حد پایین خمیرایی و شاخص خمیرایی می‌باشد که در فعالیت‌های کشاورزی از نظر تعیین رطوبت بهینه برای خاک‌ورزی حائز اهمیت است. به گونه‌ای که در اغلب خاک‌ها معمولاً رطوبت ایده‌آل برای خاک‌ورزی (حد گاورو) تقریباً برابر 90 درصد رطوبت حد خمیرایی در نظر گرفته می‌شود (اتومو و دکستر، 1981).

به عبارتی حد پایین خمیرایی، حداکثر مقدار رطوبتی از خاک است که خاک‌ورزی می‌تواند بدون اثرات منفی بر ساختمان خاک انجام شود (کارتر، 1993، دکستر و بیرد، 2001، آردوسیتون و همکاران، 2004، میرخانی و همکاران، 1386). بنابراین در استفاده از خاک برای فعالیت‌های کشاورزی حدود آتربرگ می‌توانند در ارزیابی اثرات استفاده طولانی مدت از زمین و اثرات خاک‌ورزی بر رفتار مکانیکی و رئولوژی خاک مفید باشند (کارتر، 1993، ترزاقی و همکاران، 1988). هرچند در بسیاری موارد اندازه‌گیری این ویژگی‌ها (حدود آتربرگ) در کشاورزی غیر معمول است (مپفومو و چناسایک، 1998). درحالی‌که داده‌های حدود آتربرگ عمدتاً برای طبقه‌بندی خاک‌ها برای اهداف مهندسی و برآورد برخی ویژگی‌های مهندسی خاک مانند مقاومت برشی، توان بارگذاری، آماس‌پذیری، سطح ویژه و تراکم‌پذیری (کارتر، 1993، میرخانی و همکاران، 1386) استفاده می‌شوند. اصغری (1390) نشان داد کاربرد لجن‌فاضلاب پتروشیمی تبریز می‌تواند به عنوان یک اصلاح کننده آلی ارزان قیمت سبب ارتقای کیفیت فیزیکی خاک شود. در تحقیق دیگری، میرخانی و همکاران (1386) توابع انتقالی را برای برآورد حدود پایایی خاک از روی ویژگی‌های زودیافت در 37 نمونه خاک منتخب از منطقه کرج ارائه کردند و نشان دادند که شاخص خمیرایی با متغیرهای چگالی ظاهری، درصد رس و کربن آلی خاک همبستگی معنی‌داری دارد.

لین و همکاران (2005) گزارش کردند افزودن 2 تا 16 درصد خاکستر لجن فاضلاب شهری شهر کوسینگ تایوان به خاک‌های ریزدانه و نرم مورد مطالعه سبب

کاهش معنی‌دار شاخص خمیرایی خاک و درنتیجه بهبود وضعیت فیزیکی خاک و کاهش درجه خمیرایی خاک از درجه متوسط به کم شد. لال و شوکلا (2004) بیان کردند که عوامل موثر بر حدود آتربرگ با عوامل مؤثر بر ضخامت لایه دوگانه پخشیده که شامل درصد رس، شن و میزان ماده آلی خاک می‌باشند مشابه هستند. خمیرایی خاک به دلیل ظرفیت زیاد ماده آلی برای جذب آب و همچنین برهمکنش‌های آن با مواد معدنی خاک که سبب تأثیر بر قدرت پیوند و کشش سطحی می‌شوند تحت تأثیر میزان ماده آلی خاک قرار می‌گیرد (میشل، 1976 برگرفته از همت و همکاران، 2010). همت و همکاران (2010) بیان کردند اثر لجن فاضلاب، کودهای حیوانی، مواد جامد فاضلاب‌های شهری و کمپوست بر حدود خمیرایی خاک وابسته به ویژگی‌های فیزیکو-شیمیایی خاک و ویژگی‌های ماده آلی افزوده شده به خاک است. لیما و همکاران (2009) نیز بیان کردند کاربرد طولانی مدت کودهای دامی سبب افزایش لیگنین و ترکیبات شبه لیگنین در ماده آلی خاک شده در حالی که کاربرد کمپوست سبب افزایش ترکیبات پروتئینی، شبه پروتئینی و کربوهیدرات‌ها در ماده آلی خاک شد. به طور کلی گزارش شده ماده آلی با تأثیر بر میزان پ‌هاش خاک سبب تغییر ظرفیت تبادل کاتیونی خاک می‌شود (بالدوک و نلسون، 2000) و تغییر ظرفیت تبادل کاتیونی سبب تغییر پایایی خاک می‌شود. به طوری که اسمیت و همکاران (1985) بین ظرفیت تبادل کاتیونی و حدود آتربرگ (حد بالا و پایین خمیرایی خاک)همبستگی مثبت قوی گزارش کردند. آنان همچنین بیان کردند ماده آلی با افزایش سطح ویژه خاک سبب افزایش ظرفیت نگهداری آب و در نتیجه افزایش حد پایین خمیرایی خاک می‌شود.

پژوهش‌های بسیاری در ارتباط با تأثیر لجن فاضلاب بر ویژگی‌های شیمیایی و آلودگی خاک انجام شده ولی مطالعات کمتری بر اثرات لجن فاضلاب اضافه شده به خاک در طول زمان بر ویژگی‌های فیزیکی خاک انجام شده است. به عنوان نمونه ژانگ (1994) گزارش کرد افزودن ماده آلی (پیت) به خاک سبب افزایش حدود بالا و پایین خمیرایی خاک شد درحالی که شاخص خمیرایی خاک را به مقدار کمی کاهش داد. مصدقی و همکاران (2000) نیز گزارش کردند با کاربرد کوتاه مدت 50 تن در هکتار کود دامی، رطوبت ایده‌ال خاک‌ورزی (حد گاورو) از 60 درصد حد پایین خمیرایی به 80 درصد حد پایین خمیرایی افزایش یافت. بوشان و شارما (2002) نیز بیان کردند اختلاط زیتوده گیاه شاهپسند درختی با خاک حدود پایایی (خمیرایی) خاک را به طور معنی‌داری افزایش داد. همت و همکاران (2010) نیز نشان دادند کاربرد 25 تا 100 تن لجن فاضلاب در هکتار سبب افزایش حدود بالا و پایین خمیرایی شد.

با توجه به اهمیت موضوع و با توجه به اینکه مطالعات اندکی در ارتباط با تغییر ویژگی‌های فیزیکی خاک در طول زمان در اثر کاربرد لجن فاضلاب انجام شده است، بنابراین این تحقیق با هدف بررسی تأثیر کاربرد لجن فاضلاب بر کربن آلی، پایداری خاکدانه‌ها، چگالی ظاهری و حدود خمیرایی خاک و پایداری خاکدانه‌ها در زمان‌های مختلف پس از کاربرد لجن در یک خاک آهکی انجام شد.

مواد و روش‌ها

برای انجام این پژوهش خاک مورد نیاز از عمق 30-0 سانتی‌متری خاک سری دانشکده (خاک آهکی با بافت لومی رسی) واقع در ایستگاه تحقیقات کشاورزی دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز واقع در منطقه باجگاه (در محدوده 52 درجه و 32 دقیقه طول شرقی و 29 درجه و 36 دقیقه عرض شمالی) برداشته شد. لجن فاضلاب مورد استفاده از شهرک صنعتی آب‌باریک فارس تأمین شد و پس از هوا خشک شدن از الک دو میلی‌متری عبور داده شد. آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در 3 تکرار و با تیمارهای لجن فاضلاب (در سه سطح صفر ، 30 و 60 تن در هتکار) و زمان (شامل سه زمان30 ،60 و120 روز پس از خوابانیدن) انجام شد. برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و لجن‌فاضلاب مورد استفاده در جدول 1 نشان داده شده است. مقدار مورد نیاز از لجن فاضلاب با 3 کیلوگرم از خاک مورد مطالعه که قبلاً هوا خشک شده و از الک چهار میلی‌متری عبور داده شده بود کاملاً با یکدیگر مخلوط و به گلدان‌های 3 کیلوگرمی منتقل شد. نمونه‌های خاک تیمار شده در محیط آزمایشگاه در محدوده دمای 3±25 درجه سانتی‌گراد و با توزین هفتگی در محدوده رطوبت ظرفیت مزرعه نگهداری شد.

پس از سپری شدن هر یک از زمان‌های ذکر شده چگالی ظاهری خاک موجود در گلدان‌ها با روش استوانه (بلیک، 1986) و با استفاده از استوانه‌ای با ارتفاع 3 و قطر داخلی 5/5 سانتی‌متر تعیین شد. سپس خاک گلدان‌ها تخلیه و پس از هوا خشک شدن، پایداری خاکدانه‌ها به روش الک خشک (چپیل، 1962) اندازه‌گیری شد. برای این منظور 200 گرم از خاک هر تیمار وزن شد و بر روی سری الک‌های استاندارد شامل الک‌های با قطر سوراخ 4، 3/35، 2/8، 2/36، 1/7، 1/18، 0/85،

0/71، 0/3، 0/212 و 0/106 میلی‌متر قرار داده و به مدت 10 دقیقه تکان داده شد. سپس خاک باقیمانده روی هر الک با دقت توزین شد و میانگین وزنی[1] (MWD) و هندسی[2] (GMD) قطر خاکدانه‌ها با استفاده از روابط زیر محاسبه شد:

(1)

$$MWD = \sum_{i=1}^{n} x_i w_i$$

(2)

$$GMD = e^{\frac{\sum_{i=1}^{n} w_i . \log x_i}{\sum_{i=1}^{n} w_i}}$$

که در آنها W_i وزن نسبی خاک باقیمانده روی هر الک، X_i میانگین قطر خاکدانه‌های باقیمانده روی هر الک (میانگین قطر سوراخ الک بالا و پایین) و n تعداد گروه‌های اندازه‌ای ذرات خاک می‌باشد.

همچنین حدود خمیرایی خاک (حدود آتربرگ)[3] شامل رطوبت حد بالای خمیرایی (UPL)[4]، رطوبت حد پایین خمیرایی (LPL)[5] و شاخص خمیرایی (PI)[6] بر اساس روش‌های استاندارد ASTM[7] D4318 (ASTM D4318, 2010) اندازه‌گیری شد. ماده آلی خاک نیز با روش ترسوزانی (نلسون و سامر، 1996) اندازه‌گیری شد.

تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها با استفاده از نرم افزار SAS و با به کارگیری آزمون LSD در سطح احتمال 5 درصد انجام شد.

نتایج و بحث

کربن آلی خاک

نتایج تجزیه واریانس نشان داد اثر سطوح لجن فاضلاب به کار برده شده، زمان و اثرات متقابل آنها بر میزان کربن آلی خاک در سطح 1 درصد معنی‌دار است (جدول 2). نتایج نشان داد با کاربرد 30 و 60 تن لجن فاضلاب در هکتار میانگین کربن آلی خاک به‌ترتیب به میزان 73 و 74 درصد در مقایسه با شاهد افزایش یافت؛ هرچند بین اثر کاربرد سطوح 30 و 60 تن لجن فاضلاب در هکتار بر کربن آلی خاک اختلاف معنی‌داری وجود نداشت (جدول 3). در هریک از زمان‌های مورد بررسی نیز با افزایش سطوح کاربردی لجن فاضلاب میزان کربن آلی خاک به‌طور معنی‌داری در مقایسه با شاهد افزایش یافت (هرچند در هیچ‌یک از زمان‌های مورد مطالعه، تفاوت بین کربن آلی خاک در تیمارهای کاربرد 30 و 60 تن لجن فاضلاب معنی‌دار نبود). علی رغم دو برابر شدن میزان لجن فاضلاب به کار رفته ولی تفاوت معنی‌داری بین کربن آلی (و حتی برخی ویژگی‌های دیگر مورد مطالعه) در خاک‌های تیمار شده با 30 و 60 تن لجن فاضلاب وجود ندارد که ممکن است به این دلیل باشد که در سطوح زیاد کاربرد لجن فاضلاب احتمالاً دمای خاک و در نتیجه سرعت تجزیه ماده آلی افزوده شده زیادتر از سطوح کم کاربرد لجن فاضلاب بوده و در نتیجه در سطوح زیاد لجن به کار برده شده ماده آلی خاک بیشتر تجزیه و از خاک خارج شده است و منجربه اختلاف اندک کربن آلی بین تیمارهای مربوط به سطوح مختلف لجن فاضلاب شده است. به همین دلیل شاید بتوان عنوان کرد که برای تأثیر بر ویژگی‌های خاک مورد بررسی در این تحقیق تا 30 تن بر هکتار لجن فاضلاب مؤثرتر باشد و کاربرد مقادیر بیشتر لجن فاضلاب نتواند به همان میزان که در مقادیر کم مؤثر است بر ویژگی‌های خاک تأثیر داشته باشد. البته این موضوع نیز می‌تواند تحت تأثیر برهمکنش‌های مختلف بین ماده آلی با مواد معدنی خاک قرار گیرد.

میانگین کربن آلی خاک پس از گذشت 60 و 120 روز از خوابانیدن در مقایسه با 30 روز به‌ترتیب به میزان 15 و 40 درصد کاهش یافت (جدول 3). نتایج نشان داد در هر یک از سطوح کاربرد 30 و 60 تن لجن فاضلاب در هکتار نیز با افزایش مدت زمان خوابانیدن میزان کربن آلی خاک در مقایسه با 30 روز به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. دلیل این کاهش احتمالاً تجزیه بخش بیشتری از لجن فاضلاب توسط ریز جانداران خاک در زمان‌های طولانی‌تر خوابانیدن می‌باشد. ناواس و همکاران (1999) نیز در مطالعات خود بر خاک جیپسی سول، افزایش ماده آلی خاک را با کاربرد 320 تن در هکتار لجن فاضلاب مشاهده کردند. نتایج مشابهی در رابطه با کاربرد مقادیر مختلف انواع لجن فاضلاب در خاک‌های مناطق خشک و نیمه خشک ایران (کسرایی و ساعدی، 1389) و (همت و همکاران، 2010) و سایر کشورها (اگلیدس و همکاران، 2000) گزارش شده است. اوجدا و همکاران (2006) نیز گزارش کردند افزودن لجن فاضلاب سبب افزایش کربن آلی در خاک‌های لوم شنی و لومی مورد مطالعه شد.

---

1. Mean weight diameter
2. Geometric mean diameter
3. Atterberg's limits
4. Upper plastic limit
5. Lower plastic limit
6. American Society for Testing and Materials
7. Plasticity Index

اصغری و همکاران (2009) نیز گزارش کردند که اثر اصلی مقدار مصرفی لجن فاضلاب و زمان خوابانیدن بر کربن آلی خاک در سطح یک درصد معنی‌دار شد به گونه‌ای که کلیه مقادیر مصرفی لجن فاضلاب سبب افزایش معنی‌دار کربن آلی خاک نسبت به شاهد شد و بیشترین مقدار کربن آلی در تیمار کاربرد 100 تن لجن فاضلاب در هکتار مشاهده شد. ایشان همچنین گزارش کردند کربن آلی خاک پس از گذشت 60 و120 روز از شروع آزمایش افزایش یافت و از آن پس، با گذشت 180 روز مقدار کربن آلی خاک به طور معنی‌داری نسبت به زمان‌های 60 و 120 روز کاهش یافت. نتایج مشابهی در رابطه با تغییرات اثر لجن فاضلاب با زمان در خاک‌های مختلف توسط سانچز-مارتین و همکاران (2007) و باستیدا و همکاران (2008) گزارش شده است.

چگالی ظاهری خاک

نتایج تجزیه واریانس نشان داد اثر سطوح لجن فاضلاب به کار برده شده، زمان و اثرات متقابل آنها بر چگالی ظاهری خاک به‌ترتیب در سطوح 1، 5 و 5 درصد معنی‌دار است (جدول 2). نتایج نشان داد با کاربرد 30 و 60 تن لجن فاضلاب در هکتار چگالی ظاهری خاک به‌ترتیب به‌میزان 16 و 17 درصد در مقایسه با شاهد کاهش یافت (جدول 4). در هریک از زمان‌های مورد بررسی نیز با افزایش سطوح کاربردی لجن فاضلاب میزان چگالی ظاهری خاک به‌طور معنی‌داری در مقایسه با شاهد کاهش یافت (هرچند در هیچ‌یک از زمان‌های مورد مطالعه تفاوت بین چگالی ظاهری خاک در تیمارهای کاربرد 30 و 60 تن لجن فاضلاب معنی‌دار نبود). انتظار می‌رود با افزودن مواد آلی به خاک چگالی ظاهری و تراکم‌پذیری خاک کاهش یابد زیرا به‌طور کلی موادآلی دارای چگالی ظاهری کم بوده و از طرفی افزایش مواد آلی در خاک سبب افزایش تخلخل در خاک می‌شوند (فتون، 1995). ناواس و همکاران (1999) نیز گزارش کردند با کاربرد 320 تن در هکتار لجن فاضلاب در خاک جیبسی‌سول مورد مطالعه چگالی‌ظاهری خاک از 1/25 به 1 گرم بر سانتی‌متر مکعب کاهش یافت.

نتایج نشان داد چگالی ظاهری خاک در تیمار شاهد (بدون کاربرد لجن فاضلاب) با گذشت زمان‌های 60 و 120 روز در مقایسه با 30 روز پس از خوابانیدن به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. درحالی که چگالی ظاهری در خاک‌های تیمار شده با 30 و 60 تن لجن فاضلاب در هکتار در زمان‌های 60 و 120 روز در مقایسه با 30 روز پس از خوابانیدن تفاوت معنی‌داری نداشت (جدول 4). نتایج همچنین نشان داد میانگین چگالی ظاهری خاک پس از گذشت 60 روز از خوابانیدن در مقایسه با 30 روز به‌طور معنی‌داری به‌میزان حدود 3 درصد کاهش یافت. در حالی که کاهش چگالی ظاهری خاک پس از 120 روز از شروع آزمایش در مقایسه با زمان 30 روز از نظر آماری معنی‌دار نبود. شاید دلیل این پدیده اثر لجن فاضلاب به کاربرده شده بر بهبود بیشتر ساختمان خاک در زمان 60 روز در مقایسه با 120 روز پس از شروع آزمایش باشد. همچنین ممکن است تجزیه مواد آلی در ابتدا سبب کاهش ترکیبات حجیم‌تر و با چگالی کمتر و در نتیجه کاهش چگالی ظاهری خاک شده باشد اما با گذشت زمان و تجزیه بیشتر لجن فاضلاب، تأثیر ترکیبات حاصله بر کاهش چگالی ظاهری خاک کمتر شده باشد. مولین و همکاران (1990) نیز یکی از علل افزایش چگالی ظاهری خاک مدتی پس از افزودن لجن فاضلاب به خاک را بی‌ثباتی پایداری خاکدانه‌ها و جایگزین شدن ذرات در خلل و فرج خاک و در نتیجه افزایش چگالی ظاهری خاک عنوان کردند.

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

ویژگی‌های اندازه‌گیری شده	واحد اندازه‌گیری	خاک	لجن فاضلاب
پ‌هاش *	-	7/82	6/89
قابلیت هدایت الکتریکی عصاره 1:5	دسی زیمنس بر متر	0/76	3/65
ماده آلی	درصد	1/77	28/92
نیتروژن کل	درصد	0/12	1/03
نسبت کربن به نیتروژن	-	14/75	28/08
کلاس بافت	-	رسی سیلتی	-
کربنات کلسیم معادل	درصد	40	-
رطوبت ظرفیت مزرعه	درصد وزنی	25/86	-

*. پ‌هاش خاک در خمیر اشباع و پ‌هاش لجن فاضلاب در نسبت 1:5 آب به لجن اندازه‌گیری شد.

جدول 2- نتایج تجزیه واریانس تاثیر کاربرد سطوح لجن فاضلاب و زمان بر برخی ویژگی‌های فیزیکی در خاک مورد مطالعه

	میانگین مربعات						
درجه آزادی	OC (%)	BD ($g\ cm^{-3}$)	MWD (mm)	GMD (mm)	UPL (%)	LPL (%)	PI
2	1/90**	0/13**	0/21*	0/02*	44/53*	30/68*	2/021ns
2	1/45**	0/002*	0/40**	0/04**	101/40**	11/53ns	51/52**
4	0/13**	0/002*	0/07ns	0/008ns	17/25ns	20/70*	63/98**
18	0/013	0/0004	0/03	0/003	8/56	6/71	1/61

معنی‌دار نمی‌باشد.

ر آزمون F در سطوح پنج و یک درصد معنی‌دار می‌باشند.

BD و PI به‌ترتیب عبارتند از: کربن آلی خاک، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها، میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها، حد بالای خمیرایی، حد پایین خمیرایی، جرم مخصوص ظاهری خاک و

جدول 3- اثر کاربرد سطوح مختلف لجن فاضلاب برکربن آلی خاک (درصد) در زمان‌های مختلف پس از خوابانیدن

	مدت زمان خوابانیدن (روز)			
ب (تن در هکتار)	30	60	120	میانگین
0	1/25* e	1/30 e	0/70 f	1/08 B
30	2/51 a	1/78 c	1/34 de	1/87 A
60	2/18 ab	1/96 bc	1/50 cd	1/88 A
یانگین	1/98 A	1/68 B	1/18 C	

روف مشابه نشان داده شده‌اند از نظر آماری با استفاده از آزمون LSD در سطح 5 درصد اختلاف معنی‌دار ندارند.

جدول 4- اثر کاربرد سطوح مختلف لجن فاضلاب بر چگالی ظاهری (گرم بر سانتی متر مکعب) در زمان‌های مختلف پس از خوابانیدن

لجن فاضلاب (تن در هکتار)	مدت زمان خوابانیدن (روز)			میانگین
	30	60	120	
0	1/32 *a	1/25 b	1/24 b	1/27 A
30	1/08 cd	1/06 cd	1/09 c	1/07 B
60	1/05 d	1/05 d	1/06 cd	1/05 C
میانگین	1/15 A	1/12 B	1/13 AB	

*. میانگین‌هایی که در هر ردیف یا ستون با حروف مشابه نشان داده شده‌اند از نظر آماری با استفاده از آزمون LSD در سطح 5 درصد اختلاف معنی‌دار ندارند.

بهره‌مند و همکاران (1381) گزارش کردند چگالی ظاهری خاک از 1/27 در تیمار شاهد به 1/13 گرم بر سانتی‌متر مکعب در تیمار 100 تن لجن فاضلاب در هکتار کاهش یافت. آنان همچنین گزارش کردند اثر لجن‌فاضلاب بر چگالی ظاهری خاک با گذشت زمان کاهش یافته به‌طوری که با گذشت بیشتر زمان پس از مصرف لجن‌فاضلاب در خاک، چگالی ظاهری خاک مجدداً افزایش می‌یابد. شیرانی و همکاران (1389) نیز در مطالعه خود بر اثر تجمعی لجن‌فاضلاب (سطوح صفر، 22/5 و 45 تن در هکتار) بر چگالی ظاهری خاک لومی آهکی گزارش کردند چگالی ظاهری خاک مورد مطالعه به‌طور معنی‌داری کاهش یافت به‌گونه‌ای که با افزایش سطوح کاربردی لجن فاضلاب و زمان خوابانیدن این تأثیر افزایش یافت. برخی از محققان نشان دادند که تأثیر لجن‌فاضلاب بر کاهش چگالی ظاهری و افزایش تخلخل خاک در مقایسه با کودهای دامی بیشتر است (پاگلیای و همکاران، 1981). زائری (1384) گزارش کرد کاربرد سطوح مختلف لجن فاضلاب (25، 50 و 100 تن در هکتار) به‌صورت تجمعی و باقیمانده در یک خاک رسی، چگالی ظاهری خاک را در مقایسه با تیمار شاهد به‌طور معنی‌داری کاهش داد. ایشان همچنین بیان کردند که افزایش سطوح لجن‌فاضلاب مصرف شده در یک سال در مقایسه با مصرف سطوح کمتر لجن‌فاضلاب در طی چند سال تأثیری یکسان دارند و همچنین گذشت زمان عامل مهم دیگری است که سبب تأثیرگذاری بیشتر لجن فاضلاب بر چگالی ظاهری خاک می‌شود. آنان دلیل این افزایش را تجزیه ماده آلی موجود در لجن فاضلاب در طول فصل رشد بیان کردند.

پایداری خاکدانه‌ها- میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد اثر لجن فاضلاب و زمان خوابانیدن بر میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها به ترتیب در سطوح 5 و 1 درصد معنی‌دار است در حالی که اثر متقابل لجن فاضلاب و زمان خوابانیدن بر میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها معنی‌دار نیست (جدول 2). بنابراین در مورد میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها و سایر ویژگی‌هایی که اثر متقابل تیمارها بر آنها معنی‌دار نبوده در مقایسه میانگین‌ها تنها به ارائه نتایج اثرات اصلی بسنده شده است (جدول 5). نتایج نشان داد میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها با کاربرد 30 و 60 تن لجن فاضلاب در هکتار به‌طور معنی‌داری به‌میزان 16 درصد در مقایسه با شاهد افزایش یافت (جدول 5). هرچند بین اثر تیمارهای گفته شده بر میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها اختلاف معنی‌داری وجود نداشت. یکسان بودن میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در تیمارهای کاربرد 30 و 60 تن لجن فاضلاب در هکتار (علی‌رغم تفاوت زیاد و دو برابری در مقدار لجن فاضلاب افزوده شده به خاک) می‌تواند به دلیل عدم تفاوت معنی‌دار بین کربن آلی در خاک مربوط به تیمارهای گفته شده باشد (جدول 3) و یا اینکه مربوط به نوع روش به کاربرده شده برای تعیین میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (الک خشک) باشد.

همچنین یکسان بودن میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در تیمارهای کاربرد 30 و 60 تن لجن فاضلاب در هکتار می تواند به این دلیل باشد که کاربرد مقادیر زیاد لجن فاضلاب عمدتاً بر افزایش قطر در خاکدانه‌هایی موثر بوده که امکان تشخیص آنها با مجموعه الک‌های به کار برده شده در آزمایش ممکن نبوده است و لذا منجر به عدم تشخیص اختلاف در میانگین قطر خاکدانه‌ها بین دو تیمار کاربرد 30 و 60 تن لجن فاضلاب در هکتار شده است. شیرانی و همکاران (2002) نیز نشان دادند که افزودن 30 تن در هکتار کود دامی به یک خاک لوم رسی‌سیلتی زیر کشت ذرت در مزرعه نتوانست میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها را در انتهای فصل زراعی به طور معنی‌دار نسبت به شاهد افزایش دهد اگرچه میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در تیمار 60 تن در هکتار به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. بهره‌مند و همکاران (1381) مشاهده کردند که با افزایش کاربرد سطوح مختلف لجن فاضلاب میانگین وزنی قطر

خاکدانه‌ها (که با روش الک تر اندازه‌گیری شده بود) به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. شیرانی و همکاران (1389) نیز به نتایج مشابهی دست یافتند. در پژوهشی دیگر زائری (1384) در بررسی اثر لجن‌فاضلاب در سه سطح (25، 50 و 100 تن در هکتار) در یک خاک لومی گزارش کرد که با افزایش سطح لجن فاضلاب مورد استفاده میزان خاکدانه‌های پایدار در آب به‌طور معنی‌داری افزایش یافت به‌گونه‌ای که افزایش سطوح و تعداد کوددهی سبب افزایش پایداری خاکدانه‌ها در مقایسه با شاهد شد. این درحالی‌است که اصغری (1390) با بررسی کاربرد لجن بیولوژیکی فاضلاب پتروشیمی تبریز در چهار سطح (25، 50، 75 و 100 تن در هکتار) بر میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها، تأثیر معنی‌داری گزارش نکرد. این نتایج نیز با یافته‌های اصغری و همکاران (2009) مشابهت دارد که نشان دادند مصرف لجن بیولوژیکی پتروشیمی تبریز به مقادیر حدود 5 و 10 تن در هکتار پس از 6 ماه خوابانیدن در شرایط گلخانه‌ای نتوانست میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در یک خاک لوم شنی منتخب از منطقه تبریز را به طور معنی‌دار افزایش دهد. آنان دلیل این مساله را به درشتی بافت خاک و مقادیر کم مصرف لجن فاضلاب نسبت دادند.

جدول 5 - اثرات اصلی کاربرد سطوح مختلف لجن فاضلاب و زمان پس از خوابانیدن بر میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD)، میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها (GMD) و رطوبت حد بالای خمیرایی (UPL) درخاک مورد مطالعه

لجن فاضلاب (تن در هکتار)	MWD (mm)	GMD (mm)	UPL (%)	مدت زمان خوابانیدن (روز)	MWD (mm)	GMD (mm)	UPL (%)
0	1/64* B	0/93 B	33/05 B	30	1/96 A	1/02 A	33/61 B
30	1/91 A	1/01 A	32/31 B	60	1/59 B	0/91 B	37/ 46 A
60	1/91 A	1/03 A	36/48 A	120	1/94 A	1/03 A	30/77 B

*میانگین‌هایی که در هر ستون با حروف مشابه نشان داده شده‌اند از نظر آماری با استفاده از آزمون LSD در سطح 5 درصد اختلاف معنی‌دار ندارند.

همان‌گونه که نتایج نشان می‌دهد میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های خاک پس از گذشت 60 روز به میزان 19 درصد در مقایسه با 30 روز کاهش یافت حال آن که میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها پس از گذشت مدت زمان 120 روز در مقایسه با 30 روز از نظر آماری به‌طور معنی‌داری تغییر نکرد. در حالی که در مقایسه با 60 روز به میزان 22 درصد افزایش یافت. یکی از علل احتمالی این نوسانات این است که کودهای آلی، به‌ویژه لجن فاضلاب، در آغاز افزودن به خاک مورد حمله قارچ‌ها قرار می‌گیرند و میسیلوم قارچ‌ها در خاک افزایش می‌یابد. بنابراین شبکه‌های قارچی سبب افزایش پایداری خاکدانه‌ها می‌شوند. با کاهش نسبت کربن به نیتروژن لجن فاضلاب، قدرت تجزیه‌کنندگی باکتری‌ها بیشتر شده و در این رقابت قارچ‌ها حذف می‌شوند (مولین و همکاران، 1990). اصغری و همکاران (2009) نیز گزارش کردند میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در کلیه تیمارها (شاهد و کاربرد 25 و 100 تن در هکتار لجن فاضلاب) در زمان 120 و 180 روز بیشتر از 60 روز است. شیرانی و همکاران (1389) نیز در بررسی اثر تجمعی لجن فاضلاب در سه سطح (صفر، 22/5، 45 تن در هکتار در سه سال) بر پایداری خاکدانه‌های خاک لومی آهکی، گزارش کردند با افزایش سطوح کاربردی لجن فاضلاب و گذشت زمان، پایداری خاکدانه‌ها افزایش می‌یابد. زائری (1384) نیز در پژوهش خود مشاهده کرد که میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها با گذشت زمان در تیمارهای لجن فاضلاب افزایش یافت. این یافته‌ها نشان می‌دهد که فرایند تشکیل خاکدانه‌ها تحت تأثیر مواد آلی نیاز به زمان نسبتا طولانی دارد، به‌طوری‌که با توجه به نتایج بدست آمده با گذشت زمان میزان ماده آلی خاک کاهش یافته است ولی تشکیل خاکدانه‌ها برای مدت طولانی‌تری ادامه می‌یابد. به‌طور کلی اثر مواد آلی در خاکدانه‌سازی نیاز به زمان نسبتا طولانی دارد. در پژوهش‌های جداگانه‌ای میلر و همکاران (2002) و لوگان و همکاران (1996) گزارش کردند که رشد شبکه‌های قارچی برروی خاکدانه‌ها بر اثر افزودن لجن فاضلاب می‌تواند سبب افزایش پایداری خاکدانه‌ها شود. حال آن که بهره‌مند و همکاران (1381) پس از افزودن لجن فاضلاب به خاک گزارش کردندبا گذشت زمان در ابتدا پایداری خاکدانه‌ها بدون تغییر مانده اما پس از مدتی افزایش و سپس کاهش یافت به‌طوری که پس از 221 روز پایداری خاکدانه‌ها به حالت اول بازگشت. هیلل (1998) در توجیه این پدیده بیان کرد که فعالیت میکروب‌های بومی خاک تحت تأثیر شرایط

رطوبتی و حرارتی مختلف قرار گرفته و در نتیجه ترشحات آنها و اثر آنها بر پایداری خاکدانه‌ها در زمان‌های مختلف متفاوت است.

پایداری خاکدانه‌ها- میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد اثر لجن فاضلاب و زمان خوابانیدن بر میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها به‌ترتیب در سطوح 5 و 1 درصد معنی‌دار است درحالی که اثر متقابل لجن فاضلاب و زمان خوابانیدن بر میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها معنی‌دار نیست (جدول 2). نتایج نشان داد کاربرد 30 و 60 تن لجن فاضلاب در هکتار میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها را به‌طور معنی-داری به‌میزان 9 و 11 درصد در مقایسه با شاهد افزایش داد. هرچند بین اثر کاربرد 30 و 60 تن لجن فاضلاب در هکتار بر میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها اختلاف معنی-داری وجود نداشت (جدول 5). اثر لجن فاضلاب بر افزایش میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها احتمالاً به دلیل تاثیر مثبت ماده آلی حاصل از لجن فاضلاب بر فرایندهای خاکدانه‌سازی می‌باشد.

میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها با گذشت 60 روز پس از خوابانیدن در مقایسه با 30 روز پس از خوابانیدن به‌طور معنی‌داری به‌میزان 11 درصد کاهش یافت درحالی که میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها با گذشت 120 روز از زمان خوابانیدن در مقایسه با 30 روز از نظر آماری تفاوت معنی‌داری نداشت. هرچند با گذشت 120روز از زمان خوابانیدن میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها در مقایسه با 60 روز به‌طور معنی‌داری به‌میزان 13 درصد افزایش یافت (جدول 5).

رطوبت حد بالای خمیرایی (UPL)

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد اثر لجن فاضلاب و زمان خوابانیدن بر حد بالای خمیرایی خاک به‌ترتیب در سطوح 5 و 1 درصد معنی‌دار است درحالی که اثر متقابل لجن فاضلاب و زمان خوابانیدن بر حد بالای خمیرایی خاک معنی‌دار نیست (جدول 2). نتایج نشان داد رطوبت حد بالای خمیرایی با کاربرد 30 تن لجن فاضلاب در هکتار در مقایسه با شاهد به‌میزان حدود 2 درصد کاهش یافته که از نظر آماری معنی‌دار نبود، اما با کاربرد 60 تن لجن فاضلاب در هکتار رطوبت حد بالای خمیرایی در مقایسه با شاهد به‌طور معنی‌داری به میزان 10 درصد افزایش یافت (جدول 5). شاید دلیل این پدیده مربوط به ذرات مواد آلی باشد، که با افزایش سطوح کاربردی لجن فاضلاب مقدار مواد آلی افزایش یافته است. زیرا مواد آلی به دلیل داشتن حالت کلوئیدی در مقایسه با ذرات معدنی خاک سطح ویژه زیادی داشته و درنتیجه آب بیشتری را به خود جذب می‌کنند و منجر به افزایش رطوبت حد بالای خمیرایی می‌شوند. همت و همکاران (2010) نیز گزارش کردند که مصرف لجن فاضلاب در مقادیر 50 و 100 تن در هکتار از طریق افزایش کربن آلی خاک سبب افزایش معنی دار رطوبت حد بالای خمیرایی در خاک لوم رسی سیلتی شد.

همچنین، همان‌گونه که نتایج نشان می‌دهد میانگین رطوبت حد بالای خمیرایی خاک با گذشت 60 روز پس از خوابانیدن در مقایسه با 30 روز به‌طور معنی‌داری به-میزان 11 درصد افزایش یافت، حال آن که رطوبت حد بالای خمیرایی پس از گذشت 120 روز در مقایسه با 30 روز تفاوت معنی‌داری نداشت. همچنین پس از گذشت 120 روز از خوابانیدن میانگین رطوبت حد بالای خمیرایی خاک در مقایسه با 60 روز به‌طور معنی‌داری به میزان 18 درصد کاهش یافت. به نظر می‌رسد در ابتدا به-دلیل تجزیه تدریجی لجن فاضلاب، مواد آلی افزایش یافته و رطوبت حد خمیرایی خاک نیز افزایش یافته است. اما با گذشت 120 روز پس از خوابانیدن به دلیل تجزیه بیشتر ماده آلی و کاهش میزان ماده آلی رطوبت حد بالای خمیرایی خاک کاهش یافته است. حسین مملکاوی و همکاران (1999) نیز گزارش کردند که رطوبت حد بالای خمیرایی خاک در زمان 180 روز در مقایسه با زمان‌های کوتاه‌تر به‌طور معنی‌دار کاهش یافت. آنان دلیل این موضوع را سطح ویژه زیادتر ذرات آلی خاک (به‌دلیل خاصیت کلوئیدی مواد آلی) در مقایسه با ذرات معدنی خاک بیان کردند که می‌توانند آب بیشتری را به خود جذب کرده و منجر به افزایش حد بالای خمیرایی خاک شوند. اصغری (1390) در مشاهدات خود دریافت که مقدار مصرفی لجن فاضلاب و زمان خوابانیدن بر رطوبت حد بالای خمیرایی به ترتیب در سطح احتمال یک و پنج درصد معنی‌دار است و دلیل این امر را افزایش مواد آلی حاصل از لجن فاضلاب می‌داند که سبب افزایش رطوبت حد بالای خمیرایی شد. اما با تجزیه ماده آلی خاک با گذشت زمان رطوبت حد بالای خمیرایی نیز کاهش یافته است.

رطوبت حد پایین خمیرایی (LPL)

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد اثر لجن فاضلاب و همچنین اثر متقابل لجن فاضلاب و زمان خوابانیدن بر حد پایین خمیرایی خاک در سطح 5 درصد معنی‌دار است درحالی که اثر زمان خوابانیدن بر حد پایین خمیرایی خاک معنی‌دار نیست (جدول 2). مقایسه میانگین‌ها نشان داد کاربرد لجن فاضلاب و همچنین زمان خوابانیدن در مقایسه با شاهد اثر معناداری بر میانگین

رطوبت حد پایین خمیرایی خاک نداشت (جدول 6). هرچند کاربرد 60 تن لجن فاضلاب در هکتار در مقایسه با 30 تن لجن فاضلاب در هکتار میانگین رطوبت حد پایین خمیرایی خاک را به‌طور معنی‌داری به میزان حدود 18 درصد افزایش داد. همچنین نتایج بررسی اثر متقابل زمان و لجن فاضلاب نشان داد در خاک‌های تیمار نشده با لجن فاضلاب (شاهد) و همچنین در خاک‌های تیمار شده با 60 تن لجن فاضلاب در هکتار، گذشت زمان اثر معنی‌داری بر رطوبت حد پایین خمیرایی خاک نداشت. درحالی که در خاک‌های تیمار شده با 30 تن لجن فاضلاب در هکتار، رطوبت حد پایین خمیرایی پس از گذشت 120 روز از شروع آزمایش در مقایسه با زمان‌های 30 و 60 روز پس از شروع آزمایش به میزان حدود 31 درصد کاهش یافت. دلیل عدم تأثیر لجن فاضلاب بر رطوبت حد پایین خمیرایی در مقایسه با شاهد ممکن است مقدار کم لجن فاضلاب مصرفی و درنتیجه افزایش اندک ماده آلی خاک باشد. در تایید نتایج این تحقیق اصغری (1390) نیز در پژوهش خود دریافت که با افزایش مقدار مصرفی لجن به دلیل افزایش کربن آلی خاک رطوبت حد پایین خمیری افزایش یافته است ولی این افزایش تنها در مورد تیمارهای 75 و 100 تن در هکتار معنی‌دار بود و تیمار کاربرد 100 تن در هکتار لجن فاضلاب در هکتار به‌دلیل افزودن بیشترین مقدار کربن آلی، سبب بیشترین میزان افزایش در رطوبت حد پایین خمیرایی خاک شد. همت و همکاران (2010) نیز در ارتباط با تاثیر لجن فاضلاب بر رطوبت حد پایین خمیرایی گزارش کردند که با افزایش مقدار لجن فاضلاب به کار برده شده، رطوبت حد پایین خمیرایی خاک افزایش می‌یابد. آنان بیان کردند ماده آلی به دلیل افزایش ظرفیت جذب آب و همچنین به دلیل ویژگی‌های مکانیکی متفاوت با مواد معدنی خاک منجر به افزایش حد پایین خمیرایی خاک مورد مطالعه شده است. سیلوا و همکاران (2007) و ژانگ (1994) نیز به نتایج مشابهی دست یافتند. بلاکو –کانکویی و همکاران (2006) نیز بین میزان کربن آلی و حد پایین خمیرایی خاک همبستگی مثبت معنی‌دار گزارش کردند.

جدول 6- اثر کاربرد سطوح مختلف لجن فاضلاب بر رطوبت حد پایین خمیرایی (درصد) در زمان های مختلف پس از خوابانیدن

لجن فاضلاب (تن در هکتار)	مدت زمان خوابانیدن (روز)			میانگین
	30	60	120	
0	20/7* a	22/41a	21/44 a	21/52 AB
30	22/78 a	22/67 a	15/74 b	20/40 B
60	23/84 a	23/30 a	24/88 a	24/01 A
میانگین	22/45 A	20/68 A	22/80 A	

*. میانگین‌هایی که در هر ردیف یا ستون با حروف مشابه نشان داده شده‌اند از نظر آماری با استفاده از آزمون LSD در سطح 5 درصد اختلاف معنی‌دار ندارند.

شاخص خمیرایی (PI)

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد اثر لجن فاضلاب بر شاخص خمیرایی خاک معنی‌دار نبود درحالی که اثر زمان خوابانیدن و همچنین اثر متقابل لجن فاضلاب و زمان خوابانیدن بر شاخص خمیرایی خاک در سطح 1 درصد معنی‌دار است (جدول 2). نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد کاربرد لجن فاضلاب در مقایسه با شاهد اثر معنی داری بر شاخص خمیرایی خاک نداشت (جدول 7). با افزایش مقادیر مصرفی لجن فاضلاب و در نتیجه کربن آلی خاک رطوبت حد بالای خمیرایی و رطوبت حد پایین خمیرایی هر دو تقریباً به یک میزان افزایش یافته و سبب شد که محدوده رطوبتی بین دو حد بالا و پایین خمیرایی (شاخص خمیرایی) نسبتا ثابت بماند. لال و شوکلا (2004) نیز به نتایج مشابهی دست یافتند. همت و همکاران (2010) نیز گزارش کردند که مقادیر مصرفی لجن فاضلاب نتوانست شاخص خمیرایی را به طور معنی‌دار تحت تأثیر قرار دهد. این نتایج با یافته‌های اصغری (1390)، بال و همکاران (2000) و دی‌جانگ و همکاران (1990) نیز مطابقت دارد. این در حالیست که گولسر و همکاران (2008)، حسین ملکاوی و همکاران (1999) و ژانگ (1994) کاهش شاخص خمیرایی و بلانکو-کانکویی و همکاران (2006) افزایش شاخص خمیرایی را با افزایش سطوح کاربردی ماده آلی گزارش کردند. دلیل این عدم تطابق شاید اختلاف در ویژگی‌های ذاتی خاک، مقدار و نوع رس‌ها، نوع و ویژگی مواد آلی مورد استفاده در آزمایش باشد. دی جانگ و همکاران (1990) و ماگو و آبه (1998) نیز گزارش کردند میزان وابستگی حدود آتربرگ به کربن آلی خاک متفاوت بوده و

تحت تأثیر بافت خاک، منشا ماده آلی خاک و مدیریت خاک-گیاه می‌باشد.

جدول 7- اثر کاربرد سطوح مختلف لجن فاضلاب بر شاخص خمیرایی (درصد) در زمان های مختلف پس از خوابانیدن

لجن فاضلاب (تن در هکتار)	مدت زمان خوابانیدن (روز)			میانگین
	30	60	120	
0	14/63* b	12/03 c	7/92 d	11/53 A
30	7/27 d	13/46 bc	14/99 b	11/91 A
60	11/59 c	18/48 a	7/34 d	12/47 A
میانگین	11/17 B	14/66 A	10/08 B	

*. میانگین‌هایی که در هر ردیف یا ستون با حروف مشابه نشان داده شده‌اند از نظر آماری با استفاده از آزمون LSD در سطح 5 درصد اختلاف معنی‌دار ندارند.

میانگین شاخص خمیرایی خاک 60 و 120 روز پس از خوابانیدن در مقایسه با 30 روز به‌ترتیب به‌میزان 31 درصد افزایش و 10 درصد کاهش (غیرمعنی‌دار) یافت. احتمالاً به‌دلیل وابستگی شدید شاخص خمیرایی به مواد آلی، با کاهش معنی دار کربن آلی در 120 روز نسبت به زمان‌های پیشین شاخص خمیرایی نیز کاهش یافته است. اصغری (1390) نیز نتایج مشابهی را گزارش و بیان کرد شاخص خمیرایی در زمان 180 روز پس از کاربرد لجن فاضلاب به‌طور معنی‌داری در مقایسه با زمان‌های پیشین کاهش یافت. نتایج همچنین نشان داد تنها در خاک‌های تیمار نشده با لجن فاضلاب (شاهد) با افزایش زمان خوابانیدن شاخص خمیرایی خاک در مقایسه با زمان 30 روز پس از شروع آزمایش به‌طور معنی‌داری کاهش یافت و در خاک-های تیمار شده با لجن فاضلاب گذشت زمان 60 روز در مقایسه با زمان 30 روز پس از شروع آزمایش سبب افزایش معنی‌دار شاخص خمیرایی خاک شد.

نتیجه گیری

به‌طور کلی نتایج نشان داد کاربرد لجن فاضلاب و گذشت زمان سبب ایجاد تغییرات معنی‌داری در پایداری خاکدانه‌ها و حدود خمیرایی خاک شد. با افزایش سطوح مصرفی لجن فاضلاب پایداری خاکدانه‌ها افزایش یافت در حالی که با افزایش مدت زمان خوابانیدن تا 60 روز پایداری خاکدانه‌ها کاهش و پس از آن افزایش یافت. کاربرد لجن فاضلاب اثر معنی‌داری بر رطوبت حد پایین و شاخص خمیرایی نداشت و تنها کاربرد 60 تن لجن فاضلاب در هکتار رطوبت حد بالای خمیرایی خاک را افزایش داد. بنابراین افزودن لجن فاضلاب می‌تواند درعین حال که سبب افزایش ماده آلی خاک و ظرفیت نگهداری آب خاک شود امکان شخم و عملیات خاک‌ورزی را در رطوبت‌های بیشتر و بدون فشردگی خاک فراهم آورد. البته با توجه به اینکه معمولاً مشکل اساسی استفاده از لجن فاضلاب مقدار زیاد عناصر سنگین موجود در آن و به تبع آن سمیتی است که در گیاهان ایجاد می‌کند لذا بایستی در کاربرد مقدار لجن فاضلاب به‌گونه‌ای مدیریت شود که علاوه بر در نظر گرفتن اثرات مثبت لجن بر بهبود ویژگی‌های فیزیکی خاک، مسائل اقتصادی و اثرات نامطلوب حاصل از کاربرد مقادیر زیاد لجن فاضلاب و خطرات زیست محیطی حاصل نیز مد نظر قرار گیرد. همچنین بایستی توجه شود که کاربرد لجن فاضلاب به-عنوان یک اصلاح‌کننده خاک علاوه بر اصلاح ویژگی‌های خاکی (به‌ویژه در خاک‌های ناپایدار) یکی از روش‌های مهم رهایی از انبوه فاضلاب‌ها و لجن‌های فاضلاب تولیدی در جوامع شهری و صنعتی می‌باشد و همچنین اینکه افزودن مقادیر (نسبتاً زیاد) گفته شده لجن فاضلاب (در این پژوهش و همچنین سایر پژوهش‌هایی که در بخش مقدمه به تفصیل آورده شده است) علاوه بر اثرات کوتاه مدت می‌توانند اثرات درازمدت بر ویژگی‌های خاک داشته باشند و ممکن است با یک بار افزودن لجن فاضلاب با مقادیر گفته شده، تا مدت‌های زیادی نیاز به افزودن مجدد لجن فاضلاب نباشد. البته توصیه می‌شود برای اطمینان از نتایج ذکر شده و توصیه عملی و کاربردی، پژوهش‌های بیشتری با سطوح متعدد لجن فاضلاب تولید شده از منابع مختلف و در خاک‌های با ویژگی‌های متفاوت در سطح مزرعه انجام شوند.

فهرست منابع:

1. اصغری، ش. 1390. اثرات لجن فاضلاب پتروشیمی تبریز بر کربن آلی، شاخص های پایداری خاکدانه و حدود پایای یک خاک منطقه نیمه خشک. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، جلد 25، شماره 3،صفحات 530 تا539.
2. بهره‌مند، م.ر.، م. افیونی، م.ع. حاج عباسی و ی. رضایی نژاد.1381.اثر لجن فاضلاب بر برخی ویژگی‌های فیزیکی خاک. علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، جلد 4، شماره 6، صفحات 8 تا11.
3. زائری، ع .1384 . بررسی اثرات تجمعی و باقیماندهٔ لجن فاضلاب بر حرکت املاح، رطوبت خاک و برخی خصوصیات فیزیکی خاک. پایا ن نامه کارشناسی ارشد خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان.
4. شیرانی، ح.، م.ع. حاج عباسی، م. افیونی و ح. دشتی .1389 .اثر تجمعی لجن فاضلاب بر برخی ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خاک . آب و فاضلاب ، شماره 3، صفحات 28 تا36.
5. علوی، ف.، ع. ثامنی، و ع. ا. موسوی. 1391a . اثرکاربردلجن فاضلاب برپایداری خاکدانه دریک خاک آهکی. اولین کنفرانس ملی راهکارهای دستیابی به توسعه پایدار، تهران، وزارت کشور.
6. علوی، ف.، ع. ثامنی، و ع. ا. موسوی. 1391b. اثر کاربرد لجن فاضلاب بر آبگریزی خاک. همایش ملی خاک و کشاورزی پایدار، ملایر، دانشگاه ملایر.
7. کسرایی، ر . و س. ساعدی .1389 . تأثیر لجن فاضلاب مجتمع پتروشیمی تبریز بر رشد گیاه گوجه فرنگی . آب و خاک، جلد 24، شماره 1، صفحات 10 تا 20.
8. میرخانی، ر.، س. سعادت، م. شعبان پور شهرستانی، پ. آریا، و م. یگانه. 1386. برآورد حدود پایداری خاک با استفاده از ویژگی‌های زود یافت. علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی. جلد 21، شماره 2، صفحات 205 تا207.
9. Aggelides, S. M. and P. A. Londra. 2000. Effects of compost produced from town wastes and sewage sludge on the physical properties of a loamy and a clay soil. Bioresour. Technol. 71: 253-259.
10. Arvidsson, J., T. Keller, and K. Gustafsson. 2004. Specific draught for mouldboard plough, chisel plough and disc harrow at different water contents. Soil Till. Res. 79(2): 221-231.
11. Asghari, S., M. R. Neyshabouri, F. Abbasi, N. Aliasgharzad, and Sh. Oustan. 2009. The effects of four organic soil conditioners on aggregate stability pore size distribution and respiration activity in a sandy loam soil. Turk. J Agric For. 33: 47-55.
12. ASTM D4318–10e1, 2010. Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. ASTM International, West Conshohocken, PA (www.astm.org (last access 25/10/14)).
13. Baldock, J. A. and P.N. Nelson, 2000. Soil organic matter. In: Sumner, M.E. (Ed.), Handbook of Soil Science. CRC Press, Boca Raton, FL, pp. B25–B71.
14. Ball, B. C., D. J. Campbell and E. A. Hunter. 2000. Soil compactability in relation to physical and organic properties at 156 sites in UK. Soil Till. Res. 57: 83- 91.
15. Bastida, F., E. Kandeler, J. L. Moreno, M. Ros, C. Garsia, and T. Hernandez. 2008. Application of fresh and composted organic wastes modifies structure, size and activity of soil microbial community under semiarid climate. Appl. Soil Ecol. 40: 318-329.

16. Bhushan, L. and P.K. Sharma. 2002. Long-term effects of lantana (Lantana spp. L.) residue additions on soil physical properties under maize-wheat cropping. I. Soil consistency, surface cracking and clod formation. Soil Till. Res. 65: 157–167.
17. Blanco-Canqui, H., R. Lal, W. M. Post, R. C. Izaurralde and M. J. Shipitalo. 2006. Organic carbon influences on soil particle density and rheological properties. Soil Sci. Soc. Am. J. 70: 1407-1414.
18. Carter, M. R. 1993. Soil sampling and methods of analysis. Canadian Society of Soil Science, Lewis Publisher, CRC Press, 823 p.
19. Chepil, W. S. 1962. A compact votary sieve and the importance of dry sieving in physical soil analysis. Soil Sci. Soc. Am. J. 26: 4-6.
20. De Jong, E., D. F. Acton and H. B. Stonehouse. 1990. Estimating the Atterberg limits of southern Saskatchewan soils from texture and carbon contents. Can. J. Soil Sci. 70: 543-554.
21. De Jong, E., D. F. Acton, and H. B. Stonehouse. 1990. Estimating the atterberg limits of southern Saskatchewan soils from texture andcarbon contents. Can. J. Soil Sci, 70(4): 543-554.
22. Dexter, A. R., and N. A. Bird. 2001. Methods for predicting the optimum and the range of soil water contents for tillage based on the water retention curve. Soil Till. Res. 57(4): 203-212.
23. Fetton, G. K. 1995. Soil hydraulic properties on municipal Soil Waste. Transe ASAE. 38(3): 775-782.
24. Hemmat, A., N. Aghilinategh, Y. Rezainejad, and M. Sadeghi. 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 central Iran. Soil Till. Res. 108: 43-50.
25. Hillel, D. 1998. Environmental soil physics. Academic Press.
26. Husein Malkawi, A. I., A. S. Alawneh, and O. T. Abu Safagah. 1999. Effect of organic matter on the physical and physicochemical properties of an illitic soil. Appl. Clay Sci. 14:257-278.
27. Lal, R. and M. K. Shukla. 2004. Principles of Soil Physics. Marcel Dekker, Inc, New York, 682 p.
28. Lima, D. L. D., S. M. Santos, H. W. Scherer, R. J. Schneider, A. C. Duarte, E. B. H. Santos and V. I. Esteves. 2009. Effects of organic and inorganic amendments on soil organic matter properties. Geoderma. 150: 38–45.
29. Lin, D. F., H. L. Luo, D. H. Hsiao, and C. C. Yang. 2005. The effects of sludge ash on the strength of soft subgrade soil. J. Chinese Inst. Environ. Engin. 15: 1-10.
30. Logan, T. J., B. J. Harrison, D. C. McAvoy, and J. A. Greff. 1996. Effect of Olestra in sewage sludge on soil physical properies. Environ. Qual. 25: 153-161.
31. Mapfumo, E., and D. S.Chanasyk, 1998. Guidelines for safe trafficking and cultivation, and resistance-density-moisture relations of three disturbed soils from Alberta. Soil Till. Res. 46: 193-202.
32. Mbagwu, J. S. C. and O. G. Abeh. 1998. Prediction of engineering properties of tropical soils using intrinsic pedological parameters. Soil Sci. 163: 93- 102.
33. Miller, J. J., N. J. Sweetland, and C. Changs. 2002. Hydrological properties of a clay loam soil after Long-term cattle manure application. Environ. Qual. 31: 989-996.
34. Mosaddeghi, M. R., M. A. Hajabbasi, A. Hemmat and M. Afyuni. 2000. Soil compactibility as affected by soil moisture content and farmyard manure in central Iran. Soil Till. Res. 55: 87–97.

35. Mosaddeghi, M., M. A. Hajabbasi, A. Hemmat, and M. Afyni. 2000. Soil compactibility as affected by soil moisture content and farmy and manure in central Iran. Soil Till. Res. 55: 87-97.
36. Mullin, C. E., D. A. Mcleod, K. H. Northcote, J. M. Thsdall, and I. M. Young. 1990. Hardsetting soils: behaviour,occurrence and management Advance. Soil Sci. 11: 37-108.
37. Navas, A., J. Machın, and B. Navas. 1999. Use of biosolids to restore the natural vegetation cover on degraded soils in the badlands of Zaragoza. Bioresour. Technol. 69:199–205.
38. Nelson, D. W., and L. E. Sommers. 1996. Total carbon, organic carbon and organic matter. In: D. L. Sparks et al., (Eds.), Methods of Soil Analysis. Part III. 3rd Ed. PP. 61-1010, Soil Science Society of America Inc., American Society of Agronomy Madison, WI.
39. Ojeda, G., E. Perfect, J. M. Alcaniz, and O. Ortiz. 2006. Fractal analysis of soil water hysteresis as influenced by sewage sludge application. Geoderma. 134: 386- 401.
40. Pagliai, M., G. Guidi, M. Lamarka, M. Giachetti, and G. Lucamante. 1981. Effects of sewage sludges and compost on soil porosity and aggregation. Environ. Qual. 10: 556-561.
41. Reynolds, W. D., B. T. Bowman, C. F. Dury, C. S. Tan, and X. Lu. 2002. Indicators of soil physical quality: density and storage parameter. Geoderma. 110: 131-146.
42. Sanchez-Martin, M. J., M. Garcia-Delgado, L. F. Lorenzo, M. S. Rodriguez-Cruz, and M. Arienzo. 2007. Heavy metals in sewage sludge amended soils determined by sequential extractions as a function of incubation time of soils. Geoderma. 142: 262-273.
43. Shirani, H., M. A. Hajabbasi, M. Afyuni, and A. Hemmat. 2002. Effect of farmyard and tillage systems on soil physical properties and corn yield in central Iran. Soil Till. Res. 68: 101-108.
44. Silva, A. J. N., M. R. Ribeiro, F. G. Carvalho, V. N. Silva, and L. E. S. F. Silva. 2007. Impact of sugarcane cultivation on soil carbon fractions, consistence limits and aggregate stability of a Yellow Latosol in Northeast Brazil. Soil Till. Res. 94: 420- 424.
45. Smith, C. W., A. Hadas, J. Dan and H. Koyumdjisky. 1985. Shrinkage and Atterberg limits in relation to other properties of principal soil types in Israel. Geoderma. 35: 47–65.
46. Stehouwer, R. C. 2003. Land application of sewage sludge in Pennsylvania: Effects of biosolids on soil and crop quality. Environmental Soil Issues. Pennsylvania: Penn State College of Agriculture Science University Park.
47. Terzaghi, A. W., B. Hoogmoed, and R. Miedema. 1988. The use of the wet workability limit to predict the land quality workability for some Uruguayan soils. Neth. J. Agric. Sci. 36: 91-103.
48. Utomo, W. H. and A. R. Dexter. 1981. Soil friability. J. Soil Sci. 32: 203–213.
49. Zhang, H., 1994. Organic matter incorporation affects mechanical properties of the soil aggregates. Soil Till. Res. 31: 263–275.