اثر تجمعی لجن فاضلاب بر برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک

حسین شیرانی[۱] محمدعلی حاج عباسی[۲] مجید افیونی[۲] حسین دشتی[۳]

(دریافت ۸۷/۱۰/۲۳ پذیرش ۸۹/۲/۱۵)

چکیده

لجن فاضلاب مقدار نسبتاً زیادی مواد آلی و املاح دارد که بر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک تأثیر می‌گذارد و در صورت استفاده بهینه می‌تواند به‌عنوان یک کود ارزان قیمت مورد استفاده قرار گیرد. در ایران مطالعات در زمینه تأثیر لجن فاضلاب بر خواص شیمیایی خاک تا حدودی انجام گرفته است ولی تحقیقات بر روی خواص فیزیکی خاک اندک است. در این پژوهش به‌منظور بررسی تأثیر تجمعی لجن فاضلاب بر هدایت هیدرولیکی، جرم مخصوص ظاهری، پایداری خاکدانه، نفوذ آب در خاک، EC و pH خاک، آزمایشی در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با هفت تیمار (صفر، ۲۲/۵×۱، ۲۲/۵×۲، ۲۲/۵×۳، ۴۵×۱، ۴۵×۲ و ۴۵×۳ تن در هکتار لجن فاضلاب) در سه تکرار به‌مدت سه سال انجام گرفت. پس از اعمال تیمارها در سال سوم، خواص فیزیکی و شیمیایی خاک اندازه‌گیری گردید. با افزایش سطح لجن، هدایت هیدرولیکی اشباع خاک، نفوذپذیری، پایداری خاکدانه و EC خاک افزایش و وزن مخصوص ظاهری کاهش یافت. همبستگی معنی‌داری بین مقدار لجن و خصوصیات فیزیکی وجود داشت. در تجزیه به عاملها، مقدار لجن و کلیه خصوصیات فیزیکی خاک با ضرایب بالا در عامل اول یعنی عامل خواص فیزیکی که بیش از ۷۱ درصد واریانس را توجیه می‌کند، حضور یافتند که نشان‌دهنده تأثیر زیاد لجن بر خواص فیزیکی خاک بود. در عامل دوم که عامل pH یا عامل خصوصیات شیمیایی خاک است، فقط pH دارای ضریب بالا بود. عامل دوم ۱۷درصد از واریانس موجود را توجیه نمود و هیچ رابطه‌ای با خواص فیزیکی خاک نشان نداد.

واژه‌های کلیدی: اثر تجمعی، لجن فاضلاب، خواص فیزیکی و شیمیایی خاک، تجزیه به عاملها

Cumulative Effects of Sewage Sludge on Soil Physical and Chemical Characteristics

Hossein Shirani [1] *Mohammadali HajAbbasi [2]* *Majid Afyouni[2]* *Hossein Dashti[3]*

(Received Jan. 13, 2009 Accepted May 5, 2010)

Abstract

Wastewater sludge has relatively high amounts of organic matter and salts which favorably affect the physical and chemical characteristics of the receiving soil. Hence, it can be used as a cheap fertilizer if properly utilized. A number of studies have been reported in Iran on the effects of sludge on soil chemical properties but few studies have been conducted to investigate its effects on soil physical characteristics. In order to study the cumulative effects of sludge on hydraulic conductivity, bulk density, MWD, soil infiltration, EC, and soil pH, an experiment was conducted in a complete randomized design with 7 treatments (1 × 22.5, 2 × 22.5, 3 × 22.5, 1 × 45, 2 × 45 and 3 × 45 ton/ha wastewater sludge) in three replications over three years. The above mentioned traits were measured after the third year of the experiment period. Results showed that increasing amounts of sludge enhanced saturated hydraulic conductivity, soil infiltration, MWD, and EC but decreased bulk density. A significant correlation was observed between the amount of sludge and soil physical characteristics. Factor analysis showed that the amount of sludge and all soil physical characteristics were in first order (physical characteristic factor) which explained 71% of the total variance, indicating the high impact of sludge on soil physical characteristics. The second factor was pH (a chemical characteristic) that explained only 17% of the total variance. Finally, no relationship was found between pH and soil physical characteristics.

Keywords: Cumulative Effects, Sewage Sludge, Soil Physical Characteristic, Factor Analysis.

۱- استادیار گروه خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ولی‌عصر، رفسنجان
(نویسنده مسئول) ۳۲۰۲۰۲۶ (۰۳۹۱) Shirani379@yahoo.com
۲-استاد گروه خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان
۳- استادیار گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ولی‌عصر، رفسنجان

1. Assist. Prof. of Soil Sciences, Dept. of Agriculture, ValiAsr University, Rafsanjan (Corresponding Author) (+98 391) 3202026 Shirani379@yahoo.com
2. Prof. of Soil Sciences, Dept. of Agriculture, Isfahan University of Tech., Isfahan
3. Assist. Prof., Dept. of Agriculture, Vali Asr University, Rafsanjan.

۱- مقدمه

در سالهای اخیر تقاضا برای مصرف کودهای آلی از جمله لجن فاضلاب[1] افزایش چشمگیری داشته و ارزش کودی آن در تحقیقات متعدد در کشورهای مختلف نشان داده شده است [۱-۵]. مطالعات نسبتاً جامعی در زمینه تأثیر لجن فاضلاب بر خواص شیمیایی و آلودگی خاک انجام پذیرفته است و اغلب مطالعات در ارتباط با حاصلخیزی و آلودگی خاک بوده است [۶-۹]. ولی تأثیر تجمعی لجن فاضلاب بر خواص فیزیکی خاک کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. لجن فاضلاب به‌علت دارا بودن مقدار زیاد مواد آلی، می‌تواند بر برخی خواص فیزیکی خاک از قبیل پایداری خاکدانه‌ها، هدایت هیدرولیکی، تهویه و رطوبت خاک تأثیر مطلوب داشته باشد [۱۰، ۱۱ و ۱۲]. اپستین[2] در سال ۱۹۷۵ تأثیر لجن فاضلاب را بر برخی خواص فیزیکی خاک بررسی کرد و نتیجه گرفت که کاربرد لجن، ابتدا هدایت هیدرولیکی خاک را افزایش می‌دهد، ولی ۵۰ تا ۸۰ روز پس از استفاده از لجن فاضلاب، هدایت هیدرولیکی کاهش یافته و با مقدار آن در خاک شاهد برابر می‌شود [۱۳].

ابوشرار[3] در سال ۱۹۹۳ در تحقیقی نشان داد که استفاده از تیمار ۸ درصد لجن فاضلاب، باعث افزایش هدایت هیدرولیکی خاک می‌گردد [۱۴]. گوئیس کوئیانی و همکاران[4] در سال ۱۹۹۵ تأثیر لجن فاضلاب بر خواص فیزیکی و شیمیایی خاک را مورد مطالعه قرار دادند و نتیجه گرفتند که کاربرد آن باعث افزایش تخلخل و کاهش جرم مخصوص ظاهری خاک می‌گردد [۹]. اثرات لجن فاضلاب، کمپوست و کود حیوانی روی تخلخل خاک و تشکیل خاکدانه‌ها توسط پاگلی و همکاران[5] بررسی شده است. نتایج نشان داد که این مواد آلی، تخلخل خاک را به‌طور قابل توجهی در همه زمان‌های نمونه‌گیری افزایش می‌دهند، ولی تأثیر لجن در افزایش تخلخل و کاهش جرم مخصوص ظاهری نسبت به کود حیوانی بیشتر است [۱۵]. همچنین اپستین نتیجه گرفت که استفاده از لجن فاضلاب، جرم مخصوص ظاهری خاک را کاهش می‌دهد [۱۳].

تحقیقات نشان داده است که لجن فاضلاب تأثیر بسزایی در پایداری و تشکیل خاکدانه‌های خاک دارد [۱۲، ۱۴، ۱۶و ۱۷]. گلوسر و همکاران[6] در سال ۱۹۸۸ پایداری خاکدانه‌ها را در خاکهایی که توسط لجن فاضلاب تیمار شده‌اند، بررسی نمودند و نتیجه گرفتند که پایداری خاکدانه بر اثر افزودن لجن فاضلاب افزایش می‌یابد. تصویر میکروسکوپ الکترونی خاکدانه‌های خاک تیمار شده، نشان داد که لجن فاضلاب باعث افزایش تخلخل خاکدانه‌ها می‌گردند [۱۱]. تحقیقات اپستین نیز تأثیر مطلوب لجن فاضلاب را بر پایداری خاکدانه نشان داد [۱۳].

مقدار ماده آلی نسبتاً زیاد لجن فاضلاب می‌تواند اثر مطلوبی بر خواص فیزیکی و شیمیایی خاک بگذارد و به‌خصوص در مورد خاکهای مناطق خشک ایران مثل اصفهان که از نظر مواد آلی فقیر هستند، این تأثیر بیشتر است. لجن فاضلاب دارای قابلیت هدایت الکتریکی[7] بالایی است که این امر وجود املاح زیاد در آن را نشان می‌دهد. بنابراین استفاده بی‌رویه از لجن فاضلاب در زمین‌های زراعی، ممکن است سبب افزایش EC خاک گردد. همچنین، لجن فاضلاب دارای pH نسبتاً اسیدی بوده که علت آن وجود اسیدهای آلی است که باعث کاهش pH می‌گردد [۶]. در ایران مطالعات در زمینه تأثیر تجمعی کودهای آلی، به‌خصوص لجن فاضلاب بر خواص فیزیکی خاک کمتر صورت گرفته است. بنابراین تحقیقات در این زمینه در مناطق مختلف کشور مورد نیاز است. در اصفهان از لجن فاضلاب به‌صورت گسترده‌ای به‌عنوان کود در کشاورزی استفاده می‌گردد. به‌این منظور مطالعه حاضر با هدف بررسی تأثیر تجمعی لجن فاضلاب بر خواص فیزیکی خاک شامل هدایت هیدرولیکی، جرم مخصوص ظاهری، پایداری خاکدانه و نفوذ آب به خاک و همچنین بررسی تأثیر آن بر روی pH و EC انجام شد.

۲- مواد و روشها

این مطالعه در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با هفت تیمار و سه تکرار و سه سطح لجن فاضلاب (صفر، ۲۲/۵ و ۴۵ تن در هکتار) در مزرعه تحقیقاتی لورک واقع در نجف آباد، متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان انجام گردید. خاک مزرعه دارای pH حدود ۷/۵ و EC معادل ۱/۸ دسی‌زیمنس بر متر و به‌صورت فاین[8]، لومی[9]، میکسد[10]، ترمیک[11]، تیپیک[12] و هاپل آرجید[13] طبقه‌بندی شده است. در این مطالعه در سالهای اول تا سوم به‌ترتیب گیاهان کاهو، اسفناج و ذرت کشت گردید. سه بلوک در این طرح در نظر گرفته شد که هر بلوک در ابتدا شامل سه کرت اصلی بود. ابعاد کرتهای اصلی ۶×۲ متر بود که هرکدام از این کرتها به سه قسمت ۲×۲ متر تقسیم شد. در کرتهای مربوط به شاهد، لجن فاضلاب

[1] Sewage sludge
[2] Epstein
[3] Abu Sharar
[4] Giusquianni et al.
[5] Pagliai et al.
[6] Glauser et al.
[7] Electrical Conductivity (EC)
[8] Fine
[9] Loamy
[10] Mixed
[11] Thermic
[12] Typic
[13] Haplargid

اضافه نگردید (تیمار ۱). در کرتهای اصلی که برای اضافه کردن لجن فاضلاب در نظر گرفته شده بود، هر سه سال متوالی در فصل تابستان مقدار معینی لجن اضافه گردید. بهاین ترتیب که در سال اول به هر سه قسمت یکی از کرتهای اصلی در هر بلوک، مقدار ۲۲/۵ تن در هکتار لجن اضافه شد (تیمار ۲). در سال دوم فقط به دو قسمت از همان کرت، مقدار ۲۲/۵ تن در هکتار لجن افزوده شد (۲×۲۲/۵ = تیمار ۳). در سال سوم فقط به یک قسمت از همان کرت اصلی مقدار ۲۲/۵ تن در هکتار لجن اضافه گردید (۳ × ۲۲/۵ = تیمار ۴). برای سطح ۴۵ تن در هکتار نیز بههمین ترتیب عمل شد. بهاین ترتیب پس از مدت سه سال، یک قسمت از کرت شامل ۴۵ تن در هکتار (تیمار ۵)، قسمت دوم ۴۵×۲ تن در هکتار (تیمار ۶) و قسمت سوم شامل ۴۵×۳ تن در هکتار (تیمار ۷) لجن فاضلاب بود.

لجن فاضلاب تا عمق ۳۰ سانتیمتر با خاک مخلوط گردید. نمونهبرداری برای تعیین خواص فیزیکی و شیمیایی خاک در سال سوم، از عمق صفر تا ۱۵ سانتیمتر صورت گرفت. برای تعیین هدایت هیدرولیکی خاک، نمونه خاک دستنخورده از هر قسمت توسط استوانه فلزی درپوشدار به قطر ۸ و ارتفاع ۷ سانتیمتر برداشته شد و در آزمایشگاه بهروش بار ثابت، هدایت هیدرولیکی اشباع خاک تعیین گردید.

بهمنظور تعیین جرم مخصوص ظاهری خاک، نمونههای دستنخورده از عمق مورد نظر توسط استوانه فلزی با حجم معین گرفته شد و پس از تعیین حجم دستنخورده خاک، نمونه در آزمایشگاه توسط آون در دمای ۱۰۵ درجه سانتیگراد خشک گردید و جرم مخصوص ظاهری آن بر حسب گرم بر سانتیمتر مکعب محاسبه شد [۱۸]. پایداری خاکدانه بهروش غربال مرطوب و محاسبه MWD[1] طبق دستورالعمل آزمایشگاه مورد ارزیابی قرار گرفت [۱۹]. نمونههای هوا خشک، از الک ۸ میلیمتری عبور داده شدند و پایداری خاکدانهها بهروش غربال تر[2] تعیین گردید. بهاین ترتیب که هر نمونه خاک، روی یک ردیف سرند که اندازه آنها بهترتیب از بالا به پایین ۲، ۱، ۰/۵، ۰/۲۵ و ۰/۱ میلیمتر است، قرار گرفت. بهمنظور جلوگیری از تخریب ناگهانی تحت تأثیر محبوس شدن هوا، خاکدانهها با آبفشان مرطوب شدند زیرا وارد کردن ناگهانی خاکدانهها بهداخل آب، سبب حبس شدن هوا در آنها و تخریب آنها میگردد. سرندها توسط یک موتور بهمدت ۵ دقیقه در آب، بالا و پایین شدند. سپس خاکدانههای باقیمانده روی هر سرند در آون و درجه حرارت ۱۰۵ درجه سلسیوس بهمدت ۲۴ ساعت قرار گرفت. پایداری خاکدانهها با تعیین میانگین وزنی قطر آنها ارزیابی گردید. تعیین نفوذ آب به خاک بهروش استوانههای مضاعف[3] اندازهگیری شد. بهاین صورت که استوانه فلزی در عمق صفر تا ۱۵ سانتیمتر نصب گردید و مقدار نفوذ آب به خاک با گذشت زمان اندازهگیری شد. برای تعیین pH و EC، نمونهها از عمق ۱۵ سانتیمتر برداشته شد و پس از تهیه گل اشباع، pH آن توسط دستگاه pH متر اندازهگیری گردید. سپس عصاره گل اشباع تهیه شد و هدایت الکتریکی عصاره اشباع توسط دستگاه EC متر اندازهگیری شد. تحلیل آماری دادهها با استفاده از نرمافزار SAS انجام گرفت.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- خواص لجن فاضلاب

برخی از ویژگیهای لجن فاضلاب هضم شده بیهوازی که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت، در جدول ۱ نشان داده شده است. فرایند تصفیهخانه فاضلاب که لجن فاضلاب از آن بهدست آمد، تصفیه ثانویه هوازی بود. لجن فاضلاب مورد استفاده دارای مواد آلی نسبتاً بالا و نمکهای محلول زیادی بود و لذا تأثیر بسزایی بر خواص فیزیکی اندازهگیری شده و EC خاک داشت.

جدول ۱- برخی خواص فیزیکی و شیمیایی لجن فاضلاب مورد استفاده

پارامتر	مقدار	واحد
pH	۶/۴	—
EC	۱۰/۲	دسیزیمنس بر متر
ماده آلی	۳۱	درصد
نیتروژن کل	۳/۶	درصد
جرم مخصوص	۰/۳۶	گرم بر سانتیمتر مکعب
جرم کل /جرم خشک	۷۰	درصد
سدیم	۳۸۰	میلیگرم در لیتر*
پتاسیم	۲۵۸	میلیگرم در لیتر
کلسیم	۸۴۶	میلیگرم در لیتر
منیزیم	۳۳۰	میلیگرم در لیتر
فسفر	۳/۶۴	میلیگرم در لیتر
سرب	۱۱۳	میلیگرم بر کیلوگرم
نیکل	۴۳/۷۵	میلیگرم بر کیلوگرم
کادمیم	۲/۲۵	میلیگرم بر کیلوگرم
آهن	۹۰۲۵	میلیگرم بر کیلوگرم
مس	۱۶۲/۵	میلیگرم بر کیلوگرم
روی	۹۷۵	میلیگرم بر کیلوگرم

* محلول عصارهگیری شده با آب مقطر به نسبت لجن به آب ۲:۱

جدول ۱ نشان میدهد که لجن فاضلاب مورد استفاده از نظر عناصر غذایی کممصرف و پر مصرف گیاهی غنی بود. همچنین، از نظر

[1] Mean Weight Diameter
[2] Wet Sieving
[3] Double Ring

مقدار عناصر سنگین اندازه‌گیری شده، کمتر از حد استاندارد می‌باشد. حد استاندارد عناصر سرب، نیکل و کادمیم به‌ترتیب برابر ۲۵۰، ۷۵ و ۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم است [۲۰].

۳-۲- تأثیر لجن فاضلاب بر هدایت هیدرولیکی خاک

هدایت هیدرولیکی اشباع خاک بر اثر افزودن کود آلی به خاک افزایش می‌یابد که این افزایش در خاکهای رسی چشمگیرتر است [۱۳ و ۲۱]. استفاده از لجن فاضلاب در این مطالعه باعث افزایش هدایت هیدرولیکی اشباع خاک گردید. ونگ نشان داد که افزودن لجن فاضلاب به‌مقدار ۲۵ تن در هکتار پس از ۲۰ روز هدایت هیدرولیکی خاک را ۸ برابر افزایش داد. در این مطالعه افزایش هدایت هیدرولیکی اشباع خاک بر اثر افزودن لجن فاضلاب، به‌علت ضریب پراکندگی[1] بالای داده‌ها از نظر آماری معنی‌دار نشد. هدایت هیدرولیکی خصوصیتی از خاک است که به عوامل مختلف بستگی داشته و نسبت به زمان و مکان تغییرپذیری زیادی دارد و به‌همین دلیل، داده‌های به‌دست آمده دارای CV زیاد است [۲۲].

میانگین هدایت هیدرولیکی خاک برای هر تیمار در جدول ۲ نشان داده شده است. تقریباً تمام تیمارهای لجن فاضلاب، هدایت هیدرولیکی خاک را نسبت به شاهد افزایش دادند. این افزایش در تیمار ۷ (۴۵×۳ تن در هکتار) که هدایت هیدرولیکی خاک به بیش از ۵ برابر نسبت به شاهد رسید، چشمگیرتر بود. تیمارهای ۲۲/۵×۲ ، ۲۲/۵×۳ و ۴۵×۳ تن در هکتار لجن، به‌ترتیب باعث افزایش هدایت هیدرولیکی به‌مقدار حدود ۴، ۲ و ۳ برابر نسبت به شاهد شدند و تیمارهای ۲۲/۵×۱ و ۴۵×۱ تن در هکتار، افزایشی را در هدایت هیدرولیکی نسبت به شاهد نشان ندادند. دلیل این امر را شاید بتوان چنین توجیه کرد که احتمالاً به مرور زمان، تأثیر لجن فاضلاب کم شده و مقدار هدایت هیدرولیکی خاک به مقدار آن در کرتهای شاهد رسیده است زیرا در تیمارهای ۲۲/۵×۱ و ۴۵×۱ فقط در سال اول به‌مقدار معین لجن اضافه شد و در دو سال بعد، لجن فاضلاب افزوده نشد و لذا بر اثر گذشت زمان، احتمالاً لجن فاضلاب در خاک تجزیه شده و تأثیر آن از بین رفته است. مورل[2] و گاکرت[3] گزارش کردند که هدایت هیدرلیکی خاک در اثر افزودن لجن فاضلاب ابتدا به‌مدت چند هفته افزایش و سپس کاهش می‌یابد [۲۳].

ضریب پراکندگی داده‌ها ۱۰۵ درصد بود که بسیار زیاد است و همین مقدار بالای CV باعث شد که با وجود افزایش چشمگیر هدایت هیدرولیکی بر اثر استفاده از لجن فاضلاب، این افزایش از نظر آماری معنی‌دار نشود. برخی تحقیقات نشان داده که تأثیر تیمارهای مختلف بر هدایت هیدرولیکی، به‌علت تغییرپذیری زیاد و واریانس بالای داده‌ها از نظر آماری معنی‌دار نمی‌شود [۲۴]. همچنین شیرانی و همکاران نشان دادند که با وجود تأثیر چشمگیر کود دامی بر هدایت آبی خاک، به‌علت واریانس زیاد داده‌های اندازه‌گیری، این اثر از نظر آماری معنی‌دار نشد [۲۵].

۳-۳- تأثیر لجن فاضلاب بر جرم مخصوص ظاهری خاک

به‌طور کلی مواد آلی دارای جرم مخصوص کم بوده و از طرفی افزایش مواد آلی در خاک باعث افزایش تخلخل در خاک می‌شوند. بنابراین انتظار می‌رود با افزودن مواد آلی در خاک، جرم مخصوص ظاهری و تراکم‌پذیری خاک کاهش یابد [۲۶ و ۲۷]. افزودن لجن فاضلاب به خاک، جرم مخصوص ظاهری خاک را به‌طور معنی‌داری ($p=0.05$) کاهش داد. جدول ۲ مقادیر میانگین جرم مخصوص ظاهری خاک را در تیمارهای مختلف لجن فاضلاب نشان می‌دهد. تنها تیماری که تأثیر معنی‌داری بر کاهش جرم مخصوص ظاهری نسبت به شاهد نداشت، تیمار ۲ (۲۲/۵ × ۱ تن در هکتار) بود. همچنین تیمار ۴۵×۱ تن در هکتار نیز کاهش چشمگیری در جرم مخصوص ظاهری ایجاد نکرد که این امر احتمالاً نشان‌دهنده تأثیر زمان بر تجزیه لجن و از بین رفتن اثر آن در خاک است. به‌طوری‌که جرم مخصوص در این دو تیمار، مشابه مقدار آن در کرتهای شاهد بود. تیمار ۷ (۴۵ × ۳ تن در هکتار) بیشترین تأثیر را در کاهش جرم مخصوص ظاهری خاک داشت و اختلاف آن با تمام تیمارهای اعمال شده، معنی‌دار بود و نسبت به شاهد حدود ۱۸ درصد جرم مخصوص خاک را کاهش داد. این موضوع بیانگر اثر قابل توجه افزودن تجمعی لجن فاضلاب بر جرم مخصوص ظاهری است. همچنین تیمارهای ۲۲/۵×۲ و ۲۲/۵×۳ تن در هکتار لجن، حدود ۱۰ درصد و تیمار ۴۵×۲ تن در هکتار لجن، به مقدار ۱۲ درصد باعث کاهش جرم مخصوص ظاهری شدند.

در این مطالعه جرم مخصوص لجن فاضلاب ۰/۳۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب بود (جدول ۱). این جرم نسبت به جرم مخصوص خاکهای معدنی که حدود ۲/۶۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب است بسیار کمتر می‌باشد. همچنین در برخی تیمارها، ساختمان خاک نیز بهبود یافت. بنابراین انتظار می‌رود که افزودن لجن فاضلاب به خاک، موجب کاهش جرم مخصوص ظاهری گردد. اوهیو و همکاران[4] گزارش کردند که به‌علت جرم مخصوص کمتر مواد آلی نسبت به خاک، جرم مخصوص مخلوط خاک و مواد آلی باید کمتر از جرم

[1] Coeficient of Variation (CV)
[2] Morel
[3] Guckert
[4] Ohu et al.

مخصوص ظاهری خاک اولیه باشد حتی اگر تأثیر به‌خصوصی بر پوک‌کنندگی خاک نداشته باشند [۲۸]. برخی محققان نشان دادند که تأثیر لجن فاضلاب بر کاهش جرم مخصوص ظاهری و افزایش تخلخل خاک، در مقایسه با کودهای دامی بیشتر است [۱۵]. به‌طور کلی در این تحقیق افزودن لجن فاضلاب به خاک تأثیر قابل توجهی بر کاهش جرم مخصوص ظاهری خاک داشت که با نتایج دیگر محققان مطابقت دارد [۱۳].

۳-۴- تأثیر لجن فاضلاب بر پایداری خاکدانه

جدول ۲ میانگین MWD را در تیمارهای مختلف لجن فاضلاب نشان می‌دهد. نتایج حاصل از اندازه‌گیری MWD در تیمارهای مختلف نشان داد که لجن فاضلاب باعث افزایش پایداری خاکدانه گردید. فقط هنگامی که لجن فاضلاب به‌مقدار ۲۲/۵ تن در هکتار در سه مرحله (تیمار۴) و ۴۵ تن در هکتار در سه مرحله (تیمار ۷) به خاک اضافه شد، افزایش MWD نسبت به تیمارهای دیگر معنی‌دار بود. هر دو تیمار مقدار MWD را نسبت به شاهد حدود ۱/۵ برابر افزایش دادند. به‌طوری که مقدار آن در تیمار شاهد و تیمارهای ۴ و ۷ به‌ترتیب ۰/۴۹، ۰/۷۲ و ۰/۷۱ میلی‌متر بود.

مطالعات زیادی نشان داده است که افزودن کودهای آلی به خاک سبب افزایش پایداری ساختمان خاک می‌گردد [۲۹]. به‌طور کلی کربن آلی خاک یک عامل اساسی در پایداری ساختمان خاک محسوب می‌شود [۳۰]. بیر و همکاران[1] گزارش کردند که خاکدانه‌هایی با اندازه ۰/۲۵ تا ۲ میلی‌متر نیاز به حفاظت و نگهداری توسط عوامل کربن آلی دارند و در غیر این صورت این خاکدانه‌ها تحت خاک‌ورزی سنگین و فشرده، تخریب می‌شوند [۲۹]. آنگرز[2] و میوز[3] گزارش کردند که علت پایداری خاکدانه‌های یک خاک رسی تحت سیستم بی‌خاک‌ورزی، مقدار زیاد کربن آلی آن است که باعث استحکام خاکدانه‌ها می‌گردد [۱].

خاک منطقه مورد مطالعه دارای ساختمان ضعیف و حساس به سله بود و تنها مقادیر نسبتاً زیاد لجن فاضلاب که به‌صورت تجمعی در طول سه سال به خاک افزوده شد، باعث افزایش میانگین وزنی قطر خاکدانه گردید که تأثیر مطلوب‌تر اثر تجمعی لجن فاضلاب را بر ساختمان خاک نشان می‌دهد. نتایج تحقیق مشابهی در منطقه مورد مطالعه، نشان داد که مقادیر زیاد کود گاوی در حدود ۶۰ تن در هکتار که به‌مدت ۲ سال به خاک اضافه شد، مقدار MWD خاک را به‌طور معنی‌داری نسبت به شاهد افزایش داد. در صورتی که مقادیر کمتر آن یعنی در حدود ۳۰ تن در هکتار، اثر معنی‌داری بر پایداری خاکدانه‌ها نداشت. دلیل این امر ساختمان ضعیف و حساس به سله خاک، گزارش شد [۲۵]. تحقیقات متعددی تأثیر مطلوب لجن فاضلاب را بر پایداری خاکدانه نشان داده است [۱۳ و ۱۴].

۳-۵- تأثیر لجن فاضلاب بر نفوذ آب در خاک

میانگین سرعت نفوذ آب در خاک در جدول ۲ نشان داده شده است. سرعت نفوذ آب درخاک منطقه بسیار کم است که علت آن

[1] Bear et al.

[2] Angers

[3] Mehuys

جدول ۲- اثر لجن فاضلاب بر هدایت هیدرولیکی، جرم مخصوص ظاهری، پایداری خاکدانه، نفوذ آب در خاک، pH و هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک. مقادیر موجود در جدول میانگین سه تکرار است.

لجن فاضلاب (تن در هکتار)	هدایت هیدرولیکی (سانتی‌متر در ساعت)	جرم مخصوص ظاهری (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	MWD (میلی‌متر)	نفوذ آب در خاک (سانتی‌متر در ساعت)	pH	EC (دسی‌زیمنس بر متر)
۰	۱/۱×a**	۱/۳۰a	۰/۴۹a	۰/۲۲a	۷/۷a	۱/۲۹a
۱×۲۲/۵	۱/۳a	۱/۲۸a	۰/۴۷a	۰/۲۵a	۷/۵a	۱/۵۲ab
۲×۲۲/۵	۴/۰a	۱/۱۷b	۰/۵۵a	۰/۶۲a	۷/۷a	۱/۹۶b
۳×۲۲/۵	۲/۲a	۱/۱۷b	۰/۷۲b	۰/۷۰a	۷/۷a	۲/۴۴c
۱×۴۵	۱/۰a	۱/۲۲ab	۰/۵۴a	۰/۸۷a	۷/۵a	۱/۸۰b
۲×۴۵	۳/۶a	۱/۱۴b	۰/۶۱b	۰/۷۳a	۷/۷a	۲/۵۱c
۳×۴۵	۵/۸a	۱/۰۶c	۰/۷۱b	۰/۸۰a	۷/۶a	۳/۱۴d
SEM*	۱/۰۱	۰/۰۱۸	۰/۰۲۴	۰/۰۴۲	۰/۰۵۳	۰/۰۸۸

*میانگین خطای استاندارد[4]

** اعداد هر ستون با حروف مشابه، دارای اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد نیستند.

[4] Standard Error of Mean

جدول۳- همبستگی بین خصوصیات مختلف مورد مطالعه

خصوصیت	EC	pH	نفوذ پذیری	MWD	وزن مخصوص ظاهری	هدایت هیدرولیکی	مقدار لجن
مقدار لجن	۰/۹۸۶**	۰/۰۷۶	۰/۷۳۲ **	۰/۸۳۳*	-۰/۹۶۶ **	۰/۸۴۳ **	۱
هدایت هیدرولیکی	۰/۸۳۹**	۰/۳۰۶	۰/۴۷۷	۰/۶۳۱	-۰/۹۰۵ **	۱	
وزن مخصوص ظاهری	-۰/۹۷۱**	۰/۲۱۷	-۰/ ۷۷۱*	-۰/۸۳۷ *	۱		
MWD	۰/۹۰۵ **	۰/۳۳۶	۰/۶۷۴	۱			
نفوذپذیری	۰/۷۲۱	-/۰۳۲	۱				
pH	۰/۱۸۹	۱					
EC	۱						

* و ** به‌ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ و ۰/۰۱

جدول۴- ضرایب عاملهای استخراج شده در تجزیه به عاملها

عاملها	لجن	هدایت هیدرولیکی	وزن مخصوص ظاهری	MWD	نفوذ پذیری	pH	EC	درصد واریانس توجیهی	کل واریانس توجیه شده
عامل اول	۰/۹۸۲	۰/۸۲۱	-۰/۹۸۱	۰/۸۶۸	۰/۸۲۵	۰/۰۸	۹۸۰ ۰/	۷۱/۴	۸۸/۵
عامل دوم	۰/۰۱	۰/۳۱۳	-۰/۱۴۶	۰/۲۶۶	-۰/۲۱۶	۰/۹۷۳	۱۳۶ ۰/	۱۷/۱	

ساختمان ضعیف، تشکیل سله در خاک و بافت ریز رسی سیلتی است. به‌خصوص زمانی که سطح خاک به حالت اشباع نزدیک گردید و شکافها بسته شدند، سرعت نفوذ آب (سرعت نهایی) در خاک بسیار کم شد. نتایج این مطالعه نشان داد که استفاده از لجن فاضلاب تا حدودی باعث افزایش سرعت نفوذ آب در خاک گردید ولی این افزایش معنی‌دار نبود. محققان گزارش کردند که نفوذپذیری خاک با افزودن لجن فاضلاب به‌مقدار ۵۲ و ۱۰۴ تن در هکتار به‌طور چشمگیری افزایش یافت [۱۴]. همچنین مارتنز[1] و فرانکنبرگ[2] نشان دادند که استفاده از کود مرغی، لجن فاضلاب، کاه جو و یونجه باعث بهبود نفوذپذیری یک خاک لوم شنی گردید. به‌طوری که تأثیر کاه جو، کاه یونجه و لجن فاضلاب بر نفوذپذیری در مقایسه با کود مرغی بیشتر بود [۳۱]. سرعت نفوذ با افزودن لجن به خاک در تیمارهای ۳ الی ۷ حدود ۳ برابر شاهد افزایش پیدا کرد و تیمار ۲ تأثیری بر سرعت نفوذ نداشت. میانگین سرعت نفوذ در تیمارهای ۱ (شاهد) تا ۷ به‌ترتیب برابر ۰/۲۲، ۰/۲۵، ۰/۶۲، ۰/۷۰، ۰/۸۷، ۰/۷۳ و ۰/۸۰ سانتی‌متر در ساعت بود. ضریب پراکندگی داده‌ها نسبتاً بالا و در حدود ۴۰ درصد بود. همچنین به علل مذکور، خاک مورد مطالعه دارای نفوذپذیری بسیار ضعیف بود و در نتیجه اختلافات، قابل ملاحظه و معنی‌دار نبود. لذا به‌منظور بررسی اثر مقادیر لجن بر روی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک و اثر تغییرات خصوصیات مورد اندازه‌گیری روی یکدیگر از همبستگی بین صفات و تجزیه به عاملها استفاده شد (جدولهای ۳ و ۴).

۳-۶- تأثیر لجن فاضلاب بر pH و EC

جدول ۲ میانگین pH و EC خاک را در تیمارهای مختلف لجن فاضلاب نشان می‌دهد. لجن فاضلاب بر pH خاک تأثیر معنی‌داری نداشت که علت آن مربوط به قدرت بافری بالای خاکهای آهکی است که pH آنها به‌راحتی قابل تغییر نیست. تیمارهای اعمال شده لجن فاضلاب تأثیر معنی‌داری بر EC عصاره اشباع خاک داشت. کلیه تیمارها به‌جز تیمار ۲ (۲۲/۵ × ۱ تن در هکتار) تفاوت معنی‌داری از نظر EC با شاهد نشان دادند. تیمار ۳ بار لجن فاضلاب به‌مقدار ۴۵ تن در هکتار (تیمار ۷) بیشترین تأثیر را بر افزایش شوری خاک داشت. در این تیمار مقدار EC برابر ۳/۱۴ و در تیمار شاهد مقدار EC برابر ۱/۲۹ دسی‌زیمنس بر متر بود. قابلیت هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک تیمارهای ۳، ۴، ۵ و ۶ به‌ترتیب به ۱/۵، ۱/۹، ۱/۴ و ۲ برابر شاهد افزایش یافتند. به‌طوری که میانگین EC در این تیمارها به‌ترتیب برابر ۱/۹۶، ۲/۴۴، ۱/۸ و ۲/۵۱ دسی‌زیمنس بر متر بود. می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش لجن فاضلاب در خاک، قابلیت هدایت الکتریکی خاک افزایش می‌یابد. زیاد بودن مقدار املاح در لجن فاضلاب یا EC زیاد آن است که باعث افزایش قابلیت هدایت الکتریکی خاک

[1] Martens
[2] Frankenberg

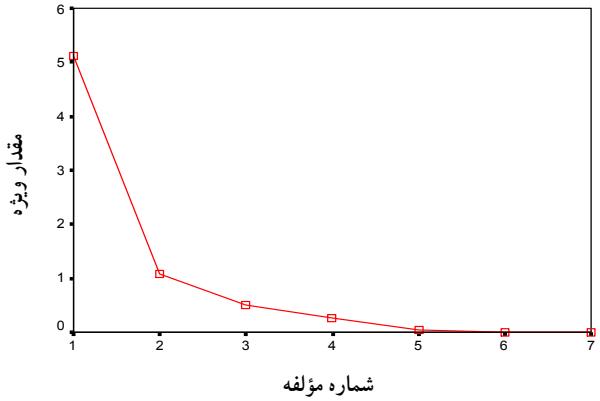
می‌گردد. مقدار قابلیت هدایت الکتریکی لجن فاضلاب برابر ۱۰/۲ دسی‌زیمنس بر سانتی‌متر بود و بنابراین با توجه به EC خاک شاهد که ۱/۲۹ دسی‌زیمنس بر سانتی‌متر بود انتظار می‌رود که با افزایش لجن فاضلاب به خاک، شوری آن افزایش یابد.

۳-۷- نتایج تجزیه به عاملها

بررسی همبستگی بین خصوصیات مختلف مورد اندازه‌گیری نشان داد که بین مقدار لجن فاضلاب با خصوصیات EC، MWD، هدایت هیدرولیکی و نفوذپذیری، همبستگی مثبت و معنی‌دار است و با افزایش مقدار لجن، خصوصیات مذکور افزایش می‌یابند (جدول ۳). اگرچه اثر تیمار برای خصوصیات هدایت هیدرولیکی و نفوذپذیری معنی‌دار نبود ولی همبستگی لجن و وزن مخصوص ظاهری منفی و معنی‌دار بود که نشان می‌دهد با افزایش لجن، وزن مخصوص کاهش می‌یابد. همبستگی منفی و معنی‌دار وزن مخصوص ظاهری با EC، نفوذپذیری، MWD و هدایت هیدرولیکی نشان می‌دهد که افزایش EC، نفوذپذیری، پایداری خاکدانه و هدایت هیدرولیکی توأم با کاهش وزن مخصوص ظاهری است. همچنین همبستگی بین MWD و EC مثبت و معنی‌دار بود. به‌منظور تجزیه به عاملها مطابق شکل ۱ فاکتورهای دارای مقادیر ویژه بیش از یک انتخاب شدند. تجزیه به عاملها نشان داد که بیش از ۸۸ درصد از کل تغییرات موجود در متغیرها، توسط دو عامل توجیه می‌شود. فاکتور اول ۷۱ درصد واریانس را توجیه نمود که دارای ضرایب[1] بالایی برای EC، نفوذپذیری، MWD، وزن مخصوص ظاهری، هدایت هیدرولیکی و مقدار لجن بود. این فاکتور را می‌توان عامل خصوصیات فیزیکی نامید و نشان می‌دهد که افزایش لجن، باعث کاهش وزن مخصوص ظاهری و افزایش سایر خصوصیات فیزیکی می‌گردد. فاکتور دوم عامل pH نامیده می‌شود که نشان‌دهنده خصوصیات شیمیایی خاک است و فقط ۱۷ درصد از تغییرات را توجیه می‌نماید و لجن و خواص فیزیکی، تأثیری بر روی آن ندارند (جدول ۴). این موضوع در جدول همبستگی‌ها و جدول میانگین‌ها نیز مشهود است. pH با هیچ‌یک از خصوصیات دیگر خاک، همبستگی نشان نداده و تغییرات آن در سطوح مختلف تیمار بسیار ناچیز است (جدولهای ۲ و ۳).

۴- نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که لجن فاضلاب تأثیر بسزایی بر خواص فیزیکی و شیمیایی اندازه‌گیری شده خاک دارد. افزودن لجن، باعث افزایش هدایت هیدرولیکی گردید. این افزایش قابل



شکل ۱- نمودار تغییرات مقادیر ویژه نسبت به تعداد عامل

ملاحظه، به‌علت تغییرپذیری زیاد هدایت هیدرولیکی خاک از نظر آماری معنی‌دار نشد. استفاده از لجن فاضلاب باعث کاهش معنی‌دار جرم مخصوص ظاهری خاک و افزایش معنی‌دار پایداری خاکدانه گردید ولی تأثیر معنی‌داری بر سرعت نفوذ آب در خاک نداشت. همچنین با افزایش لجن فاضلاب در خاک، قابلیت هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک به‌طور معنی‌داری افزایش یافت که نشان‌دهنده مقدار املاح زیاد لجن فاضلاب است ولی بر pH خاک تأثیر چندانی نداشت که علت آن قدرت بافری بالای خاک بود. هم‌چنین نتایج این مطالعه نشان داد که اثر تجمعی لجن فاضلاب بر خواص اندازه‌گیری شده، قابل ملاحظه است. در تیمارهایی که لجن فاضلاب به‌صورت متوالی در هر سال به خاک اضافه گردید، نسبت به سایر تیمارها و به‌خصوص تیمارهایی که فقط در سال اول، لجن به خاک افزوده شد، تأثیر لجن فاضلاب بیشتر بود و این مطلب بیانگر این است که احتمالاً گذشت زمان باعث از بین رفتن تأثیر لجن در خاک می‌شود. به‌طور کلی، افزودن لجن فاضلاب به خاک، می‌تواند باعث بهبود خواص فیزیکی خاک گردد ولی استفاده بی‌رویه از آن ممکن است باعث شوری و آلودگی خاک شود. ضرایب همبستگی و تجزیه به عاملها به‌خوبی این موضوع را نشان دادند. همچنین، لجن فاضلاب می‌تواند شامل عوامل میکربی بیماری‌زا و ترکیبات آلاینده خطرناک مانند عناصر سنگین باشد که در استفاده از آن به‌عنوان کود آلی، لازم است بسیار با احتیاط و دقت عمل شود.

لازم به‌ذکر است که هدف این پژوهش فقط بررسی اثرهای بلندمدت و تجمعی استفاده از لجن فاضلاب بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک بود و به مسائل آلودگی استفاده از آن پرداخته نشده است. بنابراین، اگرچه نتایج این تحقیق نشان داد که لجن فاضلاب تأثیر مطلوبی بر خواص فیزیکی خاک دارد ولی بدون در نظر گرفتن مشکلات زیست‌محیطی آن، نمی‌توان آن را به‌عنوان یک کود آلی توصیه نمود.

[1] Loading factor

۵- مراجع

1- Angers, D. A., and Mehuys, G.R. (1989). "Effects of cropping on carbohydrate content and water-stable aggregation of a clay soil." *Can. J. Soil Sci*., 69 (2), 373-380.

2- Baker, E. G., and Mathews, P.G. (1983). "Metals in sewage sludge and their potential effects in agriculture." *Water Sci. Res*., 15 (1), 209-225.

3- Deiana, S., Gessa, C., Manunza, B., Rausa, R., and sebber, R. (1990). "Analytical and spectroscopic characterization of humic acids extracted from sewage sludge, manure and worm compost." *Soil Sci*. ,150 (1), 419-424.

4- McCasline, B. D., and Connor, G. A. O. (1982). *Potential fertilizer value of sewage sludge on a calcareous soil*, New Mexico State Univ. Agri. Exp Bull., 692.

5- Smith, S. R. (1992). "Sewage sludge and refuse compost as peat alternatives for conditioning impoverished soils." *J. Hort. Sci*., 67 (2), 703-716.

6- Afyuni, M. (1987). "Extractability of Fe, Zn, and Cd in sludge amended calcareous soils." MSc. Thesis., New Mexico State Univ., Las Cruces, NM.

7- Handreck, K. A. (1994). "Effect of pH on the uptake of Cd, Cu, and Zn from soilless media containing sewage sludge." *Common. Soil Sci. Plant Anal*., 25 (11), 1913-1927.

8- Giusquianni, P. L., Gigliotti, G., and Businelli, D. (1992). "Mobility of heavy methods in urban amended soils." *J. Environ. Qual*., 21 (3), 336-345.

9- Giusquianni, P.L., Pagliai, M., Gigliotti, G., Businelli, D., and Benetti, A. (1995). "Urban waste compost: Effects on physical, chemical, and biochemical soil properties." *J. Environ. Qual*., 24 (1), 175-182.

10- Felton, G. K. (1995). "Soil hydraulic properties on municipal solid waste." *Trans ASAE*, 38 (3), 775-782.

11- Glauser, R., Doner, H. E., and Poul, E. A. (1988). "Soil aggregate stability as a function of particle size in sludge treated soils." *Soil Sci*., 146 (1), 37-43.

12- Tester, C. F. (1990). "Organic amendment effects on physical and chemical properties of sandy soil." *Soil Sci. Soc. Am. J*., 54 (1), 827-831.

13- Epstein, E. (1975). Effect of sewage sludge on some soil physical properties." *J. Environ. Qual*., 4 (2), 139-142.

14- Abusharar, T. M. (1993). "Effects of sewage sludge treatments on aggregate slaking, clay dispersion and hydraulic conductivity of semi-arid soil sample." *Geoderma*, 59 (1-4), 327-343.

15- Pagliai, M., Guide, G., Marca, M., Giachetti, M., and Lucament, G. (1981). "Effects of sewage sludge and compost on soil porosity and aggregation." *J. Environ. Qual*., 4 (1), 556-561.

16- Kladiokov, E. J., and Nelson, D. W. (1979). "Changes in soil properties from application of anaerobic sludge." *Soil Sci*., 153 (2), 53-61.

17- Pagliai, M., and Antisari, L. (1993). "Influence of waste organic matter on soil micro and macrostructure." *Bioresource Technol*., 43 (3), 205-213.

18- Blake, M. H., and Hartage, K. H. (1986). "Bulk density determination. methods of soil analysis. Part 1. Physical and mechanical methods." *Soil Sci. Soc. Am. J*., Agronomy monograph. P. 363-373.

19- Kemper, D., and Rosenou, C. (1986). "Aggregate stability and size distribution. methods of soil analysis. Part 1. Physical and mechanical methods." *Soil Sci. Soc. Am. J.* Agronomy monograph. P. 425-440.

20- Panahpoor, E., Afyuni, M., Homaee, M., and Hoodaji, M. (2008). "Cd, and Co motion in soil treated with sewage sludge and salts of the metals and their uptake by vegetable crops, A case study in east Isfahan." *J. of Water and Wastewater*, 67, 9-17.

21- Chen, Y., and Avnimelech, Y. (1986). *The role of organic matter in modern agriculture*, 1st Ed., Matinus Nijhoff, Netherlands.

22- Cosby, B.J., Hornberger, G.M., Clapp, R. B., and Ginn, T.R. (1984). "A statistical exploration of the relationship of soil moisture characteristics to the physical properties of soils." *Water Resources Res*., 20(6), 682-690.

23- Morel, J. L., and Guckert, A. (1983). *The influence of sludge application on physical and biological properties of soils*, 1st Ed., Dordrecht, Holland.

24- Lal, R. (1999). "Soil compaction and tillage effects on soil physical properties of a Mallic Ochraqualfs in northwest Ohio." *J. Sustainable Agric*., 14, 53-65.

25- Shirani, H., Hajabbasi, M. A., Afyuni, M., and Hemmat, A. (2002). "Effect of farmyard manure and tillage systems on soil physical properties and corn yield in central Iran." *Soil and Tillage Res*., 68 (2), 101-108.

26- Ekwue, E. I., and Stone, R. J. (1995). "Organic matter effects on the strength properties of compacted agricultural soils." *Trans. ASAE*., 38 (2), 357-365.

27- Felton, G.K. (1995). "Soil hydraulic properties on municipal solid waste." *Trans ASAE*, 38 (3), 775-782.

28- Ohu, J.O. (1985). "Peatmoss influence on strength hydraulic conductivity characteristics and crop production of compacted soils." Ph.D. Thesis., MacDonald College, Gill University.

29- Bear, M.H., Hendrix, P. F., and Coleman, D. C. (1994). "Water stable aggregates and organic carbon fractions in conventional and no-tillage soils." *Soil Sci. Soc. Am. J*., 58 (3), 777-786.

30- Nyamangara, J., Gotosa, J., and Mpofu, S. E. (2001). "Cattle manure effects on structural stability and water retention capacity of a granitic sandy soil in Zimbabwe." *Soil and Tillage Res*., 62 (3-4), 157-162.

31- Martens, D. A., and Frankenberg, W.T. (1992). "Modification of infiltration rates in an organic amended irrigated." *J. of Agron*., 84 (4), 707-717.