Review Article

Journal of Aquifer and Qanat

Spring And Summer 2024, Vol. 5, No. 1, pp 203-216

10.22077/jaaq.2024.7950.1074

A Review of The Effects of Sewage Sludge and Suspended Solids of Treated Wastewater on Soil Physical and Hydraulic Properties

Hossein Bagheri [1]✉ |

1. PhD Graduate of Irrigation and Drainage, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

✉Corresponding Author: bagheri.hossein@live.com

Received:
23 July 2024

Accepted:
01 October 2024

Published:
20 December 2024

Keywords:

Porosity,
Bulk density,
Soil structure,
Permeability,
Hydraulic conductivity

Extended abstract

Introduction

The lack of water resources in arid and semi-arid climates has caused treated wastewater to be used as a leading option for agricultural stability and crop production in farmland irrigation. In addition, the low quality of agricultural soil in these climates also requires using fertilizers and modifiers; in this regard, sewage sludge can be an easily accessible option. Despite meeting the land's water and fertilizer needs with the two options, it is necessary to study their consequences on the soil bed of the land for sustainable agriculture. Although treated wastewater and sewage sludge can affect a wide range of soil and crop properties, their effects on soil physical and hydraulic parameters were followed in this study. Since the degree of influence of these resources on soil properties depends on climate type, soil type and texture, and amount of irrigation, different results have been presented by researchers in this regard. For example, Mathan (1994) reported higher porosity and hydraulic conductivity and lower bulk density in loamy sand soil irrigated by wastewater for 15 years, while Zadhosh and Fardad (1996) concluded no change in bulk density and moisture content in field capacity for clay soil in 1 year and a decrease in soil infiltration during 9 years. Dawes et al. (2004) also stated a decrease in soil pore volumes and saturated hydraulic conductivity and an increase in soil water retention as affected by wastewater irrigation during 5 years.

Cite this article: Bagheri, H. (2024). A review of the effects of sewage sludge and suspended solids of treated wastewater on soil physical and hydraulic properties. *Journal of Aquifer and Qanat Title*, 5 (1), 203-216. DOI: http//doi.org/10.22077/jaaq.2024.8149.1077.

Copyright: © 2024 by the authors. Licensee Journal of Aquifer and Qanat. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Sewage sludge as a soil fertilizer and amendment has high amounts of phosphorous, nitrogen, carbon, and micronutrients (Page and Chang, 1994), which can affect soil physical parameters including bulk density, porosity, the capacity of water storage, and stability of aggregates (Ojeda et al., 2006; Ramulu, 2002). Therefore, this study aims to review the effects of suspended particles of treated wastewater and sewage sludge on the physical and hydraulic properties of soil including bulk density, porosity, hydraulic conductivity, permeability, soil structure, stability of aggregates, and characteristic curve..

Results and Discussion

The results of some studies showed an increase in porosity and a decrease in bulk density (Mojiri, 2011; Abedi-Koupai et al., 2006; Rohani Shahraki et al., 2005) and a decrease in porosity and an increase in bulk density (Mollahoseini, 2013; Abedi-Koupai et al., 2006). Bhardwaj et al., (2007) concluded higher soil compaction is due to the increase in the number of pores filled by suspended particles of wastewater. These results can be related to the different roles of organic and inorganic particles in the soil. The inorganic particles placed through soil pores, resulting in higher soil bulk density and lower soil porosity (Mollahoseini, 2013; Mathan, 1994), while injection of organic particles through the soil can sponge it due to the formation of soil aggregates and large pores between them (Mojiri, 2011; Rohani Shahraki et al., 2005). These findings also were the reasons for the increase or decrease in soil hydraulic conductivity and permeability. In this regard, some researchers concluded lower hydraulic conductivity and permeability (Mollahoseini et al., 2013; Vivani and Lovino, 2004), while others stated higher amounts for them affected by soil irrigated by wastewater (Abedi-Koupai et al., 2006; Mathan, 1994). In addition to changes in soil structure and physical blockage of soil pores, biological blockage by fungi and microbes and gas blockage also were effective parameters on the change in hydraulic conditions in soil (Kristiansen, 1981; Vandevivere and Baveye, 1992; Baveye et al., 1998; Magesan et al., 2000). The Irrigation with treated wastewater increased soil water content and retention (Rohani Shahraki et al., 2005; Islamian et al., 2007) due to the increase in soil carbon content, number of fine particles specific surface area of particles, and the change in soil structure. The application of sewage sludge in the soil also changed soil properties. In this regard, Taqvaian et al. (2007) and Lindesky and Logan (1998) reported that the use of 300 tons/hac of sewage sludge increased soil porosity by 10% and decreased bulk density by 13%. Bahremand et al. (2003) stated that the application of 100-ton/hac sewage sludge enhanced the stability of soil aggregate, hydraulic conductivity, and permeability by five, four, and eight times, respectively. Improvement of the soil water retention curve including a greater increase in moisture contents in field capacity and less increase in permanent wilting point was reported by some researchers (Alcañiz, 2010; Ojeda et al., 2006; Bahremand et al., 2003). These findings occurred due to the injection of high amounts of organic carbon in the soil which accelerated the formation of soil aggregate and large pores, resulting in higher porosity and water storage capacity and an improvement in water movement through the soil (Saadat et al., 2013; RahimiAlashti et al., 2012; Asghari, 2011). Moreover, an increase in the specific surface area of media particles due to the presence of organic particles enhanced the moisture content at the wilting point.

مقاله مروری

مجله

آبخوان و قنات

دوره پنجم، شماره اول، بهار و تابستان ۱۴۰۳، صفحات ۲۱۸-۲۰۳

10.22077/jaaq.2024.7950.1074

مروری بر اثرات لجن و مواد معلق پساب فاضلاب بر ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی خاک

حسین باقری [۱]✉

۱. دانش‌آموخته دکتری آبیاری و زهکشی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.

✉نویسنده مسئول: bagheri.hossein@live.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۰۲
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۱۰
تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۹/۳۰

کلیدواژه‌ها:
تخلخل،
چگالی ظاهری،
ساختمان خاک،
نفوذپذیری،
هدایت‌هیدرولیکی.

چکیده

کمبود منابع آب در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک سبب شده تا پساب فاضلاب به‌عنوان یک گزینه پیش‌رو جهت ثبات کشاورزی و تولید محصول در آبیاری اراضی مورد استفاده قرار گیرد. به‌علاوه، کیفیت پایین اراضی کشاورزی در این اقلیم‌ها نیز مستلزم استفاده از کودها و اصلاح‌کننده‌ها بوده که در این راستا لجن فاضلاب می‌تواند یک گزینه سهل‌الوصول باشد. به‌رغم رفع نیاز آبی و کودی اراضی با دو گزینه مذکور، مطالعه پیامدهای آن‌ها بر بستر خاک اراضی جهت کشاورزی پایدار ضروری است. لذا، هدف این مطالعه بررسی مروری اثرات مواد معلق پساب فاضلاب و لجن فاضلاب بر ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی خاک از قبیل چگالی ظاهری، تخلخل، هدایت هیدرولیکی، نفوذپذیری، ساختمان خاک، پایداری خاکدانه و منحنی رطوبتی است. مطالعات انجام شده در این زمینه نشان داد که آبیاری با پساب فاضلاب موجب افزایش چگالی ظاهری، کاهش تخلخل و هدایت هیدرولیکی، تخریب ساختمان خاک و خاکدانه‌ها شده اما وضعیت رطوبتی خاک را بهبود بخشید. اثرات لجن فاضلاب روی خصوصیات خاک، گواه این موضوع است که این ماده می‌تواند موجب بهبود ساختمان خاک، افزایش قطر خاکدانه‌ها و تسریع در فرآیند تشکیل آن‌ها شده و از این طریق شرایط کاهش چگالی ظاهری و افزایش تخلخل، هدایت هیدرولیکی و نفوذپذیری را ایجاد نموده و موجب افزایش رطوبت قابل استفاده در خاک گردد.

مقدمه

آب و خاک از جمله مولفه‌های حیاتی کشاورزی بوده که کمبود یا ضعف در هر کدام تأثیر عمیقی در تولید محصولات کشاورزی و امنیت غذایی دارد (Safari, 2023). روند افزایشی جمعیت جهان، گسترش فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی و خشکالی‌های پی در پی در عمده اقلیم‌ها به‌ویژه اقلیم‌های خشک و نیمه خشک سبب افزایش تقاضای مصرف آب و افت کمیت و کیفیت منابع آب شده است. در این راستا، در ایران، ۹۰٪ آب مصرفی متعلق به بخش کشاورزی است (Ehsani et al., 2015). جهت جلوگیری از کاهش تولید محصول ناشی از کم‌آبی، بخش کشاورزی این قابلیت را داشته تا آب‌های با کیفیت پایین و نامتعارف از جمله منابع آب شور و پساب فاضلاب در آن مورد استفاده قرار گیرد. لذا، با توجه به جمع‌آوری فاضلاب‌های خانگی و تصفیه آن، یکی از راهبردهای پیش‌رو استفاده مدیریت‌شده از پساب فاضلاب در کشاورزی است. علاوه بر بخش سیال فاضلاب، بخش جامد آن یعنی لجن فاضلاب نیز به‌عنوان یک کود آلی و اصلاح‌کننده در اراضی کشاورزی مورد استفاده قرار گرفته تا مشکل حاصلخیزی پایین خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک نیز مرتفع گردد (Shirani et al., 2002; Mullins et al., 1990; Gupta et al., 1977). به‌رغم این دست‌آوردها، کاربرد پساب و لجن فاضلاب در کشاورزی به‌دلیل اثرگذاری بر آلودگی خاک و منابع آب سطحی و زیرزمینی، عدم اطمینان از سلامت محصولات کشاورزی، گسترش افقی آلودگی در مناطق تحت کشت؛ محققان، مدیران و کشاورزان را با تردیدهایی روبه‌رو کرده است (Afkhami et al., 2021; Pal et al., 2023). در این میان، خاک به‌عنوان بستر تولید نیاز به ثبات و حفظ کیفیت پایدار داشته و یکی از جنبه‌های مهم آن اثرپذیری ویژگی‌های فیزیکی آن از پساب فاضلاب و لجن است. ضمناً، از آنجایی که عوامل مختلفی از پساب فاضلاب بر ویژگی‌های فیزیکی خاک می‌تواند اثرگذار باشد در این مطالعه نقش بار معلق آن بر چگالی ظاهری، تخلخل، خاکدانه، هدایت هیدرولیکی، نفوذپذیری و منحنی رطوبتی بررسی شده است. مواد معلق موجود در پساب عمدتاً بار معدنی، آلی و موجودات ذره‌بینی میکروب‌ها و تخم انگل می‌باشند. که هر کدام از جنبه‌ای می‌تواند سبب بهبود یا زوال فیزیک ساختمان خاک شود.

پیامدهای زوال ویژگی‌های فیزیکی مذکور شامل کاهش نرخ هوادهی خاک، مقاومت خاک در مقابل رشد و توسعه ریشه، کمبود اکسیژن در محیط ریشه، کاهش جمعیت میکروب‌های هوازی و ماندآبی است. در این زمینه مطالعات گوناگونی با اهداف مختلف صورت گرفته است. به‌عنوان مثال، متهن (Mathan, 1994) افزایش خلل و فرج، کاهش چگالی ظاهری و افزایش هدایت هیدرولیکی خاک را در اثر کاربرد فاضلاب در مدت ده تا پانزده سال برای خاک لومی شنی گزارش کرد. نتایج زادهوش و فرداد (Zadhosh and Fardad, 1996) نشان داد که کاربرد فاضلاب در یک خاک رسی به‌مدت یکسال، میانگین جرم مخصوص ظاهری و درصد رطوبت ظرفیت مزرعه را دچار تغییرات خاصی نکرده، اما زمین‌های آبیاری شده با فاضلاب طی ۹ سال، جرم مخصوص ظاهری کمتر، درصد رطوبت بیشتر و نفوذ نهایی کمتری داشتند. بررسی داده‌های ۱۲ منبع مطالعاتی مختلف، ۲۱ نوع خاک، ۷ نوع فاضلاب و ۸ نوع گیاه، نشان از افزایش ظرفیت نگهداری آب خاک و کاهش چگالی ظاهری داشت (Khaleel et al., 1981). حسن اقلی و همکاران (Hassanoghli et al., 2002) افزایش هدایت هیدرولیکی اشباع خاک‌ها را پس از اجرای عملیات کشت جعفری، هویج و گوجه فرنگی و آبیاری با فاضلاب خام، فاضلاب تصفیه شده و آب چاه در خاک‌های لومی رسی طی دو سال گزارش کردند. بیشترین افزایش هدایت هیدرولیکی اشباع در کاربرد فاضلاب خام و پس از آن در فاضلاب تصفیه شده و آب چاه بود. داوز و همکاران (Dawes et al., 2004) در زمینه تأثیر فاضلاب بر خصوصیات فیزیکی خاک بیان کردند که کاربرد فاضلاب، نگهداری آب خاک‌های لومی رسی، لوم‌رسی‌شنی، لوم و لومی شنی را در مدت ۵ سال افزایش و حجم خلل فرج و هدایت هیدرولیکی اشباع را کاهش داد .اسلامیان و همکاران (Islamian et al., 2007) گزارش کردند که تأثیر فاضلاب تصفیه شده و خام در طی یک فصل زراعی، باعث افزایش مواد آلی، بهبود ساختمان و افزایش قابلیت نگهداشت آب خاک شد. آئلو و همکاران (Aiello et al., 2007) با کاربرد فاضلاب تصفیه شده در یک خاک شنی، کاهش هدایت هیدرولیکی، خلل و فرج و ظرفیت

نگهداشت آب و خاک و افزایش چگالی ظاهری در لایه ۰-۳۰ سانتیمتری را نسبت به مقدار اولیه گزارش کردند. در مطالعه‌ای دیگر آبیاری با فاضلاب شدت نفوذ نهایی زمین تحت کشت گیاه گوجه فرنگی را کاهش داد (Xanthoulis and Wallender, 1991).

لجن فاضلاب که از تصفیه فاضلاب بوجود می‌آید یک ماده اصلاح کننده‌ی خصوصیات خاک می‌باشد. در حقیقت، این ماده حاوی مقادیر بالای فسفر، نیتروژن، کربن و ریزمغذی‌های بوده که می‌تواند برای خاک مفید واقع شود (Page and Chang, 1994). به دلیل پیشرفت‌ها در تحقیقات و تکنولوژی، این ماده می‌تواند به عنوان یک اصلاح کننده و یک انتخاب پایدار و همیشگی برای بهبود خاک‌های غیر حاصلخیز و دارای مشکلات رطوبتی به کار رود (Schaefer, 1999). ماده آلی که به شکل لجن فاضلاب به خاک اضافه می‌گردد، موجب بهبود چندین خصوصیت فیزیکی خاک، از جمله چگالی ظاهری، تخلخل، ظرفیت نگهداشت آب خاک (Ramulu, 2002) و پایداری خاکدانه و تسریع در فرایند تشکیل آن می‌شود (Ojeda et al., 2003; Ojeda et al., 2006). بنابراین هدف از این مطالعه، بررسی اثرات لجن فاضلاب و مواد معلق موجود در پساب بر برخی خصوصیات فیزیکی و هیدرولیکی خاک از قبیل، چگالی ظاهری، تخلخل، ساختمان خاک، پایداری خاکدانه، هدایت هیدرولیکی، نفوذپذیری، منحنی رطوبتی و رطوبت قابل استفاده گیاه می‌باشد.

مواد و روش‌ها

جهت انجام این مطالعه، کلمات کلیدی پساب فاضلاب، بار معلق، لجن فاضلاب و خصوصیات فیزیکی و هیدرولیکی خاک، در موتور جست‌وجوی Google و ابزارهای جست‌وجوی مجلات داخلی و خارجی مرتبط با موضوعات آب، خاک و محیط‌زیست، مورد بررسی قرار گرفتند. در این زمینه مطالعات زیادی صورت گرفته بود، که از این میان تعداد ۱۱۷ مقاله برای رسیدن به این مهم انتخاب گردید.

نتایج و بحث

چگالی ظاهری و تخلخل

بررسی اثرات پساب فاضلاب بر چگالی ظاهری و تخلخل خاک در قالب مطالعات کوتاه‌مدت (Rohani Shahraki et al., 2005; Abedi-Koupai et al., 2006) و بلندمدت (Zadhosh and Fardad, 1996; Mollahoseini, 2013; Magesan, 2001) انجام‌گرفته است. در این راستا، کاهش چگالی ظاهری و افزایش تخلخل (Mojiri, 2011; Magesan, 2001; Zadhosh and Fardad, 1996; Rohani Shahraki et al., 2005; Abedi-Koupai et al., 2006; Mahida,1981; Mathan, 1994) و بالعکس افزایش چگالی ظاهری و کاهش تخلخل (Mollahoseini, 2013; Abedi-Koupai et al., 2006) گزارش شده که ناشی از نقش دوگانه ذرات معلق آلی و غیر آلی پساب است. نتایج برخی مطالعات نشان‌دهنده کاهش چگالی ناشی از اسفنجی شدن خاک متأثر از مواد آلی پساب (Mojiri, 2011; Rohani Shahraki et al., 2005; Mahida, 1981; Mathan, 1994) بوده در حالی‌که نتایج برخی مطالعات طولانی‌مدت، مبین انسداد و پر شدن حفرات خاک ناشی از مواد معلق موجود در پساب می‌باشد (Mollahoseini, 2013; Mathan, 1994). به‌علاوه، نتایج مگسان (Magesan, 2001) نشان داد که انسداد حفرات خاک در لایه‌های بالایی به‌علت فرو ریختگی خاکدانه ناشی از ترکیبات شیمیایی پساب رخ داده و پیامد آن تراکم خاک، کاهش هوادهی و افزایش چگالی ظاهری خاک است. با این وجود، طبق برخی مطالعات، اثر غیر معنی‌دار پساب بر چگالی ظاهری و تخلخل خاک استنتاج شده است (Taqvaian et al., 2007; Masoudiashtiani et al., 2011).

علاوه بر پساب فاضلاب در آبیاری، کاربرد لجن فاضلاب به‌عنوان یک کود آلی اثرات قابل ملاحظه‌ای بر چگالی ظاهری و تخلخل داشته که در عمده مطالعات انجام شده، بهبود وضعیت چگالی ظاهری و تخلخل گزارش شده است (Boeira and de Souza, 2007; Taqvaian et al., 2007; Mays et al., 1973; Giusquianni et al., 1995; Logon and Billite, 1998; Marinari et al., 2000). نتایج مطالعه تقوائیان و همکاران (Taqvaian et al., 2007) نشان داد که استفاده ۳۰۰ تن در هکتار لجن فاضلاب موجب افزایش ۱۰ درصدی تخلخل شد. لیندسکی و لوگان (Lindesky and Logan, 1998) مشاهده کردند که استفاده از همین مقدار لجن، کاهش ۱۳ درصدی چگالی

ظاهری را سبب شد. در همین راستا، کاهش ۱۰ درصدی چگالی ظاهری و افزایش ۱۸ درصدی تخلخل پس از کاربرد لجن فاضلاب گزارش شده است (Rostagno and Sosebee, 2001; Sort and Alcañiz, 1999). پاگلیایی و همکاران (Pagliai et al., 1981) به این نتیجه رسیدند که لجن فاضلاب می‌تواند بیشتر از کود حیوانی با افزایش تخلخل و کاهش چگالی ظاهری به بهبود ساختمان خاک کمک کند. دلیل اصلی این نتایج وابسته به وجود ماده آلی در ترکیبات لجن فاضلاب است. در این راستا، برخی مطالعات، وجود ۲۰ تا ۵۹ درصدی مواد آلی در ترکیبات لجن فاضلاب را نشان داد (Fathololomi, Asghari, 2015; Shahbazi et al., 2018). لذا، وجود مواد آلی زیاد در لجن فاضلاب، به‌دلیل افزایش کربن آلی و اسفنجی و سبک شدن ساختمان خاک، کاهش چگالی ظاهری و افزایش تخلخل را موجب شده است (Saadat et al., 2013; RahimiAlashti et al., 2012; Asghari, 2011; Sort and Alcañiz, 1999; Taqvaian et al., 2007). نتیجه کلی نشان‌دهنده انسداد حفرات، افزایش چگالی ظاهری و کاهش تخلخل خاک ناشی از نفوذ بار معلق پساب به درون خاک بوده در حالی‌که لجن فاضلاب موجب بهبود این ویژگی‌ها در خاک شده است.

ساختمان خاک و پایداری خاکدانه

اگرچه مطالعات قابل توجهی در زمینه اثر ترکیبات مختلف پساب بر خواص ساختمانی خاک انجام‌گرفته (Halliwell et al., 2001; Levy and Mamedov, 2002; Levy et al., 2003; Levy et al., 2006; Bhardwaj et al., 2007)، اما مطالعات معدودی در خصوص اثر مواد معلق پساب بر این ویژگی‌ها وجود دارد (Glinski et al., 2011). وجود ذرات معلق زیاد در پساب می‌تواند با پر کردن حفرات باعث تراکم ساختمان خاک شده (Bhardwaj et al., 2007) در حالی که وجود ذرات آلی با قرارگرفتن در بین حفرات با تشکیل ترکیبات هیومیکی موجب هم‌بستگی ذرات خاک و تشکیل خاکدانه در طولانی‌مدت می‌شود. با این وجود، نتایج تراچیتزکی و همکاران (Tarchitzky et al., 1993) مبین انتشارپذیری ذرات رس خاک متأثر از حضور مواد هیومیکی پساب ناشی از نوع بار الکتریکی آن‌ها است.

لجن فاضلاب به‌دلیل دارا بودن ترکیبات حاصلخیزکننده و اصلاح‌کننده، با هدف افزایش پایداری خاکدانه و بهبود وضعیت ساختمانی خاک مورد استفاده قرار گرفته که نتیجه آن ارتقا سطح فیزیکی خاک بود (Nicolas et al., 2014; Glauser et al., 1998; Epstein, 1975; Tester, 1990; Abusharar, 1993; Kladivko and Nelson, 1979; Pagliai et al., 1993). نتایج شیرانی و همکاران (Shirani et al., 2010) نشان می‌دهد که هر چه میزان لجن اضافه شده به خاک افزایش یابد، پایداری خاکدانه‌ها بیشتر می‌گردد. بهره‌مند و همکاران (Bahremand et al., 2003) اظهار داشتند که اعمال ۱۰۰ تن در هکتار لجن به خاک، پایداری خاکدانه را پنج برابر کرد. در بسیاری از مطالعات بیان شده که، میزان مواد آلی، سهم بیشتری از مواد تشکیل دهنده‌ی لجن فاضلاب را شامل می‌شود (Vaseghi et al., 2005; Saadat et al., 2013; Shirani et al., 2010; Fu et al., 2002; Bouzaiane et al., 2007).

در این راستا، نتایج پژوهشگران (Nyamangara et al., 2001; Angers and Mehuys, 1989; Bear et al., 1994; Gollany et al., 1991) بیان‌کننده نقش اساسی مواد آلی در پایداری ساختمان خاک و تولید خاکدانه است. بیر و همکاران (Bear et al., 1994) گزارش کردند خاکدانه‌های با قطر ۰/۲۵ تا ۲ میلی‌متر نیاز به حفاظت و نگهداری توسط عوامل کربن آلی داشته تا در مقابل عملیات خاک‌ورزی سنگین، فشرده و تخریب نشوند. ساز و کار اثر ماده‌ی آلی بر پایداری خاکدانه‌ها نه‌تنها به مقدار و نوع ماده‌ی آلی بستگی دارد بلکه بیش از آن به آرایش و نحوه‌ی پیوندهای آن با اجزای معدنی خاک وابسته است (Aringhieri and Sequi, 1979). معادلات مختلف و گاهاً متناقضی که تاکنون در خصوص اثر مواد آلی بر پایداری خاکدانه‌ها ارائه‌شده، محقق را از ساده انگاری بر حذر داشته و جمع بندی نهایی نتایج را دشوار می‌سازد. زیرا، مواد آلی از سویی می‌توانند با افزایش بارهای سطحی منفی و کاهش تخلخل رس بر مقدار پراکنش رس افزوده و از سویی دیگر عامل پیوند دهنده‌ی ذرات خاک به شمار آیند (Koutika et al., 1997). با تکیه بر این موضوع و وجود برخی کاتیون‌ها نظیر سدیم، کلسیم و... در لجن فاضلاب، در مطالعاتی اثر منفی لجن فاضلاب روی وضعیت ساختمانی، پایداری و میزان خاکدانه نیز ارائه شده است (Macedo et al., 2006; Filizola et al., 2006). همچنین، اصغری و همکاران (Asghari et al., 2011) بیان کردند که استفاده از لجن فاضلاب نتوانست میانگین قطر خاکدانه‌ها

را به طور معنی داری تحت تأثیر قرار دهد. در مجموع می‌توان نتیجه گرفت که وجود ذرات معدنی در پساب موجب افزایش تراکم ساختمان خاک شده در حالی‌که لجن فاضلاب و ذرات آلی معلق پساب، پایداری و افزایش قطر خاکدانه و ثبات ساختمان متخلخل خاک را به‌همراه دارد.

هدایت هیدرولیکی و نفوذپذیری

مطالعات متعددی اثر مواد معلق موجود در پساب و فاضلاب را روی هدایت هیدرولیکی بررسی نموده که در بیشتر آنها کاهش هدایت هیدرولیکی (Mollahoseini et al., 2013; Vivani and Lovino, 2004; Yeates, 1995; Magesan et al., 2000) و در مطالعات محدودی افزایش آن به‌دست آمده است (Abedi-Koupai et al., 2006; Mathan, 1994). ون‌تن و همکاران (Vinten et al., 1983) مشاهده کردند که ماده آلی حل شده در پساب حتی در درصد سدیم قابل تبادل پایین نیز موجب کاهش هدایت هیدرولیکی شده است، که به دلیل باقی ماندن مواد آلی در طی نفوذ و تغییرات اندازه و توزیع خلل و فرج ناشی از انبساط و پراکندگی ذرات خاک اتفاق می‌افتد. لوی و همکاران (Levy et al., 1999) اثرات مضر آبیاری با پساب فاضلاب را در نتیجه اثر مقادیر بالای ذرات معلق آن بر هدایت هیدرولیکی خاک دانستند، که به بافت خاک بستگی داشته و هر چه بافت خاک ریزتر باشد، کاهش هدایت هیدرولیکی آن بیشتر می‌گردد. تغییرات مشاهده شده در هدایت هیدرولیکی را می‌توان در سه عامل انسداد بیولوژیکی توسط قارچ‌ها و میکروب‌ها (McCalla, 1950; Gupta and Swartzendruber, 1962; Frankenberger et al., 1979; Kristiansen, 1981; Vandevivere and Baveye, 1992)، انسداد گازی (ناشی از فعالیت ریز جانداران و گاز تولید شده از تجزیه) و تغییر ساختمان ناشی از دو عامل فوق‌الذکر و انسداد فیزیکی جست و جو کرد (Baveye et al., 1998). مگ‌سان و همکاران (Magesan et al., 2000) و یتس (Yeates, 1995) بیان کردند که استفاده از پساب موجب افزایش جمعیت نماتدها در اراضی کشاورزی می‌شود و در دسترس قرار گرفتن کربن، رشد آن‌ها را چندین برابر خواهد کرد که به‌سرعت این خصوصیات خاک را تضعیف خواهند کرد. اندازه ذرات مواد معلق در پساب نیز عامل دیگری در این پروسه می‌باشد. لوی و همکاران (Levy et al., 1999) اثر اندازه اجزای جامد معلق در پساب را مورد بررسی قرار دادند و بیان کردند که مقادیر بالای ماده آلی سبب کاهش هدایت هیدرولیکی می‌شود، اما با فیلتر کردن ذرات معلق بزرگ‌تر از ۰/۵ میکرون، ماده آلی موجود در پساب، موجب بهبود هدایت هیدرولیکی می‌شود. در همین مورد ایرز و وستکات (Ayers and Westcot, 1985) گزارش کردند که میزان مواد معلقی که در گرفتگی خاک نقش دارند نباید از ۱۰ میلی گرم در لیتر بیشتر باشند و پیشنهاد نمودند که با شخم زدن و طولانی کردن فواصل آبیاری، هوادهی خاک بیشتر صورت گرفته و مواد جامانده سریع‌تر تجزیه می‌شوند.

در زمینه اثرات پساب روی نفوذ نیز مطالعات زیادی انجام شده است که در اغلب آنها استفاده از پساب موجب کاهش نفوذپذیری نهایی شده است (Siegrist, 1987; Xanthoulis and Wallender, 1991; Rohani Shahraki et al., 2005; Zadhosh and Fardad, 1996). دلایل و عوامل مختلفی ممکن است در کاهش نفوذپذیری نهایی شرکت داشته باشند (مگ‌سان و همکاران، ۱۹۹۹). بعضی از این مکانیسم‌ها که در مورد هدایت هیدرولیکی نیز صدق می‌کند، شامل قطع یا انسداد فضاهای ارتباطی درون خاک به‌وسیله مواد معلق از قبیل رس‌های کلوئیدی و سلول‌های جلبکی (Bouwer and Chaney, 1974; Berend, 1967)، تشکیل لایه یا پوسته بیولوژیکی (Kristiansen, 1981; Balks et al., 1997)، گرفتگی بیولوژیکی خارج سلولی میکروبی (Thomas et al., 1966; McAuliffe et al., 1982)، تخریب ساختمان خاک به‌دلیل تجزیه مواد آلی (Vandevivere and Baveye, 1992; Lieffering and McLay, 1996; Nevo and Mitchell, 1967) و بارگذاری زیاد مواد معلق پساب در طول کاربری زمانی اراضی است (Magesan et al., 2000).

چندین محقق نشان دادند که استفاده از لجن فاضلاب در اراضی می‌تواند موجب بهبود هدایت هیدرولیکی (Morel and Guckert, 1983; Shirani et al., 2010; Epstein, 1975) و نفوذپذیری خاک گردد (Shirani et al., 2010; Martens and Frankenberg, 1992; Clapp et al., 1986). بهره‌مند و همکاران (Bahremand et al., 2003) گزارش کردند که اضافه کردن ۱۰۰ تن-هکتار از این ماده به خاک، موجب افزایش چهار برابری و هشت برابری

هدایت هیدرولیکی و نفوذپذیری خاک شده است که میزان بهبودی این ویژگی‌ها به میزان لجن افزوده شده به خاک بستگی دارد. در اکثر مطالعات مشاهده شده که بخش زیادی از مواد تشکیل دهنده لجن فاضلاب، کربن آلی می‌باشد و به همین دلیل لجن فاضلاب جز اصلاح کننده‌های آلی به شمار می‌آید، که با اضافه شدن آن به خاک میزان ماده آلی خاک افزایش می‌یابد (Vaseghi et al., 2005; Saadat et al., 2013; Shirani et al., 2010; Fu et al., 2002; Bouzaiane et al., 2007). اضافه شدن مواد آلی به خاک موجب افزایش قطر خاکدانه، پایداری و اسفنجی شدن ساختمان خاک، کاهش چگالی ظاهری (Dexter et al., 2003; Nakano and Miyazaki, 2005; Wysocka et al., 2007; Islam et al., 2008; Ahn and Jo, 2009) و افزایش خلل و فرج شده که ظرفیت انتقال را افزایش داده (Staub et al., 2009; Carman, 1937; Scheidegger, 1960) و موجب بهبود وضعیت سرعت نفوذ نهایی و هدایت هیدرولیکی می‌شود. با این وجود، با گذشت زمان و تجزیه مواد آلی، پایداری خاکدانه‌ها کاهش می‌یابد که عامل کاهش سرعت نفوذ نهایی و هدایت هیدرولیکی است. برآیند نتایج نشان می‌دهد که وجود ذرات معلق در پساب و جانمایی آن‌ها درون حفرات خاک سبب کاهش هدایت هیدرولیکی و نفوذپذیری شده در حالی‌که کاربرد لجن فاضلاب به‌واسطه اثرات مثبت بر ساختمان خاک سبب افزایش نفوذپذیری و هدایت هیدرولیکی گردیده است.

منحنی رطوبتی و آب قابل استفاده

مطالعات انجام گرفته در مورد اثرات پساب و فاضلاب بر منحنی رطوبتی و نگهداشت رطوبت خاک نسبت به دیگر ویژگی‌های فیزیکی کمتر بوده که عمدتاً مبین افزایش سطح نقاط رطوبتی و بهبود وضعیت نگهداشت رطوبت خاک می‌باشند (Saber, 1986; Zadhosh and Fardad, 1996; Rohani Shahraki et al., 2005; Islamian et al., 2007). در این راستا، عمده این نتایج متأثر از وجود کسر زیادی از مواد آلی در پساب است (Rohani Shahraki et al., 2005; Masoudiashtiani et al., 2011). اما با صرف نظر از وجود سطح ویژه زیاد و قابلیت بالای جذب آب ذرات آلی، تغییر شکل ساختمان خاک متأثر از ذرات معدنی نیز می‌تواند یک دلیل اثرگذار باشد. مواد معلق ریز به‌دلیل کوچک بودن اندازه‌شان باعث افزایش تخلخل میکرو (Sort and Alcañiz, 1999) و به‌علت داشتن سطح ویژه زیادتر نسبت به ذرات خاک موجب نگهداشت و جذب سطحی بیشتر رطوبت می‌شوند. با این وجود، انسداد منافذ خاک متأثر از این ذرات، باعث کاهش ارتباط بین حفرات و انتقال آب و ذخیره بیشتر آن در حفرات ریز خاک می‌شود (Frankenberger et al., 1979; Gupta and Swartzendruber, 1962; Magesan et al., 2000). وجود این شرایط دال بر نیاز به مکش بیشتر برای خارج کردن رطوبت خاک در تعیین منحنی رطوبتی می‌باشد. بنابراین آبیاری با پساب نگهداشت رطوبت باقی‌مانده در شرایط مکش‌های بیشتر را افزایش می‌دهد.

طبق برخی مطالعات، نگهداشت رطوبت خاک با اضافه شدن لجن فاضلاب به خاک افزایش یافت (Kumar et al., 1985; Illera et al., 1999; Tsadilas et al., 2005; Aggelides and Londra, 2000; Ojeda et al., 2006; Ojeda and Alcañiz 2010; De Jong, 1983). بهره‌مند و همکاران (Bahremand et al., 2003) بیان داشتند که کاربرد لجن فاضلاب در خاک موجب افزایش نگهداشت رطوبت در ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی می‌شود که میزان افزایش در ظرفیت زراعی خیلی بیشتر از نقطه پژمردگی دائم بوده و نتیجه آن افزایش نزدیک به ۴ درصد به رطوبت قابل استفاده متأثر از اضافه کردن ۱۰۰ تن در هکتار لجن فاضلاب است. در این راستا، همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، لجن فاضلاب به‌عنوان یک اصلاح‌کننده آلی (Ojeda et al., 2006; Catroux et al., 1981) سبب کاهش جرم مخصوص ظاهری، افزایش تخلخل، تغییر در اندازه خاکدانه‌ها و حفرات خاک شده که از دیگر دلایل بهبود منحنی رطوبتی و افزایش آب در دسترس گیاه است (Bahremand et al., 2003; Catroux et al., 1981; Epstein, 1975). به‌طور کلی می‌توان بیان داشت که ذرات معلق پساب سبب افزایش نگهداشت رطوبت خاک در مکش‌های بالا شده در حالی‌که لجن فاضلاب علاوه بر این نتیجه افزایش ذخیره رطوبت در نقطه ظرفیت زراعی را نیز موجب شده است.

نتیجه‌گیری

این مطالعه با هدف بررسی اثرات لجن فاضلاب و مواد معلق پساب فاضلاب بر ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی

خاک به‌صورت مروری انجام گرفت. طبق نتایج، کاربرد پساب فاضلاب در طولانی مدت به‌دلایل افزایش چگالی ظاهری و کاهش تخلخل، هدایت هیدرولیکی و نفوذپذیری نامناسب ارزیابی می‌گردد. با این وجود، بهبود وضعیت نقاط رطوبتی و حجم آب در دسترس گیاه از مزایای کاربرد پساب است. مطالعات انجام شده در زمینه لجن فاضلاب نشان از بهبود وضعیت فیزیکی و هیدرولیکی خاک شامل افزایش قطر خاکدانه، تسریع در فرایند خاکدانه‌سازی، کاهش چگالی ظاهری، افزایش خلل و فرج، بهبود هدایت هیدرولیکی و نفوذپذیری ارتقا سطوح جاذب رطوبت و افزایش رطوبت در دسترس گیاه داشت. اگرچه این مطالعه با هدف بررسی مواد معلق پساب بر ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی انجام گرفته اما، پساب‌ها بسته به منشأ آن‌ها دارای ترکیبات ناشناخته سمی، میکروبی نیز بوده که بررسی آن‌ها به‌جهت اثرگذاری بر سلامت خاک، محیط‌زیست و منابع آب زیرزمینی و سطحی الزام‌آور است. به‌علاوه، لجن فاضلاب نیز به‌رغم اثرات مثبت در تغذیه و اصلاح خاک، دارای ترکیبات آلی و غیر آلی زیادی بوده که احتمال آلودگی محصولات کشاورزی و منابع آب و خاک را افزایش می‌دهد. لذا، پیشنهاد می‌شود جنبه‌های مختلف اثرگذاری پساب و لجن فاضلاب بر خصوصیات شیمیایی و جمعیت میکروبی خاک نیز مورد بررسی واقع گردد.

منابع

Abedi-Koupai, J., Mostafazadeh-Fard, B., Afyuni, M. & Bagheri, M.R. (2006). Effect of treated wastewater on soil chemical and physical properties in an arid region. Plant, *Soil and Environment*, 52(8), 335–344.

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.

Afkhami, M., Amiri, F. & Tabatabaie, T. (2021). Effect of irrigation with treated wastewater on lead and cadmium accumulations in soil and sweet pepper plant. *Iranian Journal of Health and Environment*, 14(1), 99-114. [In Persian]

Angeles, S.M. & Londra, P.A. (2000). Effect of compost produced from town wastes and sewage sludge on the Physical Properties of a Lomy and Clay soil. *Bioresource Technology*, 71, 235-259.

Ahn, H.-S. & Jo, H.Y. (2009). Influence of exchangeable cations on hydraulic conductivity of compacted bentonite. *Applied Clay Science*, 44, 144–150.

Aiello, R., Cirelli, G.L. & Consoli, S. (2007). Effects of reclaimed wastewater irrigation on soil and tomato fruits: A case study in Sicily (Italy). *Journal of Agricultural Water Management*, 93, 65-72.

Angers, D.A., & Mehuys, G.R. (1989). Effects of cropping on carbohydrate content and water-stable aggregation of a clay soil. *Canadian Journal of Soil Science*, 69(2), 373-380.

Aringhieri, R. & Sequi, P. 1979. The arrangement of organic matter in a soil crumb. In: W.W. Emperson, R. D. Bond. and A. R. Dexter (Ede.) Modification of Soil Structure. *Wiley, NewYork*, 435p.

Asghari, S. (2011). Effects of Tabriz Petrochemical Sewage Sludge on Organic Carbon, Aggregate Stability Indices and Consistency Limits of a Semiarid Soil. *Water and Soil*, 25(3), 530-539. [In Persian]

Ayers, R. S. & Westcot, D. W. (1985). Water-Quality for Agriculture. Rev. I, F.A.O., Rome. 174p.

Bahremand, M. R., M. Afyuni, M. A. Hajabbassi, Y. Rezaeinejad. (2003). Effect of Sewage Sludge on Soil Physical Properties. *Journal of Crop Production and Processing*, 6(4), 1-9. [In Persian]

Balks, M.R., McLay, C.D.A. & Harfoot, C.G. (1997). Determination of the progression in soil microbial response, and changes in soil permeability, following application of meat processing effluent to soil. *Applied Soil Ecology*, 6, 109-116.

Baveye, P., Vandevivere, P., Hoyle, B.L, DeLeo, P.C. & deLozada, D.S. (1998). Environmental impact and mechanisms of the biological clogging of saturated soils and aquifer materials. Critical Review. *Environmental Science and Technology*, 28, 123-191.

Bear, M.H., Hendrix, P. F., & Coleman, D.C. (1994). Water stable aggregates and organic carbon fractions in conventional and no-tillage soils. *Soil Science of Society American Journal*, 58(3), 777-786.

Berend, J.E. (1967). An analytical approach to the clogging effect of suspended matter. *International Association of Scientific Hydrology*. *Bulletin*, 12, 42–55.

Bhangoo, M.S., Day, K.S., Sudangunta, V.R. & Petrucci, V.E. (1988). Application of poultry manure influences Thompson seedless grape production and soil properties. *Horticultural Science*, 23, 1010-1012.

Bhardwaj, A.K., Mandal, U.K., Bar-Tal, A., Gilboa, G. & Levy, G.J. (2007). Replacing saline-sodic irrigation water with treated wastewater: effects on saturated hydraulic conductivity, slaking, and swelling. *Irrigation Science*, 26, 139–146.

Fatholomi, S., & Asghari, S. (2015). Effects of Ardabil Municipal Sewage Sludge on Some Physical and Hydraulic Properties of a Coarse-Textured Soil under Wheat Cultivation. *Water and Soil Science*, 24(4), 169-183.

Filizola, H. F., de Souza, M. D., Gomes, M. A. F., & Boeira, R. C. (2006). Aspectos físicos de um solo tratado com lodo de esgoto: estabilidade de agregados e argila dispersa em água.

Frankenberger, W.T., Troeh, F.R., & Dumenil, L.C. (1979). Bacterial effects on hydraulic conductivity of soils. *Soil Science Society of America Journal*, 43, 333-338.

Frenkel, H., Goortzen, J. O. & Rhoades, J. D. (1978). Effects of clay type and content, exchangeable sodium percentage, and electrolyte concentration on clay dispersion and soil hydraulic conductivity. *Soil Science Society of America Journal*, 42(1), 32–39.

Fu, H., Wang, Y.M., Zhou, Z.Y., Zhang, H.R., Li, X.R. & Zou, X.J. (2002). Studies on effects of application of sewage sludge on alfalfa. I. Effects on physical and chemical characteristic, and element accumulation of the soil, Acta Prataculturae Sinica, 11, 57-61.

Giusquianni, P.L., Pagliai, M., Gigliotti, G., Businelli, D. & Benetti, A. (1995). Urban waste compost: Effects on physical, chemical, and biochemical soil properties. *Journal of Environmental Quality*, 24(1), 175-182.

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

Glinski, J., Horabik, J. & Lipiec, J. (2011). Encyclopedia of Agrophysics. Springer. pp.403-407.

Gollany, H.T., Schumacher, T.E., Evenson, P.D. & Lindstrom, M.J. (1991). Aggregate stability of an eroded and resurfaced typic agriustoll. *Soil Science Society of America Journal*, 55, 811-816.

Gupta, R.P. & Swartzendruber, D. (1962). Flow-associated reduction in the hydraulic conductivity of quartz sand. *Soil Science Society of America*, Proceedings, 26, 6-10. Gupta, S.C., Dowday, R.H. & Larson, W.E. (1977). Hydraulic and thermal properties of soil influenced by incorporation of sewage sludge. *Soil Science Society of America Journal*, 41, 601-605.

Halliwell, D.J., Barlow, K.M. & Nash, D.M. (2001). A review of the effects of wastewater sodium on soil physical properties and their implications for irrigation systems. *Australian Journal of Soil Research*, 39, 1259–1267.

HassanOghli, A., Mirabzadeh, M. & Liaqat, A.M. (2002). Use of domestic sewage and house sewage in irrigation of crops and artificial feeding of underground water tables. PhD Thesis, Faculty of Agriculture, University of Tehran. [In Persian]

Boeira R.C. & de Souza M.D. (2007). Estoques de carbono orgˆanico e de nitrog´enio, pH e densidade de umlatossolo ap´ os trˆes aplicac¸ ˜oes de lodos de esgoto. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo*, 31(3), 581–590.

Bouwer, H., & Chaney, R.L. (1974). Land treatment of wastewater. *Advances in Agronomy*, 26, 133-176.

Bouzaiane, O., Cherif, H., Saidi, N., Jedidi, N. & Hassen, A. (2007). Effects of municipal solid waste municipal solid waste application on the microbial biomass of cultivated and non-cultivated soil in a semi-arid zone. *Waste Management & Research*, 25, 334–342.

Carman, PC. (1937). Fluid Flow Through Granular Beds. *Transactions of the Institution of Chemical Engineers*. 15, 150.

Catroux, G., L'hermite, P., & Suess, E. (Eds.). (2012). *The Influence of Sewage Sludge Application on Physical and Biological Properties of Soils: Proceedings of a Seminar Organized Jointly by the Commission of the European Communities, Directorate-General for Science, Research and Development and the Bayerische Landesanstalt Für Bodenkultur und Pflanzenbau, Munich, Federal Republic of Germany, Held in Munich, June 23-24, 1981*. Springer Science & Business Media.

Chen, Y., & Avnimelech, Y. (1986). The Role of Organic Matter in Modern Agriculture, first edition, Martinus Nijhoff, Netherlands, 320 p.

Clapp, C.E., Stark, S.A., Clay, D.E. & Larson, W.E. (1986). Sewage sludge organic matter and soil properties. In: Chen, Y. & Avnimelech, Y. (Eds.), The Role of Organic Matter in Modern Agriculture. Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht, The Netherlands, pp. 209–253.

Dawes, L., & Goonetilleke, A. (2004). Assessing changes in soil physical and chemical properties under long-term effluent disposal. In *On-Site Wastewater Treatment X, 21-24 March 2004* (p. 1). American Society of Agricultural and Biological Engineers.

De Jong, R. (1983). Soil water desorption curves estimated from limited data. *Canadian Journal of Soil Science*, 63, 697–703.

Dexter, A.R., Czyz, E.A. & Gate, O.P. (2004). Soil structure and the saturated hydraulic conductivity of subsoils. *Soil & Tillage Research*, 79, 185–189.

Ehsani, M., Khalidi, H. & Rahimi, H. (2015). Improving agricultural water productivity to ensure the country's water and food security. *Quarterly Journal of the Academy of Sciences*, [In Persian]

Epstein, E. (1975). Effect of sewage sludge on some soil physical properties. *Journal of Environmental Quality*, 4(2), 139-142.

FAOSTAT. (2005). FAOSTAT statistical database. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations. Available at www.faostat.fao.org.

aggregates and hydraulic conductivity of soil. *European Journal of Soil Science*, 47, 43–50.

Lindsay, B. J., & Logan, T. J. (1998). *Field response of soil physical properties to sewage sludge* (Vol. 27, No. 3, pp. 534-542). American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America.

Logon, T.J. & Billite, J. (1998). Field response of soil physical properties to sewage sludge. *Journal of Environmental Quality*. 27, 534-542.

Macedo, J.R., Filizola, H.F., Souza, M.D. & Reichardt, K. (2006). Micromorfologia da camada superficial de solo tratado com lodo de esgoto. in Lodo de Esgoto: Impactos Ambientais naAgricultura, Bettiol, W. & Camargo, O.A., Eds., pp. 149–164, Embrapa Meio Ambiente, Jaguari ´una, Brazil.

Magesan, G.N. (2001). Changes in soil physical properties following irrigation of municipal wastewater on two forested soils. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 31, 188-195.

Magesan, G.N., Williamson, J.C., Sparling, G.P., Schipper, L.A. & Lloyd-Jones, A.Rh. (1999). Decreased hydraulic conductivity in soils irrigated with wastewater field and laboratory studies. *Australian Journal of Soil Research*, 37, 391-402.

Magesan, G.N., Williamson, J.C., Yeates, G.W. and Lloyd-Jones, A.Rh. (2000). Wastewater C: N ratio effects on soil hydraulic conductivity and potential mechanisms for recovery. *Bioresource Technology*, 71: 21-27.

Mahida, N.U. (1981). Water Pollution and Disposal of Wastewater on Land. Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, New Delhi, 325 p.

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

Martens, D.A. & Frankenberg, W.T. (1992). Effect of organic amendment on water infiltration and soil properties of n irrigated soil. *Agronomy Journal*, 82, 707-717.

Masoudiashtiani, S., Parsinejad, M., & abbasi, F. (2011). Effect of Applying Urban Wastewater in Irrigation of Sorghum on Some Soil Physical Properties. *Iranian Journal of Soil Research*, 25(3), 243-253. [In Persian]

Mathan, K.K. (1994). Studies of the influence of long-term municipal sewage-effluent irrigation on soil physical properties. *Bioresource Technology*. 48(3), 275-276.

Mays, D.A., Treman, G.L. & Duggan, J.C. (1973). Municipal compost: effect on yield and soil properties. *Journal of Environmental Quality*, 2, 81-89.

McAuliffe K.W., Scotter D.R., McGregor A.N. & Earl K.D. (1982): Casein whey wastewater effects on soil permeability. *Journal of Environmental Quality*, 11, 31–34.

Illera, V., Walter, I., Cuevas, G., & Cala, V. (1999). Biosolid and municipal solid waste affect on physical and chemical properties of degraded soil. *Agrochimica* 43, 178–186.

Islam, M.R., Alamgir, M., Mohiuddin, K.M. & Hasan, K.M.M. (2008). Investigation of physical properties of a selected soil to use as a compacted clay liner in a sanitary landfill. Proceedings of the National Seminar on Solid Waste Management – WasteSafe 2008, Khulna, Bangladesh, pp. 167-174.

Islamian, S.S., Hajarzadeh, B., Gohri, S.A. & Zareian, M.J. (2007). The effect of using sewage effluent in agricultural soils of Najaf Abad city. 10th Congress of Soil Sciences of Iran, Karaj, January 2007.

Khaleel, R., Reddy, K.R., & Overcash, M.R. (1981). Changes in soil physical properties due to organic waste applications: A review. *Journal of Environmental Quality*. 10(2), 133-141.

Kladivko, E.J., & Nelson, D.W. (1979) Changes in soil properties from application of anaerobic sludge. *Journal of Water Pollution Control Federation*, 51, 325–332.

Koutika, L.S., Bartoli, F., Andreux, F., Cerri, C. C., Burtin, G., Chone, Th. & Philippy, R. (1997). Organic matter dynamics and aggregation in soils under rain forest and pastures of increasing age in the eastern Amazon Basin. *Geoderma*, 76, 87–112.

Kristiansen, R. (1981). Sand-filter trenches for purification of septic tank e.uent: I. The clogging mechanism and soil physical environment. *Journal of Environmental Quality*, 10, 353-357.

Kumar, S., Malik, R.S. & Dahiya, I.S. (1985). Influence of different organic wastes upon water retention, transmission, and contact characteristics of sandy soil. *Australian Journal of Soil Research*, 23, 131–136.

Levy, G.J., & Mamedov, A.I. (2002). High-Energy-Moisture-Characteristics aggregate stability as a predictor for seal formation. *Soil Science Society of America Journal*, 66, 1603–1609.

Levy, G. J., Goldstein, D., Trachitzky, J., & Chen, Y. (2006). Combined effects of irrigation with treated wastewater and tillage on soil structural stability. *Final report submitted to the Chief Scientist, Ministry of Agriculture, State of Israel (in Hebrew).*

Levy, G. J., Mamedov, A.I. & Goldstein, D. (2003). Sodicity and water quality effects on slaking of aggregates from semi-arid soils. *Soil Science*, 168, 552–562.

Levy, G.J., Rosenthal, A., Shainberg, I., Tarchitzky, J., & Chen, Y. (1999). Soil hydraulic conductivity changes are caused by irrigation with reclaimed wastewater. *Journal of Environmental Quality*, 28, 1658-1664.

Lieffering R.E., McLay C.D.A. (1996): The effects of strong hydroxide solutions on the stability of

C.E., Larson, W.E., & Dowdy, R.H., Eds. Sewage Sludge: *land utilization and the environment*. American Society of Agronomy, Inc., Crop Science Society of America, Inc., *Soil Science Society of America*, Inc. Madison, WI. pp. 3–6.

Pagliai, M., Guide, G., Marca, M., Giachetti, M., & Lucament, G. (1981). Effects of sewage sludge and compost on soil porosity and aggregation. *Journal of Environmental Quality*, 4 (1), 556-561.

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

Pal, S., Patel, N., Malik, A., Sharma, A., Pal, U., Rosin, K.G., & Singh, D.K. (2023). Eco-friendly treatment of wastewater and its impact on soil and vegetables using flood and micro-irrigation. *Agricultural Water Management*, 275, 108025.

Perfect, E., Kay, B.D., Vanloon, W.K.P., Sheard, R.W. & Pojasok, T. (1990). Factors influencing soil structural stability of moist aggregate. *Canadian Journal of Soil Science*, 70, 33-42.

RahimiAlashti, S., Bahmanyar, M.A., Ghajarspanloo, M. (2012). The effects of sewage sludge application on pH, EC, O.C, Pb, and Cd in soil and lettuce and radish plants. *Journal of Water and Soil Conservation*, 18(3), 133-149. [In Persian]

Ramulu, U.S.S. (2002) Reuse of Municipal Sewage and Sludge in Agriculture. Scientific Publishers, Jodhpur India, 342 p.

Rohani Shahraki, F., Mahdavi, R., & Rezaee, M. (2005). Effect of Irrigation with Wastewater on Certain Soil Physical and Chemical Properties. *Journal of Water and Wastewater (Ab va Fazilab)*, 16(1), 23-29. [In Persian]

Rostagno, C.M. & Sosebee, R.E. (2001). Surface application of biosolids in the Chihuahuan Desert: Effects on soil physical properties. *Arid Land Research and Management*, 15, 233–244.

Saadat, K., Barani Motlagh, M., Dordipour, A., & Ghasemnezhad, A. (2013). Influence of sewage sludge on some soil properties, yield, and concentration of lead and cadmium in roots and Shoots of Maize. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 2(2), 27-48. [In Persian]

Saber, M.S.M. (1986). Prolonged Effect of Land Disposal of Human Wastes on Soil Conditions. *Water Science and Technology*, 18, 371-374.

Safari, Y. (2023). Review of food security indices in Iran and the forgotten role of soil. *Land Management Journal*, 11(1), 15-29. [In Persian]

Schaefer, C. (1999). The application of sewage sludge for soil remediation. Restoration and reclamation review, *A Student on-line Journal*, 5(3), 1-7.

Scheidegger, A.E. (1960). The Physics of Flow Through Porous Media. The Macmillan Company, NY, 372 p.

McCalla, T.M. (1950). Studies on the effect of microorganisms on the rate of percolation of water through soils. *Soil Science Society of America, Proceeding.* 15, 182-186.

Melo, V., Beutler, A.N., Souza, Z.M., Centurión, J.F. & Melo, W.J. (2004). Physical attributes of oxisols fertilized over five years with biosolids. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, 39, 67–72.

Mojiri, A. (2011). Effects of Municipal Wastewater on Physical and Chemical Properties of Saline Soil. *Journal of Biological & Environmental Sciences*, 5(14), 71-76.

Mollahoseini, H. (2013). Long-term effects of municipal wastewater irrigation on some properties of a semiarid region soil of Iran. International *Journal of Agronomy and Plant Production*, 4 (5), 1023-1028.

Morel, J.L., & Guckert, A. (1983). The Influence of Sludge Application on Physical and Biological Properties of Soils. 1st Ed., Dordrecht, Holland, 262 p.

Mullins, C.E., Mcleod, D.A., Northcote, K.H., Tisdall, J.M. & Young, I.M. (1990). Hardsetting soils: behavior, occurrence and management. *Advances in Soil Science*, 11, 37-108.

Nakano, K. & Miyazaki, T. (2005). Predicting the saturated hydraulic conductivity of compacted subsoils using the non-similar media concept. *Soil & Tillage Research*, 84, 145–153.

Nevo, Z., & Mitchell, K. (1967): Factors affecting biological clogging of sand associated with groundwater recharge. *Water Research*, 1, 231–236.

Nicolas, C., Kennedy, J.N., Hernandez, T., Garcia, C. & Six, J. (2014). Soil aggregation in a semiarid soil amended with composted and non-composted sewage sludge-A field experiment. *Geoderma*, 219–220 (2014), 24–31.

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

Ojeda, G., Perfect, E., Alcañiz, J.M. & Ortiz, O. (2006). Fractal analysis of soil water hysteresis as influenced by sewage sludge application. *Geoderma*, 134, 386–401.

Ojeda, G. & Alcañiz, J.M. (2010) Soil water retention under drying process in a soil amended with composted and thermally dried sewage sludges. 19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World, 1–6 August 2010, Brisbane, Australia. Published on DVD.

Ojeda, G., Alcañiz, J.M., & Ortiz, O., (2003). Runoff and losses by erosion in soils amended with sewage sludge. *Land Degradation & Development*, 14, 563–573.

Page, A.L., & Chang, A.C. (1994). Overview of the Past 25 years: Technical Perspective. In Clapp,

Chemical Properties. *Journal of Water and Wastewater (Ab va Fazilab)*, 53, 15-22. (In Persian)
Vinten, A.J.A., Minelgrin, U. & Yaron, B. (1983). The effect of suspended solids in wastewater on soil hydraulic conductivity: II. Vertical distribution of suspended solids. *Soil Science Society of America Journal*, 47, 408-412.
Vivani, G., & Lovino, M. (2004). Wastewater reuse effects on soil hydraulic conductivity. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 130(6), 476–484.
Wysocka, A., Stępniewski, W. & Horn, R. (2007). Swelling-shrinkage properties and hydraulic conductivity of a compacted coal mine tailing rock likely to be used for landfill capping. *International Agrophysics*, 21, 405-408.
Xanthoulis, D. & Wallender, W.W. (1991). Furrow Infiltration and Design with Cannery Wastewater. *Transactions of ASABE*, 34(6), 2390-2396.
Yeates, G.W. (1995). Effect of sewage effluent on soil fauna in a Pinus-radiata plantation. *Australian Journal of Soil Research*, 33, 555-564.
Zadhosh, A. & Fardad, H. (1996). Investigating the effects of irrigation with wastewater on soil and plants. Master's thesis, Faculty of Agriculture, University of Tehran. [In Persian]
Zhang, S., Grip, H. & Lovdahl, L. (2006). Effect of soil compaction on hydraulic properties of two loess soils in China. *Soil & Tillage Research*, 90, 117–125.
Shahbazi, F., Ghasemi, S., Sodaeizadeh, H., Pourdara, H., & Ayaseh, K. (2018). The Effects of Sewage Sludge on Some Physical and Chemical Properties of Soil and Wheat Yield. *Water and Soil Science*, 28(2), 193-206. [In Persian]
Shirani H., Hajabbasi M.A., Afyuni M., & Hemmat A. (2002). Effect of farmyard and tillage systems on soil physical properties and corn yield in central Iran. *Soil & Tillage Research*, 68, 101-108.
Shirani, H., HajAbbasi, M., Afyouni, M., & Dashti, H. (2010). Cumulative Effects of Sewage Sludge on Soil Physical and Chemical Characteristics. *Journal of Water and Wastewater (Ab va Fazilab)*, 21(3), 28-36. [In Persian]
Siegrist, R.L. (1987). Soil clogging during subsurface wastewater infiltration is affected by e.uent composition and loading rate. *Journal of Environmental Quality*, 16, 181-187.
So, H.B., & Aylmore, L.A.G. (1993). How do sodic soils behave? The effects of sodicity on soil physical behavior. *Australian Journal of Soil Research*, 31, 761–777.
Sort, X. & Alcañiz, J.M. (1999). Effects of sewage sludge amendment on soil aggregation. *Land Degradation and Development*, 10, 3–12.
Staub, M., Laurent, J.P., Morra C. & Gourc, J.P. (2009). TDR calibration in MSW is affected by material effects and moisture distribution. LTHE, University of Grenoble, BP 53-38041 Grenoble Cedex, France, pp.1-10.
Taqvaian, S., Alizadeh, A. & Danesh, Sh. (2007). The effect of using wastewater on the physical and chemical properties of soil. *Journal of Irrigation and Drainage*, 1(1), 49-60. [In Persian]
Tarchitzky, J., Chen, Y., & Banin, A. (1993). Humic substances and pH effects on sodium and calcium montmorillonite flocculation and dispersion. *Soil Science Society of America Journal*, 52, 1449–1452.
Tester, C.F. (1990). Organic amendment effects on physical and chemical properties of sandy soil. *Soil Science Society of America Journal*, 54 (1), 827-831.
Thomas R.E., Schwartz W.A. & Benedixen T.W. (1966). Soil chemical changes and infiltration rate reduction under sewerage spreading. *Soil Science Society of America.* Proceeding, 30, 641–646.
Tsadilas, C.D., Mitsios, I.K. & Golia, E. (2005). Influence of biosolids application on some soil physical properties. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 36, 709–716.
Vandevivere, P. & Baveye, P. (1992). Saturated hydraulic conductivity reduction caused by aerobic bacteria in sand columns. *Soil Science Society of America Journal*, 56, 1-13.
Vaseghi, S., Afyuni, M., Shariatmadari, H. & Mobli, M. (2005). Effect of Sewage Sludge on Some Macronutrient Concentration and Soil