Research Paper

Print ISSN: 2251-7480
Online ISSN: 2251-7400

Journal of
Water and Soil Resources Conservation (WSRCJ)

Web site:
https://wsrcj.srbiau.ac.ir

Email:
iauwsrcj@srbiau.ac.ir
iauwsrcj@gmail.com

Vol. 14
No. 4 (56)

Received:
2024-02-18

Accepted:
2024-12-08

Pages: 131-142

Effect of Municipal Sewage Wastewater on Some Soil Hydraulic Properties

Mohsen Dehqani[1*] and Parisa Mashayekhi[2]

1) Assistance Professor, Soil and Water Research Department, Isfahan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Isfahan, Iran.
2) Assistance Professor, Soil and Water Research Department, Isfahan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Isfahan, Iran.
*Corresponding author email: mdehqani@gmail.com

Abstract:

Background and Aim: Due to the quantitative and qualitative reduction of the country's water resources and the droughts of the last few years, the use of effluents and sewage by farmers to irrigate fields and gardens has been considered. This research was conducted in order to investigate the effect of irrigation with urban sewage effluent on some physical and hydraulic characteristics of soil in the northern region of Isfahan. Soil hydraulic parameters, such as infiltration is very important in the optimal management of furrow irrigation, and its measurement is necessary for these farms.

Method: This research using urban sewage effluent and in the form of a factorial statistical design based on a completely randomized block with three levels of irrigation treatment (irrigation with wastewater treatment plant effluent, intermittent irrigation with effluent and well water, and irrigation with well water) in the region North of Isfahan, was done.

Results:Different irrigation treatments had no significant effect on the amount of soil moisture in crop capacity (FC) and permanent wilting point (PWP). The amount of apparent specific gravity was significantly increased at the level of 1% in the irrigation treatment with well water and decreased in the irrigation treatment with wastewater. The hydraulic conductivity measured in the irrigation treatment with effluent was about 20% higher than the irrigation treatment with well water. Also, the greatest amount of difference between advance and retreat time was in the treatment of irrigation with wastewater (68.4 minutes) and the lowest was related to irrigation with well water (50.8 minutes). It showed that the chance of water infiltration into the soil was greater in the wastewater treatment than in the treatment irrigated with well water. The general trend of the coefficients of the Kostiakov-Lewis infiltration equation in the treatment of well water was a decrease (about 58 and 60% for k and a coefficients, respectively). The highest amount of average cumulative infiltration was related to wastewater and the lowest amount was related to periodic treatment. The rate of water infiltration into the soil in the effluent irrigation treatment was about 0.001 m/min and in the well water irrigation treatment was about 0.0008 m/min, which is approximately equivalent to a 73% decrease in infiltration rate.

Conclusion: Based on the results obtained from this research, the effect of irrigation with wastewater and well water on different physical characteristics of the soil depends to a large extent on the chemical characteristics of the well water and wastewater and the basic nature of the wastewater. The existing sodium ion caused the destruction of the soil structure and the blockage of coarse pores, and in general, it caused the volume of voids and pores in the soil to decrease and become denser, and finally, the apparent specific gravity of the soil increased. The reason for this can be attributed to the increase in soil organic matter as a result of wastewater consumption, as well as the increase in soil calcium and magnesium concentration, the increase in soil microbial activity and the improvement of soil structure.

Keywords: Infiltration, Surface Irrigation, Wastewater

مقاله پژوهشی

نشریه حفاظت منابع آب و خاک

شاپا چاپی: ۷۴۸۰-۲۲۵۱
شاپا الکترونیکی: ۷۴۰۰-۲۲۵۰

نشریه حفاظت منابع آب و خاک

آدرس تارنما:
https://wsrcj.srbiau.ac.ir

پست الکترونیک:
iauwsrcj@srbiau.ac.ir
iauwsrcj@gmail.com

سال چهاردهم
شماره ٤ (٥٦)

تاریخ دریافت:
۱۴۰۲/۱۱/۲۹

تاریخ پذیرش:
۱۴۰۳/۰۹/۱۸

صفحات: ۱۴۲-۱۳۱

بررسی تأثیر پساب فاضلاب شهری بر برخی ویژگی‌های هیدرولیکی خاک

محسن دهقانی[1]* و پریسا مشایخی[2]

۱) استادیار، بخش تحقیقات خاک و آب مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اصفهان، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی اصفهان، ایران.
۲) استادیار، بخش تحقیقات خاک و آب مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اصفهان، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی اصفهان، ایران.
* ایمیل نویسنده مسئول: mdehqani@gmail.com

چکیده:

زمینه و هدف: با توجه به کاهش کمّی و کیفی منابع آب کشور و خشکسالی‌های چند سال اخیر، استفاده از پساب‌ها و فاضلاب‌ها از سوی کشاورزان به‌منظور آبیاری مزارع و باغات مورد توجه قرار گرفته است. این پژوهش به‌منظور بررسی تأثیر آبیاری با پساب فاضلاب شهری بر برخی ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی خاک در منطقه شمال اصفهان انجام گردید. پارامترهای هیدرولیکی خاک از جمله سرعت نفوذ آب در خاک اهمیت زیادی در مدیریت بهینه آبیاری جویچه‌ای دارد و اندازه‌گیری آن برای این مزارع ضروری است.

روش پژوهش: این پژوهش با استفاده از پساب فاضلاب شهری و به‌صورت طرح آماری فاکتوریل با پایه بلوک کاملاً تصادفی با سه سطح تیمار آبیاری (آبیاری با پساب خروجی تصفیه‌خانه فاضلاب، آبیاری به‌صورت تناوبی با پساب و آب چاه و آبیاری با آب چاه)، در منطقه شمال اصفهان، صورت گردید.

یافته‌ها: تیمارهای مختلف آبی تأثیر معنی‌داری بر روی میزان رطوبت خاک در ظرفیت زراعی (FC[1]) و نقطه پژمردگی دایم گیاه (PWP[2]) نداشتند. مقدار وزن مخصوص ظاهری به‌صورت معنی‌دار در سطح یک درصد، در تیمار آبیاری با آب چاه افزایش و در تیمار آبیاری با پساب کاهش یافت. میزان هدایت هیدرولیکی اندازه‌گیری شده در تیمار آبیاری با پساب در حدود ۲۰ درصد بیش‌تر از تیمار آبیاری با آب چاه بود. همچنین بیش‌ترین میزان اختلاف بین زمان پیشروی و پسروی در تیمار آبیاری با پساب (۶۸/۴ دقیقه) و کم‌ترین آن مربوط به آبیاری با آب چاه (۵۰/۸ دقیقه) بود. نشان داد فرصت نفوذ آب به خاک در تیمار پساب بیش‌تر از تیمار آبیاری شده با آب چاه بوده است. روند کلی ضرایب معادله نفوذ کوستیاکوف-لوییس در تیمار آب چاه نسبت به پساب کاهشی بود (به ترتیب حدود ۵۸ و ۶۰ درصد برای ضرایب k و a). بیش-ترین میزان میانگین نفوذ تجمعی مربوط به پساب و کم‌ترین مقدار مربوط به تیمار تناوبی بود. میزان سرعت نفوذ آب به خاک در تیمار آبیاری با پساب در حدود ۰/۰۰۱ متر بر دقیقه و در تیمار آبیاری با آب چاه در حدود ۰/۰۰۰۸ متر بر دقیقه بود که تقریباً معادل ۷۳ درصد کاهش در سرعت نفوذ می‌باشد.

نتایج: براساس نتایج به‌دست آمده از این پژوهش، تاثیر آبیاری با پساب و آب چاه بر ویژگی‌های مختلف فیزیکی خاک، تا حد زیادی به ویژگی‌های شیمیایی آب چاه و پساب و ماهیت اولیه پساب بستگی دارد. یون سدیم موجود باعث تخریب ساختمان خاک و انسداد منافذ درشت شده و در کل باعث کم شدن حجم خلل و فرج موجود در خاک و متراکم‌تر شدن آن و در نهایت افزایش وزن مخصوص ظاهری در خاک شد. میزان هدایت هیدرولیکی اندازه‌گیری‌شده در تیمار آبیاری با پساب بیش‌تر از تیمار آبیاری با آب چاه بود. علت این امر را می‌توان به افزایش مواد آلی خاک در اثر مصرف پساب و نیز افزایش غلظت کلسیم و منیزیم خاک، افزایش فعالیت میکروبی خاک و بهبود ساختمان خاک نسبت داد.

کلید واژه‌ها: آبیاری سطحی، پساب، نفوذ

[1] Field capacity
[2] Permanent wilting point

مقدمه

در سال‌های اخیر، با توجه به رشد جمعیت جهانی و صنعتی شدن جوامع، بحران کمبود آب شیرین به یکی از چالش‌های اصلی قرن حاضر تبدیل شده است. به موازات این چالش، حجم تولید پساب‌های شهری نیز به طور قابل توجهی افزایش یافته است. در این راستا استفاده مجدد از پساب تصفیه‌شده به عنوان یک منبع آبیاری، به ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، به عنوان یک راهکار موثر برای مدیریت پایدار منابع آب مطرح شده است. استان اصفهان به عنوان یکی از قطب‌های صنعتی و کشاورزی کشور، با چالش جدی کمبود آب مواجه است. کاهش شدید بارندگی در سال‌های اخیر، کاهش ذخایر آب‌های زیرزمینی و افزایش تقاضا برای آب در بخش‌های مختلف، این استان را به یکی از مناطق بحرانی از نظر منابع آبی تبدیل کرده است. با این حال، استفاده از پساب می‌تواند بر ساختار و عملکرد خاک تأثیرگذار باشد. تغییرات در خواص هیدرولیکی خاک ناشی از کاربرد پساب، می‌تواند بر فرآیندهای مهمی همچون نفوذ، زهکشی و ظرفیت نگهداری آب تأثیر گذاشته و در نهایت بر حاصلخیزی خاک، کیفیت آب‌های زیرزمینی و پایداری اکوسیستم‌ها اثرگذار باشد. از این رو، درک دقیق مکانیسم‌های تأثیر پساب بر خاک و توسعه راهکارهای مدیریت بهینه این منبع آبی، برای تضمین امنیت غذایی و پایداری محیط زیست در سطح جهانی ضروری است.

پژوهش‌های مختلف نشان داد که کاربرد فاضلاب تصفیه شده به عنوان منبع آبیاری، با بهبود ساختار خاک از طریق افزایش تخلخل، نفوذپذیری و ایجاد ساختمان خاکی اسفنجی، منجر به ارتقای قابل توجه خواص فیزیکی خاک می‌گردد(Delibacak *et al*., 2009؛Aggelides and Londra , 2000 و Nadav *et al*., 2012) . در پژوهش انجام گرفته توسط عامری و یزدان‌پناه(۱۳۹۱)، تأثیر نسبت‌های مختلف استفاده از پساب شهری در آبیاری بر برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، بررسی شد و نتایج نشان داد که شوری، pH و کربن آلی خاک با افزایش مدت زمان آبیاری در خاک افزایش یافتند. همچنین هدایت هیدرولیکی خاک در تیمار آبیاری با پساب به میزان قابل توجهی نسبت به آب چاه افزایش داشت. همچنین مشخص شد که مصرف پساب تصفیه شده فاضلاب به عنوان یکی از منابع آبهای غیر متعارف، علیرغم افزایش شوری، می‌تواند باعث افزایش ذخیره کربن آلی خاک و در نتیجه بهبود وضعیت نفوذپزیری آن شود. فرمانیفرد و همکاران(۱۳۹۵) با بررسی تأثیر آبیاری بلند مدت با فاضلاب تصفیه شده شهری کرمانشاه بر برخی ویژگی‌های فیزیکی خاک، به این نتیجه رسیدند که مقادیر اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی اشباع خاک اراضی تحت آبیاری با پساب نسبت به آب چاه، هدایت هیدرولیکی خاک را به صورت قابل ملاحظه‌ای افزایش داد (۱۰۹٪ در عمق ۰ تا ۳۰ سانتی‌متر). همچنین بکارگیری پساب باعث افزایش محتوای رطوبتی خاک در نقاط ظرفیت زراعی و پژمردگی دائم شد، اما مقدار آب در دسترس را کاهش داد. در پژوهش انجام شده توسط خدادادی و همکاران(۱۳۹۳) در منطقه زرین‌شهر لنجان (استان اصفهان) آبیاری با این نوع پساب‌ها به مدت هشت سال، افزایش جرم مخصوص ظاهری خاک، کاهش قابل توجه هدایت هیدرولیکی و نفوذپذیری، و تغییر شکل منحنی رطوبتی خاک به سمت دوکوهانگی را به همراه داشت. این پژوهشگران دلیل این امر را در افزایش تراکم خاک و کاهش تخلخل آن در اثر ورود مواد جامد و آلی به خاک گزارش نمودند. کابوسی (۱۳۹۲) افزایش نفوذپذیری خاک را در اثر آبیاری با پساب فاضلاب شهری را به افزایش مواد آلی، کلسیم و منیزیم خاک، بهبود فعالیت میکروبی و توسعه سیستم ریشه‌ای نسبت داد. نتایج پژوهش‌های مختلف افزایش میزان نفوذپذیری خاک در اثر استفاده از پساب را در سطوح معنی‌دار نشان می‌دهد(Hanifeh Lu and Moazed, 2007 Gharbi ; *et al*., 2010). از طرفی پژوهشگران دیگری کاهش نفوذپذیری در اثر استفاده از پساب را بیان نمودند. آن‌ها علت کاهش نفوذپذیری را کیفیت فاضلاب، مواد معلق موجود در فاضلاب، افزایش سدیم و SAR زیاد، گرفتگی لایه سطحی خاک در اثر تغیرات شیمیایی و میکروبی و ایجاد سله در سطح خاک بیان نمودند(Alizadeh et al., 2001). در مطالعه انجام‌گرفته توسط یزدانی و همکاران(۱۳۹۲) اثر کاربرد تاثیر مصرف پساب تصفیه خانه مشهد بر برخی ویژگی‌های خاک بررسی شد. نتایج نشان داد با افزایش دفعات آبیاری با آب چاه و پساب، نفوذپذیری اولیه کاهش یافت که بخشی مربوط به تفاوت در رطوبت اولیه و بخشی در اثر به هم خوردگی ساختمان خاک و ایجاد سله در لایه سطحی خاک و وجود یون سدیم و مقدار SAR بود. همچنین در بررسی‌های انجام گرفته، افزایش ظرفیت نگهداری آب در لایه سطحی خاک(Loy et al., 2018) و نیز افزایش رطوبت خاک در نقاط ظرفیت زراعی و پژمردگی دائم در اثر آبیاری با پساب(Tunc and Sahin, 2015) گزارش شد.

در پژوهشی اثر ۱۵ سال آبیاری با فاضلاب بر ویژگی‌های هیدرولیکی یک خاک رسی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که در هر سه عمق مورد مطالعه شدت نفوذپذیری و هدایت هیدرولیکی در خاک تحت آبیاری با فاضلاب در مقایسه آبیاری با آب معمولی کمتر است (Assouline and Narkis, 2011). همچنین در بررسی انجام شده توسط حسن اوقلی و همکاران(۲۰۰۵)، میانگین هدایت هیدرولیکی اشباع خاک در لایسیمترهای مورد آبیاری با فاضلاب خام، بالاتر از میانگین آن در لایسیمترهای آبیاری شده با پساب تصفیه شده ثانویه و این

مورد نیز بالاتر از میـانگین هـدایت هیدرولیکی اشباع خاک در لایسیمترهای آبیاری شده با آب چاه بود. آبیاری با پساب می تواند با افزایش رسوب ذرات ریز، بافت خاک را تغییر داده و بر ظرفیت نگهداری آب و ویژگی های زهکشی خاک تأثیر بگذارد(Hasan et al., 2014). آیلو و همکاران (۲۰۰۷) نیز گزارش کردند که چگالی ظاهری خاک نیز می تواند تحت تأثیر آبیاری با پساب، به ویژه در لایه سطحی خاک قرار گیرد. تجمع مواد آلی و نمک ها می تواند چگالی ظاهری خاک را افزایش داده و باعث کاهش نفوذ ریشه و تهویه در خاک شوند.

در چند سال اخیر، خشکسالی و تخصیص آب زاینده‌رود به استان‌های مجاور و کاهش حق آبه کشاورزان سبب استفاده از پساب‌ها و فاضلاب‌ها از سوی کشاورزان گردیده است. از طرفی کاربرد فاضلاب و پساب آن به دلیل افزودن نمک‌ها و مواد معلق (آلی و معدنی) به خاک سبب می‌شود که ویژگی‌های شیمیایی، فیزیکی و هیدرولیکی خاک به مرور زمان دستخوش تغییرات قرار گیرد. از آنجائی‌که ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی خاک یک عامل مهم در کشاورزی و از عوامل تعیین‌کننده در برنامه ریزی آبیاری است؛ لذا آگاهی از تأثیر آبیاری با پساب بر ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی خاک به‌عنوان امری اجتناب‌ناپذیر در استفاده از آب‌های نامتعارف مطرح می-باشد. ضمن این‌که با انجام چنین مطالعاتی، می‌توان به درک بهتری از مکانیسم‌های تاثیرگذاری پساب بر خواص هیدرولیکی خاک دست یافت و در نتیجه، مدیریت بهینه استفاده از پساب در کشاورزی را تسهیل نمود. بنابراین پژوهش حاضر با هدف پژوهش بررسی تأثیر پساب فاضلاب شهری بر برخی از مهم‌ترین ویژگی‌های هیدرولیکی خاک در منطقه اصفهان صورت گرفت.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در سال زراعی ۹۸-۱۳۹۷ در یک مزرعه در مجاور تصفیه خانه فاضلاب شهری شمال شرق اصفهان اجرا شد. منطقه مورد بررسی در طول جغرافیایی ۵۱ درجه و ۴۵ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۲ درجه و ۴۵ دقیقه شمالی قرار داشت. این تحقیق به صورت طرح آماری فاکتوریل با پایه بلوک کاملاً تصادفی با سه سطح تیمار آبی (آبیاری با پساب خروجی تصفیه‌خانه فاضلاب و آبیاری به‌صورت تناوبی با پساب و آب چاه و آبیاری با آب چاه) در سه تکرار و چهار نوبت نمونه‌برداری انجام گردید.

در زمین مورد نظر، در ابتدا با استفاده از دوربین نقشه‌برداری شیب‌بندی زمین انجام گردید و جویچه‌ها ایجاد شد. فاصله پشته‌ها در جویچه‌های ایجاد شده ۷۵ سانتی متر و طول جویچه‌ها ۵۰ متر در نظر گرفته شد. در هر قطعه چهار مرتبه آبیاری با تیمارهای مورد نظر انجام گرفت. به منظور اندازه‌گیری دبی ورودی و خروجی و میزان نفوذ به زمین و تحت کنترل بودن شرایط آزمایش در ابتدا و انتهای جویچه‌ها فلوم‌ها کارگذاشته و تراز گردید. فلوم‌ها از تیپ WSC2 انتخاب گردید. به منظور اندازه‌گیری زمان پیشروی و پسروی فاصله بین فلوم‌ها توسط میخ چوبی به ده قسمت مساوی تقسیم شد. به منظور اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی خاک از هر مزرعه نمونه برداری به صورت نمونه دست‌نخورده در سه تکرار و بعد از انجام هر نوبت آبیاری (پس از رسیدن رطوبت خاک به حد تقریبی ظرفیت زراعی) انجام گردید. برای نمونه‌برداری از حلقه های فلزی با قطر داخلی 72 mm و ارتفاع 40 mm استفاده گردید. از نمونه‌های به‌دست آمده برای اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی خاک، وزن مخصوص ظاهری و حقیقی خاک، ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دائم استفاده گردید. به منظور بررسی اثر تیمارهای مختلف آبی بر ویژگی‌های شیمیایی خاک در هر مزرعه از عمق ۳۰-۰ سانتی‌متر و توسط اوگر نمونه‌برداری انجام گردید. در این پژوهش برای بررسی تاثیر پساب بر ویژگی‌های هیدرولیکی خاک، نفوذ، راندمان، پیشروی و پسروی در آبیاری جویچه‌ای از روش دو نقطه‌ای الیوت واکر (Elliott and Walker, 1982) استفاده شد. این روش با تعیین نفوذ پایه (f_0) از هیدروگراف دبی ورودی- خروجی، شروع می‌شود. سپس با استفاده از اندازه‌گیری سرعت پیشروی در دو نقطه وسط و انتهای جویچه پارامترهای معادله نفوذ تعیین می‌گردد. در اواخر آبیاری، خاک به سرعت نفوذ پایهf_0 رسیده است. f_0 را می توان از رابطه زیر به دست آورد.

رابطه ۱:

$$\mathbf{f_0}=\frac{Q_{in}-Q_{out}}{l}$$

که در آن، Q_{in} دبی هیدروگراف ورودی و Q_{out} دبی هیدروگراف خروجی و l طول جویچه می‌باشد.

آزمایش با وارد کردن دبی به جویچه شروع شده و همان لحظه دبی ورودی (ارتفاع آب در فلوم ورودی)، زمان رسیدن آب به میخ‌ها (زمان پیشروی) و دبی خروجی (ارتفاع آب در فلوم خروجی) قرائت گردید. همچنین در بین مدت آزمایش ارتفاع فلوم ورودی و خروجی قرائت گردید. زمانی‌که دبی هیدروگراف ورودی و خروجی هر دو هم زمان ثابت (حداقل سه قرائت با هم مساوی) شود، دبی ورودی قطع گردید و زمان پسروی (زمان محو شدن آب از سطح زمین) قرائت شد.

هدایت هیدرولیکی اشباع یکی از مهم‌ترین پارامترهای هیدرولیکی خاک می‌باشد که به چند روش آزمایشگاهی و محاسباتی می‌توان به‌دست آورد. اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی در خاک‌های سبک به روش بار ثابت و در خاک‌های سنگین به روش بار افتان می‌باشد. مبنای اندازه‌گیری رابطه دارسی می-

باشد. در این آزمایش از نمونه‌های اشباع و روش بار افتان استفاده گردید. هدایت هیدرولیکی از رابطه ۲ بدست می‌آید.

رابطه ۲: $$K=\frac{2.3aL}{At}\log\frac{h_1}{h_2}$$

که در آن، a : سطح مقطع لوله برحسب سانتی‌متر بر ثانیه، L: طول نمونه خاک بر حسب سانتی متر، A: سطح مقطع نمونه خاک برحسب سانتی متر مربع و t : زمان لازم برای رسیدن بار h_1 به بار h_2 درلوله مدرج برحسب ثانیه می‌باشد. برای تمام جویچه‌ها جداول پیشروی و پسروی ثبت شده است. سرعت پیشروی از فاکتورهای مهم در طراحی و شبیه‌سازی سیستم‌های آبیاری سطحی به‌شمار می‌رود. منحنی پیشروی جبهه آب در یک جویچه را می‌توان به صورت یک تابع توانی ساده بیان کرد. رابطه ۳ تابع منحنی پیشروی را نشان می‌دهد.

رابطه ۳: $$\boldsymbol{t = px^r}$$

که در آن x فاصله جبهه پیشروی آب (متر) در زمان t (ثانیه) و p و r ضرایب ثابت معادله هستند. ضرائب p , r با استفاده از داده‌های جدول پیشروی و نرم افزار Curve Expert محاسبه شد. سپس با استفاده از داده‌های پیشروی و پسروی، منحنی پیشروی پسروی برای تمام جویچه ها رسم گردید.

برای محاسبه پارامترهای پیشروی در وسط و انتهای جویچه‌ها به ترتیب از روابط ۴ و ۵ زیر استفاده گردید.

رابطه ۴: $$Q0t0.5l=\frac{\sigma_y A_0\times l}{2}+\sigma_z\frac{kt_{0.5}^a\times l}{2}+\frac{f_0 t_{0.5l}\times l}{2(1+r)}$$

رابطه ۵: $$Q0tl=\delta yA0l+\delta zktlal+f0tll/(1+r)$$

$t_{0.5l}$ زمان پیشروی تا نصف طول مزرعه، دقیقه

t_l زمان پیشروی تا انتهای مزرعه،دقیقه

r ضریب تجربی معادله پیشروی

l طول مزرعه برحسب متر

σ_y فاکتور شکل ذخیره سطحی، که ثابت بوده و برابر ۰/۷تا ۰/۸ است.

σ_z فاکتور شکل تحت الارضی

مجهولات معادلات پارامترهای k و a هستند که با لگاریتم گرفتن و حل همزمان معادلات زیر به‌دست می‌آیند (Valiantzas et al., 2001):

رابطه ۶: $$a=\frac{\ln(v_l/v_{0.5l})}{\ln(t_l/t_{0.5l})}$$

رابطه ۷: $$\boldsymbol{v_l=\frac{Q_0t_l}{l}-\sigma_yA_0-\frac{f_0t_l}{1+r}}$$

رابطه ۸: $$\boldsymbol{v_{0.5l}=\frac{2Q_0t_{0.5l}}{l}-\sigma_yA_0-\frac{f_0t_{0.5l}}{(1+r)}}$$

سپس $\boldsymbol{\sigma_z}$ (فاکتور شکل تحت الارضی) مستقیما از رابطه (۹) و و پارامتر k از رابطه (۱۰)به‌دست آمد.

رابطه ۹: $$\boldsymbol{\sigma_z=\frac{a+r(1-a)+1}{(1+a)(1+r)}}$$

رابطه ۱۰: $$k=\frac{v_l}{\sigma_z t_l^a}$$

رابطه ۱۱ فرم معادله نفوذ کوستیاکف- لوئیس را نشان می‌دهد که در آن Z نفوذ تجمعی بر حسب متر مکعب بر متر مربع، t فرصت زمان نفوذ دقیقه، f_0 سرعت نفوذ نهایی بر حسب متر مکعب بر متر بر دقیقه و a و K پارامترهای تجربی، این پارامترها از طریق برازش داده‌های نفوذ بر منحنی نفوذ تجمعی در برابر زمان در برنامه اکسل برآورد شدند.

رابطه ۱۱: $$Z=k^*ta+f_0t$$

نتایج و بحث

نتایج آنالیز فیزیکی خاک منطقه مورد مطالعه و نیز آنالیز شیمیایی آب و پساب استفاده شده در این پژوهش به ترتیب در جداول ۱ و ۲ ارائه شده است.همانطور که مشخص است pH پساب بالاتر از آب چاه بود که این امر به‌علت بالا بودن غلظت یون بی‌کربنات در پساب بوده است. از سوی دیگر شوری آب چاه بالاتر از پساب بود.

جدول ۱. میانگین ویژگی‌های فیزیکی خاک مزارع مورد مطالعه (قبل از آزمایش)

ویژگی‌های مورد مطالعه	شن ٪	سیلت ٪	رس ٪	رطوبت حجمی در نقطه پژمردگی (٪)	رطوبت حجمی در ظرفیت زراعی (٪)	وزن مخصوص ظاهری gr.cm-3
خاک مزرعه	۱۶	۳۴	۵۰	۱۴	۲۳/۹	۱/۲۷

جدول ۲. میانگین ویژگی‌های شیمیایی آب‌های استفاده شده برای آبیاری

	EC ds.m^{-1}	pH	HCO_3^-	Cl	$So4^{2-}$	Ca+Mg	Na^+	SAR Mmoll^{-1}
			mEql^{-1}					
آب چاه	۲/۸	۷/۰	۳/۰	۱۳/۷	۱۲	۱۴	۱۴/۱	۵/۳
پساب	۱/۵	۷/۵	۴/۷	۷/۲	۲۱	۸	۷/۵	۳/۸

جدول۳. نتایج تجزیه واریانس تیمارهای مختلف آبیاری بر روی برخی ویژگی‌های شیمیایی خاک در چهار نوبت آبیاری

منابع تغییرات	درجه آزادی	EC	pH	بیکربنات $Hco3^-$	کلرید Cl^-	سولفات $So4^-$	مجموع کلسیم و منیزیم $Mg^{2+}+Ca^{2+}$	سدیم Na^+	SAR
				میانگین مربعات					
تیمار آبیاری(a)	۲	۱/۷۴**	۱/۳۸**	۴/۴۷**	۴۳۰/۰۲**	۷۳۳/۳۷**	۴۷۱/۳۵**	۱۲۷۳/۹۹**	۱۲۳/۰۱**
زمان نمونه‌برداری (b)	۳	۰/۰۸*	۰/۰۲۴^{ns}	۰/۰۷۲^{ns}	۴۶/۵۷**	۴۰/۴۰**	۲۸/۷۴**	۴۵/۴۸**	۲/۰۶**
A×b	۶	۰/۰۲*	۰/۰۰۴^{ns}	۰/۷۲**	۶/۳۵**	۸۵/۰۸**	۱۵/۴۲**	۳/۷۸^{ns}	۰/۳۲۹**
خطا	۲۲	۰/۰۲۴	۰/۰۳۵	۰/۰۸۴	۰/۴۵۷	۰/۵۵۷	۰/۴۹۱	۰/۴۲	۰/۰۶
ضریب تغییرات	-	۴/۹۵	۲/۳۱	۷/۳۹	۵/۱۸	۳/۴۵	۳/۷۹	۳/۷۵	۴/۱۰

ns، ×، ×× به ترتیب غیر معنی‌دار و معنی‌داری در سطح احتمال پنج و یک درصد را نشان می‌دهد

جدول ۴. نتایج مقایسه میانگین تاثیر تیمارهای مختلف آبیاری بر ویژگی‌های شیمیایی خاک

تیمار مورد مطالعه	EC	pH	بیکربنات Hco3-	کلرید Cl^-	سولفات So^{4-}	مجموع کلسیم و منیزیم $Mg^{2+}+Ca^{2+}$	سدیم Na^+	SAR
تیمار ۱ (آبیاری با آب چاه)	۳/۵۹a	۷/۷۴b	۳/۰۹c	۱۸/۶۶a	۱۶/۶۷c	۱۴c	۲۵/۳۷a	۹/۴۹a
تیمار ۲ (آبیاری با پساب)	۲/۸۹b	۸/۳۸a	۴/۶۶a	۶/۷۵c	۳۰/۶۱a	۲۵/۶۵a	۱۱/۴۳c	۳/۲۳c
تیمار۳ (مصرف متناوب آب چاه و پساب)	۲/۹۹b	۸/۲۷a	۴/۰۱b	۱۳/۷b	۱۷/۵۱b	۱۵/۸۴b	۱۴/۷۴b	۵/۱۷b

ویژگی‌های شیمیایی خاک پس از اعمال تیمارها

جدول ۳ نتایج تجزیه واریانس تأثیر تیمار آبیاری و همچنین زمان نمونه‌برداری بر ویژگی‌های شیمیایی خاک را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است تیمار نوع آب مورد استفاده در آبیاری بر تمام ویژگی‌های اندازه‌گیری‌شده در خاک تأثیر معنی‌دار در سطح ۱ درصد داشته است. همچنین نوبت آبیاری به جز pH و بیکربنات، در سایر موارد تاثیر معنی‌داری بر ویژگی‌های اندازه‌گیری‌شده داشته است. همچنین جدول ۴ نتایج مقایسه میانگین تاثیر نهایی تیمارهای مختلف آبی (آبیاری با آب چاه، پساب و مصرف متناوب آب چاه و پساب) را بر ویژگی‌های شیمیایی خاک مورد مطالعه نشان می‌دهد.

میانگین‌ها در هر ستون با حروف مشابه، بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌دار ندارند.

آبیاری با پساب سبب افزایش معنی‌دار اسیدیته خاک شد. علت افزایش PH خاک در اثر استفاده از پساب را می‌توان به بالا بودن غلظت بی‌کربنات در پساب نسبت به آب چاه دانست. در نمونه برداری پس از انجام آزمایش و اعمال تیمارها، شوری در خاک آبیاری‌شده با آب چاه از سایر تیمارها بالاتر بود. یکی از علت‌های بالا بودن شوری زمین آبیاری شده با آب چاه به نسبت زمین‌های آبیاری شده با آب چاه و پساب به‌صورت تناوبی و زمین‌های آبیاری شده با پساب (جدول ۴) به بالا بودن شوری آب چاه نسبت به پساب مربوط می‌شود. آبیاری با آب چاه، باعث افزایش میزان کلر و کاهش سولفات خاک شده که علت افزایش میزان کلر را می‌توان به بالا بودن مقدار این یون در آب چاه نسبت به پساب دانست. در مقابل به‌دلیل بالا بودن غلظت یون بی‌کربنات در پساب، خاک‌های تحت آبیاری با این منبع دارای بی‌کربنات بیش‌تری نسبت به خاک‌های آبیاری شده با آب چاه می‌باشند.

بیش‌ترین مقدار نسبت جذب سدیم مربوط به خاک‌های آبیاری شده با آب چاه و برابر با ۹/۴۹ در مقایسه با پساب و تیمار تناوبی است. کم‌ترین مقدار SAR مربوط به تیمار پساب و برابر با ۳/۲۳ می‌باشد. آبیاری با پساب باعث افزایش کلسیم خاک در مقایسه با آبیاری با آب چاه شده است. افزایش کلسیم در خاک باعث فلوکوله شدن ذرات خاک و تشکیل خاکدانه و به تبع آن بهبود خواص فیزیکی و افزایش نفوذپذیری و تهویه در خاک می‌شود. آبیاری با پساب منجر به کاهش غلظت منیزیم در خاک گردیده است. علت بالا بودن غلظت منیزیم در خاک‌های آبیاری شده با آب چاه، بالا بودن غلظت منیزیم در آب چاه مورد استفاده می‌باشد.

تأثیر پساب بر برخی ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی خاک

جدول ۵ نتایج تجزیه واریانس تاثیر تیمارهای مختلف آبی را بر ویژگی‌های مختلف فیزیکی خاک در پایان انجام پروژه (پس از نوبت چهارم آبیاری) نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است تیمارهای مختلف آبی تاثیر معنی‌داری بر روی میزان رطوبت خاک در ظرفیت زراعی (FC) نداشتند. تاثیر تیمارهای مختلف آب مصرفی بر روی میزان رطوبت خاک در نقطه پژمردگی و همچنین چگالی مخصوص ظاهری در حد ۵ درصد و بر روی هدایت هیدرولیکی خاک در سطح ۱ درصد معنی‌دار بوده است.

جدول۵. نتایج تجزیه واریانس تیمارهای مختلف آبیاری بر روی برخی ویژگی‌های فیزیکی خاک

منابع تغییرات	درجه آزادی	FC	PWP	Ks	ρb
		میانگین مربعات			
تیمار(نوع آب آبیاری)	۲	۰/۴۱^{ns}	۱/۹۴*	۵۰۲×۱۰$^{-۶}$**	۰/۰۰۹*
تکرار	۲	۰/۰۰۳^{ns}	۰/۱۴۱^{ns}	۶۱/۴×۱۰$^{-۶}$^{ns}	۰/۰۰۰^{ns}
خطا	۴	۰/۱۵۱	۰/۲۵	۲/۷۳×۱۰$^{-۶}$	۰/۰۰۱
ضریب تغییرات	-	۱/۶۰	۳/۴۶	۴/۶۲	۲/۶۲

ns، *، ** به ترتیب غیر معنی‌دار و معنی‌داری در سطح احتمال پنج و یک درصد را نشان می‌دهد

جدول ۶. میانگین نتایج برخی ویژگی‌های فیزیکی پس از اعمال تیمارهای مختلف آبیاری

تیمار	FC (%)	PWP (%)	Ks ($cmsec^{-1}$)	ρb ($grcm^{-3}$)
آب چاه	۲۳/۹a	۱۴b	۸۷×۱۰$^{-۶}$c	۱/۳۷a
پساب	۲۴/۶a	۱۵/۶a	۱۰۹×۱۰$^{-۶}$a	۱/۲۶b
تناوب آب چاه و پساب	۲۴/۳a	۱۴/۵b	۹۱×۱۰$^{-۶}$b	۱/۳۲a

میانگین‌ها در هر ستون که دارای حروف مشابه می‌باشند بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌دار ندارند.

جدول ۶ نتایج مقایسه میانگین برخی ویژگی‌های فیزیکی اندازه‌گیری شده در خاک پس از اعمال تیمارهای مختلف آبیاری (آبیاری با آب چاه، پساب و مصرف متناوب آب چاه و پساب) را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۶، میانگین جرم مخصوص ظاهری در انتهای انجام آزمایش برای تیمارهای آبیاری شده با آب چاه، پساب و آبیاری متناوب با آب چاه و پساب معادل ۱/۳۷، ۱/۲۰ و ۱/۳۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب اندازه‌گیری شد. جرم مخصوص ظاهری خاک مزرعه ای که با پساب آبیاری می‌شود کمتر از جرم مخصوص ظاهری خاک مزرعه‌ای که به صورت تناوبی با آب چاه و پساب آبیاری می‌شد، بدست آمد. از سوی دیگر با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۴ (قبل از اعمال تیمارها)، مقدار وزن مخصوص ظاهری در اثر آبیاری با آب چاه از ۱/۲۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب به ۱/۳۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب افزایش یافته است. دلیل این امر می‌تواند وجود شوری بالاتر و یون سدیم بیشتر موجود در آب چاه نسبت به پساب باشد. همانطور که قبلا اشاره شد یون سدیم موجود باعث تخریب ساختمان خاک و انسداد منافذ درشت شده و در کل باعث کم شدن حجم خلل و فرج موجود در خاک و متراکم‌تر شدن آن و در نهایت افزایش وزن مخصوص ظاهری در خاک شده است. در تیمار آبیاری با پساب وجود کلسیم و منیزیم بالاتر موجب بهبود وضعیت ساختمان خاک و پایداری خاکدانه‌ها شده و همین امر باعث کاهش وزن مخصوص ظاهری خاک شده است. جرم مخصوص حقیقی خاک در پایان آزمایش در هر سه تیمار بدون تغییر نسبت به قبل از اعمال تیمارها و معادل ۲/۲ گرم بر سانتی متر مکعب بود. این نتایج با تحقیقات محققین دیگر مطابقت دارد. محمودی و حکیمیان(۱۳۷۹) بیان کردند، جرم ویژه حقیقی در یک خاک همواره ثابت بوده و با تغییر مقدار خلل و فرج خاک هیچ تغییری نمی‌کند. میانگین هدایت هیدرولیکی اندازه‌گیری-شده در تیمارهای مختلف پس از نوبت چهارم آبیاری به ترتیب زیاد به کم به‌صورت تیمار آبیاری با پساب(۱۰۹×۱۰^{-۶} سانتی‌متر بر ثانیه)، تیمار آبیاری شده با آب چاه و پساب به صورت متناوب(۹۱×۱۰^{-۶} سانتی‌متر بر ثانیه) و تیمار آبیاری با آب چاه(۸۷×۱۰^{-۶} سانتی‌متر بر ثانیه) بوده است. علت این امر را می توان به افزایش جزئی مواد آلی خاک، افزایش غلظت کلسیم و منیزیم خاک، افزایش فعالیت میکروبی خاک و بهبود رشد ریشه نسبت داد. همانطور که در قسمت قبل اشاره شد(جدول ۱۰)، آب چاه بیشترین میزان سدیم و کمترین مقدار کلسیم و منیزیم را داشته است و این نسبت در مورد تیمار پساب برعکس بوده است. قاعدتا با افزایش سدیم به خاک و نسبت آن به کلسیم و منیزم کاهش هدایت هیدرولیکی انتظار می‌رود. همچنین افزایش هدایت هیدرولیکی در اثر استفاده از پساب احتمالا به‌علت بهبود خواص فیزیکی خاک و در نتیجه افزایش اندازه منافذ خاک می‌باشد. ظرفیت نگهداری رطوبت در نقطه ظرفیت زراعی در انتهای آزمایش (پس از نوبت چهارم آبیاری) برای تیمارهای آبیاری با آب چاه، پساب و مصرف متناوب آب چاه و پساب به ترتیب معادل ۲۳/۹، ۲۴/۶ و ۲۴/۳ درصد حجمی و ظرفیت نگهداری رطوبت در نقطه پژمردگی برای تیمارهای آبیاری با آب چاه، پساب و مصرف متناوب آب چاه و پساب به ترتیب معادل ۱۴، ۱۵/۶ و ۱۴/۵ درصد حجمی بود که نسبت به وضعیت خاک قبل از اعمال تیمارها (جدول ۴) تفاوت نداشته است.

پیشروی، پسروی و هیدروگراف ورودی خروجی

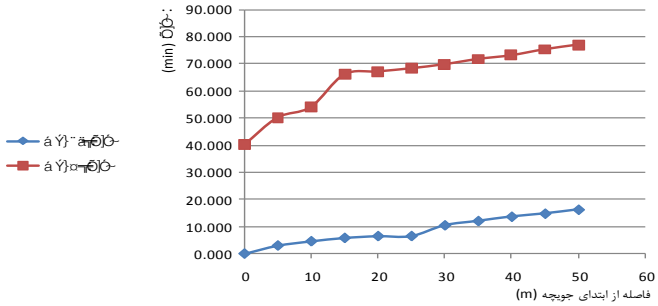
در هر تیمار آزمایش با استفاده از نرم افزار اکسل هیدروگراف ورودی خروجی برای جویچه دوم در هر آبیاری رسم گردید. نمودارهای پیشروی – پسروی مربوط به جویچه دوم (وسط) آبیاری با تیمار آب چاه، پساب و تناوبی در زیر آورده شده است (شکل‌های ۱ تا ۳). در سیستم‌های آبیاری سطحی مدت زمان نفوذ آب در یک نقطه مشخص به صورت تفاوت زمانی که برای

اولین بار به نقطه می رسد(پیشروی) و زمانی که پس از قطع آب به تدریج زهکش می‌شود(پسروی) تعریف می‌شود. به عبارت دیگر منحنی پیشروی و پسروی، توزیع زمانی- مکانی آب آبیاری و فرصت زمان جذب در کل سطح مزرعه را مشخص می سازد و برای ارزیابی راندمان‌های کاربرد و یکنواختی در آبیاری سطحی می‌توان از اطلاعات فوق استفاده نمود. همچنین پیشروی آب بر روی سطح خاک پارامتر مهمی در مدیریت سیستم‌های آبیاری سطحی می‌باشد. زمانی که طول می‌کشد تا آب به انتهای مزرعه برسد تقریب خوبی از زمان قطع جریان آب ورودی است که بیانگر زمان پایاب مزرعه یا غرقابی شدن انتهای مزرعه می باشد. نمودارهای پیشروی – پسروی و هیدروگراف ورودی خروجی از ملزومات اولیه استفاده از روش بیلان حجم در آبیاری جویچه‌ای به علت تأثیر دینامیک جریان در تعیین معادله نفوذ می باشد. هیدروگراف‌های ورودی و خروجی که با انتگرالگیری از آن حجم آب ورودی، خروجی و از اختلاف آنها مقدار آب نفوذکرده می‌آید، موازنه حجمی را در حالت کلی برای هر جویچه نشان می‌دهد. پارامتر دیگری که از هیدروگراف ورودی خروجی به‌دست می‌آید سرعت جریان ماندگار یا نفوذ پایه است که از تفاوت بین قسمت ثابت دو هیدروگراف و طول جویچه به‌دست می‌آید. مقدار نفوذ پایه در این تحقیق به‌علت کوتاه بودن طول جویچه‌ها و نزدیک بودن جریان ورودی و خروجی ناچیز به‌دست آمد که در محاسبات صفر در نظر گرفته شد.

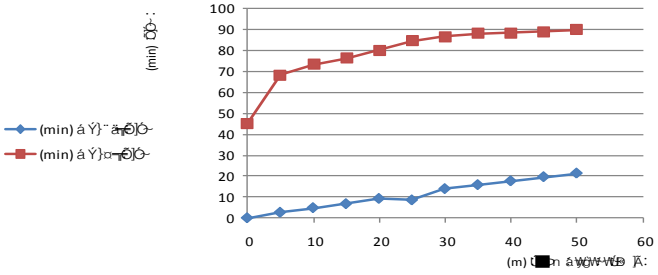
با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۷، بیش‌ترین میزان اختلاف بین زمان پیشروی و پسروی در تیمار آبیاری با پساب بود(۶۸/۴ دقیقه) و کمترین آن مربوط به آبیاری با آب چاه (۵۰/۸ دقیقه)، که این امر نشان می‌دهد فرصت نفوذ آب به خاک در تیمار پساب بیش‌تر از تیمار آبیاری شده با آب چاه بوده است. فرصت نفوذ آب به خاک از زیاد به کم به ترتیب شامل تیمار آبیاری با پساب، آبیاری متناوب با پساب و آب چاه و در نهایت آبیاری با آب چاه بود.

جدول ۷. پیشروی، پسروی آبیاری اول آب چاه، پساب و تناوبی

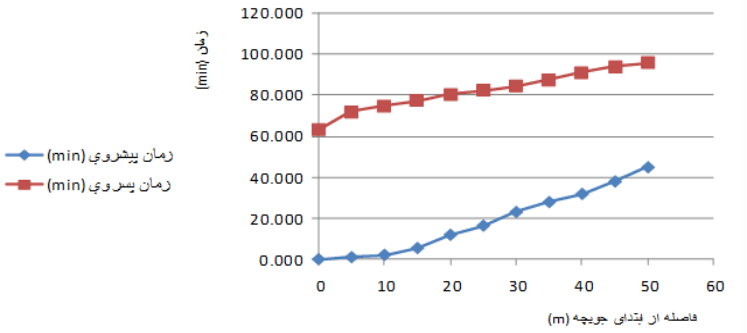
فاصله (m)	(تیمار تناوبی)		(تیمار آب پساب)		(تیمار آب چاه)	
	زمان پیشروی (min)	زمان پسروی (min)	زمان پیشروی (min)	زمان پسروی (min)	زمان پیشروی (min)	زمان پسروی (min)
۰	۰	۴۱/۲	۰	۴۴/۸	۰	۶۲/۷
۵	۳/۱	۵۱/۱	۲/۸	۶۷/۸	۱/۳	۷۲/۳
۱۰	۴/۵	۵۴/۰	۴/۷	۷۲/۹	۲/۵	۷۴/۸
۱۵	۵/۹	۶۵/۰	۶/۸	۷۵/۸	۵/۳	۷۸/۱
۲۰	۶/۵	۶۷/۲	۷/۸	۸۰/۲	۱۲/۲	۸۱/۵
۲۵	۶/۵	۶۸/۳	۸/۵	۸۴/۱	۱۶/۲	۸۳/۲
۳۰	۱۰/۵	۶۹/۸	۱۲/۵	۸۵/۷	۲۲/۵	۸۵/۱
۳۵	۱۲/۱	۷۱/۵	۱۵/۹	۸۷/۳	۲۸/۴	۸۷/۶
۴۰	۱۳/۷	۷۳/۱	۱۷/۳	۸۸/۱	۳۲/۳	۹۰/۴
۴۵	۱۴/۸	۷۵/۳	۱۹/۵	۸۸/۹	۳۸/۶	۹۴/۱
۵۰	۱۶/۳	۷۷/۱	۲۱/۴	۸۹/۸	۴۵/۳	۹۶/۱



شکل۱. نمودار پیشروی- پسروی جویچه آبیاری با آب چاه



شکل۲. نمودار پیشروی- پسروی جویچه در تیمار آبیاری تناوبی



شکل۳. نمودار پیشروی-پسروی جویچه آبیاری با پساب

جدول۸. نتایج تجزیه واریانس تیمارهای مختلف آبیاری بر روی ضرائب معادله نفوذ کوستیاکف- لوئیس

منابع تغییرات	درجه آزادی	a	k
تکرار	۲	۰/۰۰۵^{ns}	۰/۰۰۰^{ns}
تیمار آبیاری(a)	۲	۱/۲۲**	۰/۰۰**
زمان نمونه برداری(b)	۳	۰/۲۵**	۰/۰۰**
A*b	۶	۰/۷۶**	۰/۰۰**
خطا	۲۲	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰
ضریب تغییرات	-	۵/۶۴	۲/۳۱

ns، *، ** به ترتیب غیر معنی‌دار و معنی‌داری در سطح احتمال پنج و یک درصد را نشان می‌دهد

جدول ۹. میانگین ضرائب معادله نفوذ کوستیاکف- لوئیس بعد از اعمال تیمارها در نوبت‌های مختلف آبیاری

تیمار	f.	a	k
آب چاه	۰	۰/۶۵۱b	۰/۰۱۳b
پساب	۰	۱/۷۲۰a	۰/۰۳۱a
تناوب آب چاه و پساب	۰	۰/۲۳۴c	۰/۰۰۸b

میانگین‌ها در هر ستون که دارای حروف مشابه می‌باشند بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌دار ندارند.

ضرائب معادله نفوذ آب در خاک

آبیاری با پساب سبب افزایش سرعت نفوذ آب نسبت به آبیاری با آب چاه شد. نفوذ پذیری خاک بستگی زیادی به درصد سدیم تبادلی خاک دارد و نفوذ پذیری با افزایش سدیم، کاهش می‌یابد. پائین بودن نفوذپذیری زمین‌هایی که با آب چاه آبیاری شده‌اند نسبت به پساب به‌همین علت می‌باشد. برخی از محققان استفاده از پساب‌ها را سبب بهبود نفوذپذیری خاک می‌دانند(Hasan Oqli *et al.*, 2005).

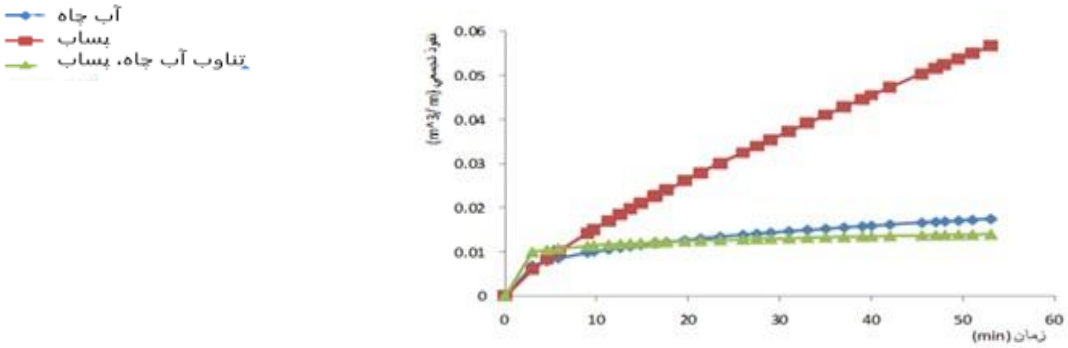
نتایج مربوط به تجزیه واریانس تاثیر تیمارهای مختلف آبیاری در چهار نوبت بر روی ضرایب معادله نفوذ کوستیاکوف-لوئیز در جدول ۸ ارائه شده است. همانطور که مشخص است تاثیر تیمار آبیاری و همچنین نوبت آبیاری و اثر متقابل این‌دو بر روی ضرایب معادله نفوذ کوستیاکف- لوئیس در سطح ۱درصد معنی‌دار بوده است. با توجه به کوتاه بودن طول جویچه‌ها (۵۰ متر) و پائین بودن زمان آبیاری (حدود ۵۰ دقیقه) در تحقیق انجام شده بر طبق شرایط محاسبه نفوذ به روش الیوت واکر، مقدار نفوذ پایه در محاسبات ناچیز بدست آمد که برابر صفر در نظر گرفته شد.

جدول ۹ نتایج مقایسه میانگین‌های این ضرایب را در تیمارهای مختلف آبیاری در چهار نوبت آبیاری نشان می‌دهد.

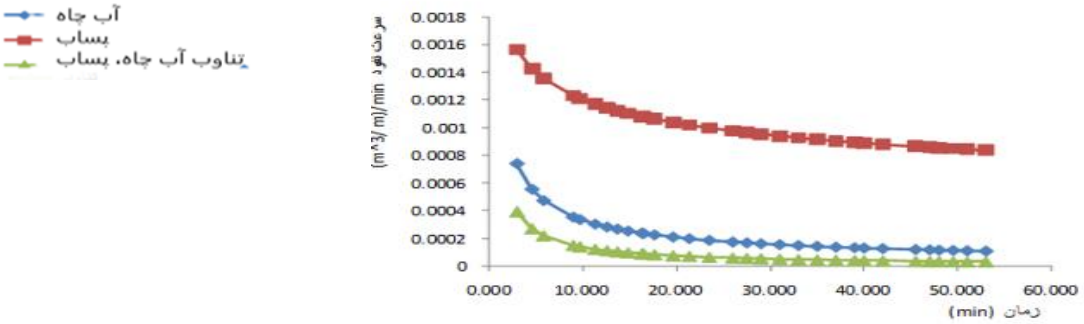
با توجه به جدول ۸ نتایج تجزیه واریانس اثر آبیاری بر روی ضریب k و a در سطح یک درصد معنی دار بوده و جدول ۹ نشان می‌دهد روند کلی ضرایب k و a در تیمار آب چاه نسبت به پساب کاهشی بوده است (به ترتیب حدود ۵۸ و ۶۰ درصد). علت این امر می تواند مربوط به وجود سدیم در آب چاه باشد که سبب پراکنده شدن ساختمان خاک و کاهش نفوذپذیری می‌گردد.

نفوذ تجمعی آب به خاک در اثر کاربرد تیمارها

بیشترین میزان میانگین نفوذ تجمعی مربوط به پساب و برابر با ۰/۰۵۷ مترمکعب در متر و کمترین مقدار مربوط به تیمار تناوبی با ۰/۰۱۴ مترمکعب در متر بود(شکل ۱۵). در آبیاری چهارم تیمار آب چاه و تناوبی به دلیل استفاده از آب چاه ویژگی‌های فیزیکی خاک و نفوذپذیری کاهش می‌یابد. در تیمار پساب به‌دلیل بهبود ویژگی‌های خاک نفوذپذیری و نفوذ تجمعی افزایش یافت (شکل ۴).



شکل ۴- نفوذ تجمعی آب به خاک در تیمارها ی مورد مطالعه



شکل ۵. سرعت نفوذ آب به خاک در اثر تیمارهای مختلف

این نتایج با نتایج محققان دیگر مطابقت داشت Taghi (Taghvaian *et al*., 2007 ; Khoo, 2011).

همچنین با توجه به شکل ۵ سرعت نفوذ در تیمار پساب بیشتر از تیمار آب چاه و برابر با ۰/۰۰۰۸۴ مترمکعب بر متر بر دقیقه و سرعت نفوذ تیمار آب چاه بیش‌تر از تیمار تناوبی و برابر با ۰/۰۰۰۱۱ مترمکعب بر متر بر دقیقه بود.

در زمان ثابت شدن سرعت نفوذ آب به خاک(۵۰ دقیقه) میزان سرعت نفوذ آب به خاک در تیمار آبیاری با پساب در حدود ۰/۰۰۱ متر بر دقیقه و در تیمار آبیاری با آب چاه در حدود ۰/۰۰۰۸ متر بر دقیقه بود که تقریبا معادل ۷۳ درصد کاهش در سرعت نفوذ می‌باشد. علت بیش‌تر بودن سرعت نفوذ تیمار پساب نسبت به آبیاری‌های قبل و نسبت به تیمار آب چاه تاثیر مثبت پساب بر هدایت هیدرولیکی و تخلخل خاک و افزایش نفوذپذیری و نیز وجود مواد آلی بالا در پساب و بهبود ساختمان خاک می‌باشد. در تیمار آب چاه نیز به‌دلیل تأثیر سدیم و SAR آب چاه نفوذپذیری کاهش پیدا کرده و سرعت نفوذ کم شده است. بعضی محققان نتایج مشابهی را دریافتند. (Vali Nejad *et al*., 2012; Abedi-Koupai and Bakhtiarifar, 2003)

سیستم آبیاری نیز اثر معنی‌داری بر سرعت نفوذ نهایی خاک نشان داد که با نتایج محققان دیگر مطابقت داشت Nadav (*et al*., 2012).

نتیجه‌گیری کلی

بر اساس نتایج به‌دست آمده از این پژوهش، تاثیر آبیاری با پساب و آب چاه بر ویژگی‌های مختلف فیزیکی خاک، تا حد زیادی به ویژگی‌های شیمیایی آب چاه و پساب و ماهیت اولیه پساب بستگی دارد. در این پژوهش شوری در خاک آبیاری‌شده با آب چاه از سایر تیمارها بالاتر بود که به دلیل بالا بودن شوری آب چاه نسبت به پساب بوده است. در همه تیمارها با گذشت زمان و انجام نوبت‌های آبیاری، تجمع املاح در خاک و در نتیجه میزان شوری خاک افزایش پیدا کرد. بیشترین میزان شوری و سدیم و کلر در تیمار آبیاری با آب چاه در نوبت چهارم بوده است. این مساله با توجه به اثر گذاری یون سدیم بر چگونگی توزیع و پراکنش منافذ موجود در خاک و در نهایت میزان نفوذ آب در خاک، از اهمیت بالایی برخوردار است. یون سدیم باعث انبساط و پراکندگی ذرات رس شده و در بیشتر موارد باعث ایجاد کاهش در اندازه و تعداد منافذ بزرگتر موجود در خاک می شود. به‌دلیل بالا بودن غلظت یون بی‌کربنات در پساب، خاک‌های تحت آبیاری با این منبع دارای بی‌کربنات بیشتری نسبت به خاک‌های آبیاری شده با آب چاه بودند و همین امر باعث افزایش معنی‌دار اسیدیته خاک در تیمار آبیاری‌شده با پساب در مقایسه با تیمار آب چاه شد. بیشترین مقادیر بی‌کربنات در نوبت چهارم آبیاری با پساب اندازه-گیری شد($۸/۴۴ meqL^{-1}$).

بیشترین مقدار نسبت جذب سدیم مربوط به خاک‌های آبیاری شده با آب چاه و کمترین مربوط به تیمار پساب بود. همچنین آبیاری با پساب باعث افزایش کلسیم خاک در مقایسه با آبیاری با آب چاه شد. افزایش کلسیم در خاک باعث فلوکوله شدن ذرات خاک و تشکیل خاکدانه و به تبع آن بهبود خواص فیزیکی و افزایش نفوذپذیری و تهویه در خاک می‌شود.

تیمارهای مورد مطالعه تاثیر معنی‌داری بر روی میزان رطوبت خاک در ظرفیت زراعی (FC) و نقطه پژمردگی دایم گیاه (PWP) نداشتند. دلیل این امر احتمالا کوتاه بودن مدت زمان انجام پروژه بوده است و احتمالا مصرف طولانی‌تر تیمارهای مورد بررسی بر روی این دو پارامتر تاثیرگذار خواهند بود. در انتهای انجام آزمایش جرم مخصوص ظاهری خاک در تیمار آبیاری با پساب کمتر از جرم مخصوص ظاهری سایر تیمارها بود. از سوی دیگر مقدار وزن مخصوص ظاهری خاک در اثر آبیاری با آب چاه از ۱/۲۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب (قبل از اعمال تیمارها) به ۱/۳۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب افزایش یافت. دلیل این امر می‌تواند وجود شوری بالاتر و یون سدیم بیش‌تر موجود در آب چاه نسبت به پساب باشد. همانطور که قبلا اشاره شد یون سدیم موجود باعث تخریب ساختمان خاک و انسداد منافذ درشت شده و در کل باعث کم شدن حجم خلل و فرج موجود در خاک و متراکم‌تر شدن آن و در نهایت افزایش وزن مخصوص ظاهری در خاک شده است، در مقابل در تیمار آبیاری با پساب وجود کلسیم و منیزیم بالاتر موجب بهبود وضعیت ساختمان خاک و پایداری خاکدانه‌ها شده و همین امر باعث کاهش وزن مخصوص ظاهری خاک شده است.

میانگین هدایت هیدرولیکی اندازه‌گیری‌شده در تیمارهای مختلف پس از نوبت چهارم آبیاری به ترتیب زیاد به کم به‌صورت تیمار آبیاری با پساب، تیمار آبیاری شده با آب چاه و پساب به صورت متناوب و تیمار آبیاری با آب چاه بوده است. میزان هدایت هیدرولیکی اندازه‌گیری‌شده در تیمار آبیاری با پساب در حدود ۲۰ درصد بیشتر از تیمار آبیاری با آب چاه بود. علت این امر را می‌توان به افزایش مواد آلی خاک در اثر مصرف پساب و نیز افزایش غلظت کلسیم و منیزیم خاک، افزایش فعالیت میکروبی خاک و بهبود ساختمان خاک نسبت داد. بیش‌ترین میزان اختلاف بین زمان پیشروی و پسروی در تیمار آبیاری با پساب و کم‌ترین آن مربوط به آبیاری با آب چاه، که این امر نشان می‌دهد فرصت نفوذ آب به خاک در تیمار پساب بیشتر از تیمار آبیاری شده با آب چاه بوده است. روند کلی ضرایب معادله نفوذ کوستیاکوف-لوییس در تیمار آب چاه نسبت به پساب کاهشی بوده است (به ترتیب حدود ۵۸ و ۶۰ درصد برای ضرایب k و a). علت این امر نیزمربوط به‌وجود سدیم بالاتردر آب چاه بوده که سبب پراکنده شدن ساختمان خاک و کاهش نفوذپذیری شده است. در کل بیشترین میزان میانگین نفوذ تجمعی مربوط به پساب و برابر با ۰/۰۵۷ مترمکعب در متر و کمترین مقدار مربوط به تیمار تناوبی با ۰/۰۱۴ مترمکعب در متر بود. در زمان ثابت شدن سرعت نفوذ آب به خاک (۵۰ دقیقه) میزان سرعت نفوذ آب به خاک در تیمار آبیاری با پساب در حدود ۰/۰۰۱ متر بر دقیقه و در تیمار آبیاری با آب چاه در حدود ۰/۰۰۰۸ متر بر دقیقه بود که تقریبا معادل ۷۳ درصد کاهش در سرعت نفوذ می‌باشد. در کل به نظر می‌رسد مصرف پساب باعث بهبود ویژگی‌های فیزیکی خاک مورد مطالعه در این پژوهش شده است. در نهایت پیشنهاد می‌شود که با توجه به تفاوت در ماهیت پساب‌ها لازم است تاثیر انواع پساب‌ها بر ویژگی‌های خاک در بلند مدت مورد بررسی قرار گیرد. همچنین در عمق‌های مختلف خاک تأثیر کاربرد پساب مورد بررسی قرار گیرد. پیشنهاد می‌شود تأثیر همزمان استفاده از پساب و کشت محصولات مختلف بر ویژگی‌های خاک و گیاهان مورد بررسی قرار گیرد.

Reference:

Abedi-Koupai, J., and Bakhtiarifar, A. (2003). Investigation of the effect of treated wastewater on hydraulic properties of emitters in trickle irrigation system. In: 20th Eur. Region. Conf. CD Int. Workshop Irrigation technologies and method: Research development and testing Montpellier France.

Aggelides, SM., and Londra, PA. (2000). Effects of compost produced from town wastes and sewage sludge on the physical properties of loamy soil and a clay soil. Bioresource Technology, 71,253-259.

Aiello, V. R., Martinez, C. E., & Araya, G. O. (2007). Impact of wastewater irrigation on soil physical and chemical properties in a semi-arid region of central Chile. Agriculture, Ecosystems & Environment, 119(1-2), 126-134.

Alizadeh, AME., Bazari, S., Velayati, M. Hasheminia, M., and Yaghmaei, A. (2001). Irrigation of corn with wastewater. pp. 147-154.

Ameri, A. R. and Yazdan-Panah, N. (2012). Investigating the effect of different proportions of urban sewage in irrigation water on some physical and chemical characteristics of soil. Sustainable Agricultural Science Research, 1(2): 37-47. (In Persian)

Assouline, S. and Narkis, K. (2011). Effects of long-term irrigation with treated wastewater on the hydraulic properties of a clayey soil. Water Resources Research, 47(8), 1-12.

Delibacak, S. Okur, B. and Ongum, AR. (2009). Effects of treated sewage sludge levels on temporal variations of some soil properties of a Typic Xerofluvent soil in Menemen Plain Western Anatolia. Turkey. Environmental Monitoring Assessment, 148(1), 85-95.

Elliott, R.L. and Walker, WR. (1982). Field evaluation of furrow infiltration and advance functions. Transaction ASAE, 25, 396-400.

Farmanifard, M., Qamarnia, H., Pirsaheb, M. and Fatahi, N. (2016). The effect of long-term irrigation with treated wastewater of Kermanshah city on some soil physical characteristics. Journal of Water Research in Agriculture, 31 (3), 493-508. (In Persian)

Gharbi, TL., Merdy, P., Raynaud, M., Pfeifer, HR. and Lucas, Y. (2010). Effects of long-term irrigation with treated wastewater. Part I: Evolution of soil physico-chemical properties. Applied Geochemistry, 25(2),1703–1710.

Hanifeh Lu, A. and Moazed, H. (2007). The effects of irrigation with the wastewater of Ahvaz city on soil hydraulic properties. Agricultural Engineering Research, 8(2), 62-47. (In Persian)

Hasan Oqli, A., Liaqat, A., Mirabzadeh, M., Vothoqi, M. and tomorrow, AH . (2005). Investigating the effects of irrigation with domestic wastewater on the transfer of substances to the depth of the soil and the quality of drainage water coming out of the lysimeter. Proceedings of the 11th Conference of Iran's National Irrigation and Drainage Committee. Tehran, January 3 and 4, 2012, 317-334. (In Persian)

Hasan, M. A., Al-Kaisi, M. H., & Al-Taani, A. A. (2014). Effect of long-term wastewater irrigation on soil properties in an arid region. Journal of Environmental Science and Health, Part B, 49(10), 739-747.

Kabusi, K. (2013). Evaluation of medium-term effects of irrigation with treated wastewater on physical and chemical properties of soil (case study: Wastewater treatment plant of Bandar Gaz city). Journal of Land Management, 2(2), 110-95. (In Persian)

Khodadadi, N., Ghorbani Dashtaki, Sh. and Kayani, Sh. (2014). The effect of irrigation water quality on some physical characteristics of the soil in the lands cultivated with rice (Oryza Sativa) 15-28. Journal of Water and Soil Resources Protection, 4(3), 15-28. (In Persian)

Loy, S., Amjad, T. Assi., Rabi, H., Morgan, M. and Jantrania, A. (2018) .The effect of municipal treated wastewater on the water holding properties of a clayey, calcareous soil. Science of the Total Environment, 643, 807–818.

Mahmoudi, Sh. and Hakimian, M. (2000). Basics of soil science (3rd edition) Tehran University Publications, pages 33 to 57. (In Persian)

Nadav, I., Arye, G., Tarchitzky J. and Chen, Y. (2012). Enhanced infiltration regime for treated-wastewater purification in soil aquifer treatment (SAT). Journal of Hydrology, 421, 275–283.

Taghi Khoo, M. (2011). The effect of irrigation with urban sewage of Shahrekord on some physical and chemical characteristics of soil, growth and yield of red bean. Master's thesis in the field of soil engineering, majoring in physics and soil protection, Faculty of Agriculture, Shahrekord University. (In Persian)

Taghvaian, S., Alizadeh, A. and Danesh, Sh. (2007). The effect of using wastewater in irrigation on the physical and some chemical characteristics of the soil. Irrigation and Drainage, 1(1), 61-49. (In Persian)

Tunc, T. and Sahin, U. (2015). The changes in the physical and hydraulic properties of a loamy soil under irrigation with simpler-reclaimed wastewaters. Agricultural Water Management, 158, 213–224.

Valiantzas, JD., Aggelides, S., and Sassalou, A. (2001). Furrow infiltration estimation from time to a single advance point. Agricultural Water Management, 52,17-32.

Vali Nejad, M., Mostafazadeh, B. and Mirmohammadi Meybodi, SAM. (2012). The effect of Shahin Shahr treated wastewater on the agricultural and chemical characteristics of corn under rain and surface irrigation systems. Agricultural Sciences and Natural Resources, 9(1), 103-115.

Yazdani, V., Kahraman, B., Davari, K. and Fazli, A. (2013). The effect of wastewater on the physical and chemical characteristics of soil. Environmental Science and Technology, 16, 558-543. (In Persian)