



Gorgan University of Agricultural  
Sciences and Natural Resources



## The effect of different amendments on some chemical properties of soil irrigated with industrial wastewater

Ghasem Rahimi<sup>\*1</sup>, Eisa Ebrahimi<sup>2</sup>

1. Corresponding Author, Dept. of Soil Science, Bu Ali Sina University, Hamadan, Iran. E-mail: [g.rahimi@basu.ac.ir](mailto:g.rahimi@basu.ac.ir)

2. Dept. of Soil Science, University of Guilan, Rasht, Iran. E-mail: [ebrahimi.soilphysic@yahoo.com](mailto:ebrahimi.soilphysic@yahoo.com)

---

---

### Article Info

#### Article type:

Full Length Research Paper

#### Article history:

Received: 11.08.2020

Revised: 05.01.2022

Accepted: 05.10.2022

#### Keywords:

Citric acid,  
Gypsum,  
Organic fertilizer,  
Pollution,  
Wastewater,  
Zinc

### ABSTRACT

**Background and Objectives:** The rapid growth of the world's population in recent decades has led to growing problems in terms of water supply and agricultural resources, and limited water resources are one of the major problems in the agricultural sector. The treated urban and industrial wastewater, which its pollution load is reduced by adding amendments, can be a suitable way to provide plant water and nutritional requirements. Thus, this research aimed to investigate the effect of different amendments on soil properties irrigated with wastewater from Bu-Ali industrial region in the Hamadan province.

**Materials and Methods:** For this study, treated wastewater was collected from Bu-Ali Industrial town, Hamadan Province. The greenhouse experiment in the Bu Ali Sina University was conducted in a completely randomized design with three replicates with loamy soil irrigated with wastewater. In this research, nine treatments including citric acid, compost, manure, gypsum, composite treatments (gypsum+ manure, gypsum+ compost, citric acid+ manure, citric acid+ compost), and control (27 sample) were used to investigate the effect of these amendments on some chemical properties. Soil properties were measured before and after the application of treatments. These properties included pH, electrical conductivity, cation exchange capacity, organic matter, total phosphorus, and available phosphorus and heavy metal concentrations such as lead, nickel, cadmium, and micronutrient such as zinc, copper, iron, and manganese were also measured.

**Results:** The results showed that the applied wastewater was considered to be unsuitable water with large quantities of sodium. The application of various amendments such as compost, manure, and citric acid in soil irrigated with wastewater can significantly reduce soil salinity (from 2.53 in the control treatment until 2.16 in the compost treatment). The effect of amendments on some chemical properties revealed that the addition of different amendments to the soil irrigated with wastewater resulted in significant changes in pH, electrical conductivity, cation exchange capacity, organic matter, carbonate equivalent calcium, Ca, Mg, and Na cations, total phosphorus, and Olsen phosphorus. The lowest total copper content was observed in the control treatment with an average of 13.84 mg kg<sup>-1</sup>, whereas the highest content of this element was seen in the treatment of 50% gypsum + 50% compost with an average of 14.93 mg kg<sup>-1</sup>. Also, the highest amount of total phosphorus was observed in the compost treatment, with an average of 294.47 mg kg<sup>-1</sup> and the lowest amount was observed in the control sample, with an average of 252.51 mg kg<sup>-1</sup>. The

---

results showed that the application of soil conditioners in most treatments had a significant effect on the concentration of available iron by the soil in comparison with the control treatment, the lowest amount of iron equivalent to  $7.68 \text{ mg kg}^{-1}$  in the control treatment and the highest Its value was  $10.59 \text{ mg kg}^{-1}$  in the treatment of 50% citric acid + 50% compost.

**Conclusion:** The results of soil analysis showed that the total concentration and supply of heavy elements lead, nickel and cadmium in soils treated with various modifiers such as citric acid, compost, gypsum, etc. was higher than the concentration of these elements in the control soil, But the measured values of the elements were less than their allowable (critical limit) values in the soil. There is also no problem with other soil characteristics such as salinity. In general, the results demonstrated that the use of these amendments can be a useful way to reduce pollution levels and the absorption of heavy metals in the plant.

---

Cite this article: Rahimi, Ghasem, Ebrahimi, Eisa. 2022. The effect of different amendments on some chemical properties of soil irrigated with industrial wastewater. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 12 (3), 27-47.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/EJSMS.2022.18525.1987

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

---

## اثر اصلاح‌کننده‌های مختلف بر برخی ویژگی‌های شیمیایی خاک آبیاری شده با پساب صنعتی

قاسم رحیمی<sup>۱\*</sup>، عیسی ابراهیمی<sup>۲</sup>

۱. نویسنده مسئول، گروه علوم خاک، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران. رایانامه: [g.rahimi@basu.ac.ir](mailto:g.rahimi@basu.ac.ir)

۲. گروه علوم خاک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران. رایانامه: [ebrahimi.soilphysic@yahoo.com](mailto:ebrahimi.soilphysic@yahoo.com)

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی- پژوهشی	<b>سابقه و هدف:</b> رشد شدید جمعیت جهان در چند دهه اخیر باعث بروز مشکلاتی از نظر تامین آب و منابع کشاورزی شده است. محدودیت منابع آب یکی از مهم‌ترین مشکلات موجود در بخش کشاورزی است. استفاده از پساب فاضلاب تصفیه شده شهری و صنعتی با در نظر گرفتن مسائل جانبی و کاهش بار آلودگی آن از طریق افزودن اصلاح‌کننده‌ها به خاک، شاید بتواند نیاز آبی و غذایی گیاه را تأمین نماید. بنابراین هدف مطالعه حاضر بررسی تأثیر اصلاح‌کننده‌های مختلف بر ویژگی‌های خاک آبیاری شده با پساب صنعتی شهرک صنعتی بوعلی استان همدان بود.
تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۸/۱۸ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۱/۰۲/۱۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۲/۲۰	<b>مواد و روش‌ها:</b> برای انجام این مطالعه پساب تصفیه شده در فصل تابستان از شهرک صنعتی بوعلی استان همدان تأمین شد. آزمایش گلخانه‌ای در دانشگاه بوعلی سینا همدان با استفاده از خاک لومی آبیاری شده با پساب در قالب طرح بلوک کامل تصادفی و با ۳ تکرار انجام شد. در این مطالعه از ۹ تیمار شامل اسید سیتریک، کمپوست، کود دامی، گچ، تیمارهای ترکیبی (گچ + کود دامی، گچ + کمپوست، اسید سیتریک + کود دامی، اسید سیتریک + کمپوست) و شاهد و در مجموع ۲۷ نمونه استفاده شد. ویژگی‌های خاک قبل و بعد از اعمال تیمارهای اندازه‌گیری شد. این ویژگی‌ها شامل pH، قابلیت هدایت الکتریکی، ظرفیت تبادل کاتیونی، ماده آلی، فسفر کل و فسفر فراهم، غلظت عناصر کم مصرف روی، مس، آهن و منگنز و غلظت فلزات سنگین سرب، نیکل و کادمیوم اندازه‌گیری شد.
واژه‌های کلیدی: آلودگی، اسید سیتریک، پساب، روی، کود آلی، گچ	<b>یافته‌ها:</b> نتایج نشان داد که پساب مورد مطالعه جزء آب‌های نامناسب با سدیم زیاد است که استفاده از اصلاح‌کننده‌های مختلف مانند کمپوست، کود دامی و اسید سیتریک در خاک تحت آبیاری با پساب می‌تواند شوری خاک را به صورت معنی‌داری کاهش دهد (از ۲/۵۳ در تیمار شاهد به ۲/۱۶ در تیمار کمپوست). اثر اصلاح‌کننده‌های مورد استفاده بر برخی ویژگی‌های

شیمیایی نشان داد که کاربرد اصلاح‌کننده‌های مختلف در خاک تحت آبیاری با پساب، سبب تغییرات معنی‌دار pH، قابلیت هدایت الکتریکی، ظرفیت تبادل کاتیونی، ماده آلی، کربنات کلسیم معادل، کاتیون‌های کلسیم، منیزیم و سدیم، فسفر کل و فسفر فراهم خاک شد. کم‌ترین مقدار مس کل در تیمار شاهد با میانگین ۱۳/۸۴ میلی‌گرم در کیلوگرم و بیش‌ترین مقدار آن در تیمار ترکیبی ۵۰٪ گچ + ۵۰٪ کمپوست با میانگین ۱۴/۹۳ میلی‌گرم در کیلوگرم به‌دست آمد. هم‌چنین بالاترین میزان فسفر کل در تیمار کمپوست، با میانگین ۲۹۴/۴۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم و کم‌ترین میزان آن در نمونه شاهد، با میانگین ۲۵۲/۵۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم مشاهده شد. نتایج نشان داد که کاربرد اصلاح‌کننده‌ها در خاک در اغلب تیمارها تأثیر معنی‌داری بر غلظت آهن فراهم خاک در مقایسه با تیمار شاهد داشت، کم‌ترین مقدار آهن فراهم معادل ۷/۶۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم در تیمار شاهد و بیش‌ترین مقدار آن ۱۰/۵۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم در تیمار ۵۰٪ اسید سیتریک + ۵۰٪ کمپوست به‌دست آمد.

**نتیجه‌گیری:** نتایج تجزیه خاک نشان داد که غلظت کل و فراهم عناصر سنگین سرب، نیکل و کادمیوم در خاک‌های تیمار شده با اصلاح‌کننده‌های مختلف مانند اسید سیتریک، کمپوست، گچ و... بیش‌تر از غلظت این عناصر در خاک شاهد بود، ولی مقادیر اندازه‌گیری شده عناصر از مقادیر مجاز (حد بحرانی) آن‌ها در خاک کم‌تر بود. هم‌چنین از نظر سایر ویژگی‌های مانند شوری نیز مشکلی ایجاد نشده است (بین تیمار شاهد و تیمارهای مخلوط گچ + کود دامی و اسید سیتریک + کمپوست). به‌طورکلی نتایج نشان داد که استفاده ترکیبی از اصلاح‌کننده‌ها نتایج بهتری نسبت به استفاده تکی دارد.

استناد: رحیمی، قاسم، ابراهیمی، عیسی (۱۴۰۱). اثر اصلاح‌کننده‌های مختلف بر برخی ویژگی‌های شیمیایی خاک آبیاری شده با پساب صنعتی.

نشریه مدیریت خاک و تولید پایدار، ۱۲ (۳)، ۴۷-۲۷.

DOI: 10.22069/EJSMS.2022.18525.1987



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

## مقدمه

رشد روزافزون جمعیت جهان همگام با فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی از یک سو و خشکسالی‌های پی در پی در اکثر کشورهای واقع در کمربند خشک جهان از سوی دیگر، موجب شده است در سال‌های اخیر تقاضا برای مصرف آب افزایش یابد و در نتیجه فشار بیش از اندازه به منابع آب وارد گردد (۱ و ۲). از این رو استفاده از منابع جدید آب به طوری که هم از جنبه اقتصادی و هم در توسعه کشاورزی مؤثر باشد در سالیان اخیر مورد توجه قرار گرفته است (۳). روش‌های جایگزین رایج برای منابع آب کشاورزی شامل نمک‌زدایی از آب‌های شور و هم‌چنین استفاده مجدد از فاضلاب‌های شهری و صنعتی می‌باشد (۴). یکی از دلایلی که حفظ و توسعه کشاورزی را در نواحی خشک و نیمه خشک محدود می‌سازد کمبود آب است، در این راستا می‌توان از آب‌هایی با کیفیت پایین یا غیرمعارف مانند پساب‌های شهری و صنعتی بهره گرفت (۵ و ۶). آب نامتعارف یا آب با کیفیت غیرمطلوب به هر آبی که معیارهای آب با کیفیت مطلوب را نداشته باشد، اطلاق می‌شود. در واقع نامتعارف بودن، دلیل بر غیرمصرف بودن این منابع آبی نیست، بلکه ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن‌ها، موجب می‌شود تا ضمن کاربردهای زراعی، عملیات و مدیریت‌های ویژه‌ای را ایجاب نماید که این الزام‌ها در استفاده از آب‌های با کیفیت مناسب ضروری نمی‌باشند (۷).

فاضلاب به ضایعات حاصل از مصرف آب در زندگی روزمره انسان (مصارف صنعتی، کشاورزی و خانگی) گفته می‌شود که دارای بیش از ۹۹ درصد آب و کم‌تر از ۱ درصد مواد جامد باشد (۸). بخش عمده‌ای از این مواد جامد به روش‌های مختلف از فاضلاب جدا شده و بخش جامد فاضلاب یا لجن فاضلاب را تشکیل می‌دهد، آب حاصل از تصفیه نیز

پساب نامیده می‌شود که ارزان‌ترین منبع آب در مناطق خشک و نیمه خشک دنیا محسوب می‌شود. بهره‌برداری از این آب می‌تواند تا حدودی کمبود آب را در این مناطق جبران کند و به علت وجود عناصر غذایی کم‌مصرف و پرمصرف موجود در آن کاربرد آن در کشاورزی هزینه‌های کوددهی را کاهش داده و سبب افزایش عملکرد محصول نیز می‌شود (۹). در عین حال می‌تواند به عنوان یک روش دفع امن محیطی برای پساب‌های تصفیه شده به کار رود (۱۰). امروزه کاربرد پساب در کشاورزی در بسیاری از کشورهای جهان از جمله ایالات متحده آمریکا، فرانسه، آلمان، مصر، عربستان سعودی، چین و غیره رایج است (۱۱)، ۱۲، ۱۳ و ۱۴). فاضلاب‌ها بر حسب منشأ تولید حاوی مواد آلاینده متفاوتی هستند. فاضلاب‌های صنعتی نسبت به فاضلاب‌های شهری دارای تنوع آلودگی بوده به طوری که نوع مواد آلاینده به نوع کارخانه و نوع تولیدات آن بستگی دارد. اگرچه استفاده از پساب تصفیه شده صنعتی می‌تواند تا حدودی کمبود آب را جبران کند ولی آثار منفی استفاده از این آب‌ها برای جلوگیری از آلودگی محیط زیست باید در نظر گرفته شود. وجود عناصر سنگین در پساب‌ها و تجمع عناصر در خاک از جمله موارد مهم زیست‌محیطی است (۱۵). عناصر سنگین از راه‌های مختلف به خاک وارد می‌شوند اما یکی از عمده‌ترین راه‌های ورود عناصر سنگین به خاک بهره‌گیری از فاضلاب‌ها در آبیاری می‌باشد، که مایه کاهش کیفیت و بهداشت خاک و آلودگی گیاهان رشد کرده در خاک‌های آبیاری شده با فاضلاب می‌شود (۱۶ و ۱۷). بر پایه نظر دوکوتا و اشमित (۲۰۰۰) فلزات سنگین اگر از طریق فعالیت‌های انسانی به خاک وارد شوند زیست‌فراهمی بیشتری دارند که این امر لزوم مدیریت درست در کاربرد پساب در کشاورزی را نشان می‌دهد (۱۸). فاکتورهای مختلفی

اراضی شهرهای چین، ۳۴۰ هزار هکتار از زمین‌های اطراف مکزیک، ۱۶ هزار هکتار از مزارع نزدیک شهر سانتیاگو در شیلی و حدود ۱۰ هزار هکتار از دشت‌های کناره شهر ملبورن با استفاده از پساب‌ها آبیاری می‌شوند (۲۳). سابقه استفاده از پساب‌ها در مکزیک به حدود ۱۰۰ سال می‌رسد. یکی از مهم‌ترین نقاط شهر مکزیک که به وفور از پساب‌ها در آن استفاده می‌شود دره مزکوتال می‌باشد (۲۴). استفاده از پساب در شیلی نیز در اطراف شهرهای بزرگ آن مانند سانتیاگو متمرکز می‌باشد. بررسی‌ها نشان می‌دهد حدود ۱۶۰۰۰ هکتار از اراضی اطراف شهر سانتیاگو با پساب آبیاری می‌شوند (۲۴).

با توجه به مطالب ذکر شده و بحران آب در سال‌های اخیر و رفع کمبودهای آن در کشور ایران، استفاده از فاضلاب‌های تصفیه شده شهری و صنعتی به عنوان یکی از راهکارهای تأمین آب در کشاورزی الزامی است. بنابراین در این پژوهش، بررسی امکان استفاده از پساب صنعتی تصفیه شده شهرک صنعتی بوعلی‌سینا همدان با اهداف بررسی کیفیت پساب صنعتی تصفیه شده و مقایسه آن با استانداردهای جهانی، امکان استفاده از پساب صنعتی تصفیه شده به‌عنوان آب آبیاری برای اهداف کشاورزی، تأثیر آبیاری با پساب صنعتی تصفیه شده بر میزان تجمع عناصر سنگین در آن بعد از استفاده از اصلاح‌کننده‌های مختلف در خاک مورد پژوهش قرار گرفت.

### مواد و روش‌ها

**نمونه برداری و اندازه‌گیری ویژگی‌های خاک:** برای انجام این پژوهش خاک مورد استفاده (بافت لومی) از اطراف گلخانه دانشگاه بوعلی‌سینا همدان و از عمق ۰-۳۰ سانتی‌متری تأمین شد. پس از هوا خشک شدن و گذراندن خاک از الک ۲ میلی‌متری، برخی خواص فیزیکی و شیمیایی براساس روش‌های متداول

زیست‌فراهمی عناصر سنگین در خاک را کنترل می‌کند که شامل pH، گنجایش تبادل کاتیونی، ماده آلی، اکسیدهای آهن، آلومینیوم و منگنز، اندازه و گونه رس، شرایط اقلیمی، کارهای کشاورزی، آب آبیاری و توپوگرافی می‌باشند (۱۹).

هر چند غلظت عناصر سنگین در پساب ممکن است کم و ناچیز باشد، ولی تجمع آن در خاک می‌تواند سبب افزایش غلظت عناصر سنگین در گیاهان کشت شده در این خاک‌ها شود (۲۰). برای این‌که بتوان از پساب به عنوان منبع آب در کشاورزی استفاده کرد باید بار آلودگی آن را کاهش داد. تصفیه پساب و کاهش بار آلودگی آن به راه‌های مختلفی از جمله تصفیه پساب با اشعه ماوراء بنفش، آهک‌دهی (۲۱) و تخلیه پساب در امتداد جوی‌های منتهی به شالیزارها که با توجه به ظرفیت تصفیه مزارع شالیکاری می‌تواند به بهبود کیفیت آب کمک کند، انجام می‌شود. اما در بعضی از کشورها به دلیل شرایط اقلیمی و اقتصادی استفاده از روش‌های نام برده برای تصفیه پساب به صرفه نمی‌باشد. بنابراین می‌توان قبل از استفاده از پساب برای آبیاری یکسری پیش تیمار بر روی خاک انجام داد. چنین تیمارهایی باعث آسان‌تر شدن استفاده از آب شور یا پساب برای آبیاری گیاهان و حل مشکل کمبود منابع آب شیرین می‌شود (۲۲).

این پیش‌تیمارها شامل افزودن اصلاح‌کننده‌های مختلفی هم‌چون کود دامی، گچ، اسید سیتریک و کمپوست و غیره می‌باشد. بنابراین، از آنجایی که تداوم آبیاری با پساب بدون هیچ پیش تیماری در خاک منجر به تجمع فلزات سنگین در قسمت‌های مختلف گیاه می‌شود، بنابراین توصیه می‌شود که یک پیش تیمار قبل از استفاده از پساب روی خاک انجام شود (۲۲). از اوایل قرن بیستم بسیاری از کشورهای جهان به استفاده مجدد از پساب‌ها روی آوردند به طوری که به عنوان مثال امروزه ۳۰ میلیون هکتار از

تصفیه شده، pH، EC، کاتیون‌های سدیم، پتاسیم، کلسیم، منیزیم و عناصر سنگین با روش‌های یاد شده اندازه‌گیری شد. کلر توسط روش تیتراسیون با محلول ۰/۰۲۵ مولار نیترات نقره در مجاورت کرومات پتاسیم و کربنات و بی‌کربنات توسط روش تیتراسیون به‌وسیله اسید سولفوریک ۰/۰۵ مولار در مجاورت معرف فنل‌فتالین اندازه‌گیری گردید (۳۴). سولفات به روش کدورت‌سنجی و با کمک دستگاه اسپکتروفتومتر مدل Cintra 101 اندازه‌گیری شد (۳۵). اندازه‌گیری COD<sup>۵</sup> به روش تیتراسیون با فرسولفات شش آبه انجام شد، تغییر رنگ در تیتراسیون از نارنجی به قهوه‌ای روشن ادامه یافت. میزان BOD<sup>۶</sup> نمونه‌ها توسط کیت BOD سنج اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری کل جامدات محلول (TDS<sup>۷</sup>) از روش توزین نمونه قبل و بعد از آون در دمای ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد استفاده شد.

**تعیین ویژگی‌های اصلاح‌کننده‌ها:** ویژگی‌های مختلفی از اصلاح‌کننده‌ها مانند pH، EC، کاتیون‌های سدیم، پتاسیم، کلسیم، منیزیم و عناصر سنگین با روش‌های یاد شده اندازه‌گیری شد.

**اعمال تیمارها و طرح آماری آزمایش:** تیمارهای مورد استفاده در این پژوهش شامل: T1، شاهد؛ T2، گچ (Gypsum) (G)؛ T3، سیتریک اسید (Citric acid) (Ci)؛ T4، کود دامی (Farmyard manure) (FYM)؛ T5، کمپوست (Compost) (Com)؛ T6، مخلوطی از ۵۰٪ G + ۵۰٪ FYM؛ T7، مخلوطی از ۵۰٪ G + ۵۰٪ Com؛ T8، مخلوطی از ۵۰٪ Ci + ۵۰٪ FYM و T9، مخلوطی از ۵۰٪ Com + ۵۰٪ Ci می‌باشند. طرح مورد استفاده برای تجزیه و تحلیل داده‌های خاک و غلظت عناصر سنگین و اصلی در گیاه به‌صورت بلوک کامل تصادفی با ۳ تکرار در نظر

اندازه‌گیری شد. بافت خاک بر پایه قانون استوکس<sup>۱</sup> و به روش هیدرومتری تعیین گردید (۲۵). هدایت الکتریکی (EC) و pH خاک در نسبت ۱ به ۵ خاک به آب به ترتیب با استفاده از دستگاه هدایت‌سنج الکتریکی (مدل Metrohm 712) و pH متر (مدل Metrohm 744) اندازه‌گیری شد (۲۶ و ۲۷). کربنات کلسیم معادل به روش تیتراسیون برگشتی (۲۸)، ماده آلی خاک به روش تیتراسیون تر (۲۹) و ظرفیت تبادل کاتیونی خاک (CEC<sup>۲</sup>) به روش باور<sup>۳</sup> (۲۵) اندازه‌گیری شد. کاتیون‌های محلول شامل سدیم، پتاسیم، کلسیم و منیزیم در عصاره ۱ به ۵ آب به خاک استخراج و سپس کلسیم و منیزیم به روش تیتراسیون و سدیم و پتاسیم به کمک دستگاه فلیم فتومتر مدل JENWAY PFP7 اندازه‌گیری شد. فسفر قابل‌جذب و کل خاک به ترتیب به روش اولسن و سامر (۱۹۸۲) و آن و همکاران (۲۰۰۰) با کمک دستگاه اسپکتروفتومتر مدل Cintra 101، قرائت شد (۳۰ و ۳۱). غلظت کل فلزات سنگین با به کارگیری اسید نیتریک (HNO<sub>3</sub>) ۴ نرمال (۳۲) و غلظت قابل‌جذب عناصر سنگین در خاک با استفاده از عصاره‌گیر<sup>۴</sup> DTPA با استفاده از دستگاه جذب اتمی مدل Varian Spectra AA 220 انجام شد (۳۳).

**تهیه پساب و اندازه‌گیری ویژگی‌های شیمیایی آن:** برای انجام این پژوهش، پساب تصفیه شده در فصل تابستان از شهرک صنعتی بوعلی استان همدان تأمین گردید. فرایند تصفیه در آن شامل دو لاگون هوادهی از نوع اختلاط کامل به صورت سری و به دنبال آن لاگون ته‌نشینی و فرایند کلرزنی می‌باشد. پس از تهیه پساب تصفیه شده برخی از ویژگی‌های شیمیایی آن در طول دوره آبیاری اندازه‌گیری شد. در تجزیه پساب

1- Stoke's law

2- Cation exchange capacity

3- Bower

4- Diethylenetriamine pentaacetate

5- Chemical Oxygen Demand

6- Biological Oxygen Demand

7- Total Dissolved Solids

در لیتر به دست آمد. نتایج نشان داد که غلظت کلر به دست آمده از این مطالعه بسیار بالاتر از مقادیر توصیه شده است. بنابراین طبق استاندارد خروجی فاضلابها (سازمان محیط زیست، ۱۳۷۳ و ضوابط زیست محیطی استفاده مجدد از آبهای برگشتی و پسابها، نشریه شماره ۵۳۵) غلظت کلر موجود در پساب برای همه مصارف پساب (تخلیه پساب به آب سطحی، چاه جاذب یا استفاده به عنوان آبیاری در امور مربوط به کشاورزی) دارای محدودیت شدید است. هم چنین براساس نظریه آیرز و وسکات (۱۹۸۵) استفاده از پساب برای آبیاری بارانی و سطحی دارای محدودیت شدید بود (۳۷). ضمن این که غلظت کلر پساب می تواند علائم مسمومیت را حتی در گیاهان مقاوم ظاهر سازد. بر پایه نتایج به دست آمده (جدول ۱) ملاحظه می شود که غلظت عناصر غذایی اندازه گیری شده مانند فسفر، کلسیم، منیزیم و پتاسیم در پساب مورد مطالعه قابل توجه بود. بر اساس استاندارد سازمان محیط زیست ایران، غلظت کلسیم برای تخلیه به آب سطحی و چاه جاذب دارای محدودیت می باشد. آیرز و وسکات (۱۹۸۵) هم چنین نسبت کلسیم به منیزیم را به عنوان شاخصی در بررسی کیفیت آب آبیاری مد نظر قرار داده اند و نسبت کلسیم به منیزیم بالاتر از یک را به لحاظ آبیاری مناسب دانسته اند (۳۷)، بر این اساس شاخص کلسیم به منیزیم پساب مورد بررسی (۳/۳) بالاتر از نسبت توصیه شده بود، که برای آبیاری محدودیتی ندارد. مقادیر بالای فسفر کاربردی می تواند مشکلاتی را سبب شود، اما به دلیل این که اثرات نامطلوب فسفر شناخته شده نیست هیچ استانداردی برای مقادیر فسفر در آب آبیاری وجود ندارد (۳۷). طبق نتایج به دست آمده در جدول ۱ مشخص شد که غلظت عناصر سنگین پساب طبق استانداردهای سازمان حفاظت محیط زیست ایران (۱۳۷۳) و FAO (۱۹۸۵) در حد

گرفته شد. بدین منظور، گلدانهایی با ظرفیت ده کیلوگرم و ارتفاع ۳۰ سانتی متر تهیه گردید. پس از رها کردن خاک در دمای اتاق به مدت یک روز، اصلاح کننده ها به خاک اضافه شد و خوب مخلوط گردید و در گلدانها ریخته شدند. در مجموع تعداد ۲۷ گلدان در نظر گرفته شد. بعد از گذشت دوره انکوباسیون (۱۵ روز) گلدانها، نشاءهای ذرت که در طی این ۱۵ روز در عمق ۰/۵ سانتی متری و در کوکوپیت کاشته شده بودند به گلدانهای آزمایشی منتقل شدند. آبیاری ذرت با فاضلاب تصفیه شده براساس نیاز آبی گیاه در طول دوره رشد انجام شد، شایان ذکر است که به منظور کاهش اثر سوء پساب بر جوانه زنی، آبیاری گلدانها تا قبل از مرحله آبیاری با پساب با آب معمولی صورت گرفت و هنگامی که جوانه ها به مرحله ۲ تا ۴ برگی رسیدند و جین انجام شد و یک گیاه در هر گلدان باقی ماند.

**محاسبات آماری:** در این مطالعه نه تیمار با سه تکرار در غالب طرح آزمایشی بلوک کامل تصادفی با استفاده از نرم افزار SAS 9.4 آنالیز شد و مقایسه میانگینها در سطح پنج درصد توسط آزمون دانکن انجام شد. نمودارها همگی در محیط Excel 2013 ترسیم شدند.

### نتایج و بحث

**کیفیت پساب:** نتایج ویژگیهای کیفی پساب مورد استفاده در جدول ۱ آمده است. در جدول ۱ نشان داده می شود که هدایت الکتریکی پساب ۵/۴۸ دسی زیمنس بر متر به دست آمد که در مقایسه با حدود توصیه ای سازمان خواروبار جهانی (۳۵) و جدول رهنمودهای آیرز و وستکات (۱۹۸۵) فراتر از حداکثر مقدار مجاز برای آبیاری بود و دارای محدودیت از نظر هدایت الکتریکی و سمیت عناصر برای آبیاری می باشد (۳۶). کلر موجود در پساب ۱۶۸۶/۲ میلی گرم



مطلوب بودند و بنابراین برای استفاده در کشاورزی مشکل‌زا نمی‌باشند (۳۵). بر اساس گزارش فیجین و همکاران (۱۹۹۱) حدود ۷۰ تا ۹۰ درصد عناصر سنگین در مراحل اولیه و ثانویه تصفیه از پساب جدا می‌شوند (۳۸).

جدول ۱- میانگین برخی از ویژگی‌های شیمیایی آب و پساب مورد آزمایش.

Table 1. Some of the chemical properties of water and effluent tested averagely.

*مرز استاندارد پساب برای		استاندارد	پساب	واحد	ویژگی‌ها
Standard of wastewater limit for		Standard	Wastewater	Unit	Parameters
بهره‌گیری در کشاورزی و آبیاری	تخلیه به آب‌های سطحی	(FAO)			
Exploitation in agriculture and irrigation	Drainage to surface waters				
6-8.5	5-9	6.5-8	7.05	-	pH
-	-	0.7	5.48	dS m <sup>-1</sup>	EC
-	b	450	3468	mg l <sup>-1</sup>	TDS
100 <sup>a</sup>	50 <sup>a</sup>	-	952	mg l <sup>-1</sup>	BOD
100 <sup>a</sup>	100 <sup>a</sup>	-	1522	mg l <sup>-1</sup>	COD
-	-	-	15.23	%	ESP
-	-	-	13.40	mmol l <sup>-1</sup>	SAR
-	75	-	240	mg l <sup>-1</sup>	Ca
100	100	-	72	mg l <sup>-1</sup>	Mg
-	-	-	39.13	me l <sup>-1</sup>	Na
-	-	-	1	me l <sup>-1</sup>	K
-	-	-	7	me l <sup>-1</sup>	HCO <sub>3</sub>
-	-	-	12.5	me l <sup>-1</sup>	CO <sub>3</sub>
600	600 <sup>b</sup>	4	1686	mg l <sup>-1</sup>	Cl
500	400 <sup>b</sup>	-	88.5	mg l <sup>-1</sup>	SO <sub>4</sub>
-	6	-	116	mg l <sup>-1</sup>	P
2	2	2	0	mg l <sup>-1</sup>	Zn
1	1	5	0.26	mg l <sup>-1</sup>	Pb
2	2	0.2	0.01	mg l <sup>-1</sup>	Ni
0.2	1	0.2	0	mg l <sup>-1</sup>	Cu
0.05	0.1	0.01	0	mg l <sup>-1</sup>	Cd
3	3	5	0.21	mg l <sup>-1</sup>	Fe
1	1	0.2	0.12	mg l <sup>-1</sup>	Mn

\* استاندارد سازمان حفاظت محیط زیست ایران (۱۳۷۳)

\* Standard of the Environmental Protection Organization of Iran (1994)

a: کاهش BOD پساب در مقایسه با نمونه مرکب ۲۴ ساعته ورودی نباید از ۹۰ درصد کمتر باشد

a: The reduction of effluent BOD in comparison with the 24-hour input composite sample should not be less than 90%

b: تخلیه با غلظت بیش از میزان مشخص شده در جدول در صورتی مجاز خواهد بود که پساب خروجی، غلظت کلراید، سولفات و مواد محلول منبع پذیرنده را در شعاع ۲۰۰ متری بیش از ده درصد افزایش ندهد

b: Discharge with a concentration higher than the amount specified in the table will be allowed if the effluent does not increase the concentration of chloride, sulfate and soluble materials of the receiving source in a radius of 200 meters by more than ten percent

ویژگی‌های شیمیایی خاک‌های تیمار شده: ویژگی‌های شیمیایی خاک مورد مطالعه در جدول ۲ ارائه شده است. نتایج نشان داده است که خاک مورد مطالعه از نظر EC فاقد مشکل شوری است و pH نزدیک به خنثی دارد. هم‌چنین مقدار CEC خاک مورد مطالعه بالا است که نشان‌دهنده قدرت تبدیلی بالای این خاک است.

جدول ۲- ویژگی‌های شیمیایی خاک مورد مطالعه.

Table 2. Chemical properties of the studied soil.

مقدار Value	واحد Unit	ویژگی‌ها Parameters	مقدار Value	واحد Unit	ویژگی‌ها Parameters	مقدار Value	واحد Unit	ویژگی‌ها Parameters
71.36	mg kg <sup>-1</sup>	Pb total	81.98	mg kg <sup>-1</sup>	Zn total	7.33	-	pH
8.09	mg kg <sup>-1</sup>	Pb ava	1.76	mg kg <sup>-1</sup>	Zn ava	2.53	dS m <sup>-1</sup>	EC
1.22	mg kg <sup>-1</sup>	Cd total	25679	mg kg <sup>-1</sup>	Fe total	12	%	CaCO <sub>3</sub>
0.08	mg kg <sup>-1</sup>	Cd ava	12.91	mg kg <sup>-1</sup>	Fe ava	1.31	%	OM
105.30	mg kg <sup>-1</sup>	Ni total	14.81	mg kg <sup>-1</sup>	Cu total	21.01	cmol <sup>+</sup> kg <sup>-1</sup>	CEC
2.02	mg kg <sup>-1</sup>	Ni ava	1.57	mg kg <sup>-1</sup>	Cu ava	36.00	mg l <sup>-1</sup>	Ca sol
			219.41	mg kg <sup>-1</sup>	Mn total	33.06	mg l <sup>-1</sup>	Mg sol
			6.35	mg kg <sup>-1</sup>	Mn ava	476.75	mg l <sup>-1</sup>	Na sol
						5.25	mg l <sup>-1</sup>	K sol
						30.93	mg kg <sup>-1</sup>	P ava
						265.63	mg kg <sup>-1</sup>	P total

به دلیل اثر غلظت تعادلی نمک، pH کم‌تری داشته باشد (۳۹). گزارش‌های شایما و همکاران (۲۰۱۲) درباره اثر اصلاح‌کننده‌های مختلف بر خاک آبیاری شده با پساب نشان‌دهنده کاهش pH می‌باشد (۲۲) که با نتایج این پژوهش در تیمارهای T2، T7، T8 و T9 همخوانی دارد. این امر به دلیل فرایندهای پوسیدگی و تجزیه مواد آلی و هم‌چنین اکسیداسیون مواد معدنی خاک می‌باشد. رویینز (۱۹۸۶) گزارش کرد که تجزیه میکروبی مواد آلی در خاک با pH همبستگی دارد و افزایش Pco<sub>2</sub> ناشی از تنفس ریشه گیاه و تجزیه مواد آلی باعث کاهش pH می‌شود (۴۰). مصطفی (۲۰۰۵) دریافت که کاربرد کود دامی و گچ، pH خاک‌های سدیمی را به صورت قابل توجهی کاهش می‌دهد (۴۱). این پژوهش‌گر بیان کرد، این نتایج می‌تواند مربوط به

اثر اصلاح‌کننده‌ها بر برخی از ویژگی‌های شیمیایی خاک

واکنش خاک (pH): در جدول ۳ نتایج اثر اصلاح‌کننده‌ها بر ویژگی‌های مختلف خاک آمده است. نتایج تجزیه آماری نشان داد که کاربرد اصلاح‌کننده‌های مختلف در خاک آبیاری شده با پساب صنعتی در برخی موارد، در مقایسه با خاک شاهد، به طور معنی‌داری ( $P \leq 0/05$ ) سبب تغییر pH خاک شد (جدول ۳). محدوده pH خاک‌ها، از ۷/۰۴ در خاک شاهد به ۶/۸۹، ۶/۹۴ و ۶/۷۷، به ترتیب در خاک‌های اصلاح شده با تیمار T8، T9 و T2 تغییر یافت. این در حالی است که اصلاح‌کننده‌هایی چون T3، T4، T5 و T6 اختلاف معنی‌داری بر pH خاک نداشتند. هم‌چنین پیش‌بینی می‌شود که در دو خاک یکسان آن که شورتر است،

تأثیر را بر کاهش EC خاک داشتند. بین تیمارهای نامبرده شده T4، T5 و T8 اختلاف معنی‌داری مشاهده نشده است. شایما و همکاران (۲۰۱۲) مشاهده نمودند که استفاده از اصلاح‌کننده‌ها EC خاک را به طور قابل توجهی کاهش می‌دهد (۲۲) که با نتایج این پژوهش همسو می‌باشد. این پژوهشگران دریافته‌اند که بیش‌ترین اثر کاهش بر EC با اعمال تیمار ۵۰٪ گچ + ۵۰٪ کود دامی (T6) به دست آمد و گزارش کردند که لایه‌های سطحی خاک نسبت به لایه‌های زیر سطحی کاهش بیش‌تری را نشان دادند. این ممکن است به علت افزایش قابلیت آبخویی سدیم محلول و تبادلی از پروفیل خاک باشد. بهیروی و سلیمان (۲۰۰۵) گزارش کردند که افزودن کودهای آلی به خاک، شوری آن را کاهش می‌دهد و این امر را به بهبود ویژگی‌های فیزیکی خاک نسبت دادند که به دنبال آن نیز آبخویی نمک‌ها به خارج از منطقه ریشه تسهیل می‌شود (۴۳).

کاهش سدیم محلول و تبادلی و افزایش اشکال کلسیم محلول و تبادلی به دنبال استفاده از این اصلاح‌کننده‌ها باشد. همچنین اثر مثبت اصلاح‌کننده‌های آلی و معدنی شامل ماده آلی و گچ در بهبود ویژگی‌های شیمیایی خاک و به خصوص کاهش pH خاک‌ها می‌تواند به علت آزاد شدن دی اکسید کربن در طول فرآیند تخریب و در نتیجه کاهش رسوب یون‌های کلسیم و کربنات به شکل آهک باشد (۴۲).

**هدایت الکتریکی (EC):** در این مطالعه EC خاک‌هایی که دریافت‌کننده اصلاح‌کننده‌های مختلف بودند، در بیش‌تر موارد در مقایسه با خاک شاهد به طور معنی‌داری ( $P \leq 0.01$ ) کاهش یافت (جدول ۳). کم‌ترین میزان EC مربوط به خاک تیمار شده با کمپوست و بیش‌ترین مقدار آن مربوط به خاک تیمار شده با گچ بود (به ترتیب ۲/۱۶ و ۳/۱۶ دسی‌زیمنس بر متر). با توجه به نتایج به دست آمده، بعد از کمپوست (T5) اصلاح‌کننده‌های ۵۰٪ سیتریک اسید + ۵۰٪ کود دامی (T8) و کود دامی (T4) بیش‌ترین

جدول ۳- میانگین ویژگی‌های شیمیایی خاک در تیمارهای مورد مطالعه.

Table 3. Soil chemical properties in the studied treatments averagely.

OM (%)	CEC (cmol <sup>+</sup> kg <sup>-1</sup> )	EC (dS m <sup>-1</sup> )	pH	تیمار Treatment
1.31 <sup>bc</sup>	19.95 <sup>cd</sup>	2.53 <sup>b</sup>	7.04 <sup>cb</sup>	T1
1.26 <sup>c</sup>	21.15 <sup>cb</sup>	2.66 <sup>a</sup>	6.77 <sup>d</sup>	T2
1.36 <sup>bc</sup>	19.60 <sup>d</sup>	2.41 <sup>bc</sup>	7.24 <sup>a</sup>	T3
1.59 <sup>a</sup>	21.92 <sup>ab</sup>	2.39 <sup>bc</sup>	7.15 <sup>ab</sup>	T4
1.53 <sup>a</sup>	22.76 <sup>a</sup>	2.16 <sup>c</sup>	7.16 <sup>ab</sup>	T5
1.57 <sup>a</sup>	21.50 <sup>ab</sup>	2.51 <sup>b</sup>	7.21 <sup>a</sup>	T6
1.56 <sup>a</sup>	22.06 <sup>ab</sup>	2.48 <sup>b</sup>	7.01 <sup>cb</sup>	T7
1.53 <sup>a</sup>	19.68 <sup>d</sup>	2.39 <sup>bc</sup>	6.94 <sup>c</sup>	T8
1.41 <sup>b</sup>	22.27 <sup>ab</sup>	2.57 <sup>b</sup>	6.89 <sup>cd</sup>	T9

T1، شاهد، T2، گچ؛ T3، سیتریک اسید؛ T4، کود دامی؛ T5، کمپوست؛ T6، مخلوطی از ۵۰٪ گچ + ۵۰٪ کود دامی؛ T7، مخلوطی از ۵۰٪ گچ + ۵۰٪ کود دامی؛ T8، کمپوست؛ T9، مخلوطی از ۵۰٪ سیتریک اسید + ۵۰٪ کود دامی و T9، مخلوطی از ۵۰٪ سیتریک اسید + ۵۰٪ کمپوست می‌باشند.

T1, control, T2, gypsum; T3, citric acid; T4, livestock manure; T5, compost; T6, a mixture of 50% gypsum + 50% livestock manure; T7, a mixture of 50% gypsum + 50% compost; T8, a mixture of 50% citric acid + 50% livestock manure and T9, a mixture of 50% citric acid + 50% compost

در هر ستون حروف غیر هم نام نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح ۵٪ می‌باشد.

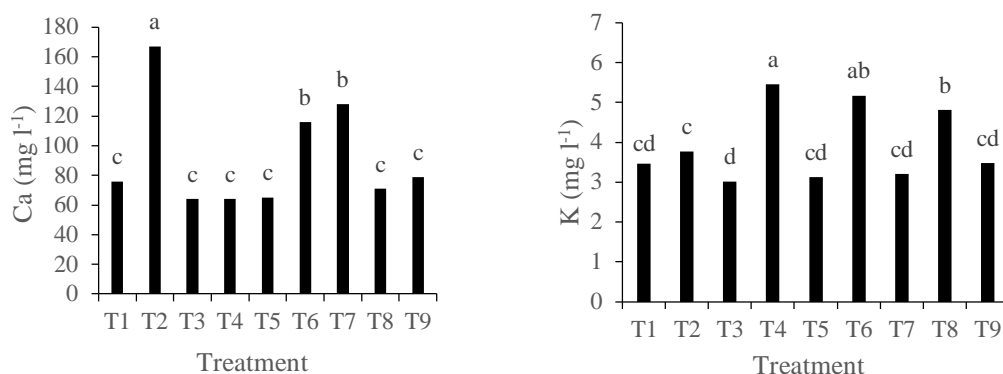
Different lowercase letters indicate significant differences at  $P < 0.05$

آن کاهش یافته است، به طوری که از ۵۷۶/۴۸ میلی‌گرم بر لیتر در نمونه شاهد به ۴۹۷/۳۶ میلی‌گرم بر لیتر در تیمار T8 (۵۰٪ سیتریک اسید + ۵۰٪ کود دامی) رسید، اما این اختلاف معنی‌دار نبود. در این مطالعه به دنبال اعمال اصلاح‌کننده‌ها، مقادیر پتاسیم محلول در مقایسه با تیمار شاهد روند افزایشی داشت. به طوری که از ۳/۴۷ میلی‌گرم بر لیتر در تیمار شاهد به ۵/۴۵ میلی‌گرم بر لیتر در تیمار کود دامی رسید. اما اصلاح‌کننده‌هایی چون کمپوست (T5) و سیتریک (T3) اسید سبب کاهش پتاسیم محلول شدند. کلسیم محلول نیز تحت تأثیر استفاده از اصلاح‌کننده‌ها افزایش یافت، که بیش‌ترین مقدار آن در تیمار گچ (T2) و کم‌ترین مقدار آن در تیمار کود دامی (T4) بود (به ترتیب، ۱۶۷ و ۶۴ میلی‌گرم بر لیتر). شایما و همکاران (۲۰۱۲) گزارش کردند که کاربرد اصلاح‌کننده‌های مختلف در خاک تحت آبیاری با فاضلاب سبب اثرات متفاوتی بر کاتیون‌های محلول می‌شود (۴۲). این پژوهش‌گران دریافتند که به دنبال کاربرد ۵۰٪ گچ + ۵۰٪ کود دامی و ۵۰٪ گچ + ۵۰٪ کمپوست مقدار کلسیم محلول افزایش یافته است. از طرف دیگر، سدیم محلول به‌طور معنی‌داری کاهش یافت اما منیزیم و پتاسیم افزایش کمی داشتند که با نتایج این پژوهش همسو می‌باشد.

مواد آلی (OM): بر اساس اطلاعات به دست آمده، مشاهده شد که میزان OM در تیمارها افزایش معنی‌داری یافته است (جدول ۳). بیش‌ترین میزان OM در تیمار کود دامی و ۵۰٪ گچ + ۵۰٪ کود دامی (T6) و کم‌ترین آن در تیمار گچ (T2) و شاهد (T1) مشاهده شد (به ترتیب، ۱/۵۹، ۱/۵۷، ۱/۲۶ و ۱/۳۱ درصد). مصطفی (۲۰۰۵) نشان دادند که اصلاح خاک با کود دامی سبب افزایش ماده آلی خاک شده است (۴۱).

ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC): همان‌طور که از روند تغییرات CEC بر می‌آید، استفاده از اصلاح‌کننده‌ها در خاک‌های آبیاری شده با پساب در مقایسه با نمونه شاهد سبب افزایش معنی‌دار در CEC شد. به طوری که افزودن کمپوست به خاک سبب افزایش سه واحدی در مقدار CEC گردید (جدول ۳). بیش‌ترین CEC در تیمار کمپوست و کم‌ترین آن مربوط به تیمار اسید سیتریک بود (به ترتیب ۲۲/۷۶ و ۱۹/۶۰ سانتی‌مول بر کیلوگرم).

املاح محلول خاک: نتایج آنالیز آماری نشان داد که کاتیون‌های محلول کلسیم و پتاسیم خاک به‌طور معنی‌داری ( $P \leq 0/05$ ) تحت تأثیر تیمار خاک با اصلاح‌کننده‌ها قرار گرفته است (شکل ۱). نتایج سدیم و منیزیم به دلیل معنی‌دار نبودن گزارش نشده است. اما در مورد سدیم محلول می‌توان بیان کرد که مقدار



شکل ۱- مقایسه میانگین غلظت کلسیم و پتاسیم در تیمارهای مورد مطالعه.

Figure 1. Comparison of mean calcium and potassium concentrations in the studied treatments.

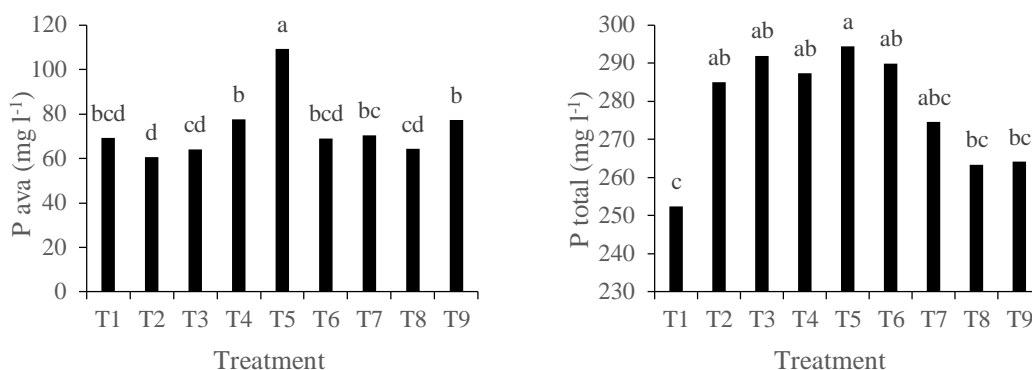
T1، شاهد، T2، گچ؛ T3، سیتریک اسید؛ T4، کود دامی؛ T5، کمپوست؛ T6، مخلوطی از ۵۰٪ گچ + ۵۰٪ کود دامی؛ T7، مخلوطی از ۵۰٪ گچ + ۵۰٪ کمپوست؛ T8، مخلوطی از ۵۰٪ سیتریک اسید + ۵۰٪ کود دامی و T9، مخلوطی از ۵۰٪ سیتریک اسید + ۵۰٪ کمپوست می‌باشند  
**T1, control, T2, gypsum; T3, citric acid; T4, livestock manure; T5, compost; T6, a mixture of 50% gypsum + 50% livestock manure; T7, a mixture of 50% gypsum + 50% compost; T8, a mixture of 50% citric acid + 50% livestock manure and T9, a mixture of 50% citric acid + 50% compost**

در هر ستون حروف غیرهم‌نام نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح ۵٪ می‌باشد

Different lowercase letters indicate significant differences at  $P < 0.05$

فسفر فراهم و کل خاک: نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که استفاده از اصلاح‌کننده‌ها توانسته است میزان تجمع فسفر در خاک را در مقایسه با خاک شاهد به‌طور معنی‌داری ( $P \leq 0.05$ ) افزایش دهد (شکل ۲). روند افزایش فسفر کل در تمام تیمارها از لحاظ آماری معنی‌دار بود و بالاترین میزان آن در تیمار کمپوست، با میانگین ۲۹۴/۴۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم و کم‌ترین میزان آن در نمونه شاهد، با میانگین ۲۵۲/۵۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم مشاهده شد. در مورد فسفر قابل‌جذب می‌توان گفت کاربرد کمپوست، کود دامی و مخلوط ۵۰٪ اسید سیتریک + ۵۰٪ کود دامی (T8) بیش‌ترین تأثیر را در افزایش فسفر فراهم داشتند (به‌ترتیب، ۱۰۹/۲۰، ۷۷/۵۷، ۷۷/۱۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم)، اما کاربرد اصلاح‌کننده‌هایی چون گچ (T2) و اسید سیتریک (T3) سبب کاهش فسفر قابل‌جذب نسبت به نمونه شاهد شدند (به ترتیب، ۶۰/۷۲ و ۶۴/۰۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم). با توجه به این که توان تحرک و پخش فسفر در خاک کم است، در استفاده درازمدت از پساب برای آبیاری اراضی، موضوع انباشته شدن فسفر باید در نظر گرفته شود (۴۴)، بنابراین ممکن است استفاده از گچ و سیتریک اسید، تجمع فسفر در خاک را کاهش دهد. از طرفی در شرایط کشاورزی متمرکز، میزان برداشت فسفر از خاک بالا است و این روند سبب کمبود گسترده فسفر در خاک می‌شود (۴۵)، به همین دلیل سالانه مقادیر زیادی کودهای شیمیایی فسفردار به خاک اضافه می‌شود، بنابراین استفاده از اصلاح‌کننده‌هایی مانند کمپوست و کود دامی می‌تواند نیاز به استفاده از این کودها را کاهش دهد و همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد تأثیر کاربرد کمپوست و کود دامی بر فسفر فراهم خاک بیش‌تر بوده است که این امر نتیجه مطلوبی برای برطرف کردن نیاز گیاهان می‌باشد.

فسفر فراهم و کل خاک: نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که استفاده از اصلاح‌کننده‌ها توانسته است میزان تجمع فسفر در خاک را در مقایسه با خاک شاهد به‌طور معنی‌داری ( $P \leq 0.05$ ) افزایش دهد (شکل ۲). روند افزایش فسفر کل در تمام تیمارها از لحاظ آماری معنی‌دار بود و بالاترین میزان آن در تیمار کمپوست، با میانگین ۲۹۴/۴۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم و کم‌ترین میزان آن در نمونه شاهد، با میانگین ۲۵۲/۵۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم مشاهده شد. در مورد فسفر قابل‌جذب می‌توان گفت کاربرد کمپوست، کود دامی و مخلوط ۵۰٪ اسید سیتریک + ۵۰٪ کود دامی (T8) بیش‌ترین تأثیر را در افزایش فسفر فراهم داشتند (به‌ترتیب، ۱۰۹/۲۰، ۷۷/۵۷، ۷۷/۱۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم)، اما کاربرد اصلاح‌کننده‌هایی چون گچ (T2) و اسید سیتریک (T3) سبب کاهش فسفر قابل‌جذب نسبت به نمونه شاهد شدند (به ترتیب، ۶۰/۷۲ و ۶۴/۰۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم). با توجه به این که توان تحرک و پخش فسفر در خاک کم است، در استفاده درازمدت از پساب برای آبیاری اراضی، موضوع انباشته شدن فسفر باید در نظر گرفته شود (۴۴)، بنابراین ممکن است استفاده از گچ و سیتریک اسید، تجمع فسفر در خاک را کاهش دهد. از طرفی در شرایط کشاورزی متمرکز، میزان برداشت فسفر از خاک بالا است و این روند سبب کمبود گسترده فسفر در خاک می‌شود (۴۵)، به همین دلیل سالانه مقادیر زیادی کودهای شیمیایی فسفردار به خاک اضافه می‌شود، بنابراین استفاده از اصلاح‌کننده‌هایی مانند کمپوست و کود دامی می‌تواند نیاز به استفاده از این کودها را کاهش دهد و همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد تأثیر کاربرد کمپوست و کود دامی بر فسفر فراهم خاک بیش‌تر بوده است که این امر نتیجه مطلوبی برای برطرف کردن نیاز گیاهان می‌باشد.



شکل ۲- مقایسه میانگین فسفر قابل جذب و فسفر کل.

Figure 2. Comparison mean of the absorbable phosphorus and total phosphorus.

T1، شاهد، T2، گچ؛ T3، سیتریک اسید؛ T4، کود دامی؛ T5، کمپوست؛ T6، مخلوطی از ۵۰٪ گچ + ۵۰٪ کود دامی؛ T7، مخلوطی از ۵۰٪ گچ + ۵۰٪ کمپوست؛ T8، مخلوطی از ۵۰٪ سیتریک اسید + ۵۰٪ کود دامی و T9، مخلوطی از ۵۰٪ سیتریک اسید + ۵۰٪ کمپوست می‌باشند  
**T1, control, T2, gypsum; T3, citric acid; T4, livestock manure; T5, compost; T6, a mixture of 50% gypsum + 50% livestock manure; T7, a mixture of 50% gypsum + 50% compost; T8, a mixture of 50% citric acid + 50% livestock manure and T9, a mixture of 50% citric acid + 50% compost**

در هر ستون حروف غیرهم‌نام نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح ۵٪ می‌باشد  
**Different lowercase letters indicate significant differences at  $P < 0.05$**

مقایسه میانگین غلظت عناصر سنگین با حدود معمول و بحرانی عناصر سنگین در خاک (جدول ۴) مشخص شد که غلظت کل و فراهم عناصر سنگین در حد مجاز بوده است.

غلظت قابل جذب و کل عناصر کم مصرف و فلزات سنگین: در جدول ۴ حد بحرانی و غلظت معمول برخی عناصر سنگین در خاک گزارش شده است (۴۵). در جدول‌های ۵ و ۶ نیز به ترتیب غلظت کل و قابل جذب عناصر سنگین در این مطالعه آمده است. با

جدول ۴- حدود غلظت طبیعی و بحرانی برخی فلزات سنگین (میلی‌گرم بر کیلوگرم) در خاک.

Table 4. Limits of natural and critical concentrations of some heavy metals (mg kg<sup>-1</sup>) in soil (Kabata – Pendias and Pendias, 1992).

غلظت معمول Normal Concentration	غلظت بحرانی Critical Concentration	عنصر Element
1-900	70-400	Zn
-	-	Fe
100-400	-	Mn
2-25	20-100	Cu
2-100	200	Ni
0.01-2	3-8	Cd
2-300	100-400	Pb

(کمپوست) بیش‌ترین اثر را بر افزایش مس فراهم خاک داشت (به ترتیب، ۱/۶۳، ۱/۶۲ و ۱/۶۱ میلی‌گرم در کیلوگرم)، اختلاف بین سه تیمار نامبرده معنی‌دار نبوده است. اسمیت (۱۹۹۲) بیان کرده، که مقدار مس قابل‌جذب در خاک‌ها متناسب با مقدار pH خاک می‌باشد و رسوب مس به صورت هیدروکسیدها، کربنات‌های نامحلول و کمپلکس‌های آلی با افزایش pH خاک افزایش می‌یابد (۴۷)، اما نتایج این پژوهش روند متفاوتی را نشان داد و بر خلاف افزایش pH خاک، فراهمی عناصر سنگین کاهش نیافت.

**منگنز (Mn):** نتایج مقایسه میانگین تغییرات غلظت منگنز کل در جدول ۵ آمده است. چنان‌چه مشاهده می‌شود با کاربرد اصلاح‌کننده‌ها غلظت منگنز در تیمارها افزایش یافت، به طوری که حداکثر غلظت منگنز کل در تیمار ۵۰٪ اسید سیتریک + ۵۰٪ کمپوست (T9) با میانگین ۲۱۸/۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم اندازه‌گیری شد. اما کاربرد گچ در خاک سبب کاهش غلظت کل منگنز در خاک گردید و غلظت آن از ۲۰۶/۵۲ میلی‌گرم در کیلوگرم در تیمار شاهد به ۲۰۰/۵۳ میلی‌گرم در کیلوگرم تغییر کرده است که البته این تغییر معنی‌دار نیست. غلظت قابل‌جذب منگنز در تیمارها نیز در جدول ۶ ارائه شده است که از ۷/۹۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم مربوط به تیمار ۵۰٪ سیتریک اسید + ۵۰٪ کود دامی (T8) تا ۶/۵۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم مربوط به تیمار اسید سیتریک (T3) متغیر بود. بنابراین می‌توان گفت که میزان منگنز فراهم تنها تحت‌تأثیر اسید سیتریک به کار رفته در خاک قرار گرفته و با کاربرد آن در خاک، منگنز فراهم به طور معنی‌داری کاهش یافت.

**روی (Zn):** تغییرات غلظت روی کل ناشی از اعمال تیمارهای مورد مطالعه در جدول ۵ آمده است. چنان‌که مشاهده می‌شود غلظت روی کل در همه تیمارها به استثناء تیمار گچ روند افزایشی نشان داد، که این افزایش از لحاظ آماری معنی‌دار بود. بیش‌ترین

آهن (Fe): نتایج مقایسه میانگین تغییرات غلظت آهن کل در جدول ۵ آمده است. چنان‌چه مشاهده می‌شود با کاربرد اصلاح‌کننده‌ها در خاک غلظت آهن کل در تیمارها افزایش یافت. حداکثر غلظت آهن در تیمار ۵۰٪ اسید سیتریک + ۵۰٪ کمپوست (T9) با میانگین ۲۷۵۵۰/۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم به دست آمد. حداقل غلظت آن نیز در تیمار شاهد با میانگین ۲۴۵۹۸/۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم به دست آمد. غلظت آهن فراهم نیز در جدول ۶ آمده است. چنان‌چه مشاهده می‌شود کاربرد اصلاح‌کننده‌ها در خاک در همه موارد تأثیر معنی‌داری بر غلظت آهن فراهم خاک در مقایسه با تیمار شاهد داشت به طوری که غلظت آن از ۷/۶۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم در تیمار شاهد به ۱۰/۵۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم در تیمار ۵۰٪ اسید سیتریک + ۵۰٪ کمپوست (T9) رسید. چرم و آقای (۲۰۰۶) بیان کردند که مقدار آهن قابل‌جذب در خاک، به ویژه در خاک آهکی، از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است، زیرا کمبود آهن از مهمترین مشکلات تغذیه گیاهان در خاک‌های آهکی است (۴۶).

**مس (Cu):** غلظت مس کل در تیمارهای مورد مطالعه در جدول ۵ آمده است. با توجه به اطلاعات به دست آمده ملاحظه می‌شود که میزان مس کل در تیمارها با کاربرد اصلاح‌کننده‌ها روند افزایشی نسبت به تیمار شاهد نشان داد، که این افزایش از لحاظ آماری معنی‌دار بود. کم‌ترین میزان مس کل در تیمار شاهد با میانگین ۱۳/۸۴ میلی‌گرم در کیلوگرم و بیش‌ترین مقدار آن در تیمار T7 (۵۰٪ گچ + ۵۰٪ کمپوست) با میانگین ۱۴/۹۳ میلی‌گرم در کیلوگرم به دست آمد. غلظت قابل‌جذب مس در تیمارها نیز در جدول ۶ ارائه شده است. نتایج به دست آمده نشان داد که کاربرد اصلاح‌کننده‌ها نیز افزایش معنی‌داری بر غلظت قابل‌جذب مس در خاک‌ها داشته است. در بین اصلاح‌کننده‌ها، تیمار T9 (۵۰٪ سیتریک اسید + ۵۰٪ کمپوست)، تیمار T7 (۵۰٪ گچ + ۵۰٪ کمپوست) و T5

۲/۲۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم مربوط به تیمار اسید سیتریک، تا ۲/۸۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم مربوط به تیمار کمپوست متغیر بود. این نشان می‌دهد که میزان روی فراهم تحت تأثیر کاربرد اصلاح‌کننده‌ها در خاک قرار گرفته و با کاربرد اصلاح‌کننده‌ها در تیمارها، روی فراهم به طور معنی‌داری افزایش یافت. به طور کلی نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که افزایش روی فراهم برای گیاه، نسبت به روی کل در تیمارهای آزمایشی بیش‌تر تحت تأثیر کاربرد اصلاح‌کننده‌ها بود، که این امر احتمالاً به دلیل میزان بالای سدیم در پساب به کار رفته بوده است. بررسی‌های کلباسی و همکاران (۱۹۷۸) نشان داد که در خاک‌های آهکی روی به صورت کربنات روی رسوب کرده و از دسترس گیاه خارج می‌شود. به همین دلیل کمبود روی قابل جذب نیز یکی دیگر از مشکلات تغذیه گیاه در خاک آهکی است. پس کاربرد کمپوست می‌تواند تا حد زیادی در رفع این کمبود مؤثر باشد (۵۰).

غلظت روی در تیمار T9 (۵۰٪ سیتریک اسید + ۵۰٪ کمپوست) و T7 (۵۰٪ گچ + ۵۰٪ کمپوست) و کم‌ترین آن در تیمار T2 (گچ) مشاهده شد که این اختلاف معنی‌دار است (به ترتیب، ۸۰/۲۳، ۸۰/۴۹ و ۷۴/۶۲ میلی‌گرم در کیلوگرم). این در حالی است که غلظت روی کل در تیمار شاهد ۷۵/۵۴ بود. صابر (۱۹۸۶) نشان داده است که با افزایش سال‌های آبیاری با فاضلاب، اندازه روی کل در خاک‌های شهر قاهره افزایش می‌یابد (۴۸)، هم‌چنین جمالی و همکاران (۲۰۰۹) دریافتند که کاربرد کمپوست ضایعات جامد شهری در خاک می‌تواند میزان روی کل را در خاک‌های تیمار شده نسبت به خاک شاهد به طور معنی‌داری افزایش دهد (۴۹). از این رو ممکن است کاربرد گچ در خاک، در طولانی‌مدت اثربخش باشد و سبب جلوگیری از تجمع روی در خاک‌های آبیاری شده با پساب صنعتی گردد. غلظت روی قابل جذب در تیمارها نیز در جدول ۶ ارائه شده است که از

جدول ۵- میانگین غلظت کل فلزات سنگین در تیمارهای مورد مطالعه (میلی‌گرم بر کیلوگرم).

Table 5. Average total concentrations of heavy metals in the studied treatments (m.g kg<sup>-1</sup>).

عناصر کم‌مصرف				عناصر سمی			تیمار
Fe	Cu	Mn	Zn	Cd	Ni	Pb	Treatments
24598.8 <sup>e</sup>	13.84 <sup>c</sup>	206.52 <sup>cb</sup>	75.54 <sup>cb</sup>	1.14 <sup>cab</sup>	100.59 <sup>cab</sup>	69.75 <sup>a</sup>	T1
25126.4 <sup>ed</sup>	14.00 <sup>cb</sup>	200.53 <sup>c</sup>	74.62 <sup>c</sup>	1.12 <sup>cd</sup>	98.95 <sup>cab</sup>	69.32 <sup>a</sup>	T2
26007.8 <sup>cb</sup>	14.49 <sup>ab</sup>	217.69 <sup>a</sup>	75.73 <sup>cb</sup>	1.16 <sup>ab</sup>	102.16 <sup>a</sup>	71.16 <sup>a</sup>	T3
26106.2 <sup>cb</sup>	14.41 <sup>b</sup>	210.63 <sup>cab</sup>	77.77 <sup>cab</sup>	1.16 <sup>ab</sup>	101.14 <sup>ab</sup>	70.74 <sup>a</sup>	T4
25892.3 <sup>cd</sup>	14.38 <sup>b</sup>	203.71 <sup>cb</sup>	78.71 <sup>ab</sup>	1.14 <sup>cab</sup>	100.22 <sup>cab</sup>	70.01 <sup>a</sup>	T5
26479.9 <sup>cb</sup>	14.53 <sup>ab</sup>	209.11 <sup>cab</sup>	77.37 <sup>cab</sup>	1.11 <sup>cd</sup>	98.57 <sup>cab</sup>	70.39 <sup>a</sup>	T6
26067.3 <sup>cb</sup>	14.93 <sup>a</sup>	211.93 <sup>ab</sup>	80.23 <sup>a</sup>	1.10 <sup>d</sup>	98.42 <sup>cab</sup>	70.55 <sup>a</sup>	T7
26827.6 <sup>ab</sup>	14.26 <sup>cb</sup>	213.81 <sup>ab</sup>	76.26 <sup>cb</sup>	1.13 <sup>cd</sup>	94.66 <sup>c</sup>	69.42 <sup>a</sup>	T8
27550.7 <sup>a</sup>	14.52 <sup>ab</sup>	218.62 <sup>a</sup>	80.49 <sup>a</sup>	1.17 <sup>a</sup>	95.54 <sup>cb</sup>	69.26 <sup>a</sup>	T9

T1، شاهد، T2، گچ؛ T3، سیتریک اسید؛ T4، کود دامی؛ T5، کمپوست؛ T6، مخلوطی از ۵۰٪ گچ + ۵۰٪ کود دامی؛ T7، مخلوطی از ۵۰٪ گچ + ۵۰٪ کمپوست؛ T8، مخلوطی از ۵۰٪ سیتریک اسید + ۵۰٪ کود دامی و T9، مخلوطی از ۵۰٪ سیتریک اسید + ۵۰٪ کمپوست می‌باشند

T1, control, T2, gypsum; T3, citric acid; T4, livestock manure; T5, compost; T6, a mixture of 50% gypsum + 50% livestock manure; T7, a mixture of 50% gypsum + 50% compost; T8, a mixture of 50% citric acid + 50% livestock manure and T9, a mixture of 50% citric acid + 50% compost

در هر ستون حروف غیرهم‌نام نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح ۵٪ می‌باشد

Different lowercase letters indicate significant differences at  $P < 0.05$



جدول ۶- میانگین غلظت فراهم فلزات سنگین در تیمارهای مورد مطالعه (میلی‌گرم در کیلوگرم).

**Table 6. Average concentration of heavy metals available in the studied treatments (mg kg<sup>-1</sup>).**

عناصر سمی			عناصر کم‌مصرف				تیمار
Cd	Ni	Pb	Fe	Cu	Mn	Zn	Treatments
0.127 <sup>c</sup>	2.15 <sup>e</sup>	10.24 <sup>b</sup>	7.68 <sup>e</sup>	1.44 <sup>c</sup>	6.82 <sup>cd</sup>	2.27 <sup>c</sup>	T1
0.142 <sup>a</sup>	2.83 <sup>cb</sup>	11.39 <sup>a</sup>	8.32 <sup>de</sup>	1.49 <sup>cb</sup>	7.04 <sup>cd</sup>	2.36 <sup>bc</sup>	T2
0.122 <sup>c</sup>	2.55 <sup>d</sup>	11.25 <sup>a</sup>	8.61 <sup>d</sup>	1.47 <sup>c</sup>	6.52 <sup>e</sup>	2.23 <sup>c</sup>	T3
0.130 <sup>cb</sup>	2.61 <sup>cd</sup>	11.24 <sup>a</sup>	9.11 <sup>cd</sup>	1.44 <sup>c</sup>	7.38 <sup>cb</sup>	2.37 <sup>bc</sup>	T4
0.127 <sup>c</sup>	2.88 <sup>ab</sup>	11.78 <sup>a</sup>	9.53 <sup>cb</sup>	1.61 <sup>a</sup>	7.42 <sup>cb</sup>	2.81 <sup>a</sup>	T5
0.142 <sup>a</sup>	3.04 <sup>ab</sup>	11.70 <sup>a</sup>	9.74 <sup>cab</sup>	1.56 <sup>ab</sup>	7.37 <sup>cb</sup>	2.42 <sup>b</sup>	T6
0.137 <sup>ab</sup>	2.95 <sup>ab</sup>	11.43 <sup>a</sup>	10.05 <sup>ab</sup>	1.62 <sup>a</sup>	7.72 <sup>ab</sup>	2.74 <sup>a</sup>	T7
0.130 <sup>cb</sup>	3.06 <sup>ab</sup>	11.54 <sup>a</sup>	10.17 <sup>ab</sup>	1.57 <sup>ab</sup>	7.92 <sup>a</sup>	2.41 <sup>b</sup>	T8
0.137 <sup>ab</sup>	3.12 <sup>a</sup>	11.87 <sup>a</sup>	10.59 <sup>a</sup>	1.63 <sup>a</sup>	7.61 <sup>ab</sup>	2.71 <sup>a</sup>	T9

T1، شاهد، T2، گچ؛ T3، سیتریک اسید؛ T4، کود دامی؛ T5، کمپوست؛ T6، مخلوطی از ۵۰٪ گچ + ۵۰٪ کود دامی؛ T7، مخلوطی از ۵۰٪ گچ +

۵۰٪ کمپوست؛ T8، مخلوطی از ۵۰٪ سیتریک اسید + ۵۰٪ کود دامی و T9، مخلوطی از ۵۰٪ سیتریک اسید + ۵۰٪ کمپوست می‌باشند

T1, control, T2, gypsum; T3, citric acid; T4, livestock manure; T5, compost; T6, a mixture of 50% gypsum + 50% livestock manure; T7, a mixture of 50% gypsum + 50% compost; T8, a mixture of 50% citric acid + 50% livestock manure and T9, a mixture of 50% citric acid + 50% compost

در هر ستون حروف غیرهم‌نام نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح ۵٪ می‌باشد.

Different lowercase letters indicate significant differences at  $P < 0.05$

دامی و گچ + کمپوست می‌تواند در کاهش میزان کادمیوم اثر بخش باشد. غلظت قابل جذب کادمیوم در تیمارها نیز در جدول ۶ ارائه شده است که از ۰/۱۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم مربوط به تیمار سیتریک اسید، تا ۰/۱۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم مربوط به تیمار گچ متغیر بود. در همین راستا می‌توان گفت که میزان کادمیوم فراهم به شدت تحت تأثیر اصلاح‌کننده‌ها در خاک قرار گرفته و با اصلاح‌کننده‌ها در تیمارها، کادمیوم فراهم به طور معنی‌داری افزایش یافت. عنصر کادمیوم یک عنصر سمی است و روند افزایشی آن مطلوب نیست. به‌طورکلی قابلیت استفاده کادمیوم خاک تحت تأثیر مقدار و منشأ کادمیوم، pH، مقدار ماده آلی، مقدار و نوع رس، رقابت سایر عناصر به ویژه روی، CEC و شوری می‌باشد (۵۲ و ۵۳). با وجود این که pH مهم‌ترین عامل کنترل‌کننده غلظت کادمیوم خاک محسوب شده و به نظر می‌رسد در خاک‌های آهکی و

**کادمیوم (Cd):** مقایسه میانگین غلظت کادمیوم کل در تیمارهای مورد مطالعه در جدول ۵ آمده است. با توجه به اطلاعات به دست آمده ملاحظه می‌شود که میزان کادمیوم کل در برخی تیمارها روند کاهشی نشان داد. بیش‌ترین تأثیر در کاهش میزان کادمیوم کل در تیمار ۵۰٪ گچ + ۵۰٪ کمپوست با میانگین ۱/۱۰ میلی‌گرم در کیلوگرم مشاهده شد. اما تیمار ۵۰٪ اسید سیتریک + ۵۰٪ کمپوست سبب افزایش غلظت کادمیوم کل خاک تا ۱/۱۷ میلی‌گرم در کیلوگرم شد. صابر (۱۹۸۶) و سبیه (۱۹۹۴) با مطالعه تجمع عناصر سنگین در خاک‌های آبیاری شده با فاضلاب نتیجه گرفتند که عناصر سنگین از جمله کادمیوم در افق شخم خاک تجمع می‌یابند و بعد از مدت طولانی غلظت این عناصر ۳ تا ۶ برابر بیش‌تر از مقدار آن‌ها در خاک‌های تحت آبیاری با آب معمولی می‌شود (۴۷ و ۵۱). بنابراین کاربرد مخلوطی از گچ + کود

معنی‌دار نبود. با این وجود کاربرد ۵۰٪ اسید سیتریک + ۵۰٪ کود دامی (T8) و ۵۰٪ اسید سیتریک + ۵۰٪ کمپوست (T9) بیش‌ترین تأثیر را در کاهش میزان نیکل کل در مقایسه با تیمار شاهد داشت (به ترتیب، ۹۴/۶۶، ۹۵/۵۴ و ۱۰۰/۵۹ میلی‌گرم در کیلوگرم). این در حالی است که کاربرد اسید سیتریک سبب افزایش نیکل کل در خاک گردید (۱۰۲/۱۶ میلی‌گرم در کیلوگرم). غلظت نیکل فراهم نیز در جدول ۶ آمده است. چنان‌چه مشاهده می‌شود کاربرد اصلاح‌کننده‌ها در خاک در همه تیمارها تأثیر معنی‌داری بر غلظت نیکل فراهم در خاک داشته است و روند افزایشی را نشان داد. در بین تیمارها ۵۰٪ سیتریک اسید + ۵۰٪ کمپوست (T9) بیش‌ترین و اسید سیتریک (T3) کم‌ترین تأثیر را در افزایش غلظت قابل‌جذب نیکل داشتند (به ترتیب، ۳/۱۲ و ۲/۵۵ میلی‌گرم در کیلوگرم).

### نتیجه‌گیری کلی

از بین ویژگی‌های شیمیایی مورد مطالعه فاضلاب تصفیه شده، شاخص‌های قابلیت هدایت الکتریکی، غلظت کل املاح محلول، غلظت آنیون‌های کلر و بی‌کربنات و غلظت کاتیون سدیم جهت استفاده از پساب برای آبیاری محدودکننده بودند. از آنجایی که پساب مورد استفاده جزء آب‌های نامناسب با سدیم بالا و شوری زیاد بود، کاربرد اصلاح‌کننده‌هایی مانند کمپوست (T5)، کود دامی (T4) و ۵۰٪ اسید سیتریک + ۵۰٪ کود دامی (T8) در خاک تحت آبیاری با پساب می‌تواند شوری خاک را کاهش دهد. کاربرد اصلاح‌کننده‌های گچ (T2)، کود دامی (T4)، کمپوست (T5)، مخلوطی از ۵۰٪ گچ + ۵۰٪ کمپوست (T7) و ... در خاک سبب افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی، ماده آلی، کاتیون‌های محلول کلسیم، پتاسیم و فسفر کل و قابل‌جذب شد. اگرچه کاربرد اصلاح‌کننده‌ها در خاک، باعث افزایش معنی‌دار غلظت

قلیایی، غلظت کادمیوم محلول خاک ناچیز باشد، ولی نتایج بررسی‌های متعدد نشان داده است که نقش شوری در افزایش حلالیت کادمیوم می‌تواند مهم‌تر از نقش pH باشد (۵۴). در خاک‌های شور، به دلایل بسیاری از جمله تشکیل کمپلکس‌های کادمیوم و کلر و نیز تبادل سدیم با کادمیوم در محل‌های جذب سطحی ذرات جامد خاک، حلالیت کادمیوم و قابلیت جذب آن به وسیله گیاه افزایش می‌یابد (۵۱). بنابراین می‌توان گفت خطر انباشته شدن کادمیوم در گیاهانی که در خاک‌های شور کشت می‌شوند وجود دارد. که این امر با نتایج این پژوهش همخوانی دارد و همان‌طور که مشاهده شد کاربرد گچ در تیمارها سبب افزایش شوری خاک گردید.

**سرب (Pb):** نتایج مقایسه میانگین تغییرات غلظت سرب کل در جدول ۵ آمده است. همان‌طور که نشان داده شده است، کاربرد اصلاح‌کننده‌ها در خاک در برخی موارد سبب کاهش میزان سرب کل در خاک شده است. هر چند این تفاوت از لحاظ آماری معنی‌دار نبود، اما تیمار اسید سیتریک (T3) و کود دامی (T4) سبب افزایش میزان نیکل کل در مقایسه با نمونه شاهد شد. غلظت سرب فراهم نیز در جدول ۶ آمده است. چنان‌چه مشاهده می‌شود با کاربرد اصلاح‌کننده‌ها در خاک غلظت سرب فراهم در تیمارها در مقایسه با تیمار شاهد افزایش یافت. اما تفاوت معنی‌داری بین اصلاح‌کننده‌ها مشاهده نشد. با این وجود کاربرد ۵۰٪ اسید سیتریک + ۵۰٪ کمپوست (T9) بیش‌ترین تأثیر و کود دامی کم‌ترین تأثیر را در افزایش غلظت سرب فراهم خاک داشت (به ترتیب، ۱۱/۸۷ و ۱۱/۲۴ میلی‌گرم در کیلوگرم).

**نیکل (Ni):** نتایج مقایسه میانگین مربوط به نیکل کل در جدول ۵ آمده است. چنان‌چه مشاهده می‌شود نیکل کل با کاربرد اصلاح‌کننده‌ها در خاک در بیش‌تر موارد کاهش یافت، اما این کاهش از لحاظ آماری

فلزات سنگین از حدود بحرانی آن‌ها در خاک کم‌تر بود و بدین لحاظ کاربرد آن، دست کم در یک دوره کوتاه‌مدت تأثیر سوئی بر خاک نخواهد داشت.

کل و قابل‌جذب برخی از فلزات سنگین مانند کادمیوم، روی و نیکل در تیمارهای مورد بررسی در این پژوهش گردید، ولی غلظت کل و قابل‌جذب

#### منابع

1. Gosling, S.N., and Arnell, N.W. 2016. A global assessment of the impact of climate change on water scarcity. *Climatic Change*. 134: 3. 371-385.
2. Rizzo, L., Gernjak, W., Krzeminski, P., Malato, S., McArdell, C.S., Perez, J.A.S., Schaar, H., and Fatta-Kassinos, D. 2020. Best Available Technologies and Treatment Trains to Address Current Challenges in Urban Wastewater Reuse for Irrigation of Crops in EU Countries. *Science of the Total Environment*. 710: Article ID: 136312 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136312>.
3. Hayssam, M.A., Sayed, M.M., Fatma, A.H., and Mohamed, A.T. 2011. Usage of sewage effluent in irrigation of some woody tree seedlings. part3: *Swietenia mahagoni* (L.) Jacq. *Saudi j. Biological Sciences*. 18: 201-207.
4. Brenner, A., Shandalov, S., Messalem, R., Yakirevich, A., Oron, G., and Rebhun, M. 2000. Wastewater reclamation for agricultural reuse in Israel: trends and experimental results. *Water, Air and Soil Pollution*. 123: 167-182.
5. Bahri, A. 1999. Agricultural reuse of wastewater and global water management. *Water Science and Technology*. 40: 4-5. 339-346.
6. Chenini, F., Xanthoulis, D., Rejeb, S., Molle, B., and Zayani, K. 2001. Impact of using reclaimed wastewater on trickle and furrow irrigated potatoes. P. 174-186. In: R. Ragab, R.G. Pearce, J. Changkim, S. Nairiz, and A. Hamdy, A. (eds.), *ICID International Workshop on Wastewater Reuse and Management*, Seoul, Korea.
7. Anon. 1992. *Wastewater treatment and use agriculture*. Food and agriculture organization of the United Nations, Rome, FAO. No. 47.
8. Hoseynian, M. 1996. *Principle of liquidators of municipal sewage*. Shahr-e Ab Pub, Tehran, 351p. (In Persian)
9. Metcalf and Eddy. 2003. *Wastewater Engineering, Treatment and Reuse* 4<sup>th</sup> ed. McGraw-Hill International Editions, New York, 1846p.
10. Jian, X., Laosheng, W., Andrew, C.C., and Yuan, Z. 2010. Impact of long term reclaimed wastewater irrigation on agricultural soils: A preliminary Assessment. *Journal of Hazardous Materials*. 183: 780-786.
11. Bouwer, H. 2000. Integrated water management: Emerging issues and challenges. *Agricultural Water Management*. 45: 217-228.
12. DWA. 2019. *DWA Topics Non-Potable Water Reuse Development, Technologies and International Framework for Agricultural, Urban and Industrial Uses*. DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft (eds).
13. Helmecke, M., Fries, E., and Schulte, C. 2020. Regulating water reuse for agricultural irrigation: risks related to organic micro-contaminants. *Environmental Sciences Europe*, 32: 1. 1-10.
14. Smith, D., Sedlak, D., Dower, R., Archuleta, E., Mosher, J.U.S., EPA (United States Environmental Protection Agency). 2018. *Mainstreaming potable water reuse in the United States: Strategies for levelling the playing field*. Final Report on a Workshop organized by the U.S. Environmental Protection Agency, in partnership with the Reinventing the Nation's Urban Water Infrastructure research consortium and The Johnson Foundation at Wingspread on October 25-27, 2017.
15. Cid, B.P., De, M., Gonzalez, J., and Gomez, E.F. 2002. *Analyst*. 126: 1304-1311.
16. Miller, E.L., Nason, S.L., Karthikeyan, K.G., and Pedersen, J.A. 2016. *Root Uptake of Pharmaceuticals and Personal*

- Care Product Ingredients. *Environmental Science and Technology*. 50: 2. 525-541.
17. Sharma, R.K., Madhoolika, A., and Fiona, M. 2007. Heavy metal contamination of soil and vegetables in suburban areas of Varanasi, India. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 66: 258-266.
  18. Devkota, B., and Schmidt, G.H. 2000. Accumulation of heavy metals in food plants and grasshoppers from the Taigetos Mountains, Greece. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 78: 85-91.
  19. Alloway, B.J. 1995. Heavy metals in soils. Blackie, London, 597p.
  20. Agarwal, S.K. 2002. Pollution management: water pollution. A.P.H. publ New Delhi. 384p.
  21. Moraetis, D., Stamati, F.E., Nikolaidis, N.P., and Kalogerakis, N. 2011. Olive mill wastewater irrigation of maize: impacts on soil and groundwater. *Agricultural Water Management*. 98: 1125-1132.
  22. Shaimaa, H., Abd Elrahman, M.A.M., Mostafa, T.A., Taha. M.A.O., and Elsharawy, M.A. 2012. Effect of different amendments on soil chemical characteristics, grain yield and elemental content of wheat plants grown on salt-affected soil irrigated with low quality water. *Annals of Agricultural Sciences*. 57: 2. 175-182.
  23. Xie, M., Kuffner, U., and Le Moigne, G. 1993. Using water efficiently: technological options. The World Bank.
  24. Escontria, M.C. 1999. A Strategy for water reuse in farm irrigation. In: Seventeenth Congress on Irrigation and drainage. Int Commission on Irrigation and Drain Granda, Spain. ICID, (IG). pp. 121-135.
  25. Rowell, D.L. 1994. Soil science methods and Application. part7. Measurement of the composition of soil solution. 146p.
  26. Roades, J.D. 1996. Salinity: electrical conductivity and total dissolved solids, P 417-436. In D.L. Sparks, A.L. Page, P.A. Helmke, R.H. Loeppert, P.N. Soltanpour, M.A. Tabatabai, C.T. Johnston, M.E. Sumner, (eds) Method of soil analysis, press: chemical methods. Madison. Wisconsin, USA.
  27. Thomas, G.W. 1996. Soil pH and soil acidity in methods of soil analysis. P 475-490. In: A. Klute, (ed). Part 3. Chemical methods. Madison, Wisconsin, USA.
  28. Sims, J.T. 1996. Lime requirement, P 491. In D.L. Sparks, A.L. Page, P.A. Helmke, R.H. Loeppert, P.N. Soltanpour, M.A. Tabatabai, C.T. Johnston, M.E. Sumner, (eds), Method of soil analysis, parts: chemical methods. Madison, Wisconsin. USA.
  29. Walkley, A., and Black, I.A. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Journal Soil Science*. 37: 1. 29-38.
  30. Rowell, D.L. 1994. Soil science methods and Application. part7. Measurement of the composition of soil solution. 146p.
  31. Ann, Y., Reddy, K.R., and Delfino, J.J. 2000. Influence of chemical amendments on phosphorus immobilization in soils from a constructed wetland. *Ecological Engineering*. 14: 157-167.
  32. Olsen, S.R., and Sommers, L.E. 1982. Phosphorus. P 403-430. In A.L. Page, (eds.), Methods of Soil Analysis. Part 2 Agronomy Monograph 9. ASA and Soil Science Society of America, Madison, WI.
  33. Sposito, G., Lund, L.J., and Chang, A.C. 1982. Trace metal chemistry in arid zone field soils amended with sewage sludge, I.: Fractionation of Ni, Cu, Zn, Cd, and Pb in solid phases. *Soil Science Society of America Journal*. 46: 260-264.
  34. Page, A.L., Miller, R.H., and Keeney, D.R. 1982. The Methods of Soil Analysis part 2: Chemical and Microbiological Properties. Second Edition. Soil Science Society of America. Inc. Madison.
  35. FAO. 1985. Water Quality of Agriculture. Ayers, R.S. and Westcott, D.W. Irrigation and Drainage. Paper 29, Rev. FAO, Rome, 174.
  36. Ayers, R.S., and Westcot, D.E.W. 1985. Water Quality for Agriculture. 29 Rev. 1, FAO, Rome.

37. Pescod, M.B. 1992. Wastewater treatment and use in agriculture. FAO, Irrigation and Drainage Paper No. 47.
38. Feigin, A., Ravina, I., and Shalhevet, J. 2012. Irrigation with treated sewage effluent: management for environmental protection (Vol. 17). Springer Science & Business Media.
39. Bohn, H.L., Myer, R.A., and O'Connor, G.A. 2002. Soil chemistry. John Wiley & Sons.
40. Robbins, C.W. 1986. Sodic calcareous soil reclamation as affected by different amendment and crops. *Agronomy Journal*. 78: 916-920.
41. Moustafa, F.A.F. 2005. Studies on reclamation of saline sodic soils. PhD Thesis, Fac. Agric., Benha Univ., Egypt, pp. 35-60.
42. Sekhon, B.S., and Bejawa, M.S. 1993. Effect of organic matter and gypsum in controlling soil sodicity in rice-wheat-maize system irrigated with sodic water. *Indian Agriculture Water Management*. 24: 15-25.
43. Beheiry, G., and Soliman, A.A. 2005. Wheat productivity in previously organic treated calcareous soil irrigated with saline water. *Egyptian Journal of Applied Sciences*. 20: 363-376.
44. Bolt, G.H., and Bruggenwert, M.G.M. 1978. Soil chemistry. A. Basic elements. Elsevier Scientific Publishing Company.
45. Kabata-Pendias, A. 2000. *Trace elements in soils and plants*. CRC press.
46. Chorom, M., and Aghaei, F.M. 2006. Effects of Amended Sewage Sludge Application on Yield and Heavy Metal Uptake of Barley: A Case Study of Ahvaz Sewage Treatment Plant. *Journal of Water and Sewerage*. 62: 63-53. (In Persian)
47. Smith, S.R. 1992. Sewage sludge and refuse composts as peat alternatives for conditioning impoverished soil. *Horticultural Science*. 67: 703-716.
48. Saber, M.S.M. 1986. Prolonged effect land disposal of human waste on soil condition. *Water Science and Technology*. 18: 371-374.
49. Jamali, M.K., Kazi, T.G., Arain, M.B., Afridi, H.I., Jalbani, N., Kandhro, G.A., Shah, A., and Baig, J.A. 2009. Heavy metal accumulation in different varieties of wheat (*Triticum aestivum* L.) Grown in soil amended with domestic sewage sludge. *Journal of Hazardous Materials*. 164: 1386-1391.
50. Kalbasi, M., Racz, G.J., and Lewen-Rudgers, L.A. 1978. Reaction products and solubility of applied zinc compounds in some Manitoba soils. *Soil Science*. 125: 55-64.
51. Friedel, J.K., Langer, T., Siebe, C., and Stahr, K. 2000. Effects of long-term wastewater irrigation on soil organic matter, soil microbial biomass and its activities in central Mexico. *Biology and Fertility of Soils*, 31: 5. 414-421.
52. Bingham, F.T., Sposito, G., and Strong, J.E. 1984. The effect of chloride on the availability of cadmium. *Journal of Environmental Quality*. 13: 71-74.
53. Lie, Y., Chaney, R.L., and Schneider, A.A. 1994. Effect of soil chloride level on cadmium concentration in sunflower kernels. *Plant Soil*. 167: 275-284.
54. McLaughlin, J.J., Palmer, L.T., Tiller, K.G., Beech, T.A., and Smart, M.K. 1994. Increased soil salinity causes elevated cadmium concentration in field grown potato tubers. *Journal of Environmental Quality*. 23: 1013-1018.

