Water and Soil Management and Modeling

Online ISSN: 2783 - 2546

University of Mohaghegh Ardabili

The effect of landfill leachate irrigation on different soil characteristics and plant nutrition: a review

Seyed Mostafa Emadi Balaldehi[1]*

[1] Former M.Sc. Student, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Crop Sciences, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran

Abstract

Introduction

Landfill leachate, a liquid resulting from waste decomposition, contains nutrients like ammoniacal-N, Na, K, and organic matter. Biological treatments effectively remove degradable organics from young landfill leachate, but aged leachate with recalcitrant organics requires combined physical-chemical and biological methods or advanced technologies, leading to higher treatment costs. Even after treatment, leachate may not meet environmental standards for release. In arid and semi-arid regions with water scarcity and low soil organic matter, leachate application to soil presents a potential solution. Soil's properties enable it to retain and degrade pollutants while utilizing leachate's nutrients to enhance fertility and crop growth. However, leachate composition and application rates are critical factors due to potential negative impacts from total nitrogen, salinity, and heavy metals. Alkaline pH in aged leachate reduces heavy metal contamination risk. Detailed leachate characterization before soil application is crucial to prevent environmental and functional problems. This review examines existing research on leachate irrigation's effects on soil properties and plant nutrition, contributing to sustainable leachate management and agricultural practices in water-limited regions. Additionally, the review explores potential risks associated with leachate irrigation, including soil salinization, heavy metal accumulation, and groundwater contamination. By understanding both the benefits and drawbacks, informed decisions can be made regarding the suitability and implementation of leachate irrigation in specific contexts.

Materials and Methods

To carry out this study, keywords such as "Landfill leachate", "Composition of landfill leachate" and "Landfill leachate irrigation" were searched in the Web of Science, Google Scholar, ScienceDirect, and SID databases. For these keywords, 205 articles were found from 1989 to 2023. After the screening, quality review, and removal of repetitive and unrelated articles, 110 relevant articles were used. The main criterion for selecting articles was the effects of landfill leachate irrigation on the various properties of soil, and the nutrition of different plant species. The quality of the articles was evaluated through the Scimago Journal Rank (SJR) index, the citation, the Impact Factor, and the source normalized impact per paper (SNIP) index.

Results and Discussion

Landfill leachate presents a complex environmental challenge due to its potential for both soil contamination and enrichment. Leachate's xenobiotic and heavy metal components can induce soil contamination, altering the natural environment. Studies have documented reduced hydraulic conductivity, increased gas production, and altered microbial communities, ultimately impacting soil productivity. Leachate percolation can also modify physicochemical characteristics, including reduced microbial biomass, phosphorus-fixing capacity, and pH shifts, depending on waste composition. Conversely, research highlights the potential benefits of leachate application in arid and semi-arid regions facing water scarcity and low soil organic matter. Leachate can contribute to the increased organic content, improved soil structure, and regulated pH, enhancing soil fertility and crop productivity. The presence of macro and micro-nutrients such as Fe, Mn, N, P, and Zn further supports leachate's potential as a fertilizer. However, concerns remain regarding inhibitory chemicals in leachate and their potential detrimental effects on plant growth and yield. Studies report instances of leaf injury, reduced yield, and poor survival rates in certain plant species. In contrast, research demonstrates the positive effects of diluted or low-strength leachate application, stimulating plant growth and enhancing yield, particularly for Brassica species and tree species like *Acacia confusa*, *Leucaena leptocephali*, and *Eucalyptus tortellini*. These contradictory findings underscore the intricate interplay of factors influencing leachate irrigation outcomes. Soil characteristics, plant species, leachate source and composition, application methods, and their interactions all play significant roles in determining the success or failure of leachate irrigation.

Water and Soil Management and Modeling

Online ISSN: 2783 - 2546

University of Mohaghegh Ardabili

Conclusion

Landfill leachate, characterized by its elevated nitrogen and nutrient levels, presents a potential alternative water and fertilizer source for agricultural practices, particularly in arid and semi-arid regions facing water scarcity. However, responsible leachate utilization necessitates a comprehensive approach that balances maximizing benefits with minimizing environmental risks. Prior to agricultural application, detailed leachate characterization is crucial to determine its precise composition and suitability for irrigation. This includes quantifying heavy metal concentrations, salinity levels, and the presence of potentially toxic organic compounds. Concurrent plant selection is equally important, prioritizing species with demonstrated tolerance to leachate constituents. Given the potential for salinity and heavy metal accumulation, continuous application of raw leachate, especially for sensitive crops, should be avoided. Implementing alternating irrigation regimes with conventional water sources can mitigate these risks while providing essential nutrients for plant growth. Monitoring soil health indicators, including pH, organic matter content, and microbial activity, is vital to assess long-term impacts and implement necessary soil amendments. Determining optimal leachate application rates requires a multifaceted approach that considers plant-specific nitrogen requirements, leachate toxicity levels, and soil infiltration capacity. This ensures adequate nutrient supply without exceeding the assimilative capacity of plants and soil, preventing environmental contamination. Further research is needed to investigate the long-term impacts of leachate irrigation on soil health, crop quality, and potential groundwater contamination. Developing standardized guidelines for leachate treatment and application, tailored to specific regional contexts and crop types, is crucial for promoting sustainable and responsible leachate utilization in agriculture.

Keywords: Irrigation, Landfill leachate, Microorganisms, Nitrogen, Phytotoxicity, Soil salinity

Article Type: Review Article

Acknowledgement

I would like to thank everyone who helped me during the writing of this article, especially Mr. Seyed Alireza Mousavi Elyerdi for his comments on the manuscript.

Conflicts of interest

There is no conflict of interest regarding the writing, publication of the contents and results of this study.

Data availability statement:

All information and results are presented in the article.

Authors' contribution

Seyed Mostafa Emadi Balaldehi: Visualization and conceptualization, search of previous research, selection of related articles, combining the results of previous research, writing - original draft preparation, manuscript editing.

*Corresponding Author, E-mail: mostafaemadibaladehi@gmail.com

Citation: Emadi Baladehi, S.M. (2024). The effect of landfill leachate irrigation on different soil characteristics and plant nutrition: a review. *Water and Soil Management and Modeling, 4*(2), 33- 54.
DOI: 10.22098/mmws.2023.12503.1246

Received: 08 March 2023, Received in revised form: 24 March 2023, Accepted: 29 March 2023, Published online: 29 March 2023

Water and Soil Management and Modeling, Year 2024, Vol. 4, No. 2, pp. 33-54

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

© Author(s)

مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک

شاپا الکترونیکی: ۲۷۸۳-۲۵٤٦

تأثیر آبیاری شیرابهٔ محل دفن زباله بر خصوصیات مختلف خاک و تغذیهٔ گیاه: مطالعهٔ مروری

سید مصطفی عمادی بالادهی[1*]

[1] دانش‌آموختهٔ کارشناسی ارشد، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکدهٔ علوم زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران

چکیده

شیرابهٔ محل دفن زباله نوعی پساب با ترکیب پیچیده است که غنی از عناصر غذایی نظیر نیتروژن و املاح بالا مانند سدیم و کلر بوده که به‌دلیل اثرات مثبت و منفی آن بر محیط زیست در سراسر جهان مورد توجه ویژه است. هم‌چنین، به‌دلیل این‌که در مناطق خشک و نیمه‌خشک آب یک عامل محدودکننده در گسترش کشاورزی و افزایش تولیدات آن محسوب می‌شود، استفاده از شیرابهٔ زباله در این مناطق می‌تواند راه‌کاری مناسب برای آبیاری محصولات مختلف باشد. مطالعهٔ حاضر، مروری بر مطالعات انجام شده در خصوص اثرات آبیاری شیرابه محل دفن زباله بر ویژگی‌های شیمیایی، فیزیکی و زیستی خاک و رشد، عملکرد و تغذیهٔ گیاه است که برگرفته از ۱۱۰ مقاله در بازهٔ زمانی سال‌های ۱۹۸۹ تا ۲۰۲۳ از پایگاه‌های اطلاعاتی Web of Science، Google Scholar، ScienceDirect و SID است. بررسی‌ها نشان داد که اثر شیرابهٔ زباله بر خاک بسته به نوع، ترکیب و pH شیرابه و به‌علاوه بافت، کانی‌های تشکیل‌دهنده و pH خاک می‌تواند سبب تغییرات متفاوتی در ویژگی‌های مختلف خاک شود. به‌طور کلی آبیاری شیرابه موجب افزایش شوری، میزان نیتروژن، آب قابل استفاده خاک و افزایش فعالیت و جمعیت میکروبی خاک می‌شود. از طرف دیگر، محققان با کاربرد شیرابهٔ زباله جهت آبیاری گیاهان نتایج بسیار متفاوتی را به‌دست آوردند. در بعضی از مطالعات افزایش رشد و عملکرد گیاهان پس از آبیاری شیرابهٔ زباله مشاهده شد، ولی در نتایج دیگر نشانه‌هایی از اثرات منفی شیرابه نظیر کاهش جوانه‌زنی بذر، رشد گیاه و سوختگی برگ، سمیّت گیاهی و از بین رفتن کامل گیاه به‌دلیل افزایش میزان شوری و فلزات سنگین و دیگر ترکیبات شیرابه یافت شد. از یافته‌ها در این زمینه می‌توان نتیجه گرفت، اثر آبیاری شیرابهٔ زباله بر گیاه به گونهٔ گیاهی، میزان تحمل گیاه، نوع و ترکیب شیرابه و شیوه و میزان آبیاری بستگی داشته و برای حصول عملکرد بیش‌تر بایستی از استفادهٔ مکرر شیرابهٔ خام جلوگیری کرده و یا به‌صورت رقیق شده آن را به‌کار برد.

واژه‌های کلیدی: آبیاری، ریزموجودات، سمیّت گیاهی، شیرابهٔ محل دفن زباله، شوری خاک، نیتروژن

نوع مقاله: مروری

[*]مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: mostafaemadibaladehi@gmail.com

استناد: عمادی بالادهی، سید مصطفی (۱۴۰۳). تأثیر آبیاری شیرابهٔ محل دفن زباله بر خصوصیات مختلف خاک و تغذیهٔ گیاه: مطالعهٔ مروری. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۴(۲)، ۳۳- ۵۴.
DOI: 10.22098/mmws.2023.12503.1246

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۱۷، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۱/۰۴، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۱/۰۹، تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۱/۰۹
مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۳، دوره ۴، شماره ۲، صفحه ۳۳ تا ۵۴
ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی

© نویسندگان

۱- مقدمه

امروزه افزایش روز افزون تولید پسماندهای جامد شهری به‌طور ویژه‌ای محسوس بوده و عمدتاً به‌دلیل ازدیاد صنعتی‌شدن و شهرنشینی نابسامان است که در نتیجهٔ رشد کنترل نشدهٔ جمعیت رخ داده است (Singh et al., 2011). دفن زباله در مناطق مشخص یک روش معمول برای دفع زباله‌های شهری است. با این حال، به‌دلیل اقدامات و امکانات نامناسب، محل‌های دفن زباله به‌عنوان منبع برجسته‌ای برای آلودگی خاک و جریان‌های آبی عمل می‌کنند (Singh et al., 2015). شیرابهٔ زباله یکی از مهم‌ترین محصولات محل‌های دفن زباله بوده که دفع ایمن آن‌ها یکی از نگرانی‌های اصلی در کشورهای در حال توسعه است. شیرابهٔ محل دفن زباله یک نوع پساب بسیار پیچیده است که حاوی مواد معلق و محلول خارج شده از زباله‌های در حال تجزیه در بدنهٔ محل دفن زباله است. شیرابهٔ زباله به‌دلیل اکسیژن خواهی بالا و مقادیر بالای مواد شیمیایی آلی و معدنی محلول از جمله آمونیاک، فسفات، فلزات سنگین، فنل‌ها و سولفید خطرناک است (Naveen et al., 2017). بیش‌تر این ترکیبات می‌توانند سبب اثرات منفی بر رشد و اکولوژی موجودات آبزی شده و در نتیجه منجر به افزایش خطر برای محیط زیست و سلامت انسان شوند (Toufexi et al., 2013). بنابراین، تصفیهٔ شیرابه از محل‌های دفن زباله باید با روش‌های زیستی، فیزیکی-شیمیایی و یا روش‌هایی مانند فناوری غشایی انجام شود (Mukherjee et al., 2015). اما این روش‌ها دارای هزینه‌های بالا و یا فرآیندهای پیچیده‌ای هستند و با این وجود حتی پس از تصفیه، شیرابه ممکن است با متغیرهای مورد نیاز سازمان‌های محیط زیستی برای رهاسازی در بوم‌سازگان‌های آبی مطابقت نداشته باشد (Renou et al., 2008). جدا از این مسأله، گسترش جمعیت، صنایع، فعالیت‌های کشاورزی و بالا رفتن استانداردهای زندگی و به تبع آن ضرورت تأمین آب مناسب برای مصارف مختلف به‌عنوان یکی از شاخص‌های مهم توسعه از یک سو و انتشار انواع آلودگی‌ها از سوی دیگر، منابع آب در دسترس را به شدت محدود ساخته است. در همین راستا، کشاورزان استفادهٔ مجدد از پساب‌های شهری و صنعتی و آب‌های برگشتی را به‌عنوان منابع جدید برای جبران بخشی از این کمبودها مورد توجه قرار داده‌اند. از قدیم در کشورهای آسیایی استفاده از فاضلاب انسانی در کشاورزی برای آبیاری محصولات و حاصل‌خیزکردن خاک رواج داشته است.

در عصر معاصر و از قرن نوزدهم و اوایل قرن بیستم در کشورهای اروپایی و آمریکا نیز یکی از مهم‌ترین روش‌های دفع فاضلاب، تخلیهٔ آن به زمین‌های کشاورزی بوده است (Ghaemi and Majdeddin, 2016). از طرف دیگر، حدود ۴۱ درصد زمین‌های کشاورزی در جهان و بیش از ۸۰ درصد این مناطق در ایران را خاک‌های خشک و نیمه‌خشک تشکیل می‌دهند که از نظر مادهٔ آلی و برخی از عناصر غذایی نظیر نیتروژن و عناصر کم‌مصرف هم‌چون آهن و روی فقیر هستند (Emadi Baladehi et al., 2022a). به‌علاوه، منابع سنتی حاوی مواد آلی در مناطق خشک و نیمه‌خشک، محدود بوده و منحصر به کودهای دامی و سبز است. این منابع به هیچ عنوان جوابگوی نیاز متزاید بخش کشاورزی به کودهای آلی نیستند (Emadi Baladehi et al., 2022b). بنابراین، در این مناطق کاربرد هر ترکیب حاوی مادهٔ آلی از جمله شیرابه‌های تولید شده در مراکز دفن زباله، هم به‌عنوان جایگزین آب آبیاری و هم منبعی از مادهٔ آلی و عناصر غذایی با در نظر گرفتن جنبه‌های سمیّت گیاهی و آلودگی خاک و آب مفید بوده و به نظر می‌رسد باید بیش‌تر مطالعه شود (Moezzipour et al., 2020). در این شرایط، کاربرد شیرابه‌های مراکز دفن زباله در خاک به روشی امیدوارکننده برای بازیافت این ترکیبات تبدیل شده است (Santos et al., 2013). شیرابهٔ زباله به‌علت داشتن مقادیر قابل‌ملاحظه از مادهٔ آلی و عناصر غذایی به‌خصوص نیتروژن، فسفر، پتاسیم و برخی عناصر کم‌مصرف نظیر آهن و روی از نظر حاصل‌خیزی خاک دارای پتانسیل بالقوه‌ای است. خاک با توجه به ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی آن، می‌تواند باقی‌مانده‌های آلاینده‌های ناشی از کاربرد شیرابهٔ زباله را تا حدودی حفظ و تجزیه کند. در حالی‌که بخش‌های آلی و معدنی شیرابه می‌توانند حاصل‌خیزی خاک را بهبود بخشند و به‌عنوان یک منبع غذایی برای محصولات عمل کنند (Tewolde et al., 2005; Leal et al., 2010). اما همان طورکه گفته شد شیرابه دارای عناصر سنگین و آلاینده‌هایی است که توانایی زیادی در آلوده‌سازی خاک و آب‌های زیر زمینی دارند و به‌دلیل بار آلودگی زیاد شیرابه زبالهٔ شهری، مدیریت صحیح در استفاده از آن بایستی صورت پذیرد. هدف از این تحقیق نیز مروری بر اثرات آبیاری شیرابهٔ زباله بر ویژگی‌های مختلف خاک، رشد و عملکرد گیاه است.

۲- مواد و روش

برای انجام این مطالعه کلیدواژه‌هایی مانند « Landfill leachate»، «Composition of landfill leachate» و «Landfill leachate irrigation» در پایگاه‌های اطلاعاتی Google Scholar، Web of Science، ScienceDirect و SID جست و جو شد. در مجموع تعداد ۲۰۵ مقاله در بازهٔ زمانی ۲۰۲۳ – ۱۹۸۹ یافت شد که پس از غربالگری، بررسی کیفیت و حذف مقالات تکراری و نامرتبط، تعداد ۱۱۰ مقالهٔ مرتبط استفاده

شد. از این تعداد، ۱۰ مقالهٔ مروری، ۶۲ مقاله مرتبط با مطالعات آزمایشگاهی یا گلخانه‌ای و ۳۸ مقاله مربوط به مطالعات مزرعه‌ای بوده است. هم‌چنین، معیار اصلی برای انتخاب مقالات، اثرات شیرابهٔ زباله بر ویژگی‌های مختلف خاک، عملکرد و تغذیهٔ گونه‌های مختلف گیاهی بود.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- ترکیب شیرابهٔ زباله

دفن زباله رایج‌ترین روش در برخورد با پسماندهای جامد شهری در سراسر جهان است و شیرابهٔ تولید شده از محل‌های دفن زباله در نتیجهٔ نفوذ آب یا خارج‌شدن از زباله‌های دفن شده همراه با گازهای متصاعد شده از آن جزء اصلی‌ترین و مهم‌ترین آلاینده‌های محیط زیست محسوب می‌شود. محل‌های دفن زبالهٔ مدرن معمولاً ظرفیت و طول عمر بیش‌تری دارند، اما این محل‌های دفن زبالهٔ بزرگ‌تر خطرات محیط زیستی بیش‌تری را نیز به همراه دارند. اگرچه اکثر آن‌ها دارای پوشش‌های کف غیرقابل نفوذ و دستگاه‌های مرتبط برای محتوای آلاینده‌های تولید شده در زباله‌های مدفون شده و سیستم لوله‌کشی برای شیرابهٔ جمع‌آوری شده که متعاقباً در محل یا خارج از محل تصفیه می‌شوند هستند، اما غلظت و حجم شیرابه همواره مشکل‌ساز است. اطلاعات در مورد خواص شیمیایی و سمیّت شیرابه‌ها به درک ترکیبات شیمیایی آن‌ها، اثرات احتمالی آلودگی، اقداماتی جهت کاهش پیامدهای منفی و ابزارهای نظارتی مؤثر کمک می‌کند (Wong, 2003). شیرابهٔ محل دفن زباله مایعی است که به‌عنوان مخلوطی از اجزای محلول زباله، مواد واسطهٔ محلول و محصولات تجزیهٔ پسماند جامد و آب یا نزولات جوی که در بدنهٔ مرکز دفن زباله نفوذ می‌کند، تعریف می‌شود (Guidi Nissim et al., 2021). به‌طور معمول شیرابهٔ محل دفن زباله دارای pH کمی قلیایی است. به‌علاوه، رسانایی و شوری آن بالا بوده که نشان‌دهندهٔ غلظت بالای یون‌ها و املاح موجود در آن است. این مسأله تقریباً در همهٔ مراکز دفن زباله در دنیا شایع است زیرا مقادیر زیادی از ترکیبات معدنی از زباله‌های مدفون در آب نفوذی حل شده که سبب قدرت یونی بالا در شیرابه می‌شود (Brennan et al., 2016; Moraes Costa et al., 2019). شیرابهٔ محل دفن زباله عموماً دارای غلظت بسیار بالای اکسیژن مورد نیاز بیوشیمیایی (Biological Oxygen Demand)، اکسیژن مورد نیاز شیمیایی (Chemical Oxygen Demand)، کربن آلی کل و ترکیبات هیومیک، نیتروژن کل و آمونیاکی، آنیون‌هایی مانند کلر و سولفات، کاتیون‌هایی نظیر پتاسیم و سدیم، فلزات سنگین مانند کادمیم، سرب و روی و حاوی انواع مواد کمیاب آلی است. مواد آلی نادری مانند آلیفاتیک‌های هالوژنه (هیدروکربن‌های غیرآروماتیک) مثل کلروفرم و دی کلرومتان، هیدروکربن‌های آروماتیک نظیر بنزن، تولوئن، اتیل بنزن، زایلن، فنول‌ها و ترکیبات بسیار دیگری که در مطالعات مختلف گزارش شده‌اند (Andreottola and Cannas, 1992). با این حال، به‌دلیل ماهیت بسیار پیچیدهٔ شیرابه‌های دفن زباله، شناسایی تمام مواد آلی موجود در آن به‌ویژه آن‌هایی که محلول در آب هستند، دشوار و تقریباً غیرممکن است.

محققان دریافتند که ۹۰ درصد مواد آلی در یک نمونه شیرابهٔ بسیار محلول بوده و با اکثر تحلیل‌های مرسوم برای ترکیبات آلی خاص قابل شناسایی نیست (Lund et al., 1992). عواملی مانند آب و هوا، ترکیب پسماند جامد، فصل و سن مرکز دفن زباله بر مشخصات شیرابهٔ زباله اثرگذار است. غلظت مواد در شیرابه تا حد زیادی با گذشت زمان کاهش می‌یابد و بین فصل‌ها در نوسان است. هم‌چنین، این احتمال وجود دارد که با بالا رفتن سطح بارندگی در زمستان به‌علت رقیق شدن شیرابه، آلاینده‌های آن شسته شوند (Adhikari et al., 2014). تفاوت قابل‌توجهی در غلظت مواد در شیرابه‌ها از محل‌های دفن زباله در سنین مختلف، به‌ویژه بین محل‌های دفن زباله فعال و پس از بسته‌شدن وجود دارد، به نحوی‌که میزان ترکیبات مختلف به‌ویژه آلاینده‌ها به سرعت پس از توقف عملیات دفن زباله کاهش می‌یابد. حتی اگر غلظت اکثر ترکیبات شیمیایی در مراکز قدیمی نسبتاً پایین باشد، مقادیر آن‌ها ممکن است از حد مجاز فراتر رود و این موضوع به‌ویژه در مورد نیتروژن کل مجاز برای تخلیهٔ پساب به تأسیسات تصفیهٔ فاضلاب موضوعی رایج است. به‌طور کلی در مراحل اولیه، شیرابه در فاز اسیدی است. یعنی دارای سطح pH پایین‌تر، غلظت اسیدهای فرار بالا و مواد آلی که به سادگی تجزیه می‌شوند است (زیست تخریب‌پذیری بالاتر). در مرحلهٔ بعد شیرابهٔ متوسط یا بالغ (فاز متانوژنیک) شده که دارای تولید متان و pH بالا است و مواد آلی موجود در آن عمدتاً بخش‌های هیومیک و فولویک هستند. پس از این هر چه شیرابه مدت زمان بیش‌تری باقی بماند خاصیت اسیدی آن کم‌تر شده و شیرابه خاصیت قلیایی پیدا می‌کند که علت آن تبدیل اسیدهای آلی حاصل از تجزیهٔ پسماندها به گازهای متان و دی اکسید کربن است. در این شرایط شیرابه سخت‌تر تجزیه و تصفیه خواهد شد (Kulikowska and Klimiuk, 2008). هم‌چنین، رنگ نیز یک متغیر مهم در شیرابه‌های زباله است. تجزیهٔ برخی از ترکیبات آلی، مانند اسیدهیومیک ممکن است باعث شیرابهٔ زرد تا قهوه‌ای تیره که نشان‌دهندهٔ سن شیرابه است شود (Kjeldsen et al., 2002). گزارش مقادیر برخی از مشخصات شیرابهٔ زباله در تحقیقات مختلف در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱- برخی مشخصات شیرابهٔ مرکز دفن زبالهٔ گزارش شده در تحقیقات مختلف (از سال‌های ۱۹۹۹ تا ۲۰۲۳)

Table 1- Some characteristics of landfill leachate reported in different researches (from 1999 to 2023)

ویژگی (Property)	مقدار* (*Value)	کشور (Country)	منبع (Reference)
اسیدیته (pH)	8.9	هند (India)	Bhagwat et al. (2018)
	6.8	اسپانیا (Spain)	Luna et al. (2007)
هدایت الکتریکی (EC)	35	ایران (Iran)	Abdollahi Mansurkhani et al. (2022)
	4.8	کلمبیا (Colombia)	Madera-Parra et al. (2014)
ماده آلی (Organic matter)			
اکسیژن خواهی شیمیایی (COD)	42000	مکزیک (Mexico)	Guerrero-Rodríguez et al. (2014)
	720	ترکیه (Turkey)	Yalcuk and Ugurlu (2020)
اکسیژن خواهی بیوشیمیایی (BOD)	43600	ایران (Iran)	Jalalipour and Ghaemi (2013)
	44	دانمارک (Denmark)	Kjeldsen and Cheristiperson (2001)
ترکیبات معدنی (Inorganic components)			
نیتروژن کل (Total N)	1094	ایتالیا (Italy)	Fasani et al. (2019)
	38.43	رومانی (Romania)	Şchiopu et al. (2009)
فسفر کل (Total P)	13.2	آمریکا (USA)	Edmundson and Wilkie (2013)
	1.5	هنگ کنگ (Hong Kong)	Cheng and Chu (2007)
کلر (Chlorine)	1086	سوئد (Sweden)	Dimitriou and Aronsson (2010)
	29.5	سوئد (Sweden)	Aronsson et al. (2010)
سدیم (Sodium)	1474	کانادا (Canada)	Xu et al. (2019)
	363	اسلوونی (Slovenia)	Zupanc and Zupanicic Justin (2010)
پتاسیم (Potassium)	3260	هند (India)	Mor et al. (2013)
	359	سوئد (Sweden)	Dimitriou et al. (2006)
منیزیم (Mangesium)	215	کانادا (Canada)	Lee et al. (2010)
	15.37	برزیل (Brazil)	Franco et al. (2020)
کلسیم (Calcium)	766	آمریکا (USA)	Kang et al. (2008)
	22.5	هنگ کنگ (Hong Kong)	Chan et al. (1999)
آهن (Iron)	57	ایران (Iran)	Astaraei and Aryabod (2008)
	0.27	آفریقای جنوبی (South Africa)	Abdulmalek (2014)
فلزات سنگین (Heavy metals)			
روی (Zinc)	30.43	ایران (Iran)	Moezzipour et al. (2020)
	0.06	برزیل (Brazil)	Klauck et al. (2017)
مس (Copper)	2.02	هند (India)	Singh et al. (2023)
	0.0096	رومانی (Romania)	Cretescu et al. (2013)
منگنز (Manganese)	6.75	مالزی (Malaysia)	Alaribe and Agamuthu (2015)
	0.5	آمریکا (USA)	Zalesny et al. (2008a)
کادمیم (Cadmium)	8.8	نیجریه (Nigeria)	Aderemi et al. (2011)
	0.07	برزیل (Brazil)	Filho et al. (2018)
کروم (Chromium)	3.58	ایتالیا (Italy)	Guidi Nissim et al. (2021)
	0.17	چین (China)	Zhang et al. (2013)
سرب (Lead)	3	نیجریه (Nigeria)	Lanrewaju et al. (2019)
	0.003	هنگ کنگ (Hong Kong)	Li and Zhao (2003)
نیکل (Nickel)	0.40	ایتالیا (Italy)	Postacchini et al. (2018)
	0.036	مکزیک (Mexico)	Ramos-Arcos et al. (2019)
آرسنیک (Arsenic)	0.23	کره جنوبی (South Korea)	Im et al. (2001)
	0.019	جمهوری چک (Czech Republic)	Mendel et al. (2020)

*هدایت الکتریکی بر حسب دسی زیمنس بر متر بوده و به جز اسیدیته که بدون واحد است، سایر متغیرها بر حسب میلی‌گرم بر لیتر هستند.

*EC is in dS/m and exept for pH which has no unit, the rest of the parameters are in mg/L

۳-۲- تأثیر آبیاری شیرابهٔ زباله بر خاک

اگر چه شیرابهٔ زباله حاوی عناصر غذایی ضروری برای گیاه نظیر نیتروژن، پتاسیم، منیزیم و کلسیم است و می‌توان از آن در هنگام تنش آبی و جایگزین آب آبیاری استفاده نمود اما ممکن است به‌دلیل اثرات بالقوه بر کیفیت خاک و سلامت انسان ایده‌آل نباشد. علاوه‌بر حمایت از رشد و عملکرد گیاه، حفظ و یا افزایش کیفیت خاک به‌عنوان یک بوم‌سازگان سالم ضروری است که شامل ظرفیت خاک برای حفظ بهره‌وری زیستی، حفظ خصوصیات طبیعی و ارتقای سلامت گیاهان، حیوانات و انسان است. ترکیبات موجود در شیرابه و فلزات سنگین آن اغلب باعث

آلودگی و تغییر در ساختار طبیعی خاک می‌شود. تحقیقات آزمایشگاهی و میدانی گزارش کردند که نفوذ شیرابه به خاک منجر به تولید نیتریفایرها و متانوژن‌ها می‌شود، هدایت هیدرولیکی خاک را کاهش داده و باعث متراکم‌شدن خاک و به تبع آن کاهش حاصل‌خیزی خاک می‌شود (Singhal and Islam, 2008). هم‌چنین، عنوان شده کاربرد شیرابه با کاهش زیست‌تودهٔ میکروبی خاک به‌دلیل سمیّت باکتریایی، ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک را تغییر داده و ظرفیت تثبیت فسفر را کاهش می‌دهد (Nyika, 2021). به‌علاوه گزارش شده که شیرابه سبب افزایش میزان یون‌هایی هم‌چون سدیم، پتاسیم و کلر در خاک شده و اسیدیته و هدایت الکتریکی خاک را افزایش می‌دهد (Islam and Singhal, 2004). برخلاف تحقیقاتی که آبیاری شیرابهٔ زباله را به‌عنوان یک تهدید و آلودگی برای خاک نشان می‌دهند، مطالعات دیگر با استناد به نقش آن در غنی‌نمودن خاک از عناصر غذایی و مواد آلی، این نظریات را رد می‌کنند (Turki and Bouzid, 2017; Salehi et al., 2020). در نواحی نیمه‌خشک و خشک، شیرابه باعث افزایش میزان مادهٔ آلی خاک، افزایش خاکدانه‌سازی و بهبود ساختار خاک و تنظیم pH خاک‌های آهکی برای افزایش ظرفیت تولید آن‌ها شد (Krishna et al., 2016). عناصر پرمصرف و کم‌مصرف شیرابه مانند کلر، آهن، منگنز، نیتروژن، فسفر و روی، حاصل‌خیزی خاک را بهبود می‌بخشد و از این‌رو از آن می‌توان به‌عنوان کود مایع استفاده کرد (Panahpour et al., 2011). به‌عبارتی دیگر، کاربرد کنترل شدهٔ شیرابهٔ زباله می‌تواند سبب بهینه‌سازی اثرات مثبت مرتبط با آن در خاک شود (Mukherjee et al., 2015). با توجه به تنوع نتایج می‌توان دریافت به‌دلیل پیچیدگی و متغیربودن ترکیب شیرابه، پیامدهای کاربرد آن در خاک ممکن است گمراه‌کننده و حتی خطرناک باشد که اغلب مقایسهٔ بین آن‌ها را دشوار می‌کند. ویژگی‌های خاک به‌عنوان شاخص‌های محیط زیستی جهت تخریب یا بهبود و اصلاح زمین‌های زراعی و برای شناسایی شیوه‌های مدیریت جهت استفادهٔ پایدار از سرزمین استفاده می‌شود. به نظر می‌رسد تعیین اثر شیرابه و پساب بر محیط زیست، به‌ویژه بر ویژگی‌های خاک، به‌دلیل تنوع خصوصیات خاک و ناهمگونی کیفیت شیرابه و تغییرات در شیمی آن، بسیار دشوار باشد. پیش‌بینی این اثرات از آن جهت مهم تلقی می‌شود که پس از کاربرد شیرابه ممکن است برخی از پیامدهای آن غیرقابل برگشت باشند. از طرف دیگر، اقدامات مدیریتی جهت اصلاح خاک (در صورت امکان) گاهی اوقات پرهزینه و زمان‌بر نیز هستند. به‌عنوان مثال، مرگ و میر گستردهٔ گیاهان و در نتیجه فرسایش خاک ناشی از آبیاری شیرابه ممکن است حتی نیاز به جایگزینی خاک سطحی و پوشش گیاهی مجدد داشته باشد (Mueller et al., 2007). در ادامه تأثیر آبیاری شیرابهٔ زباله بر خصوصیات شیمیایی، فیزیکی و زیستی خاک بحث شده است.

۳-۲-۱- تأثیر آبیاری شیرابهٔ زباله بر برخی ویژگی‌های شیمیایی و عناصر خاک

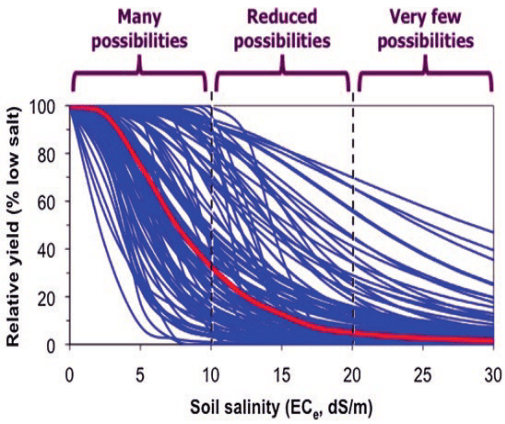
۳-۲-۱-۱- اسیدیته (pH)

pH خاک و آب آبیاری از جنبه‌های ضروری یک برنامهٔ تغذیه‌ای مناسب است. pH تأثیر مستقیمی روی گیاه ندارد، اما مستقیماً بر دسترسی به عناصر غذایی توسط گیاه و تنوع و فعالیت ریزموجودات تأثیر می‌گذارد (Emadi Baladehi et al., 2022c). pH خاک معیاری برای سنجش اسیدی یا قلیایی بودن خاک است که محدودهٔ مطلوب آن در خاک برای رشد بهینهٔ گیاه در بین محصولات زراعی متفاوت است. به‌طور کلی، pH خاک شش تا ۷/۵ برای اکثر گیاهان قابل‌قبول است؛ زیرا اکثر عناصر غذایی در این محدوده در دسترس هستند (Neina, 2019). دامنهٔ pH شیرابهٔ زباله بین ۴/۵ تا ۹ گزارش شده است (Renou et al., 2008). شیرابهٔ زباله به‌طور معمول دارای pH قلیایی است، به‌جز در شیرابه‌های جوان در محل‌های دفن تازه که دارای pH اسیدی هستند. بسته به pH خاک و این‌که شیرابه قلیایی باشد یا اسیدی ممکن است اثر شیرابه بر pH خاک متفاوت باشد (Salem et al., 2008). به‌صورت تئوری و از گذشته گزارش شده است که مقدار بالای آمونیوم و کاتیون‌هایی مانند کلسیم و منیزیم در شیرابه منجر به افزایش pH به‌خصوص در خاک‌های اسیدی می‌شود (Cheng, 2004). در تحقیقی، Zalesny et al. (2008b) بیان کردند میزان pH خاک اسیدی پس از آبیاری صنوبر با شیرابهٔ زباله از ۵/۷ در تیمار شاهد به ۶/۲ رسید. در مقابل در بسیاری از مطالعات دیگر کاهش pH خاک تحت آبیاری شیرابه به‌خصوص در طولانی مدت مشاهده شد (Mir Seyed Hosseini et al., 2016; Wong and Leung, 1989). در تحقیق دیگری، Asadi et al. (2011) در آزمایشی با کاربرد شیرابهٔ زباله و شیرابهٔ کمپوست زباله به خاک، کاهش pH خاک را در هر دو تیمار گزارش کردند. آنان بیان کردند کاهش ناشی از کاربرد شیرابهٔ کمپوست زباله بیش‌تر از کاربرد شیرابهٔ زباله بود که پایین‌تر بودن pH شیرابهٔ کمپوست را علت این نتیجه دانستند. از جمله دلایل کاهش pH خاک می‌تواند کاربرد شیرابهٔ اسیدی و تجزیهٔ زیستی مادهٔ آلی شیرابه در خاک و آزاد شدن اسیدهای آلی باشد (Cheng, 2004). به‌طور کلی، اثر شیرابهٔ قلیایی بر pH خاک می‌تواند با اسیدیته قابل تعویض و باقی‌ماندهٔ خاک و یون‌های پروتون تولید شده در طی فرآیند نیتریفیکاسیون میکروبی خنثی

شود. بدین‌صورت که جذب نیترات توسط گیاه سبب آزادشدن یون‌های بی‌کربنات برای حفظ اسیدیتهٔ خنثی در سطح ریشه می‌شود و در عین حال با یون پروتون تولید شده در نیتریفیکاسیون نیز مقابله می‌کند. هم‌چنین، شست و شوی نیترات به‌جای جذب توسط ریشه، سبب کاهش pH شده و پیش‌بینی می‌شود که اگر آبیاری شیرابه ادامه یابد، نیتریفیکاسیون همراه با شست و شوی نیترات و کاتیون‌های بازی، pH خاک را بیش‌تر کاهش دهد (Cheng et al., 2011). در خاک‌های قلیایی به‌دلیل خاصیت بافری قوی خاک عموماً تغییر زیادی در pH خاک در مطالعات ذکر نشده و اگر تغییراتی رخ دهد به‌صورت جزئی خواهد بود. ولی این اثر کاهشی در خاک قلیایی حتی به‌صورت کم و موقت تأثیرات مثبتی بر قابلیت جذب عناصری مانند فسفر، آهن، روی و منگنز دارد (Lindsay, 1995). برای مثال، Khoshgoftarmanesh and Kalbasi (2002) عنوان کردند کاربرد سطوح مختلف شیرابهٔ زباله بر خاک در طی کشت گندم هیچ تغییر معناداری در سطح پنج درصد بر pH خاک نداشت. در تحقیقی، Kalbasi and Gandomkar (1997) نیز فقط در کاربرد تیمار ۸۰۰ تن بر هکتار شیرابهٔ زباله کاهش pH خاک پس از کشت ذرت به میزان ۰/۳ واحد مشاهده کردند. آنان بیان کردند به‌علت pH پایین شیرابه (۳/۶) و به‌دلیل خاصیت بافری بالای خاک آهکی احتمالاً میزان کاهش pH بیش‌تر بوده‌است.

۳-۲-۱-۲- هدایت الکتریکی (EC)

شوری خاک با متغیری به نام هدایت الکتریکی (EC) اندازه‌گیری می‌شود. EC خاک میزان توانایی خاک برای هدایت جریان الکتریکی را نشان می‌دهد. در واقع می‌توان گفت نشان‌دهندهٔ میزان املاح موجود در خاک است. بنابراین، تأثیر ویژه‌ای روی ویژگی‌های خاک به‌خصوص حاصل‌خیزی و قابلیت دسترسی عناصر آن دارد. افزایش EC و سدیمی شدن خاک در محیط‌های خشک و نیمه‌خشک که دارای تبخیر–تعرق بالا هستند و املاح و نمک‌های بیش از حد در آن به راحتی شسته نمی‌شوند، مورد توجه ویژه است (Friedman, 2005). افزایش EC و شوری خاک به‌عنوان پیامد کاربرد شیرابهٔ زباله در خاک و سمیّت بر گیاهان و موجودات خاک شناخته می‌شود. شیرابهٔ زباله با داشتن مقادیر بالای یون‌هایی نظیر سدیم، پتاسیم، کلر، آمونیوم، نیترات و سولفات در صورت اضافه شدن به خاک می‌توانند سبب افزایش شوری خاک شوند (Nyika, 2021). در همین راستا، مطالعات بسیاری بر افزایش EC خاک پس از آبیاری با شیرابهٔ زباله دلالت دارد. به‌عنوان مثال، Torabi Farsani and Afyuni (2021) گزارش کردند که کاربرد شیرابهٔ ۲/۵ درصد در خاک لوم رسی شنی سبب افزایش معنادار در سطح احتمال یک درصد شوری و SAR خاک نسبت به تیمار شاهد شد. در تحقیقی Carlos et al. (2017) نشان دادند کاربرد غلظت‌های مختلف شیرابه سبب افزایش EC خاک نسبت به تیمار شاهد تحت کشت برنج شد که نشان می‌دهد شیرابه حتی در کشت غرقاب که موجب رقیق‌شدن آن می‌شود بازهم اثر افزایشی بر شوری خاک دارد. در مجموع اگر EC خاک از چهار دسی‌زیمنس بر متر بیش‌تر شود، خاک شور در نظر گرفته شده و همان طورکه در شکل ۱ آمده است به‌طور متوسط گیاهان مختلف از این سطح بالاتر کاهش عملکرد نسبی را نشان می‌دهند که با افزایش EC این کاهش بیش‌تر نیز می‌شود (McFarlane et al., 2016). EC خاک در حد شوری اثرات منفی بر فعالیت و تنفس میکروبی دارد، به‌ویژه زمانی‌که میزان سدیم و یا کلر خاک بالا باشد. به‌علاوه ممکن است قابلیت دسترسی و چرخهٔ عناصر غذایی نیز دچار اختلال شود. گیاهان حساس به شوری، بالاتر از این سطح از شوری تحت تأثیر قرار گرفته و در اثر تنش اسمزی و از اثرات یون‌هایی مانند سدیم، آمونیوم و کلر می‌توانند آسیب ببینند (Landon, 1991). آبیاری با شیرابه به‌خصوص در کاربردهای مزرعه‌ای ممکن است موجب تجمع املاح در آب منافذ خاک شده و در نهایت منجر به آسیب‌های رویشی شود (مگر این‌که شسته شوند). زمانی‌که املاح در خاک انباشته شوند، خطر کاربرد شیرابه ممکن است با افزایش خشکسالی نیز تشدید شود (Cheng and Chu, 2007).



شکل ۱- تأثیر شوری خاک بر عملکرد نسبی ۱۰۸ گیاه زراعی که خط قرمز نشان‌دهندهٔ متوسط پاسخ محصولات است (McFarlane et al., 2016)

Figure 1- The effect of soil salinity on the relative yield of 108 crop plants, where the red line shows the average response of crops (McFarlane et al., 2016)

یکی از راه‌های کاهش و کنترل EC خاک در پی آبیاری شیرابه، استفاده از آبشویی است. علاوه‌بر به حداقل رساندن

املاح ورودی با رقیق‌سازی مناسب شیرابه، اگر املاح از ناحیهٔ ریشه شسته شوند، تأثیر افزایش EC خاک را می‌توان کاهش داد. مقدار اضافی آب، علاوه‌بر تبخیر–تعرق به املاح شسته شده خارج از منطقهٔ ریشه اضافه می‌شود تا محتوای املاح در حد قابل‌قبولی در آن منطقه حفظ شود. حجم آبیاری را می‌توان بر اساس تبخیر–تعرق، شوری شیرابه و تحمل محصول محاسبه کرد. اگر نیاز آبشویی از حد بالایی آب ورودی به خاک فراتر رود، آبیاری متناوب با شیرابه و یا فقط شیرابهٔ رقیق شده در فصول بارانی (معمولاً فصول رشد) می‌تواند به کنترل میزان املاح خاک کمک کند (Ahmad et al., 2020). در مقایسه با کاربرد مداوم شیرابه، آبیاری متناوب ممکن است گزینهٔ بهتری باشد. با حفظ میزان ورودی نیتروژن، هر دو طرح آبیاری مقدار مشابهی املاح به خاک اضافه می‌کنند. با این حال، طرح آبیاری متناوب می‌تواند املاح را به‌طور مؤثرتری از بین ببرد. به‌عبارت دیگر، املاح بیش‌تری را می‌توان با استفاده از حجم کم‌تری از آب شست و بار هیدرولیک را کاهش داد. به‌طورکلی روش آبیاری را می‌توان با در نظر گرفتن سمیّت گیاهی شیرابه، نیاز نیتروژن و نیاز آبشویی بهبود داد تا از کاربرد بیش از حد نیتروژن و املاح جلوگیری شود. علاوه‌براین، کاشت گونه‌های مقاوم به شوری نظیر جو، گلرنگ، سورگوم، پسته، اقاقیا و غیره در مناطق بومی می‌تواند اثرات نامطلوب روی گونه‌های گیاهی را در شرایط خشکسالی به‌دلیل هوای خشک گرم یا سیستم آبیاری ناکارآمد کاهش دهد (Bowman et al., 2002).

۳-۲-۱-۳- نیتروژن

نیتروژن یکی از عناصر محدودکنندهٔ اصلی در بوم‌سازگان‌های کشاورزی محسوب می‌شود. مقدار نیتروژن قابل‌دسترس در خاک کم است، در حالی‌که مقدار مورد نیاز سالانه برای رشد و نمو گیاهان نسبتاً زیاد است. نیتروژن در خاک به سه شکل ترکیبات آلی، آمونیوم و نیترات وجود دارد که بخش اعظم آن به شکل مادهٔ آلی بوده و برای در دسترس بودن گیاهان نیاز به معدنی‌شدن و تبدیل به آمونیوم و نیترات دارد. نیتروژن شیرابهٔ زباله نیز یکی از عناصر مهم آن شناخته می‌شود که بیش‌ترین بخش آن را آمونیوم تشکیل می‌دهد (Xing et al., 2019). معمولاً شرایط احیایی در بدنهٔ محل دفن زباله برای نیتریفیکاسیون نامناسب است، همین مسأله سبب میزان پایین نیترات و بالعکس میزان بالای آمونیوم در شیرابه زباله می‌شود. میزان بالای نیتروژن کل و آمونیومی شیرابهٔ زباله سبب توجه ویژه به آن به‌عنوان یک جایگزین برای کودهای نیتروژنه شده است (Mekki et al., 2009). همین مسأله موجب افزایش قابل‌ملاحظهٔ نیتروژن خاک در پی کاربرد شیرابه زباله می‌شود که در اکثر مطالعات به آن اشاره شده است (Zhang et al., 2010; Panchoni et al., 2016). در مطالعه‌ای، Smaoui et al. (2020) نشان دادند که نیتروژن کل خاک به‌طور قابل‌توجهی پس از آبیاری با شیرابهٔ زباله افزایش یافت. در این مطالعه پس از اعمال ۱۰۰ مترمکعب در هکتار شیرابهٔ تصفیه نشده، سطح نیتروژن خاک از ۰/۰۷ درصد به ۰/۱۵ درصد افزایش یافت. در چین نیز Cheng (2004) عنوان کرد آبیاری شیرابهٔ مرکز دفن زباله WENT سبب افزایش چهار برابری میزان نیتروژن کل خاک نسبت به تیمار شاهد پس از ۹۰ روز شد. هم‌چنین، Cheng and Chu (2011) گزارش کردند شیرابهٔ زباله که حاوی میزان پایین اشکال نیتروژن است، می‌تواند نیتروژن معدنی خاک را پس از ۴۰ هفته ۲۵ برابر افزایش دهد. از طرفی مشخص شده در طول زمان و در کاربرد بلندمدت شیرابه، میزان نیتروژن کل خاک پس از افزایش اولیه به‌تدریج کاهش می‌یابد (Han et al., 2014). به‌عنوان مثال Alvarez-Bernal et al. (2006) بیان کردند نیتروژن اضافه شده توسط شیرابهٔ خام پس از افزایش اولیه به آرامی معدنی شده و متعاقباً روی ذرات خاک جذب می‌شود. آنان مشاهده کردند نیتروژن آمونیومی اضافه شده به خاک بلافاصله توسط کلوئیدهای خاک جذب و حفظ می‌شود. بنابراین، نیتروژن کل اضافه شده توسط شیرابه ممکن است در طول زمان تثبیت شود که این فرآیند در واقع برای خاک مفید است؛ زیرا نیتروژن در خاک به‌عنوان ترکیبات آلی پایدار ذخیره می‌شود. از نظر مصرف انرژی توسط گیاه نیز جذب آمونیوم کارآمدتر از نیترات است؛ زیرا نیترات قبل از ترکیب‌شدن در سنتز اسیدهای آمینه نیاز به احیا با آمونیوم دارد (Wong and Leung, 1989). در کل ثابت شده است نیترات دارای تحرک بیش‌تری نسبت به آمونیوم در خاک است که می‌توان با آبشویی آن را از منطقهٔ ریشه خارج و خطر سمیّت گیاهی را در صورت کاربرد بیش از حد شیرابه کاهش داد. البته بایستی به این نکته توجه داشت که این کار سبب افزایش ریسک آلودگی آب‌های زیرزمینی در صورت نفوذ و آلودگی آب‌های مجاور توسط رواناب خواهد شد. اگر چه سمیّت نیترات نسبت به آمونیوم برای آبزیان بسیار کم‌تر است اما سطوح بالای نیترات در آب‌های آزاد می‌تواند سبب غنی‌شدن محیط‌های آبی از ترکیبات محلول شده که به رشد بیش از اندازه برخی جانداران زنده منجر می‌شود. به‌علاوه ممکن است باعث کمبود اکسیژن محلول در آب شود. هم‌چنین، نیترات می‌تواند برای انسان نیز مضر باشد زیرا وجود نیترات در آب آشامیدنی می‌تواند سبب بیماری متهموگلوبینمی شود. علاوه‌بر جمع‌آوری و مدیریت مناسب رواناب، خطر آلودگی نیترات را می‌توان با تعیین دقیق میزان کاربرد شیرابه برای جلوگیری از عرضهٔ بیش از حد

نیتروژن کاهش داد. در کل کاربرد مناسب نیتروژن باید بر اساس بازده اقتصادی بهینه و حداقل آسیب به محیط زیست باشد. در این صورت نیتروژن موجود که از شیرابه به‌دست می‌آید، می‌تواند جایگزین مقادیر معادل کودهای نیتروژنه شود (Nyika, 2021).

۳-۲-۱-٤- فسفر

فسفر یکی دیگر از عناصر ضروری مؤثر بر رشد و تولید گیاه است. برخلاف نیتروژن، این عنصر از طریق تثبیت بیوشیمیایی تأمین نمی‌شود، بلکه باید از منابع دیگر نظیر معدنی‌شدن بستر و کودهای فسفاته فراهم شود تا نیازهای گیاه را برآورده کند. مقدار فسفر خاک معمولاً کم‌تر از یک میلی‌گرم در کیلوگرم است. ترکیبات فسفر موجود در خاک عمدتاً بسیار نامحلول بوده و برای جذب گیاه در دسترس نیستند و قسمت محلول و قابل دسترس فسفر نیز غیر متحرک است (Lambers, 2022). شکل عمدهٔ فسفر در شیرابه به شکل ارتوفسفات (PO_4^{-3}) است و معمولاً این میزان در شیرابه پایین است. علاوه‌براین، هنگامی‌که اشکال فسفر چه با استفاده از کود و چه با کاربرد شیرابهٔ زباله به خاک اضافه می‌شوند ممکن است به کمپلکس‌های غیرقابل دسترس تبدیل شده و بسیار نامحلول شوند. به‌طورکلی گزارش شده که وقتی شیرابهٔ زباله با آبیاری به خاک اضافه می‌شود، فسفر موجود در شیرابه پس از تشکیل ترکیبات نامحلول در آب توسط خاک جذب یا رسوب پیدا می‌کند. در مقایسه با فاضلاب شهری و خانگی، شیرابهٔ زباله تنها مقدار کمی فسفر را به سیستم خاک و گیاه اضافه می‌کند. اگرچه بخش عمده‌ای از فسفر شیرابه به شکل ارتوفسفات در دسترس گیاه است، اما به سرعت با جذب گیاه (در رشد سریع رویشی در پاسخ به عرضهٔ نیتروژن)، شسته شدن و تشکیل ترکیبات نامحلول توسط کمپلکس شدن با آلومینیوم و آهن در خاک اسیدی و واکنش با کلسیم و تشکیل تری کلسیم فسفات نامحلول ($Ca_3(PO_4)_2$) در خاک قلیایی، تخلیه می‌شود (Ahmad et al., 2020). در تأیید این موضوع Smaoui et al. (2020) دریافتند افزودن شیرابهٔ زباله به خاک هیچ افزایش معناداری در سطح احتمال پنج درصد در فسفر خاک نسبت به تیمار شاهد اعمال نکرد. در تحقیقی، Carlos et al. (2017) نیز بیان کردند کاربرد غلظت‌های ۲۵ و ۵۰ درصد شیرابهٔ زباله تحت کشت برنج حتی می‌تواند سبب کاهش میزان فسفر خاک شود که آنان دلیل این امر را جذب فسفر توسط برنج دانستند. در مقابل تعداد محدودی از مطالعات افزایش فسفر خاک را در پی آبیاری شیرابهٔ زباله گزارش کردند که احتمالاً به‌دلیل میزان بالای فسفر در شیرابه و یا میزان کاربرد بالای شیرابه بوده است. هم‌چنین، Khoshgoftarmanesh and Kalbasi (2002) نشان دادند آبیاری شیرابهٔ زباله در کشت گندم در دو کاربرد ۳۰۰ و ۶۰۰ تن بر هکتار سبب افزایش معنادار فسفر خاک در سطح پنج درصد در عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری شده است. آنان فقط در کاربرد ۶۰۰ تن بر هکتار افزایش معناداری در سطح پنج درصد در فسفر خاک در عمق ۳۰ تا ۶۰ سانتی‌متری مشاهده کردند. افزودن مکمل‌های حاوی فسفر غیرآلی به شیرابه و غنی‌کردن آن از فسفر یکی از راه‌های رفع کمبود فسفر خاک توسط شیرابهٔ زباله است. Fu (2004) مشخص کرد شیرابهٔ غنی شده با فسفر معدنی به‌طور قابل‌توجهی رشد گیاهان را در آبیاری شیرابه بهبود بخشید. یافته‌های فوق بیان‌گر این است که رفع کمبود فسفر خاک با آبیاری شیرابه ممکن است بدون اثر و یا پر هزینه باشد.

۳-۲-۲- تأثیر شیرابهٔ زباله بر ویژگی‌های فیزیکی خاک

خواص فیزیکی خاک نسبت به یون‌های محلول و موجود در آب آبیاری بسیار حساس است و در چنین شرایطی به شدت تحت تأثیر است. کاربرد شیرابهٔ زباله در خاک به‌خصوص در درازمدت، نسبت این گونه تغییرات را تعویض نموده و واکنش خاک نسبت به آب آبیاری با شیرابه، بستگی کاملی به کیفیت شیرابهٔ مصرفی دارد. کیفیت شیرابه نیز به نوبهٔ خود از منبع تولید آن تأثیر می‌پذیرد. به همین علت در مطالعات مختلف اثرات متفاوت و حتی متضادی ذکر شده است. مطابق بررسی‌های به عمل آمده استفاده از شیرابه به‌دلیل بسته شدن حفره‌های سطحی خاک توسط ذرات جامد معلق موجود در شیرابه و زیست‌تودهٔ آلی مانند باکتری‌ها و پراکنده شدن ذرات رس و متورم شدن خاک به‌دلیل شرایط شیمیایی شیرابه می‌تواند هدایت هیدرولیکی خاک را کاهش دهد. از طرفی گزارش شده استفاده از شیرابهٔ زباله می‌تواند باعث افزایش هدایت هیدرولیکی و نفوذ خاک شود (Mathan, 1994; Mirzaei et al., 2014). هم‌چنین، مقادیر بیش از حد یون‌ها و املاح در شیرابه ممکن است باعث پراکندگی خاک رس و کاهش پایداری خاکدانه‌ها، تخلخل، هوادهی و میزان نفوذ آب شود. اثرات نامطلوب شیرابه بر ویژگی‌های فیزیکی خاک ممکن است تراکم جهانی خاک را افزایش داده و می‌تواند منجر به افزایش حساسیت به فرسایش شود (Loncnar et al., 2010). هم‌چنین، Kuwano et al. (2017) دریافتند میزان پراکندگی رس پس از آبیاری شیرابه در عمق ۱۰ تا ۲۰ سانتی‌متری در آن مطالعه خفیف (۱/۶ درصد) بوده است و در عمق‌های پایین‌تر به‌دلیل pH کم‌تر و میزان بالای اکسید آهن و آلومینیوم این مقدر عملاً صفر بود. در ادامه، Arasan et al. (2007) نشان دادند هر چقدر میزان املاح شیرابهٔ زباله زیادتر باشد سبب افزایش حد روانی و حد خمیری خاک خواهد شد. در تحقیقی، Nayak et al. (2007) با افزودن شیرابه به خاک به میزان پنج درصد وزنی خاک نشان دادند

هدایت هیدرولیکی خاک و نسبت خلل و فرج در اثر افزودن افزایش یافت. ایشان علت این افزایش را واکنش شیمیایی بین شیرابهٔ اسیدی و کانی‌های رسی عنوان کردند.

سایر محققان مانند Zupanc and Zupanicic Justin (2010) در تحقیقی تأثیر شیرابهٔ زباله و شیرابهٔ کمپوست زبالهٔ شهری را بر خصوصیات خاک بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند شیرابهٔ زباله ظرفیت آب در دسترس خاک را بیش‌تر از ۵۲ درصد افزایش می‌دهد، در حالی‌که شیرابهٔ کمپوست ظرفیت آب در دسترس را ۴۷ درصد کاهش داد. در بررسی دیگری، Torabi Farsani and Afyuni (2021) گزارش کردند شیرابه در خاک لوم رسی شنی سبب تغییرات مثبتی شامل کاهش چگالی ظاهری خاک، افزایش میزان آب قابل استفاده و افزایش هدایت هیدرولیکی خاک شده‌است. هم‌چنین، ایشان عنوان کردند شیرابه در خاک لوم رسی نتایج عکس داشت و استفاده از شیرابه در این بافت خاک توصیه نمی‌شود. در مطالعه‌ای، Bowman et al. (2002) دریافتند آبیاری شیرابهٔ زباله با غلظت ۱۰۰ درصد موجب افزایش چگالی ظاهری خاک از ۱/۱ به ۱/۳ گرم در سانتی‌متر مکعب و کاهش تخلخل خاک از ۶۲ درصد به ۵۵ درصد شد. در نهایت، Asadi et al.(2011) افزایش قابل‌توجهی در میزان حد روانی و حد خمیری خاک را پس از کاربرد شیرابهٔ زباله و شیرابهٔ کمپوست زباله ثبت کردند که اثر شیرابهٔ کمپوست زباله بیش‌تر از شیرابهٔ زباله بود. از برآیند نتایج در این زمینه می‌توان برداشت کرد اثر شیرابهٔ زباله بر خصوصیات فیزیکی خاک تحت تأثیر عواملی نظیر میزان کاربرد یا غلظت شیرابه، املاح و pH شیرابه و خاک و هم‌چنین، بافت و نوع کانی‌های تشکیل‌دهندهٔ خاک است.

۳-۲-۳- تأثیر شیرابهٔ زباله بر ویژگی‌های زیستی خاک

ویژگی‌های میکروبیولوژیکی و بیوشیمیایی خاک، شاخص‌های حساس و اولیه تحت تأثیر تنش هستند. ویژگی‌های زیستی خاک تحت تأثیر آبیاری شیرابهٔ زباله بر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک مانند میزان فلزات سنگین و عناصر کم‌مصرف و پرمصرف هستند، زیرا شیرابه سبب ایجاد یک پتانسیل بالقوه از مواد مغذی برای ریزموجودات خواهد شد. به‌عنوان نمونه فعالیت آنزیم‌های خاک می‌تواند به‌عنوان یک شاخص یکپارچه از وضعیت زیستی خاک عمل کند (Nyika, 2021). به‌عنوان مثال، Wydro et al. (2022) دریافتند که تحت تأثیر شیرابهٔ زباله، فعالیت آنزیم دهیدروژناز در خاک نسبت به تیمار شاهد افزایش یافت اما در طول آزمایش این روند کاهشی بود. آنان عنوان کردند فعالیت آنزیم دهیدروژناز می‌تواند نشان‌دهندهٔ میزان قدرت اکسیداتیو خاک، تعداد سلول‌های میکروبی زنده و فعالیت‌های میکروبی خاک باشد. از سوی دیگر، فعالیت آنزیم بتا-گلوکسیداز در خاک پس از کاربرد شیرابه با غلظت ۱۰۰ درصد در طول دورهٔ تحقیق به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای کم‌تر از شاهد بود، اگرچه سطح آن در پایان آزمایش بالاتر از شاهد بود. در تحقیقی، Tsang (2006) گزارش کرد فعالیت آنزیم دهیدروژناز هم در تیمار شیرابه و هم در تیمار شاهد یا آبیاری با آب افزایش یافت. ایشان عنوان کرد مقدار بیش‌تر عناصر غذایی و آب اثرات مطلوبی برای رشد جمعیت باکتریایی دارد و به نظر می‌رسد ترکیبات موجود در شیرابه بر بقای ریزموجودات خاک تأثیری ندارند. هم‌چنین، Cheng et al. (2011) عنوان کردند آبیاری شیرابهٔ زباله می‌تواند فعالیت آنزیم فسفاتاز را افزایش داده، در حالی‌که فعالیت آنزیم اوره آز را به‌دلیل افزایش میزان نیتروژن خاک کاهش داد. آنان یک همبستگی منفی بین محتوای نیتروژن خاک و فعالیت آنزیم اوره آز مشاهده کردند که دلالت بر جلوگیری از معدنی شدن نیتروژن با آبیاری شیرابه دارد. هم‌چنین، گزارشاتی از رابطهٔ مستقیم بین میزان کربن آلی خاک نشأت گرفته از بقایای میکروبی و فعالیت و جمعیت ریزموجودات ثبت شده است. در تحقیق دیگری، Breza-Boruta et al. (2016) بیان کردند رابطهٔ معناداری بین کربن آلی ارگانیک و تعداد کل باکتری‌ها، ریزموجودات آمیلولیتیک (باکتری‌های دارای آنزیم آمیلاز)، سلولولیتیک (باکتری‌های دارای آنزیم سلولاز) و پروتئولیتیک (باکتری‌های دارای آنزیم پروتئاز) وجود دارد. یافته‌های مشابهی در تحقیق Taylor et al. (2002) در مورد همبستگی بین فعالیت آنزیمی ریزموجودات و میزان کربن آلی ارگانیک در پی کاربرد شیرابه در خاک یافت شد. در مطالعه‌ای که توسط Wydro et al. (2022) صورت گرفت نشان داده شده که فراوانی و ساختار جمعیت میکروبی در خاکی که شیرابه افزوده شده به‌طور قابل‌توجهی متفاوت بوده و در طول زمان تغییر کرده است. بدین‌صورت که در ابتدای آزمایش تنوع باکتریایی در خاک‌های دارای شیرابهٔ زباله کم‌تر از شاهد بود و در طول آزمایش افزایش یافت. بیش‌ترین تنوع و یکنواختی در جمعیت قارچی در این مطالعه نیز به‌طور برجسته‌ای در خاک‌های دارای شیرابه با غلظت ۱۰۰ درصد مشاهده شد. یافته‌هایی از کاهش فعالیت ریزموجودات نیز در اثر نفوذ شیرابهٔ زبالهٔ حاوی ترکیبات و عناصر آلاینده به خاک در مطالعات ذکر شده است. هم‌چنین، Breza-Boruta et al. (2016) نشان دادند سطح شمارش ریزموجودات به‌شدت دارای تفاوت‌هایی در عمق‌های مختلف خاک بوده است. به‌عنوان مثال، تجزیهٔ کم‌تر پروتئین، سلولز و نشاسته در خاک می‌تواند نشان دهد که در آن محیط بازدارنده‌های مختلفی وجود دارد. آنان چنین پدیده‌ای را در لایهٔ سطحی خاک مشاهده کردند که

تعداد ریزموجودات سلولولیتیک، آمیلولیتیک و پروتئولیتیک چندین برابر کم‌تر از تیمار شاهد بود.

۳-۲-٤- تأثیر شیرابهٔ زباله بر رشد، عملکرد و تغذیهٔ گیاه

یکی از مشکلات و محدودیت‌های اکثر مناطق کشاورزی کمبود نیتروژن است. از این‌رو، برای احیای این زمین‌ها معمولاً اضافه‌کردن مقادیر زیاد کود نیتروژن ضروری است. شیرابهٔ زباله دارای عناصر غذایی مهمی نظیر نیتروژن است که برای بهبود رشد گیاه و تجمع ساختاری آن ضروری است (MacDonald et al., 2008). افزایش نیتروژن خاک و گیاه که صرفاً به تثبیت هم‌زیستی و رسوب اتمسفری متکی است، زمانی تسریع می‌یابد که ورودی نیتروژن خارجی وجود داشته باشد و زیست‌تودهٔ بیش‌تری با محتوای نیتروژن بافتی بالاتر تشکیل شود. بیش‌تر مطالعات در این زمینه افزایش محتوای نیتروژن برگی را تحت آبیاری شیرابه نشان دادند. هم‌چنین، شیرابهٔ زباله علاوه‌بر داشتن ترکیبات آلی، حاوی مقادیر قابل‌ملاحظه‌ای از عناصر کم‌مصرف به‌ویژه آهن و روی بوده که با توجه به کمبود این عناصر در خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک می‌تواند با کلات‌شدن با اجزای آلی سبب رفع کمبود در خاک و برطرف‌کردن نیاز گیاه شود (Singh et al., 2017).

بعضی از مطالعات افزایش رشد و عملکرد را در پی استفاده از شیرابهٔ رقیق شده برای آبیاری گیاهان ثبت کردند. به‌عنوان مثال، Wong and Leung (1989) عنوان کردند عملکرد گونه‌های کلم *Brassica chinensis* و *Brassica parachinensis* هنگام آبیاری با شیرابهٔ رقیق شده افزایش یافت. یافته‌های تحقیق Liang et al. (1999) نیز نشان داده که آبیاری با شیرابهٔ رقیق شده باعث افزایش رشد، بقا و هدایت روزنه‌ای گونه‌های درختی *Acacia confusa*، *Leucaena leuocephala* و *Eucalyptus torelliana* شد. در مقابل تحقیقاتی نیز وجود دارد که نشان‌دهندهٔ اثرات منفی استفاده از شیرابهٔ زباله در آبیاری گیاهان است. مثلا، Revel et al. (1999) از شیرابه با سطوح بالای یون‌های کلر، پتاسیم، سدیم و آمونیوم برای آبیاری چچم استفاده کردند که افزایش رشد گیاه همراه با سمیّت سدیم را گزارش کردند. از طرفی بیان شده آبیاری غرقابی شیرابه شور به نهال افرای قرمز یک ساله منجر به از بین رفتن تورگ در برگ‌های گره بالایی و کاهش سرعت تعرق بلافاصله پس از اولین کاربرد شد. به‌همین ترتیب در طی یک دورهٔ ۲۵ روزه، نرخ فتوسنتز به حدود ۵۰ درصد تیمار شاهد (آبیاری با آب مقطر) کاهش یافت (Shrive and McBride, 1995). یافته‌هایی از افزایش بیش از حد نیتروژن برگی و افزایش حساسیت به سرما، خشکسالی و آفات نیز گزارش شده است (Cheng et al., 2011). یافته‌های تحقیق Mohamed and Ebead (2013) نیز نشان داده که در چغندر سوئیسی آبیاری شیرابه باعث تأخیر در رشد به‌دلیل سمیّت کاتیونی می‌شود. همان طورکه در بخش قبل توضیح داده شد یکی از نگرانی‌های استفاده از شیرابهٔ زباله، شوری آن است. املاح شیرابهٔ زباله، آب موجود در گیاهان را کاهش داده و رشد آن‌ها را به تأخیر می‌اندازد. هم‌چنین، این املاح باعث ایجاد سمیّت در برگ‌های گیاه می‌شوند که ناشی از افزایش سطوح یون‌های بر، سدیم و به‌خصوص کلر بوده که می‌توانند علاوه‌بر سمیّت گیاهی با کاهش جذب نیتروژن تعادل عناصر غذایی را در گیاهان به‌هم بزنند. گیاهانی که در خاک شور رشد می‌کنند ظاهری مومی شکل و سبز آبی تیره و ضخیم‌شدن برگ‌ها را ایجاد می‌کنند. در موارد شدیدتر، علائمی مانند کلروز و ضایعات نکروزه یا نوک برآمدگی ممکن است مشاهده شود (Parida and Das, 2005).

تغییر در میزان کلر خاک و گیاه به ندرت در تحقیقات مربوط به آبیاری پساب فاضلاب مورد توجه قرار گرفته است. با این حال، در آبیاری شیرابه به یک تهدید تبدیل می‌شود؛ زیرا کلر یکی از آنیون‌های رایج در شیرابه‌های مراکز دفن زباله است. به‌طورکلی اثرات بازدارندگی رشد و خطرات بالقوهٔ کلر و استرس اُسمزی ناشی از آن زمانی تشدید می‌شود که یون کلر در اثر تبخیر–تعرق در خاک باقی بماند. علاوه‌بر تنش اُسمزی، کلر می‌تواند سمیّت یونی خاصی را برای گیاهان حساس به آن مانند ریزش برگ یا حتی از بین رفتن کامل محصول نشان دهد. (Zalesny et al., 2008b). در تحقیقی، Stephens et al. (2000) نشان دادند غلظت ۱۰۵ میلی‌گرم بر لیتر کلر در آبیاری شیرابه زباله سبب سوختگی برگ شد. هم‌چنین، آنان مشاهده کردند افزایش کلر در آبیاری شیرابهٔ زباله زیست‌تودهٔ شاخ و برگ درخت بید را سه درصد کاهش داد. مؤثرترین و اقتصادی‌ترین راه برای کنترل اثرات مضر املاح شیرابه، رقیق‌کردن شیرابه به غلظتی است که هیچ اثر نامطلوبی ایجاد نکند. هم‌چنین، باید از تجمع املاح ناشی از شیرابه در خاک به‌ویژه در شرایط خشکی جلوگیری نمود و آبیاری را باید بیش از حد تبخیر–تعرق انجام داد تا آبشویی کافی فراهم شود (Zalesny et al., 2008b). انباشت فلزات سنگین نظیر سرب، کادمیوم و روی در خاک و به‌ویژه گیاه یکی دیگر از عوارض آبیاری شیرابهٔ زباله است که با توجه به نقش این فلزات در سمیّت گیاهی و تجمع آن‌ها در زنجیرهٔ غذایی مورد توجه هستند. گیاهان به برخی از فلزات سنگین در غلظت‌های بسیار پایین نیاز دارند اما زمانی‌که غلظت این فلزات از حد نیاز گیاه فراتر می‌رود، منجر به بروز اختلالات متابولیکی و بازدارندگی رشد اغلب گونه‌های گیاهی می‌شود (Kabata-Pendias, 2010). در جدول ۲ میزان مجاز فلزات سنگین و اثرات اصلی این فلزات در گیاهان آمده است. افزایش میزان فلزات سنگین پس از آبیاری با شیرابهٔ زباله

در مطالعات مختلف گزارش شده است. در این راستا، Guidi Nissim et al. (2021) در آبیاری صنوبر و بید با شیرابهٔ زباله در دو سال افزایش فلزات سنگین را در بافت گیاهی مشاهده کردند، به‌طوری که میزان کادمیوم در برگ صنوبر (یک میلی‌گرم بر کیلوگرم) بالاتر از بید (۰/۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم) بود. میزان نیکل هم در ساقهٔ هر دو گونهٔ بالاتر از اندام‌های دیگر و در صنوبر بالاتر از بید بود. در مجموع می‌توان گفت که اکثر مطالعات افزایش فلزات سنگین زیر سطح مجاز را گزارش کردند که تا حد زیادی بستگی به میزان این فلزات در شیرابه و نوع و میزان کاربرد شیرابه داشت (Khoshgoftarmanesh and Kalbasi, 2001).

تغییرات کوتاه‌مدت در ترکیب شیرابه نیز ممکن است به شدت بر سلامت گیاه تأثیر بگذارد و به عدم اطمینان به نتیجهٔ طرح آبیاری شیرابه بیافزاید. عدم قطعیت در پیش‌بینی نتایج آبیاری، همراه با اثرات مضر احتمالی برای گیاه و خاک، منجر به عدم تمایل کشاورزان به استفاده از شیرابه برای آبیاری گیاهان می‌شود. نتایج متناقض نه‌تنها بین آزمایش‌ها، بلکه بین گونه‌های گیاهی در یک مطالعه نیز مشاهده می‌شود. Cureton et al. (1991) رشد قابل‌توجهی در بید مجنون (*Salix babylonica*)، دانهٔ قناری کوهستانی (*Phalaris arundinacea*) و صنوبر سیاه (*Populus nigra*) را گزارش کردند که تحت آبیاری شیرابه قرار گرفتند. اما علائم سمیّت گیاهی مانند برگ‌های قهوه‌ای و لکه‌های نکروزه در برگ‌های صنوبر مشاهده شد، در حالی‌که از بین رفتن کلروفیل یا حتی کلروز کامل در بید مشاهده شد. این یافته‌ها نشان می‌دهد که گونه‌های گیاهی، مشخصات شیرابه، روش‌های کاربرد و برهم‌کنش‌های آن‌ها همگی تأثیر قابل‌توجهی بر نتیجهٔ آبیاری شیرابه دارند. تأثیر آبیاری شیرابهٔ زباله بر تغذیه و عملکرد گونه‌های درختی، گونه‌های زراعی و سبزیجات به‌ترتیب در جدول‌های ۳ تا ۵ آمده است.

جدول ۲- میزان مجاز فلزات سنگین و اثرات آن‌ها در گیاهان (میلی‌گرم بر کیلوگرم)

Table 2- The permissible value of heavy metals and their effects on plants

نوع فلز سنگین (Type of heavy metal)	میزان مجاز در گیاه (Permissible value in plant) (WHO,1996)	پیامدها در گیاه (Consequences in plants) (Jorge et al., 2005)
کادمیوم (Cd)	0.02	کاهش جوانه‌زنی بذر، مقدار لیپید و رشد گیاه؛ القای تولید کلات‌های گیاهی
روی (Zn)	0.60	کاهش سمیّت نیکل و جوانه‌زنی بذر؛ افزایش رشد گیاه و نسبت ATP به کلروفیل
مس (Cu)	10	جلوگیری از فتوسنتز، رشد گیاه و فرآیندهای تولیدمثلی؛ کاهش سطح بیرونی تیلاکوئید
کروم (Cr)	1.30	کاهش فعالیت آنزیمی و رشد گیاه؛ آسیب رساندن به غشای سلول و ریشهٔ گیاه و ایجاد سبزاک
سرب (Pb)	2	کاهش تولید کلروفیل و رشد و عملکرد گیاه؛ افزایش سوپراکساید دیسموتاز
نیکل (Ni)	10	کاهش جوانه‌زنی بذر، تجمع مادهٔ خشک، تولید پروتئین، کلروفیل‌ها و آنزیم‌ها؛ افزایش اسیدهای آمینهٔ آزاد

جدول ۳- تأثیر آبیاری شیرابهٔ زباله بر تغذیه و عملکرد گونه‌های درختی

Table 3- The impact of landfill leachate irrigation on the nutrition and performance of tree species

گیاه رشد یافته (Plant grown)	نوع و شیوهٔ کاربرد شیرابهٔ زباله (Type and method of using landfill leachate)	کشور (Country)	نتایج (Results)	منبع (Reference)
بید برگ هلویی (*Salix amygdalina*)	غلظت‌های مختلف شیرابهٔ زباله (Different concentration of landfill leachate)	لهستان (Poland)	عدم رشد گیاه در نهال‌های قرار گرفته در شیرابه در غلظت ۱۰۰ درصد و نکروز کامل در این غلظت در نهال‌هایی که ابتدا چهار هفته در آب شهری رشد کردند؛ کاهش عملکرد و اجزای عملکرد با افزایش غلظت شیرابه	Bialowiec and Randerson (2010)
صنوبر (*Populus*)	شیرابهٔ زباله خام (Raw landfill leachate)	آمریکا (USA)	اندازه‌گیری نیتروژن بافت گیاهی با میانگین ۲/۰۳ درصد در تیمارهای آبیاری شده با شیرابه در زمان برداشت؛ اندازه‌گیری بیش‌ترین میزان پتاسیم، منیزیم، کلسیم، بر و منگنز در برگ، روی مس و سرب در چوب و فسفر، آهن و آلومینیوم در ریشهٔ تیمارهای آبیاری شده با شیرابه	Zalesny et al. (2008a)
آکاسیا کنفوسا (*Acacia confusa*)	غلظت‌های مختلف شیرابهٔ زباله (Different concentration of landfill leachate)	هنگ کنگ (Hong Kong)	کاهش نرخ فتوسنتز در بالاترین غلظت شیرابه (۷۳ درصد)؛ افزایش زیست‌تودهٔ کل در نهال بدون ریزوبیوم به استثنای کم‌ترین غلظت شیرابه (۰/۵۸ درصد)؛ میزان نیتروژن بالاتر در ریشه و بافت گیاهی نهال‌های دارای ریزوبیوم و فسفر بالاتر در ریشهٔ نهال‌های بدون ریزوبیوم.	Chan et al. (1999)
افرا قرمز (*Acer rubrum*)	غلظت‌های مختلف شیرابهٔ زباله (Different concentration of landfill leachate)	کانادا (Canada)	افزایش قابل‌توجه میزان آهن و منگنز برگ در شیرابهٔ خام و رقیق‌شده؛ افزایش میزان نیتروژن برگی در تیمارهای شیرابهٔ تصفیه نشده؛ کاهش میزان کلسیم در تیمارهای شیرابهٔ رقیق‌شده	Gordon et al. (1989)

جدول ٤- تأثیر آبیاری شیرابهٔ زباله بر تغذیه و عملکرد گونه‌های زراعی

Table 4- The impact of landfill leachate irrigation on the nutrition and performance of crop species

گیاه رشد یافته (Plant grown)	نوع و شیوهٔ کاربرد شیرابه زباله (Type and method of using landfill leachate)	کشور (Country)	نتایج (Results)	منبع (Reference)
سویا (*Glycin max*)	غلظت‌های مختلف شیرابهٔ زباله (Different concentration of landfill leachate)	اندونزی (Indonesia)	نداشتن تأثیر معنادار در سطح احتمال پنج درصد در کاربرد غلظت‌های مختلف شیرابه بر ارتفاع بوته و قطر ساقه در کاربردهای خاکی و برگی؛ افزایش قابل‌توجه وزن دانه با ۲۵/۷۲ و ۲۶/۱۰ گرم به‌ترتیب در استفادهٔ برگی و خاکی با غلظت ۴۰ میلی‌گرم شیرابه بر یک لیتر آب	Hasnelly et al. (2021)
سورگوم دورنگ (*Sorghum bicolor*)	غلظت‌های مختلف شیرابهٔ زباله (Different concentration of landfill leachate)	ایران (Iran)	خشک‌شدن گیاه پس از دوبار آبیاری شیرابه با غلظت‌های ۱۰۰، ۷۰ و ۵۰ درصد؛ کاهش زیست‌تودهٔ تر، زیست‌تودهٔ خشک، طول ساقه و طول ریشه در غلظت ۳۰ درصد شیرابه	Salehi et al. (2020)
شاهدانه (*Cannabis sativa*)	شیرابهٔ زباله خام (Raw landfill leachate)	جمهوری چک (Czech Republic)	کاهش قطر و طول ساقه در سال اول. کاهش ۱۲/۸۵ درصدی میزان فیبر ساقه در سال اول در رقم Monoica؛ کاهش میزان الیاف چوبی در آوند چوبی در هر دو سال و کاهش الیاف پوستی در آوند آبکش در سال اول در رقم Monoica؛ همبستگی منفی بین میزان عنصر روی و میزان کل فیبر	Mendel et al. (2020)
لوبیا کرچک (*Ricinus communis*)	غلظت‌های مختلف شیرابهٔ زباله (Different concentration of landfill leachate)	برزیل (Brazil)	بالاتربودن ۲۸/۹۵ درصدی قطر ساقه در تیمار شاهد نسبت به تیمارهای آبیاری شده با شیرابه پس از ۳۰ روز؛ بالاتربودن سطح برگ در غلظت ۲۰ درصد شیرابه؛ اندازه‌گیری بالاترین وزن دانه در غلظت ۶۰ درصد شیرابه با ۱۴/۴۸۴ گرم	Filho et al. (2018)
آفتابگردان (*Helianthus annus*)	شیرابهٔ زبالهٔ خام (Raw landfill leachate)	برزیل (Brazil)	افزایش قطر طوقه، ارتفاع ساقه و تعداد برگ در تمامی مقادیر مصرف شده؛ افزایش ۲۲۸ درصدی زیست‌تودهٔ ریشه و۳۰۰ درصدی زیست‌تودهٔ ساقه در کاربرد شیرابهٔ معادل ۱۰۰ کیلوگرم نیتروژن	Nunes Júnior et al. (2016)
گندم (*Triticum aestivum*)	غلظت‌های مختلف شیرابهٔ زباله (Different concentration of landfill leachate)	هند (India)	افزایش درصد جوانه‌زنی بذر در غلظت‌های بالای شیرابه و کاهش درصد جوانه‌زنی در غلظت‌های پایین شیرابه پس از سه روز؛ افزایش ۵۸ و ۶۱ درصدی طول ریشه در غلظت‌های ۱۰۰ و ۷۵ درصد شیرابه و کاهش طول ریشه در باقی تیمارها؛ افزایش ۲۱۳ و ۲۳۰ درصدی میزان کلروفیل برگ در غلظت‌های ۳۰ و ۴۰ درصد شیرابه	Mor et al. (2013)
ذرت (*Zea mays*)	غلظت‌های مختلف شیرابه زباله (Different concentration of landfill leachate)	رومانی (Romania)	کاهش رشد در ابتدا و افزایش رشد در انتهای آزمایش در تیمارهای آبیاری شده با شیرابه؛ اندازه‌گیری میزان بازدارندگی رشد برابر ۵/۸۷ درصد شیرابه	Cretescu et al. (2013)
برنج (*Oryza sativa*)	مقادیر مختلف شیرابهٔ زباله (Different Doses of landfill leachate)	ایران (Iran)	ظاهرشدن علائم سوختگی در بیش‌تر بوته‌ها در تیمار ۶۰۰ تن بر هکتار؛ افزایش عملکرد کاه از هفت تن در هکتار در شاهد به ۱۶/۷ تن در هکتار در تیمار ۳۰۰ تن بر هکتار شیرابه؛ اندازه‌گیری بیش‌ترین میزان عناصر نیتروژن، فسفر و پتاسیم در دانه و کاه در تیمار ۳۰۰ تن بر هکتار	Khoshgoftarmanesh and Kalbasi (2001)

جدول ۵- تأثیر آبیاری شیرابهٔ زباله بر تغذیه و عملکرد سبزیحات

Table 5- The impact of landfill leachate irrigation on the nutrition and performance of vegetables

گیاه رشد یافته (Plant grown)	نوع و شیوهٔ کاربرد شیرابه زباله (Type and method of using landfill leachate)	کشور (Country)	نتایج (Results)	منبع (Reference)
اسفناج لاگوس (*Lagos spinach*)	مقادیر مختلف شیرابهٔ زباله (Different Doses of landfill leachate)	تایلند (Thailand)	اندازه‌گیری بیش‌ترین غلظت فلزات سنگین در گیاه در غلظت ۴۰ میلی‌گرم بر لیتر شیرابهٔ مخلوط شده با خاک؛ بالاتربودن غلظت کادمیوم و سرب از سطح قابل تحمل روزانه؛ اندازه‌گیری سرب، کادمیوم، روی و نیکل در محدودهٔ دارای خطر انسانی (HIR>1) و کروم در محدودهٔ نبود خطر انسانی (HIR<1).	Lanrewaju et al. (2019)
گوجه (*Lycopersicon esculentum*)	غلظت‌های مختلف شیرابهٔ زباله تصفیه شده و نشده (Different concentration of treated and untreated landfill leachate)	تونس (Tunisia)	افزایش تعداد برگ، وزن ریشه و اندام‌های هوایی؛ افزایش دو برابری میزان نیتروژن ریشه و ۶/۷ برابری نیتروژن اندام‌های هوایی	Turki and Bouzid (2017)
چغندر سوئیسی (*Swiss chard*)	غلظت‌های مختلف شیرابهٔ زباله (Different concentration of landfill leachate)	آفریقای جنوبی (South Africa)	کاهش ۵۰ درصدی ارتفاع گیاه در غلظت ۱۰۰ درصد شیرابه؛ اندازه‌گیری بیش‌ترین میزان مس، روی و کروم به‌ترتیب با دو، ۱۱ و ۲/۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم در غلظت ۱۰۰ درصد شیرابه که از حد مجاز فراتر نرفتند؛ افزایش قابل‌توجه میزان سدیم و کاهش میزان کلسیم و منیزیم در برگ در تیمارهای آبیاری شده با شیرابه	Abdulmalek (2014)
فلفل سبز (*Capsicum annuum*)	غلظت‌های مختلف شیرابهٔ زباله (Different concentration of landfill leachate)	ایران (Iran)	افزایش وزن تر، ارتفاع بوته و تعداد شاخه‌های فرعی در غلظت ۴۰ درصد شیرابه؛ افزایش شش، ۳۱ و شش درصدی میزان آهن، مس و منگنز بافت گیاهی در غلظت ۶۰ درصد شیرابه	Astaraei and Aryabod (2008)
کاهو (*Lactuca sativa*)	شیرابهٔ کمپوست زباله رقیق شده با غلظت ۲۰ درصد (Diluted municipal solid waste compost leachate with a concentration of 20%)	ایران (Iran)	کاهش معنادار زیست‌تودهٔ کاهو در تیمار خاک سترون شده در سطح احتمال پنج درصد؛ افزایش غلظت روی در اندام هوایی از ۸۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم در تیمار شاهد (آب مقطر) به ۱۵۱/۹ و ۱۹۰/۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم در تیمارهای شیرابه غیرسترون و شیرابهٔ سترون شده؛ افزایش معنادار آهن در اندام هوایی در سطح احتمال پنج درصد در تمامی تیمارها	Aryabod et al. (2008)
کلم برگ چینی (*Brassica chinensis*)	غلظت‌های مختلف شیرابهٔ زباله (Different concentration of landfill leachate)	هنگ کنگ (Hong Kong)	افزایش شاخص جوانه‌زنی و طول ریشه در غلظت ۱۰ درصد شیرابه مراکز دفن MYTC و PPV و غلظت پنج درصد مرکز دفن WENT.	Cheng and Chu (2007)

۴- نتیجه‌گیری

به‌طورکلی با توجه به ویژگی‌های شیرابهٔ زباله شهری و دارا بودن مقادیر قابل‌توجه مادهٔ آلی و عناصر غذایی (کم‌مصرف و پرمصرف) به‌خصوص نیتروژن، از آن می‌توان به‌عنوان یک کود مایع و جایگزین آب آبیاری در مناطق خشک استفاده نمود. اما قبل از کاربرد بایستی به‌نکاتی جهت استفاده در زمین‌های کشاورزی توجه داشت تا بهترین عملکرد با کم‌ترین آسیب محیط زیستی را در خاک و آب‌های زیرزمینی به‌دست آورد. قبل از کاربرد، بایستی ترکیب شیرابهٔ زباله تعیین شود تا بتوان با نگاه درست شیوهٔ آبیاری و میزان مصرف شیرابه را تعیین کرد. انتخاب گونه‌های گیاهی مناسب که دارای تحمل بالاتری نسبت به شیرابه هستند نیز یکی از مسائل مهم در آبیاری شیرابه است. با توجه به میزان عناصر سنگین، شوری و میزان بالای املاح نظیر سدیم و کلر و مقدار قابل‌ملاحظه اشکال نیتروژن موجود در شیرابه توصیه می‌شود از استفاده مکرر و چندساله شیرابه خام به‌ویژه در گیاهان حساس خودداری شود، مگر آن‌که به‌صورت رقیق شده استفاده شود تا اثرات مخرب آن در خاک و گیاه کاهش یابد. آبیاری متناوب (یکبار شیرابه و یکبار آب) نیز راه‌کار مناسبی است که ضمن آبشویی املاح و مقادیر اضافی نیتروژن باعث رفع نیاز گیاه و افزایش عملکرد خواهد شد. البته باید به این موضوع که آب اضافی سبب تنش به گیاه نشود هم دقت نمود. حجم آبیاری شیرابه بایستی با توجه به نوع و تحمل گیاه، میزان نیاز نیتروژن و سمیّت شیرابه محاسبه شود. در مجموع می‌توان با توجه به عمر مفید شیرابه، کاربرد آن را به‌عنوان منبع جایگزین برای کودهای شیمیایی به‌خصوص کود نیتروژنه و آب آبیاری توصیه نمود.

سپاسگزاری

از تمامی کسانی که در طی نگارش مقالهٔ حاضر اینجانب را یاری نمودند به‌ویژه جناب آقای سید علیرضا موسوی الیردی بابت نظراتشان در نسخهٔ اولیهٔ مقاله، تشکر و قدردانی می‌کنم.

تضاد منافع نویسندگان

هیچ‌گونه تضاد منافعی در خصوص نگارش، انتشار مطالب و نتایج این تحقیق وجود ندارد.

دسترسی به داده‌ها

همهٔ اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است.

مشارکت نویسندگان

سید مصطفی عمادی بالادهی: انتخاب و تعیین محدودهٔ مطالعه، بررسی و جست و جوی تحقیق‌های انجام شده در این حوزه، انتخاب و شناسایی تحقیق‌های مرتبط پیشین، ترکیب نتایج تحقیق‌ها، نگارش نسخهٔ اولیهٔ مقاله، ویرایش و بازبینی مقاله.

منابع

آریابد، ثمانه، فتوت، امیر، لکزیان، امیر، و حق‌نیا، غلامحسین (۱۳۸۷). اثر شیرابه کمپوست زباله شهری بر قابلیت جذب برخی عناصرکم‌مصرف در ذرت و کاهو. *پژوهش‌های خاک*، ۲۲(۱)، ۴۷-۵۷. doi:10.22092/IJSR.2008.126982

آستارایی، علیرضا، و آریابد، ثمانه (۱۳۸۷). اثر شیرابهٔ زبالهٔ شهری بر خصوصیات رشدی و جذب عناصر مغذی کم‌مقدار گیاه فلفل. *علوم محیطی*، ۵(۳)، ۹۵-۱۰۶.

ترابی فارسانی، بامداد، و افیونی، مجید (۱۴۰۰). اثر شیرابه کمپوست زباله شهری بر ویژگی‌های فیزیکی، هیدرولیکی، رطوبتی خاک و عملکرد گیاه ذرت. *علوم آب و خاک*، ۲۵(۱)، ۱-۱۴. doi:20.1001.1.24763594.1400.25.1.1.1

جلالی پور، هانیه، و قائمی، علی اصغر (۱۳۹۲). بررسی امکان استفاده از گیاه وتیور در پالایش دفن گاه پسماندهای شهری. *پژوهش آب ایران*، ۷(۱۲)، ۴۵-۵۲.

خوشگفتارمنش، امیرحسین، و کلباسی، محمود (۱۳۸۰). اثر شیرابه زباله بر خصوصیات خاک و رشد و عملکرد برنج. *علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک*، ۱۵(۱)، ۱۲-۲۴.

خوشگفتارمنش، امیر حسین، و کلباسی، محمود (۱۳۸۱). اثر باقی‌مانده شیرابه زباله بر ویژگی‌های خاک و رشد عملکرد گندم. *علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک*، ۶(۳)، ۱۴۱-۱۴۹. dor:20.1001.1.24763594.1381.6.3.11.2

عبدالهی منصورخانی، صدرالدین، اسدی‌لور، مهدی، فرزادیان، علی، اگدرنژاد، اصلان، و عصاره، علی (۱۴۰۰). گیاه‌پالایی فلزات سنگین به وسیله گونه گیاهی وتیور در شرایط آبیاری با آب‌های نامتعارف. *محیط‌زیست و مهندسی آب*، ۸(۴)، ۷۹۶-۸۰۹. doi:10.22034/jewe.2022.311963.1653

عمادی بالادهی، سید مصطفی، صادق‌زاده، فردین، بهمنیار، محمد علی، و جلیلی، بهی (۱۴۰۱-الف). تأثیر سطوح رطوبتی مختلف بر غنی‌سازی کود کمپوست گاوی با ضایعات فلزی آهن و روی. *مطالعات علوم محیط‌زیست*، ۸(۳)، ۶۸۹۲-۶۹۰۲. doi:10.22034/JESS.2023.378611

عمادی بالادهی، سید مصطفی، صادق‌زاده، فردین، بهمنیار، محمد علی، و جلیلی، بهی (۱۴۰۱-ب). غنی‌سازی کود کمپوست گاوی با ضایعات فلزی آهن و روی در رطوبت‌های مختلف. هفتمین کنگره بین‌المللی توسعه کشاورزی و محیط‌زیست با تأکید بر برنامه توسعه ملل، تهران.

عمادی بالادهی، سید مصطفی، صادق‌زاده، فردین، بهمنیار، محمد علی، و جلیلی، بهی (۱۴۰۱-پ). غلظت آهن و روی قابل جذب خاک‌هایی با بافت مختلف تحت تأثیر کاربرد کود کمپوست گاوی غنی شده با ضایعات فلزی آهن و روی. هفتمین کنگره بین‌المللی توسعه کشاورزی و محیط‌زیست با تأکید بر برنامه توسعه ملل، تهران.

قائمی، علی اصغر، و مجدالدین، فروغ (۱۳۹۵). بررسی گیاه پالایی وتیور و اکالیپتوس در جذب برخی فلزات سنگین از فاضلاب در خاک آلوده به شیرابه زباله. *مهندسی منابع آب*، ۹(۱)، ۹۵-۱۰۶. dor:20.1001.1.20086377.1395.9.28.8.9

کلباسی، محمود، و گندمکار، اکبر (۱۳۷۶). اثر شیرابه زباله بر عملکرد و ترکیب شیمیایی ذرت و اثر باقیمانده آن بر بعضی ویژگی‌های خاک. *علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک*، ۱(۲)، ۴۱-۵۱. dor:20.1001.1.22518517.1376.1.2.4.3

معزی‌پور، آیدا، پور طهماسبی، کامبیز، متشرع‌زاده، بابک، اولادی، رضا، و رمضانی سعادت آبادی، احمد (۱۳۹۸). اثر آبیاری با شیرابه زباله بر مقدار عناصر شیمیایی در اندام هوایی درختان صنوبر و زبان گنجشک. *جنگل ایران*، ۱۱(۴)، ۴۵۸-۴۷۵.

میرزائی، محمد جواد، طباطبائی، حسن، حیدرپور، منوچهر، و نجفی، پیام (۱۳۹۱). تأثیر شیرابه زباله بر خصوصیات فیزیکی و هیدرولیکی خاک غنی شده با زئولیت. *علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک*، ۱۷(۶۶)، ۴۸-۳۷. dor:20.1001.1.24763594.1392.17.66.7.1

References

Abdollahi Mansurkhani, S., Asadilour, M., Farzadian, A., Egdernezhad, A., & Asareh, A. (2022). Phytoremediation of heavy metals by vetiver plant species in unconventional water. *Environment and Water Engineering*, *8*(4), 796-809. doi:10.22034/jewe.2022.311963.1653. [In Persian]

Abdulmalek, M.M. (2014). Influence of landfill leachate on growth response and mineral

content of *Swiss Chard*. M.Sc. Thesis, Cape Peninsula University of Technology, Cape Town, South Africa.

Aderemi, A.O., Oriaku, A.V., Adewumi, G.A., & Otitoloju, A.A. (2011). Assessment of groundwater contamination by leachate near a municipal solid waste landfill. *African Journal of Environmental Science and Technology*, *5*(11), 933-940. doi:10.5897/AJEST11.272

Adhikari, B., Dahal, K.R., & Khanal, S.N. (2014). A review of factors affecting the composition of municipal solid waste landfill leachate. *International Journal of Engineering Science and Innovative Technology*, *3*(5), 273-281.

Ahmad, H.R., Sabir, M., Ur Rehman, M.Z., Aziz, T., Maqsood, M.A., Ayub, M.A., & Shahzad, A. (2020). Wastewater irrigation-sourced plant nutrition: Concerns and prospects. Pp. 417-434. In: Aftab T Hakeem KR (eds), *Plant Micronutrients*, Springer. doi.:10.1007/978-3-030-49856-6_18

Alaribe, F.O., & Agamuthu, P. (2015). Fertigation of *Brassica rapa* L. using treated landfill leachate as a nutrient recycling option. *South African Journal of Science*, *122*(3/4), 1-8. doi:10.17159/sajs.2016/20150051

Alvarez-Bernal, D., Contreras-Ramos, S.M., Trujillo-Tapia, N., Olalde-Portugal, V., Frías-Hernández, J.T., & Dendooven, L. (2006). Effects of tanneries wastewater on chemical and biological soil characteristics. *Applied Soil Ecology*, *33*(3), 269–277. doi:10.1016/j.apsoi l.2005.10.007

Andreottola, G., & Cannas, P. (1992). Chemical and biological characteristics of landfill leachate. Pp. 65-88. In: Christensen TH Cossu R & Stegmann R (eds), *Landfilling of Waste: Leachate*, Elsevier-London.

Arasan, S., Yilmaz, G., Akbulut, R.K., & Yetimoglu, T. (2007). Engineering properties of compacted clay liners contaminated by salt solution. Geotechnical Symposium, Adana, Turkey, Pp. 415-425.

Aronsson, P., Dahlin, T., & Dimitriou, I. (2010). Treatment of landfill leachate by irrigation of willow coppice – Plant response and treatment efficiency. *Environmental Pollution*, *158*(3), 795–804. doi:10.1016/j.envpol.2009.10.003

Aryabod, S., Fotovat, A., Lakzian, A., & Haghnia, G.H. (2008). Effect of municipal waste compost leachate on micronutrients uptake by maize and lettuce in sterile and non-sterile conditions. *Iranian Journal of Soil Research*, *22*(1), 47-57. doi:10.22092/IJSR.2008.126982. [In Persian]

Asadi, F., Shariatmadari, N., Moayedi, H., & Huat, B.B.K. (2011). Effect of MSW leachate on soil consistency under influence of electrochemical forces induced by soil particles. *International Journal of Electrochemical Science*, *6*(7), 2344-2351.

Astaraei, A., & Aryabod, S. (2008). Effect of municipal solid waste leachate on plant growth and micro elements' uptake of Green Chilli. *Environmental Sciences*, *5*(3), 95-106. [In Persian]

Bhagwat, R.V., Boralkar, D.B., & Chavhan, R.D. (2018). Remediation capabilities of pilot-scale wetlands planted with *Typha aungstifolia* and *Acorus calamus* to treat landfill leachate. *Journal of Ecology and Environment*, *42*(23), 1-8. doi:10.1186/s41610-018-0085-0

Bialowiec, A., & Randerson, P.F. (2010). Phytotoxicity of landfill leachate on willow – *Salix amygdalina* L. *Waste Management*, *30*(8/9), 1587–1593. doi:10.1016/j.wasman.2010.02.033

Bowman, M.S., Clune, T.S., & Sutton, B.G. (2002). Sustainable management of landfill leachate by irrigation. *Water, Air, & Soil Pollution*, *134*(1/4), 81-96. doi:10.1023/A:1014114500269

Brennan, R.B., Healy, M.G., Morrison, L., Hynes, S., Norton, D., & Clifford, E. (2016). Management of landfill leachate: The legacy of European Union Directives. *Waste Management*, *55*, 355-363. doi:10.1016/j.wasman.2015.10.010

Breza-Boruta, B., Lemanowicz, J., & Bartkowiak, A. (2016). Variation in biological and physicochemical parameters of the soil affected by uncontrolled landfill sites. *Environmental Earth Sciences*, 75(3), 1-13. doi:10.1007/s12665-015-4955-9

Carlos, F.S., Dos Santos, B.L., Andreazza, R., Tedesco, M.J., Morris, L., & Camargo, F.A.D.O. (2017). Irrigation of paddy soil with industrial landfill leachate: Impacts in Rice productivity, plant nutrition, and chemical characteristics of soil. *Paddy and Water Environment*, *15*(1), 133-144. doi:10.1007/s10333-016-0535-1

Chan, Y.S.G., Wong, M.H., & Whitton, B.A. (1999). Effects of landfill leachate on growth and nitrogen fixation of two leguminous trees (*Acacia confusa*, *Leucaena leucocephala*). *Water, Air, and Soil Pollution*, *111***,** 29–40. doi:10.1023/A:1005088919668

Cheng, C.Y. (2004). Landfill Leachate as a Source of Plant Nutrients. M.Sc. Thesis, The Chinese University of Hong Kong, Sha Tin, Hong Kong.

Cheng, C.Y., & Chu, L.M. (2007). Phytotoxicity data safeguard the performance of the recipient plants in leachate irrigation. *Environmental Pollution*, *145*(1), 195-202. doi:10.1016/j.envpol.2006.03.020

Cheng, C.Y., & Chu, L.M. (2011). Fate and distribution of nitrogen in soil and plants irrigated with landfill leachate. *Waste Management*, *31*(6), 1239-1249. doi:10.1016/j.wasman.2011.01.028

Cheng, C.Y., Tsang, C.K., Wong, R.S.K., & Chu, L.M. (2011). Is landfill leachate a potential source of nitrogen for plant growth? Proceedings of the 12th International Conference on Environment and Industrial Innovation., Singapore, Pp. 286-295.

Cretescu, I., Pohontu, C., Iticescu, C., Cioroi, M., Ciocinta, R.C., & Bucur, D. (2013). Treatment of landfill leachate using *Zea mays* and *Triticum* sp. on antropogenic soils. *Journal of Food, Agriculture & Environment*, *11*(3/4), 1507-1512. doi:10.1234/4.2013.4886

Cureton, P.M., Groenevelt, P.H., & McBride, R.A. (1991). Landfill leachate recirculation: Effects on vegetation vigor and clay surface cover infiltration. *Journal of Environmental Quality*, *20*(1),17-24. doi:10.2134/jeq1991.00472425002000010005x

Dimitriou, I., & Aronsson, P. (2010). Landfill leachate treatment with willows and poplars – Efficiency and plant response. *Waste Management*, *30*(11), 2137–2145. doi:10.1016/j.wasman.2010.06.013

Dimitriou, I., Aronsson, P., & Weih, M. (2006). Stress tolerance of five willow clones after irrigation with different amounts of landfill leachate. *Bioresource Technology*, *97*(1), 150–157. doi:10.1016/j.biortech.2005.02.004

Edmundson, S.J., & Wilkie, A.C. (2013). Landfill leachate – a water and nutrient resource for algae-based biofuels. *Environmental Technology*, *34*(13/14), 1849–1857. doi:10.1080/09593330.2013.826256

Emadi Baladehi, S.M., Sadegh-Zadeh, F., Bahmanyar, M.A., & Jalili, B. (2022a). The effect of different moisture levels on the enrichment of cow manure compost with iron and zinc metal scraps. *Environmental Sciences Studies*, *8*(3), 6892-6902. doi:10.22034/JESS.2023.378611. [In Persian]

Emadi Baladehi, S.M., Sadegh-Zadeh, F., Bahmanyar, M.A., & Jalili, B. (2022b). Enrichment of cow manure compost with iron and zinc metal scraps in different moisture levels. Proceedings of the 7th International Congress on Development of Agricultural and Environment with emphasis on the UN Development Program, Tehran, Iran, Pp. 1-8. [In Persian]

Emadi Baladehi, S.M., Sadegh-Zadeh, F., Bahmanyar, M.A., & Jalili, B. (2022c). Available iron and zinc concentration of soils with different textures under the influence of cow manure compost application enriched with iron and zinc metal scraps. Proceedings of the 7th International Congress on Development of Agricultural and Environment with emphasis on the UN Development Program, Tehran, Iran, Pp. 1-9. [In Persian]

Fasani, E., DalCorso, G., Zerminiani, A., Ferrarese, A., Campostrini, P., & Furini, A. (2019). Phytoremediatory efficiency of *Chrysopogon zizanioides* in the treatment of landfill leachate: a case study. *Environmental Science and Pollution Research*, *26*(10), 10057-10069. doi:10.1007/s11356-019-04505-7

Filho, J.A., Dias, N.D.S., Batista, R.O., Santos Júnior, J.A., Santos, A.G.D., & Lima, A.L.F. (2018). Landfill leachate as nutritional source in castor bean cultivation under semi-arid conditions. *Brazilian Journal of Agricultural and Environmental Engineering*, *22*(6), 378-382. doi:10.1590/1807-1929/agriambi.v22n6p378-382

Franco, H.A., Filho, S.T., Pérez, D.V., & da Costa Marques, M.R. (2020). Impact of the application of landfill leachate on the germination of Senna macranthera in different substrates. *Journal of Social, Technological and Environmental Science*, *9*(2), 68-87. doi:10.21664/2238-8869.2020v9i2

Friedman, S.P. (2005). Soil properties influencing apparent electrical conductivity: A review. *Computers and Electronics in Agriculture*, *46*(1), 45-70. doi:10.1016/j.compag.2004.11.001

Fu, L.H. (2004). The use of landfill leachate for growing ornamental plants. M.Sc. Thesis, The Chinese University of Hong Kong, Sha Tin, Hong Kong.

Ghaemi, A.A., & Majdeddin, F. (2016). Investigation of the phytoremediation of vetiver and eucalyptus by absorption of heavy metals from sewage in a contaminated soil with landfill leachate. *Water Resources Engineering*, 9(1), 95-106. dor:20.1001.1.20086377.1395.9.28.8.9. [In Persian]

Gordon, A.M., McBride, R.A., Fisken, A.J., & Bates, T.E. (1989). Effect of landfill leachate irrigation on red maple (*Acer rubrum* L.) and sugar maple (*Acer saccharum*) seedling growth and on foliar nutrient concentrations. *Environmental Pollution*, *56*(4), 327-336. doi:10.1016/0269-7491(89)90078-X

Guerrero-Rodríguez, D., Sánchez-Yáñez, J.M., Buenrostro-Delgado, O., & Márquez-Benavides, L. (2014). Phytotoxic effect of landfill leachate with different pollution indexes on Common bean. *Water, Air, & Soil Pollution*, *225*(6), 1-7. doi:10.1007/s11270-014-2002-1

Guidi Nissim, W., Palm, E., Pandolfi, C., Mancuso, S., & Azzarello, E. (2021). Willow and Poplar for the phyto-treatment of landfill leachate in Mediterranean climate. *Journal of Environmental Management*, 277(1), 111454. doi:10.1016/j.jenvman.2020.111454

Han, K., Zhou, C.J., & Wang, L.Q. (2014). Reducing ammonia volatilization from maize fields with separation of nitrogen fertilizer and water in an alternating furrow irrigation

system. *Journal of Integrative Agriculture*, *13*(5), 1099-1112. doi:10.1016/S2095-3119(13)60493-1

Hasnelly, H., Yasin, S., Agustian, A., Darmawan. (2021). Response of growth and yield of soybean (*Glycine max* L.) to the method and dose of leachate liquid organic fertilizer application. *Journal of Agro Science*, *9*(2), 109-115. doi:10.18196/pt.v9i2.9000

Im, J.H., Woo, H.J., Choi, M.W., Han, K.B., & Kim, C.W. (2001). Simultaneous organic and nitrogen removal from municipal landfill leachate using an anaerobic-aerobic system. *Water Research*, *35*(10), 2403-2410. doi:10.1016/S0043-1354(00)00519-4

Islam, J., & Singhal, N. (2004). A laboratory study of landfill leachate transport in soils. *Water Research*, *38*(8), 2035–2042. doi:10.1016/j.watres.2004.01.024

Jalalipour, H., & Ghaemi, A.A. (2013). A study of the ability of vetiver grass to refinement city landfill residuals. *Iranian Water Research Journal*, *7*(12), 45-52. [In Persian]

Jorge, L.G.T., Peralta-Videab, J.R., de la Rosa, G., & Parsons, J.G. (2005). Phytoremediation of heavy metals and study of the metal coordination by X-ray absorption spectroscopy. *Coordination Chemistry Reviews*, *249*(17-18), 1797-1810. doi:10.1016/j.ccr.2005.01.001

Kabata-Pendias, A. (2010). *Trace elements in soils and plants*. 4th Edition: CRC Press, Boca Raton, FL. 548 pages. doi:10.1201/b10158

Kalbasi, M., & Gandomkar, A. (1997). Effect of garbage leachate on yield and chemical composition of corn and the effect of leachate residual on soil characteristics. *Journal of Water and Soil Science*, 1(2), 41-51. dor:20.1001.1.22518517.1376.1.2.4.3. [In Persian]

Kang, D.H., Tsao, D., Wang-Cahill, F., Rock, S., Schwab, A.P., & Banks, M.K. (2008). Assessment of landfill leachate volume and concentrations of cyanide and fluoride during phytoremediation. *Bioremediation Journal*, *12*(1), 35–48. doi:10.1080/10889860701866297

Khoshgoftarmanesh, A.H., & Kalbasi, M. (2001). Effect of garbage leachate on soil properties, growth and yield of rice. *Journal of Water and Soil Science*, *15*(1), 12-24. [In Persian]

Khoshgoftarmanesh, A.H., & Kalbasi, M. (2002). Effects of residual processed municipal waste leachate on soil properties, and wheat growth and yield. *Journal of Water and Soil Science*, 6(3), 141-149. dor:20.1001.1.24763594.1381.6.3.11.2. [In Persian]

Kjeldsen, P., & Christophersen, M., (2001). Composition of leachate from old landfills in Denmark. *Waste Management & Research*, *19*(3), 249-256. doi:10.1177/0734242X0101900306

Kjeldsen, P., Barlaz, M.A., Rooker, A.P., Baun, A.P., Ledin, A., & Christensen, T.H. (2002). Present and long-term composition of MSW landfill leachate: A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, *32*(4), 297–336. doi:10.1080/10643380290813462

Klauck, C.R., Giacobbo, A., Altenhofen, C.G., Silva, L.B., Meneguzzi, A., Bernardes, A.M., & Rodrigues, M.A.S. (2017). Toxicity elimination of landfill leachate by hybrid processing of advanced oxidation process and adsorption. *Environmental Technology & Innovation*, *8*, 246-255. doi:10.1016/j.eti.2017.07.006

Krishna, K., Chaitra, R., & Kumari, J. (2016). Effects of municipal solid waste leachate on the quality of soil. *International Journal of Engineering Science Invention*, *5*(6), 69-73.

Kulikowska, D., & Klimiuk, E. (2008). The effect of landfill age on municipal leachate composition. *Bioresource Technology*, *99*(13), 5981–5985. doi:10.1016/j.biortech.2007.10.015

Kuwano, B.H., Nogueira, M.A., Santos, C.A., Fagotti, D.S.L., Santos, M.B., Lescano, L.E.A.M., Andrade, D.S., Barbosa, G.M.C., & Tavares-Filho, J. (2017). Application of landfill leachate improves wheat nutrition and yield but has minor effects on soil properties. *Journal of Environmental Quality*, *46*(1), 153–159. doi:10.2134/jeq2016.02.0041

Lambers, H. (2022). Phosphorus acquisition and utilization in plants. *Annual Review of Plant Biology*, *73*(1), 17-42. doi:10.1146/annurev-arplant-102720-125738

Landon, J.R. (1991). *Booker tropical soil manual: A handbook for soil survey and agricultural land evaluation in the tropics and subtropics*. 1st Edition: Longman Scientific & Technical, Harlow. 530 pages. doi:10.4324/9781315846842

Lanrewaju, O.A., Longinus, N.K., Olamilekan, M.Q., Alex, A.A., Olalekan, O.O., & Olanrewaju, B. (2019). Heavy metal residue and potential human health risk factors of Celosia argentea (*Lagos spinach*) planted in a soil mixed with landfill leachate. *Environment Asia*, *12*(1), 74-82. doi:10.14456/ea.2019.9

Leal, R.M.P., Firme, L.P., Herpin, U., Fonseca, A.F., Montes, C.R., Dias, C.T.S., & Melfi, A.J. (2010). Carbon and nitrogen cycling in a tropical Brazilian soil cropped with sugarcane and irrigated with wastewater. *Agricultural Water Management*, *97*(2), 271–276. doi:10.1016/j.agwat.2009.09.018

Lee, A.H., Nikraz, H., & Hung, Y.T. (2010). Influence of waste age on landfill leachate quality. *International Journal of Environmental Science and Development*, *1*(4), 347-350. doi:10.7763/IJESD.2010.V1.68

Li, X.Z., & Zhao, Q.L. (2003). Recovery of ammonium-nitrogen from landfill leachate as a multi-nutrient fertilizer. *Ecological*

Engineering, *20*(2), 171-181. doi:10.1016/S0925-8574(03)00012-0

Liang, J., Zhang, J., & Wong, M.H. (1999). Landfill leachate used as irrigation water on landfill sites during dry seasons. Pp 305-317. In: Wong MH, Wong JWC and Baker AJM, editors. *Remediation and Management of Degraded Lands*, Lewis Publishers, Boca Raton.

Lindsay, W. (1995). Chemical reactions in soils that affect iron availability to plants. A quantative approach. Pp. 7-14. In: Abadía J (eds), *Iron Nutrition in Soils and Plants*, Springer-Dordrecht. doi:10.1007/978-94-011-0503-3_2

Loncnar, M., Zupancic, M., Bukovek, P., & Justin, M.Z. (2010). Fate of saline ions in a planted landfill site with leachate recirculation. *Waste Management*, *30*(1), 110–118. doi:10.1016/j.wasman.2009.09.010

Luna, Y., Otal, E., Vilches, L.F., Vale, J., Querol, X., & Fernandez Pereira, C. (2007). Use of zeolitised coal fly ash for landfill leachate treatment: A pilot plant study. *Waste Management*, *27*(12), 1877–1883. doi:10.1016/j.wasman.2006.10.016

Lund, U., Rasmussen, L., Segato, H., & Ostfeldt, P. (1992). Analytical methods for leachate characterization. Pp. 167-181. In: Christensen TH Cossu R & Stegmann R (eds), *Landfilling of Waste: Leachate*, Elsevier-London.

MacDonald, N.W., Rediske, R.R., Scull, B.T., & Wierzbicki, D. (2008). Landfill cover soil, soil solution, and vegetation responses to municipal landfill leachate applications. *Journal of Environmental Quality*, *37*(5), 1974-1985. doi:10.2134/jeq2007.0637

Madera-Parra, C.A., Peña, M.R., Peña, E.J., & Lens, P.N.L. (2014). Cr (VI) and COD removal from landfill leachate by polyculture constructed wetland at a pilot scale. *Environmental Science and Pollution Research*, *22*(17), 12804-12815. doi:10.1007/s11356-014-3623-z

Mathan, K.K. (1994). Studies on the influence of long-term municipal sewageeffluent irrigation on soil physical properties. *Bioresource Technology*, 48(3), 275–276. doi:10.1016/0960-8524(94)90159-7

McFarlane, D.J., George, R.J., Barrett-Lennard, E.G., & Gilfedder, M. (2016). Salinity in dryland agricultural systems: Challenges and opportunities. Pp. 521-547. In: Farooq M & Siddique KHM (eds), *Innovations in Dryland Agriculture*, Springer. doi:10.1007/978-3-319-47928-6_19

Mekki, A., Dhouib, A., & Sayadi, S. (2009). Evolution of several soil properties following amendment with olive mill wastewater. *Progress in Natural Science*, *19*(11), 1515–1521. doi:10.1016/j.pnsc.2009.04.014

Mendel, P., Vyhnánek, T., Braidot, E., Filippi, A., Trojan, V., Bjelková, M., Vaverková, M.D., Adamcová, D., Zloch, J., Brtnický, M., & Đorđević, B. (2020). Fiber quality of Hemp (*Cannabis sativa* L.) grown in soil irrigated by landfill leachate water. *Journal of Natural Fibers*, *19*(9), 3288-3299. doi:10.1080/15440478.2020.1843101

Mir Seyed Hosseini, H., Karimi, R., Bagheri Novair, S., & Tabatabaei, S.H. (2016). A study of treated municipal waste leachate and Zeolite effects on soils. *Iran Agricultural Research*, *34*(2), 109-116. doi:10.22099/IAR.2016.3533

Mirzaei, S.M.J., Tabatabaei, S.H., Heidarpour, M., & Najafi P. (2014). Effect of compost's leachate on some physical and hydraulic characteristics of soil enriched by zeolite. *Journal of Water and Soil Science*, *17*(66), 37-48. dor:20.1001.1.24763594.1392.17.66.7.1. [In Persian]

Moezzipour, A., Pourtahmasi, K., Motesharezadeh, B., Oladi, R., & Ramazani Saadatabadi A. (2020). Effect of irrigation with municipal landfill leachate on the chemicals content of the tree shoots of Populous (*Populus deltoides*) and Fraxinus (*Fraxinus excelsior*). *Iranian Journal of Forest*, *11*(4), 458-475. [In Persian]

Mohamed, A., & Ebead, B. (2013). Effect of magnetic treated irrigation water on salt removal from a sandy soil and the availability of certain nutrients. *International Journal of Engineering and Applied Sciences*, *2*(2), 36-44.

Mor, S., Kaur, K., & Khaiwal, R. (2013). Growth behavior studies of bread wheat plant exposed to municipal landfill leachate. *Journal of Environmental Biology*, *34*(6), 1083-1087.

Moraes Costa, A., Marotta Alfaia, R.G.D.S., & Campos, J.C. (2019). Landfill leachate treatment in Brazil – An overview. *Journal of Environmental Management*, *232*, 110-116. doi:10.1016/j.jenvman.2018.11.006

Mueller, K., Magesan, G.N., & Bolan, N.S. (2007). A critical review of the influence of effluent irrigation on the fate of pesticides in soil. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *120*(2/4), 93–116. doi:10.1016/j.agee.2006.08.016

Mukherjee, S., Mukhopadhyay, S., Ali Hashim, M., & Sen Gupta, B. (2015). Contemporary environmental issues of landfill leachate: Assessment & remedies. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, *45*(5), 472-590. doi:10.1080/10643389.2013.876524

Naveen, B.P., Mahapatra, D.B., Sitharam, T.G., Sivapullaiah, P.V., & Ram achandra, T.V. (2017). Physico-chemical and biological characterization of urban municipal landfill leachate. *Environmental Pollution*, *220*, 1–12. doi:10.1016/j.envpol.2016.09.002

Nayak, S., Sunil, B.M., & Shrihari, S. (2007). Hydraulic and compaction characteristics of leachate-contaminated lateritic soil. *Engineering Geology*, *94*(3/4), 137-144. doi:10.1016/j.enggeo.2007.05.002

Neina, D. (2019). The role of soil ph in plant nutrition and soil remediation. *Applied and Environmental Soil Science*, 1-9. doi:10.1155/2019/5794869

Nunes Júnior, F.H., Gondim, F.A., Pereira, M.D.S., Braga, B.B., Filho, R.A.P., & Barbosa, F.E.L. (2016). Sanitary landfill leachate as a source of nutrients on the initial growth of sunflower plants. *Brazilian Journal of Agricultural and Environmental Engineering*, *20*(8), 746-750. doi:10.1590/1807-1929

Nyika, J. (2021). Application of experimental and modelling techniques to estimate the effects of landfill leachate on soil and water. Ph.D. Thesis, University of South Africa, Pretoria, South Africa.

Panahpour, E., Gholami, A., & Davami, A.H. (2011). Influence of garbage leachate on soil reaction, salinity and soil organic matter in east of Isfahan. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, *3*, 171-176. doi:10.5281/zenodo.1327821

Panchoni, L.C., Santos, C.A., Kuwano, B.H., Carmo, K.B., Cely, M.V.T., Oliveira-Júnior, A.G., Fagotti, D.S.L., Cervantes, V.N.M., Zangaro, W., Andrade, D.S., Andrade, G., & Nogueira, M.A. (2016). Effect of landfill leachate on cereal nutrition and productivity and on soil properties. *Journal of Environmental Quality*, *45*(1), 1-7. doi:10.2134/jeq2015.06.0281

Parida, A.K., & Das, A.B., 2005. Salt tolerance and salinity effects on plants: A review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *60*(3), 324-349. doi:10.1016/j.ecoenv.2004.06.010

Postacchini, L., Ciarapica, F.E., & Bevilacqua, M. (2018). Environmental assessment of a landfill leachate treatment plant: Impacts and research for more sustainable chemical alternatives. *Journal of Cleaner Production*, *183*, 1021-1033. doi:10.1016/j.jclepro.2018.02.219

Ramos-Arcos, S.A., López-Martínez, S., Lagunas Rivera, S., González-Mondragón, E.G., de La Cruz Leyva, M.C., & Velázquez-Martínez, J.R. (2019). Phytoremediation of landfill leachate using vetiver (*Chrysopogon zizanioides*) and cattail (*Typha latifolia*). *Applied and Environmental Microbiology*, *17*(2), 2619-2630. doi:10.15666/aeer/1702_26192630

Renou, S., Givaudan, J.G., Poulain, S., Dirassouyan, F., & Moulin, P. (2008.) Landfill leachate treatment: Review and opportunity. *Journal of Hazardous Materials*, *150*(3), 468–493. doi:10.1016/j.jhazmat.2007.09.077

Revel, J.C., Morard, P., Bailly, J.R., Labbé, H., Berthout, C., & Kaemmerer, M. (1999). Plants' use of leachate derived from municipal solid waste. *Journal of Environmental Quality*, *28*(4), 1083-1089. doi:10.2134/jeq1999.00472425002800040004x

Salehi, N., Azhdarpoor, A., & Shirdarreh, M. (2020). The effect of landfill leachate and pyrene on *sorghum bicolor* growth parameters and soil bacterial communities. *Journal of Health Sciences and Surveillance System*, *8*(2), 85-92. doi:10.30476/JHSSS.2020.86548.1093

Salem, Z., Hamouri, K., Djemaa, R., & Allia, K. (2008). Evaluation of landfill leachate pollution and treatment. *Desalination*, *220*(1/3), 108-114. doi:10.1016/j.desal.2007.01.026

Smaoui, Y., Chaari, L., Fersi, M., Gargouri, K., & Bouzid, J. (2020). Effects of raw and treated landfill leachate on the chemical properties of a Tunisian soil. *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration*, *5*(3), 1-10. doi:10.1007/s41207-020-00183-x

Santos, C.A., Panchoni, L.C., Bini, D., Kuwano, B.H., Carmo, K.B., Silva, S.M.C.P., Martines, A.M., Andrade, G., Andrade, D.S., Cardoso, E.J.B.N., Zangaro, W., & Nogueira, M.A. (2013). Land application of municipal landfill leachate: Fate of ions and ammonia volatilization. *Journal of Environmental Quality*, *42*(2), 523–531. doi:10.2134/jeq2012.0170

Şchiopu, A.M., Robu, B.M., Apostol, I., & Gavrilescu, M. (2009). Impact of landfill leachate on soil quality in IASI county. *Environmental Engineering and Management Journal*, *8*(5), 1155-1164. doi:10.30638/eemj.2009.169

Shrive, S.C., & McBride, R.A. (1995). Physiological responses of red maple saplings to sub-irrigation with and untreated municipal landfill leachate. *Waste Management & Research*, *13*(3), 219-239. doi:10.1016/S0734-242X(95)90041-1

Singh, R.P., Singh, P., Araujo, A.S.F., Ibrahim, M.H., & Sulaiman, O. (2011). Management of urban solid waste: Vermicomposting a sustainable option. *Resources, Conservation and Recycling*, *55*(7), 719-729. doi:10.1016/j.resconrec.2011.02.005

Singh, S., Raju, N.J., & Ramakrishna, C.H. (2017). Assessment of the effect of landfill leachate irrigation of different doses on wheat plant growth and harvest index: A laboratory simulation study. *Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management*, 8, 150-156. doi:10.1016/j.enmm.2017.07.005

Singh, S., Raju, N.J., & Ramakrishna, C.H. (2015) Evaluation of groundwater quality and its suitability for domestic and irrigation use in parts of the Chandauli-Varanasi region, Uttar Pradesh, India. *Journal of Water Resource and*

Protection, *7*(7), 482-497. doi:10.4236/jwarp.2015.77046

Singh, D., Tembhare, M., Machhirake, N., & Kumar, S. (2023). Impact of municipal solid waste landfill leachate on biogas production rate. *Journal of Environmental Management*, *336*, 1-17. doi:10.1016/j.jenvman.2023.117643

Singhal, N., & Islam, J. (2008). One-dimensional model for biogeochemical interactions and permeability reduction in soils during leachate permeation. *Journal of Contaminant Hydrology*, *96*(1/4), 32-47. doi:10.1016/j.jconhyd.2007.09.007

Stephens, W., Tyrrel, S.F., & Tiberghien, J.E. (2000). Irrigation short rotation coppice with landfill leachate: constraints to productivity due to chloride. *Bioresource Technology*, *75*(3), 227-229. doi:10.1016/S09608524(00)00065-1

Taylor, J.P., Wilson, B., Mills, M.S., & Burns, R.G. (2002). Comparison of microbial numbers and enzymatic activities in surface soils and subsoils using various techniques. *Soil Biology & Biochemistry*, *34*(3), 387–401. doi:10.1016/S0038-0717(01)00199-7

Tewolde, H., Sistani, K.R., & Rowe, D.E. (2005). Broiler litter as a sole nutrient source for cotton: Nitrogen, phosphorus, potassium, calcium, and magnesium concentrations in plant parts. *Journal of Plant Nutrition*, *28*(4), 605–619. doi:10.1081/PLN-200052633

Torabi Farsani, B., & Afyuni, M. (2021). Effect of urban waste compost leachate on the soil physical, hydraulic, moisture characteristics and corn yield. *Journal of Water and Soil Science*, *25*(1), 1-14. doi:20.1001.1.24763594.1400.25.1.1.1. [In Persian]

Toufexi, E., Tsarpali, v., Efthimiou, i., Vidali, M.S., Vlastos, d., & Dailianis, S. (2013). Environmental and human risk assessment of landfill leachate: An integrated approach with the use of cytotoxic and genotoxic stress indices in mussel and human cells. *Journal of Hazardous Materials*, *260*, 593–601. doi:10.1016/j.jhazmat.2013.05.054

Tsang, C.K. (2006). Landfill leachate irrigation: Evaluation of plant productivity and soil toxicity. M.Sc. Thesis, The Chinese University of Hong Kong, Sha Tin, Hong Kong.

Turki, N., & Bouzid, J. (2017). Effects of landfill leachate application on crops growth and properties of a mediterranean sandy soil. *Journal of Pollution Effects & Control*, *5*(2), 186. doi:10.4176/2375-4397.1000186

Wong, M.H., & Leung, C.K. (1989). Landfill leachate as irrigation water for tree and vegetable crops. *Waste Management & Research*, *7*(4), 311–323. doi:10.1016/0734242X(89)90069-4

Wong, R.S.K. (2003). Chemical and Ecotoxicological Characterization of Landfill Leachate, M.Sc. Thesis, The Chinese University of Hong Kong, Sha Tin, Hong Kong.

WHO. (1996). Permissible limits of heavy metals in soil and plants. World Health Organization, Geneva, Switzerland.

Wydro, U., Wołejko, E., Sokołowska, G., Leszczynski, J., & Jabłonska-Trypuc, A. (2022). Investigating landfill leachate influence on soil microbial biodiversity and its cytotoxicity. *Water*, *14*(22), 3634. doi:10.3390/w14223634

Xing, Y., Jiang, W., He, X., Fiaz, S., Ahmad, S., Lei, X., Wang, W., Wang, Y., & Wang, Y. (2019). A review of nitrogen translocation and nitrogen-use efficiency. *Journal of Plant Nutrition*, *42*(19), 2624-2641. doi:10.1080/01904167.2019.1656247

Xu, Q., Renault, S., & Yuan, Q. (2019). Phytodesalination of landfill leachate using *Puccinellia nuttalliana* and *Typha latifolia*. *International Journal of Phytoremediation*, *21*(9), 831-839. doi:10.1080/15226514.2019.1568383

Yalcuk, I., & Ugurlu, A. (2020). Treatment of landfill leachate with laboratory scale vertical flow constructed wetlands: Plant growth modeling. *International Journal of Phytoremediation*, *22*(2), 157–166. doi:10.1080/15226514.2019.1652562

Zalesny, J.A., Zalesny Jr, R.S., Wiese, A.H., Sexton, B.T., & Hall, R.B. (2008a). Uptake of macro- and micro-nutrients into leaf, woody, and root tissue of populus after irrigation with landfill leachate. *Journal of Sustainable Forestry*, *27*(3), 303-327. doi:10.1080/10549810802256262

Zalesny, J.A., Zalesny Jr, R.S., Wiese, A.H., Sexton, B.T., & Hall, R.B. (2008b). Sodium and chloride accumulation in leaf, woody, and root tissue of Populus after irrigation with landfill leachate. *Environmental Pollution*, *155*(1), 72-80. doi:10.1016/j.envpol.2007.10.032

Zhang, H.H., He, P.J., & Shao, L.M. (2010). Ammonia volatilization, N2O and CO2 emissions from landfill leachate-irrigated soils. *Waste Management*, *30*(1), 119-124. doi:10.1016/j.wasman.2009.08.004

Zhang, Q.Q., Tian, B.H., Zhang, X., Ghulam, A., Fang, C.R., & He, R. (2013). Investigation on characteristics of leachate and concentrated leachate in three landfill leachate treatment plants. *Waste Management*, *33*(11), 2277–2286. doi:10.1016/j.wasman.2013.07.021

Zupanc, V., & Zupancic Justin, M. (2010). Changes in soil characteristics during landfill leachate irrigation of *Populus deltoids*. *Waste Management*, *30*(11), 2130–2136. doi:10.1016/j.wasman.2010.05.004