

Research Article

Evaluation of the Concentration of Different Metal Ions in Wood Vinegar Produced from Different Plants in Some Samples from East Azerbaijan Province with an Emphasis on Environmental Safety

**Abdolhossein Naseri^{1✉} , Farzaneh Rasoolzadeh^{2, 3✉} , Maghsoud Fathi Zarnagh⁴ ,
Taha Kafili-Hajlari⁵ **

1- Corresponding author, Department of Analytical Chemistry, Faculty of Chemistry, University of Tabriz, Tabriz, Iran. E-mail: ab.naseri@gmail.com

2-Corresponding author, Health and Environment Research Center, Tabriz University of Medical Sciences, Tabriz, Iran. rasoolzadeh@tbzmed.ac.ir

3-Department of Environmental Health Engineering, Faculty of Health, Tabriz University of Medical Sciences, Tabriz, Iran. E-mail: rasoolzadeh@tbzmed.ac.ir

4-Department of Analytical Chemistry, Faculty of Chemistry, University of Tabriz, Tabriz, Iran.
E-mail: maghsoud.fathizar1367@gmail.com

5-Department of Analytical Chemistry, Faculty of Chemistry, University of Tabriz, Tabriz, Iran.
E-mail: tkafili@gmail.com

Received: August 31, 2025

Revised: October 9, 2025

Accepted: October 12, 2025

Published: October 18, 2025

Extended Abstract

Background and Objectives

Wood vinegar, a valuable by-product derived from the pyrolysis of biomass, has gained widespread usage in various industries such as agriculture, food processing, pharmaceuticals, and environmental management. This is largely due to its rich and diverse organic composition, which offers numerous benefits, including its ability to enhance soil health, control pests, and even serve as a preservative in food. However, despite these advantages, concerns about the safety of wood vinegar have been raised, primarily due to the potential presence of harmful metallic elements, particularly heavy metals. These metals can pose serious health risks, especially when used in agricultural or environmental applications, where they can accumulate in soil and crops, affecting both plant growth and human health. Heavy metals such as lead (Pb), cadmium (Cd), and copper (Cu) can be toxic even at low concentrations, and their presence in wood vinegar may limit its safe usage. On the other hand, essential metals like iron (Fe), zinc (Zn), and manganese (Mn) are crucial for various biological processes and may enhance the efficacy of wood vinegar in agricultural practices. The objective of this study is to identify and quantify both the essential and toxic metals present in different commercial wood vinegar samples. In doing so, it also aims to investigate how factors such as the geographical origin of the product and the type of feedstock used in its production affect the concentration of these elements.

Methodology

To achieve these objectives, samples of commercial wood vinegar were collected from a range of producers in East Azerbaijan Province, along with other regions in Iran. This geographical diversity was chosen to account for potential variations in metal content resulting from differences in local environmental conditions and feedstock sources. In total, several wood vinegar samples from various production processes were obtained, ensuring a representative analysis. The elemental analysis of the samples was conducted using advanced techniques including Atomic Absorption Spectroscopy (AAS), Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry (ICP-OES), and ion exchange chromatography. These methods were selected for their high sensitivity and precision in detecting and quantifying both essential and toxic metals. Specifically, the study focused on nine elements: copper (Cu), iron (Fe), zinc (Zn), lead (Pb), cadmium (Cd), cobalt (Co), manganese (Mn), potassium (K), and calcium (Ca). These metals were chosen because of their relevance to both plant nutrition and potential toxicity in agricultural and environmental applications. The collected data were subjected to statistical analysis to evaluate any significant differences in metal concentrations based on the type of wood feedstock used (e.g., hardwood vs. softwood) and the geographical location of the producer. This approach allowed the researchers to identify patterns and relationships between metal content and the production conditions, which could inform recommendations for safer and more effective use of wood vinegar.

Results

The results of the study revealed considerable variability in the metal content of the different wood vinegar samples, with some products containing alarmingly high concentrations of toxic metals like lead and cadmium. In particular, several samples exceeded the safe limits for heavy metal concentrations that are considered acceptable for agricultural and environmental use. This poses a significant risk to soil health, crop safety, and ultimately human health, as these metals can accumulate over time and enter the food chain. Interestingly, the type of feedstock used in the production of wood vinegar had a marked impact on the concentration of essential metals. For instance, samples derived from hardwoods contained higher levels of iron and manganese, which are critical for plant growth and development. These metals play vital roles in enzymatic processes, photosynthesis, and nutrient uptake. On the other hand, samples produced from softwoods tended to have lower concentrations of these essential elements, which may affect the overall effectiveness of the wood vinegar as a soil amendment or plant growth enhancer. Geographical location also appeared to influence the elemental composition of the wood vinegar. Producers in different regions showed varying levels of metallic elements, suggesting that environmental factors such as soil composition, climate, and local pollution could contribute to differences in the final product. This variation further underscores the importance of considering both the raw materials and production conditions when assessing the safety and effectiveness of wood vinegar for agricultural applications.

Conclusion

The findings of this study highlight the critical need for comprehensive elemental profiling of wood vinegar to ensure its safe use in agricultural and environmental applications. The presence of toxic metals such as lead and cadmium in certain samples poses a potential risk to soil health, crops, and human consumers. Therefore, it is essential to establish strict quality control measures and regulatory standards to limit the concentration of harmful metals in commercial wood vinegar products. Moreover, the study emphasizes the importance of optimizing production processes to enhance the presence of beneficial elements like iron and manganese while minimizing the risk of contamination by toxic metals. By understanding the relationship between feedstock type, production conditions, and metal content, producers can make more informed decisions to improve the quality and safety of wood vinegar. In conclusion, this research provides valuable insights into the factors that affect the metal composition of wood vinegar, offering a scientific basis for the development of guidelines and policies that will help regulate and promote the safe and effective use of this product in sustainable agriculture.

Keywords: Biosafety, Elemental analysis, Heavy metals, Sustainable agriculture, Wood vinegar.

Author Contributions

Conceptualization, F.R. and A.N.; methodology, F.R. and A.N.; software, T. K.; validation, M. F.; formal analysis, M. F.; investigation, F.R. and A.N., M. F. and T.H.; resources, F.R. and A.N.; data curation, M. F. and T. K.; writing-original draft preparation, F.R. and A.N.; writing-review and editing, F.R. and A.N.; visualization, T. K.; supervision, A.N.; project administration, F.R. and A.N.; funding acquisition, A. N. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Acknowledgements

This paper is published as a part of a MSc thesis supported by the University of Tabriz, Tabriz, Iran. The authors are thankful to the University of Tabriz for financial supports.

Data Availability Statement

Data is available on reasonable request from the authors.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Cite this article: Naseri, A., Rasoulzadeh, F., Fathi Zarnagh, M. & Kafili-Hajlari, T. (2025). Evaluation of the concentration of different metal ions in wood vinegar produced from different plants in some samples from East Azerbaijan province with an emphasis on environmental safety. *Journal of Soil and Plant Science*, 35(3):1-17

<https://doi.org/10.22034/sps.2025.68900.1019>

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



Copyright © 2025 The Authors.

Publisher: The University of Tabriz

OPEN  ACCESS
JOURNALS



مقاله پژوهشی

ارزیابی غلظت یون‌های فلزهای مختلف در سرکه چوب تولید شده از گیاهان مختلف در چند نمونه از استان آذربایجان شرقی با تأکید بر ایمنی محیط‌زیست

عبدالحسین ناصری , فرزانه رسول‌زاده , مقصود فتحی زرنق , طه کفیلی حاجلاری 

۱- نویسنده مسئول، گروه شیمی تجزیه، دانشکده شیمی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: ab.naseri@gmail.com

۲- نویسنده مسئول، مرکز تحقیقات سلامت و محیط‌زیست، دانشگاه علوم پزشکی تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: rasoolzadeh@tbzmed.ac.ir

۳- گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: rasoolzadeh@tbzmed.ac.ir

۴- گروه شیمی تجزیه، دانشکده شیمی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: maghsoud.fathizar1367@gmail.com

۵- گروه شیمی تجزیه، دانشکده شیمی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: tkafili@gmail.com

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۷/۱۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۰۹

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۷/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۲۰

چکیده

این پژوهش با هدف شناسایی و ارزیابی میزان عنصرهای فلزی به‌ویژه فلزهای سنگین در سرکه چوب حاصل از آذرقافت (پیرولیز) چوب و بررسی تأثیر نوع چوب بر ترکیب شیمیایی آن در چند نمونه از استان آذربایجان شرقی انجام شد. سرکه چوب با داشتن ترکیبات آلی متنوع در صنایع گوناگون از جمله کشاورزی و تهیه کودها کاربرد دارد، اما احتمال وجود فلزهای سنگین در آن، سبب نگرانی‌های محیط‌زیستی و بهداشتی شده‌است. در این مطالعه، نمونه‌هایی از سرکه چوب تولید شده از کارگاه‌های مناطق مختلف کشور جمع‌آوری و عنصرهای آهن (Fe)، پتاسیم (K)، روی (Zn)، سرب (Pb)، کادمیم (Cd)، کبالت (Co)، کلسیم (Ca)، مس (Cu)، منگنز (Mn) و برخی یون‌های پرکاربرد و متداول شامل پتاسیم، آمونیوم، سدیم، لیتیم، کلسیم و منیزیم با تکنیک‌های AAS، ICP-OES و کروماتوگرافی تبادل یونی تجزیه شدند. یافته‌های بدست آمده از آزمون‌های آماری تحلیل واریانس (ANOVA) و آزمون t استیودنت نشان داد که غلظت عنصرهای فلزی بسته به نوع چوب و شرایط تولید، تفاوت معناداری داشتند. برخی نمونه‌ها دارای سطوح بالای فلزهای سنگین مانند سرب و کادمیم بودند و از حدود مجاز برای مصارف کشاورزی و محیط‌زیست بیشتر بودند. همچنین، نوع درخت بر غلظت عنصرهایی نظیر آهن و منگنز تأثیر داشت. این نتایج ضرورت پایش و استانداردسازی دقیق سرکه چوب را نشان داد تا ایمنی آن در استفاده‌های کشاورزی و زیستی تضمین شده و فرایندهای تولید بهینه‌سازی شود. به‌طور کلی، نتایج این پژوهش می‌تواند پایه‌ای برای سیاست‌گذاری‌های آتی در زمینه کنترل کیفیت و استفاده ایمن از سرکه چوب در کشاورزی پایدار باشد.

واژه‌های کلیدی: آنالیز عنصری، ایمنی زیستی، سرکه چوب، عنصرهای معدنی، فلزهای سنگین، کشاورزی پایدار.

استناد به این مقاله: ناصری، ع.، رسول‌زاده، ف.، فتحی زرنق، م. و کفیلی حاجلاری، ط. (۱۴۰۴). ارزیابی غلظت یون‌های فلزهای مختلف در سرکه چوب تولید شده از گیاهان مختلف در چند نمونه از استان آذربایجان شرقی با تأکید بر ایمنی محیط‌زیست. نشریه دانش خاک و گیاه، ۳۵(۳)، ۱-۱۷.

مقدمه

سرکه چوب^۱، فرآورده‌ای طبیعی و ماده‌ای تیره رنگ است که از فرایند آذرکافت (پیرولیز^۲) چوب تولید می‌شود. محصولات حاصل از پیرولیز چوب، بیوچار^۳ که جامد سیاه رنگ باقیمانده کربن‌دار است، گازهای فرار متان، CO، CO₂، هیدروژن و بخارات آلی میعان‌پذیر است. بخارات حاصل از پیرولیز بعد از خروج از محفظه وارد کندانسور شده و در آنجا خنک شده و به مایع تبدیل می‌شوند. بخش سبک‌تر، سرکه چوب که شامل آب، ترکیبات آلی فرار شامل اسید استیک (عامل اصلی اسیدی بودن) فنول‌ها، الکل‌ها (متانول^۴، اتانول، فورفوریل الکل^۵ و سیکلوهگزانول^۶)، کتون‌ها، فرمالدهید، و ترکیبات معطر ترکیبات ضد قارچ و ضد باکتری است و بخش سنگین‌تر و غلیظ‌تر (قیر چوب) است (Ouattara et al., 2023). سرکه چوب به عنوان یک ماده ارزشمند در حوزه‌های مختلفی از جمله صنایع غذایی، کشاورزی و تولیدات دارویی- بهداشتی نقش مهمی ایفا می‌کند (Mmojieje et al., 2015). در صنعت غذا، سرکه چوب به عنوان افزودنی طبیعی برای ایجاد طعم و افزایش ماندگاری محصولات به کار می‌رود (Oramahi et al., 2022). در کشاورزی از این ماده در تهیه کود آلی، تنظیم رشد گیاهان و حتی آفت‌کش طبیعی استفاده می‌شود (Mungkumchao et al., 2013). همچنین، خواص ضدالتهابی و ضدباکتریایی سرکه چوب، آن را به گزینه‌ای جالب برای استفاده در محصولات دارویی و بهداشتی تبدیل کرده است (Kim et al., 2022; He et al., 2025). امروزه، سرکه چوب همچنان در آشپزی، پزشکی سنتی، صنایع آرایشی- بهداشتی (Wibowo et al., 2022) تولید مواد شوینده و رنگ‌ها کاربرد دارد (Mohd et al., 2023). علاوه بر این، از سرکه چوب در صنایع مختلف از جمله تولید کاغذ، چرم و حتی عمل‌آوری فلزها^۷ استفاده می‌شود (Li et al., 2019).

در صنایع دارویی سرکه چوب به دلیل داشتن خواص آنتی‌اکسیدانی، ضد التهابی و ضد میکروبی، برای درمان برخی بیماری‌ها و اختلالات مورد استفاده قرار می‌گیرد (Chenari et al., 2023). در صنایع شیمیایی، سرکه چوب به عنوان یک حلال طبیعی و ماده اولیه برای تولید انواع مواد شیمیایی از قبیل استون^۸، اتانول^۹، اسید استیک^{۱۰} و غیره استفاده می‌شود. این محصولات شیمیایی در بسیاری از صنایع دیگر از جمله صنایع رنگ، چسب، لاستیک، پلاستیک و حتی صنایع نظامی کاربرد دارند (Kalasee et al., 2021). در کشاورزی نیز، سرکه چوب کاربردهای وسیعی دارد. به عنوان مثال، می‌توان از آن به عنوان کود و علف‌کش طبیعی^{۱۱} و ایمن برای کنترل علف‌های هرز در مزارع و باغچه‌ها استفاده کرد (Lei et al., 2022). استفاده از سرکه چوب به عنوان کود در رشد گوجه فرنگی به‌طور قابل توجهی کل املاح محلول میوه گوجه فرنگی را افزایش می‌دهد (Tuntika et al., 2013). همچنین، مطالعات متعدد اثرات مفید آن را به ویژه هنگامی که به عنوان یک کود آلی برای محصولات مانند برنج، نیشکر و سیب زمینی شیرین استفاده می‌شود، تایید کرده‌اند (Mi et al., 2012). تحقیقات نشان داده است که سرکه چوب رشد و عملکرد هندوانه را در کشت بدون خاک به‌طور معناداری افزایش می‌دهد (Zulkarami et al., 2011). همچنین، سرکه چوب جوانه‌زنی دانه را تحریک و بر رشد نهال تأثیر مثبتی دارد (Nelson et al., 2012). محلول‌پاشی سرکه چوب به‌طور قابل توجهی رشد رویشی بادام‌زمینی دانه درشت را افزایش داده و باعث افزایش عملکرد بذر و درصد پوست‌گیری می‌شود (Jothityangkoon et al., 2021). همچنین،

¹-Wood vinegar

²-Pyrolysis

³-Biochar

⁴-Methanol

⁵-Urfural alcohol

⁶-Cyclohexanol

⁷-Metals preservation

⁸-Acetone

⁹-Ethanol

¹⁰-Acetic acid

¹¹-Natural herbicide

سرکه چوب در دفع آفات گیاهی و حشرات موذی نیز تأثیر دارد (Akkuş *et al.*, 2022). در صنعت چوب نیز سرکه چوب برای عمل‌آوری و محافظت از چوب در برابر پوسیدگی و آفات مورد استفاده قرار می‌گیرد. این ماده می‌تواند به عنوان یک ماده ضد عفونی کننده و ضد قارچ برای چوب‌های ساختمانی و دکوراتیو مورد استفاده قرار گیرد (Iacomino *et al.*, 2024).

در سال‌های اخیر، آلودگی‌های محیط‌زیست ناشی از فلزهای سنگین به علت ماندگاری، اثرات سرطان‌زایی، سمیت بالا و توزیع جهانی در آب، خاک و هوا، حتی در غلظت‌های پایین به نگرانی ایمنی غذا در سراسر جهان تبدیل شده است. همچنین، این فلزها تمایل به تجمع در مواد غذایی و بافت‌ها دارند. منابع اصلی این فلزها در محیط‌زیست، صنایع مختلف، پساب‌های صنعتی، دارویی، خانگی و کشاورزی هستند. با ورود مقادیر اضافی فلزات به خاک، کیفیت خاک کاهش می‌یابد و به دنبال آن بهره‌وری خاک و امنیت غذایی کاهش می‌یابد (Wuana *et al.*, 2011). غنی‌سازی موجودات زنده با فلزات سنگین از طریق زنجیره غذایی، ناگزیر تهدیدی برای انسان‌ها و اکوسیستم‌ها خواهد بود (Lei *et al.*, 2016). علاوه بر جنبه ایمنی و سلامت، وجود عنصرهای فلزی در سرکه چوب می‌تواند بر کیفیت و خواص ارگانولپتیک^۱ (مزه، بو، رنگ و غیره) آن نیز تأثیر داشته باشد. به عنوان مثال، وجود یون‌های فلزی می‌تواند باعث تغییر رنگ، ایجاد کدری و یا طعم نامطلوب در سرکه چوب شود. برخی از این عناصر حتی می‌توانند در واکنش با ترکیبات دیگر موجود در سرکه چوب، ترکیبات ناخواسته و مضر تولید کنند (Liu *et al.*, 2018; Rosales *et al.*, 2023).

بنابراین، تعیین دقیق میزان عنصرهای فلزی و مقایسه آماری نتایج در نمونه‌های مختلف سرکه چوب می‌تواند اطلاعات با ارزشی در مورد اثر عوامل مختلف مانند منشأ جغرافیایی، فرایند تولید محصول، ماده اولیه و غیره بر غلظت فلزها فراهم کند. پیمنتا^۲ و همکارانش (Pimenta *et al.*, 2018) برای استفاده از سرکه چوب در کاربردهای کشاورزی و دامپروری، روی یک نمونه سرکه چوب تولید شده از اوکالیپتوس و بامبو در مقیاس صنعتی و تجاری، به عنوان نهاده کشاورزی در بازار کشور برزیل مطالعاتی انجام دادند و دریافتند که سرکه چوب تولید شده از این درختان دارای پتانسیل لازم جهت استفاده به عنوان ماده پایه در تولید عوامل ضد میکروبی هستند که این امر ناشی از ترکیب شیمیایی آن‌ها و اثر مهاری اثبات شده بر ریزجانداران بیماری‌زا است. لینگ لو^۳ و همکارانش (Liu *et al.*, 2018) مطالعاتی روی اثر سرکه چوب بر خواص و سازوکار جذب رقابتی فلزهای سنگین روی کمپوست‌های تخمیر ثانویه انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که سرکه چوب یک افزودنی موثر برای بهبود کیفیت کمپوست و کاهش سمیت فلز است.

بنزون^۴ و همکارانش (Benzon *et al.*, 2017) در مطالعاتی به تعیین و مقایسه غلظت عنصرهای فلزی مختلف از جمله فلزهای سنگین در نمونه‌های مختلف سرکه چوب پرداختند. وجود برخی فلزها مانند سرب، آهن، روی، کادمیم، آرسنیک و جیوه در غلظت‌های بالا می‌تواند اثرات سمی و مضر جدی بر سلامت انسان داشته باشد (Liu *et al.*, 2018; Rosales-Huamani *et al.*, 2023; Xuehan *et al.*, 2023). با این حال، مطالعات کمتری در زمینه اندازه‌گیری غلظت واقعی این عناصر در نمونه‌های سرکه چوب موجود در بازار انجام شده است. لذا، این پژوهش می‌تواند اطلاعات سودمندی در این زمینه فراهم کند. از سوی دیگر، این پژوهش می‌تواند به بررسی چالش‌ها و محدودیت‌های آنالیز عنصرهای فلزی در نمونه‌های پیچیده مانند سرکه چوب بپردازد. ماتریس پیچیده و ناهمگن سرکه چوب، محدودیت‌های خاصی را در انتخاب روش تجزیه، آماده‌سازی نمونه، واسنجی^۵ و کنترل تداخلات ایجاد می‌کند. بررسی عمیق این چالش‌ها و ارائه راهکارهای مناسب برای غلبه بر آن‌ها، می‌تواند زمینه را برای انجام تجزیه‌های دقیق‌تر و قابل‌اعتمادتر در آینده فراهم کند. از نظر کاربردی، نتایج این پژوهش می‌تواند اطلاعات بسیار سودمندی را برای تولیدکنندگان،

¹-Organoleptic Properties

²-Pimenta

³-Ling Lu

⁴-Benzon

⁵-Calibration

مصرف‌کنندگان و سیاست‌گذاران در زمینه کنترل کیفیت و ایمنی سرکه چوب ارائه نماید. تولیدکنندگان می‌توانند با آگاهی از عوامل مؤثر بر غلظت فلزهای مختلف، فرایندهای تولید خود را بهینه‌سازی نمایند. مصرف‌کنندگان نیز با کسب اطلاع از سطح واقعی این فلزها در محصولات موجود در بازار، می‌توانند انتخاب آگاهانه‌تری داشته باشند. همچنین، داده‌های به‌دست آمده می‌تواند به سیاست‌گذاران و سازمان‌های ذیربط در بازبینی و گردآوری استانداردهای جدید برای حفظ سلامت عمومی کمک کند. در نهایت، این پژوهش شکاف‌های موجود در دانش فعلی در زمینه آنالیز عنصرهای فلزی در سرکه چوب را آشکار می‌کند و با ارائه دستاوردهای جدید، فرصت را برای مطالعات آینده در این زمینه فراهم می‌نماید. درک بهتر رفتار عنصرهای فلزی در این محصول صنعتی مهم، می‌تواند اساسی برای کاربردهای وسیع‌تر و ابداعاتی بیشتر در آینده باشد.

مواد و روش‌ها

آماده‌سازی نمونه‌های استاندارد

مواد مورد استفاده از برند مرک (دارمشتات، آلمان) بوده و شامل نیترات مس ۳ آبه، نیترات آهن ۹ آبه، نیترات کبالت ۶ آبه، کلرید روی، کلرید منگنز (II)، سولفات مونوهیدرات و کلسیم نیترات می‌باشد. ابزارها، تجهیزات و دستگاه‌های مورد استفاده در این کار پژوهشی عبارت از اسپکتروفتومتر جذب اتمی Analytikjena مدل Nova AA 400 ساخت آلمان، هالو کاند لامپ فلزهای سنگین مورد آنالیز از شرکت Analytikjena، دستگاه کروماتوگرافی مبادله یونی Metrohm مدل Compact IC Flex 930، دستگاه پلاسمای جفت شده القایی-اسپکترومتر نشر نوری (ICP-OES) ساخت شرکت Ltd PGInstrument's مدل ICP 5000DV از کشور انگلستان است.

برای تهیه محلول مادر به غلظت ۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر یون مس، آهن، کبالت، روی، منگنز و کلسیم مقدار مشخصی از نمک نیترات مس ۳ آبه، نیترات آهن ۹ آبه، نیترات کبالت ۶ آبه، کلرید روی، کلرید منگنز (II)، سولفات مونو هیدرات و کلسیم نیترات وزن و توسط آب دیونیزه به حجم رسانده شد. در ادامه برای تهیه محلول‌هایی به غلظت‌های ۱، ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر از یون عنصر مس، آهن، کبالت، روی، منگنز و کلسیم مقدار مشخصی از محلول‌های مذکور را برداشته و توسط آب دیونیزه در بالن ۵۰ میلی‌لیتری به حجم رسانده شد. و محلول‌های استاندارد مس، آهن، کبالت، روی، منگنز و کلسیم برای رسم منحنی واسنجی به کمک دستگاه جذب اتمی آماده شد.

آماده‌سازی محلول‌های سرکه چوب

نمونه‌های متنوعی از سرکه چوب به صورت آماده از کارخانه‌های شهرهای مختلف ایران، از جمله تهران، شیراز، تبریز، مرند، بناب و ملکان خریداری شدند که مشخصات آن‌ها در جدول ۱ آورده شده است. این نمونه‌ها از منابع مختلف چوبی، شامل درختان سیب، انگور و سپیدار بودند. از انتخاب این گونه‌های درختی به دلیل تفاوت‌های ساختاری و شیمیایی آن‌ها بود که می‌تواند بر ترکیب و غلظت عنصرهای معدنی در سرکه چوب تأثیرگذار باشد. فرایند جمع‌آوری نمونه‌ها با دقت بالا انجام شد تا از عدم آلودگی و حفظ کیفیت نمونه‌ها اطمینان حاصل شود. هر نمونه در ظروف شیشه‌ای تمیز و استریل جمع‌آوری شد. پس از جمع‌آوری، نمونه‌ها بلافاصله در دمای ۴ درجه سلسیوس نگهداری شدند. این دما برای جلوگیری از تغییرات شیمیایی و میکروبی در نمونه‌ها انتخاب شد. نمونه‌ها حداکثر به مدت یک هفته در این شرایط نگهداری شدند تا از تازگی آن‌ها در زمان آنالیز اطمینان حاصل شود. برای اندازه‌گیری فلزهای سنگین منگنز، کلسیم، روی، کبالت، مس و آهن مقدار ۹ نمونه سرکه چوب از شهرهای مختلف ایران تهیه شد و عملیات مورد نیاز از جمله رقیق‌سازی و غیره انجام شد و محلول‌های استاندارد ۱، ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر جهت رسم نمودار واسنجی آماده گردید و نمودار واسنجی مربوط به هر فلز رسم شد و آنالیزهای مربوطه جهت اندازه‌گیری فلزهای سنگین در نمونه‌های مختلف سرکه چوب انجام شد.

جدول ۱- مشخصات سرکه‌های چوب مورد استفاده در این پژوهش.

نمونه	pH	EC (mS/cm)	رنگ
نمونه تبریز، کارگاه شماره ۱	۳/۰۵	۴/۳۰	قهوه ای سوخته
نمونه تبریز، کارگاه شماره ۲	۳/۴۸	۱/۳۵	سیاه
نمونه تجاری نماکو	۳/۲۵	۱۱/۸	قهوه ای سوخته
نمونه بناب، کارگاه شماره ۱	۳/۵۵	۹/۶۴	قهوه ای
نمونه بناب، کارگاه شماره ۲	۳/۷۰	۶/۶۰	سیاه
نمونه آذرشهر	۳/۲۰	۳/۲	قهوه ای سوخته

شرایط کاری دستگاه FAAS^۱

به منظور دستیابی به نتایج قابل اعتماد، اندازه گیری مقدار کبالت، منگنز، آهن، مس و روی باید با استفاده از دستگاه جذب اتمی شعله‌ای در شرایط بهینه انجام شود. اتم ساز دستگاه اسپکتروفوتومتر به کار رفته در روش پیشنهادی از نوع شعله استیلن- هوا بوده است که مشخصات کارکردی آن برای کاتیون‌های مذکور در جدول ۲ آورده شده است (Eskin et al., 2020; Anwar et al., 2024).

جدول ۲- شرایط دستگاهی استفاده شده در FAAS برای آنالیز فلزهای سنگین.

فلوی سوخت (nL/h)	پهنای نوار طیفی (nm)	شدت جریان لامپ (mA)	طول موج (nm)	نام کاتیون
۵۵	۰/۲	۷	۲۴۰/۷	کبالت (Co)
۶۰	۰/۲	۷	۲۷۹/۵	منگنز (Mn)
۶۵	۰/۲	۶	۲۴۸/۳	آهن (Fe)
۵۰	۰/۵	۴	۲۱۳/۹	روی (Zn)
۵۰	۱/۲	۳	۳۲۴/۸	مس (Cu)

شرایط کاری دستگاه ICP-OES

طول موج‌های متناسب برای هر شش عنصر جهت استفاده در دستگاه ICP-OES در جدول ۳ آورده شده است (Xiandeng et al., 2000; Khan et al 2022).

جدول ۳- طول موج‌های انتخاب شده برای هر عنصر در ICP-OES

نام فلز	طول موج (nm)
آهن	۲۳۸/۲۰۴
روی	۲۰۶/۲۰۵
منگنز	۲۵۷/۶۱۰
مس	۳۲۷/۳۹۳
کبالت	۲۲۸/۶۶۱
مولیبدن	۲۰۳/۸۴۴

^۱-Flame Atomic Absorption Spectrophotometry

پارامترهای پلاسما

- توان پلاسما : معمولاً بین ۱۰۰۰ تا ۱۵۰۰ وات تنظیم می‌شود.
- سرعت جریان گاز پلاسما : بین ۱۰ تا ۲۰ لیتر در دقیقه
- سرعت جریان نمونه : بین ۱ تا ۲ میلی‌لیتر در دقیقه
- سرعت جریان گاز کمکی پلاسما : بین ۵/۰ تا ۱ لیتر در دقیقه

پارامترهای اپتیکی

- عرض شکاف: بین ۱۰ تا ۵۰ میکرومتر
 - زمان ماندگاری: بین ۱ تا ۳ ثانیه
- لازم به ذکر است که این اعداد تنها یک بازه کلی را نشان می‌دهند و برای هر دستگاه و نمونه خاص ممکن است متفاوت باشد.

مقایسه آماری فلزهای سنگین در نمونه‌های سرکه چوب

با استفاده از آزمون‌های آماری تجزیه واریانس (ANOVA) و آزمون t ، تفاوت معنادار بین مقادیر فلزهای سنگین در نمونه‌های مختلف سرکه چوب تهیه‌شده از شهرهای گوناگون ایران بررسی گردید. به‌منظور بررسی تأثیر نوع درخت بر میزان فلزهای سنگین موجود در سرکه چوب، نمونه‌هایی از سرکه چوب تهیه‌شده از درختان سیب، انگور و سپیدار مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. آزمون تجزیه واریانس (ANOVA) برای مقایسه مقادیر فلزهای سنگین آهن، منگنز و روی در این نمونه‌ها به‌کار گرفته شد. به‌منظور ارزیابی دقت و همخوانی نتایج حاصل از دو روش تحلیل عنصری-ICP OES (طیف‌سنجی نشر نوری پلاسمای جفت‌شده القایی) و AAS (طیف‌سنجی جذب اتمی)، مقادیر فلزهای سنگین شامل آهن، منگنز و روی در نمونه‌های سرکه چوب با استفاده از هر دو تکنیک اندازه‌گیری شدند. سپس به‌منظور مقایسه آماری میانگین نتایج حاصل، آزمون t جفت‌شده^۱ به‌کار گرفته شد.

نتایج و بحث

غلظت منگنز

نتایج به‌دست‌آمده در جداول ۴ و ۵ از تحلیل نمونه‌های مختلف سرکه چوب با استفاده از دو روش اسپکتروفتومتری جذب اتمی (AAS) و طیف‌سنجی پلاسمای جفت‌شده القایی (ICP-OES) نشان داد که میزان منگنز در این نمونه‌ها به‌طور قابل‌توجهی متغیر است. بیشترین غلظت منگنز مربوط به نمونه اول شهر بناب (۱۹۶/۳ و ۱۴۷/۲۵ میلی‌گرم بر لیتر) و کمترین آن مربوط به نمونه دوم شهر مرند (۲/۶۴۵ و ۲/۰۶۸ میلی‌گرم بر لیتر) و شهر تهران (۱/۳۱۹ و ۸/۶۲ میلی‌گرم بر لیتر) بود. این تفاوت می‌تواند ناشی از نوع چوب مصرفی، ویژگی‌های خاک محل رشد درختان و شرایط تولید سرکه چوب باشد. دقت بالای روش‌های تحلیلی به‌کاررفته، به‌ویژه خطی بودن نمودار واسنجی و ضریب تبیین بالا ($r^2 = ۰/۹۹۷۹$) در روش AAS، نشان‌دهنده قابلیت اعتماد این روش‌ها در تعیین غلظت منگنز در نمونه‌ها است. با توجه به اینکه منگنز نقش مهمی در رشد گیاهان، فتوسنتز و تنظیم آنزیم‌ها ایفا می‌کند، استفاده از سرکه چوب به‌عنوان یک منبع طبیعی این عنصر می‌تواند به بهبود تغذیه گیاهی کمک کند. با این حال، مقادیر بالای منگنز در برخی نمونه‌ها نشان می‌دهد که استفاده بی‌رویه یا بدون رقیق‌سازی مناسب از سرکه چوب ممکن است منجر به تجمع بیش از حد عنصرهای در خاک و ایجاد سمیت برای گیاهان شود. بنابراین، لازم است در مصرف این کود طبیعی دقت و تعادل

^۱-Paired t-test

رعایت شود. در نهایت، یافته‌های این پژوهش بر اهمیت انتخاب نوع چوب مناسب و کنترل شرایط تولید سرکه چوب تأکید دارد تا محصول نهایی از نظر ترکیب عنصرهای غذایی برای استفاده در کشاورزی بهینه باشد. انجام مطالعات بیشتر بر روی تأثیر مستقیم این ترکیبات بر رشد گیاهان و عملکرد محصول، می‌تواند راهکارهای عملی‌تری را برای به‌کارگیری مؤثرتر سرکه چوب در مدیریت تغذیه گیاهی فراهم آورد.

جدول ۴- غلظت فلزهای سنگین مختلف بر حسب میلی‌گرم بر لیتر به روش AAS.

نام نمونه	کلسیم (Ca)	کبالت (Co)	مس (Cu)	آهن (Fe)	منگنز (Mn)	روی (Zn)
شهر مرند ۱	۳۷۰/۶	<۱	<۱	۳۲۸۲	۱۵/۲۲	۱۵/۸۱۸
شهر مرند ۲	۱۹۱/۲۵	<۱	<۱	۲۳۱/۵	۲/۶۴۵	۴/۰۴۷
شیراز (تجاری)	۱۷۰۹	<۱	<۱	۱۳۰۸	۲۸/۵۴	۶۶/۲۴
تبریز	۱۲۶	<۱	<۱	۴۶۱۲	۴۱/۰۳	۱۴/۹۵۴
ملکان ۱	۱۱۶/۵	<۱	<۱	۲۳۹۱	۱۵/۳	۱۷/۱۹
ملکان ۲	۲۶/۸	<۱	<۱	۱۸۰۸	۲۴/۹	<۱
تهران	۲۶/۹۶	۱/۵۳۳	<۱	۱۲۷۲	۱/۳۱۹	۱/۵۷۲
بناب ۱	۱۱۸۸/۶	۳/۹۷۷	<۱	۱۸۵۴۰	۱۹۶/۳	۴/۳۴۶
بناب ۲	۳۰۹/۹	۲/۲۸۳	<۱	۴۱۰۸	۴۱/۱۷	<۱

جدول ۵- غلظت فلزهای سنگین مختلف بر حسب میلی‌گرم بر لیتر به روش ICP-OES.

نام نمونه	کبالت (Co)	مس (Cu)	آهن (Fe)	منگنز (Mn)	روی (Zn)	مولیبدن (Mo)
مرند ۱	۰/۰۷۷	<۰/۰۰۵	۴۵۴۶/۸	۱۳/۱۶۷	۱۳/۹	<۰/۰۰۵
مرند ۲	۰/۰۱۸	۰/۱۰۵	۲۴۰/۲	۲/۰۶۸	۴/۱۷۵	<۰/۰۰۵
شیراز	<۰/۰۰۵	<۰/۰۰۵	۱۲۱۹/۸	۱۸/۴۱	۳۲/۴۴	<۰/۰۰۵
تبریز	<۰/۰۰۵	<۰/۰۰۵	۴۷۴۵/۶	۲۸/۹۴	۸/۴۴	<۰/۰۰۵
ملکان ۱	<۰/۰۰۵	<۰/۰۰۵	۲۵۵۳/۴	۷/۴۶	۹/۸۲	<۰/۰۰۵
ملکان ۲	<۰/۰۰۵	<۰/۰۰۵	۱۸۱۶/۶	۱۲/۰۴	۰/۲۵	<۰/۰۰۵
تهران	<۰/۰۰۵	<۰/۰۰۵	۱۲۷۸/۰	۸/۶۲	۲/۸۶	<۰/۰۰۵
بناب ۱	<۰/۰۰۵	<۰/۰۰۵	۱۸۳۸۵	۱۴۷/۲۵	۱/۳۷	<۰/۰۰۵
بناب ۲	<۰/۰۰۵	<۰/۰۰۵	۴۳۶۸/۴	۳۵/۲۷	۲۲/۹۶	<۰/۰۰۵

غلظت کلسیم

یافته‌های این تحقیق نشان داد که میزان کلسیم موجود در نمونه‌های مختلف سرکه چوب، بسته به منطقه تولید، تفاوت قابل توجهی دارد. نتایج حاصل از آنالیز دستگاهی با استفاده از روش اسپکتروفتومتری جذب اتمی (AAS) نشان داد که بیشترین غلظت کلسیم مربوط به نمونه‌های شهر بناب (به‌ویژه نمونه بناب ۱ با مقدار ۱۱۸۸/۶ میلی‌گرم بر لیتر کمترین میزان مربوط به نمونه‌های ملکان ۲ و تبریز به‌ترتیب ۸/۲۶ و ۱۲۶ میلی‌گرم بر لیتر بود (جدول ۴). این تفاوت‌ها می‌تواند ناشی از تفاوت در نوع ماده خام گیاهی مورد استفاده در فرایند تولید سرکه چوب، شرایط اقلیمی منطقه، و روش‌های تولید باشد. با وجود این که کلسیم یکی از عنصرهای غذایی کم‌مصرف برای گیاهان به شمار می‌رود و نقش مهمی در تقویت دیواره یاخته‌ها، تنظیم فعالیت آنزیم‌ها و بهبود کیفیت محصولات گیاهی ایفا می‌کند، نتایج این پژوهش نشان داد که سرکه چوب نمی‌تواند به عنوان منبع اصلی تأمین کلسیم برای گیاهان مطرح باشد. غلظت‌های به‌دست‌آمده در اغلب نمونه‌ها، پایین‌تر از محدوده‌ای است که بتواند نقش بارزی در تأمین نیاز گیاهان به این عنصر ایفا کند. از سوی دیگر، معادله خطی به‌دست‌آمده از نمودار واسنجی ($A = 0.018C + 0.0145$) با ضریب تبیین بالای ۰/۹۹۶۷

نشان‌دهنده دقت بالای روش اندازه‌گیری در این پژوهش است. حد تشخیص روش نیز برابر با ۶۳۰ میکروگرم بر لیتر تعیین شد که حساسیت مناسبی برای اندازه‌گیری مقادیر پایین کلسیم در نمونه‌های سرکه چوب فراهم می‌کند. همچنین، بهینه‌سازی pH خاک به‌منظور افزایش قابلیت جذب این عنصر توسط گیاهان از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. استفاده از سرکه چوب می‌تواند به عنوان مکمل ثانویه مفید باشد، اما نباید به عنوان منبع اصلی کلسیم مورد استفاده قرار گیرد.

غلظت روی

عنصر روی (Zn) به عنوان یک عنصر غذایی کم‌مصرف، در فعالیتهای آنزیمی، فتوسنتز، سنتز پروتئین و پایداری ساختارهای سلولی نقش اساسی ایفا می‌کند. بررسی مقادیر به‌دست‌آمده در جداول ۴ و ۵ نشان داد که بیشترین غلظت روی مربوط به نمونه تجاری شهر شیراز (۶۶/۲۴ میلی‌گرم بر لیتر) بوده و پایین‌ترین مقادیر در نمونه دوم شهر ملکان و شهر تهران مشاهده شد. این نوسانات می‌تواند تحت تأثیر عواملی همچون نوع چوب اولیه، شرایط فیزیوشیمیایی خاک محل رشد درختان، فرایندهای تولید سرکه چوب و نبود استانداردهای دقیق برای کنترل کیفیت مواد خام و محصول نهایی باشد. نمودار واسنجی تهیه‌شده در محدوده ۱ تا ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر دارای ضریب تبیین (R^2) برابر با ۰/۹۸۷۱ بود که دقت و تکرارپذیری بالای روش اسپکتروفتومتری جذب اتمی را تأیید می‌کند. همچنین، حد تشخیص روش معادل ۱۳۳۵ میکروگرم بر لیتر تعیین گردید که برای مقاصد تحلیلی قابل قبول محسوب می‌شود. با در نظر گرفتن نتایج، می‌توان نتیجه گرفت که سرکه چوب به‌عنوان منبع تأمین روی برای گیاهان از کارایی محدودی برخوردار است و نمی‌تواند جایگزین مناسبی برای کودهای شیمیایی یا آلی غنی از روی تلقی گردد. لذا، استفاده از این ترکیب بیشتر باید به‌عنوان مکمل تغذیه‌ای در کنار راهبردهای تغذیه‌ای دیگر مورد توجه قرار گیرد.

غلظت مس

به‌طور مشابه، غلظت مس در سرکه چوب نیز بسیار اندک گزارش شد و با وجود اهمیت حیاتی این عنصر برای متابولیسم نیتروژن، تنفس سلولی و فتوسنتز، مقدار آن برای تأمین نیاز گیاه ناکافی بود. معادله واسنجی دقیق و ضریب تبیین بسیار بالا ($R^2 = ۰/۹۹۹۷$) نشان‌دهنده دقت بالای روش آنالیز بود، اما نتایج کم‌مقدار بودن غلظت مس را نیز تأیید کرد. با توجه به این نتایج می‌توان گفت که اگرچه سرکه چوب می‌تواند به‌عنوان یک محصول طبیعی و زیست‌سازگار در مدیریت کشاورزی پایدار مورد استفاده قرار گیرد، اما از منظر تأمین عنصرهای غذایی کم‌مصرف ضروری برای گیاه مانند روی و مس، به‌هیچ‌وجه نمی‌توان روی آن به‌عنوان یک منبع اصلی حساب کرد. بنابراین، توصیه می‌شود برای تأمین این عنصرهای حیاتی، از کودهای شیمیایی یا آلی تخصصی استفاده گردد و پیش از مصرف، آنالیز دقیق خاک انجام گیرد تا از کمبودهای تغذیه‌ای پیشگیری شود.

غلظت کبالت

نتایج حاصل از آنالیز نمونه‌های سرکه چوب نشان داد که میزان کبالت موجود در این ماده بسیار ناچیز بوده و نمی‌تواند به‌عنوان منبع قابل اتکایی برای تأمین نیاز گیاهان به این عنصر در نظر گرفته شود. با وجود آنکه کبالت به‌عنوان یک عنصر غذایی کم‌مصرف، در برخی فرایندهای زیستی مانند تثبیت نیتروژن در گیاهان لگوم و متابولیسم ویتامین B12 در میکروارگانیسم‌ها نقش دارد، اما نقش مستقیم و مؤثری در رشد عمومی گیاهان در مقایسه با عنصرهای کلیدی‌تر نظیر آهن و روی ندارد. اندازه‌گیری غلظت کبالت با استفاده از اسپکترومتر جذب اتمی نشان داد که حتی با وجود دقت بالای روش تحلیلی (ضریب تبیین معادله واسنجی برابر با ۰/۹۹۲۸)، حد تشخیص این روش (۹۹۳ میکروگرم بر لیتر) نشان‌دهنده آن است که بیشتر نمونه‌های مورد بررسی یا پایین‌تر از حد تشخیص بودند یا مقادیر بسیار ناچیزی از کبالت را دارا بودند. این موضوع می‌تواند به‌دلیل تغییرات طبیعی در ترکیب شیمیایی چوب، تفاوت در گونه‌های گیاهی

مصرفی برای تهیه سرکه، و نیز شرایط فرایند تولید باشد. با توجه به این موارد، می‌توان نتیجه گرفت که اگرچه کبالت به صورت بالقوه می‌تواند در فرایندهای زیستی خاص مفید باشد، اما میزان اندک آن در سرکه چوب و نقش محدودش در فیزیولوژی گیاهان، باعث می‌شود که استفاده از سرکه چوب به‌عنوان منبع تأمین کبالت برای تغذیه گیاهان توصیه نشود. در صورت نیاز به تأمین کبالت در برنامه تغذیه‌ای گیاهان، استفاده از کودهای تخصصی و بررسی وضعیت عنصرهای کم‌مصرف در خاک از طریق آزمایش‌های دقیق توصیه می‌گردد.

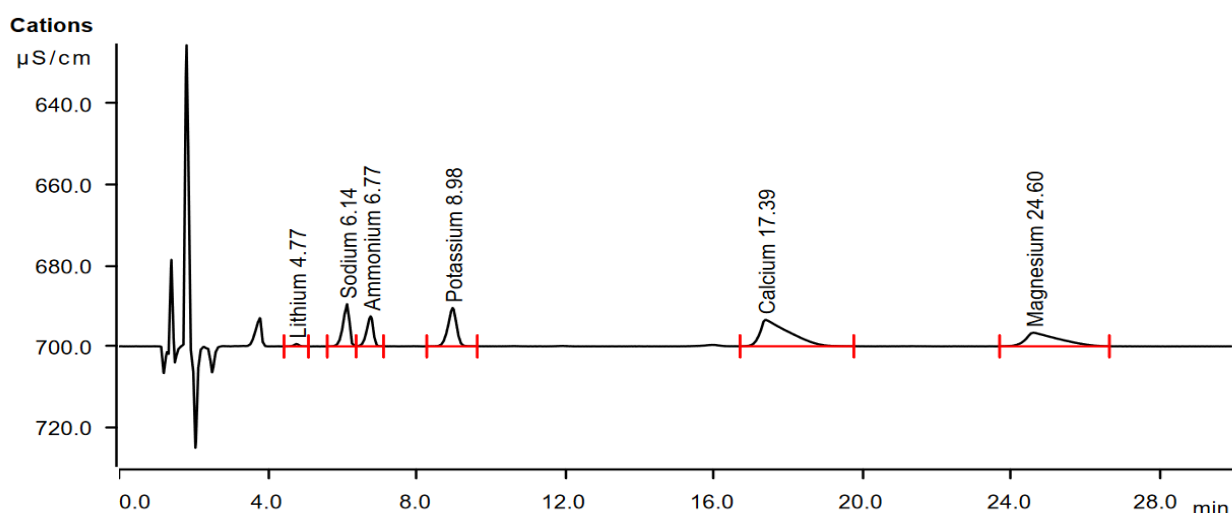
غلظت آهن

آهن به‌عنوان یکی از عنصرهای ضروری و کلیدی در تغذیه گیاهان، نقش اساسی در فرایند فتوسنتز، سنتز کلروفیل و فعالیت‌های آنزیمی دارد. کمبود آهن موجب بروز کلروز (زردی برگ‌ها)، کاهش رشد و عملکرد گیاه می‌شود. بر همین اساس، بررسی حضور این عنصر در منابع تغذیه‌ای مانند سرکه چوب، از منظر کاربرد آن در کشاورزی پایدار اهمیت زیادی دارد. نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل نمونه‌های سرکه چوب با استفاده از دو روش اسپکتروفتومتری جذب اتمی (AAS) و پلاسمای جفت‌شده القایی (ICP-OES) نشان داد که غلظت آهن در این محصول متغیر و عموماً بالا است و در برخی نمونه‌ها به مقادیر قابل توجهی می‌رسد. بر اساس جداول ۴ و ۵، بیشترین مقدار آهن در نمونه شهر تبریز با مقدار ۴۷۴۵/۶ میلی‌گرم بر لیتر (ICP-OES) و ۴۶۱۲ میلی‌گرم بر لیتر (AAS) مشاهده شد، در حالی‌که کمترین مقدار مربوط به نمونه دوم شهر مرنده با مقدار ۲/۲ میلی‌گرم بر لیتر (ICP-OES) و ۲۳۱/۵ میلی‌گرم بر لیتر (AAS) بود. این اختلافات زیاد می‌تواند ناشی از عواملی نظیر منبع چوب مورد استفاده، فرایند تولید سرکه، و شرایط نگهداری باشد. نکته دیگری که باید به آن اشاره کرد این است که کارگاه تولیدی عموماً از تجهیزات و ظروف فلزی و آهنی استفاده می‌کنند که ممکن است انحلال این آهن موجب افزایش قابل توجه در مقدار آهن سرکه چوب شود. ضریب رگرسیون بالا در معادله واسنجی ($r^2 = 0.9988$) نشان‌دهنده دقت قابل قبول روش اندازه‌گیری بوده و صحت داده‌ها را تأیید می‌کند. اگرچه در برخی نمونه‌ها، میزان آهن به‌طور قابل ملاحظه‌ای بالا بوده و می‌تواند بخشی از نیاز گیاهان به این عنصر را تأمین کند، اما نبود یکنواختی و عدم قابلیت پیش‌بینی دقیق میزان آهن در محصولات مختلف سرکه چوب، باعث می‌شود که استفاده از آن به‌عنوان منبع اصلی آهن با احتیاط همراه باشد. به همین دلیل، توصیه می‌شود پیش از استفاده از سرکه چوب به‌عنوان کود آهن، آنالیز شیمیایی دقیق از محصول انجام شود. در غیر این صورت، برای تأمین مطمئن آهن، استفاده از کودهای استاندارد و تخصصی آهن توصیه می‌گردد.

مطالعه حاضر که با هدف بررسی ترکیب شیمیایی سرکه چوب و سنجش پتانسیل آن به‌عنوان یک منبع تغذیه‌ای برای گیاهان، بر پایه سه تکنیک پیشرفته شامل اسپکتروفتومتری جذب اتمی (AAS)، پلاسمای جفت‌شده القایی (ICP-OES) و کروماتوگرافی مبادله یونی انجام گرفت (جدول ۴-۶) دید جامعی نسبت به حضور فلزهای سنگین، کاتیون‌ها و آنیون‌های مختلف در سرکه چوب ارائه داد. اندازه‌گیری عنصرهای فلزی نظیر آهن، روی، مس، منگنز و کبالت با روش‌های AAS و ICP-OES نشان داد که برخی از این عنصرهای در مقادیر نسبتاً قابل توجهی در برخی نمونه‌ها حضور دارند (مانند آهن در نمونه تبریز یا شیراز)، اما غلظت بسیاری از آن‌ها مانند مس و کبالت در حد کمتر از حد تشخیص دستگاه بوده است. آهن نقش کلیدی در فتوسنتز دارد و در برخی نمونه‌ها با غلظت‌های بالا (تا ۴۷۴۵/۶ میلی‌گرم بر لیتر) شناسایی شد که نشان‌دهنده پتانسیل نسبی سرکه چوب در تأمین آهن برای گیاهان است. غلظت روی در برخی نمونه‌ها بالا گزارش شد (مثلاً شیراز با ۶۶/۲۴ میلی‌گرم بر لیتر)، ولی یکنواختی وجود ندارد. مس و کبالت در اکثر نمونه‌ها یا وجود نداشتند یا مقدارشان بسیار ناچیز بود. منگنز در برخی نمونه‌ها مانند شیراز و تبریز در غلظت‌های متوسط تا بالا مشاهده شد که می‌تواند در فعالیت‌های آنزیمی گیاه مؤثر باشد.

آنالیز آنیون‌ها و کاتیون‌های متدوال با روش کروماتوگرافی یونی

نتایج کروماتوگرافی مبادله یونی (شکل ۱) برای کاتیون‌ها نشان داد که سرکه چوب حاوی مقدار مناسبی از کلسیم (Ca^{2+})، منیزیم (Mg^{2+})، پتاسیم (K^{+})، سدیم (Na^{+}) و در برخی موارد آمونیوم (NH_4^{+}) است (جدول ۶). نمونه‌های تجاری مانند شیراز و تبریز بیشترین غلظت کاتیون‌های حیاتی را داشتند (مانند Ca^{2+} با بیش از ۲۴۷۱/۴ میلی‌گرم بر لیتر) این عنصرهای برای رشد سلولی، تعادل اسمزی، فعال‌سازی آنزیم‌ها و افزایش کیفیت محصولات بسیار حیاتی هستند.

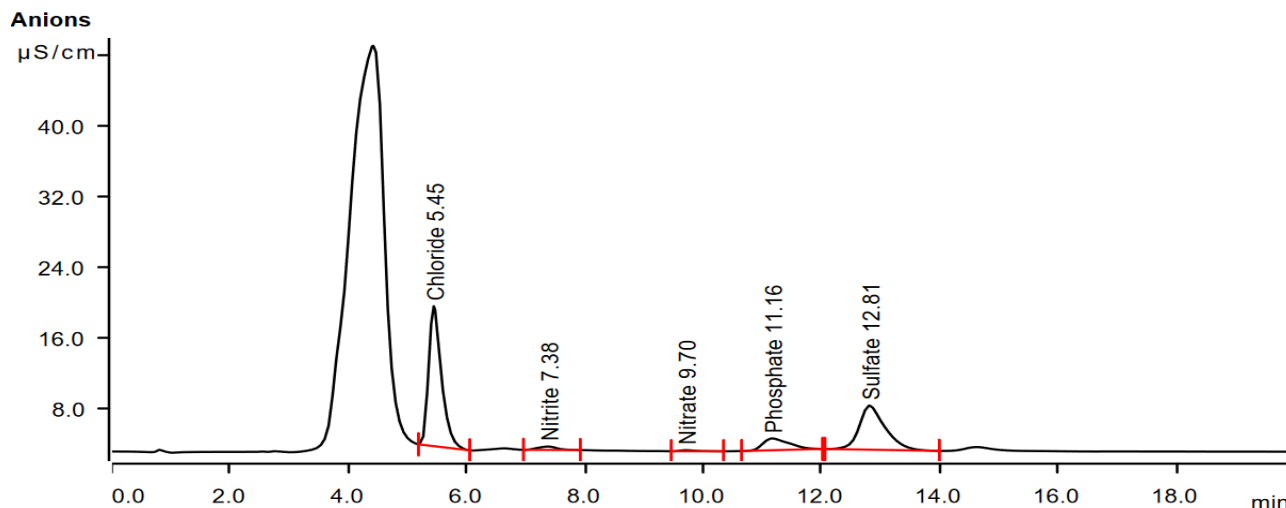


شکل ۱- کروماتوگرام مربوط به آنالیز کاتیون‌ها.

جدول ۶- غلظت کاتیون‌های مختلف بر حسب میلی‌گرم بر لیتر به روش کروماتوگرافی مبادله یونی.

نام نمونه	Li^{+}	Na^{+}	NH_4^{+}	K^{+}	Ca^{2+}	Mg^{2+}
مرند ۱	۲۶۹/۴۳	۱۸/۸۲	۹۱/۴۳	۱۰/۸۹	۲۲۵/۳۱	۲۰/۱
مرند ۲	۰/۴۱	۱۷/۷۲	۶/۲۲	۷/۳۵	۱۶۰/۱۱	۱۶/۶۹
شیراز(تجاری)	۱۰/۶۱۱	۷۶۹/۰۸	۴۶۰/۳۸	۱۷۸۳/۹	۲۴۷۱/۴	۷۲۸/۲۳
تبریز	۸/۶۹	۳۱۸/۹۵	۱۲۷۷/۷	۷۲/۶	۷۴۲/۷۴	۳۸۴/۸۷
ملکان ۱	-	۱۷۴/۰۳	۴۲۰/۱۴	۴	۱۰۸/۶۱	۱/۲۸
ملکان ۲	-	۰/۱۳۹	۷۶/۲۴	۲/۲۴	۱۵۵/۱۱	۱/۱۹۳

آنیون‌هایی نظیر کلرید (Cl^{-})، نیترات (NO_3^{-})، فسفات (PO_4^{3-}) و سولفات (SO_4^{2-}) نیز با روش کروماتوگرافی مبادله یونی بررسی شدند (شکل ۲). مقادیر بالای سولفات و نیترات در برخی نمونه‌ها (مثلاً مرند و شیراز) نشان‌دهنده پتانسیل بالای تغذیه‌ای سرکه چوب برای تأمین آنیون‌های مختلف است. وجود فسفات تنها در برخی نمونه‌ها مانند شیراز، اهمیت منبع چوب و فرایند تولید را یادآور می‌شود. نتایج حاصل از سه تکنیک تحلیلی نشان داد که اگرچه سرکه چوب دارای مقادیر ارزشمندی از برخی عنصرهای غذایی است، اما یکنواختی ترکیب شیمیایی آن پایین بوده و غلظت عنصرهای بسته به منبع و روش تولید بسیار متغیر است. از این‌رو سرکه چوب می‌تواند به عنوان مکمل تغذیه‌ای و بهبوددهنده خاک مورد استفاده قرار گیرد، اما به‌تنهایی نمی‌تواند تمامی نیازهای تغذیه‌ای گیاهان را تأمین کند. بنابراین استفاده از سرکه چوب در برنامه تغذیه‌ای، به‌ویژه به عنوان منبع عنصرهای غذایی مانند کلسیم، منیزیم و پتاسیم قابل‌تأمل است.



شکل ۲- کروماتوگرام مربوط به آنالیز آنیون‌ها.

مقایسه آماری فلزهای سنگین در نمونه‌های سرکه چوب

در تحلیل واریانس منبع تغییرات، سرکه چوب تولیدی در کارگاه‌های مختلف بوده است به عبارت دیگر بین کارگاهی می‌باشد. با توجه به تکرار سه بار آزمایش‌ها درجات آزادی ناشی از تکرار (درون نمونه‌ای) برابر دو می‌باشد.

تجزیه واریانس (ANOVA) برای داده‌های ICP-OES

درجات آزادی بین نمونه‌ای هم برابر پنج می‌باشد. نتایج تجزیه واریانس داده‌های تکنیک (ICP-OES) جدول ۷ برای سه فلز منگنز، روی و آهن نشان داد که مقدار آماری F برای هر سه فلز $Fe = 17120.53$ ، $Zn = 3167.29$ ، $Mn = 12556.26$ است (جدول ۷). این یافته به وضوح دلالت بر تفاوت آماری معنادار میان غلظت این فلزهای در بین نمونه‌های مختلف دارد. به عبارتی، اختلاف مشاهده شده در مقادیر این فلزهای تصادفی نبوده و ناشی از عوامل واقعی مانند نوع چوب، روش تولید سرکه چوب یا شرایط اقلیمی محل برداشت چوب است.

جدول ۷- مقایسه آماری مقادیر فلزهای سنگین در نمونه‌های مختلف سرکه چوب مورد استفاده در این پژوهش.

نام فلز	F آماری	F بحرانی
منگنز	۱۲۵۵۶/۲۶	۲/۵۱
روی	۳۱۶۷/۲۹	۲/۵۱
آهن	۱۷۱۲۰/۵۳	۲/۵۱

آزمون t برای داده‌های AAS

نتایج مقایسه مقادیر فلزهای سنگین به روش AAS با آزمون t برای فلزهای منگنز، آهن، کلسیم و روی نشان دادند که در تمامی موارد، مقادیر t به دست آمده بزرگتر از مقدار بحرانی $t(4/30)$ است. این نیز مؤید وجود تفاوت‌های آماری معنادار بین نمونه‌های شهری مختلف در میزان این عنصرهای است. برای منگنز (Mn) با توجه به گستره پراکندگی مقادیر در نمونه‌ها، اختلاف معناداری در سطح ۰/۰۵ مشاهده شد. آهن (Fe) که عنصری حیاتی برای فتوسنتز است، در برخی نمونه‌ها تا بیش از ۱۸۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر هم گزارش شد (بناب ۱)، درحالی‌که در برخی دیگر به مراتب کمتر بود، که نشان‌دهنده نیاز به بررسی منبع چوب است. کلسیم (Ca) با وجود اینکه نقش مهمی در ساختار سلولی و تعادل یونی گیاه دارد، در نمونه‌هایی مانند شیراز و تهران در مقادیر بسیار بالا دیده شد، اما در ملکان ۲ بسیار پایین گزارش شد. روی (Zn) نیز دارای پراکندگی چشمگیر بود که نقش آن را در یکنواختی ترکیب تغذیه‌ای سرکه چوب زیر سوال

می‌برد. بررسی آماری صورت گرفته بر اساس داده‌های کمی دقیق نشان می‌دهد که ترکیب شیمیایی سرکه چوب به شدت وابسته به محل تولید، نوع ماده اولیه و فرایند تهیه است. بنابراین استفاده از سرکه چوب به عنوان یک منبع مطمئن تأمین عنصرهای غذایی نیازمند آنالیز شیمیایی پیش از مصرف است. در برخی مناطق مانند تبریز، بناب و شیراز، سرکه چوب ممکن است بتواند تا حدی نیازهای عنصرهای خاصی مانند آهن یا کلسیم را پاسخ دهد، اما در مناطق دیگر ممکن است فاقد مقدار کافی باشد. برای کاربرد مؤثرتر سرکه چوب در برنامه تغذیه گیاه، استانداردسازی در تولید و تدوین دستورالعمل‌های منطقه‌ای ضروری به نظر می‌رسد. مقایسه غلظت سه فلز سنگین (آهن، روی و منگنز) در نمونه‌های مختلف سرکه چوب به روش AAS نمایش می‌دهد که آهن (Fe) در برخی نمونه‌ها مانند بناب ۱ به طور قابل توجهی بیشتر از سایر نمونه‌هاست. روی (Zn) در نمونه شیراز دارای بالاترین مقدار بوده در حالی که در برخی نمونه‌ها مانند ملکان ۲ و بناب ۲ مقدار آن صفر گزارش شده است. منگنز (Mn) نیز در بناب ۱ مقدار بسیار بالایی داشته و در تهران کمترین مقدار را نشان می‌دهد.

مقایسه آماری مقدار فلزهای سنگین در نمونه‌های مختلف سرکه چوب براساس نوع درخت تهیه شده نتایج حاصل از آزمون تجزیه واریانس (ANOVA) برای مقایسه مقادیر فلزهای سنگین آهن، منگنز و روی در این نمونه‌ها در جدول ۸ ارائه شده است.

جدول ۸- مقایسه آماری مقادیر فلزهای سنگین در نمونه‌های سرکه چوب تهیه شده از درختان متفاوت در پژوهش حاضر.

نام فلز	F آماری	F بحرانی
آهن	۲۷۸/۵	۵/۱۴
منگنز	۷۱۹۳/۵	۵/۱۴
روی	۱۳۴۰۴	۵/۱۴

با توجه به اینکه مقدار F آماری برای فلز روی به طور قابل توجهی بالاتر از مقدار F بحرانی است، می‌توان نتیجه گرفت که تفاوت معناداری در میزان روی بین نمونه‌های سرکه چوب تهیه شده از درختان مختلف وجود دارد. اما برای فلزهای آهن و منگنز، مقادیر F آماری کمتر از F بحرانی بوده و بنابراین تفاوت معناداری مشاهده نمی‌شود. این یافته‌ها نشان می‌دهد که نوع درخت منبع سرکه چوب می‌تواند بر میزان برخی فلزهای سنگین در محصول نهایی تأثیرگذار باشد. به ویژه، درختانی که سرکه چوب آن‌ها حاوی مقادیر بالاتری از فلز روی است، ممکن است به عنوان منابعی با پتانسیل بالاتر برای تولید سرکه چوب با ویژگی‌های خاص در نظر گرفته شوند.

مقایسه آماری غلظت فلزهای سنگین در دو روش ICP-OES و AAS

به منظور مقایسه آماری میانگین نتایج حاصل، نتایج آزمون t زوجی (paired t-test) در جدول ۹ آمده است. همان گونه که در جدول ۹ مشاهده می‌شود، در هر سه مورد مقدار t آماری کوچکتر از مقدار t بحرانی است ($t\text{-critical} = ۲/۳۰$) در سطح اطمینان ۹۵٪. این موضوع نشان می‌دهد که تفاوت میان نتایج حاصل از دو تکنیک ICP-OES و AAS از نظر آماری معنادار نیست. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که دو روش مذکور در اندازه‌گیری غلظت فلزهای سنگین عملکرد مشابهی دارند و اختلافات عددی مشاهده شده را می‌توان به خطاهای تصادفی یا نوسانات آزمایشگاهی معمول نسبت داد. به عبارت دیگر، هر دو تکنیک برای این نوع اندازه‌گیری‌ها قابل اعتماد و قابل جایگزینی با یکدیگر هستند. مطالعات پیشین نیز نشان داده‌اند که گونه‌های مختلف درختی توانایی متفاوتی در جذب و تجمع فلزهای سنگین دارند. برای مثال، در تحقیقی که بر روی گونه‌های درختی مختلف انجام شد، مشخص گردید که برخی گونه‌ها مانند برگ نو و سرو خمره‌ای توانایی بالاتری در جذب فلزهای سنگین مانند سرب و روی دارند. با توجه به اهمیت کنترل میزان فلزهای

سنگین در محصولات زیستی مانند سرکه چوب، انتخاب منبع چوب مناسب و پایش دقیق فرایند تولید می‌تواند نقش مهمی در تضمین کیفیت و ایمنی این محصولات ایفا کند.

جدول ۹- مقایسه آماری اندازه‌گیری مقادیر فلزهای سنگین توسط دو تکنیک ICP-OES و AAS در پژوهش حاضر.

نام فلز	T-آماري	T-بحراني
آهن	۱/۲۵	۲/۳۰
منگنز	۱/۹۶	۲/۳۰
روی	۰/۶۶	۲/۳۰

نتیجه‌گیری

نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که شرایط اقلیمی و ویژگی‌های زمین‌شناسی خاک تأثیر قابل‌توجهی بر میزان فلزهای سنگین شامل آهن، منگنز و روی در سرکه چوب تولیدی در شهرهای مختلف ایران دارند. به‌طور کلی، آنالیز انجام‌شده حاکی از تفاوت‌های معنادار در غلظت این فلزهای میان مناطق مختلف است که به عوامل متعددی مانند ترکیب خاک، اقلیم منطقه و فرایندهای تولید سرکه چوب در هر منطقه مرتبط است. در مناطق شمالی کشور که دارای آب‌وهوای مرطوب و بارندگی‌های بالا هستند، نمونه‌های سرکه چوب معمولاً غلظت بالاتری از منگنز و آهن را نشان می‌دهند. این پدیده به‌دلیل غنای معدنی خاک‌های این مناطق و قابلیت جذب بالاتر فلزهای توسط گیاهان است که نهایتاً منجر به افزایش فلزهای در محصول نهایی می‌شود. در مقابل، در مناطق مرکزی و جنوبی ایران که با اقلیم خشک‌تری مواجه هستند، غلظت فلزهای سنگین در سرکه چوب معمولاً کمتر گزارش شده است. این کاهش می‌تواند ناشی از کمبود نسبی عنصرهای معدنی در خاک، تبخیر بالا و تفاوت در شیوه‌های تولید در این مناطق باشد. یکی از نکات قابل‌توجه در یافته‌ها، نوسان چشمگیر غلظت فلز روی در مناطق مختلف بود. برای مثال، در برخی مناطق نظیر شیراز، غلظت این فلز به‌صورت قابل‌توجهی بالاتر از سایر مناطق اندازه‌گیری شد، در حالی که در برخی دیگر از شهرها این غلظت در سطح پایینی قرار داشت. به‌نظر می‌رسد این تفاوت‌ها به ترکیب شیمیایی خاک منطقه و روش‌های خاص فرآوری سرکه چوب مرتبط باشد. در مجموع، نتایج نشان می‌دهد که در تمامی نمونه‌های سرکه چوب بررسی‌شده در این تحقیق هیچ‌گونه آلودگی خطرناک مشاهده نشده است. این موضوع بیانگر کیفیت مناسب و کنترل مطلوب فرایندهای تولید و آزمون‌های آزمایشگاهی در این محصولات است. با این حال، مطالعه حاضر توصیه می‌کند که در مناطقی با غلظت‌های بالاتر فلزهای سنگین، نظارت دقیق‌تری بر فرایند تولید سرکه چوب و مدیریت منابع خاک صورت گیرد تا از خطرات احتمالی در زمینه آلودگی جلوگیری شود.

منابع مورد استفاده

References

- Akkuş, M., Akçay, Ç. & Yalçın, M. (2022). Antifungal and larvicidal effects of wood vinegar on wood-destroying fungi and insects. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 24, 1–10. <https://doi.org/10.4067/s0718-221x2022000100437>
- Anwar, S., Syed, Q.A., Ullah, A., Arshad, M., Khan, S.N. & Hussain, M.I. (2024). Detection of heavy metals using atomic absorption and emission spectroscopy in drinking water of Faisalabad. Pakistan: Microbial safety and quality status assessment. *Toxin Reviews*, 43(1), 1-17. <https://doi.org/10.1080/15569543.2023.2272174>
- Chenari Bouket, A., Narmani, A., Sharifi, K., Naeimi, S., Afshar Mogaddam, M.R., Hamidi, A.A., Luptakova, L., Alenezi, F.N., & Belbahri, L. (2023). Semi-VOCs of wood vinegar display strong antifungal activities against oomycete species *Globisporangium ultimum*

- and *Pythium aphanidermatum*. *Microbiology Research*, 14(1), 371–389.
<https://doi.org/10.3390/microbiolres14010029>
- Eskina, V., Baranovskaya, V., Karpov, Y.A. & Filatova, D. (2020). High-resolution continuum source atomic absorption spectrometry: a review of current applications. *Russian Chemical Bulletin*, 69, 1-16. <https://doi.org/10.1007/s11172-020-2718-6>
- He, L., Geng, K., Li, B., Li, S., Gustave, W., Wang, J., Jeyakumar, P., Zhang, X., & Wang, H. (2025). Enhancement of nutrient use efficiency with biochar and wood vinegar: A promising strategy for improving soil productivity. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 105(1), 465–472. <https://doi.org/10.1002/jsfa.11898>
- Jun, Mu. Tohru, U., & Takeshi, F. (2003). Effect of bamboo vinegar on regulation of germination and radicle growth of seed plants. *Journal of Wood Science*, 35: 564-571.
<https://doi.org/10.1007/s10086-002-0472-z>
- Kalasee, W., & Dangwilailux, P. (2021). Effect of wood vinegar substitutes on acetic acid for coagulating natural Para rubber sheets during the drying process. *Applied Sciences*, 11(17), 7891. <https://doi.org/10.3390/app11177891>
- Khan, S.R., Sharma, B., Chawla, P.A., & Bhatia, R. (2022). Inductively coupled plasma optical emission spectrometry (ICP-OES): A powerful analytical technique for elemental analysis. *Food Analytical Methods*, 15, 666–688. <https://doi.org/10.1007/s12161-021-02148-4>
- Kim, B., Park, K.-C., Park, H., & Park, S.-Y. (2022). Quantification of microbial growth pattern on growth medium using image processing program and evaluation of antifungal activities of wood vinegar. *BioResources*, 17(4), 6532-6541. <https://doi.org/10.15376/biores.17.4.1-7>
- Lei, C., Haifeng, L., Zhenyu, Z., Yue, Z., Kang, W., Deyu, Y., Ziqiang, L., & Jialin, Yu. (2022) Evaluation of wood vinegar as an herbicide for weed control. *Agronomy*, 12(12), 3120. <https://doi.org/10.3390/agronomy12123120>
- Li, Z., Zhang, Z., Wu, L., Zhang, H., & Wang, Z. (2019). Characterization of five kinds of wood vinegar obtained from agricultural and forestry wastes and identification of major antioxidants in wood vinegar. *Chemical Research in Chinese Universities*, 35, 12–20.
<https://doi.org/10.1007/s40242-019-8207-5>
- Liu, L., Guo, X., Wang, S., Li, L., Zeng, Y., & Liu, G. (2018). Effects of wood vinegar on properties and mechanism of heavy metal competitive adsorption on secondary fermentation based composts. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 150, 270–279.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.12.037>
- Mi, Y.K., Kyu, H.H., Joo, H.K., Sun, S.C., Pil, D.S., Cyren, M.R., & Sang, C.L. (2012). Effects of carbonized rice hull and wood charcoal mixed with pyroligneous acid on the yield, and antioxidant and nutritional quality of rice. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 36(1), 45-53. <https://doi.org/10.3906/tar-1001-640>
- Mohd Amnan, M.A., Teo, W.F.A., Aizat, W.M., Khaidizar, F.D., & Tan, B.C. (2023). Foliar application of oil palm wood vinegar enhances *Pandanus amaryllifolius* tolerance under drought stress. *Plants*, 12 (4), 785. <https://doi.org/10.3390/plants12040785>
- Mmojieje, J.I., & Hornung, A. (2015). The potential application of pyroligneous acid in the UK agricultural industry. *Journal of Crop Improvement*, 29 (2).
<https://doi.org/10.1080/15427528.2014.995328>
- Mungkunkamchao, T., Kesmala, T. Pimratch, S., Toomsan, B., & Jothityangkoon, D. (2013). Wood vinegar and fermented bioextracts: Natural products to enhance growth and yield of tomato (*Solanum lycopersicum* L.). *Scientia Horticulturae*, 154, 66-72.
<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2013.02.020>
- Nelson, DC. Flematti, GR., Ghisalberti, EL., Dixon, KW., & Smith, SM. (2012). Regulation of seed germination and seedling growth by chemical signals from burning vegetation. *Annual Review of Plant Biology*, 63(1), 107-30.

[https://doi.org/ 10.1146/annurev-arplant-042811-105545](https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042811-105545)

- Oramahi, H.A., Tindaon, M.J., Nurhaida, N., Diba, F., & Yanti, H. (2022). Termicidal activity and chemical components of wood vinegar from nipah fruit against *Coptotermes curvignathus*. *Journal of the Korean Wood Science and Technology*, 50(5), 315–324. [https://doi.org/ 10.5658/WOOD.2022.50.5.315](https://doi.org/10.5658/WOOD.2022.50.5.315)
- Ouattara, H.A.A., Niamké, F.B., Yao, J.C., Amusant, N., & Garnier, B. (2023). *Wood vinegars: Production processes, properties, and valorization*. *Forest Products. Journal*, 73(3), 239–249. [https://doi.org/ 10.13073/FPJ-D-23-00021](https://doi.org/10.13073/FPJ-D-23-00021)
- Raymond A., Wuana., & Felix E, Okieimen. (2011). Heavy metals in contaminated soils: a review of sources, chemistry, risks and best available strategies for remediation. *International Scholarly Research Notices*, 02647, 1-20. <https://doi.org/10.5402/2011/402647>
- Tuntika, M., Thawan, K., Sumran, P., Banyong, T., & Darunee, J. (2013). Wood vinegar and fermented bioextracts: Natural products to enhance growth and yield of tomato (*Solanum lycopersicum* L.). *Scientia Horticulturae*, 154, 66-72. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2013.02.020>
- Wibowo, S., Syafii, W., Pari, G., Herliyana, E., Saputra, N., & Efiyanti, L. (2023). The effect of pyrolysis temperature stratification on the chemical compound of wood vinegar production from hardwood, softwood, and bamboo. *Rasayan Journal of Chemistry*, 16(2), 189–197. [https://doi.org/ 10.31788/RJC.2023.1625021](https://doi.org/10.31788/RJC.2023.1625021)
- Xiandeng, H., & T. Jones, B. (2000). Inductively coupled plasma/optical emission spectrometry. *Encyclopedia of Analytical Chemistry*, 200, 9468–9485. <https://doi.org/10.1002/9780470027318.a5110>
- Xiaoming, W., Mei, L., & Tongbin, C. (2016). Cost-benefit calculation of phytoremediation technology for heavy-metal-contaminated soil. *Science of The Total Environment*, 563–564, 796-802. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.12.080>
- Xuehan, F., Xiaojun, G., Weiguo, X., & Ling, Z. (2023). Effect of the addition of biochar and wood vinegar on the morphology of heavy metals in composts. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(56), 118928–118941. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-30645-y>
- Zulkarami, B., Ashrafuzzaman, M., & Husni Ismail, MR. (2011). Effect of pyroligneous acid on growth, yield and quality improvement of rock melon in soilless culture. *Australian Journal of Crop Science*, 5(12), 1508-1514.