



Intermittent Leaching of Saline-Sodic Soil in the Sistan Plain Using Biochar, Acidic Biochar, Graphene Oxide, and Gypsum

Azad Aghaei¹, Peyman Afrasiab^{2*}, Masoumeh Delbari³,
Ali Shahriari⁴ and Alireza Oveisi⁵

- 1) PhD Graduate in Irrigation and Drainage, Department of Water Engineering, University of Zabol.
 - 2) Corresponding Author and Faculty Member, Department of Water Engineering, University of Zabol.
 - 3) Corresponding Author and Faculty Member, Department of Water Engineering, University of Zabol.
 - 4) Faculty Member, Department of Soil Science, University of Zabol.
 - 5) Faculty Member, Department of Chemistry, University of Zabol.
- *Corresponding author emails: p_afrasiab@yahoo.com

Abstract:

Background and Aim: Soil salinity and decreased fertility are among the most critical environmental challenges in land management, especially in arid and semi-arid regions such as Sistan. These conditions not only limit agricultural production but also threaten ecosystem balance. Amending saline-sodic soils in such areas is essential due to the vital need for crop production. In this context, the simultaneous use of soil amendments and leaching has been proposed as an effective strategy to improve soil quality. This study aimed to investigate the effects of different amendments, including gypsum, biochar, acid-modified biochar, and graphene oxide, on reducing salinity and exchangeable sodium, as well as improving soil chemical properties.

Materials and Methods:

The effects of various amendments on the leaching of saline-sodic soils from the Sistan plain were examined. The amendments included grapewood biochar, its combination with terephthalic acid, graphene oxide, and gypsum. Experiments were conducted under controlled laboratory conditions using cylindrical columns. The soil, with a loam texture and saline-sodic characteristics, was collected from Nimroz, Sistan, and placed in columns with a capacity of 1.5 kg. The leaching process was performed over ten intermittent cycles with five-day intervals, applying water equal to the soil pore volume in each cycle. At the end of each cycle, the leachate was collected and its chemical properties were measured. Additionally, the soil inside the columns was analyzed after the completion of the experiments.

Findings: Results showed that the use of modified biochar, particularly in the treatment containing 5% terephthalic acid and graphene oxide, produced the most significant reduction in soil salinity and sodium adsorption ratio. The use of modified biochar also increased nutrient retention capacity and improved the chemical properties of the soil. Leachate analyses indicated that a water volume equal to four to five times the soil pore volume was sufficient to achieve complete soil leaching, effectively altering sodium and chloride concentrations. Comparisons among treatments showed that organic amendments (biochar and its combination with terephthalic acid) performed better than gypsum in reducing salinity and exchangeable sodium, suggesting their superior effectiveness for managing saline-sodic soils.

Conclusion: These findings demonstrate the efficiency of using modified biochar in combination with intermittent leaching to improve saline-sodic soils. Reducing salinity and exchangeable sodium not only enhances soil quality and crop performance but also contributes to maintaining soil chemical and ecosystem balance. This study emphasizes the importance of using organic amendments together with intermittent leaching in managing saline-sodic soils in arid and semi-arid regions, and the results can serve as a practical and scientific guide for agricultural planning and soil quality improvement in such areas.

Keywords: Leaching, Biochar, Graphene Oxide, Soil Amendment, Sodium Adsorption Ratio



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

نشریه حفاظت منابع آب و خاک

آدرس تارنما:

<https://wsrj.srbiau.ac.ir>

پست الکترونیک:

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

سال پانزدهم

شماره ۲ (۵۸)

تاریخ دریافت:

۱۴۰۳/۱۰/۱۸

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۴/۰۶/۳۰

صفحات: ۳۷-۲۵

آبشویی متناوب خاک شور و سدیمی دشت سیستان با استفاده از بیوچار، بیوچار اسیدی، اکسیدگرافن و گچ

آزاد آقایی^۱، پیمان افراسیاب^{۲*}، معصومه دلبری^۳، علی شهریاری^۴ و علیرضا اویسی^۵

(۱) دانشجوی دکترای تخصصی آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشگاه زابل، زابل، ایران.

(۲) عضو هیئت علمی، گروه مهندسی آب، دانشگاه زابل، زابل، ایران.

(۳) عضو هیئت علمی، گروه مهندسی آب، دانشگاه زابل، زابل، ایران.

(۴) عضو هیئت علمی، گروه مهندسی خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران.

(۵) عضو هیئت علمی، گروه مهندسی شیمی، دانشگاه زابل، زابل، ایران.

* ایمیل نویسنده مسئول: p-afrafiab@yahoo.com

چکیده:

زمینه و هدف: شوری و کاهش حاصلخیزی خاک از مهم‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی در مدیریت اراضی، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند منطقه سیستان محسوب می‌شوند. این شرایط نه تنها تولید محصولات کشاورزی را محدود می‌کند، بلکه تعادل اکوسیستم را نیز تهدید می‌نماید. اصلاح خاک‌های شور و سدیمی در چنین مناطقی به دلیل نیاز حیاتی به تولید محصولات زراعی، امری ضروری است. در این راستا، استفاده همزمان از مواد اصلاح‌کننده و فرآیند آبشویی به‌عنوان یک راهکار کارآمد برای بهبود کیفیت این نوع خاک‌ها مطرح شده است. هدف از این تحقیق، بررسی اثر اصلاح‌کننده‌های مختلف شامل گچ، بیوچار، بیوچار اسیدی و اکسید گرافن در کاهش شوری، سدیم تبادلی و بهبود ویژگی‌های شیمیایی خاک بود.

روش پژوهش: در این پژوهش، تأثیر ترکیبات اصلاحی مختلف بر فرآیند آبشویی خاک‌های شور-سدیمی دشت سیستان مورد بررسی قرار گرفت. مواد اصلاحی شامل بیوچار تولیدشده از چوب انگور و ترکیبات آن با ترفتالیک اسید، اکسید گرافن و گچ بودند. آزمایش‌ها در شرایط کنترل‌شده آزمایشگاهی و با استفاده از لوله‌های استوانه‌ای انجام شد. خاک مورد استفاده، با بافت لوم و شرایط شور و سدیک، از منطقه نیمروز سیستان برداشت و در ستون‌هایی با ظرفیت ۱/۵ کیلوگرم جای‌گذاری شد. فرآیند آبشویی در ۱۰ دوره متناوب با فواصل ۵ روزه انجام گردید و در هر دوره، آبیاری معادل حجم منفذی خاک صورت گرفت. در پایان هر دوره، زه‌آب استخراج و ویژگی‌های شیمیایی آن اندازه‌گیری شد. علاوه بر این، پس از تکمیل آزمایش‌ها، خاک داخل ستون‌ها نیز مورد بررسی قرار گرفت.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که استفاده از بیوچار اصلاح‌شده، به‌ویژه در تیمار حاوی ۵ درصد ترفتالیک اسید و اکسید گرافن، مؤثرترین کاهش در شوری خاک و نسبت جذب سدیم را ایجاد کرده است. استفاده از بیوچار اصلاح‌شده باعث افزایش ظرفیت نگهداری مواد مغذی و بهبود خواص شیمیایی خاک شد. داده‌های حاصل از آزمایش‌های شیمیایی زه‌آب نشان داد که برای دستیابی به آبشویی کامل خاک، حجم آبی معادل چهار تا پنج برابر حجم منفذی کافی است و این حجم آبی توانست تغییرات قابل توجهی در غلظت یون‌های سدیم و کلرید ایجاد کند. همچنین مقایسه بین تیمارها نشان داد که اصلاح‌کننده‌های آلی (بیوچار و ترکیب آن با ترفتالیک اسید) عملکرد بهتری نسبت به گچ در کاهش شوری و سدیم تبادلی دارند و می‌توانند به عنوان راهکار مؤثرتر در مدیریت خاک‌های شور-سدیمی مطرح شوند.

نتایج: این یافته‌ها نشان‌دهنده کارایی استفاده همزمان از بیوچار اصلاح‌شده و فرآیند آبشویی در بهبود خاک‌های شور و سدیمی هستند. کاهش شوری و سدیم تبادلی نه تنها می‌تواند کیفیت خاک و عملکرد زراعی را افزایش دهد، بلکه به حفظ تعادل شیمیایی و اکوسیستمی خاک نیز کمک می‌کند. این مطالعه اهمیت استفاده همزمان از اصلاح‌کننده‌های آلی در ترکیب با روش آبشویی متناوب را در مدیریت خاک‌های شور و سدیمی مناطق خشک و نیمه‌خشک تأکید می‌کند و نتایج آن می‌تواند به‌عنوان راهنمای علمی و کاربردی برای برنامه‌ریزی کشاورزی و بهبود کیفیت خاک در چنین مناطق استفاده شود.

کلیدواژه‌ها: آبشویی، بیوچار، اکسید گرافن، اصلاح خاک، نسبت جذب سدیم

مقدمه

با افزایش روزافزون جمعیت، نیاز به تولید محصولات غذایی بیش از پیش احساس می‌شود و کشاورزی به‌عنوان یکی از بخش‌های کلیدی در تأمین نیازهای غذایی بشر اهمیت ویژه‌ای دارد. در این میان، بسیاری از خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک با مشکلات شوری و سدیمی مواجه‌اند. شوری خاک و آب در اراضی کشاورزی تحت آبیاری به یک چالش جهانی تبدیل شده است، زیرا ترکیب شیمیایی و غلظت نمک‌های محلول در این خاک‌ها باعث افزایش فشار اسمزی می‌شود که همین مسئله دسترسی گیاهان به آب را دشوار می‌سازد (Keren, 2000). اصلاح خاک‌های شور و سدیمی، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، برای تضمین تولید پایدار محصولات کشاورزی اهمیت دارد.

در ایران، بخش وسیعی از اراضی کشاورزی با معضل شوری و سدیمی بودن خاک مواجه هستند که این موضوع بهره‌وری محصولات و مدیریت پایدار منابع خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهد. به‌کارگیری روش‌های اصلاح خاک، شامل اصلاح‌کننده‌های آلی و معدنی، می‌تواند توان بالقوه خاک را افزایش داده و کیفیت کشاورزی را بهبود بخشد. پژوهش‌های داخلی نشان می‌دهند که استفاده از موادی مانند گچ، ترکیبات معدنی و مواد آلی قادر است میزان شوری و سدیم تبادلی خاک را کاهش دهد و ویژگی‌های شیمیایی آن را ارتقا بخشد (Yezdanpanah & Mahmoudabadi, 2011; Ghaneie Motlagh et al., 2010).

در دشت سیستان، شوری خاک به‌عنوان یکی از چالش‌های اصلی کشاورزی مطرح است که به‌ویژه در اراضی با منابع آبی محدود و زهکشی ناکافی، تأثیر منفی بر عملکرد محصولات دارد. مطالعات نشان می‌دهند که شوری خاک در این منطقه تحت تأثیر عواملی مانند بارش، آبیاری و مدیریت اراضی قرار دارد و با تغییرات فصلی و رویدادهای بارشی تغییر می‌کند. این وضعیت، ضرورت توجه به روش‌های مؤثر اصلاح خاک را برای حفظ بهره‌وری کشاورزی و پایداری منابع طبیعی منطقه ایجاب می‌کند (Saadat, 2024).

در سال‌های اخیر، پژوهش‌های متعددی به بررسی روش‌های اصلاح خاک‌های شور و سدیمی پرداخته‌اند. برای نمونه، در مطالعه‌ای تأثیر اصلاح‌کننده‌های ترکیبی شامل ورمی‌کمپوست، بیوجار، گچ و گوگرد عنصری بر شاخص‌های شوری، سدیمی و بیولوژیکی خاک بررسی شد و نتایج نشان داد که ترکیب مواد آلی و شیمیایی، به‌ویژه در حضور تلقیح میکروبی، تأثیر مثبت‌تری در بهبود خصوصیات خاک دارد (Rezapour, 2025). همچنین در پژوهشی کاربرد پسماندهای آلی و بیوجار در اصلاح خاک‌های شور-سدیمی مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان داد که افزودن این مواد

می‌تواند شوری و سدیمی بودن خاک را کاهش دهد (Fouladi Dorehami, 2023). در پژوهشی دیگر تأثیر بیوجار و شوری آب آبیاری بر خصوصیات شیمیایی خاک بررسی شد و مشخص شد که بیوجار می‌تواند بهبود قابل توجهی در ویژگی‌های شیمیایی خاک ایجاد کند (Rezaei, 2018). استفاده از اسید هیومیک به‌عنوان اصلاح‌کننده نشان داده شده است که باعث کاهش شوری خاک و افزایش فعالیت میکروبی و دسترسی به عناصر غذایی می‌شود، که اهمیت استفاده از اصلاح‌کننده‌های آلی و شیمیایی در ارتقای ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خاک‌های شور را برجسته می‌سازد (Alsudays et al., 2024). این پژوهش‌ها اهمیت استفاده از اصلاح‌کننده‌های آلی و شیمیایی در بهبود ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خاک‌های شور و سدیمی را تأکید می‌کنند.

یکی از راه‌های اصلاح این خاک‌ها استفاده همزمان از آبشویی و مواد اصلاحی مانند بیوجار می‌باشد بیوجار یک ماده سیاه‌رنگ است که از بقایای آلی طی فرآیند پیرولیز در غیاب اکسیژن تولید می‌شود (Wang et al., 2020) و می‌تواند به بهبود شرایط نامطلوب خاک کمک کند. مطالعات زیادی درباره تأثیر بیوجار بر کیفیت خاک انجام شده است و یافته‌های این مطالعات نشان می‌دهند که بیوجار موجب افزایش کربن آلی خاک (Glaser et al., 2002)، ظرفیت نگهداری آب خاک (Abel et al., 2013)، تهویه خاک، دسترسی پذیری مواد مغذی، تحریک فعالیت میکروبی و آنزیمی خاک (Taheri et al., 2022) و ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) می‌شود. یکی از مهم‌ترین مزایای بیوجار، بهبود نگهداری آب در خاک است. بیوجار به دلیل تخلخل بالا ظرفیت زیادی برای نگهداری آب دارد. افزودن ۱ تا ۵ درصد بیوجار به خاک لومی، ظرفیت نگهداری آب خاک را ۴ تا ۱۰ درصد افزایش می‌دهد (Streubel et al., 2011). ویژگی‌های فیزیکی بیوجار، مانند ظرفیت نگهداری آب، سطح ویژه و گروه‌های عاملی سطحی، ارتباط نزدیکی با نوع زیست‌توده اولیه آن دارند (Ahmad et al., 2014). بیوجار مزایای بسیاری برای خاک دارد، اما pH بالای آن می‌تواند برای باروری خاک مشکل‌ساز باشد، به‌ویژه از نظر دسترسی پذیری مواد مغذی خاک مانند فسفر (Cheng et al., 2018)، همچنین افزایش pH خاک موجب افزایش فعالیت نیتریفیکاسیون میکروبی می‌شود که آمونیوم را به نیترات تبدیل می‌کند، و بنابراین دسترسی گیاهان به آمونیوم، به‌عنوان منبع نیتروژن ترجیحی، کاهش می‌یابد (Xiao and Meng, 2020). در برخی موارد، اثر افزایش pH خاک ناشی از افزودن بیوجار می‌تواند شرایط نامطلوبی برای گیاهان ایجاد کند، به‌ویژه در خاک‌های آهکی که ممکن است به کاهش عملکرد محصولات نیز منجر شود (Xiao and Meng 2020; Bachmann et al., 2020).

مقدار کاتیون کلسیم و کاهش سدیم در خاک می-شود (Ghaneie Motlagh et al., 2010). اگرچه مطالعات متعددی در زمینه اصلاح خاک‌های شور و سدیمی با استفاده از مواد اصلاح‌کننده مختلف انجام شده است، اما بررسی و ارزیابی مواد اصلاحی نوین در احیای خاک همچنان ضروری است. با توجه به اهمیت اصلاح خاک‌های شور و سدیمی در بهبود بهره‌وری کشاورزی و مدیریت پایدار منابع خاک، این پژوهش به بررسی تأثیر مواد اصلاحی مختلف شامل بیوپار تولیدی از چوب انگور و در ترکیب با ترفتالیک اسید و اکسیدگرافن بر ویژگی‌های شیمیایی خاک در بافت لوم دشت سیستان از طریق آبشویی غرقاب متناوب پرداخته است.

این پژوهش تلاش دارد به سولاتی نظیر تأثیر آبیاری متناوب در حضور مواد اصلاحی، انتخاب اثربخش‌ترین ماده اصلاحی در کاهش شوری و نسبت جذب سدیم و تأثیر مواد اصلاحی بر خصوصیات شیمیایی خاک لوم دشت سیستان پاسخ دهد. نتایج این پژوهش می‌تواند راهکارهای علمی و کاربردی برای بهبود شرایط خاک‌های شور و سدیمی منطقه سیستان ارائه دهد.

مواد و روش‌ها

منطقه و خاک مورد مطالعه

نطقه سیستان در طول جغرافیایی ۶۱ درجه و ۱۰ دقیقه شرقی و همچنین عرض جغرافیایی ۲۹ درجه و ۵۵ دقیقه شمالی در شمال استان سیستان و بلوچستان واقع شده است. متوسط بارندگی سالیانه منطقه ۵۵ میلی‌متر و میزان تبخیر سالیانه ۴۵۰۰ تا ۵۰۰۰ میلی‌متر است. ارتفاع از سطح دریا در دشت سیستان ۴۸۹ متر می‌باشد (RezaZadeh et al., 2016). غالب خاک‌های منطقه دارای محدودیت شوری و سدیمی هستند که عملاً کشت و کار در آن‌ها را با مشکل مواجه کرده است. این پژوهش در بافت غالب منطقه (لوم) که از منطقه نیمروز سیستان تهیه شده است، انجام شد. جدول (۱) ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده را نشان می‌دهد. نمونه‌های خاک از عمق ۰ تا ۳۰ سانتی‌متری برداشت شده و به آزمایشگاه منتقل شد. با توجه به مقادیر بالای هدایت الکتریکی و نسبت جذب سدیم، این خاک در دسته خاک‌های شور و سدیمی قرار دارد.

2016). برخی بیوپارها که دارای pH بالایی هستند را نمی‌توان بطور مستقیم در خاک استفاده کرد، اما به نظر می‌رسد pH بیوپار را می‌توان از طریق ترکیب با موادی مانند گوگرد کاهش داد. استفاده از بیوپار غنی‌شده با گوگرد به‌عنوان اصلاح‌کننده خاک، باعث بهبود ظرفیت تبادل کاتیونی خاک، ماده آلی، هدایت هیدرولیکی، تخلخل خاک، نرخ نفوذ و فعالیت‌های میکروبی می‌شود (Hafeez et al., 2022). تحقیقات نشان داده است که ترکیب بیوپار با اسیدهای معدنی باعث بهبود ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی بیوپار، مانند کاهش pH و افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی آن شده و استفاده از این نوع بیوپار در خاک، دسترسی مواد مغذی خاک را بهبود می‌دهد (El-Sharkawy et al., 2022; Sahin et al., 2017). در تحقیقی، تأثیر افزودن انواع بیوپارهای تولید شده از پوشال برنج و خاشاک چوب نراد و بیوپارهای اسیدی‌شده بر خاک‌های شور و سدیمی و فرآیند احیای این خاک‌ها مورد بررسی قرار گرفت. بیوپارهای اسیدی با افزودن اسید هیدروکلرید به بیوپارها تولید شدند. نتایج نشان داد که استفاده از بیوپارها و بیوپارهای اسیدی به‌طور مؤثری شوری خاک و نسبت جذب سدیم (SAR) خاک را کاهش می‌دهند. در نهایت، تحقیق نشان داد که بیوپار اسیدی تهیه شده از پوشال برنج به‌عنوان یک اصلاح‌کننده مؤثر برای بهبود و احیای خاک‌های شور و سدیمی مفید است (Sadegh-Zadeh et al., 2018). محققین در تحقیقی از مقادیر مختلف بیوپار برای اصلاح خاک استفاده کردند نتایج نشان داد که بیوپار و همچنین سطوح متفاوت آن در بهبود ویژگی‌های شیمیایی خاک‌های اسیدی یا قلیایی کاملاً مؤثر هستند و توانایی اصلاح این خاک‌ها را دارند (Yu et al., 2013). پس از افزودن گچ، مواد آلی و آبشویی به خاک شور و سدیمی در استان کرمان گزارش شد که مواد آلی، مانند تفاله پسته، نسبت به مواد معدنی توانایی بیشتری در تخلیه نمک‌های مضر از خاک دارند. همچنین، ترکیب مواد اصلاحی آلی و معدنی موجب بهبود کارایی فرایند آبشویی می‌شود (Yazdanpanah and Mahmoudabadi, 2011). در همین راستا، پس از بررسی چندین ماده اصلاحی از جمله گچ، اسید سولفوریک و گوگرد بر روی خصوصیات خاک‌های سدیمی مشخص شد که کاربرد گچ و اسید سولفوریک موجب افزایش

جدول ۱. برخی از ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خاک مورد آزمایش

بافت	تخلخل	Pb (gr/cm ³)	pH	EC (dS/m)	Na (meq/lit)	Mg (meq/lit)	Ca (meq/lit)
لوم	۴۲٪	۱/۵۶	۸/۴	۱۱	۱۲۱	۴۷/۵	۶۸
SAR	ESP ٪	K (meq/lit)	Cl (meq/lit)	کربن آلی	CEC (meq/1000g)	CCE	
۱۵/۶	۱۷/۲	۱/۱	۱۴۴	٪(۰/۲)	۹/۱	٪۹	

جدول ۲. ویژگی‌های بیوجار تولیدی از چوب انگور و بیوجار ترکیبی با ترفتالیک‌اسید و اکسیدگرافن

اصلاح کننده	K (%)	Na (%)	Mg (%)	Ca (%)	CEC (meq/100g)	C (%)	pH	EC (dS/m)
بیوجار	۱/۱	۰/۵۵	۰/۸۱	۳	۵۹	۵۴	۷	۱/۲۲
بیوجار + TA 5%	۰/۷۹	۰/۴۸	۰/۹۵	۲/۵	۳۱	۵۲	۵/۵	۱/۶
اکسیدگرافن	۰/۰۸	۰/۱	۰/۱	۰/۵	۸۰	۵/۵	۴/۵	۱/۲

مواد اصلاحی و تیمارهای مورد آزمایش

در این پژوهش، از بیوجار چوب انگور با توجه به فراوانی وجود این ضایعات حاصل از هرس انگور در دشت سیستان، برای اصلاح خاک استفاده شد. بیوجار مورد نیاز از طریق سوزاندن ضایعات چوب انگور در کوره با دمای ۳۵۰ درجه سانتیگراد و بدون وجود اکسیژن تولید شد. همچنین در این پژوهش از بیوجار ترکیب شده با ۵ درصد وزنی ترفتالیک‌اسید استفاده شد. اکسیدگرافن حاصل از اکسید کردن گرافیت به‌منظور بهبود خاک و گچ به‌عنوان اصلاح‌کننده مرسوم خاک‌های شور و قلیا نیز از دیگر تیمارها در این پژوهش بودند. اکسیدگرافن معمولاً از طریق اکسیداسیون گرافیت با استفاده از ترکیبات قوی مانند اسید سولفوریک و پرمنگنات پتاسیم تولید می‌شود. در این فرآیند، گروه‌های اکسیژنی مانند هیدروکسیل، اپوکسی و کربوکسیل به سطح گرافن اضافه می‌شود. سپس برای بهبود خواص، می‌توان اکسیدگرافن را با استفاده از مواد کاهنده مانند هیدرازین کاهش داد. این روش باعث تولید اکسید گرافنی با ویژگی‌های خاص مانند سطح ویژه بالا و قابلیت اصلاح می‌شود. پنج تیمار شامل بیوجار خالص، بیوجار با ترفتالیک‌اسید (۵ درصد)، اکسید گرافن، گچ و تیمار شاهد با سه تکرار در طرح کاملاً تصادفی مورد بررسی قرار گرفتند. به‌منظور بررسی ویژگی‌های شیمیایی بیوجار تهیه‌شده از چوب انگور و بیوجار اصلاح‌شده با ترفتالیک‌اسید و اکسیدگرافن، اندازه‌گیری و مقایسه برخی از ویژگی‌های کلیدی آنها انجام شد. جدول (۲) نتایج به‌دست‌آمده از این آزمایش‌ها را ارائه می‌دهد.

آماده کردن نمونه‌ها و آبشویی

پس از انتقال نمونه‌های خاک به آزمایشگاه، خاک‌ها به مدت هشت روز در هوای آزاد خشک شدند، سپس کوبیده شده و از الک دو میلی‌متری عبور داده شدند. هر نمونه خاک به وزن ۱/۵ کیلوگرم آماده شد. برای آزمایش‌های آبشویی از لوله‌های PVC با قطر ۹ سانتی‌متر و ارتفاع نیم متر استفاده گردید. دیواره‌های داخلی استوانه‌ها به منظور حذف جریانات ترجیحی چسب‌کاری و از طریق شن‌پاشی زبر شد و انتهای استوانه‌ها با استفاده از مش گالوانیزه بسته شده و ۱/۵ سانتی‌متر شن روی آنها ریخته شده تا از فرسایش خاک جلوگیری شود. شن‌های ریخته شده در کف استوانه‌ها، با آب مقطر و اسید سولفوریک شستشو داده شد تا در اندازه‌گیری عناصر مربوط به املاح زه‌آب‌ها خطایی ایجاد نکنند. مواد اصلاحی بیوجار، گچ و اکسیدگرافن به خاک‌ها اضافه شدند،

خاک به طریقی داخل استوانه قرار گرفت که وزن مخصوص ظاهری در داخل آن تا حدودی شبیه به وزن مخصوص ظاهری خاک مزرعه باشد به این صورت که خاک به صورت لایه‌لایه ریخته و کوبیده شد. پس از آماده‌کردن نمونه‌ها برای مدتی آنها به حال خود رها شده تا به وزن مخصوص ظاهری اولیه نزدیک شوند. سپس نمونه‌ها با اضافه کردن آب از زیر استوانه به حالت اشباع درآورده شدند. دلیل اینکار این است که منافذ خالی از هوا شوند. پس از آنکه حرکت عمودی آب در خاک متوقف شد و رطوبت خاک به حد ظرفیت زراعی رسید آبشویی شروع شد. ویژگی‌های شیمیایی آب مورد استفاده در فرآیند آبشویی در جدول (۳) ارائه شده است.

جدول ۳. ویژگی‌های شیمیایی اولیه آب آبشویی

SAR	Cl (meq/Lit)	Mg (meq/Lit)	Ca (meq/Lit)	Na (meq/Lit)	pH	EC (dS/m)
۳/۲	۱۳	۱۳/۵	۵/۵	۱۰	۷/۳	۱/۷۸

آبشویی به‌صورت متناوب در ۱۰ دوره با دور آبیاری ۵ روزه و هر بار حجمی معادل یک برابر حجم منفذی خاک در هر نوبت انجام گردید (Sadegh-Zadeh et al., 2018). حجم منفذی خاک به درصد حجمی از خاک گفته می‌شود که توسط فضاهای خالی بین ذرات خاک اشغال شده است. این فضاها معمولاً با آب یا هوا پر می‌شوند و برای ذخیره‌سازی آب، تبادل گازها و تنفس ریشه‌های گیاهان اهمیت دارند. محاسبات حجم منفذی نمونه-خاک در جدول (۴) آمده است. بر اساس ارتفاع خاک داخل استوانه‌ها و تخلخل و حجم نمونه خاک داخل استوانه حجم منفذی برای خاک لوم مورد مطالعه ۴۸۰ سانتیمتر مکعب برآورد شد. در پایان هر دوره آبشویی (هر حجم منفذی) از نمونه‌ها شیرابه برداشت شده و مشخصات شیمیایی زه‌آب خروجی از استوانه‌ها شامل هدایت الکتریکی شوری، کلسیم، منیزیم، سدیم، نسبت جذب سدیم، درصد سدیم تبادل، کلر و pH اندازه‌گیری شد. برای بررسی تغییرات غلظت عناصر زه‌آب‌ها از رسم منحنی رخنه عناصر استفاده شده است.

جدول ۴. محاسبه حجم منفذی نمونه خاک‌ها در استوانه‌ها

Pb (gr/cm3)	تخلخل	ارتفاع پر شده از خاک در استوانه	حجم نمونه	حجم منفذی
۱/۵۲	۴۲٪	۱۸ cm	۱۱۴۵ cm3	۴۸۰ cm3

پس از پایان آخرین دور آبخشویی و پس از اینکه خاک تقریباً خشک شد، خاک درون استوانه‌ها بیرون آورده شد و پس از خشک کردن و کوبیدن، خصوصیات شیمیایی آنها شامل هدایت الکتریکی، کلسیم، منیزیم، سدیم، نسبت جذب سدیم، درصد سدیم تبادل، کربن آلی، کلر، آهک، CEC و pH اندازه‌گیری شدند. سطح معنی‌داری تیمارها با آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS بررسی شد.

نتایج و بحث

پس از انجام مراحل آبخشویی، خصوصیات شیمیایی زهاب خروجی و نمونه‌های خاک در تیمارهای مختلف اندازه‌گیری و مورد بررسی قرار گرفت. در شکل‌های (۱) و (۲) تیمارهای شاهد، بیوجار، اکسید گرافن، گچ و بیوجار ترکیب شده با ترفتالیک اسید ۵ درصد به ترتیب با علائم (T)، (bi)، (Ox-Gr)، (G) و (Bi+5%AT) نشان داده شده است.

تغییرات pH، EC، SAR در زه‌آب نمونه‌ها

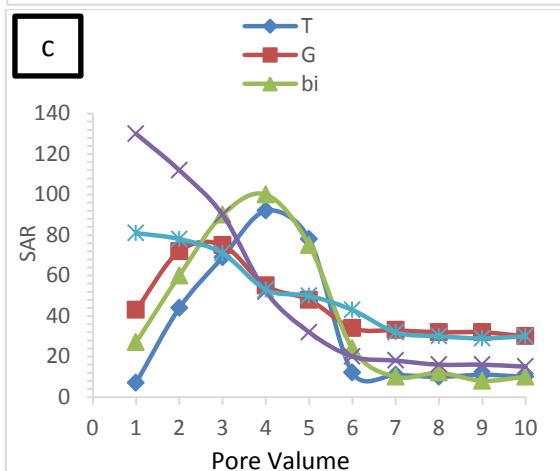
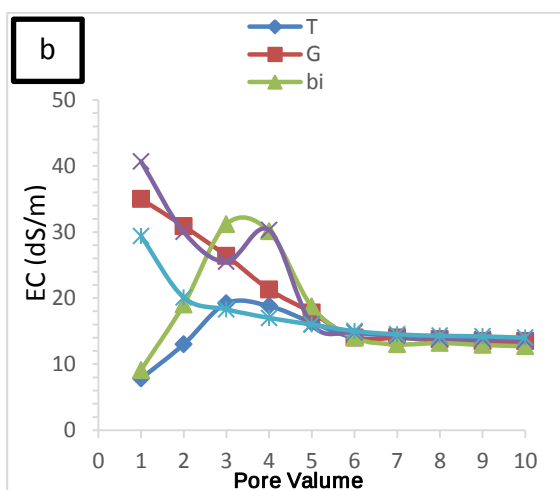
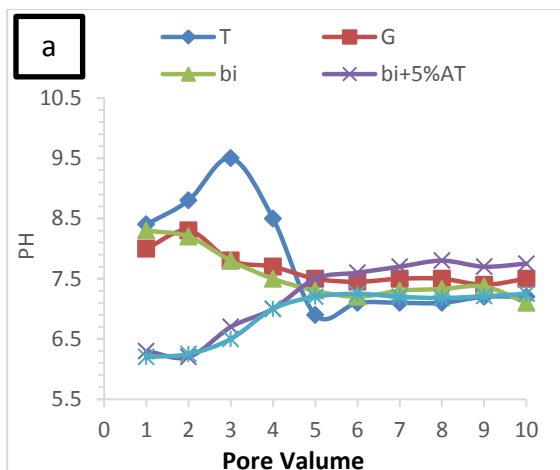
شکل (۱) منحنی تغییرات مقادیر pH، EC، SAR زه‌آب‌ها در حجم منفذی‌های مختلف برای همه تیمارها را نشان می‌دهد. مقادیر واکنش (pH) در تیمارهای مورد آزمایش از ۷ تا ۹ متغیر است. بالا بودن مقادیر واکنش زه‌آب در برخی تیمارها نشان‌دهنده این است که خاک دارای ویژگی‌های قلیایی است. شکل (۱) pH زه‌آب خروجی از نمونه‌ها را در طول دوره آبخشویی نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، واکنش شیرابه اولیه در تیمار بیوجار ترکیبی با ترفتالیک‌اسید و اکسیدگرافن بسیار پایین است این امر می‌تواند ناشی از حضور عوامل اسیدی اصلاح‌کننده در اولین شیرابه‌ها باشد، به‌طوری که در آبخشویی‌های بعدی این عوامل کاهش یافته و با سدیم موجود در خاک جایگزین شده‌اند؛ این کاهش، همراه با سدیم جایگزین‌شده در شیرابه‌ها، واکنش را افزایش داده است. برعکس در دیگر تیمارها، مقدار واکنش در شیرابه‌های اولیه بیشتر است. به عنوان مثال در زه‌آب مربوط به تیمار گچ، وجود عناصر تشکیل دهنده گچ در زه‌آب‌ها pH را بالا برده است (Sadegh-Zadeh et al., 2018). این مقادیر تا آبخشویی چهارم و پنجم دارای نوسان بوده و از آن به بعد، تغییرات زیادی در pH شیرابه‌ها مشاهده نشد. شکل (۲) منحنی تغییرات هدایت الکتریکی (EC) برای همه تیمارها را نمایش می‌دهد. با توجه به این شکل، در حالی که مقادیر اولیه هدایت الکتریکی در تیمار شاهد و تیمار بیوجار پایین است، پس از آبخشویی این مقادیر افزایش یافته است که نشان می‌دهد در این تیمارها مرحله اول آبخشویی خوب عمل نکرده است و املاح کمتری از خاک جدا شده است. تیمارهای بیوجار ترکیبی با ترفتالیک‌اسید، اکسید

گرافن و تیمار گچ، در شیرابه اولیه هدایت الکتریکی بیشتر از ۲۹ dS/m داشتند. (Jalali et al., 2016) و همکاران نیز به نتایج مشابهی دست یافتند. از دلایل این امر شستشوی اولیه املاح اضافی به وسیله آبخشویی، کارایی مواد اصلاحی در مراحل اولیه و جایگزینی مواد اصلاحی با سدیم در خاک را می‌توان نام برد. در آبخشویی سوم، بیشترین مقدار هدایت الکتریکی برای تیمار شاهد و بیوجار ثبت شد و سپس این مقادیر به تدریج کاهش یافت. در نهایت بعد از آبخشویی پنجم تغییرات به حداقل رسیده و هدایت الکتریکی برای همه تیمارها تقریباً به یک مقدار ثابتی رسیده است (Sadegh-Zadeh et al., 2018). کاهش مقدار EC بدلیل از بین رفتن نمک‌های موجود در تیمارها است که این نتیجه با نتایج (Ghayanti et al., 2015) همخوانی دارد. اگرچه EC اولیه در تیمارهای گچ، اکسید گرافن و بیوجار اصلاح شده با ترفتالیک اسید بالا بوده، پس از شروع آبخشویی غلظت-های EC به تدریج آبخشویی کاهش یافته است. شکل ۱ (c) تغییرات SAR در زه‌آب‌های گرفته شده از تیمارهای مختلف برای حجم منفذی‌های متفاوت را نشان می‌دهد. کمترین مقادیر اولیه SAR مربوط به تیمارهای شاهد، گچ و بیوجار می‌باشد به طوری که در تیمار گچ پس از آبخشویی سوم و در تیمار شاهد و بیوجار پس از آبخشویی چهارم پس از رسیدن به بالاترین مقدار خود، با افزایش آبخشویی، SAR روند کاهشی دارد. بالاترین مقادیر SAR در اولین زه‌آب اندازه‌گیری شده مربوط به تیمار بیوجار ترکیبی با ترفتالیک اسید و تیمار اکسید گرافن می‌باشد که نشان دهنده کارایی بالای مواد اصلاحی این تیمارها در اصلاح و شستشوی خاک می‌باشد که منجر به خروج مقادیر بالای املاح (بویژه سدیم) از خاک در شیرابه‌های اولیه شده است. با این حال مقادیر SAR در زه‌آب خروجی با افزایش آبخشویی کاهش یافته است به‌گونه‌ای که در تمام تیمارها از آبخشویی ششم به بعد مقادیر SAR با قرار گرفتن در بازه عددی ۱۰-۳۰ کمترین تغییرات را نشان داده‌اند. نتایج آبخشویی SAR با نتایج بدست آمده از آبخشویی سدیم (شکل ۲ (a)) مطابقت دارد.

تغییرات سدیم، کلسیم، منیزیم و کلر در زه‌آب نمونه‌ها

شکل ۲ (a) مقادیر سدیم شیرابه در حجم منفذی‌های مختلف برای تیمارهای مورد آزمایش را نشان می‌دهد. بیشترین مقادیر Na به ترتیب مربوط به تیمارهای بیوجار ترکیبی با ترفتالیک‌اسید و اکسیدگرافن است که پس از آبخشویی ششم به مقادیر تقریباً ثابتی می‌رسند. در تیمارهای گچ، بیوجار و شاهد در ابتدا مقدار Na کم بوده اما با افزایش آبخشویی تا آبخشویی سوم، Na افزایش یافته است و سپس در آبخشویی‌های بعدی روند کاهشی شکل گرفته است و از آبخشویی ششم به بعد، تغییرات Na به حداقل رسیده است. بالا بودن سدیم در شیرابه‌های اولیه تیمار بیوجار ترکیبی با ترفتالیک‌اسید و اکسیدگرافن

خود شوند. اگر در فرآیند تولید بیوجار از مواد آلی حاوی کلر (مثل بقایای گیاهی یا چوب‌هایی که حاوی کلر باشند) استفاده شده باشد، این ممکن است باعث آزاد شدن یون‌های کلرید (Cl^-) در آبشویی شود (Wang et al, 2024). شکل ۲(c) تغییرات نسبت جذب سدیم (SAR) را نشان است.



شکل ۱. مقادیر pH (a)، هدایت الکتریکی EC (b)، نسبت جذب سدیم SAR (c)، زه‌آب خروجی در تیمارهای مختلف

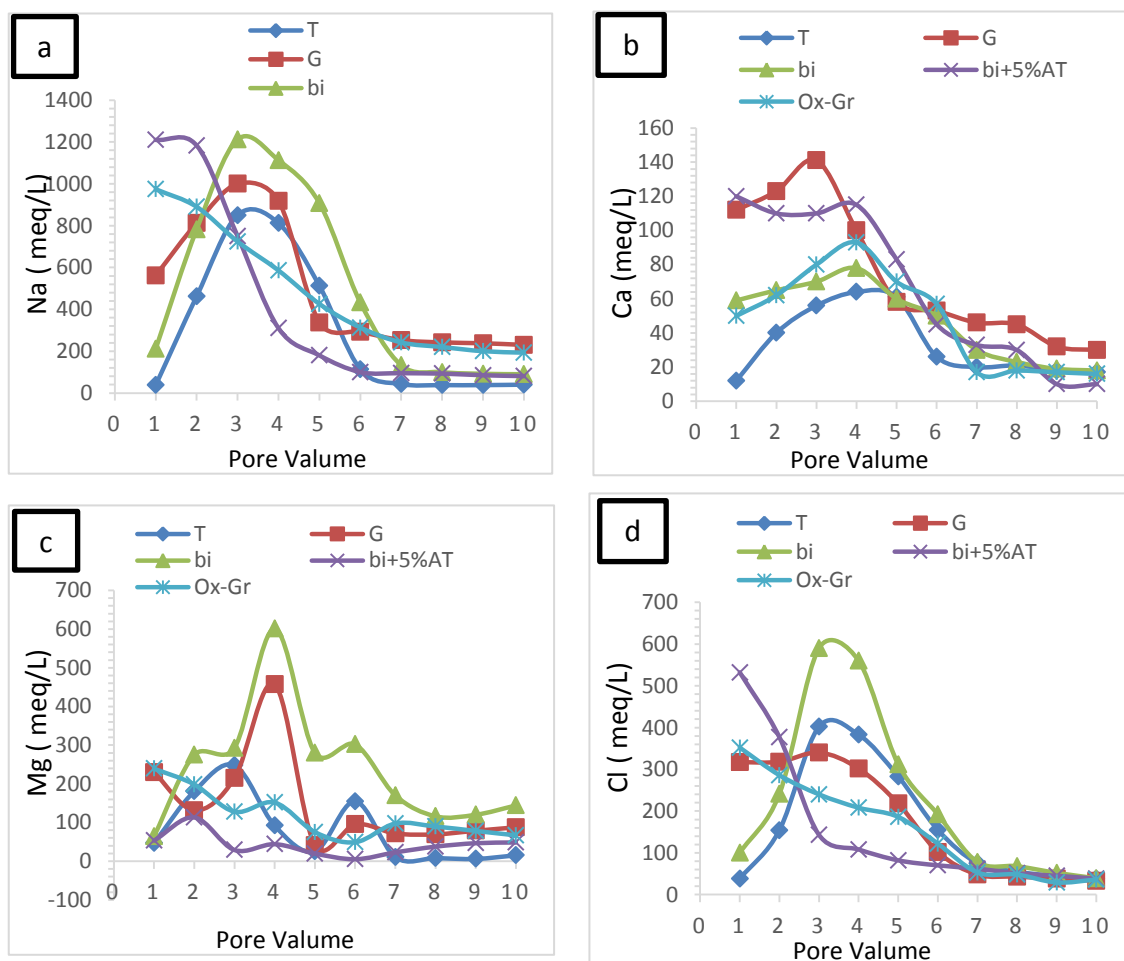
نشان می‌دهد که مقادیر بالای کلسیم و منیزیم و همچنین H^+ در این مواد اصلاحی به خوبی توانسته است جایگزین سدیم روی کلوئیدهای خاک شده و سدیم را از آنها جدا کرده که در نهایت با آبشویی از خاک خارج شده است. در شکل ۲(b) منحنی رخنه کلسیم محلول در زه‌آب در تیمارهای مختلف نمایش داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در زه‌آب اولیه تیمار گچ، بیشترین مقدار کلسیم ثبت شده است که به دلیل وجود ترکیبات کلسیم‌دار در گچ است که مقدار زیادی از آن در مراحل اولیه بصورت محلول از ستون‌های خاک خارج شده است. از طرفی از آبشویی پنجم به بعد تغییرات کلسیم در شیرابه‌ها بسیار ناچیز است که نشانگر این است که از آن به بعد، آبشویی تأثیر چندانی بر املح باقیمانده در نمونه‌های خاک ندارد. در شکل ۲(c) تغییرات منیزیم محلول در زه‌آب‌ها برای تیمارهای مختلف قابل مشاهده است. منیزیم یکی از کاتیون‌های مهم در خاک است و در فرآیند آبشویی ممکن است به همراه سایر کاتیون‌ها مانند سدیم یا کلسیم شسته شود. به‌طور معمول، اگر خاک حاوی مقادیر بالای منیزیم باشد، آبشویی می‌تواند منیزیم را از خاک خارج کند. در اندازه‌گیری مقادیر Mg در تیمارهای مختلف مقادیر اولیه در تیمار بیوجار ترکیبی با ترفتالیک اسید، تیمار شاهد و بیوجار، کمترین مقدار را به خود اختصاص دادند، به گونه‌ای که تیمارهای شاهد و بیوجار اصلاحی با ترفتالیک اسید از همان ابتدای آبشویی‌ها با کمترین تغییرات منیزیم مواجه شده که عدم تأثیر این اصلاح کننده در آبشویی یون منیزیم را نشان می‌دهد. همچنین می‌توان دریافت که تیمار گچ و بیوجار با روند افزایشی نسبت به مقادیر اولیه خود تا آبشویی چهارم بیشترین خروجی یون منیزیم را نشان می‌دهند و پس از آن روند کاهشی از خود نشان می‌دهند. در تیمار گچ از آبشویی پنجم به بعد و در تیمار بیوجار از آبشویی هفتم به بعد غلظت منیزیم نسبت به دیگر تیمارها به حد تقریباً یکنواختی می‌رسد. در برخی شرایط، استفاده از مواد اصلاح‌کننده مانند گچ یا بیوجار ممکن است باعث افزایش یا کاهش غلظت منیزیم محلول در زه‌آب شود. شکل ۲(d) منحنی رخنه کلر محلول در زه‌آب برای تیمارهای مختلف را نشان می‌دهد. کلر معمولاً به‌صورت یون کلرید (Cl^-) در خاک موجود است. هنگام آبشویی، آب به همراه خود نمک‌های محلول از جمله یون‌های کلرید را از خاک شسته و لذا انتظار می‌رود که غلظت کلر به‌ویژه در مراحل اولیه آبشویی در زه‌آب افزایش یابد. بیشترین مقدار یون کلر در آبشویی سوم تیمار بیوجار اتفاق افتاده است. بیوجار دارای گروه‌های فعال سطحی مانند هیدروکسیل ($-OH$) و کربوکسیل ($-COOH$) است که می‌توانند یون‌ها و مولکول‌ها را جذب کنند. با این حال، برخی از ترکیبات بیوجار نیز ممکن است موجب آزادسازی یون‌های موجود در

مطالعه شده است. از طرفی شکل ۳ (a) افزایش pH در تیمار گچ را نسبت به تیمار شاهد نشان می‌دهد که ناشی از خاصیت قلیابیت گچ می‌باشد. ترکیبات بیوچار و اکسید گرافن نیز باعث اسیدی شدن نمونه‌های خاک شده است. مقادیر pH در تیمار بیوچار و اکسیدگرافن در سطح پنج درصد در یک گروه آماری قرار گرفته‌اند و از نظر آماری تفاوت چندانی با هم ندارند ولی سایر تیمارها اختلاف معنی‌داری از نظر آماری با یکدیگر دارند. این نتایج با یافته‌های پژوهش که در آن اکثر تیمارها بعد از کاربرد مواد اصلاحی در اسیدیته تفاوت چندانی با هم داشتند، مطابقت دارد (halu et al., 2021). شکل ۳ (b) نشان می‌دهد که در پایان آبهوشی خاک تیمار شاهد با EC برابر با ۸ dS/m بیشترین شوری را دارد و نشانگر این است که آبهوشی تنها برای اصلاح این خاک کافی نیست و برای اصلاح موثرتر نیاز به استفاده از مواد اصلاحی است. در مقابل، خاک تیمار بیوچار ترکیب‌شده با ترفتالیک‌اسید کمترین مقدار EC (۲ dS/m) را به ثبت رسانده است. این تفاوت‌ها می‌تواند به دلیل تأثیر مواد اصلاحی مختلف بر میزان شوری خاک باشد. تیمارها در مقادیر

به‌طور کلی، تغییرات SAR در شیرابه‌ها تحت تأثیر شدت فرآیند آبهوشی، ترکیب شیمیایی خاک، نوع اصلاح‌کننده‌ها و مقدار سدیم قابل تبادل خاک قرار دارد. در صورتی که آبهوشی به‌طور مؤثر سدیم را از خاک خارج کند، SAR در شیرابه ممکن است افزایش یابد. همان‌طور که در تمامی شکل‌ها مشاهده می‌شود، تغییرات عناصر و پارامترها پس از پنجمین و ششمین آبهوشی بسیار کم است، که نشان می‌دهد برای اصلاح این خاک‌ها با استفاده از اصلاح‌کننده‌های به‌کار رفته در این پژوهش، نیاز به بیش از شش برابر حجم منفذی آبهوشی وجود ندارد. این یافته با پژوهش Sadegh-Zadeh et al. (2018) که برای شستشو مقدار ۱/۶ برابر حجم منفذی را در نظر گرفته‌اند، همسو است.

تغییرات pH، EC و SAR، سدیم، کلسیم، منیزیم و کلر محلول خاک در نمونه‌ها بعد از اتمام آبهوشی

شکل (۳) تغییرات میانگین pH، EC و SAR نمونه‌های خاک را برای تیمار شاهد و اصلاح‌کننده‌ها نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود ترکیب بیوچار با ترفتالیک‌اسید نسبت به سایر تیمارها، منجر به کاهش بیشتر پارامترهای مورد



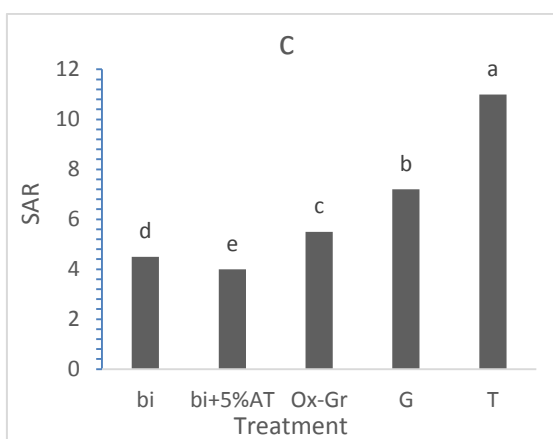
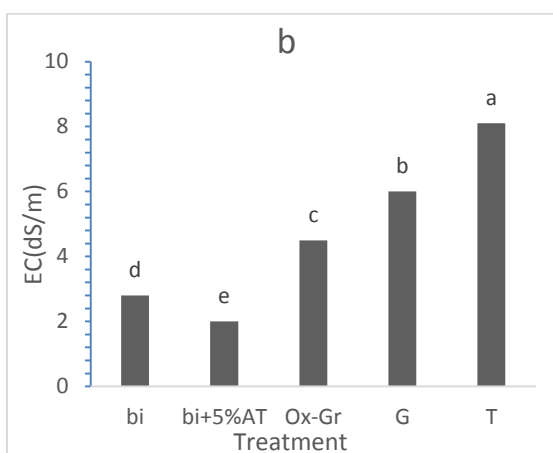
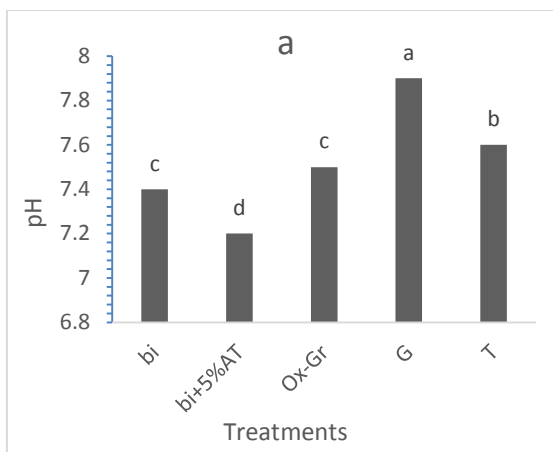
شکل ۲. مقادیر سدیم Na (a)، کلسیم Ca (b)، منیزیم Mg (c) و کلر Cl (d)، زه‌آب خروجی در تیمارهای مختلف

شوری خاک تفاوت معنی داری با هم داشتند و هر کدام در یک گروه آماری قرار گرفته‌اند که نشانگر آن است که عملکرد هر کدام در شستشوی املاح متفاوت بوده است. تیمارهای بیوچار با پنج درصد ترفتالیک‌اسید و بیوچار و اکسیدگرافن به ترتیب بهترین عملکرد را در کاهش شوری و نسبت جذب سدیم داشته‌اند. علی و همکاران (۲۰۱۹) (2019) نیز نشان دادند که افزودن بیوچار اسیدی به خاک‌های شور می‌تواند SAR را کاهش دهد. در این پژوهش بالاترین مقادیر SAR در اولین زه‌آب مربوط به تیمارهای بیوچار ترکیبی با ترفتالیک‌اسید و اکسیدگرافن بود که با افزایش آبشویی، این مقادیر کاهش یافتند. با توجه به شکل ۳ (c) اختلاف معنی داری بین نست-جذب سدیم تیمارها وجود دارد بطوری که هر کدام در یک گروه آماری قرار گرفته‌اند. از طرفی با توجه به شکل ۴ (a) اختلاف معنی داری ($p < 0.05$) بین مقادیر سدیم (Na) نمونه‌های خاک در تیمارهای مختلف وجود دارد. نمونه شاهد با غلظت سدیم برابر با ۵۶/۶ meq/lit بیشترین میزان سدیم را داشت، در حالی که میزان سدیم تیمار بیوچار ترکیب شده با ترفتالیک‌اسید برابر با ۱۴/۴ meq/lit بود که کاهش قابل توجهی را نشان می‌دهد. این امر می‌تواند نشان‌دهنده توانایی بیوچار در کاهش مقدار سدیم در خاک و بهبود ساختمان آن باشد. همچنین، خاک تیمار گچ با ۳۳ meq/lit کلسیم (Ca)، بیشترین میزان کلسیم را دارا بود که از ویژگی‌های گچ به‌عنوان یک اصلاح‌کننده کلسیم‌دار است. در حالی که بیوچار ترکیب شده با ترفتالیک-اسید مقدار کلسیم کمتری (۱۷ meq/lit) داشت که این تفاوت می‌تواند نشان‌دهنده نقش گچ در افزایش کلسیم و بهبود ساختمان خاک‌های بدون کلسیم باشد. این نتایج با نتایج پژوهش (SWERI 2021) همخوانی دارد که در آن کلسیم در تیمار حاوی گچ بیشترین مقدار خود را دارا بود. مقدار منیزیم (Mg) نمونه‌های خاک نیز تفاوت‌های قابل توجهی داشت. بیشترین مقدار منیزیم در نمونه شاهد (۲۰ meq/lit) مشاهده شد، در حالی که خاک تیمار بیوچار ترکیب شده با ترفتالیک‌اسید تنها ۹ meq/lit منیزیم داشت. این امر می‌تواند ناشی از تأثیر متفاوت مواد اصلاحی مختلف بر جذب منیزیم در خاک باشد (Sadegh-Zadeh et al., 2018). با توجه به شکل ۳ (c) نمونه‌های شاهد و گچ بیشترین میزان SAR را دارند (۱۱/۰ و ۱۰/۰)، که این موضوع می‌تواند به افزایش شوری و مشکلات مربوط به جذب یون‌ها در خاک‌های تحت اصلاح اشاره داشته باشد. در مقابل، تیمارهای بیوچار و بیوچار ترکیب شده با ترفتالیک‌اسید SAR کمتری داشتند که به‌طور مثبت بر کاهش شوری و بهبود ساختار خاک تأثیرگذار هستند. همچنین، بررسی مقدار کلر (Cl) نیز نشان داد (شکل ۴ (d)) که نمونه شاهد با ۱۰۵ meq/lit بیشترین مقدار کلر را داشت که بیانگر

شوری بیشتر در این نمونه است. در حالی که بیوچار ترکیب شده با ترفتالیک‌اسید با ۵ meq/lit کلر، بهبود کیفیت خاک در این تیمار را نشان می‌دهد. این یافته‌ها نشان‌دهنده اهمیت استفاده از اصلاح‌کننده‌ها به‌ویژه بیوچار و ترکیب‌های آن در کاهش شوری و بهبود ویژگی‌های شیمیایی خاک هستند. با توجه به شکل ۴، مقادیر سدیم در تمامی تیمارها اختلاف معنی داری ($p < 0.05$) دارند. این اختلاف به دلیل اثرات متفاوت مواد اصلاحی یا روش‌های استفاده شده در تیمارها است. به عنوان مثال، ممکن است برخی مواد اصلاحی مانند بیوچار یا اکسید-گرافن، جذب سدیم را بهبود بخشیده یا آن را در خاک تثبیت کنند، در حالی که در برخی دیگر این اثرات محدود یا ناپایدار باشند. از سوی دیگر، این نشان می‌دهد که تیمارهای مختلف ممکن است ظرفیت‌های متفاوتی برای کاهش اثرات شوری یا جذب سدیم داشته باشند که به ترکیبات و ویژگی‌های آن‌ها بستگی دارد. در مورد کلسیم (شکل ۴ (b)) نیز روند مشابهی مشاهده می‌شود. کلسیم معمولاً به عنوان یک عنصر تنظیم‌کننده در خاک عمل می‌کند و می‌تواند به کاهش جذب سدیم کمک کند. در این صورت، تیمارهایی که قادر به تأمین کلسیم کافی در خاک هستند، می‌توانند تأثیر مثبتی بر کاهش شوری و بهبود کیفیت خاک داشته باشند. این اختلاف معنی دار در مقادیر کلسیم نشان‌دهنده تأثیر متفاوت تیمارها در تأمین این عنصر در خاک است. در خصوص میانگین غلظت منیزیم، تیمارهای بیوچار، اکسیدگرافن و گچ در یک گروه آماری قرار گرفته‌اند و تفاوت معنی داری با یکدیگر ندارند که ممکن است به این دلیل باشد که این مواد به طور مشابه بر جذب یا تبادل منیزیم در خاک تأثیر گذاشته‌اند، یا به دلیل ترکیب‌های مشابه، ظرفیت‌های مشابهی برای بهبود وضعیت منیزیم در خاک دارند. بیوچار به عنوان یک اصلاح‌کننده خاک، ممکن است ویژگی‌هایی مشابه اکسیدگرافن یا گچ در جذب و ذخیره منیزیم داشته باشد، که باعث شده این تیمارها عملکرد مشابهی از خود نشان دهند. به طور مشابه در مورد کلر، تیمارهای بیوچار و اکسیدگرافن در یک گروه آماری قرار گرفته‌اند که ممکن است به دلیل اثرات مشابه این مواد در کاهش غلظت کلر در خاک یا افزایش ظرفیت نگهداری آب و مواد مغذی در خاک باشد. بیوچار و اکسیدگرافن هر دو می‌توانند ویژگی‌های فیزیکی خاک را بهبود بخشیده و در نتیجه تأثیر مشابهی بر رفتار یون‌های کلر در خاک داشته باشند. در این تحقیق، تأثیر تیمارهای مختلف اصلاح خاک بر ویژگی‌های شوری (EC) و سدیمی (SAR) خاک بررسی شد. خاک اولیه بر طبق نمودار طبقه‌بندی ویل‌کاکس در کلاس C3S3 قرار داشت که در دسته خاک‌های با شوری و سدیمی بالا قرار می‌گیرد که برای کاربردهای کشاورزی مناسب نیست.

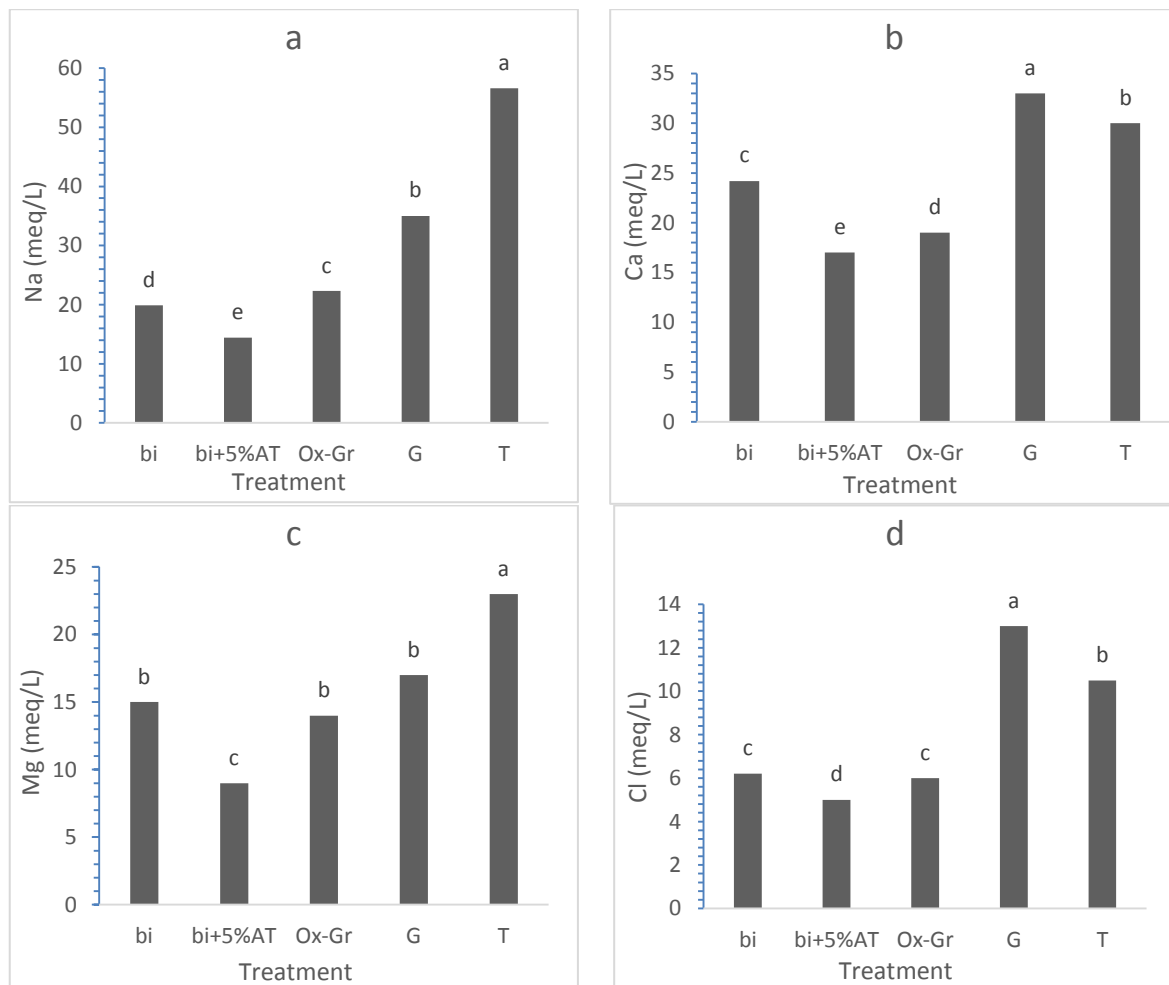
که خاک از طبقه‌بندی اولیه C3 S3 به طبقه‌بندی C1 S1 منتقل شود. این وضعیت نشان‌دهنده بهبود شرایط شوری و سدیمی خاک و رسیدن به وضعیت مناسب‌تر است. در تیمار بیوچار ترکیبی با ترفتالیک اسید نیز کاهش مقادیر EC و SAR موجب شد تا خاک به طبقه‌بندی C1 S1 منتقل شود و همچنین این تیمار بیشترین کاهش را در این پارامترها ثبت کرد. تیمار اکسیدگرافن باعث کاهش شوری (EC به ۴/۵) و کاهش نسبت جذب سدیم (SAR به ۵) شد و خاک به طبقه‌بندی C2 S1 رسید. این بهبود نسبی نشان‌دهنده تأثیر مثبت این تیمار در کاهش شوری و سدیم است، اگرچه همچنان وضعیت شوری خاک به حد مطلوب نرسیده است. در تیمار گچ، به رغم کاهش جزئی شوری خاک (EC به ۶ و SAR به ۱۰) مشاهده شد که همچنان خاک دارای محدودیت شوری و سدیمی می‌باشد. این تغییرات منجر به انتقال خاک به طبقه‌بندی C2S2 شد که نشان‌دهنده شرایط شوری و سدیمی به نسبت بالا است. به‌طور کلی، استفاده از گچ نتایج مطلوبی در کاهش شوری خاک نداشته و وضعیت SAR خاک را بدتر کرده است. در مجموع، نتایج نشان داد که تیمارهای بیوچار و بیوچار ترکیب‌شده با ۵ درصد ترفتالیک اسید تأثیرات بیشتری در کاهش شوری و سدیمی خاک داشتند و شرایط خاک را بهبود بخشیدند. این تغییرات باعث انتقال خاک به طبقه‌بندی C1S1 شد. در مقابل، تیمار گچ به دلیل افزایش SAR نتایج ضعیف‌تری داشت و تأثیر چندانی در اصلاح خاک نداشت (Dotaniya et al., 2023).

نتایج پژوهش حاضر نشان داد که تیمارهای بیوچار و بیوچار ترکیب‌شده با ۵ درصد ترفتالیک اسید بیشترین تأثیر را در کاهش شوری و نسبت جذب سدیم (SAR) خاک داشتند و وضعیت خاک را بهبود بخشیدند، به‌گونه‌ای که خاک از طبقه‌بندی اولیه C3 S3 به C1 S1 منتقل شد. این یافته‌ها با نتایج مطالعات دوتانیا و همکاران (۲۰۲۴)، صادق زاده و همکاران (۲۰۱۸) همسو است، که نشان دادند بیوچار و بیوچار اسیدی قادر به کاهش شوری و بهبود ویژگی‌های شیمیایی خاک‌های شور و سدیمی هستند. در مقابل، تیمار گچ اثر محدودتری داشت و به دلیل افزایش جزئی SAR، نتایج ضعیف‌تری در اصلاح خاک ارائه کرد، که مشابه یافته‌های غنی مطلق و همکاران (۱۳۸۹) و یزدان پناه و همکاران (۱۳۹۰) است، که نشان داده بودند مواد معدنی خالص مانند گچ به تنهایی همیشه قادر به کاهش مؤثر شوری و سدیمی نیستند و اثر اصلاحی آن‌ها بسته به ویژگی‌های خاک و ترکیب با مواد آلی متغیر است. این مقایسه نشان می‌دهد که اصلاح‌کننده‌های آلی یا ترکیبی، به‌ویژه آن‌هایی که توانایی بهبود ظرفیت تبادل کاتیونی و تعدیل pH خاک را دارند، گزینه مؤثرتری برای احیای خاک‌های شور و سدیمی هستند.



شکل ۳. مقادیر میانگین pH (a)، هدایت الکتریکی (b) EC و نسبت جذب سدیم (c) SAR، بعد از آبخوبی خاک در تیمارهای مختلف، حروف یکسان نمایش داده شده در برخی از ستون‌ها نشان‌دهنده عدم معنی‌داری اختلاف بین تیمارها می‌باشد. (آزمون LSD، $p < 0.05$)

در این پژوهش، با استفاده از تیمارهای مختلف اصلاحی، وضعیت شوری و سدیمی خاک بهبود یافت و کلاس خاک به شرح جدول ۵، تغییر پیدا کرد. تیمار بیوچار باعث کاهش قابل توجه شوری خاک (EC از ۱۱ به ۲ dS/m) و کاهش نسبت-جذب سدیم (SAR از ۱۵/۶ به ۴) شد. این تغییرات موجب شد



شکل ۴. مقادیر میانگین سدیم (a)Na، کلسیم (b)Ca، منیزیم (c)Mg و کلر (d)Cl بعد از آبشویی خاک در تیمارهای مختلف، حروف یکسان نمایش داده شده در برخی از ستون‌ها نشان‌دهنده عدم معنی‌داری اختلاف بین تیمارها می‌باشد (آزمون LST، $p < 0.05$)

جدول ۵. مقایسه کلاس و طبقه بندی خاک بعد از اصلاح خاک در تیمارهای مختلف

بیوچار	بیوچار + ۵ درصد ترفتالیک اسید	اکسید گرافن	گچ	تیمار شاهد
۲/۸	۲	۴/۵	۶	۸/۱
EC				
۴/۵	۴	۵/۵	۱۰	۱۱
SAR				
C1 S1	C1 S1	C2 S1	C2 S2	C3 S2
کلاس طبقه بندی				

نتیجه‌گیری

حاوی گچ بیشترین مقدار EC (۶ dS/m) را نشان داد. همچنین، میزان سدیم (Na) در نمونه شاهد بیشترین مقدار (۵۶/۶) را داشت، در حالی که بیوچار ترکیب‌شده با ترفتالیک اسید مقدار قابل توجهی کاهش در Na (۱۴/۴) را نشان داد. این کاهش در مقدار سدیم می‌تواند به عنوان نشانه‌ای از بهبود ساختار خاک و کاهش شوری در خاک‌های اصلاح شده با بیوچار باشد. در مورد کلسیم (Ca) و منیزیم (Mg)، نمونه حاوی گچ بیشترین مقادیر را به ترتیب برابر با ۳۳ و ۱۶ meq/lit داشت، در حالی که نمونه حاوی بیوچار ترکیب‌شده با ترفتالیک اسید به ترتیب برابر با ۱۷ و ۹ meq/lit را نشان داد. از طرفی SAR در نمونه‌های شاهد و گچ بیشترین میزان (۱۱ و ۱۰ meq/lit) را داشت، که

این پژوهش به منظور احیای خاک‌های شور-سدیمی منطقه سیستان از طریق آبشویی متناوب و استفاده از اصلاح‌کننده های مختلف شامل بیوچار، ترکیب بیوچار با ترفتالیک اسید و اکسید گرافن، و گچ انجام شد. نتایج نشان داد که استفاده از بیوچار و ترکیبات آن تأثیر قابل توجهی بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک دارد. بیوچار ترکیب‌شده با ترفتالیک اسید قادر به کاهش pH خاک تا مقدار ۷/۱۵ بود، در حالی که گچ pH خاک را به سمت قلیایی (۷/۹) هدایت کرد. نمونه‌های حاوی بیوچار ترکیب‌شده با ترفتالیک اسید کمترین مقدار هدایت الکتریکی (EC) را با مقدار ۲ dS/m داشت در حالی که نمونه

از شوری و کمبود مواد مغذی مورد استفاده قرار گیرند. به طور کلی، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از بیوچار تولید شده از چوب آنگور و ترکیبات مختلف آن می‌تواند تأثیرات مثبتی بر کاهش شوری و بهبود ویژگی‌های شیمیایی خاک‌ها داشته باشد. در حالی که برخی از اصلاح‌کننده‌ها مانند گچ ممکن است باعث افزایش شوری خاک شوند، بیوچار ترکیب شده با ترفتالیک اسید به‌ویژه در کاهش شوری و بهبود pH و سایر ویژگی‌های خاک مؤثرتر است. شایان ذکر است که دشت سیستم دارای انواع بافت‌های خاک می‌باشد پیشنهاد می‌شود انواع بافت‌های خاک منطقه سیستم که مشکل شوری و سدیک بودن را دارند در تحقیقات آتی مورد پژوهش قرار گیرد.

نشان‌دهنده افزایش شوری و مشکلات مربوط به جذب یون‌ها در خاک است. در مقابل، تیمار بیوچار و بیوچار ترکیب شده با ترفتالیک اسید مقدار SAR کمتری داشتند. در نهایت، کلر (Cl) در نمونه شاهد بیشترین مقدار (۱۰۵ meq/lit) را نشان داد، در حالی که بیوچار ترکیب شده با ترفتالیک اسید تنها ۵ meq/lit کلر داشت که بیانگر کاهش شوری در خاک‌های تحت درمان بود. این نتایج نشان می‌دهد که استفاده از بیوچار و ترکیبات آن، به‌ویژه بیوچار ترکیب شده با ترفتالیک اسید، می‌تواند تأثیرات مثبتی در کاهش شوری، بهبود pH خاک و بهبود ویژگی‌های شیمیایی خاک داشته باشد. این مواد اصلاحی می‌توانند به عنوان یک روش مؤثر در بهبود کیفیت خاک‌ها، کاهش مشکلات ناشی

Reference:

- Abel S, Peters A, Trinks S et al. (2013). Impact of biochar and hydrochar addition on water retention and water repellency of sandy soil. *Geoderma* 202:183–191
- Ahmad M, Rajapaksha AU, Lim JE et al. (2014). Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: a review. *Chemosphere* 99:19–33
- Ali, S., et al. (2019). The effect of acid biochar on sodium adsorption ratio (SAR) in salt-affected soils. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(7), 6981-6989.
- Bachmann HJ, Bucheli TD, Dieguez-Alonso A et al. (2016). Toward the standardization of biochar analysis: the COST action TD1107 interlaboratory comparison. *J Agric Food Chem* 64:513–527
- Cheng H, Jones DL, Hill P et al. (2018). Influence of biochar produced from different pyrolysis temperature on nutrient retention and leaching. *Arch Agron Soil Sci* 64:850–859
- Corwin, D.L., Rhoades, J.D. and Simunek, J. (2007). Leaching requirement fore soil salinity control : Steady – state versus transient models. *Agricul Water Manage* , 90(3):165-180.
- Dotaniya, M. L., Meena, M. D., Choudhary, R. L., Meena, M. K., & Harvir. (2023). Management of plant nutrient dynamics under alkaline soils through graded application of pressmud and gypsum
- El-Sharkawy M, El-Naggar AH, AL-Huqail AA, Ghoneim AM. (2022). Acid-modified biochar impacts on soil properties and biochemical characteristics of crops grown in saline-sodic soils. *Sustainability* 14:8190
- Fouladi Dorehami, S. (2023). Application of various organic residues and biochar in saline-sodic soil reclamation. *Journal of Water and Soil Conservation Research*, 14(4), 123–135. (in Persian)
- Ghaneie Motlagh G.H., Pashaiy Aval A., Khormaly F., and Mosaedy A. (2010). Investigating effect of some amendments on soil chemical properties in a saline-sodic soil. *Watershed Management Research Journal*, 86: 24-31. (In Persian)
- Ghanimotlagh, S., Hosseini, B., & Kazemi, F. (2010). Effects of gypsum, sulfuric acid, and sulfur on the properties of sodic soils. *Iranian Journal of Soil and Agricultural Research*, 12(3), 89–98. (in Persian)
- Glaser B, Lehmann J, Zech W. (2002). Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal—a review. *Biol Fertil soils* 35:219–230
- Hafeez A, Pan T, Tian J, Cai K (2022) Modified biochars and their effects on soil quality: a review. *Environments* 9:60
- Hosseini M., Hassanpour, F., Naghavi, H., Abbasi, F., Bastani, S. (2019). Leaching of Saline Calcareous Soil under Laboratory Conditions. *ISSN 1064-2293, Eurasian Soil Science*, 2019, Vol. 52, No. 10, pp. 1214–1222.
- Jalali, M., et al. (2016). Effect of gypsum and biochar on electrical conductivity of saline soils. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 16(3), 45-59.
- Kalu, S., Simojoki, A., Karhu, K., & Tammeorg, P. (2021). Long-term effects of softwood biochar on soil physical properties, greenhouse gas emissions, and crop nutrient uptake in two contrasting boreal soils. Department of Agricultural Sciences, University of Helsinki, FI-00014 Helsinki, Finland.
- Keren R. (2000). Salinity. In: Sumner M.E. (Ed.), *Handbook of Soil Science*. pp. G3-G25. CRC Press, Boca Raton.
- Konuku, F., Gowing, G.W. and Rose, D.A. (2005). Dry drain: A sustainable solution to water logging and salinity problems in irrigation areas, *Agricul Water Manage*. 83(1-2):1-12.
- Lal, P., Chippa, B.R. and Arvind, K. (2003). Salt affected soils and crop production , a modern synthesis, AGROBIS (India). Corwin, D.L., Rhoades, J.D., and Simunek, J. 2007. Leaching requirement fore soil salinity control : Steady state versus transient models. *Agricul Water Manage* , 90(3):165-180.
- Isudays, I. M., et al. (2024). "Applications of humic and fulvic acid under saline soil conditions to improve growth and yield in barley." *BMC Plant Biology*. <https://bmcpantbiol.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12870-024-04863-6>

- Mzezewa J., Gotosa J., and Nyamwanza B. (2003). Characterization of a sodic soil catena for reclamation and improvement strategies. *Geoderma*. 113, 161-175.
- Qadir M., and Schubert S. (2002). Degradation processes and nutrient constraints in sodic soils. *Land Deg. Dev.* 13, 275-294.
- Rezaei, M. (2018). Effects of biochar and irrigation water salinity on soil chemical properties. *Journal of Water and Soil Conservation Research*, 11(2), 56–68. (in Persian)
- Rezapour, M. (2025). Effects of combined soil amendments on improving soil salinity, sodicity, and biological indicators. *Journal of Water and Soil Conservation Research*, 15(3), 234–245. (in Persian)
- Rezazadeh, S., Gholamalizadeh, A., & Gazmeh, S. (2016). Evaluation of different interpolation methods for spatial estimation of some soil properties (Case study: Sistan Plain lands). *Journal of Water and Soil Science (Science and Technology of Agriculture and Natural Resources)*, 20(4), Winter 2016. (in Persian)
- Saadat, S. (2024). Monitoring soil salinity status in the Sistan plain using remote sensing data. *Journal of Soil and Water Science and Engineering*. (in Persian)
- Sadegh-Zadeh, F., Parichehreh, M., Jalili, B., Bahmanyar, A. (2018). Rehabilitation of calcareous saline- sodic soil by means of biochars and acidified biochars. *Land degradation and development*. Volume 29, Issue 10. October 2018. Pages 3262-3271.
- Sadeghzadeh, F., Ahmadi, R., & Rezaei, M. (2018). Reclamation of calcareous saline-sodic soils using acidified biochars. *Iranian Journal of Soil and Water Sciences*, 29(4), 123–135. (in Persian)
- Sahin O, Taskin MB, Kaya EC et al. (2017). Effect of acid modification of biochar on nutrient availability and maize growth in a calcareous soil. *Soil Use Manag* 33:447–456
- Streubel JD, Collins HP, Garcia-Perez M et al. (2011). Influence of biochar on soil pH, water holding capacity, nitrogen and carbon dynamics. *Soil Sci Soc Am J* 75:1402–1413
- Taheri M, al-R, Astarai AR, Lakzian A, Emami H. (2022). Sorbitol and biochar have key roles in microbial and enzymatic activity of saline-sodic and calcareous soil in millet cropping. *Rhizosphere* 24:100598
- Wang L, Ok YS, Tsang DCW et al. (2020). New trends in biochar pyrolysis and modification strategies: feedstock, pyrolysis conditions, sustainability concerns and implications for soil amendment. *Soil Use Manag* 36:358–386
- Wang, Xiao, Jianli Ding, Lijing Han, Jiao Tan, Xiangyu Ge, and Qiong Nan. (2024). "Biochar Addition Reduces Salinity in Salt-Affected Soils with No Impact on Soil pH: A Meta-Analysis." *Geoderma* 443: 116845.
- Xiao L, Meng F. (2020). Evaluating the effect of biochar on salt leaching and nutrient retention of Yellow River Delta soil. *Soil Use Manag* 36:740–750
- Yazdanpanah, N., & Mahmoudabadi, M. (2011). Temporal changes in leachate quality during the reclamation process of saline-sodic soil using soil columns. *Electronic Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 1(1), 1-20. (in Persian)
- Yazdanpanah, N., & Mahmoudabadi, M. (2012). Temporal monitoring of drainage water quality during the reclamation process of saline-sodic soil using soil columns. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 1(1), 1-22. (in Persian)
- Yazdanpanah, S., & Mahmoudabadi, M. (2011). Effects of gypsum, organic matter, and leaching on saline-sodic soils of Kerman Province. *Journal of Soil and Water Conservation*, 11(2), 15–26. (in Persian)
- Yu O-Y, Raichle B, Sink S (2013) Impact of biochar on the water holding capacity of loamy sand soil. *Int J Energy Environ Eng* 4:1–9.