

مقاله علمی-پژوهشی

بررسی تأثیر برخی مواد اصلاح کننده معدنی و آلی (در مقیاس نانو و غیر نانو) بر آبشویی املاح در خاک شور با بافت لومی

فاطمه حاجبی^۱، نوازاله مرادی^{۲*}، ام البنین بذرافشان^۳، عدنان صادقی لاری^۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۰۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۱۳

چکیده

فناوری نانو به عنوان یک رویکرد نوین، پتانسیل بالایی در بهبود ویژگی های فیزیکی و هیدرولیکی خاک های شور دارد. در این پژوهش، اثر مقایسه ای مواد اصلاح کننده آلی و معدنی (در مقیاس نانو و میکرو) بر خاک شور با بافت لومی مورد بررسی قرار گرفت. تیمارهای آزمایشی شامل بیوپار و نانو بیوپار پوست انار، نانو بنتونیت، زئولیت، میکروسیلیس و نانوسیلیس بود که در ستون های خاکی (قطر ۱۰ و ارتفاع ۳۵ سانتی متر) در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار اعمال شدند. نتایج نشان داد که بالاترین مقدار هدایت الکتریکی ($EC = 23.597$) میلی زیمنس بر سانتی متر (و بیشترین غلظت سدیم 4903 mg/kg) در تیمار بیوپار پوست انار و قبل از آبشویی مشاهده شد. در مقابل، کمترین EC قبل از آبشویی در تیمار نانوسیلیس (13.817 میلی زیمنس بر سانتی متر) و کمترین غلظت سدیم در تیمار نانوبنتونیت (2054 mg/kg) ثبت گردید. بر اساس آنالیز زهاب حاصل از آبشویی با چهار حجم آب منفذی، کمترین میزان EC و غلظت عناصر پتاسیم و آهن به تیمار نانوبنتونیت و کمترین غلظت کلسیم به نانوسیلیس اختصاص داشت؛ در حالی که بالاترین مقادیر EC و غلظت های کلسیم، پتاسیم و آهن در زهاب، مربوط به تیمار بیوپار پوست انار بود. یافته ها نشان می دهد که افزودنی های نانوساختار، به ویژه نانوبنتونیت و نانوسیلیس، توانایی قابل توجهی در کاهش نمک و تعدیل غلظت یون های سدیم، پتاسیم، کلسیم و آهن در خاک های شور دارند و می توانند به عنوان گزینه های مؤثر در مدیریت پایدار این خاک ها مطرح شوند.

واژه های کلیدی: آبشویی خاک، نانو بیوپار، نانوسیلیس، هدایت الکتریکی

مقدمه

خاک های تحت تأثیر نمک در جهان سالانه بیش از ۱/۵ میلیون هکتار افزایش می یابند و نیمی از زمین های زراعی موجود تا اواسط قرن در معرض خطر شور شدن قرار دارند (Sharma and Singh, 2019). وجود چنین خاک هایی در سطح جهانی نیاز به مدیریت کارآمد، ارزان و سازگار با محیط زیست تأکید می کند.

بالین حال، بهبود و مدیریت خاک های تحت تأثیر نمک چالش برانگیز است (Choudhary and Kharche, 2018). استراتژی های مختلفی برای رفع این محدودیت ها، از جمله تکنیک های هیدرولیکی، شیمیایی و گیاه بالایی، اجرا شده است (Rezapour et al., 2022). شستشوی نمک آبیاری یک روش رایج بهبود هیدرولیکی است (Ranjbar and Jalali, 2015). بالین حال، استراتژی های شیمیایی در طول دو دهه گذشته برای کشاورزان در کشورهای در حال توسعه پرهزینه شده اند. هزینه های اصلاح کننده به دلیل افزایش استفاده توسط صنعت و کاهش یارانه دولتی به کشاورزان برای خرید آن ها افزایش یافته است (Kumar et al., 2022). احیای خاک های شور - سدیمی یکی از مشکلات اصلی بشر

اصلاح خاک های مشکل دار، به ویژه در خاک های شور یا شور - سدیمی، یک هدف بسیار مهم در سراسر جهان است. خاک های سدیمی و شور - سدیمی دارای خواص فیزیکی ضعیف و مشکلات حاصلخیزی هستند که بر رشد و عملکرد اکثر محصولات کشاورزی تأثیر منفی می گذارند (Osman, 2018). تخمین زده شده است که

- ۱- دانشجوی دکتری مهندسی آبخیزداری، گروه منابع طبیعی دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران
- ۲- استادیار، گروه مهندسی منابع طبیعی، دانشکده کشاورزی منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران
- ۳- استاد، گروه مهندسی منابع طبیعی، دانشکده کشاورزی منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران
- ۴- دانشیار، گروه علوم مهندسی آب، دانشکده کشاورزی منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران

(*) - نویسنده مسئول : Email: nvz.moradi@hormozgan.ac.ir

DOI: [10.22034/ijdi.2026.561979.2648](https://doi.org/10.22034/ijdi.2026.561979.2648)

در آینده است (Tejada et al., 2006) احیای خاک‌های شور از روش‌های مختلفی مانند اصلاح فیزیکی (شخم عمیق، زیرشکنی، شن‌پاشی، وارونگی پروفیل)، اصلاح شیمیایی (اصلاح خاک با معرف‌های مختلف: گچ، کلرید کلسیم، سنگ‌آهک، اسیدسولفوریک، گوگرد، سولفات آهن)، اصلاح الکتریکی (تیمار با جریان الکتریکی) استفاده می‌کند. مؤثرترین روش‌ها بر اساس حذف و تبادل سدیم محلول و تغییر ترکیب یونی خاک‌ها توسط مواد شیمیایی اضافه شده با شستشوی هم‌زمان نمک‌های سدیم از پروفیل خاک است (Leogrande & Vitti, 2019).

روش‌های اصلاح بیولوژیکی با استفاده از مواد آلی زنده یا مرده (محصولات زراعی، ساقه، کاه، کود سبز، کود باغی، کمپوست، لجن فاضلاب) دو اثر مفید اصلی بر احیای خاک‌های شور و قلیایی دارند: بهبود ساختار و نفوذپذیری خاک، در نتیجه افزایش آبشویی نمک، کاهش تبخیر سطحی و مهار تجمع نمک در لایه‌های سطحی؛ و آزادسازی دی‌اکسیدکربن در طول تنفس و تجزیه. برای خاک‌های شور یا سدیمی، افزودن ماده آلی (OM) می‌تواند آبشویی سدیم را تسریع کند، ESP و رسانایی الکتریکی (EC) را کاهش دهد و نفوذ آب، ظرفیت نگهداری آب و پایداری خاکدانه‌ها را افزایش دهد (Omokaro et al., 2024). این امر به‌ویژه برای خاک‌های کشاورزی که کمبود ماده آلی دارند بسیار مهم است (Omokaro et al., 2024). به نظر می‌رسد که با اصلاح خاک شور با یک ماده آلی پایدار شیمیایی که به‌عنوان منبع دائمی ماده آلی با درجه هوموس‌زایی بالا مؤثر است. چنین ماده‌ای با CEC بالا می‌تواند بخشی از نمک‌های محلول را جذب کند، pH را کاهش دهد و تجمع را افزایش دهد (Wang et al., 2024). کاهش pH به زیر ۸ می‌تواند باعث باردار شدن لبه مثبت کانی‌های رسی و جذب الکترواستاتیک ترکیبات آلی شود. جذب فیزیکی و اتصال کاتیون‌های چند ظرفیتی ترکیبات با وزن مولکولی بالا روی سطوح معدنی می‌تواند علاوه بر این، باعث تثبیت تجمعات تازه تشکیل شده شود. انتخاب عوامل احیا باید نه تنها تأثیر آن‌ها بر خود خاک، بلکه قیمت و خطرات زیست‌محیطی آنها را نیز در نظر بگیرد (Ashraf et al., 2014).

نانوفناوری به‌عنوان فناوری قدرتمند قادر است که سیستم غذایی و کشاورزی را متحول کند، و اهمیت زیادی بر کیفیت خاک در مناطق خشک و نیمه‌خشک دارد. برهم‌کنش نانومواد با اجزای خاک به‌شدت بر کیفیت خاک و رشد گیاه اثرگذار است (Haris et al., 2023). مطالعات نشان داده که بیشترین کاربردهای موردانتظار نانوفناوری برای اصلاح بخش‌های محیطی مانند آب‌وخاک شامل تصفیه فاضلاب، پاک‌سازی آب‌های زیر زمینی و اصلاح خاک‌های آلوده و شور، بوده است و بیشتر این کاربردها مبتنی بر نانوذرات فلزی مهندسی شده است (Bakhshi and Abhilash, 2020). استفاده از فناوری نانو همچنین با تحریک آنزیم‌های خاک، انتقال مواد مغذی و

حاصلخیزی خاک را بهبود بخشیده است. رشد گیاه و سلامت خاک هر دو می‌توانند با تعامل نانومواد با باکتری‌های ریزوسفری بهبود یابند. نانومواد دارای خواص سطحی منحصربه‌فردی هستند که فعالیت‌های بیولوژیکی قابل‌توجهی را امکان‌پذیر می‌کند که به طور بالقوه برای اصلاح ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی و بیولوژیکی خاک مفید هستند (Rajput et al., 2023). همچنین، استفاده از نانوتکنولوژی در اصلاح خاک با بهره‌گیری از نانومواد مانند نانوسیلیس، نانو بنتونیت و نانو بیوجار، به‌عنوان رویکردهای نوین، موردتوجه قرار گرفته است. این مواد با خواص سطحی ویژه، توانایی تعامل با ذرات خاک و بهبود خصوصیات هیدرولیکی و ساختاری خاک را دارند. در این زمینه مطالعات نشان داده که بنتونیت به‌عنوان یک رس طبیعی با ظرفیت تبادل کاتیونی بالا اصلاح‌کننده مؤثر بر خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک در نظر گرفته شده و منجر به حفاظت بهتر آب‌وخاک اراضی رسی شده (Bameri et al., 2022)؛ بنابراین پایداری خاک را افزایش می‌دهد. نانوسیلیس به دلیل اندازه ذرات بسیار کوچک و سطح ویژه بالا، قادر است ظرفیت نگهداری آب خاک، ظرفیت زراعی^۱ و ظرفیت آب قابل‌دسترس^۲ را افزایش داده درحالی‌که سبب کاهش نقطه پژمردگی دائم شده است. نانومواد مانند: هیدروژل‌ها و ژئولیت‌ها برای بهبود ظرفیت نگهداری آب در خاک (El-Aziz et al., 2025) و جذب آلاینده‌های زیست‌محیطی (Nassaj-Bokharaei et al., 2021)؛ بنابراین، هدف از این پژوهش مقایسه اثربخشی مواد نانو (نانوسیلیس، نانو بنتونیت، نانو بیوجار) و شکل معمولی آن‌ها (سیلیس، بنتونیت و بیوجار) در بهبود آبشویی سدیم از خاک شور است. همچنین، هدف دیگر این تحقیق، شناسایی ترکیب بهینه از این مواد برای حداکثرسازی بهبود خصوصیات خاک و کاهش اتلاف آب در شرایط شوری است. نتایج این مطالعه نه تنها به درک بهتر مکانیسم عمل نانومواد در محیط‌های شور کمک خواهد کرد، بلکه پایه‌ای برای استفاده از راهکارهای نوین و پایدار در مدیریت منابع خاک و آب در مناطق تحت‌تأثیر شوری فراهم خواهد کرد.

مواد و روش‌ها

محل اجرای پژوهش و نمونه‌برداری خاک

در این مطالعه، به‌منظور بررسی تأثیر برخی مواد اصلاح‌کننده معدنی و آلی (در مقیاس نانو و غیر نانو) بر خاک شور با بافت لومی، نمونه‌برداری از خاک از عمق ۵ تا ۳۰ سانتی‌متری در منطقه ی زراعی روستای حسنلنگی واقع در شرق شهرستان بندرعباس در سال ۱۴۰۲ انجام شد. پس از جمع‌آوری، نمونه‌ها به آزمایشگاه آب و خاک دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه هرمزگان انتقال و در

1- FC

2- AWC

مخصوص ظاهری به‌روش کلوخه‌ای (Grossman and Reinsch, 2002) اندازه‌گیری شد. و ویژگی‌های اولیه خاک مطابق جدول ۱ اندازه‌گیری شد.

شرایط محیطی هواخشک شدند و به‌منظور یکنواخت‌سازی و آماده سازی برای اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی با الک ۲ میلی‌متری غربال‌گری شد و پارامترهای هدایت الکتریکی، اسیدیت، سدیم، کلسیم و منیزیم خاک (Page and et al, 1982) و بافت خاک به روش هیدرومتری (Gee and Bauder, 1986) و جرم

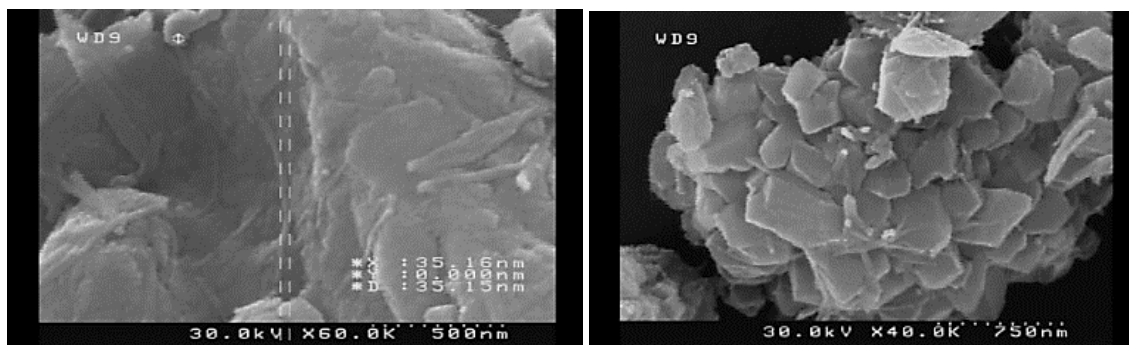
جدول ۱- نتایج تجزیه ویژگی‌های اولیه نمونه خاک مورد مطالعه

Texture	Silt (%)	Clay (%)	Sand (%)	CEC (meq/100g)	SAR	BD (g/cm ³)	pH	Ec (dS/m)
loam	۳۲	۱۶	۵۲	۱۰/۵۱	۲۲/۲۷	۱/۵۸	۷/۸۴	۲۲/۱

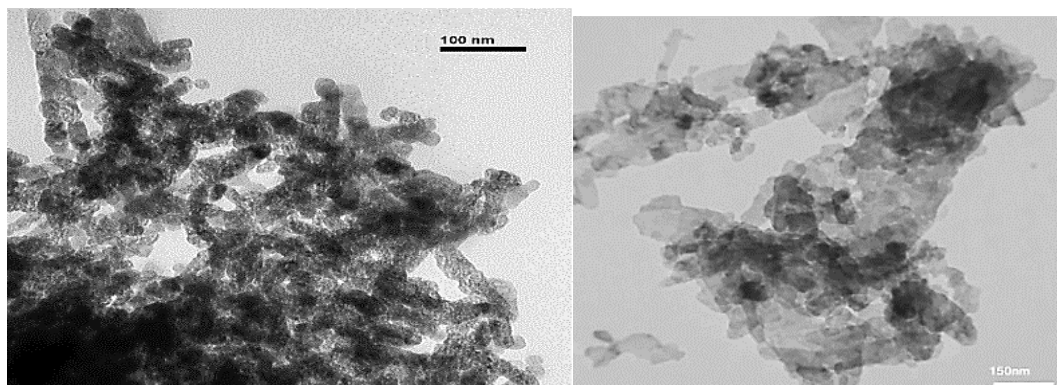
مقطر شست‌وشو داده شدند، دوباره در آون خشک شدند و در ظروف دربسته برای مراحل بعدی آزمایش نگهداری گردیدند که مشخصات آن در جدول آمده است. نانو بیوچار با اندازه متوسط 20 ± 60 نانومتر در آزمایشگاه شیمی دانشگاه اصفهان با استفاده از آسیاب گلوله‌ای و بر اساس روش (Amusat et al., 2021) تهیه شد (جدول ۲). علاوه بر بیوچار، از مواد معدنی شامل زئولیت کشاورزی و سیلیس (تأمین‌شده از شرکت پارس اور) و همچنین نانوذرات بنتونیت و سیلیکا با خلوص ۹۹٫۵٪ تهیه‌شده از شرکت پیشگامان نانومواد ایرانیان؛ محصول شرکت آمریکایی US Nano (US3437) نیز در این مطالعه استفاده گردید (شکل ۱ و شکل ۲) که مشخصات آن در (جدول ۳) بیان شده است.

تهیه مواد معدنی نانو و غیر نانو تیمارهای آزمایشی

برای تهیه بیوچار به‌عنوان منبعی از ماده آلی، از ضایعات پوست انار بر اساس روش (Kim et al., 2012; Moshtagh et al, 2022) استفاده شد. بدین منظور، پوست انار ابتدا شست‌وشو داده شد، سپس در آون در دمای ۸۰°C خشک گردید و پیش از فراوری، به‌صورت پودر یکنواختی با اندازه ذرات ۰٫۵ تا ۱ میلی‌متر آسیاب شد. برای تولید بیوچار، این پودر در شرایط پیرولیز بدون اکسیژن درون ظرف پیرکس ریخته شد، سطح آن با فویل آلومینیومی پوشانده شد و به مدت ۴ ساعت در کوره الکتریکی در دمای ۵۰۰°C قرار گرفت. نمونه‌های بیوچار حاصل برای حذف ناخالصی‌های سطحی چندین بار با آب



شکل ۱- تصاویر SEM از نانو بنتونیت



شکل ۲- تصاویر TEM از نانو سیلیکا

جدول ۲- برخی از ویژگی‌های شیمیایی زغال زیستی مورد استفاده در این پژوهش

ویژگی‌ها	پوست انار
ظرفیت تبادل کاتیونی	۶۲/۴۲ c.mol/kg
اسیدیته	۹/۸
سطح ویژه	۱۸/۱۲ m ² /g

جدول ۳- ویژگی‌ها کلی نانو ذرات بنتونیت و نانو سیلیکا

نانوذره	فرمول	اندازه ذرات (nm)	سطح ویژه (m ² g ⁻¹)	درجه خلوص %	چگالی حقیقی g/cm ³
نانو بنتونیت	H ₂ Al ₂ O ₅ Si	۲۰	۱۸۰-۶۰۰	۹۹/۵	۲/۴
نانوسیلیکا	SiO ₂	۲۰-۳۰		۹۹/۵	۲/۴

آماده‌سازی ستون‌ها

به‌منظور بررسی تأثیر مواد اصلاحی معدنی و آلی نانو و غیر نانو بر برخی ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی خاک شور مورد مطالعه بعد از نمونه‌برداری و یکنواخت نمودن خاک مورد مطالعه، نمونه‌های خاک بعد اعمال تیمار با غلظت ۴ گرم در لیتر سوسپانسیون ترکیبات بیوپار و نانو بیوپار، نانوبنتونیت و زئولیت و میکرو سیلیس و نانو سیلیس، نمونه‌ها به طور جداگانه در قالب طرح کاملاً تصادفی در ستونی‌هایی از جنس پلی انیلن با ارتفاع و قطر ۳۵ و ۱۰ سانتی‌متر در سه تکرار قرار داده شدند. به‌منظور تثبیت شرایط خاک، به مدت ۱۰۰ روز در شرایط خشک و تر شدن در محدوده ظرفیت زراعی و ۵۰ درصد آن در آزمایشگاه آب و خاک دانشگاه هرمزگان در دمای ۱۸ تا ۲۵ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند. بعد از گذشت دوره استراحت ۱۰۰ روزه به منظور تأثیر مواد اصلاحی بر پارامترهای قابل اندازه‌گیری مورد نظر نمونه‌برداری از تیمارهای مورد نظر به آهستگی و کمترین دست‌خوردگی در ستون در عمق سطحی تا محدوده ۱۰ سانتی‌متری انجام شد. سپس نمونه‌ها در معرض هوا آزاد قرار گرفتند و به صورت طبیعی خشک شدند. و پارامترهای هدایت الکتریکی، سدیم، پتاسیم، کلسیم خاک (Page and et al., 1982) و آهن با دستگاه جذب اتمی اندازه‌گیری شد.

آبشویی ستون‌ها

آبشویی ستون‌های خاک با اعمال یک‌بار آبی ثابت به ارتفاع ۵ سانتی‌متر در بالای ستون انجام شد. به‌منظور جلوگیری از تبخیر محلول‌های ورودی و خروجی، سطح ستون‌ها در طول آزمایش با پلاستیک مشکی پوشانده شد. فرآیند آبشویی به مدت ۲۴ ساعت ادامه یافت و نمونه‌های خروجی در حجم منفذی معادل ۰.۵، ۱، ۲ و ۴ (PV) جمع‌آوری گردید. نمونه‌ها پس از جمع‌آوری به‌سرعت در یخچال نگهداری شدند و سپس به آزمایشگاه تحلیل عناصر دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی انتقال یافتند. در این آزمایشگاه، غلظت

عناصر سدیم (Na)، کلسیم (Ca)، آهن (Fe) و پتاسیم (K) در زه‌آب‌ها با استفاده از دستگاه جذب اتمی ICP تعیین شد. هم‌زمان، برای ترسیم منحنی‌های آبشویی، هدایت الکتریکی (EC) زه‌آب‌های خروجی به‌صورت ساعتی با دستگاه EC سنج اندازه‌گیری گردید.

تجزیه و تحلیل اطلاعات

این پژوهش در قالب طرح بلوک‌های کاملاً تصادفی با دو نوع ماده معدنی نانو و غیر نانو، ماده آلی بیوپار و نانو بیوپار انجام شد. تجزیه آماری داده‌ها و با استفاده از نرم‌افزار SPSS انجام شد. واکاوی، مقایسه میانگین و همبستگی مقادیر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و هیدرولیکی خاک با استفاده از آزمون LSD در سطح ۱٪ مقایسه شدند.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس (جدول ۴) نشان داد که اثر تیمارها بر تمامی پارامترهای مورد بررسی Fe, Ca, K, Na و SAR در سطح احتمال ۱٪ معنی‌دار بود ($P < 0.01$)، درحالی‌که اثر بلوک‌ها تنها بر هدایت الکتریکی (EC) در سطح ۵٪ معنی‌دار شد ($P < 0.05$) و بر سایر عناصر معنی‌دار نبود.

قابلیت هدایت الکتریکی (EC) قبل از آبشویی

نتایج آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵٪ نشان داد که اعمال تیمارهای مختلف به طور معنی‌داری بر هدایت الکتریکی خاک (EC) تأثیر گذاشته است (شکل ۳). بیشترین مقدار EC مربوط به تیمار بیوپار پوست انار معادل ۲۳ (mS/cm) بود که از نظر آماری با سایر تیمارها اختلاف معنی‌دار داشت. این نتیجه نشان‌دهنده تجمع بالای یون‌های محلول در خاک تحت اثر این تیمار است. در مقابل، کمترین مقدار EC مربوط به تیمار نانوسیلیکا حدود ۱۳/۸۱ mS/cm

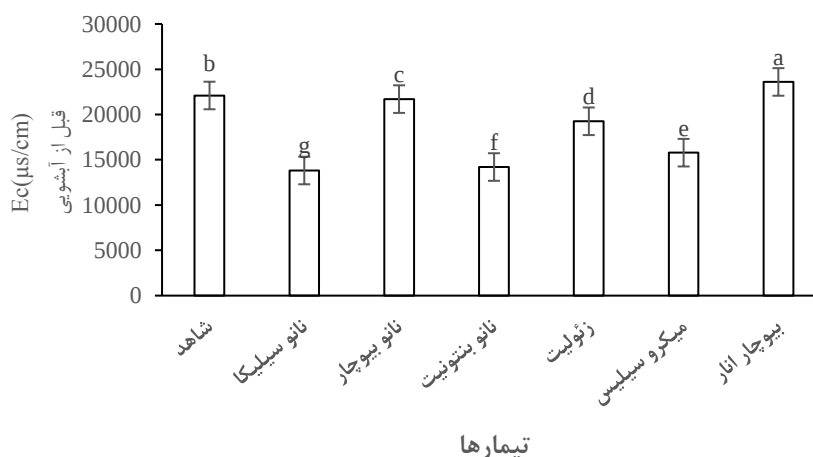
بیوچارهای قلیایی افزایش غلظت املاح محلول (مانند یون‌های کلسیم و منیزیم) و جایگزینی برخی از این یون‌ها با سدیم تبادل‌پذیر خاک موجب افزایش هدایت الکتریکی و نسبت جذب سدیم خاک شده است (رضاپور و همکاران ۱۴۰۰) که با نتایج این تحقیق مطابقت دارد. لازم به ذکر است واحد بیان شده هدایت الکتریکی که در شکل ۳ بر حسب $\mu\text{S}/\text{cm}$ بیان شده صرفاً همخوانی با هدایت الکتریکی زهاب که در شکل ۹ بیان شده است.

بود و در مرحله بعدی نانو بنتونیت بود. به‌طور کلی، نتایج حاکی از آن است که افزایش بیوچار آثار سبب افزایش هدایت الکتریکی و نانوسیلیکا سبب کاهش هدایت الکتریکی خاک شده‌اند. این یافته‌ها می‌توانند در مدیریت شوری خاک و انتخاب مواد اصلاح‌کننده مناسب برای شرایط خاص کشاورزی مورد استفاده قرار گیرند. اصلاح‌کننده‌های آلی مانند بیوچار می‌تواند به دلیل داشتن عناصر مختلف و همچنین سطح ویژه بالا تأثیر مثبتی بر کاهش هدایت الکتریکی خاک داشته باشد (ثقفی و همکاران، ۱۴۰۰) اما در برخی از

جدول ۴- تجزیه واریانس قابلیت هدایت الکتریکی و میزان عناصر قبل آیشویی

منابع تغییر	درجه آزادی	EC	SAR	Na	K	Ca	Fe
بلوک	۲	۱۳۳/۸۹*	۰/۱۴۴ ^{ns}	۳۲/۴۸ ^{ns}	۲۲/۲۶ ^{ns}	۰/۵ ^{ns}	۱۲۳۴ ^{ns}
تیمار	۸	۳۸/۴۹۵**	۵۸/۰۴۹**	۳۸۴/۳۳**	۱۵۴/۶۲**	۹۳/۵۷۶**	۴**
خطا	۱۶	۳۶/۹۰	۰/۱۸۰	۱۰/۳۱	۶/۴۷	۴/۷۳	۱۳
ضریب تغییرات		۱/۰۴	۲/۱۶	۲/۹	۰/۲۵	۰/۰۴	۰/۰۸

معدنار بودن در سطح ۱٪ * معدنار بودن در سطح ۵٪ ** معدنار نبودن ns



شکل ۳- نمودار تأثیر کاربرد مواد معدنی و آلی بر هدایت الکتریکی (EC) خاک

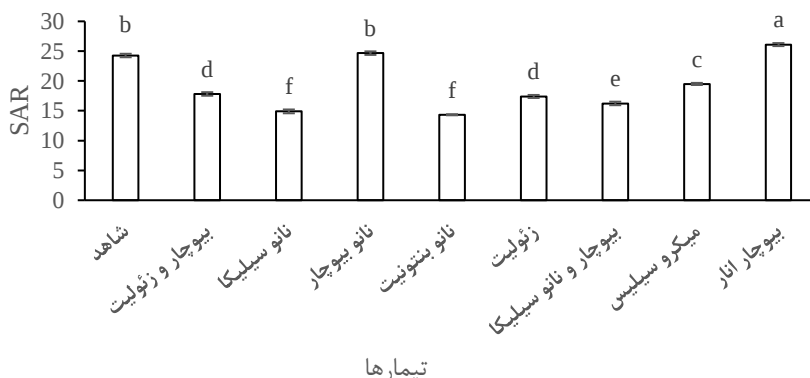
افزودن ماده اصلاحی به خاک سبب کاهش مقدار جذب سدیم شده است. افزودن بیوچار می‌تواند نسبت جذب سدیم را کاهش داده و ویژگی‌های فیزیکی خاک را تحت تأثیر قرار دهد. اما افزایش مقدار شوری خاک در نتیجه افزایش غلظت سدیم و کلسیم در تیمار بیوچار افزایش داشته و در تیمار نانو بیوچار این افزایش با مقدار اندازه‌گیری شده در تیمار شاهد تفاوت معناداری نداشته است. در پژوهش فولادی درهانی و همکاران (۲۰۲۰) با بررسی تأثیر چند بیوچار مختلف نشان داده شد که برخی بیوچارها قادرند با جذب بخشی از سدیم و آزادسازی کلسیم و منیزیم محلول مقدار درصد جذب سدیم

نسبت جذب سدیمی (SAR) قبل از آیشویی

تجزیه واریانس نشان داد که اثر تیمار بر نسبت جذب سدیمی در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۴). مطابق (شکل ۴) بیشترین نسبت جذب سدیمی در تیمار بیوچار انار با میزان ۲۶/۱۰ بدست آمد و کمترین میزان نسبت جذب سدیمی در تیمار نانوبنتونیت با میزان ۱۴/۳۳ و تیمار نانوسیلیکا با میزان ۱۴/۹۰ بدست آمد که از نظر آماری تفاوت معنی‌داری با هم نداشتند. براساس نتایج تیمار نانو بنتونیت سبب کمتر شدن نسبت جذب سدیمی در خاک گردید. نتایج نشان داد در تمام تیمارها به جز تیمار بیوچار و نانو بیوچار،

مقدار همه کاتیون‌ها به‌جز پتاسیم کاهش یافت و نسبت جذب سدیم کاهش یافت که می‌تواند در نتیجه تمایل بیوجار برای جذب این کاتیون‌ها باشد (She et al., 2018).

محلول را در آب آبیاری کاهش دهند که مطابق با نتایج به‌دست‌آمده در این پژوهش است (Fouladidorhani et al 2020). در پژوهشی دیگر نیز نشان داده شد که با کاربرد بیوجار تولید شده از بقایای گندم



شکل ۴- نمودار تاثیر کاربرد مواد معدنی و آلی بر نسبت جذب سدیمی (SAR)

می‌دهد که افزودن نانو بنتونیت، زئولیت و نانوسیلیکا به خاک، سبب کاهش قابل توجه سدیم در مقایسه با تیمارهای آلی و شاهد شده است. این یافته‌ها بیانگر آن است که مواد معدنی با ساختار لایه‌ای و ظرفیت تبادل کاتیونی بالا (مانند نانو بنتونیت و زئولیت) قادرند یون‌های سدیم را از محلول خاک جذب یا تثبیت کنند، درحالی‌که مواد آلی مانند بیوجار به‌ویژه اگر منشأ پسماندی یا با خلوص کمتری داشته باشند ممکن است حاوی سدیم قابل تبادل بوده یا شرایطی ایجاد کنند که تحرک سدیم را در خاک افزایش دهد. استفاده از مواد اصلاحی معدنی باعث کاهش چشمگیر مقدار نسبت جذب سدیم شد که دلیل آن آزاد شدن نسبی کلسیم از آهک موجود در خاک و جایگزینی آن با سدیم تبادلی است (تیرانداز و همکاران، ۱۳۹۷).

حضور نانوذرات به دلیل داشتن سطح ویژه بالا و افزایش فرایند تبادل کاتیونی و آنیونی در خاک ارتباط مستقیمی با یکدیگر دارند (Mabagala, 2022). با توجه به ترکیب شیمیایی نانوسیلیکا که در ساختار خود تعداد زیادی از گروه‌های عاملی در شرایط مختلف اسیدیته دارد در خاک‌هایی با pH قلیایی، نانوسیلیکا می‌تواند با جذب سطحی یون سدیم (Na^+) به دلیل بار منفی سطح خود، به طور مؤثری به کاهش نسبت جذب سدیم (SAR) خاک کمک کند و از این طریق کیفیت خاک را بهبود بخشد؛ بنابراین در این پژوهش می‌توان بیان کرد که کاربرد نانوسیلیکا باعث خارج شدن سدیم از فاز تبادلی نسبت به سایر کاتیون‌ها و در نتیجه، کاهش نسبت جذب سدیم منجر شد (Mabagala, 2022).

تأثیر مواد اصلاحی بر مقدار سدیم خاک قبل از آیشویی

نتایج آزمون مقایسه میانگین چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵٪ نشان داد که تیمارهای مورد بررسی تأثیر معنی‌داری بر مقدار سدیم خاک نداشته‌اند (شکل ۵). بیشترین مقدار سدیم خاک با ۴۹۰۳ (mg/kg) در تیمار بیوجار انار مشاهده شد که به طور معنی‌داری بالاتر از سایر تیمارها بود که از نظر آماری تفاوت معنی‌داری با سایر تیمارها نشان داده و در مرحله بعدی شاهد و نانوبیوجار قرار گرفتند. که با یکدیگر

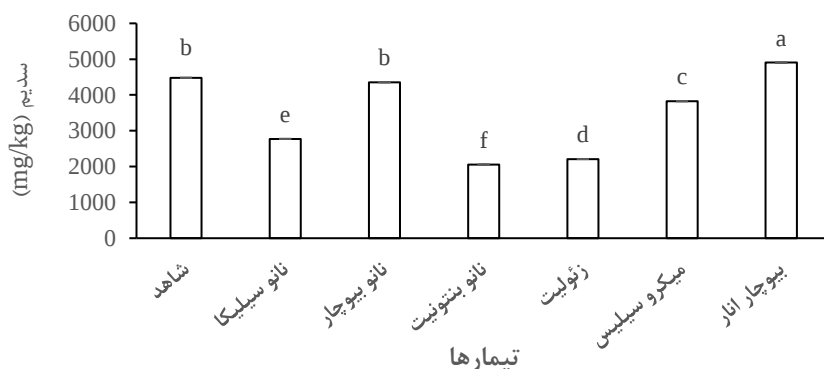
تفاوت آماری معنی‌داری نداشتند، اما هر دو به طور معنی‌داری بیشتر از تیمارهای نانوسیلیکا، زئولیت و نانو بنتونیت بودند و کمترین مقدار مربوط به نانو بنتونیت با ۲۰۵۴ (mg/kg) به دست آمد و در مرحله بعدی زئولیت و نانوسیلیکا بودند. این گروه‌بندی‌ها نشان

تأثیر مواد اصلاحی بر مقدار پتاسیم خاک قبل از آیشویی

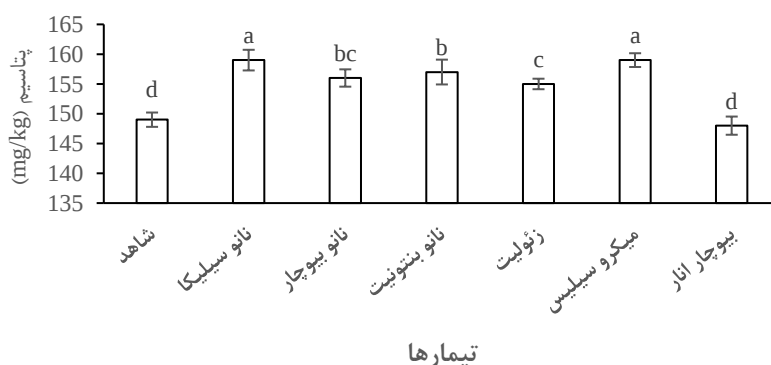
نتایج حاصل از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در (شکل ۶)، تفاوت معنی‌دار میانگین مقدار پتاسیم قابل استفاده در خاک تحت تأثیر کاربرد انواع تیمارهای مواد معدنی و آلی را به وضوح نشان می‌دهد. بر اساس این نتایج، تیمار نانو سیلیکا و میکرو سیلیس با میانگین‌های ۱۵۹/۷ و ۱۵۹/۲ میلی گرم در کیلوگرم خاک به ترتیب، بیشترین میزان پتاسیم را در خاک ایجاد کردند که تفاوت معنی‌داری با سایر تیمارها نشان داده است. این نتیجه نشان‌دهنده تأثیر مثبت و قابل توجه این مواد نانو و میکرو در افزایش دسترسی پتاسیم در خاک است، که احتمالاً ناشی از بهبود ساختار خاک، افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) یا کاهش تثبیت پتاسیم در ذرات خاک است. کمترین میزان غلظت پتاسیم در تیمار بیوجار انار با میزان ۱۴۸٫۹

اصلاح خاکهای شور و سدیمی دارد (رضاپور و همکاران، ۱۴۰۰). اعمال سیلیکون و نانو دی اکسید سیلیکون موجب افزایش میزان پتاسیم و نسبت می شود. به ویژه نانو ذره دی اکسید سیلیکون، توانایی کاهش سمیت حاصل از تنش شوری را دارد (عاصمه و همکاران، ۱۴۰۱)

(mg/kg) بدست آمد و همچنین بعد از آن کمترین میزان غلظت پتاسیم در تیمار شاهد با میزان ۱۴۹,۲ (mg/kg) بدست آمد که از نظر آماری تفاوت معنی داری با هم نداشتند. کاربرد تیمارهای آلی مانند بیوپار و معدنی باعث افزایش مقادیر پتاسیم تبادلی خاک می شود در نتیجه استفاده از تیمارهای آلی و معدنی کارایی بیشتری برای



شکل ۵- نمودار تأثیر کاربرد مواد معدنی و آلی بر میزان سدیم خاک



شکل ۶- نمودار تأثیر کاربرد مواد معدنی و آلی بر میزان پتاسیم خاک

تفاوت معنی داری در غلظت آهن بین تیمارهای مختلف مواد اصلاحی را نشان داد (شکل ۸). بر اساس این آزمون، تیمار حاوی میکرو سیلیس با میانگین غلظت ۱۳/۵ میلی گرم بر کیلوگرم خاک، بالاترین مقدار آهن قابل جذب را نسبت به سایر تیمارها نشان داد این مقدار به طور معنی داری بالاتر از تیمار شاهد و سایر مواد اصلاحی بود. این یافته نشان می دهد که میکرو سیلیس به عنوان یک ماده اصلاحی، توانایی برجسته ای در افزایش دسترسی آهن برای گیاهان دارد. و تیمار نانوبنتونیت در مرتبه دوم مقدار آهن مشاهده شده است. در مقابل، در تیمار زئولیت کمترین غلظت آهن قابل جذب را با میانگین ۱۲/۵ (mg/kg) مشاهده شده است که به طور معنی داری کمتر از تمامی تیمارهای دیگر بود. این کاهش ممکن است ناشی از تثبیت شدید آهن در ساختار بلوری زئولیت باشد که باعث کاهش آزادسازی

تأثیر مواد اصلاحی بر مقدار کلسیم خاک قبل از آبیاری

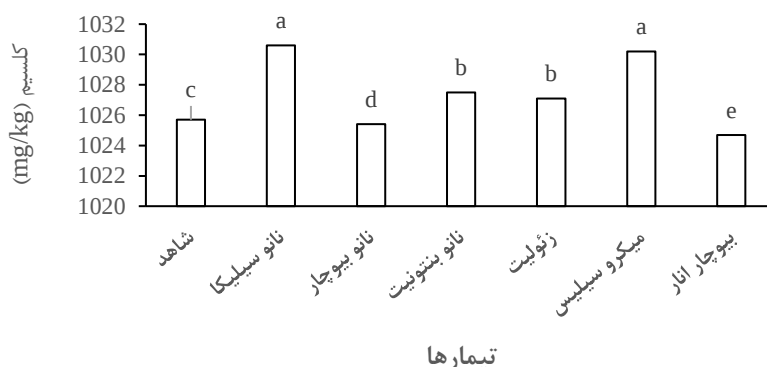
نتایج نشان داد که کاربرد انواع اصلاح کننده های آلی و معدنی تأثیر معنی داری بر غلظت کلسیم قابل دسترس خاک داشته است (شکل ۷). بیشترین مقدار کلسیم در تیمارهای نانوسیلیس و میکرو سیلیسی مشاهده شد که از نظر آماری با یکدیگر تفاوت معنی داری نداشتند در مقابل، تیمار بیوپار و شاهد و کمترین میزان غلظت کلسیم نشان داده است این یافته ها حاکی از آن است که نانوسیلیس و میکرو سیلیس در مقایسه با سایر اصلاح کننده ها، به ویژه بیوپار، توانایی بالاتری در افزایش کلسیم در خاک مورد مطالعه دارند.

تأثیر مواد اصلاحی بر مقدار آهن خاک قبل از آبیاری

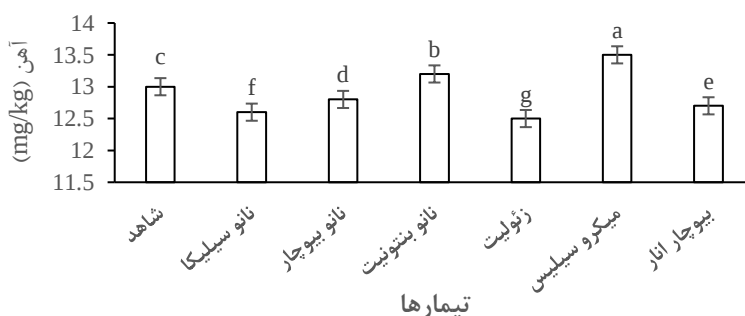
نتایج حاصل از آزمون چند دامنه ای دانکن در سطح احتمال ۰/۵،

به ارتقای زیست‌دسترسی این عنصر ضروری برای گیاهان شود. در حالی که موادی مانند زئولیت، با وجود خواص جاذبی خوب، ممکن است به دلیل اتصال شدید آهن به ساختار بلوری خود، باعث کاهش دسترسی آن شوند.

آن در محیط خاک می‌شود. به نظر می‌رسد به طور کلی این یافته‌ها حاکی از آن است که کاربرد مواد اصلاحی، به‌ویژه میکرو سیلیس و نانو بنتونیت، می‌تواند از طریق بهبود خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک، افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی و کاهش ثابت شدن آهن، منجر



شکل ۷- نمودار تاثیر کاربرد مواد معدنی و آلی بر میزان کلسیم خاک



شکل ۸- نمودار تاثیر کاربرد مواد معدنی و آلی بر میزان آهن خاک

زهاب خروجی مربوط به نانو بنتونیت با مقدار $1283 \mu\text{S/m}$ و نانو سیلیکا به میزان $1300 \mu\text{S/m}$ بود در حالی که بالاترین سطح EC مربوط به بیوجار انار با مقدار $1720 \mu\text{S/m}$ می‌باشد. لازم به ذکر است که در تیمارهای حاوی مواد آلی (مانند بیوجار انار و نانو بیوجار)، حتی در PV های بالاتر، EC نسبت به تیمارهای حاوی مواد معدنی (مانند سیلیس و نانو سیلیکا) بالاتر باقی ماند، که ممکن است ناشی از ظرفیت تبادل یونی بالاتر و یا آزادسازی موقت املاح از سطح مواد آلی باشد. در مقابل، تیمارهای حاوی مواد معدنی مانند نانو سیلیکا و نانو بنتونیت، کمترین مقادیر EC را در تمامی حجم‌های شست‌شو نشان دادند، که نشان‌دهنده کارایی بالاتر آن‌ها در جذب یا ثابت‌سازی املاح است این الگو نشان می‌دهد که انتخاب نوع ماده اصلاح‌کننده و حجم آب شست‌شو، عوامل کلیدی در مدیریت شوری خاک هستند و باید بر اساس شرایط خاک و هدف اصلاحی انتخاب

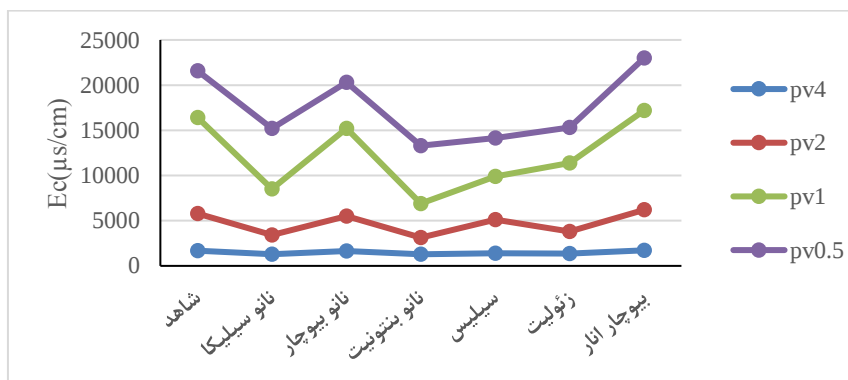
آبشویی ستون‌ها

مقدار هدایت الکتریکی تحت شرایط حجم‌های مختلف آبشویی

نتایج (شکل ۹) نشان می‌دهد که مقدار حجم آب منفذی (PV) نقش تعیین‌کننده‌ای در کاهش هدایت الکتریکی (EC) عصاره اشباع خاک دارد. در تمامی تیمارها، با افزایش حجم آب منفذی از PV0.5 تا PV4، هدایت الکتریکی به‌طور قابل‌توجهی کاهش یافت، که نشان‌دهنده مؤثر بودن فرآیند شست‌وشو در کاهش املاح محلول است. در حجم‌های پایین شست‌شو (PV0.5)، EC بالاترین مقدار را در تمامی تیمارها نشان داد، به‌ویژه در تیمارهای بیوجار، نانو بیوجار و شاهد شامل نانو بیوجار و سیلیس که EC در محدوده $20,000 - 23,000 \mu\text{S/cm}$ ثبت شد. با افزایش PV به ۱ و ۲، EC به‌طور چشمگیری کاهش یافت و در PV4، مقادیر EC در تمامی تیمارها به زیر $2000 \mu\text{S/cm}$ رسیدند. به طوری که کمترین میزان EC در

معدنی در اصلاح خاک شور است (تیرانداز و همکاران، ۱۳۹۷).

شوند. مقدار هدایت الکتریکی پس از آبیویی در حالت استفاده از تیمار های معدنی به زیر حد بحرانی رسیده. که نشان دهنده کارآمدی مواد

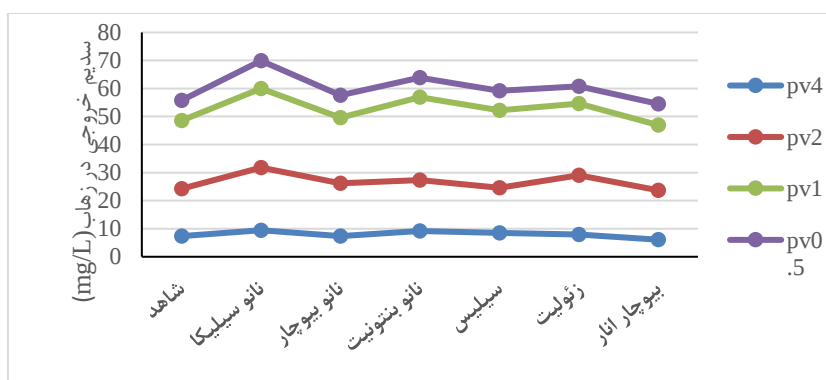


شکل ۹- نمودار تأثیر کاربرد مواد معدنی و آلی بر EC زهاب خروجی

حجم آب عبوری (تا ۴ برابر حجم منفذی)، غلظت سدیم در زهاب کاهش یافته که حاکی از شستشوی پیشرفته تر یون های سدیم از منافذ ریزتر و کاهش تدریجی غلظت آن در محلول خاک است. همچنین، تیمارهای حاوی نانوبیوجار و زئولیت در مقایسه با سایر مواد، به دلیل سطح ویژه بالا و ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) مناسب، منجر به کاهش نسبی غلظت سدیم در زهاب در تمامی حجم های منفذی شده اند. در مجموع، در تمام سطوح حجم منفذی، بیوجار انار کمترین و نانوسیلیکا بیشترین غلظت سدیم را در زهاب خروجی ایجاد کردند این یافته ها تأکید می کنند که هم نوع ماده اصلاح کننده و هم حجم آب عبوری (نسبت به حجم منفذی خاک) از عوامل کلیدی در کنترل دینامیک سدیم در فرآیند آبیویی خاک هستند.

غلظت سدیم آبیویی شده تحت شرایط حجم های مختلف آبیویی

(شکل ۱۰) تغییرات غلظت سدیم (mg/L) در زهاب خروجی را تحت کاربرد انواع مواد اصلاح کننده خاک شامل بیوجار، نانوبیوجار، زئولیت، سیلیس، نانوسیلیکا و نانوبنتونیت در حجم های منفذی مختلف (۵، ۱، ۲ و ۴ برابر حجم منفذی خاک) نشان می دهد. نتایج بیانگر آن است که در حجم های منفذی پایین به ویژه PV0.5، غلظت سدیم در زهاب خروجی به طور قابل توجهی بالاتر است که نشان دهنده خروج سریع یون های سدیم از منافذ بزرگ خاک در مراحل اولیه آبیویی است در PV0.5، کمترین غلظت سدیم در زهاب خروجی مربوط به تیمار بیوجار انار با مقدار ۵۴٫۳ mg/L بود، در حالی که بیشترین غلظت سدیم در تیمار نانوسیلیکا مشاهده شد. با افزایش



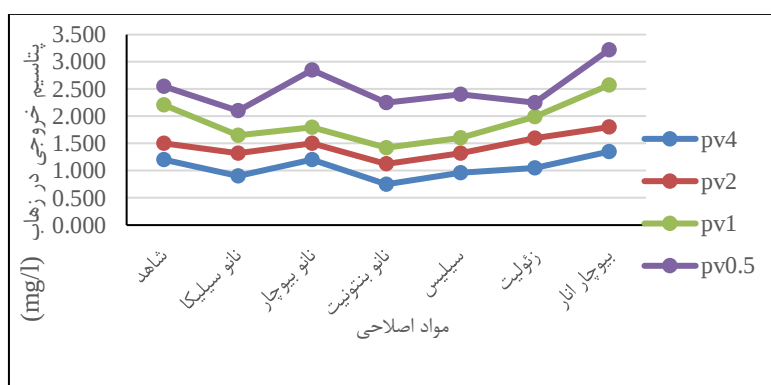
شکل ۱۰- نمودار تأثیر کاربرد مواد معدنی و آلی بر میزان سدیم زهاب خروجی

خروجی در زهاب تحت تأثیر نوع ماده اصلاح کننده و حجم منافذ رطوبتی (PV) قرار دارد. در شرایط PV0.5، بالاترین غلظت پتاسیم در زهاب مربوط به تیمار بیوجار انار با مقدار ۲۲٫۳ mg/L بود، در

غلظت پتاسیم آبیویی شده تحت شرایط حجم های مختلف آبیویی

همان طور که در (شکل ۱۱) مشاهده می شود، میزان پتاسیم

را در شرایط مختلف رطوبتی به‌طور موثری در خاک نگه دارد و از شستشوی آن جلوگیری کند، در حالی که بیوپچار انار با ساختار متخلخل و محتوای بالای مواد آلی، ممکن است به‌دلیل آزادسازی پتاسیم ذخیره‌شده یا کاهش ظرفیت جذب، موجب افزایش خروجی این یون در زهاب شود به‌ویژه در شرایط رطوبتی بالاتر شود. این الگو نشان‌دهنده نقش مواد کاربردی در تنظیم رفتار رهاسازی و آبشویی عناصر غذایی در خاک است؛ به‌طوری که موادی مانند بیوپچار و نانو ذرات می‌توانند با تغییر در ساختار منفذی، ظرفیت تبادل یونی یا فعالیت سطحی خاک، بر میزان حرکت و آبشویی پتاسیم تأثیرگذار باشند. در نهایت، این یافته‌ها اهمیت انتخاب صحیح نوع و مقدار ماده کاربردی را در مدیریت کودهای پتاسیمی و جلوگیری از اتلاف آن از طریق زهاب خروجی برجسته می‌سازد.



شکل ۱۱- نمودار تاثیر کاربرد مواد معدنی و آلی بر مقدار پتاسیم زهاب خروجی

کلسیم خروجی در تمام تیمارها مشاهده می‌شود. این روند می‌تواند ناشی از افزایش زمان تماس آب با مواد اصلاحی و در نتیجه تقویت مکانیسم‌های جذب سطحی، تبادل یونی یا رسوبدهی کلسیم باشد. با این حال، نانو سیلیکا حتی در حجم‌های کم $pv1$ و $pv0.5$ نیز عملکرد برجسته‌ای در کاهش شستشوی کلسیم از خود نشان داده است این یافته‌ها بر این موضوع تأکید دارد که نانو سیلیکا نه تنها در کاهش تلفات عناصر مغذی مانند کلسیم در شرایط آبیاری با حجم‌های بالا کارایی دارد، بلکه می‌تواند به‌عنوان یک ماده اصلاحی مؤثر در مدیریت خاک‌های مستعد شستشو به کار گرفته شود.

غلظت آهن آبشویی شده تحت شرایط حجم‌های مختلف آبشویی

نتایج به‌دست‌آمده از فرایند آبشویی نشان داد که میزان آبشویی آهن تحت تأثیر نوع ماده اضافه‌شده و حجم آبشویی قرار دارد. در تمامی تیمارها، بالاترین غلظت آهن در حجم کمتر آبشویی ($PV=0.5$) مشاهده شد که نشان‌دهنده رهاسازی سریع آهن از

حالی که کمترین میزان پتاسیم مربوط به نانو بنتونیت با $2/25$ mg/L ثبت شد. با افزایش حجم منافذ رطوبتی به $PV1$ ، میزان پتاسیم خروجی در تمام تیمارها افزایش یافت؛ به‌طوری که بیوپچار انار با $5/2$ mg/L بیشترین و نانو بنتونیت با $1/4$ mg/L کمترین غلظت پتاسیم را در زهاب نشان داد. این روند نشان‌دهنده نقش مؤثر رطوبت در تسهیل حرکت یون‌های محلول، به‌ویژه پتاسیم، در محیط خاک است. در $PV2$ ، نانو بنتونیت با $1/12$ mg/L کمترین غلظت پتاسیم را در زهاب داشت، در حالی که بیوپچار انار همچنان با مقادیر بالاتر (حدود $3/5$ mg/L) در بالاترین سطح قرار گرفت. در $PV4$ ، که نشان‌دهنده شرایط اشباع شدیدتر است، بیوپچار انار با $1/3$ mg/L بیشترین غلظت پتاسیم را در زهاب خروجی نشان داد، در حالی که نانو بنتونیت با $0/75$ mg/L کمترین میزان پتاسیم را ثبت کرد. این الگو نشان می‌دهد که نانو بنتونیت به‌عنوان یک ماده با ظرفیت جذب بالا، قادر است پتاسیم

غلظت کلسیم آبشویی شده تحت شرایط حجم‌های مختلف

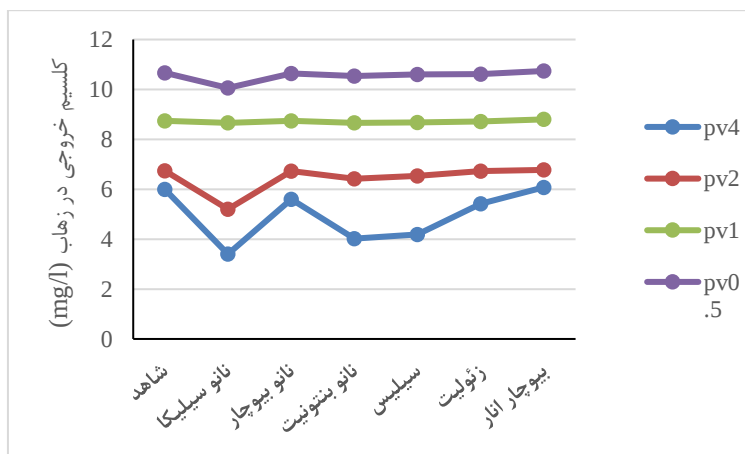
آبشویی

بررسی نتایج نشان می‌دهد که میزان کلسیم خروجی تحت تأثیر نوع ماده اصلاحی و حجم منفذی رطوبتی به‌کاررفته قرار گرفته است (شکل ۱۲). در تمامی سطوح حجم منفذی، تیمار نانو سیلیکا کمترین میزان کلسیم خروجی را از خود نشان داده است؛ به‌طوری که در حجم منفذی $pv4$ ، مقدار کلسیم خروجی در این تیمار به حدود $3/4$ mg/L رسیده است که پایین‌تر از تمامی سایر تیمارهاست. این یافته نشان‌دهنده کارایی بالای نانو سیلیکا در کاهش آبشویی کلسیم از ستون خاک می‌باشد. در مقابل، تیمار شاهد (بدون اصلاح‌کننده) در تمامی حجم‌های منفذی بیشترین میزان کلسیم خروجی را ثبت کرده است که نشان از نبود مکانیسم مؤثر برای نگهداری کلسیم در خاک و در نتیجه شست‌وشوی گسترده آن دارد. سایر تیمارها از جمله نانو بنتونیت، زئولیت، بیوپچار انار و نانو بیوپچار نیز در مقایسه با شاهد، عملکرد بهتری در کاهش غلظت کلسیم زهاب داشته‌اند، همچنین، با افزایش حجم منفذی رطوبتی از $pv0.5$ به $pv4$ ، روند کلی کاهش

بیشترین غلظت آهن را در تمامی حجم های آبخویی نسبت به سایر تیمارها داشتند، این دو تیمار هم کمترین میزان غلظت آهن در خاک را داشتند و هم بیشترین رهاسازی آهن را داشتند می تواند ناشی از ساختار قلیایی و PH بالای این دو تیمار باشد.

سطوح جذبی خاک یا مواد اضافه شده در ابتدای فرایند آبخویی است. با افزایش حجم آبخویی به $PV=1$ و $PV=2$ ، غلظت آهن به طور کلی کاهش یافت

میزان آبخویی آهن تحت تأثیر نوع ماده اضافه شده و حجم آبخویی قرار دارد. مقایسه بین مواد نشان داد که بیوچار و زئولیت

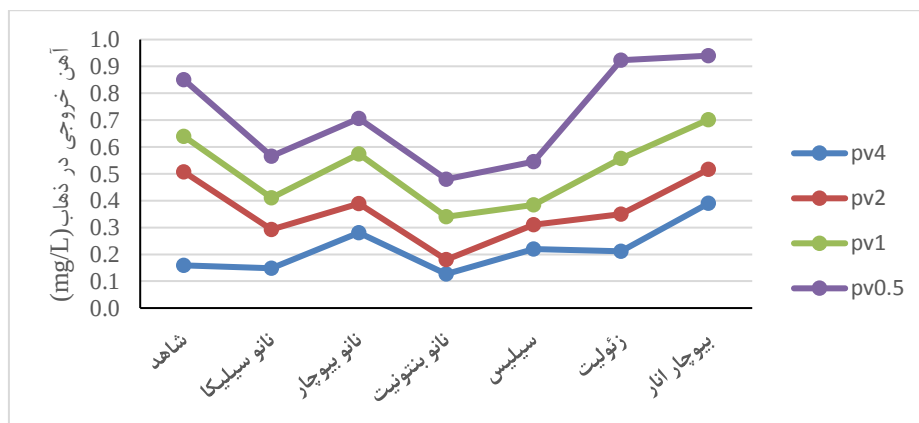


شکل ۱۲- نمودار تأثیر کاربرد مواد معدنی و آلی بر مقدار کلسیم زهاب خروجی

در مقابل، نانوسیلیکا و نانو بنتونیت کمترین مقدار آهن را در طول فرایند آبخویی آزاد کردند که نشان دهنده ثبات بیشتر آهن در ساختار این مواد یا اثرات عامل های جذبی قوی تر آنها است. این رفتارها بیانگر نقش مهم مواد اصلاح کننده خاک در تنظیم رفتار انتقال و رهاسازی عناصر غذایی مانند آهن در محیط های خاکی است و نشان می دهد که انتخاب مواد مناسب می تواند به مدیریت کارآمدتر کیفیت آب زیرزمینی و جلوگیری از آلودگی آن کمک کند.

میزان آهن خروجی در زهاب نشان داد (شکل ۱۳) در $PV0.5$ ، کمترین میزان آهن در زهاب خروجی مربوط به نانو بنتونیت با مقدار

۰/۴۸ (mg/L) بود در حالی که بالاترین سطح آهن در زهاب خروجی مربوط به بیوچار انار به مقدار ۰/۹۴ (mg/L) بود. در $PV1$ ، کمترین میزان آهن مربوط به نانو بنتونیت با مقدار ۰/۳۴ (mg/L) بود. در حالی که بالاترین سطح آهن در زهاب خروجی مربوط به بیوچار انار با مقدار ۰/۷ (mg/L) بود. در ادامه روند خروجی زهاب در $PV2$ ، کمترین میزان آهن در زهاب خروجی مربوط به نانو بنتونیت با مقدار ۰/۱۸ (mg/L) بود و در $PV4$ کمترین سطح آهن مربوط به نانو بنتونیت با مقدار ۰/۱۳ (mg/L) بود و بالاترین میزان آهن در زهاب خروجی مربوط به بیوچار انار با مقدار ۰/۳۹ (mg/L) بود.



شکل ۱۳- نمودار تأثیر کاربرد مواد معدنی و آلی بر مقدار آهن زهاب خروجی

نتیجه گیری

فرایند آبشویی، به عنوان یکی از مؤثرترین راهبردهای اصلاح خاک‌های شور و سدیمی، تنها زمانی کارایی پایدار دارد که تحرک یون‌های نامطلوب به‌ویژه Na^+ و عناصر معدنی ثانویه مانند آهن، کلسیم و پتاسیم تحت کنترل خواص فیزیکوشیمیایی خاک قرار گیرد (Qadir et al., 2007). یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که انتخاب ماده اصلاح‌کننده نه تنها در کاهش شوری و سدیم خاک مؤثر است، بلکه نقش تعیین‌کننده‌ای در دینامیک آبشویی عناصر فلزی دارد. بر اساس بررسی کولایان و همکاران (۱۳۹۷) نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که مواد اصلاح‌کننده خاک همراه با آبشویی خاک تأثیر معناداری در تغییرات درصد سدیم تبادلی، نسبت جذب سدیم و قابلیت هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک داشت و مصرف آنها مقدار درصد سدیم تبادلی و نسبت جذب سدیم را به ترتیب به زیر ۶۰ درصد و ۴۵ درصد کاهش داده است. نتایج پژوهش نوری و همکاران (۱۳۹۹) نیز نشان داده که در میان تیمارهای شیمیایی بیشترین افزایش سدیم را تیمار مخلوط گچ و بقایای آلی به همراه داشته و نسبت جذب سدیم را از ۲۲/۶ در تیمار شاهد به ۳۵/۶ افزایش داد که با نتایج این تحقیق همخوانی داشته است.

در این مطالعه، نانو بنتونیت و نانوسیلیکا ضمن کاهش مؤثر هدایت الکتریکی (EC) و سدیم، توانستند غلظت آهن خروجی را در تمامی حجم‌های منفذی $PV=0.5$ تا ۴ به‌طور چشمگیری کاهش دهند. کمترین میزان آهن خروجی در تمام مراحل آبشویی متعلق به تیمار نانوبنتونیت بود (از mg/L ۰,۴۸ در $PV=0.5$ به mg/L ۰,۱۳ در $PV=4$)، که گواهی بر توانایی بالای آن در نگهداری فلزات در پروفیل خاک است. این عملکرد نشان می‌دهد که نانوذرات معدنی از طریق ایجاد سطوح جذب فعال و فراهم‌سازی شرایط مناسب برای رسوب هیدروکسیدهای فلزی، نقش مؤثری در کاهش تحرک آهن و سایر فلزات در خاک ایفا کرده‌اند. این فرایندها با افزایش ظرفیت جذب سطحی و تشکیل ترکیبات پایدار، از انتقال این عناصر به منابع آب زیرزمینی جلوگیری کرده‌اند. از سوی دیگر، کاربرد ژئولیت با بهبود ویژگی‌های فیزیکی خاک مانند کاهش چگالی ظاهری و افزایش تخلخل، ضمن افزایش دسترسی آب و رطوبت، محیطی مناسب برای جذب سطحی و رسوب‌گذاری یون‌های فلزی فراهم ساخته که به‌طور غیرمستقیم از آبشویی عناصر جلوگیری می‌کند (Hassan & Radi, 2018). نقل‌شده از (Louhar et al., 2020). با این حال، در کاربردهایی که کنترل دقیق تحرک فلزات سنگین یا عناصری مانند آهن اهمیت بالایی دارد (مانند مناطق مستعد آلودگی آب‌های زیرزمینی)، ژئولیت الزاماً گزینه برتر محسوب نمی‌شود. در چنین شرایطی، استفاده از موادی با سطح ویژه بالاتر و قابلیت جذب

فیزیکی-شیمیایی قوی‌تر، مانند نانوبنتونیت، می‌تواند کارایی بیشتری نشان دهد. نتایج این پژوهش نیز بیانگر آن است که تیمارهای ژئولیت و بیوجار انار اگرچه کاهش محدودی در شاخص‌های شوری ایجاد کردند، اما بالاترین غلظت آهن را در پساب خروجی به همراه داشتند (کاهش از mg/L ۰,۹۴ در $PV = 0.5$ به mg/L ۰,۳۹ در $PV = 4$). این رفتار احتمالاً ناشی از افزایش pH محلول خاک در اثر کاربرد مواد قلیایی است که در مرحله اولیه باعث کاهش بار سطحی اکسیدهای آهن و کاهش کارایی جذب سطحی می‌شود و در نتیجه تحرک آهن را افزایش می‌دهد. با این حال، در مراحل بعدی و با رسیدن سیستم به تعادل، افزایش pH شرایط را برای رسوب هیدروکسیدهای آهن فراهم کرده و روند کاهش غلظت آهن محلول را توضیح می‌دهد (Uchimiya et al., 2011).

این یافته‌ها اهمیت فراتر از کاهش شوری را در فرایند آبشویی برجسته می‌سازد. توزیع زمانی و مکانی عناصر در پروفیل خاک نه تنها بر سلامت اکوسیستم و پایداری بلندمدت اصلاح خاک تأثیر می‌گذارد (Agassi et al., 1981)، بلکه کیفیت آب زیرزمینی را نیز شکل می‌دهد. به عنوان مثال، خروج مقادیر بالای آهن حتی در محدوده غیرسمی می‌تواند در چاه‌ها منجر به تشکیل رسوبات اکسیدی یا تغییر در پتانسیل اکسیداسیون - کاهش‌پذیری محیط شود. ازسوی دیگر، حفظ کلسیم و پتاسیم در پروفیل خاک برای تثبیت ساختار خاک و تأمین عناصر غذایی گیاه ضروری است (Rengasamy, 2006). در نتیجه، ارزیابی مواد اصلاح‌کننده باید فراتر از کاهش شاخص‌های کلی مانند EC باشد و شامل تحلیل پویایی عناصر فردی در طول فرایند آبشویی گردد. یافته‌های این پژوهش (جدول ۲ و شکل‌های ۱۰-۱۳) نشان می‌دهند که انتخاب ماده اصلاحی باید باتوجه به هدف مدنظر صورت گیرد: الف: اگر هدف مهار آبشویی فلزات به‌ویژه در مناطق مستعد نفوذ به آب‌های زیرزمینی باشد، نانو بنتونیت به دلیل ظرفیت تبادل کاتیونی بالا (۸۰-۱۵۰ سانتی‌مول بر کیلوگرم)، ساختار متخلخل و قابلیت به‌دام‌اندازی مؤثر یون‌ها (Kayama et al., 2016; Minhal et al., 2020) گزینه بهینه‌تری است. ب- اگر هدف تأمین تدریجی عناصر غذایی به گیاه باشد، بیوجار با در نظر گرفتن منشأ مواد اولیه، pH و خواص سطحی آن می‌تواند مؤثر باشد، هرچند نیاز به مدیریت دقیق برای جلوگیری از آزادسازی اولیه بالای فلزات دارد. ج- نانوسیلیکا نیز به عنوان یک ماده دوکاره، هم در کاهش تنش شوری و هم در مهار متوسط آبشویی عناصر غذایی عملکرد مناسبی از خود نشان داد و می‌تواند در سیستم‌های تلفیقی مدیریت خاک کاربرد یابد. البته، به کارگیری نانوذرات معدنی هرچند از نظر کارایی فنی چشمگیر هستند مستلزم ارزیابی دقیق پایداری محیط‌زیستی، ریسک تجمع در زنجیره غذایی و اثرات بلندمدت بر سلامت خاک است (Lin et al., 2010). بنابراین،

- microalga *Chaetoceros muelleri* Lemmermann, 1898 under long-term exposure. *Environmental Science and Pollution Research*. 29(20): 30427-30440. DOI: 10.1007/s11356-021-17870-z.
- Choudhary, O. P., and Kharche, V. K. 2018. Soil salinity and sodicity. *Soil science: an introduction*. 12: 353-384.
- El-Aziz, M. A. A., Elbagory, M., Arafat, A. A., Aboelsoud, H. M., El-Nahrawy, S., Khalifa, T. H. and Omara, A. E. D. 2025. Evaluating the impact of nano-silica and silica hydrogel amendments on soil water retention and crop yield in rice and clover under variable irrigation conditions. *Agronomy*. 15(3): 652.
- Fouladidorhani, M., Shayannejad, M., Shariatmadari, H., Mosaddeghi, M. R., and Arthur, E. 2020. Biochar, manure, and super absorbent increased wheat yields and salt redistribution in a saline- sodic soil. *Agronomy Journal*. 112(6): 5193-5205.
- Gee, G. W. and Bauder, J. M. 1986. Particle-size analysis. In Page, A. L., and et al. (Eds.), *Methods of Soil Analysis, Part 1, Physical and Mineralogical Methods*. Agronomy Monograph No. 9 (2nd edition). American Society of Agronomy, Madison, WI. pp. 383-411.
- Grossman, R. B. and Reinsch, T. G. 2002. Bulk density and linear extensibility. In Dane, J. H., Topp, G. C., and Dina, T. C. (Eds.), *Methods of soil analysis: Part 4—Physical methods*. Soil Science Society of America. pp. 201-228. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.4.c8>.
- Haris, M., Hussain, T., Mohamed, H. I., Khan, A., Ansari, M. S., Tauseef, A. and Akhtar, N. 2023. Nanotechnology—A new frontier of nano-farming in agricultural and food production and its development. *Science of the Total Environment*. 857: 159639. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159639>.
- Hassan, S. N. and Radi, A. M. A. 2018. Effect of zeolite on some physical properties of wheat plant growth (*Triticum aestivum*). *Plant Archives*. 18(2): 2641-2648.
- Kayama, M., Nimpila, S., Hongthong, S., Yoneda, R., Wichienopparat, W., Himmaman, W. and Noda, I. 2016. Effects of bentonite, charcoal and corncob for soil improvement and growth characteristics of teak seedling planted on acrisols in northeast Thailand. *Forests*. 7(2): 36.
- Kim, K. H., Kim, J.-Y., Cho, T.-S. and Choi, J. W. 2012. Influence of pyrolysis temperature on physicochemical properties of biochar obtained from the fast pyrolysis of pitch pine (*Pinus rigida*). *Bioresource Technology*. 118: 158-162.
- Kumar, R., Singh, A., Bhardwaj, A. K., Kumar, A., Yadav, R. K. and Sharma, P. C. 2022. Reclamation گزینه‌های مبتنی بر نانوفناوری باید در چارچوب اصول مدیریت پایداری و با رویکرد احتیاطی توسعه یابند.
- ## منابع
- تیرانداز نژاد، ر.، اسدزاده، ف. و احمدی، ح. ۱۳۹۷. بررسی آزمایشگاهی اصلاح یک خاک شور-سدیمی با استفاده از ستون‌های آبشویی. تحقیقات کاربردی خاک. ۳۲-۱۲۱: (۴)۳۲.
- ثقفی، ف.، قانع بافقی، م.ج. و شیرمردی، م. ۱۴۰۰. اثر بیوچار ضایعات درخت خرما بر غلظت عناصر، نسبت جذب سدیم و برخی خصوصیات فیزیکی خاک شور. نشریه مهندسی اکوسیستم بیابان، ۱۰ (۳۱)، ۸۵-۹۴.
- رضاپور، س.، برین، م.، اسدزاده، ف. و نوری، ا. ۱۴۰۰. ارزیابی تأثیر اصلاح‌کننده‌های آلی و شیمیایی بر بعضی شاخص‌های شیمیایی خاک-های شور-سدیمی. تحقیقات کاربردی خاک. ۳۱-۳۱: (۳)۴۲.
- عاصمه، م. و پور اکبر، ل. ۱۴۰۱. تأثیر سیلیکون و نانودی اکسید سیلیکون بر فاکتورهای رشدی، میزان اسمولیت ها و محتوای یونی گیاه زعفران (*Crocus Sativus L.*) تحت تنش شوری. مجله پژوهش‌های گیاهی (علمی). ۳۵: (۱) ۳۱-۴۱.
- کولایان، ع.، خوش‌روش. م. ۱۳۹۷. ارزیابی آبشویی خاک شور و سدیمی با استفاده از مواد اصلاحی در شرایط آزمایشگاهی. ۴۹ (۶)۴۹.
- نوری، ز.، صفری، ی. و دلاور، م. ۱۳۹۹. استفاده از بیوچار و تیمارهای معدنی برای اصلاح ویژگی‌های شیمیایی یک خاک شور و سدیمی. علوم آب و خاک. ۲۴ (۴): ۲۱-۳۶.
- Agassi, M., Shainberg, I. and Morin, J. 1981. Effect of electrolyte concentration and soil sodicity on infiltration rate and crust formation. *Soil Science Society of America Journal*. 45(5): 848-851.
- Ashraf, M. A., Maah, M. J. and Yusoff, I. 2014. Soil contamination, risk assessment and remediation. *Environmental risk assessment of soil contamination*. 1: 3-56.
- Amusat, S. O., Kebede, T. G., Dube, S. and Nindi, M. M. 2021. Ball-milling synthesis of biochar and biochar-based nanocomposites and prospects for removal of emerging contaminants: A review. *Journal of Water Process Engineering*. 41: 101993.
- Bakhshi, M. and Abhilash, P. C. 2020. Nanotechnology for soil remediation: Revitalizing the tarnished resource. In *Nano-materials as photocatalysts for degradation of environmental pollutants*. pp. 345-370.
- Bameri, L., Sourinejad, I., Ghasemi, Z. and Fazelian, N. 2022. Toxicity of TiO₂ nanoparticles to the marine

- Qadir, M., Oster, J. D., Schubert, S., Noble, A. D. and Sahrawat, K. L. 2007. Phytoremediation of sodic and saline-sodic soils. *Advances in Agronomy*. 96: 1-65.
- Rajput, V. D., Kumari, A., Upadhyay, S. K., Minkina, T., Mandzhieva, S., Ranjan, A., Sushkova, S., Burachevskaya, M., Rajput, P., Konstantinova, E., Singh, J. and Verma, K. K. 2023. Can Nanomaterials Improve the Soil Microbiome and Crop Productivity? *Agriculture*. 13(2): 231. <https://doi.org/10.3390/agriculture13020231>.
- Ranjbar, F. and Jalali, M. 2015. The effect of chemical and organic amendments on sodium exchange equilibria in a calcareous sodic soil. *Environmental Monitoring and Assessment*. 187(11): 683.
- Rengasamy, P. 2006. World salinization with emphasis on Australia. *Journal of Experimental Botany*. 57(5): 1017-1023. doi: 10.1093/jxb/erj108.
- Rezapour, S., Asadzadeh, F., Barin, M. and Nouri, A. 2022. Organic amendments improved the chemical-nutritional quality of saline-sodic soils. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 19(6): 4659-4672.
- Sharma, P. C. and Singh, A. 2019. Reviving the Productivity of Salt-affected Lands: Technological Options, Constraints and Research Needs. In Dagar, J., Yadav, R., and Sharma, P. (Eds.), *Research Developments in Saline Agriculture*. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-13-5832-6_20.
- She, D., Sun, X., Gamareldawla, A. H., Nazar, E. A., Hu, W., Edith, K. and Yu, S. E. 2018. Benefits of soil biochar amendments to tomato growth under saline water irrigation. *Scientific Reports*. 8(1): 14743.
- Tejada, M., Garcia, C., Gonzalez, J. L. and Hernandez, M. T. 2006. Use of organic amendment as a strategy for saline soil remediation: Influence on the physical, chemical and biological properties of soil. *Soil Biology and Biochemistry*. 38(6): 1413-1421.
- Uchimiya, M., Lima, I. M., Klasson, K. T., Chang, S. and Wartelle, L. H. 2011. Influence of pyrolysis temperature on biochar properties and heavy metal adsorption by the biochar. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 59(17): 9388-9398.
- Wang, X., Ding, J., Han, L., Tan, J., Ge, X. and Nan, Q. 2024. Biochar addition reduces salinity in salt-affected soils with no impact on soil pH: A meta-analysis. *Geoderma*. 443: 11684.
- of salt- affected soils in India: Progress, emerging challenges, and future strategies. *Land Degradation & Development*. 33(13): 2169-2180.
- Leogrande, R. and Vitti, C. 2019. Use of organic amendments to reclaim saline and sodic soils: a review. *Arid Land Research and Management*. 33(1): 1-21.
- Lin, D., Tian, X., Wu, F. and Xing, B. 2010. Fate and transport of engineered nanomaterials in the environment. *Journal of Environmental Quality*. 39(6): 1896-1908. doi: 10.2134/jeq2009.0423.
- Louhar, G., Devi, S. and Dahiya, G. 2020. Zeolites: A potential source of soil amendments to improve soil properties. *Chemical Science Review and Letters*. 9(35): 777-785.
- Mabagala, F. S. 2022. On the tropical soils; The influence of organic matter (OM) on phosphate bioavailability. *Saudi Journal of Biological Sciences*. 29(5): 3635-3641.
- Minhal, F., Ma'as, A., Hanudin, E. and Sudira, P. 2020. Improvement of the chemical properties and buffering capacity of coastal sandy soil as affected by clays and organic by-product application. *Soil and Water Research*. 15(2): 93-100.
- Moshtagh, R., Moradi, N. and Gholami, H. 2022. Investigation of the role of biochar from eggplant plant residues and shrimp waste on some soil stability characteristics. *Environmental Erosion Research*. 12(1): 1-17.
- Nassaj-Bokharaei, S., Motesharezedeh, B., Etesami, H. and Motamedi, E. 2021. Effect of hydrogel composite reinforced with natural char nanoparticles on improvement of soil biological properties and the growth of water deficit-stressed tomato plant. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 223: 112576.
- Omokaro, G. O., Osarhiemen, I. O., Idama, V., Airueghian, E. O., West, S. T., Igbigbi, F. E. and Omoshie, V. O. 2024. The role of organic amendments and their impact on soil restoration: A review. *Asian Journal of Environmental Ecology*. 23: 41-52.
- Osman, K. T. 2018. Saline and sodic soils. In *The Management of Soil Problems*. Cham: Springer International Publishing. pp. 255-298.
- Page, A. L., Miller, R. H. and Keeney, D. R. (Eds.). 1982. *Methods of Soil Analysis, Part 2*. Second edition. American Society of Agronomy-Soil Science Society of America, Madison, USA. 1159p.

Effects of Nano- and non-nano Organic and Inorganic Soil Amendments on the Leaching Dynamics of Soluble Salts in a Loamy-Textured Saline Soil

F. Hajebi¹, N. Moradi^{2*}, O. Bazrafshan³, A. Sadeghi Lari⁴

Recived: Nov.29, 2025

Accepted: May.03, 2026

Abstract

Nanotechnology holds promising potential as an innovative approach for improving the physical and hydraulic properties of saline soils. This study comparatively evaluated the effects of organic and mineral soil amendments applied at nano and conventional scales on a loamy saline soil. The experimental treatments included pomegranate peel-derived biochar and nanobiochar, nano-bentonite, zeolite, micro-silica, and nano-silica, which were applied in soil columns (10 cm diameter × 35 cm height) under a completely randomized design with three replications. Results indicated that, before leaching, the highest electrical conductivity ($EC = 23.597 \text{ dS m}^{-1}$) and sodium concentration (4903 mg kg^{-1}) were recorded in the pomegranate peel biochar treatment. Conversely, the nano-silica treatment showed the lowest pre-leaching EC (13.817 dS m^{-1}), while nano-bentonite had the lowest sodium concentration (2054 mg kg^{-1}). Analysis of leachate collected after irrigation with four pore volumes of water revealed that nano-bentonite produced the lowest EC and potassium and iron concentrations, whereas nano-silica produced the lowest calcium concentration. In contrast, the pomegranate peel biochar treatment yielded the highest EC and concentrations of calcium, potassium, and iron in the leachate. These findings demonstrate that nano-engineered amendments, particularly nano-bentonite and nano-silica, exhibit significant efficacy in mitigating salinity and modulating the leaching dynamics of key ions (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , and $\text{Fe}^{2+}/^{3+}$), thereby offering viable, sustainable strategies for the reclamation and management of saline soils.

Keywords: Electrical Conductivity, Nanobiochar, Nanosilica, Soil Column Leaching

1- PhD Student, in Watershed Science and Engineering, Department of Natural Resources Engineering, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Hormozgan, Iran

2- Assistant Professor, Department of Natural Resources Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran.

3- Professor, Department of Natural Resources Engineering, Faculty of Natural Resources and Agriculture, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran

4- Associate Professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran.

(*- Corresponding Author Email: nvz.moradi@hormozgan.ac.ir)