

مدیریت آبشویی و بهسازی خاک‌های متأثر از نمک، مطالعه موردی: دشت سیستان

حامد رضایی^{۱*}، لیلا اسماعیل‌نژاد^۱، رسول میرخانی^۱، مجتبی هادی‌زاده^۲

^۱. بخش تحقیقات پایش و بهسازی خاک و آب، موسسه تحقیقات خاک و آب،

سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران

^۲. بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی سیستان،

سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، سیستان، ایران

*مسئول مکاتبه، رایانامه: h_rezaei@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۲۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۲۱

DOI: [10.30470/jsp.2026.2089022.1031](https://doi.org/10.30470/jsp.2026.2089022.1031)

چکیده

این پژوهش با هدف ارزیابی قابلیت اصلاح خاک‌های شور و سدیمی دشت سیستان، تعیین نیاز آبشویی برای کاهش شوری خاک و بررسی ضرورت کاربرد گچ در بهسازی خاک‌های سدیمی انجام شد. بدین منظور، سه پایگاه مطالعاتی از سری‌های خاک اکبرآباد، چارک و ارباب با کلاس‌های مختلف شوری و سدیمی انتخاب گردید. آبشویی به روش غرقاب متناوب با کاربرد یک متر آب در چهار مرحله ۲۵ سانتی‌متری انجام شد. همچنین، تأثیر کاربرد گچ به میزان ۵/۱۳ و ۳۴ تن در هکتار در دو پایگاه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد در نیمرخ اکبرآباد با میانگین شوری اولیه ۵/۱۱ دسی‌زیمنس بر متر، حدود ۴۵ سانتی‌متر آب برای کاهش شوری ۵۰ سانتی‌متر سطحی خاک به حدود ۲ دسی‌زیمنس بر متر و در نیمرخ ارباب نیز برای کاهش شوری ۵۰ سانتی‌متر سطحی خاک به ۶ دسی‌زیمنس بر متر، حدود ۵۸ سانتی‌متر آب خالص آبشویی کفایت نمود. در مقابل، در نیمرخ چارک با شوری اولیه ۳/۶۵ دسی‌زیمنس بر متر و درصد سدیم تبدلی حدود ۷۳ درصد، حتی پس از مصرف یک متر آب و ۳۴ تن در هکتار گچ، شوری خاک تنها به ۱۴ دسی‌زیمنس بر متر و درصد سدیم تبدلی به ۵/۴۹ درصد کاهش یافت. همچنین، کاربرد گچ تأثیر محسوسی بر افزایش نفوذپذیری، کاهش شوری و کاهش درصد سدیم تبدلی نسبت به تیمارهای بدون گچ نشان نداد. نتایج نشان داد که قابلیت اصلاح خاک‌های شور و سدیمی دشت سیستان به شدت تحت تأثیر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک است. در خاک‌های دارای نفوذپذیری مناسب، آبشویی به‌تنهایی توانست موجب کاهش قابل توجه شوری و سدیمی بودن خاک شود، در حالی‌که در خاک‌های با بافت سنگین و نفوذپذیری کم، حتی مصرف مقادیر زیاد آب و گچ نیز کارایی محدودی داشت. بنابراین، تعیین نیاز آبشویی و ضرورت مصرف مواد اصلاح‌کننده باید بر اساس ویژگی‌های هر خاک و با در نظر گرفتن محدودیت منابع آب منطقه انجام شود.

واژه‌های کلیدی: انتقال املاح، کیفیت آب، مدل‌های تجربی، نفوذپذیری، نیاز آبشویی

Management of Leaching and Improvement of Salt Affected Soils; Case Study: Sistan Plain

H. Rezaei^{1*}, L. Esmaeelnejad¹, R. Mirkhani¹, M. Hadizadeh²

1. Monitoring and Improvement of Soil and Water Research Department, Soil and Water Research Institute (SWRI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran

2. Soil and Water Research Department, Sistan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Sistan, Iran

*Corresponding Author, Email: h_rezaei@yahoo.com

Received: May 2026 Accepted: June 2026

DOI: [10.30470/jsp.2026.2089022.1031](https://doi.org/10.30470/jsp.2026.2089022.1031)

Extended Abstract

Aim

Salinity and sodicity are critical soil degradation processes in arid and semi-arid regions, severely constraining agricultural productivity and water resource sustainability. The Sistan Plain in northeastern Iran, with annual precipitation of only 55 mm and evaporation exceeding 4,800 mm, exemplifies such fragile environments. The region depends on the Hirmand River and Chah-Nimeh reservoirs for irrigation. However, extensive salinity and sodicity, especially in northern and eastern parts, threaten agricultural sustainability, particularly following recent large-scale irrigation projects covering 46,000 hectares. Given that previous reclamation studies are outdated due to changes in water quality, land use, and climate, this study had four primary objectives: (1) evaluate the reclamation potential of representative saline-sodic soils through field-scale experiments, (2) determine precise leaching water requirements for achieving target salinity reduction levels appropriate for crop production, (3) assess the necessity and actual effectiveness of gypsum application for sodicity amelioration across different soil types and salinity-sodicity classes, and (4) develop site-specific leaching and desodification curves as practical, science-based management tools for farmers, agricultural extension services, and land-use planners. The central hypothesis was that reclamation success is predominantly governed by soil physical properties, particularly texture, permeability, and the presence of restrictive layers, and that gypsum application is not universally required across all salt-affected soils in the region.

Materials and Methods

Three representative soil series were carefully selected to represent the range of salinity-sodicity conditions and physical characteristics in the Sistan Plain: Akbarabad (Hi1-11: initial EC_e 11.5 dS m^{-1} , silty clay, S3A2), Charak (Nim2-13: initial EC_e 65.3 dS m^{-1} , ESP ~73%, silty loam with heavy clay layers at depth, S4A4), and Arbab (NP-20: initial EC_e ~60 dS m^{-1} , loam, S3A2). At each site, four GRP lysimeters (1 m diameter, 60 cm height) were installed, inserted 15–20 cm into soil to prevent lateral flow and ensure predominantly vertical water movement. Leaching used intermittent ponding with 100 cm water applied in four 25-cm increments. After each increment, soil samples were collected from one lysimeter at 0–25, 25–50, 50–75, 75–100, and 100–150 cm depths, with each lysimeter representing a distinct leaching stage to avoid disturbance from repeated sampling. Gypsum was applied at 34 t ha^{-1} (Charak) and 13.5 t ha^{-1} (Arbab), calculated from initial ESP, CEC, bulk density, target ESP of 15%, and 92.6% purity. Leaching-only was applied to Akbarabad, while both leaching-only and leaching-plus-gypsum were applied to Arbab for direct comparison. Soils were analyzed for EC_e , soluble cations and anions, SAR, ESP, and CEC using standard laboratory methods. Normalized leaching curves used $X = (\text{leaching water depth})/(\text{soil depth})$ and $Y = (EC_f - EC_{eq})/(EC_i - EC_{eq})$ for salinity, with analogous equations for ESP, to eliminate external factors such as evaporation and drainage conditions. Best-fit mathematical models (power, exponential, inverse, and logarithmic) were tested and selected using SPSS statistical software.

Results

Results revealed strongly contrasting reclamation responses, confirming the overriding influence of soil physical properties. For Akbarabad, leaching alone was highly effective: after 100 cm water, EC_e of the upper 50 cm decreased from 11.5 to <2 dS m^{-1} , with SAR and ESP dropping to safe levels (<13 and <15%). The desalination curve indicated ~45 cm net water was sufficient to reach EC_e of 2 dS m^{-1} . This success was attributed to adequate permeability and native calcium sources (calcium carbonate and possibly natural gypsum) facilitating sodium displacement without external

amendment. In stark contrast, Charak showed extremely limited reclamation. Despite 100 cm water and 34 t ha⁻¹ gypsum, ECe of the top 25 cm decreased only from 65.3 to 14 dS m⁻¹, and ESP from 73% to 49.5%. SAR remained extremely high (>100). The heavy clay layer (60% clay at 50–75 cm) severely restricted water flow and solute transport, acting as a permeability barrier. Desalination curves predicted that reducing ECe to 6 dS m⁻¹ would require >110 cm water, and desodification to ESP of 10% would demand nearly 200 cm—unrealistic volumes given severe water scarcity. Thus, the primary limitation was not calcium deficiency but poor physical conditions preventing effective water movement and solute exchange. For Arbab, both treatments were effective. In the leaching-only treatment, ECe of the upper 50 cm decreased from ~60 to <6 dS m⁻¹ after 100 cm water, with SAR and ESP reaching safe levels. The desalination curve indicated ~58 cm net water was required to reach ECe of 6 dS m⁻¹. Gypsum addition (13.5 t ha⁻¹) provided only marginal benefits: after the first 25 cm water, ECe in the top 25 cm decreased from 19.2 to 9.9 dS m⁻¹ with gypsum, compared to 14.5 dS m⁻¹ without. However, this minor advantage disappeared in later stages, and final salinity and ESP values showed no significant differences between treatments. The desalination curves were nearly identical, indicating that gypsum did not meaningfully enhance permeability or solute removal. This was attributed to adequate soil permeability, sufficient native calcium, and calcium/magnesium in irrigation water, which together allowed effective sodium displacement by leaching alone, making gypsum application unnecessary and economically unjustifiable in this profile.

Conclusion

This study conclusively demonstrates that reclamation potential of saline-sodic soils in the Sistan Plain is strongly controlled by site-specific physical and chemical properties, not simply by initial salinity levels. In soils with favorable permeability and adequate native calcium, leaching alone can effectively reduce salinity and sodicity to acceptable levels without gypsum. In contrast, in soils with heavy clay textures, very high initial salinity, and extremely low hydraulic conductivity, even large water volumes and high gypsum rates yield only marginal improvements, making complete reclamation economically and practically unfeasible under water-scarce conditions. Gypsum should not be prescribed indiscriminately; its necessity depends on exchangeable sodium, native calcium availability, permeability, and irrigation water quality. Given acute water scarcity, leaching objectives should be aligned with crop salt tolerance and rooting depth rather than targeting excessively low salinity. The leaching and desodification curves provide a robust scientific basis for estimating site-specific water requirements and prioritizing reclamation investments. Adoption of salt-tolerant crops with limited, targeted leaching is more pragmatic than complete reclamation in severely affected areas. Future research should address long-term sustainability of reclamation, secondary salinization risks from capillary rise and evaporation, and economic feasibility of alternative physical and chemical amelioration methods under local climatic and economic conditions. The findings of this study can inform policy decisions regarding land-use planning, irrigation water allocation, and agricultural development strategies in arid and semi-arid regions facing similar salinity challenges.

Keywords: Experimental models, Leaching requirement, Permeability, Solute transport, Water quality

مقدمه

گسترش خاک‌های متأثر از نمک، یکی از چالش‌های مهم مدیریت منابع خاک و آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک است. بر اساس گزارش فائو، بیش از ۱۳۸۱ میلیون هکتار از اراضی جهان تحت تأثیر شوری قرار دارند و روند افزایش دما، کمبود آب، افت کیفیت منابع آب و مدیریت نامناسب آبیاری و زهکشی می‌تواند خطر شورشدن خاک‌ها را تشدید کند (FAO, 2024). این مسئله در مناطق خشک، از جمله دشت سیستان، به دلیل تبخیر زیاد، بارندگی اندک و محدودیت منابع آب آبیاری اهمیت بیشتری دارد. خاک‌های متأثر از نمک معمولاً بر پایه شاخص‌هایی مانند هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک، درصد سدیم تبدلی و نسبت جذب سدیم ارزیابی و طبقه‌بندی می‌شوند. بر اساس معیارهای ارائه‌شده توسط آزمایشگاه شوری ایالات متحده، خاک‌های شور دارای هدایت الکتریکی عصاره اشباع بیش از ۴ دسی‌زیمنس بر متر هستند، در حالی‌که در خاک‌های سدیمی، مقدار سدیم تبدلی به حدی است که می‌تواند موجب تخریب ساختمان خاک، کاهش پایداری خاکدانه‌ها و افت نفوذپذیری شود (Richards, 1954). بر این اساس خاک‌های متأثر از نمک به سه دسته خاک‌های شور، سدیمی، و شور-سدیمی گروه‌بندی شده است. اصلاح خاک‌های شور با خارج کردن نمک با آب مناسب و کافی، اصلاح خاک‌های شور-سدیمی با به کارگیری همزمان آب مناسب برای آبشویی نمک‌ها و افزودن مواد اصلاح‌کننده دارای یون کلسیم برای جایگزینی با یون سدیم تبدلی، و اصلاح خاک‌های سدیمی با به کارگیری ماده به‌ساز انجام می‌پذیرد. در برنامه‌های اصلاح و به‌سازی خاک‌های متأثر از نمک در صورت وجود شرایط زهکشی مناسب و مطلوب، چند پرسش مهم مطرح است. ۱) چه میزان آب برای کاهش شوری مورد نظر در نیمرخ خاک تا عمق مشخص لازم است، و به کارگیری و نفوذ این میزان آب به سطح و درون نیمرخ خاک، چه مدت طول خواهد کشید؟ ۲) آیا همزمان با فرایند شوری‌زدایی، پدیده سدیم‌زدایی خاک‌ها

نیز مطرح است؟ و یا این که شوری‌زدایی خاک‌ها موجب تشدید پدیده سدیمی شدن خاک‌ها می‌شود؟ ۳) مقدار و نوع ماده اصلاح‌کننده چیست؟

در مطالعات مختلف، از آزمایش‌های ستونی، لایسیمتری و میدانی برای برآورد نیاز آبشویی، بررسی حرکت املاح و ارزیابی کارایی مواد اصلاحی در خاک‌های شور و سدیمی استفاده شده است. با وجود اینکه آزمایش‌های ستونی امکان کنترل بهتر شرایط آزمایشگاهی و شناخت اولیه رفتار انتقال املاح را فراهم می‌کنند، نتایج آن‌ها به دلیل تفاوت در ساختمان خاک، شرایط زهکشی، تبخیر سطحی و ناهمگنی نیمرخ خاک، همواره به‌طور کامل قابل تعمیم به شرایط مزرعه نیستند. اگرچه آزمایش‌های ستونی و کنترل‌شده آزمایشگاهی ابزار مناسبی برای بررسی اولیه فرایند انتقال املاح، ارزیابی راندمان آبشویی و رفتار مواد اصلاح‌کننده هستند، اما به دلیل ناهمگنی خاک، تغییرپذیری ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی در مزرعه، شرایط متفاوت زهکشی، تبخیر سطحی و اثرات ساختار خاک، نتایج حاصل از آن‌ها همواره قابل تعمیم مستقیم به شرایط واقعی مزرعه نیست. از این رو، انجام آزمایش‌های میدانی برای ارزیابی کارایی عملیات آبشویی و به‌سازی خاک‌های شور و سدیمی ضروری است (Richards, 1954; Suarez, 2001). لذا ضرورت دارد تا امکان اصلاح فیزیکی و شیمیایی خاک‌های شور و یا شور-سدیمی و همچنین تعیین میزان آب لازم برای آبشویی نمک‌های محلول از نیمرخ خاک‌های شور، از طریق آزمایش‌های میدانی انجام گیرد. با اجرای آزمایش‌ها، این امکان فراهم می‌شود تا میزان آب مورد نیاز برای به‌سازی شوری و سدیمی بودن خاک‌ها بر اساس منحنی‌های شوری‌زدایی و یا سدیم‌زدایی را تعیین نمود.

مطالعات میدانی متعددی در زمینه آبشویی و به‌سازی خاک‌های شور و سدیمی در مناطق مختلف جهان انجام شده است. نتایج این پژوهش‌ها نشان داده‌اند که موفقیت عملیات آبشویی به عواملی نظیر بافت خاک،

کیفیت آب آبیاری، وضعیت زهکشی و نوع ماده اصلاح‌کننده بستگی دارد (Tóth, 2022). در یک آزمایش میدانی در اتیوپی، کاربرد گچ همراه با گیاهان هالوفیت موجب کاهش معنی‌دار شوری و سدیمی خاک و بهبود شرایط رشد گیاه شد (Abate et al., 2021). همچنین در مطالعات انجام‌شده در چین، استفاده از گچ در مقیاس مزرعه‌ای باعث کاهش شوری، کاهش درصد سدیم تبدیلی و بهبود شرایط تولید محصولات زراعی گردید (Wang et al., 2023). علاوه بر این، نتایج پژوهش‌های اخیر نشان داده است که کارایی مواد اصلاح‌کننده در خاک‌های با بافت سبک و متوسط بیشتر بوده و در خاک‌های سنگین، محدودیت نفوذپذیری می‌تواند اثربخشی عملیات آبشویی و اصلاح را کاهش دهد (Tóth, 2022; Wang et al., 2023). بنابراین، انجام مطالعات میدانی منطقه‌ای برای تعیین نیاز آبشویی و ارزیابی کارایی مواد اصلاح‌کننده در هر منطقه ضروری است.

چاه‌نیمه‌ها مجموعه‌ای از مخازن طبیعی و مصنوعی ذخیره آب در منطقه سیستم هستند که آب رودخانه هیرمند در آنها ذخیره شده و به‌عنوان اصلی‌ترین منبع تأمین آب شرب و کشاورزی منطقه مورد استفاده قرار می‌گیرند. به‌منظور استفاده بهینه از منابع آب چاه نیمه‌ها در منطقه سیستم طرح آبرسانی با لوله به ۴۶ هزار هکتار از اراضی کشاورزی با هدف مصرف بهینه از منابع محدود آب چاه نیمه‌ها، بهبود وضعیت اقتصادی و تثبیت جمعیت سیستم از سال ۱۳۹۴ آغاز گردید. یکی از مهمترین محدودیت‌های کشت و کار در دشت سیستم، شوری منابع خاک است (Saadat et al., 2024)، که تأثیر بسیار مهمی بر روی مدیریت آب در منطقه دارد. چرا که علاوه بر تأمین نیاز تبخیر و تعرق کشت مورد نظر، بایستی نسبت به در نظر گرفتن آب مورد نیاز برای آبشویی (و یا سدیم‌زدایی) هم در مرحله اصلاح زمین (آبشویی مقدماتی) و هم در مرحله داشت گیاه (آبشویی نگهداری) اقدام شود.

با توجه به وجود خاک‌های شور و سدیمی در مناطقی از دشت سیستم، بافت سنگین، وجود لایه‌های نفوذناپذیر در اعماق مختلف نیم‌رخ‌های خاک، نفوذپذیری کم و تبخیر زیاد، مسأله آبشویی اراضی و کنترل شوری یکی از الزامات کشاورزی در منطقه می‌باشد. مطالعات آبشویی و اصلاح خاک‌های شور و سدیمی در دشت سیستم سابقه‌ای نسبتاً طولانی دارد. شرکت مهندسی مشاور یکم (Consulting Engineers I, 1990)، با هدف ارزیابی قابلیت اصلاح خاک‌های شور و سدیمی منطقه، آزمایش‌های آبشویی را در چند سری خاک از جمله ارباب، چارک، زابل و پیرستان انجام داد. نتایج این مطالعه نشان داد که میزان موفقیت عملیات آبشویی تابع شدت شوری اولیه، وضعیت سدیمی بودن خاک، بافت خاک و شرایط زهکشی است. همچنین شرکت مهندسی مشاور خاک آب تهران (Tehran Water and Soil Consulting Engineers, 2015)، در مطالعات زهکشی و بهسازی اراضی واحد عمرانی هامون چهار، با هدف بررسی محدودیت‌های خاک و ارائه راهکارهای مدیریتی برای توسعه کشاورزی منطقه، بر اهمیت کنترل شوری، بهبود نفوذپذیری و برنامه‌ریزی مناسب برای آبشویی اراضی تأکید نمود. با وجود ارزشمند بودن نتایج این مطالعات، تغییرات رخ داده در کیفیت آب آبیاری، مدیریت اراضی، الگوی بهره‌برداری و شرایط اقلیمی منطقه، ضرورت انجام مطالعات جدید آبشویی و بهسازی خاک را در دشت سیستم آشکار می‌سازد. لذا این مطالعه با هدف تعیین منحنی‌های آبشویی برای عملیات آبشویی و بهسازی خاک‌های شور و سدیمی دشت سیستم انجام گرفت.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

دشت سیستم در شمال استان سیستم و بلوچستان قرار گرفته و دلتای رودخانه هیرمند را در برمی‌گیرد. این منطقه، دارای اقلیم خشک بوده، به‌طوری‌که میانگین بیشترین و کمترین درجه حرارت آن بر اساس میانگین

بلندمدت داده‌های هواشناسی ایستگاه زابل در دوره ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۸، به ترتیب ۴۰/۶ و ۱/۴ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. میانگین بارندگی سالیانه ۵۵ میلی‌متر و مقدار تبخیر به علت گرمای شدید و وجود بادهای تند؛ زیاد (میانگین سالیانه ۴۸۰۰ میلی‌متر) است (Saadat et al., 2024). خاک‌های منطقه دارای درجات مختلفی از مشکل شوری و سدیمی بوده و قسمت بیشتر خاک‌های شور-سدیمی در قسمت شمال و شرق دشت سیستان واقع شده‌اند (Saadat et al., 2024). منبع تأمین آب این منطقه برای کشاورزی، از چاه نیمه‌ها، به‌ویژه از چاه نیمه شماره چهار می‌باشد.

انجام آزمایش‌های آبشویی

با استفاده از نقشه شوری و قلیائیت خاک و سری‌های خاک مطالعات خاک‌شناسی نیمه تفصیلی، از بین

جدول ۱- موقعیت، ویژگی و نوع عملیات آبشویی و اصلاحی تعیین شده برای پایگاه‌های تعیین شده

کد نقطه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	نام سری خاک	کلاس شوری - سدیمی	کلاس بافت خاک سطحی	نوع عملیات
Hi1-11	۳۷۰۷۲۱	۳۴۵۷۵۷۷	اکبرآباد	S3A2	رسی سیلتی	آبشویی
nim2-13	۳۵۲۲۲۴	۳۴۴۶۷۲۴	چارک	S4A4	لومی سیلتی	اصلاح
NP20	۳۷۲۴۹۷	۳۴۱۹۴۱۹	ارباب	S3A2	لومی	اصلاح-آبشویی

لازم به ذکر است که سه پایگاه انتخاب شده نماینده سه وضعیت متفاوت از نظر شدت شوری، سدیمی بودن و ویژگی‌های فیزیکی خاک در دشت سیستان بودند و هر یک با هدف مشخصی انتخاب شدند. پایگاه Hi1-11 (سری اکبرآباد) با کلاس S3A2 برای ارزیابی قابلیت آبشویی خاک بدون استفاده از ماده اصلاح‌کننده انتخاب شد. این نیم‌رخ در واحد عمرانی هیرمند یک و پلی‌گونی با کلاس شوری و قلیائیت S3A2 و در سری خاک اکبرآباد قرار دارد. خاک‌های سری اکبرآباد خیلی عمیق بوده (بیش از ۱۲۰ سانتی‌متر)، و به علت نزدیکی به تالاب هامون دارای زهکشی ضعیف هستند. کلاس بافت خاک سطحی رسی سیلتی است. مواد مادری آبرفتی داشته و اکثراً دارای کاربری کشاورزی و آیش هستند. پایگاه Nim2-13 (سری چارک) با کلاس S4A4 به دلیل شوری

و سدیمی بودن شدید خاک برای بررسی کارایی کاربرد گچ در فرآیند اصلاح انتخاب گردید. علت انتخاب این نیم‌رخ، شناخت عکس‌العمل خاک‌های دارای شوری و سدیمی زیاد و بافت سنگین در برابر افزایش مقادیر مختلف آب در حضور به‌ساز بود. بر پایه نقشه شوری و قلیائیت، این نیم‌رخ در واحد عمرانی نیمروز دو و در پلی‌گونی با کلاس شوری و قلیائیت S4A4 و در سری خاک چارک قرار دارد. این پروفیل دارای بافت سنگین تا عمق ۷۵ سانتی‌متری است. کلاس بافت خاک سطحی لوم سیلتی است و برای عملیات اصلاح با گچ انتخاب شد. از ویژگی‌های این سری خاک، بافت خاک سطحی عمدتاً سنگین که به تدریج با افزایش عمق به بافت بسیار سنگین تغییر می‌یابد. ساختمان خاک فشرده تا بسیار فشرده بوده و حالات غالب در این خاک حالت شور با شوری

اعمال ۷۵ سانتی‌متر آب و استوانه چهارم پس از اعمال ۱۰۰ سانتی‌متر آب مورد نمونه‌برداری قرار گرفتند. بنابراین هر استوانه نماینده یک مرحله مشخص از فرآیند آبخوئی بود و نمونه‌برداری‌های متوالی از یک استوانه انجام نشد. برای جلوگیری از جریان جانبی آب، در اطراف هر استوانه پشته‌ای حلقوی به ارتفاع حدود ۳۰ سانتی‌متر و قطر تقریبی ۱/۵ متر ایجاد شد و همزمان با افزودن آب به داخل استوانه، فضای اطراف آن نیز مرطوب نگه داشته شد. ویژگی‌های شیمیایی آب به کار رفته در عملیات آبخوئی و بهسازی نیم‌رخ‌های مختلف خاک در جدول ۲، ذکر شده است.

برای اندازه‌گیری مقدار شوری تعادلی (EC_{eq}) و درصد سدیم تبدیلی تعادلی (ESP_{eq}) پس از نفوذ ۱۰۰ سانتی‌متر آب به سطح خاک، از عمق ۵-۰ سانتی‌متری، نمونه خاک (در سه تکرار) تهیه و به آزمایشگاه ارسال شد. میانگین وزنی شوری در عمق‌های مختلف به ازای مقادیر متفاوت عمق آب مصرفی محاسبه شد. لازم به ذکر است که در عمل امکان دارد مقداری از آب آبخوئی برای جبران کمبود رطوبت خاک در اعماق نمونه‌برداری شود و در فرآیند آبخوئی بی‌اثر باشد، از این‌رو، در محاسبات کسر رطوبتی خاک لحاظ شد. همچنین کاهش میزان شوری با مصرف آب آبخوئی حتی به میزان زیاد در لایه‌های سطحی نیم‌رخ خاک منجر به حصول تعادل شیمیایی کامل با آب آبخوئی در کوتاه مدت نخواهد شد. برای رفع این اشکال از شوری و سدیم تبدیلی تعادلی و با استفاده از رابطه بین مقادیر X و Y در روابط ۱ تا ۳ نسبت به تهیه منحنی‌های شوری‌زدایی و سدیم‌زدایی اقدام شد (Pazira and Keshavarz, 1998):

$$X = \frac{D_{lw}}{D_s} \quad \text{رابطه ۱}$$

$$Y = \left[\frac{(EC_f - EC_{eq})}{(EC_i - EC_{eq})} \right] \quad \text{رابطه ۲}$$

$$Y = \left[\frac{(ESP_f - EC_{eq})}{(ESP_i - EC_{eq})} \right] \quad \text{رابطه ۳}$$

متوسط است. سری چارک بعد از سری ارباب بزرگترین سری خاک موجود در محدوده طرح است. پایگاه NP-20 (سری ارباب) نیز با کلاس S3A2 به منظور ارزیابی همزمان اثر آبخوئی و کاربرد گچ و مقایسه نتایج آن با تیمار آبخوئی انتخاب شد. بنابراین، هر پایگاه دارای هدف مطالعاتی مشخص بوده و تمامی تیمارها در همه پایگاه‌ها اجرا نشدند. پس از انتخاب پایگاه‌های مطالعاتی، آزمایش‌های آبخوئی به روش استوانه‌ای در شرایط مزرعه انجام شد. برای این منظور، در هر پایگاه چهار استوانه از جنس GRP (Glass Fiber Reinforced Plastic) با قطر ۱ متر و ارتفاع حدود ۶۰ سانتی‌متر مورد استفاده قرار گرفت. استوانه‌ها تا عمق حدود ۱۵ تا ۲۰ سانتی‌متری در خاک استقرار داده شدند تا از گسترش جانبی جریان آب جلوگیری شده و حرکت آب و املاح عمدتاً در راستای عمودی انجام شود. چهار استوانه در رأس‌های یک مربع با فاصله ۳ تا ۶ متر از یکدیگر و در محدوده‌ای با شرایط نسبتاً یکنواخت خاک مستقر شدند. آبخوئی به روش غرقاب متناوب و با اعمال مجموعاً ۱۰۰ سانتی‌متر آب در چهار تناوب ۲۵ سانتی‌متری انجام شد. در مرحله نخست، ۲۵ سانتی‌متر آب به هر چهار استوانه اضافه شد. پس از نفوذ کامل آب و رسیدن رطوبت خاک به حدود ظرفیت مزرعه، که بر اساس تجربه حاصل از شرایط فیزیکی هر پایگاه و زمان لازم برای تخلیه آب ثقلی و بر پایه یک پیش‌آزمایش تعیین می‌شد، از اولین استوانه در اعماق مختلف تا ۱۰۰ سانتی‌متری و با فواصل ۲۵ سانتی‌متری نمونه‌برداری انجام شد. پس از نمونه‌برداری، این استوانه از ادامه آزمایش خارج گردید تا عملیات نمونه‌برداری موجب اختلال در ادامه فرآیند آبخوئی نشود. سپس ۲۵ سانتی‌متر دوم آب به سه استوانه باقی‌مانده اضافه شد. پس از نفوذ کامل آب و رسیدن خاک به حدود ظرفیت مزرعه، از استوانه دوم نمونه‌برداری انجام و این استوانه نیز از چرخه آزمایش حذف شد. همین روند برای مراحل سوم و چهارم آبخوئی تکرار شد، به‌طوری‌که استوانه سوم پس از

شوری‌زدایی و سدیم‌زدایی به‌دست آمده نسبت به تهیه منحنی‌های شوری و سدیم‌زدایی خاک‌های مورد آزمایش اقدام گردید. با استفاده از نرم افزار SPSS، ضریب همبستگی مدل‌های ریاضی (توانی، نمایی، معکوس و لگاریتمی) شوری‌زدایی و سدیم‌زدایی محاسبه شده و مناسب‌ترین مدل شوری‌زدایی و سدیم‌زدایی خاک‌های مورد آزمون تعیین گردید.

که در آن‌ها: D_{lw} : عمق آب آبشویی، D_s : عمق خاک مورد نظر برای آبشویی، EC_r : هدایت الکتریکی مورد انتظار، EC_i : هدایت الکتریکی اولیه، EC_{eq} : هدایت الکتریکی تعادلی است. کم کردن مقدار EC_{eq} و ESP_{eq} از صورت و مخرج کسر یاد شده (Y) موجب خواهد شد تا نتایج حاصل از عوامل خارجی مؤثر از جمله میزان تبخیر، شرایط زهکشی داخلی خاک، کیفیت آب آبشویی و شرایط اجرای آزمایش مستقل گردد. بر مبنای رقم‌های

جدول ۲- مشخصات شیمیایی آب کاربردی در آزمایش‌های آبشویی نیم‌رخ‌های مختلف.

نیم‌رخ	واحد	NP-20	Hi1-11	Nim2-13
pH	-	۸	۷/۳	۸/۵
EC	dS.m ⁻¹	۱/۱	۱/۱	۰/۵۶۱
TDS	mg/L	۶۶۵	۶۶۰	۳۳۷
Ca ²⁺	meq/L	۱/۷	۱/۵	۱/۷
Mg ²⁺	meq/L	۴/۳	۴/۴	۲/۰۵
Na ⁺	meq/L	۵/۷	۵/۷	۲/۰۵
مجموع کاتیون‌ها		۱۱/۷	۱۱/۶	۵/۸۹
SO ₄ ²⁻	meq/L	۵/۶	۶/۰	۱/۴
Cl ⁻	meq/L	۳/۶	۳/۶	۱/۵
HCO ₃ ⁻	meq/L	۴/۲	۴/۱	۲/۳
مجموع آنیون‌ها		۱۳/۴	۱۳/۷	۵/۲
SAR	(meq/L)1/2	۳/۳	۳/۳	۱/۵
کلاس*		C3S1	C3S1	C1S1

* کلاس‌بندی بر اساس نمودار ویل‌کاکس ارائه شده است. pH اسیدیته خاک، EC هدایت الکتریکی خاک، TDS مجموع کاتیون‌های محلول، Ca²⁺ یون کلسیم، Mg²⁺ یون منیزیم، Na⁺ یون سدیم، SO₄²⁻ یون سولفات، Cl⁻ یون کلر، HCO₃⁻ یون بیکربنات و SAR نسبت جذبی سدیم در آب آبیاری است. C3S1 کلاس آب با شوری متوسط و سدیمی کم و C1S1 شوری کم و سدیمی کم است. dS m⁻¹ دسی زیمنس بر متر، meq/L میلی اکی والان بر لیتر می باشد.

محاسبه نیاز گچی

هدف اصلی مصرف گچ، ورود مقادیر بیشتر کلسیم به خاک و جایگزینی آن با سدیم اضافی موجود روی سطوح تبدلی ذرات خاک است. با آگاهی از اینکه واکنش تبدلی بر پایه قوانین معمول شیمی با اکی‌والان‌های برابر صورت می‌گیرد، با محاسبه میزان سدیم اضافی خاک می‌توان گچ مورد نیاز را بر اساس رابطه (۴) محاسبه کرد:

$$\text{رابطه ۴} \quad GR = \frac{\rho_b \times a \times d \times (ESP_i - ESP_f) \times CEC \times 8.61}{b}$$

که در آن: GR: نیاز گچی (کیلوگرم در هکتار)، ESP_i : درصد سدیم تبدلی اولیه خاک، ESP_f : درصد سدیم تبدلی مورد نظر پس از اصلاح، CEC: ظرفیت تبادل

کاتیونی خاک (میلی‌اکی‌والان در صد گرم خاک)، a : سطح (هکتار)، d : عمق (متر) خاک مورد نظر برای اصلاح، و b : درصد خلوص گچ مورد استفاده است. بر این پایه، مقادیر گچ مورد نیاز برای بهسازی خاک و رساندن درصد سدیم تبدلی هر خاک تا عمق ۵۰ سانتی‌متری به ۱۵ درصد برای پایگاه آبشویی NIM2-13 و NP-20 به ترتیب ۳۴ و ۱۳/۵ تن در هکتار محاسبه و اعمال شد.

ویژگی‌های گچ به کار رفته برای عملیات بهسازی خاک ویژگی‌های گچ کاربردی برای بهسازی خاک‌های مد نظر در جدول ۳ بیان شده است. بر پایه این نتایج، درصد خلوص گچ ۹۲/۶ درصد، پ‌هاش گچ کمی قلیایی، و شوری عصاره اشباع آن ۲/۳۲ دسی‌زیمنس بر متر بود.

جدول ۳- نتایج آنالیز گچ به کار رفته برای بهسازی خاک

پهش	هدایت الکتریکی	اکسید کلسیم	منیزیم	خلوص	کلر	سدیم	کربنات کلسیم معادل	گوگرد سولفات
-	(dS m-1)					(%)		
۷/۳۵	۲/۳۲	۲۹/۱	۰/۰۲۱	۹۲/۶	۰/۱۲	۰/۰۵۲	۱/۰	۱۴/۵

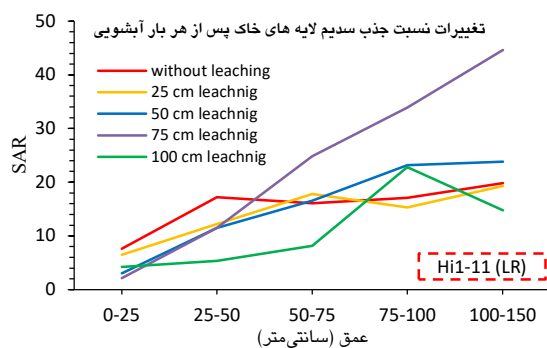
نتایج و بحث

نتایج آبشویی و بهسازی نیمرخ‌های خاک بررسی شده
نیمرخ شماره Hi1-11

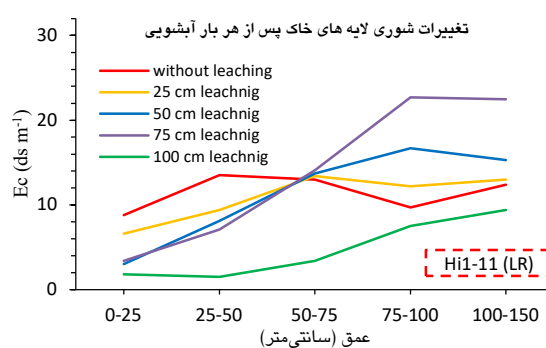
بر اساس نتایج حاصل، میانگین میزان شوری عصاره اشباع خاک لایه‌های ۰-۲۵، ۲۵-۵۰، ۵۰-۷۵، ۷۵-۱۰۰ و ۱۰۰-۱۵۰ سانتی‌متری آن قبل از آبشویی به ترتیب ۸/۸، ۱۳/۵، ۱۳، ۹/۷ و ۱۲/۴ دسی‌زیمنس بر متر است. با توجه به شکل ۱-الف، هدایت الکتریکی همه لایه‌ها به جز لایه ۵۰-۷۵ سانتی‌متری پس از ۲۵ سانتی‌متر آبشویی کاهش یافته است. پس از به کار بردن ۲۵ سانتی‌متر آبشویی دوم، هدایت الکتریکی لایه‌های اول و دوم خاک (تا ۵۰ سانتی‌متری) دوباره کاهش نشان داد و هدایت الکتریکی در لایه اول از ۸/۸ به ۳ دسی‌زیمنس بر متر و در لایه دوم از ۱۳/۵ به ۸/۱ دسی‌زیمنس بر متر کاهش یافت. ولی لایه ۵۰-۷۵ سانتی‌متری همچنان بدون تغییر باقی مانده است و هدایت الکتریکی لایه‌های ۷۵-۱۰۰ و ۱۰۰-۱۵۰ سانتی‌متری افزایش یافته است. همین‌الگو بعد از به کار بردن ۲۵ سانتی‌متر سوم آب نیز تکرار شده ولی هدایت الکتریکی لایه‌های چهارم و پنجم افزایش چشمگیری داشته است. سرانجام، پس از به کار بردن صد سانتی‌متر آب، هدایت الکتریکی همه لایه‌ها تا عمق ۱۵۰ سانتی‌متری خاک کاهش قابل ملاحظه‌ای داشته است. علت تأخیر بیشتر در کاهش هدایت الکتریکی لایه ۵۰-۷۵ سانتی‌متری به دلیل بافت سنگین‌تر آن نسبت به بقیه لایه‌ها و همچنین شستشوی نمک از لایه‌های بالا و انباشت آن در این لایه و لایه زیرین آن است. بافت خاک این لایه بسیار سنگین بوده و متشکل از ۱ درصد شن، ۵۹ درصد سیلت و ۴۰ درصد رس است. در واقع این لایه به عنوان یک لایه کاهنده سرعت نفوذ در این نیمرخ تلقی می‌شود. رفتار

متفاوت لایه ۷۵-۵۰ سانتی‌متری با نتایج مطالعات انجام‌شده در خاک‌های شور و سدیمی دارای بافت سنگین مطابقت دارد. در این خاک‌ها، افزایش درصد رس و کاهش هدایت هیدرولیکی اشباع موجب تأخیر در حرکت جبهه آبشویی و تجمع موقت املاح در لایه‌های میانی نیمرخ می‌شود. وانگ و همکاران (Wang et al, 2023) نیز در بررسی اصلاح خاک‌های شور-سدیمی گزارش کردند که وجود لایه‌های ریزبافت باعث کاهش کارایی آبشویی و افزایش تجمع موقت نمک در بخش‌هایی از نیمرخ می‌شود. همچنین سوارز (Suarez, 2001) نشان داد که ناهمگنی بافت خاک یکی از مهم‌ترین عوامل کنترل‌کننده سرعت آبشویی و توزیع املاح در نیمرخ خاک است.

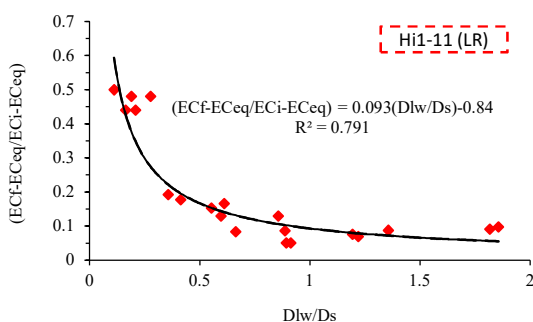
شکل ۱-الف به خوبی نشان می‌دهد که افزایش ۵۰ سانتی‌متر از آب آبشویی درصد املاح باقیمانده در خاک در عمق ۲۵-۰ سانتی‌متر را به شدت کاهش داده حال آنکه این تأثیر با افزایش عمق خاک کاهش یافته است. در این مرحله، شوری خاک در عمق ۲۵-۰ سانتی‌متری به ۳ دسی‌زیمنس بر متر می‌رسد. اما شوری اعماق پایین‌تر همچنان بالاتر از ۸ دسی‌زیمنس بر متر است. بررسی روند آبشویی نشان دهنده نیاز به ۱۰۰ سانتی‌متر آبشویی است تا شوری خاک تا عمق ۵۰ سانتی‌متری به کمتر از دو دسی‌زیمنس بر متر و تا عمق ۷۵ سانتی‌متری به کمتر از چهار دسی‌زیمنس بر متر برسد. به نظر می‌رسد افزودن صد سانتی‌متر آب برای آبشویی این نیمرخ کافی بوده و قادر است شوری خاک محدوده رشد ریشه را به کمتر از آستانه قابل تحمل اکثر گیاهان زراعی برساند.



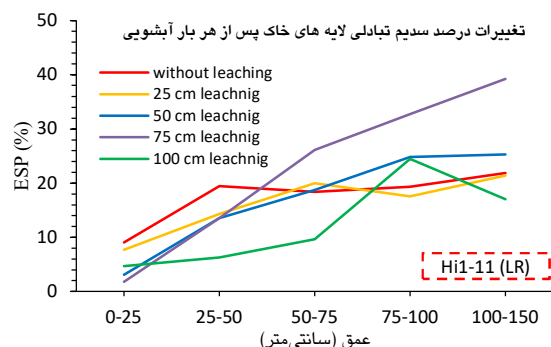
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۱- تغییرات شوری (الف)، تغییرات نسبت جذب سدیم (ب)، تغییرات درصد سدیم تبدالی (ج) لایه‌های خاک پس از هر بار آبخشویی و (د) منحنی شوری‌زدایی در نیم‌رخ Hi1-11 (نکته: در محاسبه آب خالص برای آبخشویی، علاوه بر کسر رطوبتی تا حد ظرفیت مزرعه، تبخیر از سطح خاک بر اساس آمار هواشناسی ده ساله منطقه نیز اعمال شده است)

موضوع را می‌توان به وجود منابع طبیعی کلسیم در خاک‌های منطقه، از جمله کربنات کلسیم و احتمالاً مقادیر قابل توجهی گچ طبیعی، همچنین حضور کلسیم و منیزیم محلول در آب آبیاری نسبت داد. در چنین شرایطی، با کاهش غلظت املاح محلول در اثر آبخشویی، بخشی از کلسیم موجود در سیستم خاک وارد محلول شده و امکان جایگزینی سدیم تبدالی را فراهم می‌سازد. در نتیجه، کاهش SAR و ESP لزوماً مستلزم مصرف ماده اصلاح‌کننده خارجی نبوده و در برخی خاک‌های آهکی منطقه می‌تواند صرفاً در اثر آبخشویی مناسب نیز رخ دهد. نتایج این پژوهش با گزارش‌های ارائه‌شده برای برخی خاک‌های آهکی مناطق خشک و نیمه‌خشک سازگار است. در این شرایط، انحلال تدریجی کربنات کلسیم و گچ طبیعی موجود در خاک و همچنین حضور کلسیم و منیزیم در آب آبیاری می‌تواند بخشی از سدیم تبدالی را جایگزین نماید. آبرول و همکاران (Abrol et al., 1988)

شکل‌های ۱(ب) و ۱(ج) به ترتیب تغییرات نسبت جذب سدیم و درصد سدیم تبدالی در اعماق مختلف پروفیل خاک پس از آبخشویی با مقادیر مختلف آب را نشان می‌دهند. بر پایه نتایج، پس از اعمال ۲۵ سانتی‌متر آب، نسبت جذب سدیم خاک تا عمق ۵۰ سانتی‌متری به کمتر از ۱۳ رسیده است. با ادامه آبخشویی و مصرف ۱۰۰ سانتی‌متر آب، نسبت جذب سدیم تا عمق ۷۵ سانتی‌متری نیز به کمتر از ۱۳ می‌رسد. این روند در مورد درصد سدیم تبدالی نیز تکرار می‌شود و تغییرات آنها تقریباً از الگوی مشابهی پیروی می‌کند. از آنجائی که کاهش یون سدیم در این اراضی بدون استفاده از مواد به‌ساز مثل گچ عملی است، بنابراین استفاده از ماده اصلاح‌کننده در این اراضی پیشنهاد نمی‌گردد. کاهش مقادیر SAR و ESP در برخی نیم‌رخ‌ها، حتی در تیمارهای بدون مصرف گچ، نشان می‌دهد که آبخشویی به تنهایی توانسته است بخشی از سدیم موجود در خاک را حذف نماید. این

و قدیر و همکاران (Qadir et al., 2007) نیز گزارش کردند که در برخی خاک‌های آهکی، کاهش SAR و ESP می‌تواند حتی بدون مصرف مستقیم گچ و صرفاً در اثر آبشویی مناسب رخ دهد.

شکل ۱(د)، منحنی شوری‌زدایی در نیم‌رخ HI1-11 را نشان می‌دهد. میزان هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک در لایه سطحی خاک (۵-۰ سانتی‌متر) در انتهای عملیات آبشویی به‌طور کلی تابعی از شوری آب آبیاری، میزان تبخیر سطحی، نسبت آب داده شده به زمین به میزان آب خارج شده از عمق مورد نظر شست و شو می‌باشد. بنابراین تفریق این ثابت از دو متغیر EC_i و EC_f در این عملیات سبب خواهد گردید تا تغییرات شوری خاک در طی عملیات آبشویی به شوری آب آبیاری و شرایط زهکشی خاک بستگی نداشته باشد. در این صورت منحنی‌های تهیه شده تنها متأثر از شرایط فیزیکی و شیمیایی خاک تحت آبشویی خواهد بود. بر پایه منحنی شوری‌زدایی ارائه شده، چنانچه بخواهیم خاکی با مشخصات نیم‌رخ HI1-11 را تا عمق ۵۰ سانتی‌متری از شوری میانگین ۱۱/۵ به شوری ۲ دسی‌زیمنس بر متر برسانیم، حدوداً به ۴۵ سانتی‌متر آب برای آبشویی نیاز است. از نتایج بسیار مهم این بررسی امکان انحلال، شستشو و انتقال مقادیر بسیار زیاد املاح از خاک‌های دارای بافت بسیار سنگین در اراضی واقع در محدوده طرح می‌باشد. با توجه به بافت سنگین و شوری زیاد این اراضی در محدوده مطالعاتی این نتیجه‌گیری بسیار مهم و امیدوار کننده می‌باشد. بر این پایه، افزایش مقادیر نسبتاً کم از آب آبشویی (حدود ۵۰ سانتی‌متر) میزان شوری خاک سطحی را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد. این امر امکان تلفیق عملیات آبشویی را با کشت گیاهان مقاوم و نیمه مقاوم به شوری عملی می‌سازد. میزان آب مورد نیاز برای کاهش شوری در این نیم‌رخ در مقایسه با بسیاری از خاک‌های شور-سدیمی شدید، نسبتاً پایین ارزیابی می‌شود. وانگ و همکاران (Wang et al., 2023) گزارش کردند که در برخی خاک‌های شور-

سدیمی چین، برای دستیابی به کاهش مشابه شوری به حجم بیشتری از آب و استفاده همزمان از مواد اصلاح‌کننده نیاز بوده است. همچنین نتایج آباته و همکاران (Abate et al., 2021) نشان داد که در خاک‌های با شدت شوری متوسط، آبشویی به همراه مدیریت مناسب آب می‌تواند بدون نیاز به مصرف مقادیر زیاد مواد اصلاح‌کننده، شرایط قابل قبولی برای استقرار گیاه فراهم کند. این موضوع نشان می‌دهد که نیم‌رخ HI1-11 از دیدگاه اصلاح‌پذیری در مقایسه با بسیاری از خاک‌های شدیداً شور و سدیمی منطقه، دارای پتانسیل مناسبی برای احیا و بازگشت به چرخه تولید کشاورزی است. با وجود اینکه مصرف ۷۵ تا ۱۰۰ سانتی‌متر آب موجب کاهش قابل توجه شوری در عمق‌های مختلف خاک شد، از دیدگاه مدیریتی و اجرایی لزوماً نیازی به کاهش شوری خاک تا مقادیر بسیار پایین در کل نیم‌رخ وجود ندارد. در شرایط اقلیمی دشت سیستان، انتخاب گیاهان متحمل به شوری و تعیین هدف آبشویی بر اساس آستانه تحمل شوری گیاه می‌تواند راهکار عملی‌تر و اقتصادی‌تری نسبت به آبشویی کامل خاک باشد. هدف از اجرای آزمایش آبشویی در این پژوهش تعیین پتانسیل اصلاح‌پذیری خاک و تهیه منحنی‌های شوری‌زدایی و سدیم‌زدایی بود و مقادیر آب گزارش شده لزوماً به عنوان توصیه مدیریتی مستقیم برای بهره‌برداران ارائه نشده‌اند. منحنی‌های به‌دست‌آمده این امکان را فراهم می‌کنند که بسته به نوع محصول، آستانه تحمل شوری گیاه و شرایط اقتصادی، میزان آب مورد نیاز برای دستیابی به سطح مطلوب شوری تعیین شود. بنابراین در بسیاری از موارد، نیازی به کاهش شوری خاک تا کمتر از ۴ دسی‌زیمنس بر متر نبوده و می‌توان با انتخاب محصولات متحمل به شوری، اهداف واقع‌بینانه‌تری برای مدیریت آبشویی تعریف کرد.

نیم‌رخ شماره Nim2-13

بر اساس نتایج حاصل، میانگین میزان شوری عصاره اشباع خاک لایه‌های ۰-۲۵، ۲۵-۵۰، ۵۰-۷۵، ۷۵-۱۰۰، و

۱۰۰-۱۵۰ سانتی متری آن به ترتیب ۶۵/۳، ۳۵/۵، ۹/۱، ۸/۵، ۶/۹ دسی زیمنس بر متر، میانگین نسبت جذب سدیم در همان لایه ها به ترتیب ۱۸۶/۸، ۷۹/۱، ۵۰/۵، ۴۴/۷، ۳۱/۴ (میلی اکوی والان بر لیتر)^{۱/۲} و مقادیر درصد سدیم تبدالی لایه های آن نیز به ترتیب ۷۳/۳، ۵۳/۶، ۴۲/۳، ۳۹/۳، ۳۱ درصد است. بر اساس مشاهدات صحرایی عملیات آبخشویی و اصلاحی انجام شده در نیمرخ NIM2-13، به دلیل وجود لایه های سنگین دارای سیلت و رس زیاد، فرآیند آبخشویی بسیار کند پیش رفت. لایه سوم نیمرخ (۵۰-۷۵ سانتی متری) دارای ۶۰ درصد رس با کلاس بافت رسی سنگین است. نتایج این پژوهش نشان داد که وجود لایه های بسیار رسی در نیمرخ NIM2-13 نقش تعیین کننده ای در کاهش کارایی آبخشویی داشته است. مطالعات متعددی نیز نشان داده اند که در خاک های شور-سدیمی دارای لایه های ریزبافت، محدودیت هدایت هیدرولیکی و تورم رس ها موجب کاهش شدید سرعت انتقال آب و املاح در نیمرخ می شود. سوارز (Suarez, 2001) و قدیر و همکاران (Qadir et al., 2007) گزارش کردند که در چنین خاک هایی، حتی در صورت تأمین آب کافی و استفاده از اصلاح کننده های شیمیایی، محدودیت های فیزیکی خاک می تواند عامل اصلی کاهش بازده عملیات اصلاح باشد. نتایج به دست آمده در این پژوهش نیز این موضوع را تأیید می کند.

مقدار آب تخصیص یافته در هر هکتار ۸۷۰۰ متر مکعب در سال است که بر اساس ذخیره آب چاه نیمه ها و سطح اراضی زیر کشت تعیین شد. این در حالی است که با توجه به نتایج، حتی پس از اعمال ۱۰۰ سانتی متر آبخشویی (معادل ۱۰ هزار متر مکعب آب در هر هکتار)، هدایت الکتریکی لایه اول (۲۵-۰ سانتی متر) از ۶۵/۳ به ۱۴ دسی زیمنس بر متر و درصد سدیم تبدالی آن با وجود مصرف ۳۴ تن در هکتار گچ، از ۷۳ به ۴۹/۵ درصد رسید. به عبارتی، حتی با مصرف یک متر آب نیز، کلاس شوری و سدیمی آن از S4 و A4 به محدوده S2 و A3 رسیده است. این محدوده برای بسیاری از گیاهان زراعی

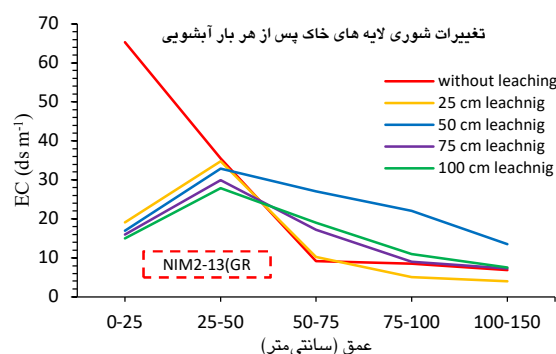
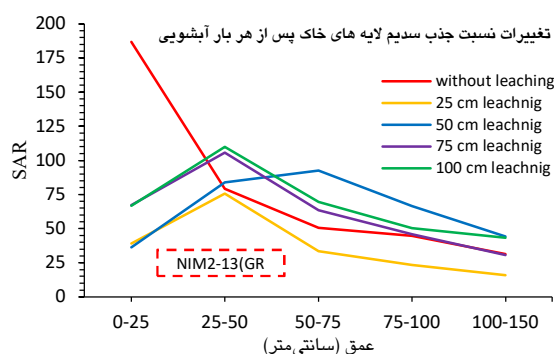
دارای محدودیت است. به نظر می رسد محدودیت شوری و سدیمی آن علاوه بر شرایط اقلیمی منطقه، تا حد زیادی تابع بافت سنگین این خاک ها است و عدم موفقیت آبخشویی و اصلاح در کاهش بیشتر شوری و سدیمی این خاک ها متأثر از شرایط فیزیکی خاک است. البته با وجود این شرایط، در صورت کاشت محصولات می مثل گندم، که دارای آستانه شوری ۶ دسی زیمنس بر متر (Mass and Hoffman, 1977) می باشند انتظار حداقل کاهش عملکرد به میزان ۵۰ درصد در این منطقه وجود خواهد داشت. یکی از توصیه های مهم برای اصلاح خاک هایی با این ویژگی ها در منطقه، اصلاح فیزیکی این خاک ها قبل از آبخشویی است. نتایج این پژوهش نشان داد که محدودیت اصلی اصلاح پذیری خاک سری چارک، نفوذپذیری پایین و بافت نسبتاً سنگین خاک است. در چنین شرایطی، برخی مطالعات استفاده از عملیات خاک ورزی عمیق، بهبود ساختمان خاک و افزودن مواد آلی را به عنوان راهکارهایی برای افزایش نفوذ آب و بهبود کارایی آبخشویی پیشنهاد کرده اند (Hassantabar-Shoubi et al., 2018; Jalali & Ranjbar, 2019; Mohammadi and Karimi, 2018; Rahimi et al., 2024). با این حال، اجرای گسترده روش هایی نظیر اختلاط شن با خاک در سطح مزرعه به دلیل هزینه های اجرایی بالا و محدودیت های اقتصادی، در بسیاری از مناطق عملی نیست و نیازمند ارزیابی اقتصادی و فنی جداگانه است. بنابراین، بررسی کارایی این روش ها در شرایط اقلیمی و اقتصادی دشت سیستان می تواند موضوع پژوهش های آینده باشد. مطالعات مروری و میدانی، خاک ورزی عمیق، مواد آلی و اصلاح کننده ها را برای بهبود ساختار و نفوذپذیری خاک های شور-سدیمی مطرح کرده اند، اما اجرای وسیع آنها همیشه از نظر اقتصادی توجیه پذیر نیست.

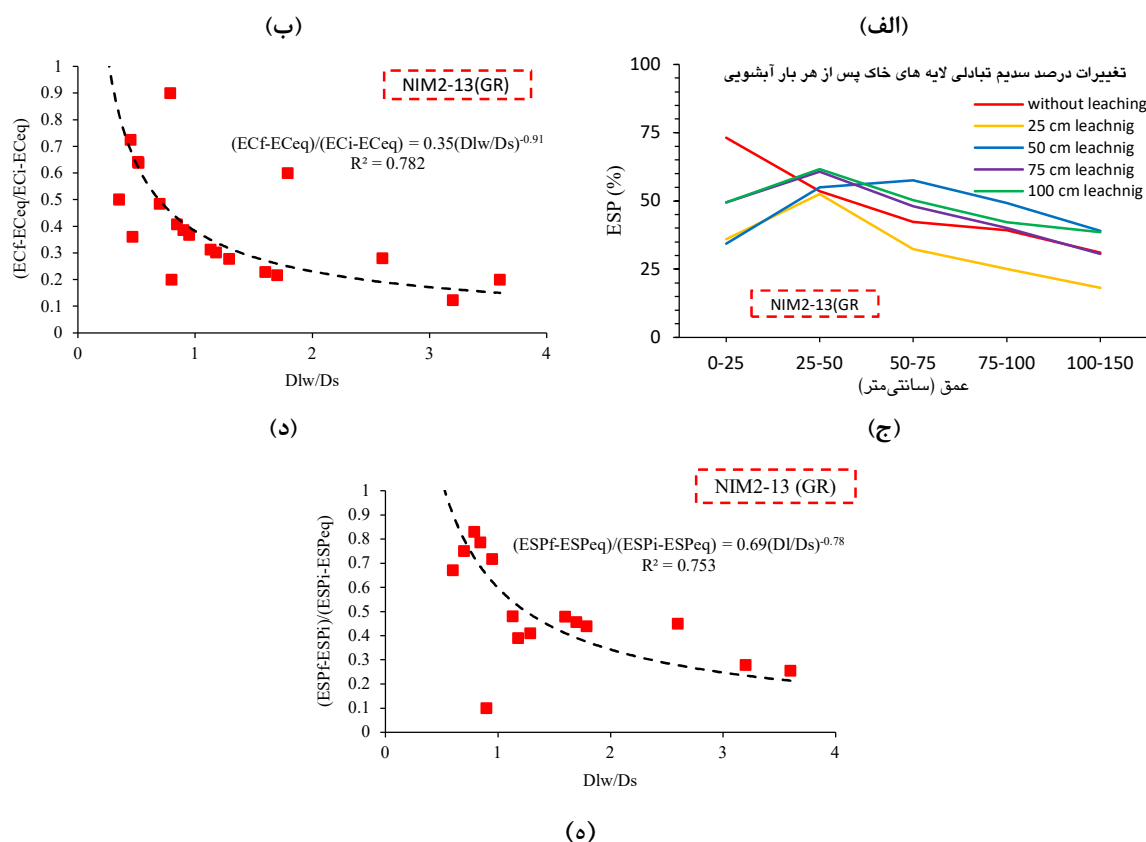
شکل ۲(الف)، تغییرات هدایت الکتریکی خاک را پس از هر بار آبخشویی نشان می دهد. بر این پایه، با افزایش مقدار آب آبخشویی از شوری لایه های بالایی کاسته شده ولی اعماق پایین تر با افزایش شوری مواجه می شوند.

انتقال مجدد املاح از لایه‌های زیرین به سطح خاک وجود دارد. بنابراین، نتایج این بخش بیش از آن‌که یک توصیه اجرایی مستقیم برای مدیریت مزرعه ارائه کند، محدودیت اصلاح‌پذیری این خاک و دشواری احیای آن را در شرایط موجود نشان می‌دهد.

بر پایه منحنی سدیم‌زدایی به دست آمده (شکل ۲-ه)، برای کاهش درصد سدیم تبدلی ۲۵ سانتی‌متر سطح خاک از ۷۳ به ۱۰ درصد حدود ۱۹۸/۷ سانتی‌متر آب به همراه مصرف گچ نیاز است. اما چنان‌چه وضعیت فیزیکی و نفوذپذیری خاک اصلاح شود، با مصرف مقادیری کمتر این میزان آب می‌توان به نتایج دلخواه رسید. مقادیر بسیار زیاد آب مورد نیاز برای شوری‌زدایی و سدیم‌زدایی این نیمرخ بیانگر آن است که محدودیت اصلی در این خاک صرفاً شوری اولیه نیست، بلکه ترکیب هم‌زمان شوری زیاد، سدیمی بودن شدید و شرایط نامطلوب فیزیکی خاک موجب کاهش قابلیت اصلاح‌پذیری آن شده است. نتایج مشابهی توسط آبرول و همکاران (Abate et al., 2021) و توث (Tóth, 2022) برای خاک‌های شدیداً شور-سدیمی گزارش شده است، به‌طوری‌که در برخی موارد هزینه و حجم آب مورد نیاز برای اصلاح کامل خاک از نظر اقتصادی و اجرایی قابل توجیه نبوده است. از این‌رو، در چنین اراضی ممکن است انتخاب گیاهان متحمل به شوری، مدیریت هدفمند آبشویی و بهره‌برداری محدود از اراضی، رویکردی عملی‌تر از تلاش برای اصلاح کامل خاک باشد.

تغییرات نسبت جذب سدیم و درصد سدیم تبدلی خاک پس از هر مرحله آبشویی در عمق‌های مختلف خاک در نیمرخ NIM2-13 به‌ترتیب در شکل‌های ۲(ب) و ۲(ج) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، حتی پس از کاربرد یک متر آب آبشویی و مصرف حدود ۳۴ تن در هکتار گچ، مقادیر SAR و ESP در این نیمرخ به حدود مطلوب نرسید. عدم کاهش کافی SAR و ESP با وجود مصرف حدود ۳۴ تن در هکتار گچ نشان می‌دهد که محدودیت اصلی در این خاک صرفاً کمبود منبع کلسیم نبوده است. وانگ و همکاران (Wang et al., 2023) نیز گزارش کردند که در خاک‌های بسیار شور-سدیمی، کارایی گچ زمانی کاهش می‌یابد که حرکت آب در نیمرخ محدود باشد، زیرا انتقال کلسیم آزادشده و خروج سدیم جابه‌جا شده به شدت وابسته به جریان آب است. بنابراین در چنین شرایطی، بهبود وضعیت فیزیکی خاک و افزایش نفوذپذیری می‌تواند حتی مهم‌تر از افزایش مقدار ماده اصلاح‌کننده باشد. بر اساس منحنی شوری‌زدایی مربوط به نیمرخ NIM2-13 (شکل ۲-د)، برای کاهش شوری ۲۵ سانتی‌متر سطحی این خاک تا حدود ۶ دسی‌زیمنس بر متر، به بیش از ۱۱۰ سانتی‌متر آب و حدود ۳۴ تن در هکتار گچ نیاز است. با این حال، با توجه به محدودیت شدید منابع آب در دشت سیستان، چنین روشی از نظر اجرایی و اقتصادی چندان واقع‌بینانه نیست. علاوه بر این، اصلاح صرفاً لایه سطحی خاک نمی‌تواند پایداری بلندمدت شرایط مطلوب را تضمین کند، زیرا در اقلیم خشک منطقه و تحت تأثیر تبخیر بالا و خیز موئینه، امکان





شکل ۲- تغییرات شوری (الف)، تغییرات نسبت جذب سدیم (ب)، تغییرات درصد سدیم تبادل (ج) لایه های خاک پس از هر بار آبشویی و (د) و (ه) به ترتیب منحنی های شوری زدایی و سدیم زدایی در نیمرخ NIM2-13 (نکته: در محاسبه آب خالص برای آبشویی، علاوه بر کسر رطوبتی تا حد ظرفیت مزرعه، تبخیر از سطح خاک بر اساس آمار هواشناسی ده ساله منطقه نیز اعمال شده است)

نیمرخ شماره NP-20

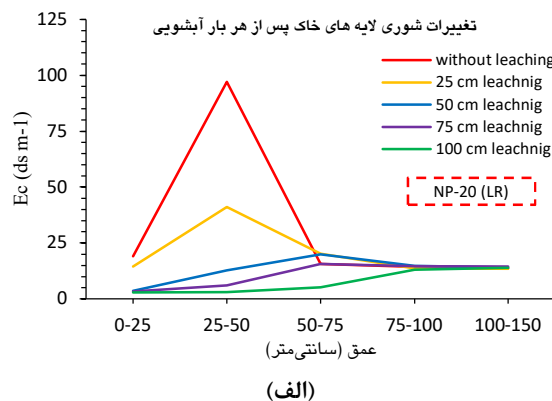
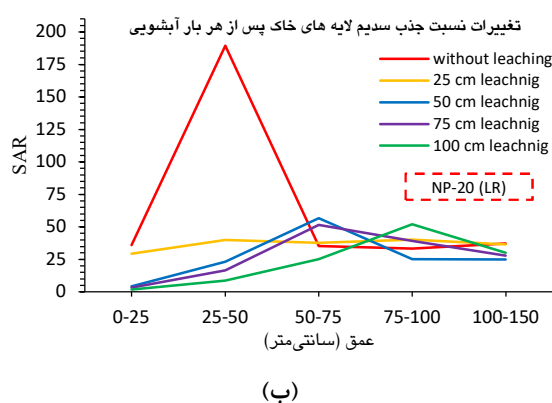
بر اساس نقشه شوری و قلیائیت، این نیمرخ در واحد عمرانی زهک سه و در پلی گونی با کلاس شوری و قلیائیت S3A2 و در سری خاک ارباب قرار دارد. کلاس بافت خاک سطحی لوم است. این نقطه برای عملیات همزمان آبشویی و اصلاح با گچ به میزان ۱۳/۵ تن در هکتار انتخاب شد. بر اساس نتایج، میانگین میزان شوری عصاره اشباع خاک لایه های ۰-۲۵، ۲۵-۵۰، ۵۰-۷۵، ۷۵-۱۰۰، و ۱۰۰-۱۵۰ سانتی متری آن به ترتیب ۱۹/۲، ۹۷/۲، ۱۵/۶، ۱۴/۳، و ۱۳/۶ دسی زیمنس بر متر است و میانگین نسبت جذب سدیم نیز در همان لایه ها به ترتیب ۳۶، ۱۸۹/۵، ۳۰/۴، ۳۳/۲، ۳۷/۲ می باشند.

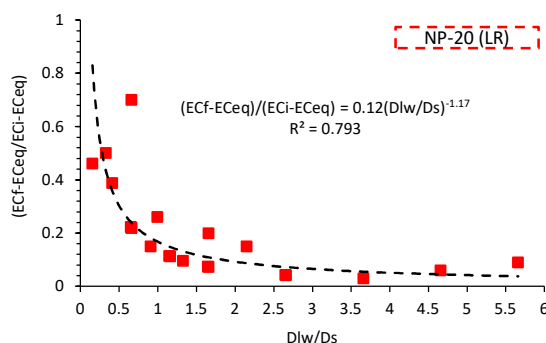
الف- آبشویی

روند تغییرات شوری خاک پس از هر مرحله آبشویی در شکل ۳-الف نشان داده شده است. بر این اساس، افزایش اولیه ۲۵ سانتی متر از آب آبشویی سبب تغییر چشمگیری در هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک، به خصوص در عمق ۲۵-۵۰ سانتی متر از نیمرخ خاک که از شوری اولیه بسیار زیادی برخوردار بوده، گردید. در این مرحله از عملیات آبشویی، شوری خاک در عمق ۵۰ - ۷۵ سانتی متر به جای کاهش، افزایش نیز یافت. افزایش موقت شوری در لایه های زیرین در مراحل اولیه آبشویی، پدیده ای رایج در فرآیند انتقال املاح در خاک های شور است و لزوماً به معنای عدم موفقیت آبشویی نیست. در واقع، با حرکت جبهه آب در خاک، املاح شسته شده از افق های سطحی به طور موقت در افق های پایین تر تجمع می یابند تا زمانی که حجم کافی آب برای انتقال آن ها به

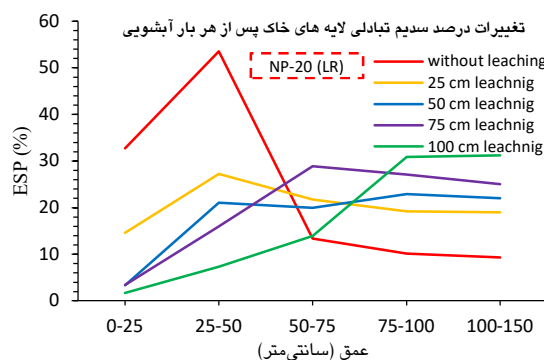
بسیار زیاد املاح از خاک‌های دارای بافت متوسط در سطح خاک تا عمق ۵۰ سانتی‌متری در اراضی واقع در محدوده طرح می‌باشد. با توجه به بافت متوسط، درصد سیلت زیاد و شوری بسیار زیاد (میانگین وزنی شوری ۵۰ سانتی‌متر سطحی خاک حدود ۶۰ دسی‌زیمنس بر متر است) و مساحت قابل توجه این اراضی در محدوده مطالعاتی این نتیجه‌گیری بسیار مهم و امیدوار کننده است. علاوه بر این بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که افزایش حدود ۵۰ سانتی‌متر ناخالص آب آبشویی، میزان شوری خاک سطحی را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد. این امر امکان تلفیق عملیات آبشویی و اصلاح را با کشت گیاهان مقاوم و نیمه مقاوم به شوری عملی می‌سازد. راندمان آبشویی، به‌خصوص در مراحل اولیه، در لایه‌هایی که از هدایت الکتریکی عصاره اشباع بیشتر برخوردارند به مراتب بیشتر است. به همین دلیل میزان املاح شسته شده از عمق ۲۵-۰ در مقایسه با عمق ۲۵-۵۰ سانتی‌متر، به دنبال افزایش میزان معینی از آب آبشویی، کمتر می‌باشد. در مراحل اولیه آبشویی میزان کاهش املاح در نیمرخ خاک سریع و به تدریج با افزایش میزان آب به‌کار گرفته شده برای آبشویی، میزان انتقال املاح از خاک کاهش می‌یابد.

اعماق بیشتر فراهم شود. نتایج مشابهی توسط ریچاردز (Richards, 1954) و آبرول و همکاران (Abrol et al., 1988) گزارش شده است که افزایش موقت شوری در لایه‌های میانی نیمرخ را بخشی طبیعی از فرآیند آبشویی خاک‌های شور دانسته‌اند. افزایش میزان آب آبشویی به تدریج سبب کاهش املاح محلول در افق‌های مختلف نیمرخ خاک شد. این کاهش ابتدا در افق‌های سطحی مشاهده شده و به تدریج افق‌های پایین‌تر را نیز در بر می‌گیرد. افزایش صد سانتی‌متر آب ناخالص آبشویی به خاک، شوری خاک تا عمق ۷۵ سانتی‌متر از سطح خاک را تا حد کلاس S0 در طبقه‌بندی اراضی شور کاهش داد. کارایی نسبتاً بالای آبشویی در این نیمرخ را می‌توان به بافت متوسط لایه‌های سطحی و نبود لایه‌های بسیار محدودکننده جریان آب نسبت داد. در مقایسه با نیمرخ NIM2-13 که دارای لایه‌های رسی سنگین و نفوذپذیری بسیار کم بود، انتقال املاح در این خاک با سهولت بیشتری انجام شد. وانگ و همکاران (Wang et al., 2023) و آباته و همکاران (Abate et al., 2021) نیز گزارش کردند که موفقیت عملیات آبشویی بیش از آنکه تابع شدت اولیه شوری باشد، به ویژگی‌های فیزیکی خاک و امکان حرکت آب در نیمرخ وابسته است. از نتایج بسیار مهم این بررسی امکان انحلال، شستشو و انتقال مقادیر





(د)



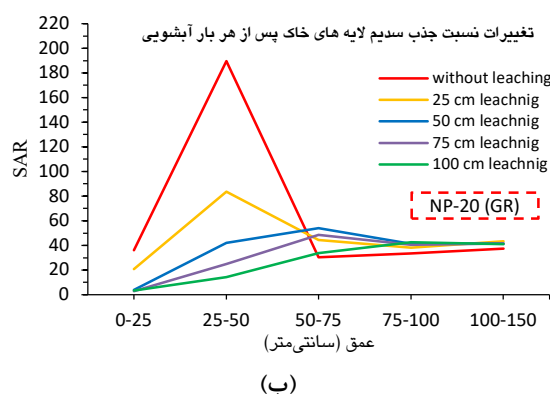
(ج)

شکل ۳- تغییرات شوری (الف)، تغییرات نسبت جذب سدیم (ب)، تغییرات درصد سدیم تبادلی (ج) لایه‌های خاک پس از هر بار آبیاری و (د) و منحنی شوری‌زدایی در نیم‌رخ NP-20 (LR) (نکته: در محاسبه آب خالص برای آبیاری، علاوه بر کسر رطوبتی تا حد ظرفیت مزرعه، تبخیر از سطح خاک بر اساس آمار هواشناسی ده ساله منطقه نیز اعمال شده است)

نسبت به کمبود کلسیم قابل تبادل سهم بیشتری در تغییر شاخص‌های سدیمی داشته است. وجود کربنات کلسیم در خاک‌های منطقه و همچنین حضور کلسیم و منیزیم در آب آبیاری می‌تواند بخشی از سدیم تبادلی را جایگزین کرده و امکان کاهش شاخص‌های سدیمی را بدون نیاز به مصرف مقادیر زیاد ماده اصلاح‌کننده فراهم نماید. نتایج مشابهی توسط قدیر و همکاران (Qadir et al., 2007) و توث (Tóth, 2022) در برخی خاک‌های آهکی مناطق خشک گزارش شده است. در مراحل اولیه آبیاری تغییرات قابل توجهی در میزان املاح محلول و همچنین درصد سدیم تبادلی خاک مشاهده شد. این امکان تلفیق عملیات آبیاری با کاشت گیاهان مقاوم و نیمه مقاوم به شوری را هنگام عملیات آبیاری آشکار می‌سازد. در اینجا لازم به یادآوری است که شستشوی اولیه املاح از طریق افزایش حجم مناسبی از آب برای آماده‌سازی خاک سطحی برای کشت گیاهان مقاوم به شوری در ابتدای عملیات اصلاح در این قبیل از خاک‌ها ضروری است. برآورد آب مورد نیاز برای شستشوی اولیه املاح با استفاده از منحنی آبیاری که برای این خاک ارائه شد عملی خواهد بود. منحنی شوری‌زدایی نیم‌رخ NP-20 در تیمار فقط آبیاری در شکل ۳-د آورده شده است. بر پایه این منحنی، برای آبیاری و رساندن هدایت الکتریکی ۵۰ سانتی‌متر سطحی خاک به ۶

شکل ۳-ب، تغییرات نسبت جذب سدیم لایه‌های خاک پس از هر بار آبیاری را نشان می‌دهد. بر این پایه، پس از ۲۵ سانتی‌متر آبیاری، نسبت جذب سدیم در لایه اول و به‌ویژه لایه دوم تغییر چشمگیری داشته است. ولی مقادیر SAR در اعماق پایین‌تر تغییری نکرده است. با ادامه آبیاری و مصرف ۵۰ سانتی‌متر آب، مقدار SAR به کمتر از ۸ و پس از آن با ادامه آبیاری تا ۱۰۰ سانتی‌متر آب مصرفی، مقادیر SAR در لایه اول و دوم به ۱/۹ و ۸/۸ رسید. به عبارتی برای کاهش شوری به ۴ دسی‌زیمنس و SAR به حدود ۴ (میلی‌اکی‌والان بر لیتر)^{۱/۲} تا عمق ۲۵ سانتی‌متری، مصرف ۵۰ سانتی‌متر ناخالص آب آبیاری کفایت می‌کند. تغییرات درصد سدیم تبادلی در مراحل مختلف آبیاری در اعماق ۰-۲۵ و ۵۰-۲۵ سانتی‌متر در شکل ۳-ج نشان دهنده کاهش قابل توجه درصد سدیم تبادلی در مراحل اولیه آبیاری (حدود ۵۰ سانتی‌متر آب آبیاری ناخالص) است. به‌طور کلی افزایش ۱۰۰ سانتی‌متر آب آبیاری به خاک بسیار ثمربخش بوده و نتایج حاصل نشان‌دهنده این واقعیت است که این گروه از خاک‌ها از توانایی کافی برای اصلاح‌پذیری بدون نیاز به افزایش ماده اصلاح‌کننده، برای غلبه بر محدودیت سدیمی بودن خاک برخوردارند. کاهش قابل توجه SAR و ESP حتی در تیمار بدون گچ نشان می‌دهد که در این خاک، تجمع نمک‌های محلول

کننده در خاک تفاوت چندانی نداشت. بر پایه مدل ارائه شده در این نمودار (شکل ۴-د) نیز، برای کاهش شوری ۵۰ سانتی‌متر سطحی خاک به ۶ دسی‌زیمنس بر متر حدود ۵۰ سانتی‌متر آب خالص آبشویی نیاز بود. بر اساس منحنی شوری‌زدایی همین خاک بدون ماده به‌ساز (شکل ۳-د) مقدار آب مورد نیاز برای کاهش هدایت الکتریکی ۵۰ سانتی‌متر سطحی خاک به شوری حد آستانه تحمل گیاه گندم (۶ دسی‌زیمنس بر متر)، ۵۸ سانتی‌متر آب خالص نیاز بود. از این‌رو، افزودن گچ نتوانسته است تغییر چندانی در کاهش آب مصرفی در اثر تأثیر بر نفوذپذیری خاک داشته باشد. عدم تفاوت محسوس بین تیمار آبشویی و تیمار آبشویی همراه با گچ نشان می‌دهد که در این نیمرخ، تأمین کلسیم عامل محدودکننده اصلی فرآیند اصلاح نبوده است. در چنین شرایطی، زمانی که خاک از نفوذپذیری مناسب برخوردار باشد و آب آبیاری نیز دارای مقادیر قابل توجهی کلسیم و منیزیم باشد، آبشویی به تنهایی می‌تواند بخش عمده‌ای از فرآیند شوری‌زدایی و سدیم‌زدایی را انجام دهد. وانگ و همکاران (Wang et al., 2023) گزارش کردند که اثر گچ عمدتاً در خاک‌هایی بارز است که محدودیت شدید سدیمی داشته باشند یا منبع کافی کلسیم در سیستم خاک وجود نداشته باشد. نتایج این پژوهش نیز نشان می‌دهد که مصرف ۱۳/۵ تن در هکتار گچ در خاک NP-20 مزیت قابل توجهی نسبت به آبشویی منفرد ایجاد نکرده است.

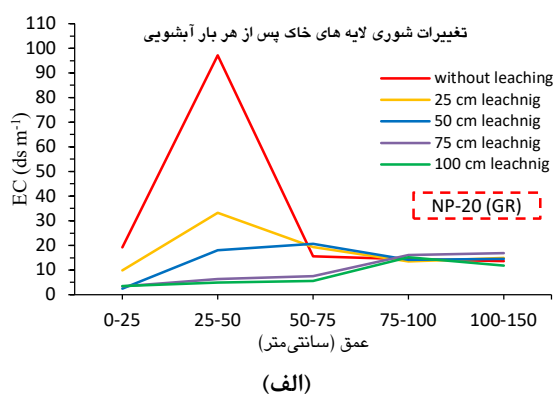


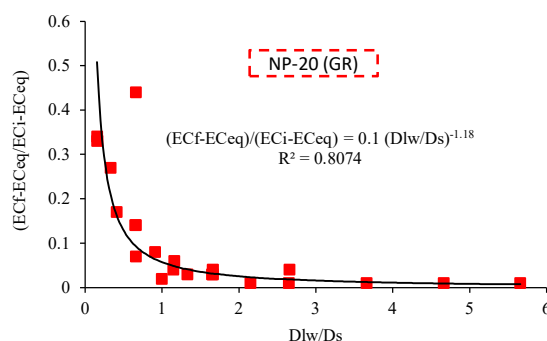
دسی‌زیمنس بر متر حدود ۵۸ سانتی‌متر آب خالص آبشویی نیاز است.

ب- آبشویی و اصلاح همزمان

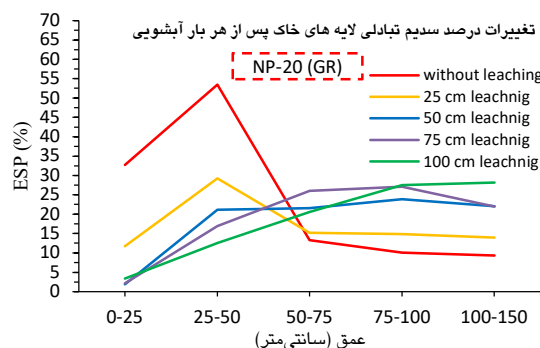
مقایسه نتایج، تفاوت محسوسی بین افزایش و عدم افزایش ماده اصلاح کننده بر روی دو محدودیت عمده خاک محل آزمون یعنی شوری و سدیمی نشان نمی‌دهد. تنها تفاوت مشاهده شده کاهش اندک هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک در تیمار همراه با گچ در مقایسه به تیمار بدون گچ به دنبال افزایش اولین ۲۵ سانتی‌متر از آب آبشویی ناخالص بود. به‌طوری که در تیمار فقط آبشویی، پس از اولین مرحله آبشویی، شوری ۲۵ سانتی‌متر سطحی خاک از ۱۹/۲ دسی‌زیمنس بر متر به ۱۴/۵ دسی‌زیمنس بر متر رسید، در حالی که در تیمار آبشویی همراه با گچ، شوری همین عمق پس از اولین مرحله آبشویی به ۹/۹ دسی‌زیمنس بر متر رسید. این امر شاید به دلیل تأثیر گچ در افزایش اندک نفوذپذیری خاک سطحی نسبت به تیمار بدون گچ بود. همان‌طور که قبلاً نیز یاد شد، نفوذپذیری این نیمرخ پس از افزودن گچ به خاک کمی افزایش یافت.

نمودار شوری‌زدایی نیمرخ NP-20 در تیمار آبشویی همراه با گچ در شکل ۴-الف آورده شده است. مقایسه نمودارهای ارائه شده در شکل ۴-د و شکل ۳-د، تفاوت چندانی را در شیب منحنی‌های آبشویی نشان نمی‌دهد. این بدین معنی است که پتانسیل انتقال املاح از خاک در اثر آبشویی در حضور و یا حضور نداشتن ماده اصلاح





(د)



(ج)

شکل ۴- تغییرات شوری (الف)، تغییرات نسبت جذب سدیم (ب)، تغییرات درصد سدیم تبادلی (ج) لایه‌های خاک پس از هر بار آبیاری و (د) و منحنی شوری‌زدایی در نیم‌رخ NP-20 در آبیاری و اصلاح همزمان (نکته: در محاسبه آب خالص برای آبیاری، علاوه بر کسر رطوبتی تا حد ظرفیت مزرعه، تبخیر از سطح خاک بر اساس آمار هواشناسی ده ساله منطقه نیز اعمال شده است)

حساس به سدیم هستند در این اراضی جلوگیری شود. رابطه بین درصد سدیم تبادلی باقی‌مانده در خاک و مقادیر مختلف آب آبیاری در شکل ۴-ج ارائه شده است. در اینجا نیز مشابه آنچه در رابطه با تیمار فقط آبیاری به آن اشاره گردید در اولین مراحل از آبیاری کاهش چشمگیری در درصد املاح باقیمانده در خاک و همچنین درصد سدیم تبادلی باقیمانده در خاک مشاهده می‌شود. این پدیده برای درصد سدیم تبادلی نیز در شرایط یادشده صادق بود. افزایش معادل ۱۳/۵ تن در هکتار گچ به خاک کاهش محسوسی را در درصد سدیم تبادلی نسبت به تیمار آبیاری بدون گچ نشان نمی‌دهد. از آنجائی که غلبه بر سدیم در این اراضی با و بدون استفاده از ماده اصلاح‌کننده عملی است، بنابراین استفاده از ماده اصلاح‌کننده در این اراضی پیشنهاد نمی‌شود. با توجه به این امر منحنی شوری‌زدایی شکل ۳-د برای آبیاری خاک‌های نیم‌رخ NP-20 به‌عنوان منحنی نهایی آبیاری این خاک‌ها ارائه شد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش قابلیت اصلاح خاک‌های شور و سدیمی دشت سیستان در اثر مصرف مقادیر مختلفی آب در حضور یا عدم حضور به‌ساز ارزیابی شد. نتایج نشان داد که قابلیت اصلاح خاک‌های شور و سدیمی دشت سیستان به‌شدت تابع ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی

روند تغییرات نسبت جذب سدیم پس از مراحل مختلف آبیاری در شکل ۴-ب نشان داد که پس از اولین مرحله آبیاری، مقادیر نسبت جذب سدیم در عمق ۲۵-۵۰ سانتی‌متر و ۵۰-۲۵ سانتی‌متر به ترتیب ۴۳ و ۵۶ درصد کاهش داشته‌اند. پس از مرحله دوم آبیاری، نسبت جذب سدیم خاک به ۳/۸ یعنی در محدوده بی‌خطر (کمتر از ۸ درصد) رسیده بود ولی در عمق ۵۰-۲۵ سانتی‌متری ۴۲/۱ بود، اما به‌صورت میانگین می‌توان گفت پس از شستشوی خاک با ۵۰ سانتی‌متر آب ناخالص آبیاری، میانگین وزنی نسبت جذب سدیم در ۵۰ سانتی‌متر سطحی خاک به ۲۲ رسید. به‌نظر می‌رسد چنانچه ۳۰ سانتی‌متر سطحی خاک مطرح باشد و گیاهانی که قرار است کاشته شوند عمق توسعه ریشه آن‌ها از ۳۰ سانتی‌متر تجاوز نکند، عملیات آبیاری با حدود ۵۰ سانتی‌متر آب خالص برای کاهش سدیم و شوری کفایت می‌کند. عمق توسعه ریشه ۳۰ سانتی‌متری در بیشتر گیاهان زراعی دیده می‌شود ولی چنانچه کاشت گیاهان باغی که عمق توسعه ریشه بیشتری دارند در این اراضی مطرح باشد نیاز است آبیاری بیشتری برای کاهش سدیم خاک در عمق‌های بیشتر انجام شود. همچنین توصیه می‌شود گیاهانی مثل یونجه که ریشه عمیق دارند در این اراضی کاشته نشود. با توجه به شرایط حاضر که مشکل کمبود آب برای آبیاری وجود دارد بهتر است از کاشت گیاهان با ریشه عمیق و همچنین گیاهانی که

با توجه به محدودیت منابع آب در دشت سیستان، هدف عملیات آبشویی نباید لزوماً کاهش شوری خاک به مقادیر بسیار پایین باشد، بلکه تعیین سطح هدف شوری باید بر اساس نوع محصول، آستانه تحمل شوری گیاه، عمق توسعه ریشه و شرایط اقتصادی بهره‌برداری انجام شود. در بسیاری از موارد، کشت گیاهان متحمل به شوری همراه با آبشویی محدود و هدفمند می‌تواند راهکاری عملی‌تر و اقتصادی‌تر از اصلاح کامل خاک باشد. نتایج این پژوهش می‌تواند در برنامه‌ریزی احیای اراضی شور، تعیین اولویت سرمایه‌گذاری در پروژه‌های توسعه کشاورزی و برآورد نیاز آب آبشویی در دشت سیستان مورد استفاده قرار گیرد. پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده، پایداری بلندمدت اثر آبشویی، احتمال شورشدگی مجدد خاک در اثر تبخیر و خیز موئینه، نقش بهبود زهکشی و همچنین ارزیابی اقتصادی روش‌های مختلف اصلاح خاک در شرایط اقلیمی سیستان مورد بررسی قرار گیرد.

REFERENCES

- Abate, S., Belayneh, M., & Ahmed, F. (2021). Reclamation and amelioration of saline-sodic soil using gypsum and halophytic grasses: Case of Golina-Addisalem irrigation scheme, Raya Kobo Valley, Ethiopia. *Cogent Food & Agriculture*, 7(1), 1859847. <https://doi.org/10.1080/23311932.2020.1859847>
- Abrol, I. P., Yadav, J. S. P., & Massoud, F. I. (1988). *Salt-affected soils and their management* (Vol. 39). Food & Agriculture Org.
- Consulting Engineers I. (1980). Report on the reclamation and improvement of saline and alkaline lands in the Sistan downstream and upstream areas. Sistan and Baluchestan Regional Water Joint Stock Company.
- FAO. 2024. Global status of salt-affected soils - Main report. Rome. <https://doi.org/10.4060/cd3044en>
- Hassantabar-Shoubi, S., & colleagues. (2018). Amelioration of a saline-sodic clay soil using dissolved organic carbon. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 8(3), 45–60. https://ejournals.gau.ac.ir/article_4087.html
- Jalali, M., & Ranjbar, F. (2019). Laboratory evaluation of saline-sodic soil reclamation using leaching columns and organic amendments. *Iranian Water and Soil Research*, 50(1), 123–138. https://journal.urmia.ac.ir/article_120649.html
- Maas, E. V., & Hoffman, G. J. (1977). Crop salt tolerance—current assessment. *Journal of the irrigation and drainage division*, 103(2), 115-134. <https://doi.org/10.1061/JRCEA4.0001137>
- Mohammadi, R., & Karimi, A. (2019). Effects of organic matter, gypsum, and leaching on physico-chemical properties of a sodic soil. *Journal of Water and Soil*, 33(4), 267–282. https://journals.ut.ac.ir/article_69678.html
- Pazira, E., & Keshavarz, A. (1998). Studies on appropriate depth of leaching water, A case study in South-east part of Khuzestan Province, Iran. *Proceedings of the International Workshop on the Use of Saline and Brackish Water for Irrigation*, Bali, Indonesia, pp: 328-338.
- Qadir, M., Oster, J. D., Schubert, S., Noble, A. D., & Sahrawat, K. L. (2007). Phytoremediation of sodic and saline-sodic soils. *Advances in agronomy*, 96, 197-247. [http://dx.doi.org/10.1016/s0065-2113\(07\)96006-x](http://dx.doi.org/10.1016/s0065-2113(07)96006-x).
- خاک است و نمی‌توان یک نسخه مدیریتی واحد برای تمامی اراضی منطقه ارائه نمود. در نیمرخ HI1-11 و NP-20، آبشویی به تنهایی یا همراه با مقادیر محدود گچ توانست موجب کاهش قابل‌توجه شوری و شاخص‌های سدیمی شود، در حالی که در نیمرخ NIM2-13 به دلیل شوری اولیه بسیار زیاد، بافت سنگین و نفوذپذیری پایین، حتی مصرف یک متر آب و ۳۴ تن در هکتار گچ نیز نتوانست شرایط خاک را به محدوده مطلوب برای بسیاری از محصولات زراعی برساند. نتایج همچنین نشان داد که در برخی خاک‌های منطقه، کاهش SAR و ESP بدون مصرف مواد اصلاح‌کننده نیز امکان‌پذیر است. این موضوع احتمالاً به وجود منابع طبیعی کلسیم در خاک، حضور کلسیم و منیزیم در آب آبیاری و قابلیت مناسب انتقال املاح در برخی خاک‌ها مربوط است. بنابراین مصرف گچ در همه اراضی شور و سدیمی منطقه ضرورت نداشته و باید بر اساس ویژگی‌های هر خاک و نتایج آزمایش‌های محلی تصمیم‌گیری شود.

- Rahimi, A., Zamani, J., & Nouri, H. (2024). Combined organic and inorganic amendments improve salinity, sodicity and biological properties of a saline-sodic soil. *Asr Research Journal*, 11(2), 95–112. https://asr.urmia.ac.ir/article_121476.html
- Richards, L.A. (Ed.). 1954. *Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils*. USDA Agricultural Handbook No. 60. United States Department of Agriculture, Washington, DC, USA. 160 p.
- Saadat, S., esmaeelnejad, L., rezaei, H. & Mirkhani, R. (2024). Monitoring soil Salinity of the Sistan plain using field data and remote sensing. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 55(8), 1297-1309. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.378077.669733> (In Persian with English abstract)
- Suarez, D. L. (2001). Sodic soil reclamation: Modelling and field study. *Australian Journal of Soil Research*, 39(6), 1225-1246. <https://doi.org/10.1071/SR00094>
- Tehran Water and Soil Consulting Engineers. (2015). Design and Construction (EPC) of water transmission and distribution to Sistan lands. Zabol area, Civil Unit 1, soil science report, layering, water permeability coefficient and soil permeability
- Tóth, T. 2022. Review of Sodic Soil Reclamation with a Snapshot of Current Research Activity. *Chinese Geographical Science*, 32(6): 1099–1109. <https://doi.org/10.1007/s11769-022-1310-4>.
- Wang, J., Zhao, A., Ma, F., Liu, J., Xiao, G., & Xu, X. (2023). Amendment of saline–alkaline soil with flue-gas desulfurization gypsum in the Yinchuan plain, Northwest China. *Sustainability*, 15(11), 8658. <https://doi.org/10.3390/su15118658>