

Research Paper

Field leaching and evaluation of theoretical and experimental models of soil leaching in the Sistan plain

Seyed Reza Tabatabaei ¹, Mohammad Mahdi Chari ^{2*}, Peyman Afrasiab ³, Masoomeh Delbari ⁴,

¹ Msc student, Water Engineering Department, Faculty of water and soil, University of Zabol, Zabol, Iran

² Associate Professor, Water Engineering Department, Faculty of water and soil, University of Zabol, Zabol, Iran

³ Associate Professor, Water Engineering Department, Faculty of water and soil, University of Zabol, Zabol, Iran

⁴ Associate Professor, Water Engineering Department, Faculty of water and soil, University of Zabol, Zabol, Iran



10.22125/IWE.2023.416450.1750

Received:
September 15, 2023
Accepted:
January 21, 2024
Available online:
May 5, 2024

Keywords:
**Leaching, Saline soil
Electrical conductivity,
Series of Reservoirs
Model, Sodium
adsorption ratio**

Abstract

Improvement of saline soils is very important from the point of view of soil and water resources conservation. Excess Solution salts in the root zone can reduce water uptake by the plant due to reduced soil osmotic potential. Necessary strategy in dealing with this issue is reducing the soil salinity to optimum level by capital leaching. The purpose of this study was to investigate the application of different amounts of leaching water in reducing salinity and evaluating experimental and theoretical models in predicting final salinity. This research was carried out in a part of Mohammadabad lands of Sistan plain as a randomized complete block. This experiment are carried out with five treatments and four iterations using test plots with one-to-one meter. Leaching was performed using 100 cm of water in four intervals of 25 cm. The required physical and chemical analyses before and after leaching and after the application of each irrigation cycle in treatments and at different depths up to 100 cm of soil were performed on the collected data. The results showed that the use of 100 cm of water for leaching could reduce the soil salinity class from S2A2 to S1A2. Experimental and theoretical models were evaluated and the results showed that theoretical models predicted the final salinity better than experimental models. Of all the experimental and theoretical models studied in this study, the theoretical model of a single reservoir with a correlation coefficient of 94% had the best results.

1. Introduction

Improvement of saline soils is very important from the point of view of soil and water resources conservation. In saline soils, crop production is adversely affected by soluble salts within the root zone as well as by shallow saline water table. Excess Solution salts in the root zone can reduce water uptake

* **Corresponding Author:** Mohammad Mahdi Chari

Address: Water Engineering Department, Faculty of water and soil, University of Zabol, Zabol, Iran
Email: m.mahdi.chari@gmail.com
Tel: 09367220062

by the plant due to reduced soil osmotic potential. Necessary strategy in dealing with this issue is reducing the soil salinity to optimum level by capital leaching.

The purpose of this study was to investigate the application of different amounts of leaching water in reducing salinity in Sistan region soils and evaluating experimental models including Leffelaar and Sharma (1977), Pazira and Kawachi (1981), Pazira and Keshavarz (1998) and theoretical leaching models including reservoirs model (SRM), series of reservoirs (SRM), Theoretical Plate – Thickness Model (TPTM) in predicting final salinity.

2. Materials and Methods

Study area

Located in south east of Iran, Sistan region is one of the areas characterized with great soil spatial variability. This research farm is located at coordinates of 61 degrees 32 minutes East and 31 degrees 2 minutes North and is 481 m above sea level. According to Köppen–Geiger climate classification, Zabol climate is classified as hot and dry climate with warm and dry summers.

Experimental models

Lafler and Sharma (1977) the equation indexes for their soils considering the equilibrium electric conductivity (ECe) and initial moisture of soil as well. This equation is as following:

$$\left[\frac{(EC_f - EC_i)}{(EC_{eq} - EC_{eq})} \right] = 0.062 \left(\frac{D_s}{D_{lw}} \right) + 0.034 \quad (1)$$

Pazira and Kavachi (1981) presented a model for Iran's soils, particularly is applicable for central parts of Khuzestan:

$$\left[\frac{(EC_f - EC_{eq})}{(EC_i - EC_{eq})} \right] = 0.076 \left(\frac{D_s}{D_{lw}} \right) + 0.023 \quad (2)$$

Studies related to the preparation and compilation of this experimental model in salinity and sodium fields in the southeastern part of Khuzestan province through field experiments have been performed on the model plots (Pazira and Keshavarz):

$$\left[\frac{(EC_f - EC_{eq})}{(EC_i - EC_{eq})} \right] = 0.0764 \left(\frac{D_s}{D_{lw}} \right)^{0.864} \quad (3)$$

Theoretical models

Reservoirs model (SRM)

This model developed by Van der Molen (1979), In this model, the soil is assumed to be a reservoir with a volume (V) that has the same amount of moisture or soil solution (liquid phase) with an initial concentration of C_0 . During the leaching process, C_i leaching gradually replaces the soil solution.

$$C_t = C_i + (C_0 - C_i)e^{-\frac{t}{T}} \quad (4)$$

Where, C_t is the concentration of salt in the outflow of the reservoir (soil) at time t and T at stop time.

Series of Reservoirs Model (SRM)

In a similar way, the expressions corresponding to the concentration of the effluents from the second (C_2), the third (C_3) and the fourth (C_4) reservoir are obtained. Therefore, the general equation for the concentration in n th reservoir is of the following form:

$$C_n = C_i + (C_0 - C_i)e^{-f\frac{t}{T}} \sum_{k=0}^{k=n-1} \left(1 + \frac{f^n t^n}{n! \cdot T^n}\right) \quad (5)$$

Theoretical plate-thickness model (TPTM)

This model considers the soil profile to be a continuous column. Glueckauf (1949) developed a theoretical formulation describing the behavior of such a column.

$$C - C_i = \frac{(C_0 - C_i)}{2} \left[\operatorname{erfc} \frac{f \cdot P - 1}{\sqrt{2f \cdot P}} \sqrt{N} - e^{2N} \cdot \operatorname{erfc} \frac{f \cdot P + 1}{\sqrt{2f \cdot P}} \sqrt{N} \right] \quad (6)$$

Where $P = D_w / \theta_{fc} \cdot D_s$, $N = D_s / 2K$; θ_{fc} is the soil moisture content at field capacity; D_w denotes the net depth of leaching water.

Finally, the values obtained from field and laboratory experiments and the values obtained from experimental and theoretical models were compared through statistical statistics of root mean square error (RMSE) and coefficient of determination (R^2).

3. Results

The results show that with the increase of leaching to the plots, the electrical conductivity and the percentage of exchangeable sodium have decreased, but this decrease is better seen in the electrical conductivity, so that in the first application of applied water to a depth of 50 cm, Electrical conductivity and percentage of exchangeable sodium have decreased significantly, but in depth the opposite trend has been observed.

The results show that among the experimental models, the lowest value of RMSE was related to the receptive Pazira and Kavachi and Pazira and keshavarz models with a value of 0.16 and for a depth of 0-25 cm. The maximum value of RMSE is related to the Pazira and Kavachi model with a value of 3.35 and for a depth of 0-100 cm. The predicted salinity coefficient had the highest value equal to 0.88 in the Pazira and Kavachi model and a depth of 0-75 cm.

Among the theoretical models, the lowest value of RMSE was related to the reservoir series model (SRM) and TPTM with a value of 0.03 and a depth of 0-25 cm. The maximum value of RMSE is related to the TPTM model with a value of 3.47 and a depth of 0-100 cm. The predicted salinity coefficient had the highest value equal to 0.99 in SRM model and a depth of 0-25 cm.

4. Discussion and Conclusion

In general, it can be concluded that theoretical models predicted the final salinity better than experimental models. Of all the experimental and theoretical models studied in this study, the theoretical model of a single reservoir with a correlation coefficient of 94% had the best results.

5. Six important references

- 1) Asadi S., Homae M., Pazira E. 2012. Modeling leaching requirement for desalination of saline soils. Iranian Water and soil resources conservation. 2 (2):65-84.
- 2) Corwin, D.L., Rhoades, J.D. and Simunek, J. 2007. Leaching requirement fore soil salinity control : Steady – state versus transient models. Agricul , Water Manage, 90(3):165-180.

- 3) Mashal M., Daneshvar M., Emami S., Varaviour M. 2013. Evaluation of theoretical salt leaching models (Case study: Labar-Saveh plan). Iranian Journal of water and irrigation management. 3(1): 121-134.
- 4) Mohammadzadeh, M., Homaei, M., Asadi Kapourchal, S., Mahnaz Eskandari, M. 2020. Evaluating efficiency of theoretical saline soils leaching models in Azadegan plain. Iranian Journal of Irrigation and Water Engineering. 10(40): 144-165.
- 5) Pazira, E. and Kawachi, T. 1981. Studies on appropriate depth of leaching water, Iran .A case study. Journal of Integrated Agricultural Water agricultural production in South Asia. Agriculture Water Management, 78 (1-2): 136-151.
- 6) Rajabzadeh, F., Pazira, E. Mahdian, MH. Mahmoudi, S. and Heidarizadeh, M. 2009. Leaching saline and sodic soils along with reclamation-rotation program in the mid-part of Khuzestan, Iran. Journal of Applied Science, 9: 4020-4025.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

This work was supported by University of Zabol [grant number: UOZ-GR-7644].



آبشویی صحرائی و ارزیابی مدل‌های نظری و تجربی آبشویی خاک دشت سیستان

سید رضا طباطبایی^۱، محمد مهدی چاری^{۲*}، پیمان افراسیاب^۳، معصومه دلبری^۴

تاریخ ارسال: ۱۴۰۲/۰۶/۲۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۰۱

مقاله پژوهشی

چکیده

بهسازی خاک‌های شور از دیدگاه حفاظت منابع خاک و آب اهمیت فراوانی دارد. وجود بیش از حد نمک‌های محلول در ناحیه ریشه می‌تواند باعث کاهش جذب آب توسط گیاه به دلیل کاهش پتانسیل اسمزی محلول خاک شود. راهبرد لازم در مواجهه با این مسئله، کاهش شوری خاک تا حد بهینه از راه آبشویی املاح و جلوگیری از ماندابی شدن آن‌ها است. هدف از این تحقیق بررسی کاربرد مقادیر متفاوت آب آبشویی در کاهش شوری و ارزیابی مدل‌های تجربی و نظری در پیش‌بینی شوری نهایی بوده است. این تحقیق در بخشی از اراضی محمدآباد دشت سیستان به صورت طرح کاملاً تصادفی اجرا گردید. آزمون‌های صحرائی به روش غرقاب متناوب با استفاده از کرت‌های آزمایشی با آرایش یک در یک متر، با پنج تیمار و در چهار تکرار اجرا گردید. آبشویی با کاربرد ۱۰۰ سانتی‌متر آب آبشویی در چهار تناوب ۲۵ سانتی‌متری اجرا شد. نمونه‌های خاک قبل و بعد از آبشویی و پس از کاربرد هر تناوب آبیاری در تیمارها و در اعماق مختلف تا ۱۰۰ سانتی‌متری خاک برداشت شد و مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد کاربرد ۱۰۰ سانتی‌متر آب برای آبشویی توانست کلاس شوری خاک را از S₂A₂ به S₁A₂ تقلیل دهد. مدل‌های تجربی و نظری مورد ارزیابی قرار گرفتند. بر اساس نتایج کمترین مقدار RMSE در مدل‌های تجربی مربوط به مدل پذیرا و کشاورز و پذیرا و کاوچی با مقدار ۰/۱۶ و برای عمق ۰-۲۵ سانتی‌متری و در مدل‌های نظری مربوط به مدل سری مخازن (SRM) با مقدار ۰/۰۳ و برای عمق ۰-۲۵ سانتی‌متری بوده است.

واژه‌های کلیدی: آبشویی، مدل سری مخازن، خاک شور، هدایت الکتریکی، نسبت جذب سدیم

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران. Email: seyedreza22182218@gmail.com

^۲ دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل (نویسنده مسئول). Email: mmahdichari@uoz.ac.ir

^۳ دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران. Email: P_Afrasiab@yahoo.com

^۴ دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران. Email: mas_delbari@yahoo.com

مقدمه

مدیریت منابع آب و خاک یکی از مباحث مهم برای تأمین نیاز غذایی جمعیت در حال رشد جهان است. شوری خاک یکی از فرایندهای مهم تخریب اراضی به خصوص در مناطق خشک و نیمه خشک به شمار می آید (Katerji et al 2005). از طرفی با توجه به جمعیت رو به افزایش بشر و بالا رفتن سطح استاندارد زندگی جهانی، این امر نیاز به تولید محصولات و فراورده های کشاورزی بیشتر را اجتناب ناپذیر ساخته است. به همین سبب هر روز زمین های بیشتری زیر کشت قرار گرفته و آب های بیشتری مهار می گردد که در نتیجه آن با رشد جمعیت و توسعه کشاورزی، اراضی زیادی از حالت طبیعی خود خارج و با شور و قلیایی شدن، فرسایش و ماندابی، بهره وری خود را از دست داده اند. این پدیده در مناطق خشک و نیمه خشک با گرایش خاک ها به سمت شور و سدیمی شدن بیشتر خود را نشان داده اند (رضاییان و همکاران، ۱۳۹۶).

شور شدن خاک فرایندی است که طی آن تأثیر تجمع املاح در قشر سطحی خاک بر ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خاک از جمله فشار اسمزی، نفوذپذیری و هدایت هیدرولیکی، سبب اختلال جدی در رشد و نمو بیشتر گیاهان یا توقف کامل رشد آن ها می شود (Farifte et al 2005; Balkhi et al., 2022). منظور از اصلاح خاک های شور، آبشویی نمک های محلول از ناحیه رشد ریشه می باشد. در عمل برای دستیابی به این نتیجه، مقدار قابل توجهی آب به عنوان آب آبشویی به کار می رود (اسدی کپورچال و همکاران، ۱۳۹۱). (Helalia et al (2021) شوری فصلی خاک و جذب آب ریشه را به عنوان تابعی از شوری آب آبیاری و شوری فصلی خاک مورد ارزیابی قرار داد. نتایج نشان داد که کاهش جذب آب ریشه با اثرات تجمعی استفاده از آب های شور در سال های قبل، حتی زمانی که باران برای شستشوی نمک ها در طول یک سال مرطوب کافی بود، ارتباط زیادی دارد. (Dong et al (2022) تأثیر آبشویی در نمک زدایی در آبیاری قطره ای را مورد ارزیابی قرار داد. نتایج نشان داد که در آبیاری قطره ای استفاده از ضریب آبشویی ۴۲/۶٪ نرخ نمک زدایی ۹۱/۸٪ در لایه ۰ تا ۱۲۰ سانتی متری ایجاد می کند.

ارزیابی مقدار آب مورد نیاز برای آبشویی نمک های محلول خاک از اقدامات مهم در برنامه ریزی شوری زدایی خاک های شور و سدیمی است (Corwin et al 2007). عمق آب لازم برای آبشویی نمک ها، بستگی به میزان شوری اولیه، بافت و عمق خاک، گیاهان انتخابی در الگوی کشت و روش آبشویی نمک-های محلول خاک دارد (Konuku et al 2005).

آبشویی نمک های محلول از نیم رخ خاک های شور و سدیمی، با استفاده از آبشویی با روش های غرقاب دائم، متناوب و یا به وسیله روش آبیاری بارانی امکان پذیر است که هر روش مزیت ها و محدودیت های خاص خود را دارد. راندمان آبشویی در روش غرقاب متناوب در مقایسه با روش غرقاب دائم به علت برقراری شرایط غیر اشباع، و عبور کمتر آب از میان منافذ درشت، بیشتر می باشد (Cote et al 2000).

در روش های متداول، تغییرات مقدار نمک ها با کاربرد مقادیر مختلف آب و تهیه نمونه های متعدد آب، خاک و زهاب بررسی می شود. اجرای این روش ها مستلزم صرف وقت، هزینه زیاد و آزمایش های میدانی است، اهمیت آبشویی سبب شده که مدل های ریاضی، تجربی و رایانه ای گوناگونی برای تعیین و پیش بینی این فرآیند ارائه شوند (مشعل و همکاران، ۱۳۹۲). با استفاده از مدل های شبیه سازی رایانه ای، می توان مقدار آب آبشویی و زمان لازم برای انجام عملیات آبشویی را به دست آورد و همچنین در یک مدل مناسب، می توان عملیات مدیریتی مختلف را در برنامه آبشویی نمک های محلول اعمال نموده و نتایج به دست آمده را برای بررسی فرآیندهایی که در ساختار مدل گنجانده نشده اند، اعمال، اصلاح و یا تعدیل نمود. به این وسیله امکان مطالعه روند آبشویی با دقت مناسب امکان پذیر می گردد (Droogers et al 2000).

اسدی کپورچال و همکاران (۱۳۹۱) به ارزیابی و مقایسه آماری مدل های تجربی حاصله برای آبشویی نمک های محلول از نیم رخ خاک ها و معرفی مناسب ترین مدل تجربی برای استان خوزستان با مساحتی حدود ۶۴۰۵۷ کیلومتر مربع پرداختند. نتایج تحقیق نشان داد که مناسب-



مخازن (SRM) و ستون پیوسته‌ی خاک (TPTM) در برآورد آبشویی است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه، مزرعه‌ای واقع در محمدآباد در ۱۵ کیلومتری زابل با عرض جغرافیایی ۳۰ درجه، ۵۴ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۶۱ درجه، ۴۱ دقیقه شرقی می‌باشد. که در ارتفاع ۴۸۰ متری از سطح دریا قرار گرفته و متوسط بارندگی سالانه ۵۹/۶ است (Shahriari et al, 2019). شکل ۱ نحوه کرت‌بندی و چیدمان تیمارها را نشان می‌دهد.

برای انجام آزمایش زمینی با مساحت یک هکتار و کلاس شوری S_2A_2 انتخاب شد. بافت خاک تا عمق ۰-۱۰۰ سانتی‌متری با استفاده از آزمایش هیدرومتری مشخص گردید. خصوصیات و فیزیکی (شامل درصد شن، سیلت و رس، تخلخل، رطوبت ظرفیت زراعی، رطوبت اولیه و نقطه پژمردگی) برای اعماق مختلف خاک در جدول ۱ و خصوصیات شیمیایی (شامل pH، EC، کاتیون‌ها، SAR، ESP، آهک و گچ) در جدول ۲ ارائه شده است. درصد شن، سیلت و رس با استفاده از آزمایش هیدرومتری (Gee and Bauder, 1986)، چگالی ظاهری از طریق روش استوانه و رطوبت ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی با استفاده از دستگاه صفحات فشاری اندازه‌گیری می‌شود. رطوبت اولیه از طریق نمونه‌برداری و انتقال به آزمایشگاه و خشک کردن خاک اندازه‌گیری شد. عصاره اشباع هر نمونه تهیه شوری (EC) با استفاده از EC متر و اسیدپته (pH) به کمک دستگاه pH متر هر نمونه اندازه‌گیری شد. پارامترهای سدیم با فلیم فوتومتر، کلسیم و منیزیم به کمک دستگاه جذب اتمی بدست آمد.

جدول‌های ۱ و ۲ نشان می‌دهد که بافت عمده خاک لوم سیلتی است. بیشترین مقدار EC مربوط به عمق ۵۰-۷۵ سانتی‌متری خاک با مقدار ۱۵/۳ دسی‌زیمنس بر متر است. به‌منظور بررسی نحوه تغییرات شوری نیم‌رخ خاک و تعیین منحنی آبشویی، آزمایش‌های آبشویی به‌صورت غرقاب متناوب و در قابل طرح بلوک‌های کامل تصادفی در چهار

ترین مدل برای محدوده مورد مطالعه، مدل توانی و منطقه-ای پذیرا و کشاورز (۱۳۷۸) بوده است. مشعل و همکاران (۱۳۹۲) در مطالعه‌ای، چهار مدل نظری آبشویی خاک شامل سری مخازن (SRM)، مدل نظری ستون پیوسته خاک (TPTM)، انتقال انتشار و روش حل عددی (NM) را با منظور انتخاب و معرفی مناسب‌ترین مدل برای پیش‌بینی شوری نهایی خاک بررسی و با داده‌های واقعی به‌دست‌آمده از آزمایش‌های صحرایی مقایسه کردند. نتایج نشان داد که به ازای اعماق مختلف آب، آبشویی مدل‌های مورد بررسی عملکردهای متفاوتی دارد، اما به‌طور کلی مدل سری مخازن، شوری نهایی را با دقت بیشتری برآورد می‌کند. محمدزاده و همکاران (۱۳۹۹) مدل‌های نظری آبشویی املاح خاک در دشت آزادگان را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد دو مدل سری مخازن و مخزن منفرد دارای نتایج بهتری نسبت مدل ستون پیوسته و مدل حل عددی داشتند. بروجنی و همکاران (۱۴۰۱) روش غرقاب دائم و متناوب خاک‌های شور و سدیمی را برای خاک‌های استان مرکزی مورد ارزیابی قرار دادند و نتیجه گرفتند که آبشویی نمک‌های محلول به روش متناوب دارای راندمان بالاتری است و می‌توان روش غرقاب متناوب را برای آبشویی خاک‌های منطقه مورد مطالعه استفاده کرد.

با توجه به تغییرات زیاد خصوصیات آب و خاک در مناطق مختلف، نتایج به دست آمده از آبشویی به‌طور مستقیم قابل استفاده برای مناطق دیگر نمی‌باشند، همچنین قبل از کاربرد مدل‌های نظری و تجربی آبشویی باید دقت و کارایی آن‌ها مورد ارزیابی قرار گیرد. منطقه سیستان واقع در جنوب شرق ایران یکی از مناطقی است که تغییرات مکانی خاک بسیار زیاد است. از طرفی بخش بسیار زیادی از اشتغال (حدود ۳۸٪) در این منطقه مربوط به بخش کشاورزی می‌باشد (Chari et al 2020). در نتیجه هدف از این تحقیق تعیین مقدار آبشویی مورد نیاز برای بخشی از خاک‌های منطقه سیستان و ارزیابی دقت مدل‌های تجربی، (Pazira and Leffelaar and Sharma (1977), Kawachi (1981) و Pazira and Keshavarz (1998) و همچنین مدل‌های نظری، مخزن منفرد (SRM)، سری

(تیمار C) و (تیمار D) سانتی‌متر سانتی‌متر آب
آبشویی به کار رفت.

تیمار آزمایشی و یک تیمار شاهد در چهار تکرار به مرحله
اجرا درآمد و به ترتیب ۲۵ (تیمار A)، ۵۰ (تیمار B)، ۷۵

D (۱۰۰ سانتی‌متر)	C (۷۵ سانتی‌متر)	B (۵۰ سانتی‌متر)	A (۲۵ سانتی‌متر)
B (۵۰ سانتی‌متر)	A (۲۵ سانتی‌متر)	D (۱۰۰ سانتی‌متر)	C (۷۵ سانتی‌متر)
C (۷۵ سانتی‌متر)	D (۱۰۰ سانتی‌متر)	A (۲۵ سانتی‌متر)	B (۵۰ سانتی‌متر)
A (۲۵ سانتی‌متر)	B (۵۰ سانتی‌متر)	C (۷۵ سانتی‌متر)	D (۱۰۰ سانتی‌متر)



شکل (۱): نحوه کرت‌بندی و چیدن تیمارهای آزمایشی

جدول (۱): خصوصیات فیزیکی خاک مزرعه آزمایشی قبل از اعمال آبشویی

PWP	θ	%FC	%Porosity	Bulk density (gr/cm ³)	(%)			Depth of sampling (cm)
					Clay	Silt	Sand	
۹/۳	۷/۸	۱۷	۵۳	۱/۲۴۱	۳۷/۸	۲۷/۸	۳۴/۴	۰-۲۵
۱۰/۵	۸/۳	۱۹	۵۰	۱/۳۲	۳۶/۶	۲۹/۶	۳۳/۸	۲۵/۵۰
۱۰/۷	۱۱/۱	۱۹	۴۴	۱/۴۷	۳۸/۹	۳۹	۲۲/۱	۷۵-۵۰
۱۲/۳	۹/۲	۲۲	۵۰	۱/۳۳	۳۴/۴	۴۴/۲	۲۱/۴	۱۰۰-۷۵

جدول (۲): خصوصیات شیمیایی خاک مزرعه آزمایشی قبل از اعمال آبشویی

عمق (cm)	pH	EC(ds/m)	کاتیون (meq/lit)		%ESP	%SAR	گچ (%)
			Ca+Mg	Na			
۰-۲۵	۷/۷	۱۱/۱	۲۴	۴۱	۱۰	۱۲	۱/۳۸
۵۰-۲۵	۷/۷	۱۱/۴	۱۸	۶۲	۱۶	۲۰	۰/۶
۷۵-۵۰	۸	۱۵/۳	۴۵	۱۵۸	۲۱	۳۳	۰/۳۵
۱۰۰-۷۵	۸/۲	۱۵	۵۸	۱۷۰	۲۰	۳۲	۰/۲

اطراف پشته‌های اطراف کرت‌ها کوبیده شدند. همچنین خاک اطراف کرت‌ها تا حد ممکن کوبیده شدند تا جایی که بتوان از جریان‌های سطحی و زیرسطحی به خارج کرت جلوگیری شود (شکل ۱).

عملیات آماده‌سازی زمین و پیاده کردن طرح در بهمن ۱۳۹۸ و آزمایش‌های آبشویی در اسفند ۱۳۹۸ انجام گرفت. برای آبشویی از آبی با EC برابر با ۰/۷۶ دسی‌زیمنس استفاده شد که مشخصات آن در جدول (۳) بیان شده است.

مطابق با طرح آزمایش، کرت‌هایی به ابعاد یک در یک متر ایجاد گردید. در هر تیمار چهار کرت به فاصله ۲ متری از یکدیگر قرار دارند و فاصله هر تیمار با تیمار بعدی نیز دو متر در نظر گرفته شد. در اطراف کرت‌ها پشته‌هایی به ارتفاع و عرض ۳۰ سانتی‌متر احداث شد و به منظور عدم خروج آب هنگام آبشویی و ایجاد جریان‌های ترجیحی زیرسطحی تا عمق ۳۰ سانتی‌متری اطراف کرت‌ها با نایلون پوشانده و خاک

جدول (۳): خصوصیات شیمیایی آب مورد استفاده در آزمایشات آبشویی

%ESP	%SAR	کاتیون (meq/lit)		pH	EC (ds/m)
		Ca+Mg	Na		
۲-۳	۴	۲/۳۹	۴/۳۳	۷/۱	۰/۷۶

مربوط را با دو روش غرقاب دائم و متناوب در خاکی که میزان شوری اولیه آن (EC_i) تا عمق ۸۰ سانتی‌متری، حداکثر معادل ۳۰ دسی‌زیمنس بر متر ($EC_e=30$) بود، انجام دادند و از رابطه تجربی مشابه برای برازش نتایج حاصل به صورت هذلولی به شرح زیر استفاده کردند:

$$\left[\frac{(EC_f - EC_i)}{(EC_{eq} - EC_{eq})} \right] \quad (1)$$

$$= 0.062 \left(\frac{D_s}{D_{lw}} \right) + 0.034$$

که در آن D_s عمق خاک بر حسب متر، D_{lw} عمق خالص آبشویی بر حسب متر، EC_i هدایت الکتریکی عصاره گل

نمونه‌ها به آزمایشگاه منتقل و پارامترهای فیزیکی خاک شامل بافت، وزن مخصوص ظاهری، تخلخل، رطوبت اولیه، ظرفیت زراعی و همچنین پارامترهای شیمیایی لازم برای تحقیق قبل از آبشویی و در تناوب‌های آبشویی شامل هدایت الکتریکی، سدیم، کلسیم، منیزیم و اسیدیته اندازه‌گیری شد (جدول ۲)

مدل‌های تجربی

مدل لافر و شارما (۱۹۷۷)

بر پایه‌ی بررسی‌ها و آزمون‌های مزرعه‌ای در سال ۱۹۷۵ در منطقه هانسا-هارینا هندوستان به‌وسیله‌ی Leffelaar and Sharma (1977) به انجام رسید. آن‌ها آزمایش‌های



با اختلاط یا امتزاج کامل محلول خاک با آب آشوبی، شرایط $C_r=C$ فراهم می‌شود که با قرار دادن این تساوی در رابطه بالا نتایج زیر حاصل می‌شود:

$$C_i \cdot Q \cdot dt = C \cdot Q \cdot dt + V \cdot dC \quad (4)$$

$$\frac{dC}{(C - C_i)} = -\frac{Q}{V} \cdot dt \quad (5)$$

که C_r : غلظت جریان خروجی از انتهای مخزن و Q : میزان جریان عبوری از مخزن است.

با انتگرال‌گیری از روابط بالا برای حدود $C = C_0$ در زمان $t=0$ و C_t در زمان t نتیجه می‌شود:

$$\frac{(C_t - C_i)}{(C_0 - C_i)} = e^{-\frac{Q}{V} \cdot t} \quad (6)$$

به دلیل اینکه $T=V/Q$ است بنابراین $1/T=Q/V$ خواهد بود، با جایگزینی این عبارت در رابطه‌ی بالا و حل آن برای C_t نتیجه می‌شود:

$$C_t = C_i + (C_0 - C_i)e^{-\frac{t}{T}} \quad (7)$$

که در آن، C_t غلظت نمک در جریان خروجی از مخزن (خاک) در زمان t و T زمان توقف است.

چنانچه بتوان منطقه‌ی توسعه ریشه گیاه را نوعی مخزن با اختلاط کامل فرض کرد، در این صورت رابطه‌ی بالا را می‌توان برای حالت آشوبی محدوده توسعه ریشه‌ی گیاه به کاربرد (Rajabzadeh et al 2009).

مدل سری مخازن (SRM⁶)

اگر آشوبی به‌دقت بررسی شود، مشاهده می‌شود که اختلاط کامل محلول آب خاک و آب آشوبی در لایه‌های مختلف خاک امکان‌پذیر نیست زیرا عوامل اختلاط در خاک از قبیل پخشیدگی، تغییر رژیم رطوبتی خاک در اثر آبیاری و تبخیر و تعرق یا تلاطم جریان فقط در محدوده کوچکی مؤثر است (سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، ۱۳۸۵). مقداری از آب مصرفی نیز پس از اختلاط با محلول خاک در هر لایه به سمت لایه پایین‌تر حرکت می‌کند و به‌تدریج از عمق آب نفوذ یافته به لایه‌های پایین‌تر کاسته می‌شود. بنابراین عمق مؤثر اختلاط آب و محلول خاک محدود است. فن درمولن به‌منظور وارد کردن

اشباع خاک قبل از اعمال آب آشوبی خالص (دسی‌زیمنس بر متر)، EC_f هدایت الکتریکی عصاره گل اشباع خاک بعد از استفاده از آب آشوبی خالص (دسی‌زیمنس بر متر)، EC_{eq} هدایت الکتریکی عصاره گل اشباع خاک که با آشوبی به تعادل شیمیایی می‌رسد (دسی‌زیمنس بر متر).

مدل پذیرا و کاواچی (۱۹۸۱)

این مدل براساس مطالعات و آزمون‌های متعددی که در سالیان متمادی در بخش مرکزی استان خوزستان انجام شد و پس از گردآوری، تجزیه و تحلیل آمار و رقم‌های مزرعه‌ای، استخراج گردید. رابطه‌ی تجربی حاصل از این آزمایشات به شکل هذلولی و به شرح زیر بوده است:

$$\left[\frac{(EC_f - EC_{eq})}{(EC_i - EC_{eq})} \right] = 0.076 \left(\frac{D_s}{D_{lw}} \right) + 0.023 \quad (2)$$

مدل پذیرا و کشاورز (۱۹۹۸)

مطالعات مربوط به تهیه و تدوین این مدل تجربی، در زمینه‌های شوری و سدیمی بخش جنوب شرقی استان خوزستان از طریق آزمایشات مزرعه‌ای، بر روی کرت‌های مدل انجام شده است. خاک منطقه‌ی مورد آزمون دارای بافت لومی رسی تا رسی سیلتی و روش آشوبی غرقاب متناوب با عمق آب کاربردی ۱۰۰ سانتیمتری که در چهار تناوب ۲۵ سانتیمتری به مصرف رسیده بود که رابطه‌ی تجربی حاصل به‌صورت زیر به دست آمد:

$$\left[\frac{(EC_f - EC_{eq})}{(EC_i - EC_{eq})} \right] = 0.0764 \left(\frac{D_s}{D_{lw}} \right)^{0.864} \quad (3)$$

مدل‌های نظری

مدل مخزن منفرد (SRM⁵)

ویرایش کامل این مدل به‌وسیله‌ی وان در مولن (۱۹۷۹) ارائه شده است. در این مدل، خاک به‌عنوان مخزنی با حجم (V) فرض می‌شود که دارای میزان رطوبت یا محلول خاکی (فاز مایع) با غلظت اولیه‌ی C_0 است. طی فرایند آشوبی، آشوبی با غلظت C_i به‌تدریج جایگزین محلول خاک می‌شود.

آبشویی و W_{fc} : مقدار رطوبت خاک در حالت ظرفیت مزرعه است (مشعل و همکاران، ۱۳۹۲).

مدل نظری ستون پیوسته‌ی خاک ($TPTM^*$)

در این مدل، نیم‌رخ خاک به صورت ستون پیوسته‌ای در نظر گرفته می‌شود که اختلاط آب آبشویی (محلول جایگزین شونده) و محلول خاک در هر عمقی از آن می‌تواند صورت گیرد. بنابراین دامنه‌ی اختلاط مؤثر، محدود است. گلوچکف (۱۳۴۹) نظریه‌ای ارائه داد که با استفاده از آن می‌توان رفتار چنین ستونی را رابطه‌بندی کرد. تطبیق و کاربرد این نظریه برای فرایند آبشویی نمک‌های محلول از نیم‌رخ خاک، منجر به رابطه‌ی زیر شده است.

$$\left[\frac{\partial q}{\partial v} \right]_{D_s} + \left[\frac{\partial C}{\partial D_s} \right]_V - K \left[\frac{\partial^2 C}{\partial D_s^2} \right]_V = 0 \quad (12)$$

که در آن q میزان یون‌های جذب شده به وسیله‌ی ذرات خاک و در حالت تعادل با محلولی به غلظت C است؛ D_s عمق خاک و K نصف طول مؤثری که فرایند اختلاط در آن انجام می‌شود.

حل این رابطه برای تشریح فرایند آبشویی نمک‌های محلول از نیم‌رخ خاک همگن به صورت زیر است:

$$C - C_i \quad (13)$$

$$= \frac{(C_0 - C_i)}{2} \left[\operatorname{erfc} \frac{f \cdot P - 1}{\sqrt{2f \cdot P}} \sqrt{N} - e^{2N} \cdot \operatorname{erfc} \frac{f \cdot P + 1}{\sqrt{2f \cdot P}} \sqrt{N} \right]$$

$$P = D_w / \theta_{fc} \cdot D_s \quad (14)$$

$$N = D_s / 2K$$

که θ_{fc} میزان رطوبت حجمی خاک، erfc : متمم تابع خطا است.

در نهایت مقادیر حاصل از آزمایشات میدانی و آزمایشگاهی و مقادیر حاصل از مدل‌های تجربی و نظری از طریق آماره-های آماری جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب تعیین (R^2) با هم مقایسه گردیدند

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{N}} \quad (15)$$

این محدودیت در محاسبات و تعدیل نتایج، مدل سری مخازن را ارائه کرد. در این مدل، خاک منطقه توسعه ریشه به چند لایه تقسیم و هر لایه، یک مخزن در نظر گرفته می‌شود. در مخزن اول، محلول خاک و بخشی از آب آبشویی که وارد مخزن شده است، اختلاط می‌یابند و فرایند شست و شوی املاح صورت می‌پذیرد. زه‌آب خروجی از مخزن اول، آب آبشویی ورودی به مخزن دوم محسوب می‌شود. بنابراین هر مخزن، آب آبشویی خود را از مخزن بالایی دریافت می‌کند. این در شرایطی است که به تدریج از مقدار آب آبشویی کاسته می‌شود و برعکس، غلظت املاح محلول در آن افزایش می‌یابد. در این مدل همچنین فرض می‌شود که حرکت هم‌زمان آب و املاح در هر مخزن از رطوبت حد ظرفیت مزرعه به بعد شروع می‌شود و حجم آب درون هر لایه طی فرایندهای انحلال و شست و شوی املاح ثابت می‌ماند. در این مدل، غلظت جریان خروجی از لایه‌ها مختلف از روش‌های زیر به دست می‌آید:

$$C_1 = C_i + (C_0 - C_i) \cdot e^{-f \frac{t}{T}} \quad (8)$$

$$C_2 = C_i + (C_0 - C_i) \cdot e^{-f \frac{t}{T}} \quad (9)$$

$$C_n = C_i + (C_0 - C_i) e^{-f \frac{t}{T}} \sum_{k=0}^{k=n-1} (1 + \frac{f n t^n}{n! \cdot T^n}) \quad (10)$$

در معادله‌های بالا فرض شده که غلظت اولیه

املاح در تمام لایه‌های خاک یکسان است. اگر غلظت اولی (C_0) املاح در لایه‌های متوالی خاک، متفاوت در نظر گرفته شود و هر لایه ضریب بازده آبشویی و نسبت t/T معینی داشته باشد، باید از ضریب بازده آبشویی و نسبت t/T همان لایه استفاده شود. به منظور تعیین ضریب بازده آبشویی، با در نظر گرفتن خاک به عنوان مخزن منفرد با مجرای فرعی از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$f = \frac{W_{fc}}{Qt} \cdot \ln \left(\frac{C_0 - C_i}{C_f - C_i} \right) \quad (11)$$

در این رابطه، C_f : غلظت نهایی املاح محلول خاک پس از آبشویی به دست آمده از آزمون صحرایی، Q_t : عمق آب



تأثیرات آبشویی را مشاهده کرد. پس از کاربرد آب آبشویی، مقدار هدایت الکتریکی و در صد سدیم تبدلی کاهش یافته است ولی این کاهش در هدایت الکتریکی بهتر دیده می-شود. کاهش شوری برای لایه ۰-۲۵ سانتی متری بیشتر بود، نتایج سایر پژوهشگران نیز این نتیجه را نشان می دهد (رضاییان و همکاران، ۱۳۹۶؛ Rajabzadeh et al., 2009). نتایج برای هر تیمار به صورت جداگانه در زیر قابل مشاهده است. به گونه ای که در کاربرد اولین تناوب آب کاربردی تا عمق ۵۰ سانتی متری، هدایت الکتریکی و درصد سدیم تبدلی کاهش چشمگیری داشته است اما در اعماق روندی برعکس مشاهده شده است. که دلیل آن شستشوی نمک ها در لایه بالایی و انتقال آن به لایه های پایین تر است.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \quad (16)$$

در این روابط P_i مقادیر پیش بینی شده توسط مدل، O_i مقادیر اندازه گیری شده، N تعداد نقاط و \bar{O} میانگین اندازه گیری شده می باشد. بهترین پیش بینی ها زمانی رخ می دهد که RMSE به صفر و R^2 به سمت یک میل کند.

نتایج و بحث

نیاز آبشویی

مجموع آنیون ها و کاتیون ها با هدایت الکتریکی در ارتباط هست. بنابراین شاخصی مناسب برای بیان کل نمک های موجود در خاک می باشد. با مقایسه نتایج جدول ۳ (مقادیر قبل از آبشویی) و جداول (۴)، (۵)، (۶) و (۷) می توان

جدول (۴): تغییرات مقادیر EC، SAR و ESP در تیمار A (کاربرد ۲۵ سانتیمتر)

گج (%)	ESP (%)	SAR (%)	کاتیون (meq/lit)		EC(ds/m)	Depth of sampling	Leaching depth (cm)
			Ca+Mg	Na			
۰/۲	۳/۵	۴/۹	۴/۳	۷/۳	۲/۱	۰-۲۵	۲۵
-	۸/۶	۱۰/۱	۴/۴	۱۴/۹	۲/۹	۲۵-۵۰	
-	۲۱/۲	۳۲/۷	۴۲/۷	۱۵۱	۱۴/۹	۵۰-۷۵	
-	۲۱/۱	۳۲/۵	۶۱/۴	۱۷۹/۳	۲۰/۲	۷۵-۱۰۰	

جدول (۵): تغییرات مقادیر EC، SAR و ESP در تیمار B (کاربرد ۵۰ سانتیمتر)

گج (%)	ESP(%)	SAR(%)	کاتیون (meq/lit)		EC(ds/m)	Depth of sampling	Leaching depth (cm)
			Ca+Mg	Na			
۰/۱	۲/۹	۴/۱	۳/۹	۶/۳	۲/۰	۰-۲۵	۵۰
-	۹/۱	۱۰/۵	۴/۱	۱۵/۱	۲/۹	۲۵-۵۰	
-	۲۰/۶	۳۱/۱	۳۴/۰	۱۲۸/۳	۱۲/۴	۵۰-۷۵	
-	۲۰/۸	۳۱/۷	۵۲/۲	۱۶۲/۰	۱۸/۳	۷۵-۱۰۰	

جدول (۶): تغییرات مقادیر EC، SAR و ESP در تیمار C (کاربرد ۷۰ سانتیمتر)

گج (%)	ESP (%)	SAR (%)	کاتیون (meq/lit)		EC(ds/m)	Depth of sampling	Leaching depth (cm)
			Ca+Mg	Na			
-	۲/۶	۴/۲	۳/۴	۵/۵	۱/۷	۰-۲۵	۷۵
-	۷/۵	۸/۶	۳/۱	۱۰/۹	۲/۱	۲۵-۵۰	
-	۱۶/۳	۲۱/۲	۱۸/۲	۶۴/۱	۶/۳	۵۰-۷۵	
-	۱۸/۱	۲۴/۸	۳۴/۷	۱۰۳/۶	۱۱/۷	۷۵-۱۰۰	

جدول (۷): تغییرات مقادیر EC، SAR و ESP در تیمار D (کاربرد ۱۰۰ سانتیمتر آب)

گج (%)	ESP (%)	SAR (%)	کاتیون (meq/lit)		EC(ds/m)	Depth of sampling	Leaching depth (cm)
			Ca+Mg	Na			
-	۲/۷	۴/۱	۳/۲	۵/۴	۱/۵	۰-۲۵	۱۰۰
-	۶/۳	۷/۵	۳	۹/۲	۱/۹	۲۵-۵۰	
-	۱۵/۱	۱۹/۱	۱۵/۹	۵۳/۶	۵/۵	۵۰-۷۵	
-	۱۷/۲	۲۳/۱	۳۰/۹	۹۰/۷	۱۰/۵	۷۵-۱۰۰	

نتایج پژوهشگران در بخشی از اراضی جنوب شرق استان خوزستان نیز نشان داد که بیشترین هدایت الکتریکی قبل از آبیاری به روش غرقاب متناوب مربوط به عمق ۰-۲۵ سانتی متری خاک برابر با ۷۸/۲۰ دسی زیمنس بر متر بوده است که پس از آبیاری با تناوب های ۲۵ سانتی متری در عمق مذکور به طور متوسط به ۴ دسی زیمنس بر متر کاهش یافته است (Rajabzadeh et al 2009). در این تحقیق شوری خاک در این عمق از ۱۱/۱ دسی زیمنس بر متر به ۱/۵ دسی زیمنس بر متر تقلیل یافت.

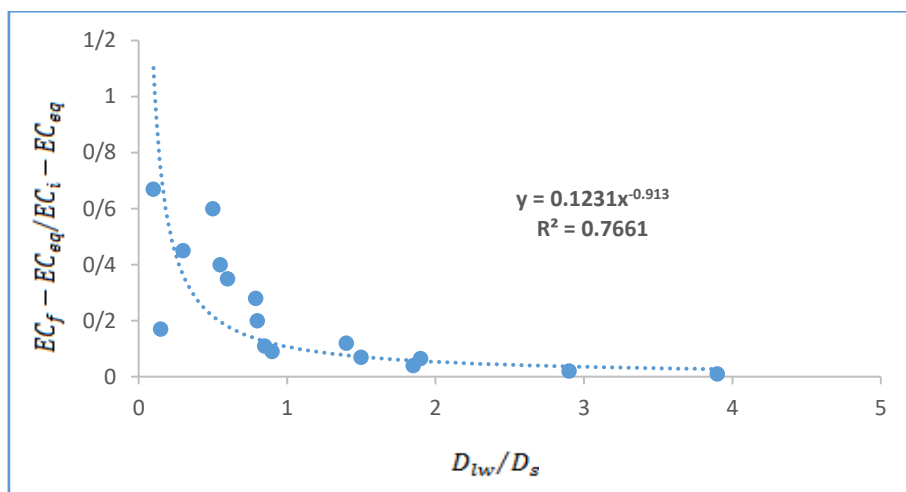
در نهایت با کاربرد ۱۰۰ سانتی متر آب، شوری برای اعماق ۰-۲۵، ۲۵-۵۰، ۵۰-۷۵ و ۷۵-۱۰۰ به ترتیب برابر ۱/۵، ۱/۹، ۵/۵ و ۱۰/۵ به دست آمد، همچنین به طور میانگین برای کل عمق یک متری خاک میزان هدایت الکتریکی از مقدار ۱۳/۲ به ۴/۸۵ میلی موس بر سانتی متر کاهش داشته است. که می توان نتیجه گرفت که کاربرد ۱۰۰ سانتی متر آب آبیاری و به روش غرقاب متناوب برای شوری زدایی مزرعه آزمایشی مؤثر بوده است. نتایج (Rajabzadeh et al (2009)، همچنین، نتایج اسدی کپورچال و همکاران (۱۳۹۱) نیز مؤید روند کاهش شوری

قابل مشاهده است که در تیمار A با کاربرد ۲۵ سانتی متر آب برای آبیاری، شوری خاک در لایه ۰-۲۵ خاک از ۱۱/۱ به ۲/۱ دسی زیمنس بر متر رسیده است که نشانگر کارایی مؤثر این عمق آب کاربردی برای شستشوی املاح موجود در خاک است. در لایه ۷۵-۱۰۰ این مقدار از ۱۹/۲ به ۲۰/۲ دسی زیمنس بر متر رسیده است که می توان چنین استدلال کرد که آب املاح را از سطح به عمق شستشو کرده و جبهه شوری به این اعماق رسیده است و این عمق آب کاربردی برای خارج کردن املاح از عمق یک متری خاک کافی نبوده است. این نتیجه گیری مشابه با تحقیق رضاییان و همکاران (۱۳۹۶) است بر این اساس پس از کاربرد آب آبیاری، به روش غرقاب متناوب مقدار شوری خاک کاهش داشت و عکس توزیع نمکها در اعماق پایین مشاهده شد که به علت شسته شدن نمکها از سطح به عمق خاک اتفاق افتاده است. بهترین آبیاری و بیشترین کاهش شوری در عمق ۰-۲۵ سانتی متری اتفاق افتاده است که این نتایج با نتایج رضاییان و همکاران (۱۳۹۶) و (Anapali et al (2001) هماهنگی دارد.

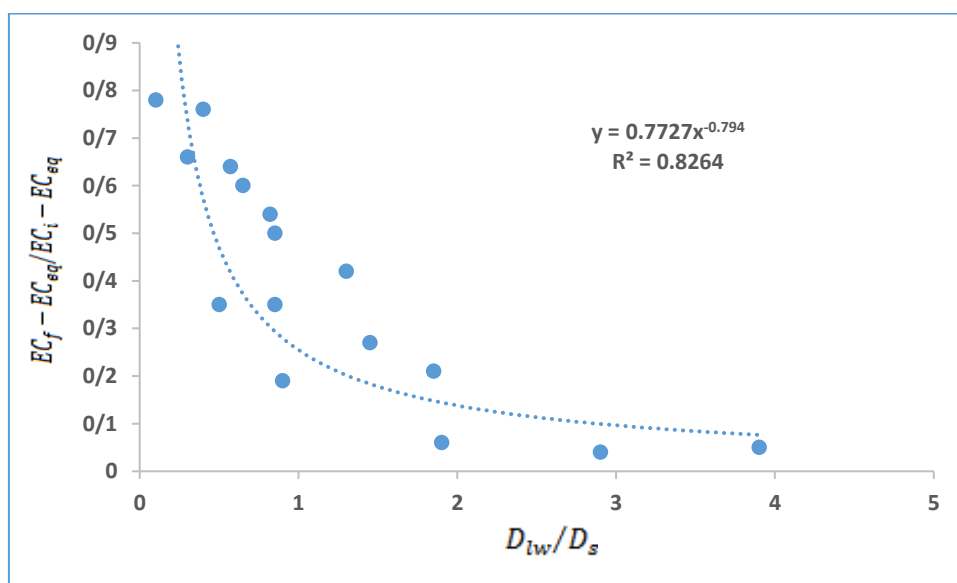
خاک قابل برآورد است. مقادیر استخراجی از این منحنی‌ها، نیاز خالص آبشویی نمک‌های محلول را نشان می‌دهد. در این آزمایش مقدار شوری تعادلی (EC_{eq}) برابر با $1/28$ دسی‌زیمنس بر متر در نیمرخ خاک در نظر گرفته شد. روند تغییرات در لایه‌های اول بیشتر بوده و کاملاً حالت نمایی دارد، لیکن در لایه‌های زیرین، از آنجایی که مقداری از املاح از لایه‌های روئین شسته شده و با غلظت زیاد وارد این لایه‌ها می‌گردد میزان تغییرات شوری با عمق آب کمتر بوده و برای لایه‌های زیرین تقریباً خطی می‌شود.

و درصد سدیم تبدالی در لایه‌های خاک و مشابهت این کاهش در لایه‌های یکسان خاک می‌باشد. با توجه به نتایج ارائه‌شده در کاهش میزان هدایت الکتریکی و درصد سدیم تبدالی خاک‌های شور و سدیمی منطقه می‌توان بیان کرد که آبشویی غرقاب متناوب روشی مناسب برای آبشویی نمک‌های خاک منطقه می‌باشد.

شکل‌های ۲ و ۳ به ترتیب منحنی‌های شوری و سدیم-زدایی را نشان می‌دهد. با استفاده از این منحنی‌ها عمق خالص آب موردنیاز برای کاهش عملی شوری و قلیابیت



شکل (۲): منحنی شوری زدایی نیمرخ خاک در طول آبشویی



شکل (۳): منحنی سدیم‌زدایی نیمرخ خاک در طول آبشویی



به منظور تعیین بهترین مدل مقایسه شدند و مورد آنالیز قرار گرفتند. جدول (۸) نتایج مربوط به مدل‌های تجربی و جدول (۹) نتایج مربوط به مدل‌های نظری را نشان می‌دهد. در جدول (۸) کمترین مقدار RMSE مربوط به مدل پذیرا و کشاورز و پذیرا و کاوچی با مقدار ۱/۱۶ و برای عمق ۰-۲۵ سانتی‌متری بوده است. بیشترین مقدار RMSE مربوط به مدل پذیرا و کاوچی با مقدار ۳/۳۵ و برای عمق ۰-۱۰۰ سانتی‌متری می‌باشد. مقدار ضریب تعیین مقدار شوری پیش-بینی شده دارای بیشترین مقدار برابر با ۰/۸۸ در مدل پذیرا و کاوچی و عمق ۰-۷۵ سانتی‌متری بوده است. پیش‌بینی سه مدل تجربی از شوری نهایی، در عمق ۰-۲۵ سانتی‌متری، بهتر از سایر اعماق بوده است زیرا نسبت آب ورودی به عمق اولیه لایه خاک به نسبت زیاد می‌باشد که این اثر در لایه‌های پایین‌تر تعدیل می‌گردد. بر اساس پژوهشی در خوزستان مناسب‌ترین مدل برای محدوده مورد مطالعه مدل پذیرا و کشاورز بوده است (Rajabzadeh et al 2009). از بین مدل‌های تجربی، مدل پذیرا و کشاورز دارای عملکرد بهتری نسبت به دو مدل دیگر بوده است.

نمودارهای شوری (شکل ۲) و سدیم‌زدایی (شکل ۳) بیان می‌کند که آبشویی نمک‌ها در روش غرقاب متناوب و آزمایش صورت گرفته بسیار سریع و با شیب زیاد اتفاق افتاده است که نشان می‌دهد که این روش با ۱۰۰ سانتی‌متر آب به خوبی عمل کرده است. (Cote et al (2000) آبشویی متناوب و پاشش و غرقاب دائمی را مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که آبشویی با روش متناوب بهتر عمل می‌کند و در روش غرقاب دائم به دلیل اشباع بودن از راندمان کمتری برخوردار بود. نتایج نشان می‌دهد که روش آبشویی متناوب به کار رفته در این تحقیق قابلیت شوری‌زدایی و سدیم‌زدایی دارند به گونه‌ای که کلاس شوری و قلیائیت S₂A₂ به کلاس شوری S₁A₁ تقلیل یافت. رضاییان و همکاران (۱۳۹۶) سه روش آبشویی متناوب، پاششی و غرقاب دائم را مورد تحقیق قرار دادند که مشخص شد که روش متناوب نتایج بهتری در آبشویی دارد و کلاس شوری را بهبود بخشید.

مدل‌های نظری و تجربی

نتایج حاصل از واسنجی مدل‌های نظری و تجربی با داده‌های واقعی به دست آمده از آزمایش‌های صحرایی

جدول (۸): ارزیابی آماری داده‌های مشاهداتی و داده‌های حاصل از مدل‌های تجربی

Pazira and Keshavarz	Pazira and Kawachi	Leffelaar and Sharma	Depth of soil (cm)
۰/۱۶	۰/۱۶	۰/۱۸	RMSE ۰-۲۵
۰/۸۷	۰/۸۵	۰/۸۵	R ²
۰/۳	۰/۵	۰/۳۹	RMSE ۰-۵۰
۰/۸۲۰	۰/۸۰	۰/۸۰	R ²
۱/۰۱	۱/۵۶	۱/۸۷	RMSE ۰-۷۵
۰/۸۸	۰/۸۶	۰/۸۷	R ²
۳/۱۵	۳/۳۵	۳/۳۱	RMSE ۰-۱۰۰
۰/۸۰	۰/۷۹	۰/۷۹	R ²

پیش‌بینی کنند و مقادیر این مدل‌ها بسیار نزدیک‌تر به مقادیر مشاهداتی می‌باشد. در بین مدل‌های نظری مدل مخزن منفرد (SR_m) دارای بهترین است. مدل مخزن منفرد پیش‌بینی‌های بسیار خوبی از شوری نهایی در عمق ۰-۲۵ سانتی‌متر ارائه بدهند و می‌توان استدلال کرد چون نسبت آب کاربردی به عمق خاک بیشتر از سایر اعماق می‌باشد شوری به‌راحتی شسته شده و مدل نیز این را پیش‌بینی کرده است. (Rajabzadeh et al (2009) در مطالعه‌ای روی سه نمونه خاک توسط سه مدل مخزن منفرد، مخزن سری مخازن و روش حل عددی نتیجه گرفتند که مدل مخزن منفرد و مدل سری مخازن داده‌هایی بسیار واقعی‌تر و نزدیک‌تر به مقادیر واقعی حاصل می‌کنند.

جدول (۹) مقایسه آماری بین مدل‌های نظری و مقادیر مشاهداتی را نشان می‌دهد. در جدول (۹) کمترین مقدار RMSE مربوط به مدل سری مخازن (SRM) و مدل ستون پیوسته (TPTM) با مقدار ۰/۰۳ و برای عمق ۰-۲۵ سانتی‌متری بوده است. بیشترین مقدار RMSE مربوط به مدل ستون پیوسته با مقدار ۳/۴۷ و برای عمق ۰-۱۰۰ سانتی‌متر می‌باشد. مقدار ضریب تعیین مقدار شوری پیش‌بینی‌شده دارای بیشترین مقدار برابر با ۰/۹۹ در مدل مخزن منفرد (SR_m) و عمق ۰-۲۵ سانتی‌متر بوده است. جدول (۹) نشان می‌دهد که مدل‌های نظری بهتر از مدل‌های تجربی توانسته‌اند که شوری نهایی را در اعماق خاک

جدول (۹): ارزیابی آماری بین داده‌های مشاهداتی و داده‌های حاصل از مدل‌های نظری

TPTM	SRM	SR _m	Depth of (cm)soil	
۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۵	RMSE	۰-۲۵
۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۹	R ²	
۰/۸۸	۱/۱	۰/۵۸	RMSE	۰-۵۰
۰/۳۱	۰/۵۱	۰/۹۴	R ²	
۲/۱۵	۲/۲۶	۲/۲۱	RMSE	۰-۷۵
۰/۵۱	۰/۷۰	۰/۷۸	R ²	
۳/۴۷	۳/۴۲	۰/۹۴	RMSE	۰-۱۰۰
۰/۶۰	۰/۷۵	۰/۹۴	R ²	

خاک‌ها قابلیت شوری و سدیم‌زدایی دارند به این صورت که کلاس شوری نیم‌رخ خاک از کلاس شوری و قلیائیت S₂A₂ به کلاس شوری S₁A₁ تقلیل یافت. همچنین مشخص شد مدل‌های نظری شوری نهایی را با دقت بیشتری نسبت به مدل‌های تجربی در منطقه مورد مطالعه پیش‌بینی می‌کنند. در پیش‌بینی شوری و قلیائیت نهایی خاک بین مدل‌های

نتیجه‌گیری

خاک‌های مورد مطالعه تحت تأثیر شوری و سدیمی بودن به خاک‌های غیر قابل کشت یا با کیفیت پایین تبدیل شده‌اند. از طریق آبخویی صورت گرفته به روش غرقاب متناوب در پژوهش انجام گرفته مشخص شد که این



بودن نتایج حاصل برای تمام منطقه، پیشنهاد می‌گردد آزمایش‌های آبشویی و مقایسه داده‌های صحرایی با مدل-های تجربی و همچنین مدل‌های نظری در نقاط بیشتری از منطقه انجام شود.

قدردانی

این پژوهش با حمایت مالی معاونت پژوهشی دانشگاه زابل با کد پژوهانه UOZ-GR-7644 انجام شد که بدین‌وسیله از آن تشکر و قدردانی می‌گردد.

تجربی تفاوت چندانی نبود و از بین مدل‌های ذکر شده در تحقیق مدل پذیرا و کشاورز (۱۹۹۸) عملکرد بهتری داشت از بین مدل‌های نظری مدل مخزن منفرد نسبت به داده‌های مشاهداتی بهترین عملکرد را داشت. منحنی‌های شوری-زدایی و سدیم‌زدایی نشان داد که شستشوی املاح با شیب سریعی انجام گرفته است و بهترین عملکرد در تیمار ۱۰۰ سانتی‌متر اتفاق افتاده است. البته در اعماق کمتر کاربرد تیمارهای ۲۵، ۵۰ و ۷۵ سانتی‌متر آب نیز عملکرد قابل قبولی داشته‌اند ولی در نهایت برای کل عمق ۱۰۰ سانتی-متر پروفیل خاک تیمار D با کاربرد ۱۰۰ سانتی‌متر آب عملکرد بهتر داشت. با توجه به اینکه آزمایشات آبشویی در این تحقیق، در یک مزرعه کوچک و در یک نقطه از خاک-های این منطقه انجام شده است، به‌منظور جامع و کاربردی

منابع

- اسدی، ص.، همایی، م.، پذیرا، ا. ۱۳۹۱. مدل‌سازی آب آبشویی مورد نیاز برای بهسازی خاک‌های شور. نشریه حفاظت منابع آب و خاک، دوره ۲، شماره ۲، ص ۶۵-۸۳.
- بروجنی، د.، بابازاده، ح.، پذیرا، ا.، پلوس، ا. ۱۴۰۱. کاربرد مدل فیزیکی در شبیه‌سازی روش غرقاب دائم و متناوب خاک‌های شور و سدیمی. علوم و مهندسی آبیاری، دوره ۴۵، شماره ۱، ص ۴۹-۶۴.
- پذیرا، ا.، کشاورز، ع. ۱۳۷۸. بررسی و تعیین آب مورد نیاز اصلاح خاک‌های شور و سدیمی اراضی جنوب شرقی استان خوزستان، مجله تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سال ۴، شماره ۱۶، ص ۱-۱۳.
- رضائیان، ز.، پذیرا، ا.، پناهپور، ا.، ظهراپی، ن. ۱۳۹۶. مقایسه روش‌های مختلف آبشویی نمک‌های محلول از نیم‌رخ خاک‌های شور و سدیمی. فصلنامه تخصصی علوم و مهندسی آب، سال ۷، شماره ۱۵، ص ۷۹-۹۲.
- رنجبران، ن.، غلامی، ع.، پناهپور، ا. ۱۳۹۵. بررسی مدل‌های مختلف تجربی و نظری آبشویی بر شستشوی املاح و سدیم در خاک‌های شور استان خوزستان. همایش ملی آب و سازه‌های هیدرولیکی، ۱۱ اسفند ۱۳۹۵، ۱۳ صفحه.
- سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور. ۱۳۸۵. راهنمای کاربرد مدل‌های تجربی و نظری آبشویی نمک‌های شور. نشریه شماره ۳۵۹
- کپورچال، ص.، همایی، م.، پذیرا، ا. ۱۳۹۱. مدل‌سازی آب آبشویی مورد نیاز برای بهسازی خاک‌های شور. نشریه حفاظت منابع آب و خاک، سال ۲، ص ۶۵-۸۳.
- سلطانی، ر. ۱۳۸۷. واسنجی مدل‌های تجربی آبشویی خاک‌های شور در مزرعه آموزشی دانشگاه زابل. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشکده کشاورزی دانشگاه زابل.
- محمدزاده، م.، همایی، م.، اسدی کپورچال، ص. اسکندری، م. ۱۳۹۹. ارزیابی کارایی مدل‌های نظری آبشویی املاح خاک در دشت آزادگان. مهندسی آبیاری و آب ایران، شماره ۱۰، ص ۱۴۴-۱۶۶.
- مشعل، م.، دانشور، م.، امامی، س.، وراوی پور، م. ۱۳۹۲. ارزیابی مدل‌های نظری آبشویی املاح خاک. مدیریت آب و آبیاری، دوره ۳، شماره ۱، ص ۱۳۴-۱۲۱.



- Anapali, O., Shahin, V. Oztas, T. and Hanay, A. 2001. Defining effective salt leaching regions between drains. *Turk. J. agric.* 25: 51-56.
- Balkhi, A., Ebrahimian, H., Ghameshlou, A.N. Amini, M. 2022. Modeling of nitrate and ammonium leaching and crop uptake under wastewater application considering nitrogen cycle in the soil. *Model. Earth Syst. Environ*, <https://doi.org/10.1007/s40808-022-01546-9>.
- Chari MM, Poozan MT, Afrasiab P. 2020. Modeling soil water infiltration variability using scaling. *Biosyst Eng.* 196: 5 6 -6 6.
- Corwin, D.L., Rhoades, J.D. and Simunek, J. 2007. Leaching requirement fore soil salinity control : Steady – state versus transient models. *Agricul , Water Manage.* 90(3):165-180.
- Cote, C.M., Bristow, K.L., and Ross, P.J. 2000. Increasing the efficiency of solute leaching. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 43: 1100-1106.
- Dong S., Wang G., Yaohu Kang Y., Ma Q Wan, S. 2022. Soil water and salinity dynamics under the improved drip-irrigation scheduling for ecological restoration in the saline area of Yellow River basin. 264- <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107255>.
- Droogers, P., Akbari, M., and Torabi, M. 2000. Exploring field scale salinity using simulation modeling, example for Rudasht area, Isfahan Province, Iran. *IAERI-IWMI Research Reports* 2. 16p.
- Farifte J., Farshad, A., George RJ. 2005. Assessing salt – affected soils using remote sensing, solute modeling , and geophysics. *Geoderma.* 130: 191-206.
- Gee, G. W., & Bauder, J. W. 1986. Particle size analysis, hydrometer methods. In A. Klute (Ed.), *Method of soil analysis: Part 1, physical and mineralogical methods* (pp. 383e411). Madison, WI, USA: American Society of Agronomy and SoilScience Society of America. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c15>.
- Helalia , S., Anderson, R., Skaggs T., Jirka Šimunek, J. 2021. Impact of Drought and Changing Water Sources on Water Use and Soil Salinity of Almond and Pistachio Orchards: 2. Modeling. *Soil Syst.* <https://doi.org/10.3390/soilsystems5040058>
- Katerji N., van Hoorn J.W., Fares,C., Hamdy A., Mastrorilli M.and Oweis T. 2005. Salinity effect on grain quality of two durum wheat varieties differing in salt tolerance.*Agricultural Water Management.* 75:85-91.
- Konuku, F., G.W. Gowing, and D.A. Rose. 2005. Dry drain:A sustainable solution to water logging and salinity problems in irrigation areas. *Agricul, Water Manage.* 83(1):1-12.
- Leffelaar PA, sharma P. 1977. Leaching of a highly saline-sodic soil. *Journal of Hydrology.* 32: 203-218.
- Mohsenifar, K., Pazira, A. and Najafi, P. 2006. Evaluation of different types of leaching models in two pilots of south east Khoozestan province. 18th World Congress of Soil Science, Philadelphia, Pennsylvania, USA, 6 page.
- Pazira, E. and Kawachi, T. 1981. Studies on appropriate depth of leaching water, Iran .A case study. *Journal of Integrated Agricultural Water agricultural production in South Asia. Agriculture Water Management.* 78 (1-2): 136-151.
- Pazira, E., Keshavarz, A. and Torii, K. 1998. Studies on appropriate depth of leaching water, International Workshop on the Use of Saline and Brackish-Water for Irrigation, Indonesia. Reeve, R.C. 1957. The relation of salinity to irrigation and drainage requirements. *Third Congress of International Commission on Irrigation and Drainage, Transactions.* 5(10): 175-187.
- Rajabzadeh, F., Pazira, E. Mahdian, MH. Mahmoudi, S. and Heidarizadeh, M. 2009. Leaching saline and sodic soils along with reclamation-rotation program in the mid-part of Khuzestan, Iran. *Journal of Applied Science.* 9: 4020-4025.
- Shahriari M., Delbari M., Afrasiab P., Pahlavan-Rad M.R. 2019. Predicting regional spatial distribution of soil texture in floodplains using remote sensing data: A case of southeastern Iran. *Catena.* 182:1-12.