نشریه علمی مدیریت اراضی/ جلد ۱۱ / شماره ۲ / ۱۴۰۲. ص ۱۴۷-۱۶۰
https://doi.org/10.22092/lmj.2023.361458.326

مروری بر وضعیت شوری خاک در اراضی دیم ایران

سعید سعادت*، لیلا اسمعیل‌نژاد، حامد رضائی و رسول میرخانی

دانشیار مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران. **saeed_saadat@yahoo.com**

استادیار مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران. **esmaeelnejad.leila@gmail.com**

دانشیار مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران. **rezaei_h@yahoo.com**

استادیار مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران. **rasoul_mirkhani@yahoo.com**

دریافت: فروردین ۱۴۰۲ و پذیرش: شهریور ۱۴۰۲

چکیده

حدود ۸۰ درصد اراضی کشاورزی جهان به‌صورت دیم کشت می‌شوند و این اراضی نزدیک به ۶۰ درصد نیاز غذایی بشر را تأمین می‌کنند. با توجه به پراکنش نامناسب بارش در مناطق خشک و نیمه‌خشک، جلوگیری از شور شدن خاک و آب این اراضی بسیار ضروری است. اراضی دیم یکی از مهم‌ترین منابع برای تولید در بخش کشاورزی به‌ویژه در شرایط کنونی است که توسعه اراضی آبی با محدودیت روبه‌رو باشد. یکی از محدودیت‌های مهم که می‌تواند در توسعه و استفاده از این اراضی مؤثر باشد، شوری خاک است که افزون بر محدودیت‌های دیگر (کمبود رطوبت و ...)، می‌تواند باعث کاهش تولید در این اراضی شود. به‌منظور آگاهی از وضعیت شوری اراضی دیم کشور، در یک پژوهش ملی تعداد ۸۴۹ پایگاه مطالعاتی انتخاب و نمونه‌های خاک از اعماق مختلف تهیه و افزون بر هدایت الکتریکی، برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن‌ها نیز اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که بیشترین و کمترین مقدار شوری در اراضی دیم با کاربری زراعی (عمق ۳۰-۰ سانتیمتر) به‌ترتیب برابر ۹۷/۵ و ۰/۱۹ دسی‌زیمنس بر متر است. میانگین شوری خاک سطحی این اراضی (عمق ۳۰-۰ سانتیمتر) برابر ۲/۲۸ دسی‌زیمنس بر متر بوده و بیش از ۵۰ درصد خاک‌های این اراضی دارای شوری بیش از ۰/۶ دسی‌زیمنس بر متر بودند. همچنین، نتایج تحلیل مؤلفه اصلی نشان داد تغییرپذیری شوری خاک در اراضی دیم، تحت تأثیر ویژگی‌های اقلیمی (مثل دما و بارش و سایر شاخص‌های منتج شده از این دو عامل شامل شاخص‌های بارش استانداردشده و خشک‌سالی مؤثر) و همچنین ویژگی‌های خاک (کربن آلی، رس و مقادیر املاح محلول به‌ویژه سدیم) بودند.

واژه‌های کلیدی: املاح محلول، اقلیم، پایش، کربن آلی، سدیم

* - آدرس ایمیل نویسنده مسئول: saeed_saadat@yahoo.com

نوع مقاله: پژوهشی

مقدمه

خاک به‌عنوان یک پیکر زنده و جزئی از محیط پویای طبیعی، همواره در حال تغییر و تکوین است. خاک تحت تأثیر فاکتورها و فرآیندهای بیرونی و داخلی قرار گرفته و تمام ویژگی‌های فیزیکی و شیمیائی آن در مکان و زمان تغییر می‌کند. با آگاهی از غیر همگن بودن خاک، لازم است تغییرات ویژگی‌های خاک‌پایش و کمّی شده تا بتوان بر مبنای آن به مدیریت مناسب خاک دست یافت. تحقیق در زمینه پایش ویژگی‌های خاک و آب در اراضی کشاورزی و روش‌های مناسب حفظ و بهبود آن‌ها از جمله محورهای پژوهشی در راستای کشاورزی پایدار است. امروزه شوری خاک یکی از مهم‌ترین چالش‌های جهان و کشور ما به‌شمار می‌رود که به دلایل متعدد در حال گسترش و توسعه است. شوری خاک در واقع عبارت است از وجود املاح محلول در خاک به‌اندازه‌ای که بتواند گیاه را تحت تأثیر قرار داده و باعث ایجاد محدودیت در رشد و عملکرد آن شود (Saadat *et al.*, 2019). با این تعریف، شوری، ویژگی‌هایی از خاک و یا آب را بیان می‌کند که گیاه محور بوده و با توجه به ویژگی‌های فیزیولوژیکی و مقدار تحمل گیاه، مقدار و میزان اثربخشی آن می‌تواند برای گیاهان مختلف متفاوت - باشد (Saadat *et al.*, 2019). به‌عبارتی‌دیگر، در یک مکان و برای یک گیاه مشخص، یک مقدار شوری می‌تواند محدودکننده باشد درصورتی‌که همین مقدار شوری برای گیاهی دیگر و یا در مکانی دیگر می‌تواند محدود کننده نباشد (Saadat *et al.*, 2020). مدیریت درست شوری خاک برای دستیابی به اغلب اهداف توسعه پایدار (SDGs[1]) سازمان ملل از جمله «گرسنگی صفر» (SDG2[2]) و «زندگی روی زمین» (SDG15[3]) حیاتی است. از دیگر سو با توجه به محدودیت منابع آب‌وخاک و لزوم روزافزون تأمین غذا، استفاده از این منابع نه تنها ضروری، بلکه با اعمال مدیریت‌های مناسب، از جمله وظایف دولت‌ها محسوب می‌شود. بررسی تغییرات شوری در خاک امری بسیار پیچیده بوده و تغییرات زمانی و مکانی آن به‌دلیل حجم آب مصرفی متفاوت، حرکت آب (نفوذپذیری و زهکشی) و تبخیر و تعرق، متفاوت است. شوری خاک‌های زراعی و آب آبیاری را می‌توان جزء عمده‌ترین عوامل محدوده کننده رشد گیاهان در اغلب نقاط جهان و از جمله ایران دانست (Ghassemi *et al.*,1995). کل اراضی شور جهان حدود ۱۱۳۰ میلیون هکتار بوده که حدود ۶۷ درصد آن متأثر از فعالیت‌های بشری هستند (FAO, 2018). همچنین روزانه حدود ۱۴ کیلومترمربع از اراضی آبی جهان به‌واسطه شور شدن در حال از بین رفتن می‌باشند (Singh., 2022). بخش بزرگی از اراضی کشاورزی ایران به‌علت قرار گرفتن در اقلیم خشک و نیمه‌خشک و مدیریت نامناسب زراعی و باغی در خطر شوری قرار گرفته‌اند و بر اساس اطلاعات موجود سطحی حدود ۴۴/۵ میلیون هکتار را به خود اختصاص داده است (Banaei, 2002). بر اساس مطالعات و بررسی‌های انجام شده، سطح اراضی کشاورزی کشور حدود ۱۸/۵ میلیون هکتار است (Momeni, 2011; Saadat *et al.*, 2019). از این مقدار، حدود هشت میلیون هکتار به‌صورت آبی بوده که حدود ۶/۸ میلیون هکتار آن با محدودیت‌های مختلف و عمدتاً شوری روبرو است و تنها حدود ۱/۲ میلیون هکتار آن بدون محدودیت است.

شوری خاک یکی از ویژگی‌های پویای خاک بوده که تحت تأثیر عوامل بسیاری قرار دارد. بر اساس یک تقسیم‌بندی این عوامل به عوامل اولیه و ثانویه گروه‌بندی می‌شوند. همچنین، برخی از پارامترهای محیطی نظیر دما، تبخیر و تعرق، میزان رطوبت خاک و هوا و به‌طورکلی پارامترهای اقلیمی بر شدت تأثیر شوری بر گیاهان اثرگذار است (Aksoy *et al.*, 2020 و Wilson, 2019). با این مقدمه می‌توان گفت که برای درک صحیح اثر شوری بر گیاه، بررسی دقیق و تجزیه‌وتحلیل آن از نظر زمانی، مکانی و فیزیولوژیکی ضرورت دارد. شوری

[1]-Sustainable Development Goals
[2]-Zero Hunger
[3]-Life on Land

هم‌چنین در طی فصول مختلف و با توجه به مدیریت آبیاری در محدوده‌های مختلف، تغییرات وسیعی دارد (*et* Muhetaer *al.*, 2022). بررسی وسعت، شدت و مقدار شوری منابع خاک و آب و به‌عبارتی پایش آن‌ها می‌تواند به مدیریت درست این منابع کمک نموده و راهکاری برای به‌کارگیری مناسب این منابع به‌منظور قرار گرفتن در چرخه تولید قرار گیرد.

حدود ۸۰ درصد اراضی کشاورزی جهان به‌صورت دیم کشت می‌شوند که نزدیک به ۶۰ درصد نیاز غذایی بشر را تأمین می‌کنند. گستره کشاورزی دیم به‌صورت منطقه‌ای از ۶۰ درصد در جنوب آسیا تا بیش از ۹۵ درصد از زمین‌های کشاورزی در جنوب صحرای آفریقا متفاوت است (Mandal *et al.*, 2020). با توجه به پراکنش نامناسب بارش در سال‌های اخیر، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان، مدیریت آب‌وخاک و پیشگیری از شوری در این اراضی بسیار ضروری است. تضاد بین افزایش تقاضا برای تولید غذا و کاهش دسترسی به آب، مانع اصلی برای کشاورزی پایدار در سراسر جهان است (Molden *et al.*, 2011). انتظار می‌رود مشکل کمبود آب (یا دسترسی محدود به آب) در آینده با افزایش جمعیت جهان و تغییرات پیش‌بینی شده اقلیمی (افزایش دما همراه با الگوهای بارندگی نامنظم) تشدید شده (Sishodia *et al.*, 2018) و بدترین مناطق تحت تأثیر این تغییرات، اراضی کشاورزی دیم در مناطق خشک و نیمه‌خشک که عموماً از بهره‌وری پایین و سایر مشکلات زراعی- اکولوژیکی رنج می‌برند، باشد (Jin *et al.*, 2018) ؛ بنابراین، بهره‌وری بیشتر از مناطق دیم باید برای تأمین امنیت غذایی آینده افزایش یابد. بهره‌وری کشاورزی اراضی دیم در درجه اول به بارش باران‌های فصلی بستگی داشته و به‌شدت تحت تأثیر تغییرات مکانی و زمانی بارندگی است. درحالی‌که برخی از این مناطق دارای ذخیره آب زیرزمینی هستند، عملیات کشاورزی فشرده اتخاذشده منجر به کاهش سطح آب شده است. شواهد متعددی مبنی بر کاهش پتانسیل تولید در مناطق کشاورزی دیم در سراسر جهان به‌دلیل تغییر اقلیم وجود دارد؛ بنابراین، افزایش تقاضای غذا، دسترسی ناکافی به آب همراه با بارندگی نامشخص (هم از نظر مقدار و هم از نظر مدت‌زمان) و شور شدن خاک، استراتژی‌های مدیریت پایدار در مناطق دیم را برای افزایش بهره‌وری کشاورزی و تأمین امنیت غذایی آینده تحت تأثیر قرار می‌دهد (Surendran *et al.*, 2016). Feizi Asl (2019) ، وضعیت حاصلخیزی دیمزارهای شمال غرب کشور را ارزیابی نموده و بیان کرد که شوری و آهک، مشکل جدی در دیمزارهای این منطقه محسوب نمی‌شود. وی مقادیر میانگین و بیشینه هدایت الکتریکی این مناطق را به‌ترتیب ۰/۷۶ و ۱/۷۳ دسی زیمنس بر متر اعلام کرد. با توجه به پویا بودن شوری، بررسی و ارائه آمارهای جدید و به‌روز از مقدار، وسعت و شدت آن در اراضی دیم ضروری است. پژوهش حاضر با اهداف ۱) بررسی وضعیت شوری خاک در اراضی دیم کشور، ۲) تعیین مقادیر شوری خاک در کاربری‌های مختلف اراضی دیم (زراعی، باغی و آیش) و ۳) تعیین مهم‌ترین عوامل اقلیمی و خاکی مؤثر بر شوری خاک در اراضی دیم اجرا شد.

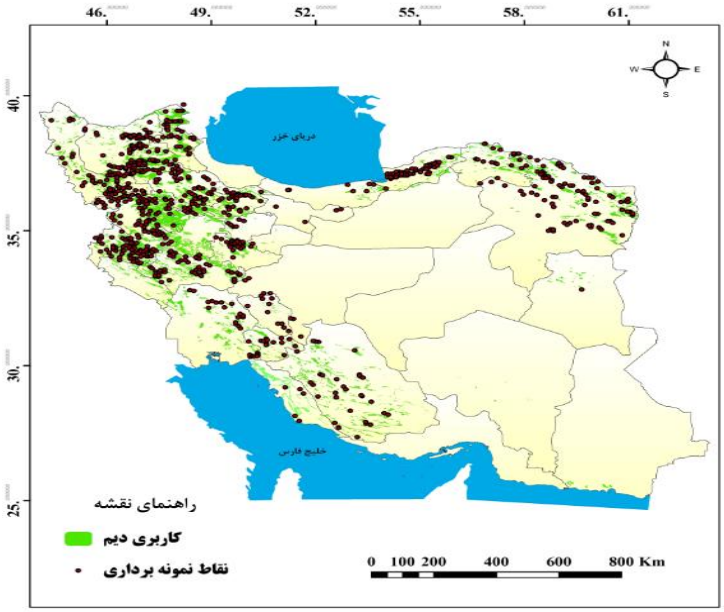
مواد و روش‌ها

نمونه‌برداری

به‌منظور آگاهی از وضعیت شوری خاک اراضی دیم کشور، پژوهشی ملی در ۸۵۴ پایگاه مطالعاتی که توسط شبکه‌بندی اراضی دیم کشور (به ازاء حداقل هر ۶۰۰۰ هکتار یک پایگاه مطالعاتی) تعیین‌شده بودند، انجام گرفت. برای انتخاب این پایگاه‌های نمونه‌برداری، از برخی اطلاعات جانبی نظیر نوع کاربری اراضی، نقشه خاک‌های ایران، اقلیم، اطلاعات زمین‌شناسی و غیره نیز استفاده شد. برای تعیین نقاط نمونه‌برداری، ابتدا با استفاده از اطلاعات موجود نظیر نقشه رقومی استان‌ها، نقشه رقومی کاربری اراضی و نیز نقشه خاک‌های کشور و با توجه به سطح زیر کشت استان‌ها، در یک شبکه ۶×۶ کیلومتر، پایگاه‌های پیشنهادی در هر منطقه مشخص شد.

سپس با انجام بازدیدهای کارشناسی از هر یک از پایگاه‌ها و برگزاری جلسات کارشناسی با کارشناسان خبره منطقه‌ای در نهایت تعداد ۸۴۹ پایگاه انتخاب گردید.

شکل یک موقعیت پایگاه‌ها را در اراضی دیم کشور نشان می‌دهد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود پایگاه‌ها از پراکنش مناسبی برخوردار بوده و اطلاعات به‌دست‌آمده از آن‌ها می‌تواند به کل منطقه/کاربری تعمیم یابد. نکته مهم در به‌دست آوردن اطلاعات از این پایگاه‌ها، افزون بر پراکنش، چگونگی و عمق نمونه‌برداری از خاک است. در پایگاه‌های موجود در اراضی زراعی، نمونه‌برداری از دو عمق ۳۰-۰ و ۶۰-۳۰ سانتی‌متری خاک و در پایگاه‌های موجود در اراضی باغی نمونه‌برداری از سه عمق ۳۰-۰، ۶۰-۳۰ و ۹۰-۶۰ سانتی‌متری (در مجموع ۱۷۱۱ نمونه خاک) انجام گرفت تا معرف تغییرات موجود در ویژگی‌های خاک در عمق‌های مختلف باشد.



شکل ۱- موقعیت پایگاه‌های مطالعاتی در اراضی دیم کشور

Figure 1- The location of study sites in the country's rainfed lands

برای تحلیل وضعیت شوری خاک نیز از ویژگی هدایت الکتریکی (EC) اشباع بر حسب دسی‌زیمنس بر متر استفاده شد. نمونه‌های خاک در آزمایشگاه تجزیه‌شده و افزون بر هدایت الکتریکی، pH، سدیم محلول، کلر محلول، کربن آلی، رس، سیلت و شن و ... نیز بر اساس روش‌های استاندارد موسسه تحقیقات خاک و آب (Ali Ehyaei, 1998) اندازه‌گیری شدند. همچنین با استفاده از داده‌های اقلیمی، ویژگی‌های میانگین دمای سالیانه، میانگین بارندگی سالانه، شاخص بارش استانداردشده (SPI) (Bahreini *et al.*, 2018) ، درصد ناهنجاری بارش (RAI) ، شاخص استاندارد تبخیر و تعرق (SPEI) و شاخص خشکسالی مؤثر (EDI) نیز استخراج شده (Yao *et al.*, 2018) و برای بررسی همبستگی با شوری خاک مورد استفاده قرار گرفتند.

به‌منظور محاسبه شاخص استاندارد شدهٔ بارش (SPI)، در بازه‌های زمانی متفاوت ۳، ۶، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماهه با توجه به حجیم بودن محاسبات و طولانی بودن انتقال تابع توزیع تجمعی گاما به توزیع نرمال از برنامهٔ کامپیوتری SPI استفاده گردید. این برنامه محصول مرکز ملی تعدیل خشکسالی ایالات‌متحده است که در آن به‌منظور پایش خشکسالی از روش SPI در سطح گسترده‌ای استفاده گردیده و نتایج پایش خشکسالی به‌صورت نقشه‌هایی در مقیاس‌های متفاوت تهیه و بر روی سایت اینترنتی ارائه شده است.

اساس درصد ناهنجاری بارش (RAI)، محاسبه انحراف مقادیر بارش از نرمال است و از روابط زیر به‌دست می‌آید:

$$RAI = 3[(P-\bar{P})/(\bar{m}-\bar{P})] \quad P>\bar{P} \quad (۱)$$

$$RAI = -3[(P-\bar{P})/(\bar{m}-\bar{P})] \quad P<\bar{P} \quad (۲)$$

شاخص استاندارد تبخیر و تعرق (SPEI) در مقیاس‌های زمانی مختلف از معادله ساده بیلان آب یعنی تفاوت بین بارندگی و تبخیر و تعرّق پتانسیل بر اساس رویکرد تورنت–وایت استفاده می‌نماید. با در نظر گرفتن تبخیر و تعرّق پتانسیل، تفاوت بین بارندگی و تبخیر و تعرّق پتانسیل برای ماه i به‌صورت رابطه ۳ محاسبه می‌گردد:

$$D_i = P_i - PET_i \quad (۳)$$

مقادیر D در مقیاس‌های زمانی مختلف از رابطه ۴ به‌دست می‌آید:

$$\mathbf{D_n^k = \sum_{n=0}^{k-1} P_{n-1} - PET_{n-i}} \quad (۴)$$

که k ماه‌ها (مقیاس زمانی مورد نظر) و n ماه مورد نظر در محاسبه است. یک توزیع سه پارامتری برای محاسبه شاخص خشکسالی نیاز است تا بتواند مقادیر منفی در داده‌های D را پوشش دهد. نتایج انتخاب مناسب‌ترین تابع توزیع نشان داده است که تابع لجستیک لگاریتمی برازش خوبی بر سری زمانی داده‌ها در مقیاس‌های زمانی مختلف دارد. بدین ترتیب تابع تجمعی احتمال سری داده‌های D بر اساس تابع لجستیک لگاریتمی به‌صورت رابطه ۵ است.

$$f(x) = \left[1 + \left(\frac{a}{x-\gamma}\right)\right]^{-1} \quad (۵)$$

که در آن، a پارامتر مقیاس، γ پارامتر اصلی برای مقادیر مختلف D و x پارمتر شکل است. بدین ترتیب پس از محاسبه تابع توزیع تجمعی و تبدیل آن به مقادیر نرمال مقادیر شاخص SPEI استخراج می‌گردد.

شاخص خشکسالی مؤثر (EDI) عبارت است از مقدار کمبود بارش نسبت به وضعیت نرمال که بر اساس رابطه ۶ بدست می‌آید:

$$EDI = \frac{PRN_j}{ST(PRN_j)} \quad (۶)$$

که در آن، PRN_j مقدار بارندگی لازم برای برگشت به شرایط نرمال از کمبود بارش (میلی‌متر) و $ST(PRN_j)$ نیز انحراف معیار از PRN_j را نشان می‌دهد.

بررسی همبستگی ویژگی‌های خاک و پارامترهای اقلیمی با شوری خاک در اراضی دیم و آنالیز مؤلفه‌های اصلی

همبستگی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، زمینه‌های به‌کارگیری روش‌های مختلف را برای تفسیر و بررسی تغییرپذیری خاک‌ها فراهم آورده است. از جمله این روش‌ها، روش‌های چندمتغیره است. یکی از روش‌های چند متغیره پرکاربرد در علوم خاک، روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA[۴]) است. این روش با توجه به اهمیت شناخت عوامل خاکی و اقلیمی مؤثر بر شوری خاک در اراضی دیم و در راستای گروه‌بندی ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی اندازه‌گیری شده خاک و همچنین پارامترهای اقلیمی برای شناسایی مهم‌ترین ویژگی‌های مؤثر بر شوری خاک با استفاده از تحلیل مؤلفه‌های اصلی و رگرسیون چند متغیره، در اراضی دیم سراسر کشور انجام شد.

آمار توصیفی

آماره‌های توصیفی ویژگی‌های خاک شامل کرانه‌ها (حداقل و حداکثر)، آماره‌های مرکزیت (میانگین و میانه)، آماره‌های پراکندگی (واریانس، انحراف معیار، چولگی و کشیدگی و ضریب تغییرات) محاسبه شدند. برای محاسبه این ویژگی‌ها از نرم‌افزار (SPSS ۲۴) استفاده شد.

تحلیل مؤلفه اصلی

برای انتخاب تعداد مؤلفه‌های مؤثر، مؤلفه‌هایی انتخاب شدند که مقدار ارزش ویژه آن‌ها بیشتر از یک باشد. ازآنجایی‌که واحدهای متغیرهای مورد بررسی همسان نبودند برای محاسبه مؤلفه‌های اصلی از ماتریس

[4] -Principal Component Analysis

همبستگی استفاده شد. به‌منظور ارزیابی شایستگی داده‌ها برای تحلیل مؤلفه‌های اصلی از ضریب KMO (Kaiser,1974) و به‌منظور بررسی رابطه قوی بین متغیرها (معناداری اطلاعات موجود در ماتریس همبستگی) از آزمون کرویت بارتلت (Bartlett, 1954) استفاده شد. محدوده ضریب KMO از صفر تا یک است و درصورتی‌که KMO بیشتر از ۰/۵ باشد، داده‌ها برای تحلیل عاملی مناسب خواهند بود (Hair *et al*., 2006). قبل از انجام تحلیل مؤلفه‌های اصلی باید بررسی شود که متغیرها در ماتریس همبستگی، همبستگی خیلی کم یا خیلی زیاد با هم نداشته باشند. معیار همبستگی زیاد ضریب همبستگی کمتر از ۰/۸- و بیشتر از ۰/۸ (Field, 2009) است. همچنین چنانچه ضرایب همبستگی یک متغیر بین ۰/۳- تا ۰/۳ باشد، نشان‌دهنده این است که آن متغیر برای تحلیل مؤلفه‌های اصلی مناسب نیست (Tabachnick and Fidell., 2001). به‌منظور انتخاب و تفسیر ویژگی‌های مهم و کنترل‌کننده بیشترین تغییرات در هر مؤلفه، از معیار انتخاب (SC) استفاده گردید (Ovalles and Collins., 1988).

$$SC = \frac{0.5}{(PC_{eigenvalue})^{0.5}} \qquad (۷)$$

در این رابطه SC معیار انتخاب، $PC_{eigenvalue}$ ارزش ویژه مؤلفه مربوطه است. برای تعیین ترکیب خطی هر مؤلفه (رابطه ۷) تنها ویژگی‌هایی انتخاب می‌شوند که قدر مطلق ضرایب آن‌ها از مقدار معیار انتخاب محاسبه‌شده برای آن مؤلفه بیشتر است.

آنالیز رگرسیون چند متغیره

پس از استخراج مؤلفه‌های مهم، بین این مؤلفه‌ها با مقدار شوری خاک، رگرسیون چند متغیره خطی به روش هم‌زمان انجام شد. در رگرسیون هم‌زمان، همه متغیرهای غیر وابسته در یک زمان داخل معادله شده و هر متغیر پیش‌بینی کننده مانند بقیه متغیرهای غیر وابسته دیگر که وارد شده‌اند، ارزیابی می‌شود. این روش برای زمانی که یک مجموعه کوچک از پیش‌بینی کننده‌ها وجود دارد و هنگامی‌که محقق نمی‌داند کدام متغیرهای غیر وابسته بهترین معادله پیش‌بینی را به‌وجود می‌آورند، مناسب است. در این مطالعه از معیارهای ضریب تبیین (R^2)، میانگین خطا یا اریب (ME) و ریشه دوم میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE) برای اعتبارسنجی مدل‌ها استفاده شد (معادله ۸ و ۹). برای محاسبه معیارهای مذکور، ۲۵ درصد از داده‌ها که در مدل‌سازی وارد نشده‌اند مورد استفاده قرار گرفتند. در این روابط Pi مقادیر پیش‌بینی‌شده، Qi مقادیر اندازه‌گیری شده، n تعداد نمونه‌های به‌کار رفته و $\bar{Q}_i$ مقدار متوسط پارامتر مشاهده شده است. در شرایط ایده‌ال اگر پیش‌بینی بدون اُریب باشد، آنگاه ME محاسبه‌شده می‌بایستی برابر با صفر شود، بنابراین مقادیر کمتر ME ترجیح داده می‌شوند. اگر چه ارزش ME به مقیاس داده‌ها وابسته است. مقدار NRMSE نشان می‌دهد که پیش‌بینی‌ها تا چه حد اندازه‌گیری‌ها را بیشتر یا کمتر تخمین زده‌اند؛ بنابراین مقادیر کمتر NRMSE محاسبه شده نشان‌دهنده نزدیکی بیشتر مقادیر پیش‌بینی‌شده به مقادیر اندازه‌گیری شده است. مقدار NRMSE ایده‌آل برای مدل‌سازی کمتر از ۱۰ درصد است. مقدار NRMSE در بازه‌های ۱۰ تا ۲۰ درصد و ۲۰ تا ۳۰ درصد به‌ترتیب نشانگر وضعیت مناسب و متوسط در پیش‌بینی و بیشتر از ۳۰ درصد نشان‌دهنده عدم اطمینان از پیش‌بینی است.

$$ME = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(P_i - Q_i) \qquad (۸)$$

$$NRMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(P_i - Q_i)^2} \times \frac{100}{\bar{Q}_i} \qquad (۹)$$

نتایج و بحث

آماره‌های هدایت الکتریکی خاک در کاربری‌های مختلف اراضی دیم کشور در جدول ۱ ارائه شده است. بیشترین و کمترین مقدار شوری در اراضی زراعی دیم ایران به ترتیب برابر با ۹۹/۸ و ۰/۱۹ و میانگین آن برابر با ۲/۹۹ دسی زیمنس بر متر است. بیش از ۵۰ درصد خاک‌های اراضی دیم کشور نیز دارای شوری کمتر

از ۰/۶ دسی زیمنس بر متر هستند. در اراضی باغی دیم، میانگین شوری خاک ۱/۸ دسی‌زیمنس بر متر و کمینه و بیشینه آن نیز به‌ترتیب ۰/۳۴ و ۱۷/۳۴ دسی‌زیمنس بر متر است. بیشترین مقدار هدایت الکتریکی خاک در اراضی دیم آیش مشاهده شد که در عمق ۳۰-۰ و ۶۰-۳۰ سانتی‌متری به‌ترتیب ۱۵۹ و ۱۳۲ دسی‌زیمنس بر متر بود. میانگین هدایت الکتریکی در اراضی آیش دیم ۲/۹ دسی‌زیمنس بر متر بود. در اراضی آیش معمولاً به‌دلیل برهنه بودن سطح خاک و افزایش تبخیر از سطح، به‌دلیل پدیده موئینگی، تجمع نمک در سطح خاک افزایش‌یافته و بدین ترتیب شوری خاک افزایش می‌یابد (Singhal *et al.*, 2022).

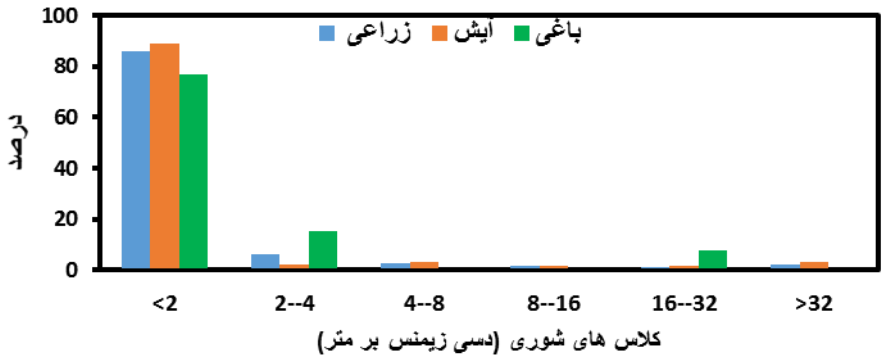
جدول ۱- آماره‌های هدایت الکتریکی خاک در کاربری‌های مختلف اراضی دیم کشور

Table 1- Statistics of EC of soil in different uses of the country's rainfed lands

کاربری	عمق (سانتی‌متر)	میانگین	میانه	انحراف معیار	کمینه	بیشینه	چولگی	کشیدگی
زراعی	0-30	2.28	0.6	8.98	0.19	97.5	8.17	71.88
	30-60	3.08	0.52	13.14	0.2	99.86	7.8	16.73
	Total	2.99	0.57	13.5	0.19	99.86	7.6	62.1
باغی	0-30	2.38	0.8	4.56	0.48	17.34	3.4	11.94
	30-60	1.66	0.64	2.84	0.34	10.73	3.17	10.49
	60-90	1.19	1.15	0.818	0.34	2.58	0.953	2.58
	Total	1.8	0.92	1.2	0.34	17.34	2.2	7.59
آیش	0-30	3.59	0.56	15.1	0.29	159	7.44	63.3
	30-60	2.67	0.49	11.14	0.24	132	8.68	88.4
	Total	2.9	0.5	12.12	0.24	159	7.5	70.5

منظور از کل در هر کاربری، مجموع کل نمونه‌های بررسی شده در همه اعماق آن است

شوری خاک سطحی (۳۰-۰ سانتی‌متری) کاربری‌های زراعی، باغی و آیش اراضی دیم در شکل ۲ نشان داده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، درصد بالایی از کاربری‌های زراعی، آیش و باغی به ترتیب با ۸۶، ۸۹ و ۷۷ درصد از خاک‌های مطالعه شده، در کلاس غیرشور (شوری کمتر از دو دسی‌زیمنس بر متر) قرار دارند. حدود ۱۴ درصد از خاک‌های زراعی دیم دارای درجات مختلفی از شوری هستند و این مقدار در مورد خاک‌های با کاربری آیش و باغی دیم به‌ترتیب ۱۱ و ۲۳ درصد است.



شکل ۲- وضعیت شوری خاک در عمق ۳۰-۰ سانتی‌متر در کاربری‌های مختلف اراضی دیم کشور

Figure 2- Soil salinity status at depth of 0-30 cm in different land uses of the country's rainfed lands

به‌منظور ارائه تصویری دقیق‌تر از وضعیت شوری خاک‌های اراضی زراعی دیم، اطلاعات مربوط به آن‌ها در مناطق ده‌گانه آگرواکولوژیکی[5] (AEZ) کشور در جدول دو ارائه شده است.

[5] -Agro-Ecological Zones (AEZs)

جدول ۲- مقادیر هدایت الکتریکی خاک‌های اراضی زراعی دیم در مناطق ده‌گانه آگرواکولوژیکی ایران
Table 2- Soil EC values of rainfed agricultural lands in ten Agro-Ecological Zones of Iran

AEZs	استان‌های قرار گرفته در هر AEZ	میانگین هدایت الکتریکی ($dS.m^{-1}$)	توضیحات*
AEZ1	اصفهان، یزد	0.58	استان یزد فاقد نقطه مطالعاتی
AEZ2	کرمان، سیستان و بلوچستان	-	هر دو استان فاقد نقطه مطالعاتی
AEZ3	گیلان، مازندران، گلستان	15.02	-
AEZ4	کرمانشاه، ایلام، لرستان، همدان	0.49	-
AEZ5	قزوین، مرکزی، سمنان، البرز، تهران، قم	0.81	استان‌های تهران و قم فاقد نقطه مطالعاتی
AEZ6	خراسان رضوی، خراسان شمالی، خراسان جنوبی	1.59	-
AEZ7	خوزستان	2.9	-
AEZ8	آذربایجان غربی، آذربایجان شرقی، اردبیل	0.86	-
AEZ9	بوشهر، هرمزگان	5.69	استان هرمزگان فاقد نقطه مطالعاتی
AEZ10	فارس، چهارمحال و بختیاری، کهکیلویه و بویراحمد	2.14	-

AEZ1: ناحیه خشک مرکزی، AEZ2: ناحیه خشک جنوبی، AEZ3: ناحیه دشت ساحلی خزر، AEZ4: ناحیه زاگرس مرکزی، AEZ5: ناحیه مرکزی، AEZ6: ناحیه خراسان، AEZ7: ناحیه خوزستان، AEZ8: ناحیه شمال غرب، AEZ9: ناحیه دشت ساحلی جنوبی، AEZ10: ناحیه زاگرس جنوبی

*: استان‌هایی که سطح اراضی دیم آن‌ها کم بوده یا نقشی در تولید محصولات اراضی دیم کشور نداشته‌اند، فاقد پایگاه مطالعاتی پایش بوده و بنابراین مقادیر شوری آن‌ها در میانگین شوری لحاظ نشده است

همان‌طور که از جدول دو قابل استنتاج است، نواحی آگرواکولوژیکی دشت ساحلی خزری (AEZ3) و دشت ساحلی جنوبی (AEZ9) به‌ترتیب بیشترین تأثیر را در افزایش میانگین شوری خاک اراضی زراعی دیم کشور دارا هستند. در ناحیه آگرواکولوژیکی دشت ساحلی خزر، میانگین شوری استان‌های گیلان و مازندران ۰/۴۲ دسی‌زیمنش بر متر است و آنچه مقدار میانگین شوری خاک در این ناحیه را بالا می‌برد، مقادیر شوری برخی خاک‌های اراضی دیم استان گلستان است. همچنین، در ناحیه دشت ساحلی جنوب، نیز شوری خاک اراضی دیم استان بوشهر باعث افزایش میانگین شوری در این ناحیه شده است. بنظر می‌رسد دشت‌های آبرفتی و تالاب‌ها در مناطق خشک و نیمه‌خشک اغلب به شوری اولیه (و ثانویه) حساس هستند، زیرا به دلیل ارتفاع نسبی کم، جریان آب روی زمین انباشته می‌شود. بررسی‌های تکمیلی در ارتباط با نقش شیب در شور شدن اراضی نشان داد که اراضی مورد بررسی در این نواحی دارای شیب کمتر از یک درصد بوده و به دلیل انباشت آب و خاصیت مویینگی شور شده‌اند، لیکن اراضی دارای شیب بیشتر (در برخی مناطق شیب بیشتر از ۱۴ درصد)، شور نبوده‌اند. فرآیندهای شور شدن در این لندفرم‌ها توسط جریان بین آب‌های زیرزمینی و سطحی کنترل می‌شوند. در دوره‌های خشک، آب‌های زیرزمینی با شوری کم اثرات مفیدی دارند، زیرا تخلیه آن می‌تواند جایگزین آب‌های سطحی تبخیر شونده، حفظ شوری متوسط در دشت آبرفتی یا تالاب شود. برعکس، زمانی که آب‌های زیرزمینی شور هستند و سطح آب به دلیل تغییر کاربری زمین یا تغییرات دبی و سطح دریا افزایش می‌یابد، تأثیر آن بر شوری سطح زمین مضر است (Jolly *et al.*, 2008). مناطق ساحلی در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک در معرض خطر بالای شوری اولیه خاک هستند. نمک‌هایی که توسط بادها مستقیماً از سطح دریا منتقل می‌شوند، می‌توانند در سطح خاک رسوب کنند. این یک فرآیند شوری اولیه رایج در جزایر اقیانوسی، مانند هاوایی است (Whipkey *et al.*, 2000). یکی دیگر از انواع شوری اولیه در مناطق ساحلی که در معرض جزر و مد هستند، نفوذ آب شور به رودخانه‌ها و آب‌های زیرزمینی است و با افزایش سطح آب دریا به‌دلیل تغییرات اقلیمی، پیش‌بینی می‌شود در آینده، مقدار و شدت این فرایند تشدید شود.

تحلیل مؤلفه اصلی

پیش از اجرای تحلیل مؤلفه‌های اصلی، مناسب بودن اطلاعات برای تحلیل ارزیابی شد. مقدار ضریبKMO در این مطالعه ۰/۷۲۱ و مقدار آماره بارتلت ۳۹۸/۲ در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. این نتایج نشان داد که تحلیل مؤلفه‌های اصلی می‌تواند برای کاهش تعداد داده و متغیرهای مورد مطالعه سودمند باشد. از سوی دیگر ماتریس ضریب همبستگی خطی بین شوری خاک با سایر ویژگی‌های خاک و پارامترهای اقلیمی (جدول ۳) نشان داد که ۱۴ جفت مقایسه، از بین ۷۸ جفت، در سطح احتمال یک و پنج درصد معنی‌دار بودند که این مسئله احتمال موفقیت در کاهش داده‌ها از راه انجام تحلیل مؤلفه اصلی در جلوگیری از همبستگی‌های موازی بین داده‌ها را توجیه می‌نماید.

جدول ۳- همبستگی بین شوری و سایر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و پارامترهای اقلیمی

Table 3- Correlation between salinity and other physical and chemical characteristics of soil and climatic parameters

متغیر	EC	pH	Na	Cl	Clay	Sand	Silt	Tem.	Pre.	SPI	RAI	SPEI	EDI	OC
EC	1													
pH	0.08	1												
Na	0.52**	0.43*	1											
Cl	0.61**	0.39	0.4*	1										
Clay	0.42*	0.23	0.32	0.29	1									
Sand	-0.12	-0.2	-0.16	-0.11	-0.16	1								
Silt	0.26	0.29	0.15	0.23	0.14	-0.21	1							
Tem.	0.48**	0.2	0.29	0.25	0.18	0.12	0.16	1						
Pre.	-0.53**	-0.28	-0.33	-0.39	0.19	0.22	0.15	0.1	1					
SPI	0.58**	-0.2	-0.14	-0.15	0.2	0.11	0.1	0.13	0.41*	1				
RAI	0.62**	0.1	0.12	0.15	0.21	0.12	0.14	0.08	0.14	-0.22	1			
SPEI	0.6**	0.09	0.17	0.14	0.09	0.21	0.13	0.44**	0.26	0.25	0.3	1		
EDI	0.69**	0.29	0.32	0.27	0.15	-0.32	0.11	0.22	0.28	-0.39	0.41*	0.25	1	
OC	-0.49*	0.02	0.11	0.14	0.39	0.26	0.08	-0.27	0.45*	0.39	0.22	0.29	-0.2	1

EC: هدایت الکتریکی خاک، Na: سدیم محلول خاک، Cl: کلر محلول خاک، clay، sand و silt به‌ترتیب رس، شن و سیلت خاک، Tem: میانگین دمای سالیانه، Pre: میانگین بارش سالیانه، SPI: شاخص بارش استانداردشده، RAI: درصد ناهنجاری بارش، SPEI: استاندارد تبخیر و تعرق، EDI: شاخص خشکسالی مؤثر و OC: کربن آلی خاک

*: معنی‌داری در سطح پنج درصد و **: معنی‌داری در سطح یک درصد

از ارزش مقدار ویژه به‌عنوان محکی برای تفسیر روابط بین متغیرهای خاک و مؤلفه‌ها استفاده شد. تحلیل مؤلفه‌های اصلی نشان داد که سه مؤلفه اول (PC1، PC2 و PC3) با مقدارهای ویژه بزرگ‌تر از یک،۷۳/۲ درصد واریانس کل را برآورد می‌نمایند (جدول ۴). ترتیب اهمیت این مؤلفه‌ها بر مبنای مقدار ارزش ویژه آن‌ها در جدول ۴ نشان داده شده است. همچنین ضرایب مؤلفه‌های اصلی متغیرهای مختلف در مؤلفه‌های مربوطه در جدول ۴ ارائه شده است.

اولین مؤلفه (PC1)، ۳۶/۰۸ درصد از کل واریانس را تشریح می‌کند و دارای بیشترین بار عاملی مثبت با شاخص خشک‌سالی مؤثر (۰/۷۹۳) و بعد ازآن میانگین بارش سالیانه با بار منفی زیاد (۰/۷۵-) و در ادامه بار عاملی مثبت و زیاد سدیم (۰/۷۱)، درصد ناهنجاری بارش (۰/۷) و کربن آلی (۰/۵۰۸-) قرار داشتند. بر پایه نتایج، میزان کربن آلی خاک با افزایش شوری خاک کاهش می‌یابد. به‌نظر می‌رسد تولید توده زنده کمتر در شرایط شور و در نتیجه برگشت کمتر آن به خاک منجر به کاهش کربن آلی خاک شده باشد. شوری خاک نه تنها موجب کاهش پتانسیل اسمزی خاک و محلول غذایی می‌شود بلکه ریز جانداران خاک را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد. افزون بر این شور شدن خاک در تغییر و تبدیل بیوشیمیایی بعضی عناصر غذایی خاک نظیر نیتروژن نیز تأثیر دارد. مؤلفه دوم (PC2) که ۲۵/۲ درصد از کل واریانس را

تشریح می‌کند، دارای بیشترین بار عاملی مثبت با رس (۰/۸۱) و بعد از آن با میانگین دمای سالانه (۰/۷۹) است. مؤلفه سوم (PC3) که ۱۱/۹۲ درصد از کل واریانس را توجیه می‌کند، دارای بیشترین بار عاملی با شاخص بارش استاندارد شده (۰/۶۳) است.

جدول ۴- ضرایب مؤلفه‌های اصلی استخراج‌شده از روش چرخش عاملی و میزان اشتراک واریانس برای ویژگی‌های خاک مورد مطالعه

Table 4- The coefficients of the main components extracted from the factorial rotation method and the share of variance for the studied soil characteristics

متغیر	واحد	PC1	PC2	PC3
pH	-	0.231	0.244	0.140
Na	meq/l	0.710	0.262	0.302
Cl	meq/l	0.302	0.022	0.113
Clay	٪	0.198	0.810	0.058
Sand	٪	-0.002	0.112	0.011
Silt	٪	0.306	0.127	0.211
Tem.	˚C	0.298	0.790	0.149
Pre.	mm	-0.75	0.300	0.134
SPI	-	0.256	0.241	0.630
RAI	-	0.700	0.126	0.300
SPEI	-	0.207	0.133	0.211
EDI	-	0.793	0.013	0.021
OC	٪	-0.508	0.210	0.110
مقدار ویژه	-	2.609	2.241	1.815
واریانس	٪	36.08	25.2	11.92
واریانس تجمعی	٪	36.08	61.28	73.2
معیار انتخاب (SC)	-	0.31	0.34	0.371

Na: سدیم محلول خاک، Cl: کلر محلول خاک، clay، sand و silt به ترتیب رس، شن و سیلت خاک، Tem: میانگین دمای سالیانه، Pre: میانگین بارش سالیانه، SPI: شاخص بارش استاندارد شده، RAI: درصد ناهنجاری بارش، SPEI: استاندارد تبخیر و تعرق، EDI: شاخص خشک‌سالی مؤثر و OC: کربن آلی خاک

به‌منظور تفسیر ویژگی‌های مهم در هر مؤلفه، معیار انتخاب برای سه مؤلفه اصلی شناسایی‌شده، محاسبه شد. همان‌گونه که در جدول ۴ نشان داده شد، به دلیل اینکه از مؤلفه اول به سمت مؤلفه سوم، مقادیر بردار ویژه استفاده‌شده برای محاسبه SC کوچک‌تر می‌شود، مقدار SC حاصله برای مؤلفه سوم بزرگ‌تر است. این مقادیر برای انتخاب ویژگی‌های مهم برای تفسیر هر مؤلفه استفاده می‌شوند. در مؤلفه اول متغیرهای شاخص خشک‌سالی مؤثر، میانگین بارش سالیانه، سدیم محلول خاک، ناهنجاری بارش و کربن آلی که قدر مطلق ضرایب آن‌ها از معیار انتخاب مؤلفه اول (۰/۳۱) بزرگ‌ترند، در تفسیر این مؤلفه در نظر گرفته می‌شوند. به‌همین ترتیب مهم‌ترین ویژگی‌ها برای مؤلفه دوم رس و درجه حرارت سالیانه و برای مؤلفه سوم شاخص بارش استانداردشده می‌باشند. بر این اساس، ترکیب خطی مؤلفه‌های اصلی شناسایی‌شده به‌صورت زیر می‌باشند:

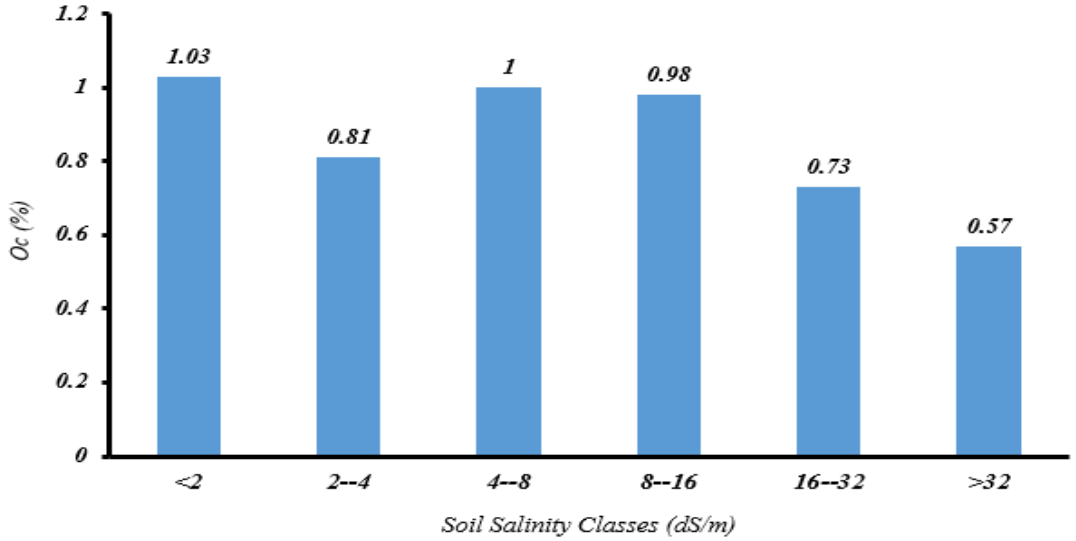
$$PC1 = 0.793EDI - 0.75Pre. + 0.71Na + 0.7RAI - 0.508OC \quad (۱۰)$$

$$PC2 = 0.81Clay + 0.79Tem \quad (۱۱)$$

$$PC3 = 0.63SPI \quad (۱۲)$$

شکل ۳، مقادیر کربن آلی در کلاس‌های مختلف شوری خاک در اراضی دیم را نشان می‌دهد. مقدار میانگین کربن آلی در دیمزارهای کشور، ۷۹٪ درصد است. روند کلی کاهش مقدار کربن آلی خاک با افزایش شوری در شکل ۳ قابل مشاهده است. کاهش مقدار کربن آلی با افزایش شوری می‌تواند بواسطه کاهش فعالیت ریزجانداران، آنزیم‌ها و متابولیک‌ها و در نهایت کاهش زیست‌توده تولید

شده در شرایط شور باشد. به همین خاطر راهکار افزایش کربن آلی از منابع مختلف برای تعدیل اثر شوری بر رشد و عملکرد گیاهان، راهکاری عملی است. نتایج و آمارهای موجود نشان می‌دهد مقادیر کربن آلی تا دو درصد و بیشتر با عملکرد بیشتر همراه است.



شکل ۳- مقادیر کربن آلی در اراضی دیم در کلاس‌های شوری مختلف

Figure 3- Amounts of organic carbon in rainfed lands in different salinity classes

پژوهش‌های زیادی در خصوص تأثیر تغییرات کربن آلی بر عملکرد گیاهان انجام شده است. نتایج بیشتر این پژوهش‌ها حاکی از محدودیت‌های عملکرد محصولات زراعی در مقادیر کربن آلی کمتر از ۲٪ بوده و این مقدار اغلب به‌عنوان یک سطح بحرانی در نظر گرفته می‌شود. Kemper and Koch, 1966; Kravchenko and Bullock, 2000; Pan *et al.*, 2009). در پژوهشی که توسط Rubio و همکاران (۲۰۲۱) انجام گرفت، نشان داده شد که به ازای افزایش یک واحد کربن آلی، مقدار عملکرد گندم ۲۰ درصد افزایش می‌یابد. اخیراً یک متاآنالیز جهانی از این موضوع برای گندم و ذرت توسط Oldfield و همکاران (۲۰۱۹) انجام شد و بر این اساس، مشخص شد بیشترین افزایش عملکرد بین غلظت‌های ۲-۰/۱ درصد کربن آلی اتفاق می‌افتد. به‌عنوان مثال، عملکرد در خاکی با مقدار کربن آلی یک درصد، ۱/۲ برابر بیشتر از خاکی با محتوای کربن آلی ۰/۵ است. همچنین، افزایش مقدار کربن آلی تا دو درصد، ظرفیت بالقوه‌ای برای افزایش میانگین عملکرد در هکتار به میزان ۱۱±۱۰٪ (میانگین ± انحراف معیار) برای ذرت و ۳۷±۲۳٪ برای گندم دارد. این افزایش عملکرد به ترتیب به افزایش ۵ و ۱۰ درصدی در تولید سالانه جهانی ذرت و گندم منجر می‌شود. همچنین، این افزایش در تولید ۳۲٪ از شکاف عملکرد جهانی برای ذرت و ۶۰٪ از شکاف برای گندم را کاهش می‌دهد. با توجه به اینکه دو سوم اراضی تحت کشت ذرت و گندم در جهان دارای غلظت کربن آلی کمتر از ۲ درصد هستند، به نظر می‌رسد فرصت قابل توجهی برای افزایش کربن آلی خاک و در نتیجه کاهش ورودی‌های کودهای نیتروژنی و به‌طور بالقوه کاهش شکاف‌های عملکرد جهانی گندم و ذرت وجود دارد. با این حال، تجزیه‌وتحلیل‌ها نشان می‌دهد که افزایش کربن آلی خاک در زمین‌های مناطق خشک، از ۰/۵ به ۰/۸ درصد، به‌طور بالقوه می‌تواند عملکرد گندم را تا ۱۰٪ افزایش دهد که احتمالاً به دلیل تأثیرات کربن آلی بر افزایش ذخیره رطوبت خاک و همچنین بهبود عرضه مواد مغذی باشد. با توجه به اینکه محدوده کربن آلی در اراضی دیم کشورمان در شوری‌های متفاوت حدود ۰/۵ تا ۱ درصد است، انتظار افزایش عملکرد در این شرایط با

افزایش کربن آلی و مدیریت شوری قابل‌انتظار خواهد بود.

آنالیز رگرسیون چندگانه

نتیجه آنالیز رگرسیون چند متغیره با استفاده از تأثیر سه مؤلفه بر شوری خاک به روش هم‌زمان در معادله ۱۳ نشان داده شده است.

$$EC = 112.1PC1 + 75.1PC2 + 12.1PC3 + 43.2$$
$$R^2 = 0.76; P < 0.05 \quad (۱۳)$$

ضریب تبیین رابطه بین شوری خاک و سه مؤلفه اصلی، ۰/۷۶ است که نشان می‌دهد حدود ۷۶ درصد از تغییرات شوری خاک توسط ویژگی‌های مؤثر بر سه مؤلفه اصلی ذکر شده کنترل می‌شوند. این نتایج نشان داد که بر تغییرپذیری شوری خاک در اراضی دیم، ویژگی‌های متأثر از اقلیم (مثل دما و بارش و سایر شاخص‌های منتج شده از این دو عامل شامل شاخص بارش استاندارد شده و شاخص خشک‌سالی مؤثر) و همچنین ویژگی‌های خاک (کربن آلی، رس و مقادیر املاح محلول به‌ویژه سدیم) مؤثر بودند. به‌عبارتی، ویژگی‌های اقلیمی و برخی ویژگی‌های خاک مثل بافت خاک (درصد رس) و مقدار نمک‌های سدیمی بیشترین تغییرات شوری در خاک‌های اراضی دیم را توجیه می‌کنند. بقیه موارد مثل شرایط فیزیوگرافی، مدیریت مزرعه و کوددهی، مدیریت بقایای گیاهی بر روی سطح خاک پس از برداشت محصولات نیز در تغییرات شوری مؤثر هستند و ۲۴ درصد باقی‌مانده تغییرات شوری در اراضی دیم را بر عهده دارند. همچنین، معیارهای ME و NRMSE محاسبه شده به‌منظور اعتبارسنجی مدل به‌دست آمده نیز به‌ترتیب ۱۲/۷۸- و ۱۰/۵۶ بوده که نشان می‌دهد مدل به‌دست آمده از دقت خوبی برخوردار بوده است.

نتیجه‌گیری کلی

بر پایه نتایج این پژوهش، خاک‌های کشاورزی بیشتر اراضی دیم ایران در نواحی آگرواکولوژیکی مختلف، مشکل شوری نداشته و تنها در استان‌های گرگان (ناحیه آگرواکولوژیکی دشت ساحلی خزر)، بوشهر (ناحیه آگرواکولوژیکی دشت ساحلی جنوبی)، خوزستان (زون خوزستان) و فارس (زون زاگرس جنوبی) تا حدی مشکل شوری اراضی دیم وجود دارد. با توجه به اینکه مؤثرترین پارامترها بر شوری خاک در اراضی دیم مربوط به ویژگی‌های اقلیمی است لذا با توجه به نتایج، به نظر می‌رسد شوری خاک در شرایط دیم کمتر تابع ویژگی‌های خاک و گیاه باشد، لیکن‌در بین ویژگی‌های خاک بررسی‌شده در این مطالعه، رس و کربن آلی خاک به‌عنوان مهم‌ترین ویژگی‌های خاک مؤثر بر شوری اراضی دیم می‌باشند. از آنجا که تغییرات اقلیمی و میزان بارش‌ها چندان مدیریت‌پذیر نیست؛ لذا لازم است با مدیریت مطلوب منابع خاک، ویژگی‌های مؤثر مربوط به خاک را تعدیل نمود. بنابر گزارش‌های مختلف، عملکرد محصولات در شرایط خاک و آب شور با افزایش کربن آلی خاک، افزایش می‌یابد. بر اساس گزارش Keshavarz *et al.*, (2014)، افزایش کربن آلی خاک تأثیر بیشتری بر افزایش عملکرد دانه گندم در شرایط شور (بیشتر یا مساوی ۶ دسی‌زیمنس بر متر) نسبت به شرایط غیر شور داشت. لذا به نظر می‌رسد کربن آلی خاک افزون بر بهبود وضعیت رطوبتی خاک با افزایش فعالیت میکروبی خاک، قابلیت استفاده و نگهداری نیتروژن و بسیاری از عناصر غذایی دیگر را بهبود می‌بخشد. همچنین با کاهش کربن آلی خاک احتمال از دست رفتن عناصر غذایی به‌واسطه آبشویی و رواناب بیشتر خواهد بود؛ بنابراین به‌نظر می‌رسد مهم‌ترین اقدامات مدیریتی برای جلوگیری از افزایش شوری در خاک‌های دیمزارها در شرایط تغییر اقلیم می‌تواند استفاده از بقایای گیاهی در سطح خاک دیمزارها در شرایط آیش برای جلوگیری از تبخیر زیاد و صعود نمک‌ها به سطح خاک، افزایش ذخیره کربن آلی خاک، استفاده از روش‌های مناسب خاکورزی، استفاده از کودهای آلی و دامی و ... باشد.

Reference

1. Aksoy, s., Yildirim, A., Gorji, T., Hamzehpour, N., Tanik, A., and Sertel, E., 2022. Assessing the performance of machine learning algorithms for soil salinity mapping in Google Earth Engine platform using Sentinel-2A and Landsat-8 OLI data. Advances in Space Research
2. Ali Ehyaei, M., 1998. Description of soil chemical decomposition methods. Extension publication of Tehran Agricultural Education and Extension Research Organization, (1024), 0-0. SID. https://sid.ir/paper/458282/fa. (in Persian).
3. Bahreini, F., Panahi, F., Jafari, M., & Malekian, A. (2018). Identification of vegetation-vulnerable areas to drought using remote sensing (Case study: Boushehr Province). *Journal of Range and Watershed Management*, 71(2), 341-354
4. Balasundram, S. K., Husni, M. H. A., and Ahmad, O. H., (2008). Application of geostatistical tools of qualifies spatial variability of selected soil chemical properties from a cultivated tropical peat. *Journal of Agronomy*, 7(1), 82-87.
5. Banaei, M. H., 2002. Map of Iran's soil resources and potential. Soil and Water Research Institute, Tehran, Iran, 6 pages. (in Persian).
6. Bartlett, M. S., (1954). A note on the multiplying factors for various chi square approximations. *Journal of the Royal Statistical Society.*16, 296–298.
7. Faizi Asl, W., 2019. Evaluation of the soil fertility status in the north-western drylands of Iran using the Nutrient Index (NIV). Journal of Water and Soil, 34 (4): 897-919. (in Persian).
8. FAO. 2018. Handbook for saline soil management. Editors: Vargas, R., Pankova, E.I., Balyuk, S.A., Krasilnikov, P.V., and Khasankhanova, G.M.,.Published by the Food and Agriculture Organization of the United Nations and Lomonosov Moscow State University.
9. Field, A., (2009). Discovering statistics using SPSS (3th ed.). London: Sage.
10. Ghassemi, F., Jakeman A. J., and H. A., Nix. 1995. Salinization of land and water resources human causes, extent management and case studies. CAB International, UK.
11. Hair, J. F., Black, B., Babin, B., Anderson, R. E., and Tatham, R. L., (2006). Multivariate data analysis (6th ed.). New Jersy: Prentice Hall.
12. Jolly, I. D., McEwan, K. L., and Holland, K. L., (2008). A Review of GroundwaterSurface Water Interactions in Arid/semi-Arid Wetlands and the Consequences of Salinity for Wetland Ecology. Ecohydrol. 1, 43–58. doi:10.1002/eco.61
13. Kaiser, H., (1974). An index of factorial simplicity. Psychometrika, 39, 31–36.
14. Keshavarz, P., Zangiabadi, M., Abbas Zadeh, M., 2014. The effect of soil clay and salinity on the relationship between soil organic carbon and wheat yield. Soil Research Journal (Soil and Water Sciences): A, 27 (3). (in Persian).
15. Kline, R. B., (2005). Principles and practice of structural equation modeling (2th ed.). New York: Guilford.
16. Mandal, S., Vema, V. K., Kurian, C., & Sudheer, K. P., (2020). Improving the crop productivity in rainfed areas with water harvesting structures and deficit irrigation strategies. Journal of Hydrology, 124818. doi:10.1016/j.jhydrol.2020.124818.
17. Molden D., Vithanage, M., Fraiture C., Faures J.M., Gordon L., Molle F., Peden, D., 2011. 4.21 - Water Availability and Its Use in Agriculture, Editor(s): Peter Wilderer, Treatise on Water Science, Elsevier, Pages 707-732, ISBN 9780444531995, https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53199-5.00108. (https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780444531995001081).
18. Momeni, A., 2011. Geographical distribution and salinity levels of Iran's soil resources. Journal of Soil Research (Soil and Water Sciences): A, 24 (3): 215-203, (in Persian).
19. Muhetaer, n., Nurmemet, I., Abulaiti, A., Xiao, S., and Zhao, J., 2022. A Quantifying Approach to Soil Salinity Based on a Radar Feature Space Model Using ALOS PALSAR-2 Data. Remote Sensing. Volume 14, issue 2.

20. Ovalles, F. A., and Collins, M. E., (1988). Variability of northwest Florida soils by principal component analysis. Soil Science Society of America Journal, 52(5), 1430-1435.
21. Saadat, S., 2019. Final report of agricultural soil quality monitoring. Soil and Water Research Institute. Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), (in Persian).
22. Saadat, S., Dehghany, F., Rezaei, H., Esmaeelnejad, L., and Maleki, P., 2020. Effects of salinity and Ca:Mg ratio of irrigation water on pistachio seedlings phosphorus planted under greenhouse conditions. Desert (25):1, 25-32
23. Sharma, S., (1996). Applied multivariable techniques. New York: John Wiley and Sons.
24. Singh, A., 2022. Soil salinity: a Global Threat to Sustainable Development. Soil use Manage. 38:39-67.
25. Singhal Sonica, Julie Farmer, Anuj Aggarwal, JinHee Kim, Carlos Quiñonez, 2022. A Review of "Optimal Fallow Period" Guidance Across Canadian Jurisdictions, International Dental Journal, Volume 72, Issue 1, Pages 116-122, ISSN 0020-6539, https://doi.org/10.1016/j.identj.2021.03.003.
26. Sishodia P., Sanjay Shukla, Suhas P. Wani, Wendy D. Graham, James W. Jones, 2018. Future irrigation expansion outweigh groundwater recharge gains from climate change in semi-arid India, Science of The Total Environment, Volume 635, Pages 725-740, ISSN 0048-9697, https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.130.
27. Surendran, U., Jayakumar, M., Marimuthu, S., 2016. Low cost drip irrigation: Impact on sugarcane yield, water and energy saving in semiarid tropical agro ecosystem in India, Science of The Total Environment, Volume 573, Pages 1430-1440, ISSN 0048-9697, https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.07.144.
28. Tabachnick, B. G., and Fidell, L. S., (2001). Using multivariate statistics. Boston: Allyn and Bacon.
29. Whipkey, C. E., Capo, R. C., Chadwick, O. A., and Stewart, B. W., (2000). The Importance of Sea spray to the Cation Budget of a Coastal Hawaiian Soil: a Strontium Isotope Approach. Chem. Geology. 168, 37–48. doi:10.1016/s00092541(00)00187-x
30. Wilson, M.J., 2019. The importance of parent material in soil classification: A review in a historical context. Catena, 182, doi: 10.1016/j.catena.2019.104131.
31. Yao Ning, Yi Li., Tianjie Lei., Lingling Peng, 2018. Drought evolution, severity and trends in mainland China over 1961–2013, Science of The Total Environment, Volumes 616–617, Pages 73-89, ISSN 0048-9697, https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.327.

A Survey of Soil Salinity in Iran's Drylands

S. Saadat*, L. Esmaeelnejad, H. Rezaei, and R. Mirkhani

Associate Prof.; Soil and Water Research Institute; Agricultural Research, Education and Extension Organization; Tehran, Iran.**saeed_saadat@yahoo.com**

Assistant Prof.; Soil and Water Research Institute; Agricultural Research, Education and Extension Organization; Tehran, Iran**. esmaeelnejad.leila@gmail.com**

Associate Prof.; Soil and Water Research Institute; Agricultural Research, Education and Extension Organization; Tehran, Iran**. rezaei_h@yahoo.com**

Assistant Prof.; Soil and Water Research Institute; Agricultural Research, Education and Extension Organization, Tehran; Iran**. rasoul_mirkhani@yahoo.com**

Received: April 2023 and Accepted: September 2023

Abstract

About 80 percent of the world's agricultural lands, supplying nearly 60 percent of all human food, is under rain-fed cultivation. Considering the uneven distribution of global rainfall, arid and semi-arid areas call for measures to prevent soil and water salinization. Being one of the most important resources for agricultural production, especially in the face of the current restrictions on the development of irrigated lands, drylands are especially stressed by soil salinity as an important limitation on dry farming, which causes decreased production especially when combined with other limitations such as lack of moisture. In order to gain an enlightened knowledge of the salinity status of rain-fed lands in Iran, a research project of national-scale including 849 study sites was performed and soil samples were collected from different depths across the study sites to determine their Electrical Conductivity (EC) as well as soil physical and chemical characteristics. The results showed that the highest and lowest salinity levels of the surface soil (depths of 0-30 cm) in rain-fed lands under cultivation were 97.5 and 0.19 dS/m, respectively, with an average value of 2.28 dS/m while more than 50% of the soils collected exhibited salinity levels greater than 0.6 dS/m. The results of principal component analysis showed that the variability of soil salinity in rain-fed lands were affected by climatic parameters (such as temperature and precipitation as well as indices resulting from their interactions including standardized precipitation indices and effective drought). Moreover, soil characteristics such as organic carbon, clay, and soluble salt (especially sodium) contents were found to have due effects on salinity level.

Keywords: Climate, Dissolved solutes, Monitoring, Organic carbon, Sodium

*. Corresponding author's email: saeed_saadat@yahoo.com