19th Iranian Soil Science Congress
16-18 September, 2025

نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران
۲۵ تا ۲۷ شهریور ۱۴۰۴

مدیریت جامع‌نگر و هوشمند خاک و آب
Holistic and Smart Soil and Water Management

دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران
College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran

۰۴۲۵۰-۳۲۰۳۱

گسست پروتونی–یونی، شاخصی بر پیشبینی ناپایداری عملکردی در خاک‌های مناطق خشک

هانیه فرامرزی[۱]، میرحسن رسولی صدقیانی[۱*]، حسین خیرفام[۲]، سامان جلال‌زاده[۱]

۱- گروه علوم و مهندسی خاک،دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه
۲- گروه مهندسی مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه
*نویسنده مسئول: m.rsadaghiani@urmia.ac.ir

چکیده

در مناطق خشک، تخریب شیمیایی خاک غالباً پیش از هرگونه نشانه ظاهری از بیابان‌زایی آغاز می‌شود، اما به‌دلیل پایداری عددی pH، از دید بسیاری از ارزیابی‌های مرسوم پنهان می‌ماند. این پژوهش، با تمرکز بر واگرایی عملکردی میان شوری، ظرفیت بافری و pH، به بررسی دو خاک قلیایی با pH نزدیک (۸/۲ و ۸/۱) اما تفاوت بارز در هدایت الکتریکی (۱۲/۴ و ۳۱/۲ dS/m) و کربنات کلسیم (۳۴/۹۶٪ و ۳۷/۳۸٪) در حاشیه دریاچه ارومیه می‌پردازد. به‌منظور تبیین بهتر پویایی شیمیایی خاک، دو شاخص ترکیبی جدید تعریف شد: نسبت شوری به ظرفیت بافری آهک ($EC/CaCO_3$) و شاخص تنش شوری-پروتونی (SCII = EC/pH). نتایج نشان داد که شاخص‌های $EC/CaCO_3$ و SCII به‌ترتیب برای نقطه دوم برابر با ۰/۸۳ و ۳/۸۵ و برای نقطه اول برابر با ۰/۳۵ و ۱/۵۱ بودند؛ وضعیتی که بیانگر بروز تنش یونی نهفته و فروپاشی تدریجی مکانیسم‌های بافری در خاک‌های به‌ظاهر پایدار است. این شکاف میان پایداری عددی pH و ناپایداری عملکردی سیستم یونی، ضرورت بازنگری بنیادین در ارزیابی‌های کلاسیک خاک را برجسته می‌سازد. چارچوب تحلیلی ارائه‌شده، الگویی مفهومی برای شناسایی زودهنگام بیابان‌زایی شیمیایی در بوم‌اقلیم‌های خشک فراهم می‌کند و افقی جدید در پایش پویایی‌های پنهان خاک می‌گشاید.

واژه‌های کلیدی : بیابان‌زایی، گسست یونی–پروتونی، هدایت الکتریکی ، دریاچه ارومیه، شوری‌زایی

مقدمه

خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک، به‌دلیل ویژگی‌های اقلیمی نظیر تبخیر بالا، بارندگی محدود، پوشش گیاهی ضعیف و توزیع نامتوازن رطوبت، به‌طور ذاتی مستعد توسعه پدیده‌هایی همچون شوری، قلیائیت و ناپایداری‌های شیمیایی هستند (Schlesinger et al., 1990; FAO, 2017). **در چنین سامانه‌هایی، درک سازوکارهای شیمیایی خاک به‌ویژه در مواجهه با تنش‌های یونی و تغییرات بافری، یکی از چالش‌های بنیادی در علوم خاک و اکولوژی مناطق خشک به‌شمار می‌آید. شوری و قلیائیت، در اغلب مطالعات، از طریق شاخص‌های کلاسیکی نظیر هدایت الکتریکی** (EC) **و اسیدیته** (pH) **ارزیابی می‌شوند؛ حال آن‌که این دو متغیر همواره نمایانگر کامل دینامیک شیمیایی خاک نبوده و ممکن است دچار گسست مفهومی شوند**(Osman, 2012). **مطابق با فرضیات کلاسیک، افزایش بار یونی ناشی از تجمع نمک‌ها باید منجر به تغییر در** pH **خاک شود؛ اما شواهد روزافزون ژئوشیمیایی حاکی از آن است که این رابطه در خاک‌های دارای کربنات کلسیم بالا، ساختار بافری قوی، و غلظت بالای نمک‌های خنثی، ممکن است**

تضعیف یا حتی قطع شود (Rengasamy, 2010; Le Ngoc Sen, 1986). در واقع، در برخی خاک‌های آهکی تحت اقلیم خشک، رفتار pH می‌تواند تقریباً پایدار باقی بماند، حتی در شرایطی که EC به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافته است. این پدیده که از آن با عنوان "گسست یونی–پروتونی (Ionic-Proton Decoupling)" یاد می‌شود، زمانی رخ می‌دهد که تغییر در غلظت یون‌های محلول اثری متقارن بر سیستم تعادل اسیدی–بازی ندارد. در خاک‌هایی با مقادیر بالای کربنات کلسیم، که بافری قوی در برابر نوسانات pH ایجاد می‌کنند، ورود یا تجمع نمک‌ها ممکن است بدون تغییر محسوس در غلظت یون‌های H^+ و OH^- صورت گیرد. این وضعیت که معمولاً در خاک‌های دارای $CaCO_3$ بالاتر از ۳۰٪ و تحت تنش تبخیر شدید مشاهده می‌شود، نوعی ناپایداری شیمیایی پنهان به‌شمار می‌رود که با شاخص‌های رایج قابل شناسایی نیست (Minhas et al., 2020; Corwin, 2021). در چنین شرایطی، EC می‌تواند به‌عنوان نماینده‌ای از فشار اسمزی و غلظت کل یون‌ها عمل کند، بی‌آنکه pH تغییر معناداری را نشان دهد؛ و این واگرایی ممکن است نشانگر ورود خاک به فازی از بی‌ثباتی ژئوشیمیایی باشد که در آن اثرگذاری املاح بر فرآیندهای خاک، گیاه و آب، از چارچوب تبیین‌های سنتی خارج می‌شود. پژوهش حاضر با هدف تحلیل شکاف مفهومی میان رفتار یونی و دینامیک پروتونی در خاک‌های خشک، به بررسی دو نقطه با ویژگی‌های شیمیایی متفاوت در منطقه حوضه دریاچه ارومیه می‌پردازد. با تمرکز بر نسبت هدایت الکتریکی (EC) به pH و تأکید بر نقش کربنات کلسیم به‌عنوان یک عامل بافری غالب، تلاش شده است چارچوبی مفهومی برای تبیین پدیده‌ی «گسست یونی–پروتونی» ارائه شود. در این چارچوب، جداسازی تحلیلی میان دینامیک یونی و رفتار اسیدی–بازی خاک مورد بررسی قرار گرفته است، به‌ویژه در شرایطی که شوری به‌طور فزاینده‌ای افزایش می‌یابد، اما pH به‌واسطه‌ی اثرات بافری کربنات کلسیم در محدوده‌ای نسبتاً پایدار باقی می‌ماند. این واگرایی پنهان می‌تواند در سامانه‌های خشک و شور، که تبخیر زیاد و بارش اندک دارند، به‌عنوان نشانه‌ای هشداردهنده از ناپایداری شیمیایی خاک تلقی شود. در چنین شرایطی، پایداری ظاهری pH ممکن است برداشت اشتباهی از سلامت شیمیایی خاک القا کند، در حالی که غلظت‌های بالای یون‌ها و اختلال در تعادل‌های شیمیایی می‌تواند به‌صورت تدریجی فرآیندهای بیابان‌زایی را تشدید کند.

مواد و روش‌ها

موقعیت مکانی مطالعه

این مطالعه در دو نقطه منتخب از مناطق پیرامونی جنوبی دریاچه ارومیه در شمال‌غرب ایران انجام گرفت. این منطقه در یک بوم‌سامانه خشک-نیمه‌خشک واقع شده که در دهه‌های اخیر تحت فشار فزاینده خشک‌سالی و کاهش تراز دریاچه، با تغییرات گسترده‌ای در ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خاک مواجه بوده است. مختصات جغرافیایی دقیق نمونه‌برداری به شرح زیر ثبت شد:

- نقطه اول: ″۴۵°۰۵′۵۷ طول شرقی و ″۳۷°۵۰′۳۶ عرض شمالی
- نقطه دوم: ″۴۵°۱۱′۳۰ طول شرقی و ″۳۸°۰۳′۱۳ عرض شمالی

فاصله جغرافیایی نزدیک و اقلیم مشابه این دو نقطه، اما تفاوت‌های قابل‌توجه در شاخص‌های شیمیایی خاک، شرایط مناسبی برای آزمون فرضیه مطالعه فراهم می‌کند.

طراحی پژوهش و رویکرد تحلیلی

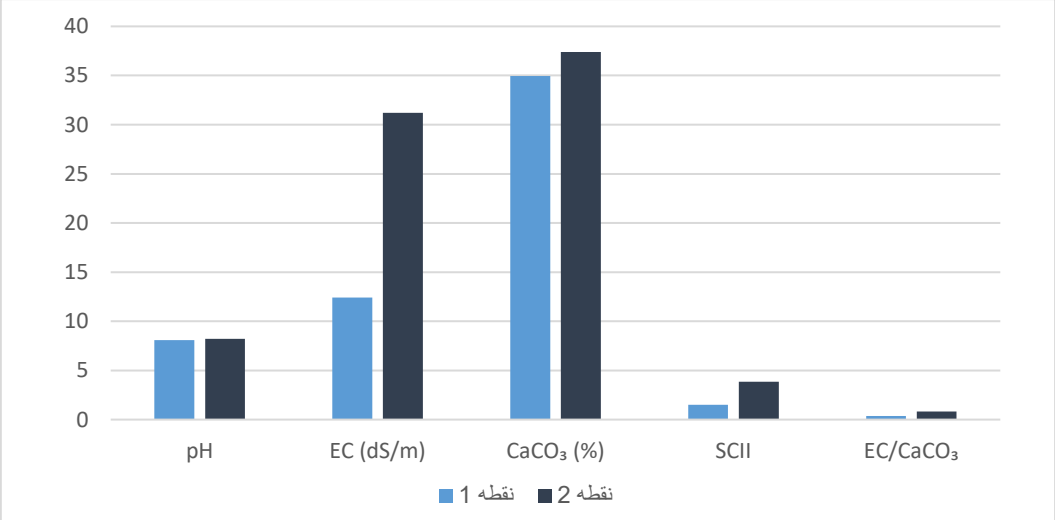
مطالعه حاضر به‌صورت مقایسه‌ای طراحی و از رویکرد تحلیل تفکیکی شاخص‌ها (decoupling analysis) برای تمایز رفتار یونی (Electrical Conductivity, EC)از دینامیک پروتونی (pH) استفاده شده است. برای هر نقطه، سه پارامتر pHخاک (اندازه‌گیری در محلول ۱:۱ آب-خاک)، هدایت الکتریکی (EC) برحسب (dS/m) و درصد کربنات کلسیم معادل ($CaCO_3$%) مورد اندازه‌گیری و تحلیل قرار گرفتند. pH و EC با استفاده از الکترودهای استاندارد دیجیتال در محلول ۱:۲/۵ آب مقطر-خاک توسط دستگاه Multi meter HI 9811-5 قرائت شد. درصد کربنات کلسیم معادل از طریق روش کلاسیک تیتراسیون اسید –باز اندازه‌گیری شد. بر اساس این سه متغیر، یک شاخص ترکیبی تحت عنوان شاخص ناپایداری شیمیایی خاک (Soil Chemical Instability Index =EC/PH)و همچنین نسبت EC به $CaCO_3$ به‌عنوان شاخص مکمل ($EC/CaCO_3$) تعریف شد. این شاخص به‌عنوان نمایه‌ای مفهومی برای ارزیابی ناپیوستگی رفتار یونی از پایداری پروتونی پیشنهاد شده و پایه تحلیل مقایسه‌ای قرار گرفت.

نتایج و بحث

بررسی دقیق وضعیت شیمیایی دو خاک قلیایی واقع در غرب و شمال‌غرب حوضه دریاچه ارومیه، نشان از وجود سازوکارهای پنهان اما بسیار اثرگذار در تخریب شیمیایی خاک تحت تنش خشک‌شدگی دارد. علی‌رغم شباهت ظاهری در pH (۸/۱ در برابر ۸/۲)، دو نقطه مورد مطالعه، از منظر هدایت الکتریکی (EC) و درصد کربنات کلسیم($CaCO_3$) ، الگوهای رفتاری کاملاً متمایزی از خود نشان می‌دهند؛ به‌گونه‌ای که نقطه دوم با EC معادل ۳۱/۲ dS/m و $CaCO_3$ برابر ۳۷/۳۸٪، حدود ۲/۵ برابر هدایت الکتریکی بیشتری نسبت به نقطه اول با EC برابر با ۱۲/۴ dS/m و$CaCO_3$ ۳۴/۹۶ ٪ دارد. برای تحلیل ژرف‌تر این وضعیت، دو شاخص ترکیبیSCII (نسبت EC به pH) و $EC/CaCO_3$ محاسبه شدند. نتایج حاکی از آن‌اند که نقطه دوم با SCII=۳/۸ و ۰/۸۳ =$EC/CaCO_3$نسبت به نقطه اول (SCII=۱/۵۱ و ۰/۳۵ =$EC/CaCO_3$)، وارد مرحله‌ای از تنش یونی پیشرفته‌تر شده است. این اختلاف عددی بزرگ در شاخص‌ها، با وجود تفاوت ناچیز در pH (فقط ۰/۱ واحد) و درصد $CaCO_3$ (فقط ۲/۴۲٪)، نشان‌دهنده پدیده‌ای است که در متون تخصصی به عنوان "ناپیوستگی یونی-پروتونی" شناخته می‌شود (Rengasamy, 2016; Corwin, 2021).در این پدیده، افزایش شدید غلظت یون‌ها (خصوصاً سدیم) در خاک بدون تغییر متناظر در pH رخ می‌دهد، که معمولاً ناشی از فروپاشی ظرفیت بافری خاک یا غیرفعال شدن کربنات‌ها تحت اثر تبلور نمک است(Umer et al., 2020) . یافته‌های این مطالعه حاکی از آن است که سیستم شیمیایی خاک در نقطه دوم به‌مراتب بی‌ثبات‌تر و مستعد تخریب است؛ هرچند درصد کربنات کلسیم آن بیشتر است، اما به دلیل غلبه بار یونی، عملکرد بافری آن تحلیل رفته است. کاهش نسبت $EC/CaCO_3$ در نقطه اول، مؤید این نکته است که ظرفیت کربناتی خاک، تا حدی توانسته مانع از جهش یونی شود. در حالی‌که در نقطه دوم، با وجود درصد بالاتر کربنات، حضور بیش‌ازحد یون‌ها، نقش کربنات را تحت‌الشعاع قرار داده است. در سطح مولکولی، می‌توان استدلال کرد که انباشت یون‌های تک‌ظرفیتی) نظیر (Na^+ بر سطح کلوئیدها، کاهش فعالیت تبادلی کاتیونی، و پوشیده شدن ذرات $CaCO_3$ با لایه‌های نمکی غیرفعال، از مهم‌ترین فرآیندهایی هستند که پایداری شیمیایی خاک را در این مناطق تهدید می‌کنند(Singh, 2022; Stavi et al., 2021) . این وضعیت، به‌ویژه در مناطق خشک و در حال خشک‌شدگی مانند حاشیه دریاچه ارومیه، از اهمیت بالایی برخوردار است، زیرا تخریب شیمیایی ممکن است مدت‌ها پیش از بروز نشانه‌های آشکاری نظیر کاهش pHیا افت باروری آغاز شده باشد (Corwin, 2021). مطالعه حاضر با تبیین دقیق شاخص‌های ترکیبی و ارائه چارچوبی نوین برای تحلیل همزمان EC، pH و $CaCO_3$، ابزار مفیدی برای پایش سلامت شیمیایی خاک در مناطق خشک ارائه کرده است. این چارچوب می‌تواند مبنایی برای شناسایی اولیه نقاط بحرانی و پیشگیری از پیشروی بیابان‌زایی در چنین مناطق شکننده‌ای باشد.

جدول۱. مشخصات پارامترهای شیمیایی موردمطالعه در دو نقطه مطالعاتی حوضه دریاچه ارومیه

نقطه	pH	EC (dS/m)	$CaCO_3$ (%)	SCII (EC/pH)	$EC/CaCO_3$
۱	۸/۲	۱۲/۴	۳۴/۹۶	۱/۵۱	۰/۳۵۴
۲	۸/۱	۳۱/۲	۳۷/۳۸	۳/۸۵	۰/۸۳۴



شکل۱. نمودار خوشه‌ای گروهی مقایسه پارامترهای شیمیایی مورمطالعه در دو نقطه مطالعاتی حوضه دریاچه ارومیه

نتیجه‌گیری

مطالعه حاضر به‌صورت قاطعانه نشان می‌دهد که روش‌های مرسوم ارزیابی سلامت خاک که صرفاً بر مقادیر ساده‌ای مانند pH تکیه دارند، حتی در مواردی که خاک‌ها مقادیر مشابهی از این شاخص را نشان می‌دهند (۸/۲ و ۸/۱)، قادر به آشکارسازی پیچیدگی‌های رفتاری خاک‌های مناطق خشک نیستند. شناسایی پدیده‌ای تحت عنوان "گسست یونی-پروتونی" در این پژوهش، درک جدیدی از مکانیسم‌های تخریب پنهان خاک ارائه کرده است، جایی که بی‌ثباتی شیمیایی خاک، پیش‌زمینه‌ای برای بروز تغییرات محسوس فیزیکی و زیستی محسوب می‌شود. شاخص‌های ترکیبی طراحی‌شده (SCII و $EC/CaCO_3$) به‌وضوح نشان دادند که خاک نقطه اول در معرض فشار یونی قابل توجهی قرار دارد که توسط ظرفیت بافری خنثی نمی‌شود. این واگرایی میان هدایت یونی و رفتار پروتونی، که در این پژوهش از آن با عنوان **گسست یونی–پروتونی** یاد شد، بیانگر نوعی ناپایداری شیمیایی خاموش است که در مراحل آغازین تخریب خاک ظاهر می‌شود، پیش از آنکه نشانه‌های فیزیکی یا زیستی مشهود گردند. اهمیت این یافته‌ها در آن است که **شاخص‌های ترکیبی ساده، ولی فرآیندمحور** مانند SCII و نسبت EC به $CaCO_3$ ، می‌توانند به‌عنوان ابزار هشدار زودهنگام برای پایش بیابان‌زایی پنهان در سامانه‌های خشک به‌کار روند؛ به‌ویژه در خاک‌هایی که از نظر بافتی سبک، از نظر بافری ضعیف و از نظر تبخیر تحت فشارهای اقلیمی شدید هستند. این شاخص‌ها به‌سادگی از داده‌های پایه قابل استخراج‌اند، اما برخلاف شاخص‌های رایج، قادر به نمایان ساختن **تخریب شیمیایی زیرسطحی و تدریجی** هستند. از

منظر مفهومی، این مطالعه بر ضرورت **بازنگری بنیادین در الگوهای پایش سلامت خاک** تأکید دارد؛ الگویی که از چارچوب‌های ایستای pH و EC فراتر رفته و به سمت تحلیل دینامیکی روابط میان مؤلفه‌های شیمیایی حرکت می‌کند. نتایج این پژوهش قابل تعمیم به طیفی از اکوسیستم‌های خشک جهانی است که در معرض شوری‌زایی، قلیایی‌شدگی، یا فرسایش بی‌صدای خاک قرار دارند. در نهایت، این مطالعه پیشنهاد می‌کند که **گنجاندن شاخص‌های واگرایی شیمیایی در نظام‌های پایش سرزمین** (نظیر LADA یا UNCCD) می‌تواند گام مهمی در جهت مدیریت پایدار سرزمین و پیشگیری از بیابان‌زایی باشد، به‌ویژه در مناطقی مانند حاشیه دریاچه ارومیه که اکنون در آستانه فروپاشی بوم‌سرزمینی قرار دارند.

فهرست منابع

1. AghaKouchak, A., Norouzi, H., Madani, K., Mirchi, A., Azarderakhsh, M., Nazemi, A., Nasrollahi, N., Farahmand, A., Mehran, A. and Hasanzadeh, E., 2015. Aral Sea syndrome desiccates Lake Urmia: call for action. *Journal of Great Lakes Research*, *41*(1), pp.307-311.
2. Corwin, D.L., 2021. Climate change impacts on soil salinity in agricultural areas. *European Journal of Soil Science*, *72*(2), pp.842-862.
3. FAO (2015) Global Soil Status, Processes and Trends, Rome: Food and Agriculture Organization. Available at
4. Hassanzadeh, E., Zarghami, M. & Hassanzadeh, Y. Determining the Main Factors in Declining the Urmia Lake Level by Using System Dynamics Modeling. Water Resour Manage 26, 129–145 (2012).
5. Le Ngoc Sen, L.N.S., 1986. The evaporation and acidification process in an acid sulphate soil.
6. Osman, K.T., 2012. Chemical properties of soil. In Soils: Principles, properties and management (pp. 97-111). Dordrecht: Springer Netherlands.
7. Ravi, S., Breshears, D.D., Huxman, T.E. and D'Odorico, P., 2010. Land degradation in drylands: interactions among hydrologic–aeolian erosion and vegetation dynamics. *Geomorphology*, *116*(3-4), pp.236-245.
8. Rengasamy, P., 2010. Soil processes affecting crop production in salt-affected soils. *Functional Plant Biology*, *37*(7), pp.613-620.
9. Rengasamy, P., 2016. Soil chemistry factors confounding crop salinity tolerance A review. *Agronomy*, *6*(4), p.53.
10. Schlesinger, W.H., Reynolds, J.F., Cunningham, G.L., Huenneke, L.F., Jarrell, W.M., Virginia, R.A. and Whitford, W.G., 1990. Biological feedbacks in global desertification. Science, 247(4946), pp.1043-1048.
11. Singh, A., 2022. Soil salinity: A global threat to sustainable development. *Soil Use and Management*, *38*(1), pp.39-67.
12. Stavi, I., Thevs, N. and Priori, S., 2021. Soil salinity and sodicity in drylands: A review of causes, effects, monitoring, and restoration measures. *Frontiers in Environmental Science*, *9*, p.712831.
13. Umer, M.I., Rajab, S.M. and Ismail, H.K., 2020, August. Effect of CaCO3 form on soil inherent quality properties of calcareous soils. In *Materials Science Forum* (Vol. 1002, pp. 459-467). Trans Tech Publications Ltd.

Proton-ion dissociation as an indicator for predicting functional instability in soils in arid regions

Haniyeh Faramarzi[1], MirHssan Rasouli-Sadaghiani[1*], Hossein Kheirfam[2], Saman Jalalzadeh[1]

1- Dept of Soil science, Faculty of Agriculture, Urmia University

2- Dept of Rangeland and Watershed Engineering, Faculty of Natural Resources, Urmia University

Abstract

In arid regions, chemical soil degradation often begins before any visible signs of desertification appear, but due to the numerical stability of pH, it remains hidden from many conventional assessments. This study, focusing on the functional divergence between salinity, buffering capacity, and pH, examines two alkaline soils with similar pH (8.2 and 8.1) but distinct differences in electrical conductivity (12.4 and 31.2 dS/m) and calcium carbonate content (34.96% and 37.38%) along the shores of Urmia Lake. To better explain soil chemical dynamics, two new composite indices were defined: the salinity-to-lime buffering capacity ratio ($EC/CaCO_3$) and the salinity-proton stress index (SCII = EC/pH). The results showed that the $EC/CaCO_3$ and SCII indices for the second site were 0.83 and 3.85, respectively, while for the first site, they were 0.35 and 1.51—a situation indicating the emergence of latent ionic stress and the gradual collapse of buffering mechanisms in seemingly stable soils. This gap between the numerical stability of pH and the functional instability of the ionic system highlights the need for a fundamental revision of classical soil assessments. The proposed analytical framework provides a conceptual model for the early detection of chemical desertification in arid ecoclimates and opens new horizons for monitoring hidden soil dynamics.

Keywords: Desertification, Ion-Proton Dissociation, Electrical Conductivity, Lake Urmia, Salinity