

Research Paper

Morphological response of soil surface cracks to the microclimate induced by planted *Tamarix* shrubs

Leila Alizadeh¹, Ahmad Alijanpour^{*2} and Hossein Kheirfam³

1- Ph.D. Student of Forestry, Department of Forestry, Faculty of Natural Resources, Urmia University, Urmia, I. R. Iran. (alizadehalizadeh659@gmail.com)

2,*- (Corresponding author) Professor, Department of Forestry, Faculty of Natural Resources, Urmia University, Urmia, I. R. Iran. (a.alijanpour@urmia.ac.ir)

3- Associate Professor, Department of Range and Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Urmia University, Urmia, I. R. Iran. (h.kheirfam@urmia.ac.ir)

Received: 16 October 2025

Revised: 04 January 2026

Accepted: 05 January 2026

Extended Abstract

Background and Objective: The desiccation of lakes and wetlands in arid and semi-arid regions, such as Lake Urmia, is driven by climate change and anthropogenic pressures, leading to the formation of unstable saline playas that serve as major sources of harmful dust. Establishing salt-tolerant shrubs like *Tamarix ramosissima* (tamarisk) is an effective strategy for soil stabilization and microclimate modulation. The microclimate created beneath shrub canopies reduces temperature, buffers thermal fluctuations, increases relative humidity, and limits evaporation, thereby influencing surface crack morphology in saline-clay soils. Such cracks not only disrupt water infiltration, gas exchange, and root growth but also provide pathways for wind erosion. However, knowledge of how plant-induced microclimates affect crack patterns in these ecosystems remains limited, hindering the optimization of ecological restoration efforts.

Material and Methods: This study assessed the impact of microclimates generated by hand-planted tamarisk shrubs on surface soil crack morphology in the western dried bed of Lake Urmia. Sixty shrubs, planted since 2015, were systematically selected based on uniformity in height, canopy dimensions, and spacing to minimize confounding factors. Prevailing wind directions were determined using synoptic station wind-rose data (1949-2021). From 15 shrubs, high-resolution vertical digital images ($n=120$) were acquired at two sampling positions per shrub, beneath the canopy (at half-canopy radius) and outside the canopy (5-8 m from the stem base, in inter-canopy gaps), across four cardinal directions (N, S, E, W). Images were processed using PCAS (Pores and Cracks Analysis System) to extract key morphological indices: crack density (D_c), area-to-perimeter ratio ($AWMARP$), weighted mean fractal dimension ($AWMFRAC$), and morphological connectivity (r). Statistical analyses (two-way ANOVA, Tukey's HSD, independent t-tests) compared indices across canopy conditions and directions.

Results: Shrub microclimates significantly altered crack morphology. Under canopies, mean D_c was 1.99% versus 0.70% in open areas; $AWMARP$ was $>2\times$ higher (0.0375 vs. 0.014); $AWMFRAC$ was $\sim 12\times$ greater (1.40 vs. 0.122); and r increased by $\sim 83\%$ (0.293 vs. 0.160).

Two-way ANOVA confirmed highly significant effects of canopy position on all indices ($p < 0.01$), while direction alone significantly affected only r ($p < 0.01$). Interaction effects (position \times direction) were significant for *AWMARP* and r , indicating directional dependence of microclimate impacts. Maximum D_c and *AWMFRAC* occurred in the NE and NW directions beneath canopies. Independent t-tests revealed highly significant differences ($p < 0.01$): D_c (+65%), *AWMARP* (>60%), *AWMFRAC* (~91%), and r (~43%) were all higher under canopy. Visual PCAS outputs confirmed denser, more uniform, semi-regular polygonal crack networks beneath canopies, versus sparse, irregular, fragmented patterns in open areas, highlighting the efficacy of tamarisk-induced microclimate in modulating soil physical processes.

Conclusion: Hand-planted tamarisk shrubs substantially enhance surface crack morphology in the western playa of Lake Urmia by fostering structured, dense, interconnected crack networks, thereby improving soil hydraulic and biological functionality. Greatest effects occurred in NE and NW aspects, likely due to interactions between microclimate, prevailing winds, and solar radiation. Functionally, tamarisk acts as an ecosystem engineer, offering more than physical stabilization, by enabling ecological restoration and dust mitigation. Moreover, crack morphological indices serve as valuable quantitative indicators for evaluating restoration effectiveness in arid degraded lands.

Keywords: Ecological restoration, Lake Urmia, Novel ecosystem, Soil structural stability, Wind erosion.

How to Cite This Article: Alizadeh, L., Alijanpour, A., and Kheirfam, H. (2026). Morphological response of soil surface cracks to the microclimate induced by planted Tamarix shrubs. Forest Research and Development, 12(1), 65-86. DOI: [10.30466/jfrd.2026.56667.1787](https://doi.org/10.30466/jfrd.2026.56667.1787)



Copyright ©2024 Alizadeh et al. Published by Urmia University.

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which allows users to read, copy, distribute, and make derivative works for non-commercial purposes from the material, as long as the author of the original work is cited properly.

پاسخ ریخت‌شناسی ترک‌های سطح خاک به خرداقلیم ایجادشده توسط گزهای دست‌کاشت

لیلا علی‌زاده^۱، احمد علیجانپور^{۲*} و حسین خیرفام^۳

۱- دانشجوی دکتری مدیریت جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران. (alizadehalizadeh659@gmail.com)

۲- استاد، گروه جنگلداری، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران. (a.alijanpour@urmia.ac.ir)

۳- دانشیار، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران. (h.kheirfam@urmia.ac.ir)

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۱۵

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۰/۱۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۲۴

چکیده

مقدمه و هدف: خشک‌شدن دریاچه‌ها و تالاب‌ها در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند دریاچه ارومیه، پیامد تغییر اقلیم و فشارهای انسانی است و منجر به تشکیل بسترهای نمکی ناپایدار و منبع گردوغبارهای مضر می‌شود. استقرار گونه‌های مقاوم به شوری مانند گز (*Tamarix ramosissima*) به‌عنوان راهبردی برای تثبیت خاک و تعدیل خرداقلیم مؤثر است. خرداقلیم ایجادشده توسط این گیاهان، دما را کاهش داده، نوسانات حرارتی را تعدیل، رطوبت نسبی را افزایش و تبخیر را محدود می‌کند و در نتیجه بر ریخت‌شناسی ترک‌های سطحی در خاک‌های رسی-شور تأثیرگذار است. چنین ترک‌هایی علاوه بر اختلال در نفوذ آب، تبادل گاز و رشد ریشه، مسیرهایی برای فرسایش بادی ایجاد می‌کنند. با این حال، شناخت تأثیر خرداقلیم گیاهی بر الگوهای ترک‌خوردگی در این زیست‌بوم‌ها ناقص بوده و برای بهینه‌سازی طرح‌های احیایی ضروری است.

مواد و روش‌ها: این پژوهش با هدف بررسی تأثیر خرداقلیم ایجادشده توسط درختچه‌های گز دست‌کاشت بر ریخت‌شناسی ترک‌های سطح خاک در بستر غربی خشک‌شده دریاچه ارومیه طراحی شد. از میان درختچه‌هایی که از سال ۱۳۹۴ کاشته شده‌اند، ۶۰ پایه به‌صورت تصادفی سیستماتیک و با همگونی در ارتفاع، ابعاد تاج و فاصله انتخاب گردید تا بیشینه کنترل عوامل خارجی حاصل شود. با استفاده از داده‌های گلباد ایستگاه‌های سینوپتیک (۱۳۲۸ تا ۱۴۰۰)، جهت بادهای غالب منطقه تعیین شد. برای تحلیل ریخت‌شناسی ترک‌ها، از ۱۵ پایه، در چهار جهت جغرافیایی (شمال، جنوب، شرق، غرب)، دو نقطه نمونه‌برداری، در داخل (در فاصله نصف قطر تاج) و خارج (در فاصله پنج تا هشت متر از طوقه، در فضای میانی مجاورت تاج‌ها)، در نظر گرفته شد. مجموعاً ۱۲۰ تصویر دیجیتال با وضوح بالا، عمود بر سطح و با فاصله کانونی ثابت ثبت شد. پردازش تصاویر با نرم‌افزار PCAS انجام و شاخص‌های تراکم ترک (D_c)، نسبت وزنی میانگین مساحت به محیط ($AWMARP$)، میانگین وزنی بُعد فرکتالی ($AWMFRAC$) و

اتصال‌پذیری ریخت‌شناختی (r) استخراج شدند. این شاخص‌ها با روش‌های آماری در دو محیط (داخل/خارج تاج) و چهار جهت مقایسه گردید تا نقش خرداقلیم و جهت‌گیری فضایی در الگوی ترک‌خوردگی خاک ارزیابی شود.

یافته‌ها: نتایج پژوهش نشان داد که خرداقلیم تاج‌پوشش درختچه‌های گز تأثیر قابل‌توجهی بر ریخت‌شناسی ترک‌های سطح خاک در بستر غربی دریاچه ارومیه دارد. در زیر تاج‌پوشش، مقادیر Dc به‌طور میانگین $1/99$ درصد، درحالی‌که در خارج از تاج تنها $0/70$ درصد بود. همچنین، $AWMARP$ بیش از دو برابر ($0/375$) در مقابل $0/14$ ، $AWMFRAC$ تقریباً 12 برابر ($1/40$ در مقابل $0/122$) و r تقریباً 83 درصد بیش‌تر ($0/293$ در مقابل $0/16$) اندازه‌گیری شد. تجزیه واریانس دوطرفه تأثیر بسیار معنی‌دار موقعیت (داخل/خارج تاج) بر تمام شاخص‌ها ($p < 0/01$) و اثر معنی‌دار جهت فقط بر r ($p < 0/01$) را نشان داد؛ همچنین، اثر متقابل جهت و موقعیت بر $AWMARP$ و r معنی‌دار بود ($p < 0/01$)، که بیانگر وابستگی جهتی تأثیر خرداقلیم است. در زیر تاج، بیش‌ترین مقادیر Dc و $AWMFRAC$ در جهات شمال‌شرقی و شمال‌غربی مشاهده شد. آزمون‌های t مستقل و توکی تفاوت بسیار معنی‌دار ($p < 0/01$) را تأیید کردند که در مجموع، Dc حدود 65 درصد، $AWMARP$ بیش از 60 درصد، $AWMFRAC$ تقریباً 91 درصد و r حدود 43 درصد در زیر تاج بیش‌تر بود. تصاویر PCAS نیز به‌صورت بصری نشان دادند که شبکه ترک‌ها در زیر تاج متراکم‌تر، یکنواخت‌تر و با الگوی چندضلعی نیمه‌منظم است، درحالی‌که در مناطق باز پراکنده، نامنظم و قطعه‌قطعه است. این یافته‌ها مؤید نقش مؤثر خرداقلیم گز در تعدیل فرآیندهای فیزیکی خاک‌های نمکی-رسی است.

نتیجه‌گیری: یافته‌های این پژوهش نشان داد که درختچه‌های گز دست‌کاشت در بستر غربی دریاچه ارومیه با ایجاد خرداقلیم، ریخت‌شناسی ترک‌های سطح خاک را به‌طور معنی‌داری بهبود می‌بخشند؛ به‌طوری‌که شاخص‌های Dc ، $AWMFRAC$ ، $AWMARP$ و r در زیر تاج‌پوشش به‌وضوح بالاتر از مناطق باز بودند. این تغییرات منجر به تشکیل شبکه‌ای متراکم، پیچیده و یکپارچه می‌شود که عملکرد هیدرولوژیکی و زیستی خاک را ارتقاء می‌دهد. بیش‌ترین تأثیر در جهت‌های شمال‌شرقی و شمال‌غربی مشاهده شد که احتمالاً ناشی از تعامل خرداقلیم با بادهای غالب و تابش خورشیدی است. از منظر کاربردی، گز فراتر از تثبیت فیزیکی، به‌عنوان مهندس زیست‌بوم، زمینه‌ساز احیای اکولوژیکی و کاهش گردوغبار است و شاخص‌های ترک‌خوردگی می‌توانند معیارهای کمی اثربخشی طرح‌های احیاء باشند.

واژه‌های کلیدی: احیای اکولوژیک، زیست‌بوم نوپدید، پایداری ساختاری خاک، دریاچه ارومیه، فرسایش بادی.

فیزیکی خاک، از جمله ترک‌خوردگی سطحی به‌عنوان عامل کلیدی تعیین‌کننده پایداری و عملکرد هیدرولوژیکی خاک، تأثیر می‌گذارند (Havrilla and Barger, 2018). ترک‌خوردگی خاک، پدیده‌ای طبیعی ناشی از چرخه‌های مکرر رطوبت-خشکی بوده که در خاک‌های رسی و شور (Bu et al., 2023)، مانند بستر خشک‌شده دریاچه ارومیه، چشمگیر است. این ترک‌ها نه تنها بر نفوذپذیری آب، تبادل گازی، حرکت نمک‌ها و رشد ریشه گیاهان تأثیر می‌گذارند (Feng et al., 2025)، بلکه ضمن تشدید تخلیه رطوبتی از لایه‌های بالایی و میانی خاک، در شرایط بادهای فرساینده به‌عنوان مسیرهای تمرکزی برای حمل رسوبات بادی عمل کرده و هدررفت خاک ناشی از فرسایش بادی را تشدید نمایند (Pi et al., 2021).

در سال‌های اخیر، توجه پژوهشگران به ویژگی‌های ریخت‌شناسی ترک‌ها، از جمله چگالی، ابعاد، الگوی فضایی، پیچیدگی فرکتالی و اتصال‌پذیری شبکه، به‌عنوان شاخص‌های کلیدی کیفیت فیزیکی خاک و پاسخ آن به تغییرات محیطی معطوف شده است. مطالعات نشان داده‌اند که این ویژگی‌ها تحت تأثیر عواملی مانند بافت خاک (Vogel et al., 2005)، محتوای مواد آلی (Zhang et al., 2016)، رطوبت (Ribeiro Filho et al., 2023) و خرداقلیم ناشی پوشش گیاهی (Ye et al., 2025) قرار دارند. با این حال، دانش کنونی درباره نحوه تأثیر خرداقلیم ایجادشده توسط گیاهان دست‌کاشت، به‌ویژه در زیست‌بوم‌های خشک و شور، بر ریخت‌شناسی ترک‌های سطح خاک هنوز کامل نیست. این شکاف دانشی به‌ویژه در مناطقی مانند بستر دریاچه ارومیه که طرح‌های گسترده‌ای برای کاشت گز اجرا شده، اهمیت دوچندان می‌یابد؛ چرا که بدون درک دقیق از اثرات این گونه بر ساختار خاک، ارزیابی

خشکسالی‌های گسترده، تغییرات اقلیمی و مدیریت نامناسب منابع آب در دهه‌های اخیر منجر به خشک‌شدن بسیاری از دریاچه‌های داخلی در سراسر جهان شده است (Chen et al., 2022; Hanifinia et al., 2025). یکی از بارزترین نمونه‌های این پدیده، خشک‌شدن دریاچه ارومیه در شمال‌غرب ایران است که نه تنها بحران زیست‌محیطی گسترده‌ای را در منطقه ایجاد کرده، بلکه با تشکیل سطوح وسیع رسوبی ناپایدار، بستری ایده‌آل برای فرسایش بادی و تولید گردوغبارهای نمکی فراهم آورده است (Kheirfam, 2022). این ذرات معلق نه تنها سلامت انسان و جوامع جانوری را تهدید می‌کنند، بلکه به‌طور جدی بر کشاورزی، زیست‌بوم‌های طبیعی و پایداری خاک تأثیر منفی می‌گذارند (Bahmani et al., 2025). در چنین شرایطی، اجرای راهبردهای مؤثر برای تثبیت خاک و کاهش فرسایش بادی از اهمیتی حیاتی برخوردار است. یکی از راهکارهای کلیدی در این زمینه، استقرار پوشش گیاهی، به‌ویژه گونه‌های مقاوم به شوری مانند گز (*Tamarix ramosissima*) است که نه تنها به‌عنوان یک بادشکن فیزیکی در برابر باد عمل می‌کند، بلکه با ایجاد خرداقلیم در اطراف خود، شرایط محیطی را برای بهبود کیفیت خاک تعدیل می‌نماید (Miri and Davidson, 2021; Arnott, 2021).

خرداقلیم، به‌عنوان یک محیط میکرومقیاس با شرایط فیزیکی و بیولوژیکی متمایز از اقلیم منطقه‌ای، نقشی محوری در تعدیل دما، رطوبت، تابش خورشیدی و سرعت باد در سطح خاک ایفا می‌کند (Gagliardi, 2025). سایه‌اندازی تاج گیاهان، کاهش تبخیر، افزایش رطوبت نسبی و تعدیل نوسانات دمایی از جمله ویژگی‌های بارز خرداقلیم‌های گیاهی هستند (Rafieijahed et al., 2025) که مستقیماً بر فرآیندهای

اثر بخشی واقعی آن در تثبیت خاک و کاهش گردوغبار ممکن نخواهد بود.

سایبان‌های گیاهی، خرداقلیم‌های محلی ایجاد می‌کنند که به‌طور قابل توجهی با محیط کلان اطراف متفاوت هستند (Ramirez and Wright, 2025). در حالی که نقش پوشش گیاهی در بهبود ماده آلی خاک، پایداری خاکدانه‌ها و چرخه مواد مغذی به خوبی مستند شده است (Haidari et al., 2024; Shi et al., 2024)،

توجه بسیار کم‌تری به مؤلفه‌های کیفی و ظاهری مؤثر خاک در پایداری زیست‌بوم‌های خشک به‌ویژه الگوی رفتاری و ریخت‌شناسی ترک سطحی خاک به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل تنظیم‌کننده تعادل رطوبتی، تبادلات گازی و الگوی ساختاری حرکت رسوبات بادی توسط خرداقلیم‌های ناشی از تاج‌پوشش پوشش گیاهی شده است (Zeng et al., 2024). از سوی دیگر، جهت‌گیری جغرافیایی نمونه‌برداری (شمال، جنوب، شرق، غرب) نیز می‌تواند به‌دلیل تفاوت در میزان تابش خورشیدی و جهت بادهای غالب، بر خرداقلیم محلی و در نتیجه بر الگوی ترک‌خوردگی تأثیر بگذارد؛ امری که در مطالعات پیشین کم‌تر مورد توجه قرار گرفته است.

این پژوهش با هدف بررسی پاسخ ریخت‌شناسی ترک‌های سطح خاک به خرداقلیم ایجادشده توسط گزهای دست‌کاشت در بستر غربی خشک‌شده دریاچه ارومیه برنامه‌ریزی شد. با استفاده از روش‌های نوین پردازش تصویر و تحلیل‌های آماری، شاخص‌های کلیدی ترک‌خوردگی در داخل و خارج از محدوده تاج‌پوشش گزهای هفت‌ساله و در چهار جهت جغرافیایی مقایسه شد. در این پژوهش فرض بر این شد که خرداقلیم‌های ایجادشده توسط درختچه‌های گز، با تعدیل دما و افزایش رطوبت خاک، منجر به شکل‌گیری شبکه‌ای از ترک‌ها با چگالی بالاتر، پیچیدگی فرکتالی بیشتر و اتصال‌پذیری بهتر می‌شود که این امر

نشان‌دهنده بهبود کیفیت فیزیکی خاک و کاهش خطر فرسایش بادی است. یافته‌های این پژوهش نه تنها به درک عمیق‌تری از تعاملات گیاه-خاک در محیط‌های شدیداً خشک کمک می‌کند، بلکه می‌تواند به‌عنوان یک شاخص کمی برای ارزیابی موفقیت طرح‌های احیای اکولوژیک مبتنی بر کاشت گز در مناطق مشابه مورد استفاده قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد بررسی و توصیف کمی پایه‌های گز

این پژوهش در ایستگاه‌های نهال‌کاری درختچه‌های گز واقع در بسترهای خشک‌شده غرب دریاچه ارومیه واقع در شمال‌غرب ایران و در حدواسط استان‌های آذربایجان غربی و شرقی انجام شد که در محدوده جغرافیایی بین عرض‌های شمالی ۳۶ درجه و ۴۵ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۲۰ دقیقه و طول‌های شرقی ۴۴ درجه و ۵۰ دقیقه تا ۴۶ درجه و ۱۰ دقیقه قرار دارد (شکل ۱). پیش از بحران خشکی دریاچه ارومیه، مساحت دریاچه ارومیه حدود ۵۰۰۰ کیلومتر مربع بود و حوزه آبخیز آن که محل تجمع رواناب‌های سطحی و زیرزمینی است، وسعتی نزدیک به ۵۲۰۰۰ کیلومتر مربع داشت. در سال‌های اخیر، بخش عمده‌ای از سطح دریاچه خشک شده و بستر آن به‌دلیل بافت نرم و لایه‌های نمکی، بسیار مستعد فرسایش بادی و تولید گردوغبار شده است (Darvishi Boloorani et al., 2025). از این رو، اقدامات گسترده‌ای برای تثبیت این کانون‌های ریزگرد و ماسه‌های روان در حاشیه‌های خشک‌شده دریاچه ارومیه اجرا شده است که مهم‌ترین آن‌ها، استقرار پوشش گیاهی از طریق روش‌هایی مانند بذرکاری، بوته‌کاری (با گونه غالب قره‌داغ) و نهال‌کاری درختچه‌های گز (*Tamarix ramosissima* Ledeb.) بوده است (Rostami et al., 2023). تمرکز اصلی این اقدامات در بخش غربی دریاچه ارومیه، به‌ویژه در

دقت ± 2 سانتی‌متر)، قطر بزرگ و کوچک تاج (با متر نواری)، و قطر یقه تنه اصلی (با کولیس و دقت میلی‌متری) اندازه‌گیری شد (Yin and Wang, 2019).

مساحت تاج‌پوشش (به‌عنوان شاخص خرداقلیم) نیز با استفاده از رابطه بیضی (رابطه ۱) محاسبه شد که در این رابطه S مساحت تاج‌پوشش، W قطر بزرگ تاج، L قطر کوچک تاج و π عدد ثابت ریاضی برابر با 3.14 است. این روش بر اساس پژوهش‌های پیشین (Li et al., 2021) نیز تأیید شده و برای برآورد دقیق‌تر مساحت مؤثر خرداقلیم به‌کار گرفته شد.

$$S = \frac{1}{4} \pi WL \quad \text{رابطه ۱}$$

محدوده بین روستاهای سپرغان تا مرنگلو، انجام شده که همین منطقه به‌عنوان سایت اصلی پژوهش انتخاب شد.

با توجه به سابقه طولانی کاشت گز در این منطقه (از سال ۱۳۹۴) و تشکیل خرداقلیم گسترده توسط آن، پایه‌های این گونه برای بررسی دقیق‌تر انتخاب شدند. در این راستا، ابتدا بازدید میدانی از سایت‌های نهال‌کاری انجام و ۶۰ پایه گز به‌صورت تصادفی سیستماتیک از ردیف‌های کاشت انتخاب شدند. این انتخاب با رعایت فواصل نسبتاً یکسان و همگونی در ارتفاع و ابعاد پایه‌ها انجام شد تا اثرات متغیرهای خارجی کاهش یابد (Lozano et al., 2020). سپس در آبان ماه ۱۴۰۱، مؤلفه‌های ریخت‌شناسی پایه‌ها شامل ارتفاع (با ژالون و



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی بسترهای خشک‌شده و وضعیت فعلی دریاچه ارومیه (الف)، محل پژوهش واقع در غرب دریاچه ارومیه (منطقه سپرغان، ب) و درختچه‌های کاشته‌شده گز که رشد موفقیت‌آمیزی را در بخش غربی دریاچه ارومیه نشان می‌دهند (ج)

Figure 1. Geographical location of the dried beds and current status of Lake Urmia (a); the study site located west of Lake Urmia (Seporghan region, b); and the planted Tamarix shrubs showing successful growth in the western part of Lake Urmia (c).

تعیین جهت بادهای غالب منطقه

در این پژوهش، برای تعیین جهت بادهای غالب منطقه اقدام به استفاده از نمودارهای گلباد سالانه و ماه‌های خشک (سهم و جهت باد غالب) ایستگاه‌های سینوپتیک موجود و نزدیک در اطراف دریاچه ارومیه استفاده شد (Zamani et al., 2020). از این‌رو، نمودارهای گلباد سالانه و ماه‌های خشک (برای دوره آماری ۱۳۲۸ تا ۱۴۰۰ شمسی) از ایستگاه سینوپتیک ارومیه (طول جغرافیایی ۴۵ درجه و ۳۹ دقیقه) از طریق مزونت محیطی آیووا (Iowa Environmental Mesonet; IEM) واقع در دانشگاه ایالتی آیووا در ایالات متحده آمریکا (<https://mesonet.agron.iastate.edu>) استخراج شد (Kheirfam, 2022).

اندازه‌گیری شاخص‌های ترک‌های سطحی

ترک‌های سطحی در مناطق مستعد فرسایش بادی اثرگذاری قابل‌توجهی در ایجاد و توسعه مسیرهای انتقال و همچنین تولید رسوبات ایفا کرده و اغلب به کانال‌ها یا شیارهای کوچکی تبدیل می‌شوند که قابلیت حمل رسوبات توسط باد (فرسایش بادی) را افزایش می‌دهند. به‌منظور ارزیابی ساختار منافذ-شیارها و ویژگی‌های ابعادی ترک‌های سطحی در نقاط نمونه‌برداری اطراف پایه‌های درختچه‌های گز در چهار جهت اصلی جغرافیایی منطبق با ردیف‌های کاشت پایه‌های گز، اقدام به تهیه تصاویر دیجیتال با وضوح بالا از سطح خاک داخل و خارج از محدود خرداقلیم ۱۵ پایه از ۶۰ پایه انتخابی شد. با توجه به محدودیت‌های زمانی و ظرفیت پردازش تصاویر با نرم‌افزار مورد استفاده در این پژوهش (که پردازش دستی-نیمه‌اتوماتیک نیازمند زمان قابل‌توجهی است)، ۱۵ پایه مطالعاتی به‌صورت تصادفی سیستماتیک از بین ۶۰ پایه انتخاب شده که بهینه‌ترین تعادل بین دقت آماری و امکان‌سنجی میدانی را فراهم می‌کند (Tefera et al., 2025).

برای تهیه تصاویر سطحی، پس از انتخاب جهت‌های جغرافیایی بر اساس ردیف‌های کاشت، به تعیین یک نقطه در فاصله نصف قطر تاج پایه‌ها (محدوده داخل خرداقلیم (تاج‌پوشش)) و همچنین یک نقطه در خارج از محدوده خرداقلیم (در میانه فاصله با تاج‌پوشش پایه‌های گز مجاور) برای تصویربرداری در هر یک از جهت‌های تعیین‌شده اقدام شد (Iwaoka et al., 2018). جهت‌های جغرافیایی انتخاب شده منطبق بر ردیف‌های کاشت پایه‌های گز انتخاب شده که به‌عبارتی هم‌جهت با جهت‌های اصلی جغرافیایی (شمال، شرق، جنوب و غرب) نبوده و نسبت به جهت‌های جغرافیایی اصلی دارای جهت‌های شمال‌شرقی، شمال‌غربی، جنوب غربی و جنوب شرقی بودند. در نهایت، با احتساب ۱۵ پایه گز مورد پژوهش و تهیه ۸ تصویر از داخل و خارج از محدوده تاج‌پوشش هر پایه گز، در مجموع ۱۲۰ تصویر ثبت شد. این تصاویر با فاصله کانونی ثابت و عمود بر سطح خاک گرفته شدند تا از اعوجاج نوری جلوگیری شده و دقت هندسی اطمینان‌بخش باشد. سپس با استفاده از روش پردازش تصاویر با نرم‌افزار (PCAS (Pores (Particles) and Cracks Analysis System) اقدام به استخراج و تحلیل ریخت‌شناسی شبکه ترک‌ها شد (Liu et al., 2013). با استفاده از این تصاویر پردازش‌شده، پارامترهای کلیدی ترک‌ها با به‌کارگیری روابط تجربی و تحلیل آماری محاسبه شدند. تراکم ترک‌ها (Crack density; D_c) با استفاده از رابطه ۲ (Novak, 1999)، نسبت وزنی میانگین مساحت ترک‌ها به محیط آن‌ها (Area-weighted mean ratio of crack area to perimeter; $AWMARP$) با استفاده از رابطه ۳ (Xiong et al., 2009)، میانگین وزنی بعد فرکتالی ترک‌ها (Area weighted mean of crack fractal dimension; $AWMFRAC$) که نشان‌دهنده پیچیدگی و

از تحلیل واریانس دوطرفه (Two-way ANOVA) استفاده شد. در ادامه، تفاوت‌های میان مؤلفه‌ها در جهت‌های مختلف، به‌صورت جداگانه برای محیط‌های داخل و خارج خرداقلیم، با ANOVA یک‌طرفه و آزمون تعقیبی Tukey مورد ارزیابی قرار گرفت. هم‌چنین، مقایسه میانگین شاخص‌های اندازه‌گیری‌شده بین دو محیط با آزمون t مستقل تحلیل شد. تمامی تحلیل‌ها در SPSS نسخه ۲۳ انجام شد.

نتایج

ویژگی‌های ریخت‌شناختی درختچه‌های گز

صفات ریخت‌شناختی درختچه‌های هفت‌ساله گز کاشته‌شده در بستر خشک‌شده دریاچه ارومیه، تغییرپذیری متوسطی را نشان داد (جدول ۱). ارتفاع درختچه‌ها در محدوده دو تا ۳/۶ متر (میانگین: $0.6 \pm$ تا ۲/۸۴ متر) متغیر بود. مساحت تاج در محدوده ۹/۴۸ تا ۲۷/۰۹ مترمربع (میانگین: $0.59 \pm 17/27$ مترمربع) متغیر بوده که نشان‌دهنده تفاوت‌های قابل توجهی در توسعه تاج بین پایه‌ها بود. قطر یقه به‌طور میانگین $1/48 \pm$ تا $54/90$ میلی‌متر (دامنه: ۳۲ تا ۹۵ میلی‌متر) بود که بیانگر رشد پایه‌ای قوی است. تعداد شاخه‌ها در هر درختچه از ۲ تا ۱۷ (میانگین: $0.42 \pm 7/09$) متغیر بود، در حالی که توان زیستی (ویتالیتی) به‌طور متوسط $0.92 \pm 85/59$ درصد (دامنه: ۵۰ تا ۱۰۰ درصد) بود. قطرهای تاج، بزرگ، کوچک و میانگین، به‌ترتیب میانگین‌های $0.97 \pm$ ، $4/86 \pm$ ، $0.69 \pm 4/38$ و $0.81 \pm 4/62$ متر بودند که حاکی از گسترش جانبی نسبتاً یکنواخت تحت شرایط محیطی حاکم است.

تأثیر خرداقلیم و جهت جغرافیایی بر ریخت‌شناسی

ترک‌ها

ریخت‌شناسی ترک‌های سطح خاک در دو میکرومحیط داخل و خارج از خرداقلیم ایجادشده توسط تاج‌پوشش

توانایی پرکردن فضا توسط ترک‌هاست، با رابطه ۴ (Xiong et al., 2009) و هم‌چنین اتصال ریخت‌شناسی ترک‌ها (Crack morphological connectivity; r) که شاخصی از پیوستگی شبکه و پتانسیل جریان ترجیحی است، با استفاده از رابطه ۵ (Xiong et al., 2010) محاسبه شد. در روابط ۲ تا ۵، متغیرهای N ، P ، A_c ، ac ، V و L به‌ترتیب مجموع مساحت کل ترک‌ها (میلی‌مترمربع)، مساحت کل سطح خاک مورد آزمایش (میلی‌مترمربع)، محیط ترک‌ها (میلی‌متر)، تعداد ترک‌ها، تعداد ترک‌های به‌هم‌متصل و تعداد نقاط اتصال ترک‌ها می‌باشند. هم‌چنین، مقادیر DC ، $AWMARP$ و $AWMFRAC$ به‌ترتیب در محدوده‌های صفر تا ۱۰۰ درصد، صفر تا ۱۰۰، صفر تا ۲ و صفر تا ۱ متغیر هستند (Sadeghi et al., 2020).

$$D_c = \sum_{i=1}^n \left(\frac{a_c}{A_c} \right) \times 100\% \quad \text{رابطه ۲}$$

$$AWMARP = \sum_{i=1}^m j = \sum_{j=1}^n \left[\left(\frac{a_{cij}}{P_{cij}} \right) \times \left(\frac{a_{cij}}{A_c} \right) \right] \quad \text{رابطه ۳}$$

$$AWMFRAC = \left(\sum_{i=1}^m \times \sum_{j=1}^n \left[\frac{2Ln(0.25 \times P_{cij})}{Ln(a_{cij})} \times \left(\frac{a_{cij}}{A_c} \right) \right] \right) \div N \quad \text{رابطه ۴}$$

$$r = \frac{L}{3 \times (V - 2)} \quad \text{رابطه ۵}$$

تحلیل آماری

برای تحلیل آماری داده‌ها، ابتدا اطلاعات مربوط به شاخص‌های ریخت‌شناسی ترک‌های سطحی خاک در پایه‌های درختچه‌های گز، بر اساس جهت‌های جغرافیایی و موقعیت‌های نمونه‌برداری (درون و بیرون خرداقلیم)، در نرم‌افزار Excel 2016 سازمان‌دهی شد. با توجه به حجم کم داده‌ها (کمتر از ۳۰ نمونه در هر گروه)، نرمال‌بودن توزیع داده‌ها با آزمون Shapiro-Wilk بررسی شد که داده‌ها نیز نرمال بودند. سپس، برای سنجش اثر همزمان جهت و موقعیت نمونه‌برداری،

پارامتر در تمام جهت‌ها یکسان بود. شاخص *AWMFRAC* در داخل تاج‌پوشش در شمال‌شرق (۱/۶۱) و شمال‌غرب (۱/۴۹) بیشینه شد، در حالی که در خارج از تاج‌پوشش در شمال‌غرب (۰/۱۵) بیش‌ترین مقدار را داشت.

نتایج تجزیه واریانس یک‌طرفه الگوهای جهتی را در هر دو میکرومحیط روشن‌تر کرد (جدول ۴). هم *DC* و هم *AWMFRAC* در هر دو منطقه داخل و خارج از تاج‌پوشش به‌طور معنی‌داری بین جهت‌های جغرافیایی متفاوت بودند ($p < 0/01$). برای *AWMARP*، اثر جهتی تنها در داخل تاج‌پوشش معنی‌دار بود ($p < 0/05$)، در حالی که در خارج از تاج‌پوشش چنین اثری مشاهده نشد ($p > 0/05$). شاخص *r* نیز در داخل تاج‌پوشش تفاوت جهتی معنی‌داری نشان داد ($p < 0/01$)، اما در خارج از تاج‌پوشش چنین تفاوتی دیده نشد ($p > 0/05$). مقایسه میانگین‌ها با آزمون توکی الگوهای جهتی خاصی را نشان داد (شکل ۲). شاخص *r* در داخل تاج‌پوشش در شمال‌غرب (۰/۲۹۸) بیش‌ترین مقدار را نشان داد و در سایر جهت‌ها تغییر کمی داشت؛ در خارج از تاج‌پوشش، *r* تفاوت جهتی نداشت. آزمون *t* مستقل تفاوت‌های بسیار معنی‌داری ($p < 0/01$) را بین دو میکرومحیط داخل و خارج از تاج‌پوشش برای تمام پارامترهای ترک تأیید کرد (جدول ۵). چگالی ترک‌ها در زیر تاج‌پوشش حدود ۶۵ درصد بیش‌تر بود (۱/۹۷۵ در مقابل ۰/۶۹۵ درصد؛ شکل ۳). شاخص *AWMARP* بیش از ۶۰ درصد در زیر تاج‌پوشش بیش‌تر بود (۰/۳۷ در مقابل ۰/۱۵؛ شکل ۳). شاخص *AWMFRAC* حدود ۹۱ درصد در زیر تاج‌پوشش بیش‌تر بود (۱/۳۹۲ در مقابل ۰/۱۲۱؛ شکل ۳) و شاخص *r* نیز ۴۳ درصد در زیر تاج‌پوشش بیش‌تر بود (۰/۲۹۲ در مقابل ۰/۱۶۷؛ شکل ۳). این یافته‌ها به‌طور جمعی نشان می‌دهند که خرداقلیم ایجادشده

درختچه‌های گز تفاوت‌های قابل‌توجهی داشت (جدول ۲). در منطقه زیر تاج‌پوشش، *DC* به‌طور میانگین $0/014 \pm 1/99$ درصد بود، در حالی که این مقدار در خارج از تاج $0/004 \pm 0/70$ درصد بود. همچنین، *AWMARP* در زیر تاج‌پوشش بیش از دو برابر ($0/0005 \pm 0/375$) نسبت به مناطق باز ($0/0004 \pm 0/014$) بود. شاخص *AWMFRAC* که پیچیدگی و توانایی پرکردن فضا را نشان می‌دهد، در زیر تاج‌پوشش به‌طور محسوسی بالاتر بود ($0/19 \pm 1/40$ در مقابل $0/002 \pm 0/122$). همچنین، شاخص *r* که نشان‌دهنده پیوستگی شبکه و پتانسیل جریان ترجیحی است، در زیر تاج‌پوشش تقریباً دو برابر ($0/0005 \pm 0/293$) نسبت به مناطق باز ($0/0005 \pm 0/16$) بود.

تجزیه واریانس دوطرفه نشان داد که موقعیت نمونه‌برداری (داخل در مقابل خارج از تاج‌پوشش) تأثیر بسیار معنی‌داری ($p < 0/01$) بر هر چهار پارامتر ترک سطح خاک، *DC*، *AWMARP*، *AWMFRAC* و *r*، داشت (جدول ۳). در مقابل، جهت جغرافیایی به‌تنهایی تأثیر معنی‌داری بر *DC*، *AWMARP* یا *AWMFRAC* نداشت ($p > 0/05$)، هرچند بر *r* اثر معنی‌داری داشت ($p < 0/01$). همچنین، اثر متقابل موقعیت نمونه‌برداری و جهت جغرافیایی برای *AWMARP* و *r* معنی‌دار بود ($p < 0/01$) که نشان داد میزان تأثیر تاج‌پوشش بر این شاخص‌ها با جهت جغرافیایی تغییر می‌کند.

در داخل تاج‌پوشش، *DC* در جهت شمال‌شرقی بیش‌ترین مقدار (۲/۱۳ درصد) و در جنوب‌شرقی کم‌ترین مقدار را داشت. در خارج از تاج‌پوشش، *DC* در جهت شمال‌غربی بیش‌ترین مقدار (۰/۷۴ درصد) و در سایر جهت‌ها نسبتاً یکنواخت بود. شاخص *AWMARP* در داخل تاج‌پوشش در جنوب‌شرقی کم‌ترین مقدار (۰/۳۵) را داشت و در سایر جهت‌ها تفاوت معنی‌داری نداشت؛ در خارج از تاج‌پوشش، این

توسط تاج‌پوشش گز، شبکه‌ای از ترک‌ها با چگالی
بیش‌تر، پیچیدگی بیش‌تر و اتصال‌پذیری بالاتر را نسبت
به مناطق باز تسهیل می‌کند.

جدول ۱- شاخص‌های آماری اجزای ریخت‌شناسی درختچه‌های گز مورد بررسی در بسترهای خشک‌شده دریاچه ارومیه
Table 1. Statistical indices of morphological components of *Tamarix* shrubs studied in the dried beds
of Lake Urmia

مقادیر Values	شاخص‌های آماری Statistical indicator	اجزای ریخت‌شناسی Morphological component	مقادیر Values	شاخص‌های آماری Statistical indicator	اجزای ریخت‌شناسی Morphological component
3.55	کمینه Minimum	قطر بزرگ تاج (متر) Large crown diameters (m)	2	کمینه Minimum	ارتفاع (متر) Height (m)
6.65	بیشینه Maximum		3.6	بیشینه Maximum	
4.86	میانگین Mean		2.84	میانگین Mean	
0.097	اشتباه معیار Standard error		0.06	اشتباه معیار Standard error	
3.40	کمینه Minimum	قطر کوچک تاج (متر) Small crown diameters (m)	9.48	کمینه Minimum	مساحت تاج‌پوشش (مترمربع) Canopy area (m ²)
5.40	بیشینه Maximum		27.09	بیشینه Maximum	
4.38	میانگین Mean		17.27	میانگین Mean	
0.069	اشتباه معیار Standard error		0.59	اشتباه معیار Standard error	
3.47	کمینه Minimum	قطر میانگین تاج (متر) Mean crown diameters (m)	32	کمینه Minimum	قطر یقه (میلی‌متر) Collar diameter (mm)
5.87	بیشینه Maximum		95	بیشینه Maximum	
4.62	میانگین Mean		54.90	میانگین Mean	
0.081	اشتباه معیار Standard error		1.48	اشتباه معیار Standard error	
50	کمینه Minimum	توان زیستی (درصد) Vitality (%)	2	کمینه Minimum	تعداد جست Number of shoots
100	بیشینه Maximum		17	بیشینه Maximum	
85.59	میانگین Mean		7.90	میانگین Mean	
0.92	اشتباه معیار Standard error		0.42	اشتباه معیار Standard error	

جدول ۲- شاخص‌های آماری اجزای خاک در داخل و خارج از منطقه خرداقليمی درختچه‌های گز در بسترهای خشک‌شده دریاچه ارومیه

Table 2. Statistical indices of soil components inside and outside the microclimate zone of *Tamarix* shrubs in the dried beds of Lake Urmia

مقادیر Values	شاخص‌های آماری Statistical indicator	اجزای ریخت‌شناسی Morphological component	محدوده Zone	مقادیر Values	شاخص‌های آماری Statistical indicator	اجزای ریخت‌شناسی Morphological component	محدوده Zone
0.61	کمینه Minimum		خارج از محدوده خرد اقلیم Outside the microclimatic zone	1.69	کمینه Minimum		داخل محدوده خرد اقلیم Within the microclimatic zone
0.79	بیشینه Maximum	تراکم ترک‌ها <i>DC (%)</i>		2.41	بیشینه Maximum	تراکم ترک‌ها <i>DC (%)</i>	
0.70	میانگین Mean			1.99	میانگین Mean		
0.004	اشتباه معیار Standard error			0.014	اشتباه معیار Standard error		
0.011	کمینه Minimum			0.0035	کمینه Minimum		
0.036	بیشینه Maximum	نسبت وزنی میانگین مساحت ترک‌ها به محیط		0.0465	بیشینه Maximum	نسبت وزنی میانگین مساحت ترک‌ها به محیط	
0.014	میانگین Mean	آن‌ها <i>AWMARP</i>		0.0375	میانگین Mean	محیط آن‌ها <i>AWMARP</i>	
0.0004	اشتباه معیار Standard error			0.0005	اشتباه معیار Standard error		
0.069	کمینه Minimum			1.035	کمینه Minimum		
0.180	بیشینه Maximum	میانگین وزنی بعد فرکتالی ترک‌ها		2.010	بیشینه Maximum	میانگین وزنی بعد فرکتالی ترک‌ها	
0.122	میانگین Mean	<i>AWMFRAC</i>	1.40	میانگین Mean	<i>AWMFRAC</i>		
0.002	اشتباه معیار Standard error		0.019	اشتباه معیار Standard error			
0.15	کمینه Minimum		0.284	کمینه Minimum			
0.17	بیشینه Maximum	اتصال ریخت‌شناسی ترک‌ها	0.309	بیشینه Maximum	اتصال ریخت‌شناسی ترک‌ها		
0.16	میانگین Mean	<i>r</i>	0.293	میانگین Mean	<i>r</i>		
0.0005	اشتباه معیار Standard error		0.0005	اشتباه معیار Standard error			

جدول ۳- نتایج آنالیز واریانس دوطرفه برای تعیین اثرات ریزاقلیم درون و بیرون درختچه گز (محل نمونه‌برداری) و جهت‌های جغرافیایی مختلف بر اجزای خاک

Table 3. Results of two-way ANOVA to determine the effects of the inside and outside of *Tamarix* shrubs microclimate (sampling location), and various geographic directions on soil components

معنی‌داری Sig.	مقادیر فیشر F-value	میانگین مربعات Mean Square	درجه آزادی df	منابع تغییر Variation sources	متغیرها Variable
0.001	4012.19	49.970	1	نقاط نمونه‌برداری Sampling location	
0.177	01.647	0.021	3	جهت‌های جغرافیایی Geographic directions	تراکم ترک‌ها DC (%)
0.177	1.671	0.021	3	نقاط نمونه‌برداری × جهت‌های جغرافیایی Sampling location × geographic directions	
0.001	641.552	0.016	1	نقاط نمونه‌برداری Sampling location	نسبت وزنی میانگین
0.937	0.138	0.00001	3	جهت‌های جغرافیایی Geographic directions	مساحت ترک‌ها به محیط آن‌ها
0.001	5.794	0.00014	3	نقاط نمونه‌برداری × جهت‌های جغرافیایی Sampling location × geographic directions	AWMARP
0.001	2303.75	48.939	1	نقاط نمونه‌برداری Sampling location	میانگین وزنی بعد
0.246	1.404	0.030	3	جهت‌های جغرافیایی Geographic directions	فرکتالی ترک‌ها
0.391	1.010	0.021	3	نقاط نمونه‌برداری × جهت‌های جغرافیایی Sampling location × geographic directions	AWMFRAC
0.001	18174.49	0.476	1	نقاط نمونه‌برداری Sampling location	اتصال ریخت‌شناسی
0.001	7.102	0.0002	3	جهت‌های جغرافیایی Geographic directions	ترک‌ها
0.007	4.254	0.0001	3	نقاط نمونه‌برداری × جهت‌های جغرافیایی Sampling location × geographic directions	r

که چرخه‌های مرطوب‌شدن و خشک‌شدن متوسط و مکرر را تجربه می‌کنند. در مقابل، مناطق باز ترک‌های پراکنده، نامنظم و اغلب ناپیوسته‌ای داشتند که نشان‌دهنده خشکی شدید و ناپایداری ساختاری است.

تصاویر پردازش‌شده با نرم‌افزار PCAS (شکل ۴) یافته‌های کمی را به صورت بصری تأیید کردند. در زیر تاج‌پوشش گز، شبکه ترک‌ها متراکم‌تر، یکنواخت‌تر و بهتر به هم متصل بود و الگوی چندضلعی نیمه‌منظمی را تشکیل می‌داد که معمولاً در خاک‌هایی دیده می‌شود

جدول ۴- نتایج آنالیز واریانس یک طرفه اجزای خاک اندازه گیری شده در داخل و خارج تاج درختچه های گز در جهات جغرافیایی مختلف در بسترهای خشک دریاچه ارومیه

Table 4. Results of one-way ANOVA of soil components measured inside and outside the crown of *Tamarix* shrubs across different geographical directions in the dried beds of Lake Urmia

متغیرها Variable	محدوده نمونه برداری Sampling zone	منابع تغییر Variation sources	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean Square	مقادیر فیشر F-value	معنی داری Sig.	
تراکم ترکها DC (%)	داخل محدوده تاج پوشش Inside crown	بین گروهها Between groups	3	0.227	17.599	0.001	
		درون گروهها Within groups	56	0.013			
		کل Total	59				
	خارج محدوده تاج پوشش Outside crown	بین گروهها Between groups	3	0.019	17.247	0.001	
		درون گروهها Within groups	56	0.001			
		کل Total	59				
	نسبت وزنی میانگین مساحت ترکها به محیط آنها AWMARP	داخل محدوده تاج پوشش Inside crown	بین گروهها Between groups	3	0.00008	2.902	0.043
			درون گروهها Within groups	56	0.00003		
			کل Total	59			
خارج محدوده تاج پوشش Outside crown		بین گروهها Between groups	3	0.00001	0.409	0.747	
		درون گروهها Within groups	56	0.00004			
		کل Total	59				
میانگین وزنی بعد فرکتالی ترکها AWMFRAC		داخل محدوده تاج پوشش Inside crown	بین گروهها Between groups	3	0.491	26.967	0.001
			درون گروهها Within groups	56	0.018		
			کل Total	59			
	خارج محدوده تاج پوشش Outside crown	بین گروهها Between groups	3	0.006	17.661	0.001	
		درون گروهها Within groups	56	0.018			
		کل Total	59				

ادامه جدول ۴.

Continued Table 4.

متغیرها Variable	محدوده نمونه‌برداری Sampling zone	منابع تغییر Variation sources	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean Square	مقادیر فیشر F-value	معنی‌داری Sig.
اتصال ریخت‌شناسی ترک‌ها <i>r</i>	داخل محدوده تاج‌پوشش Inside crown	بین گروه‌ها Between groups	3	0.0002	10.523	0.001
		درون گروه‌ها Within groups	56	0.00002		
	کل Total		59			
	خارج محدوده تاج‌پوشش Outside crown	بین گروه‌ها Between groups	3	0.00004	0.927	0.434
		درون گروه‌ها Within groups	56	0.00003		
		کل Total		59		

بحث

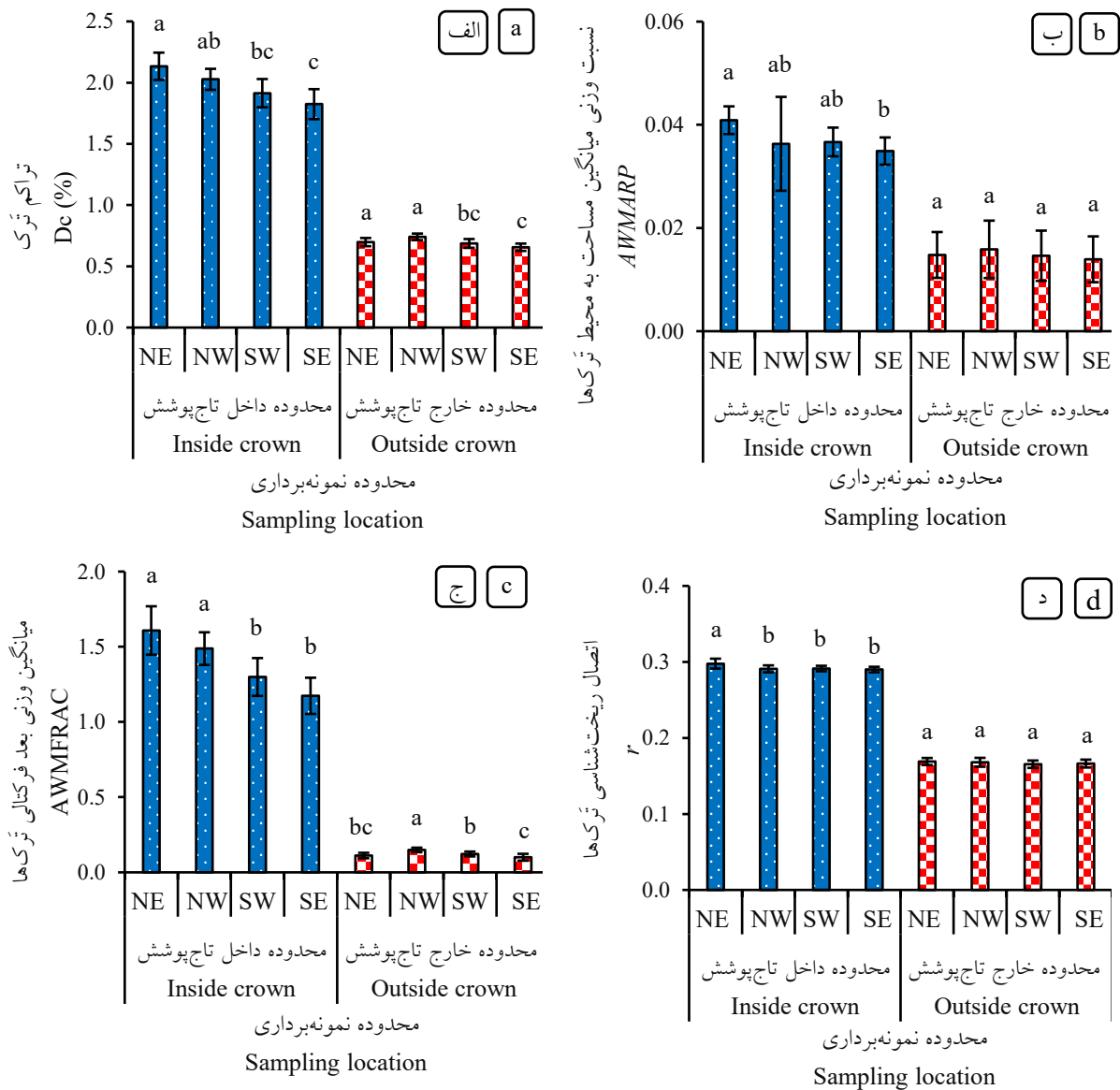
توسط تاج‌پوشش آن‌ها تغییر می‌دهد. در این پژوهش، تمامی شاخص‌های کلیدی ترک‌خوردگی، شامل *Dc*، *AWMFRAC*، *AWMARP* و *r*، در زیر تاج‌پوشش گز به‌طور معنی‌داری ($p < 0.01$) بیش‌تر از مناطق باز بود. این نتایج همسو با پژوهش‌های پیشین است که نقش پوشش گیاهی را در تعدیل رطوبت خاک و کاهش نوسانات دمایی سطحی تأکید کرده‌اند (Havrilla and Barger, 2018; Ye et al., 2025).

افزایش *Dc* در زیر تاج‌پوشش گز (حدود ۶۵ درصد نسبت به خارج از تاج‌پوشش) نشان‌دهنده وجود یک شبکه ترک متراکم‌تر است که می‌تواند به‌عنوان مسیری برای نفوذ آب و تبادل گاز عمل کند. این در حالی است که در مناطق باز، چگالی ترک کمتر از یک درصد بوده و سطح خاک بیشتر به‌صورت یک لایه نسبتاً یکنواخت و نفوذناپذیر ظاهر می‌شود. چنین سطحی نه‌تنها تبادل گازی را محدود می‌کند، بلکه مانع از نفوذ آب و حرکت ریشه‌های گیاهان جوان می‌شود و در نتیجه، شرایط را برای استقرار پوشش گیاهی طبیعی نامساعد می‌سازد که در نهایت سرعت توالی بوم‌شناسی

ترک‌خوردگی خاک، به‌عنوان پدیده‌ای طبیعی و پیچیده ناشی از چرخه‌های مکرر خشک‌شدن و مرطوب‌شدن، نقشی کلیدی در تنظیم رفتار فیزیکی و عملکرد اکولوژیکی خاک دارد (Tang et al., 2011). این فرآیند نه‌تنها بر ساختار خاک تأثیر می‌گذارد، بلکه بر طیف وسیعی از ویژگی‌های هیدرولوژیکی و زیستی، از جمله نفوذپذیری آب، جابه‌جایی نمک‌ها، تبادل گازی، تبخیر رطوبت و رشد ریشه گیاهان، تأثیر مستقیم دارد (Tang et al., 2011). در زیست‌بوم‌های خشک و نیمه‌خشک مانند بستر خشک‌شده دریاچه ارومیه، که با شرایط سخت اقلیمی، شوری بالا و فرسایش بادی شدید مواجه‌اند، الگوی ترک‌خوردگی سطح خاک می‌تواند شاخص حساس و کارآمد برای سنجش کیفیت فیزیکی خاک و پایداری اکولوژیکی آن باشد (Sadeghi et al., 2020).

یافته‌های این پژوهش نشان داد که حضور درختچه‌های گز به‌طور معنی‌داری ریخت‌شناسی ترک‌های سطح خاک را در محدوده خرداقلیم ایجادشده

زیست‌بوم به سمت توسعه پوشش گیاهی را کاهش می‌دهد (Sadeghi et al., 2020).

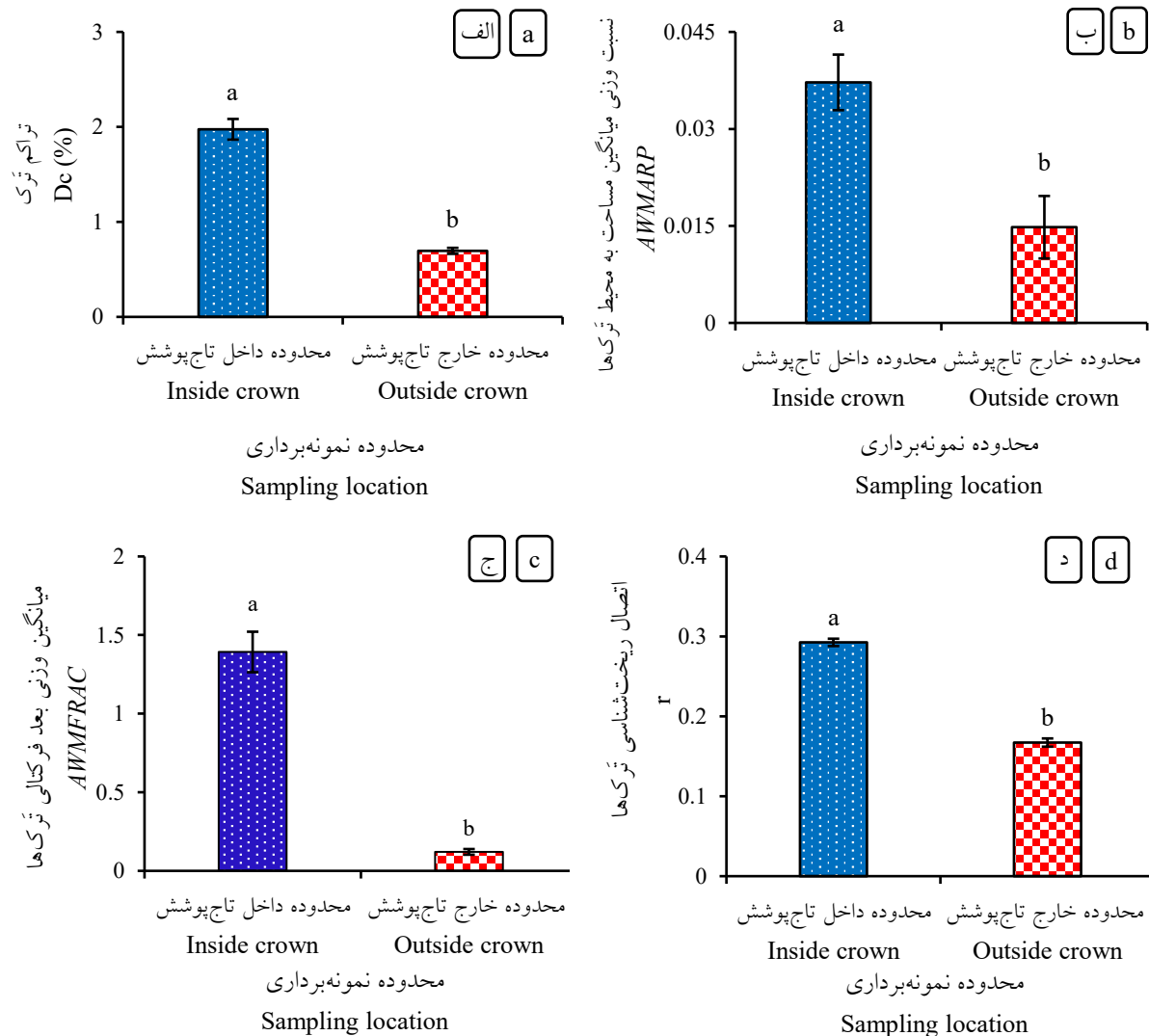


شکل ۲- مقایسه میانگین مقادیر Dc (الف)، $AWMARP$ (ب)، $AWMFRAC$ (ج) و r (د) ترک‌های خاک سطحی در داخل و خارج از تاج پوشش درختچه‌های گز در جهات مختلف جغرافیایی شمال شرقی (NE)، شمال غربی (NW)، جنوب غربی (SW) و جنوب شرقی (SE) (حروف کوچک مشابه نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار ($p > 0.05$) هستند، در حالی که حروف متفاوت نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار ($p < 0.05$) هستند)

Figure 2. Comparison of mean values of Dc (a), $AWMARP$ (b), $AWMFRAC$ (c), and r (d) of soil surface cracks inside and outside the canopy of *Tamarix* shrubs across different geographical directions of north east (NE), north west (NW), south west (SW), and south east (SE) (Similar lowercase letters indicate no significant difference ($p > 0.05$), while different letters denote significant differences ($p < 0.05$)).

توده‌ای و با ترک‌های بسیار ریز داشته که همانند خاک‌های رسی مرطوب شبکه‌های بزرگ چندسانتی‌متری تشکیل نمی‌دهند. در این شرایط، Dc کمتر از دو درصد و $AWMARP$ کم‌تر از یک درصد غیرعادی نبوده و مشابه با یافته‌های Xiong et al. (2009) است.

هرچند، مقادیر Dc و $AWMARP$ در داخل و خارج از محدوده تاج‌پوشش پایه‌های گز منطقه مورد بررسی بسیار کم بود. به عبارتی، خاک بستر خشک‌شده دریاچه ارومیه از نظر بافت غالباً رسی نمکی سخت بوده که تحت شرایط خشکی طولانی‌مدت، ترک‌های عمیق و پایداری را از دست داده و سطحی ناهموار،



شکل ۳- مقایسه میانگین مقادیر Dc (الف)، $AWMARP$ (ب)، $AWMFRAC$ (ج) و r (د) ترک‌های سطحی در داخل و خارج از تاج پوشش درختچه‌های گز (حروف کوچک مشابه نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار ($p > 0.05$) هستند، در حالی که حروف متفاوت نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار ($p < 0.05$) هستند)

Figure 3. Comparison of mean values of Dc (a), $AWMARP$ (b), $AWMFRAC$ (c), and r (d) of soil surface cracks inside and outside the canopy of *Tamarix* shrubs (Similar lowercase letters indicate no significant difference ($p > 0.05$), while different letters denote significant differences ($p < 0.05$))

در این راستا، Xiong et al. (2009) خاک‌های با مقادیر DC کم‌تر از پنج درصد و $AWMARP$ کم‌تر از دو درصد را خاک‌های با توسعه‌یافتگی ضعیف ترک‌خوردگی تقسیم‌بندی کردند. با این حال، افزایش DC درصدی ۱۶۸ و $AWMARP$ درصدی ۱۸۴ محدوده داخل تاج‌پوشش نسبت به محدوده خارج از آن، حاکی از بهبود مقادیر این دو مؤلفه بوده که در نهایت منجر به بهبود تبادلات گازی و رطوبت می‌شوند

در این راستا، Xiong et al. (2009) خاک‌های با مقادیر DC کم‌تر از پنج درصد و $AWMARP$ کم‌تر از دو درصد را خاک‌های با توسعه‌یافتگی ضعیف ترک‌خوردگی تقسیم‌بندی کردند. با این حال، افزایش DC درصدی ۱۶۸ و $AWMARP$ درصدی ۱۸۴ محدوده داخل تاج‌پوشش نسبت به محدوده خارج از آن، حاکی از بهبود مقادیر این دو مؤلفه بوده که در نهایت منجر به بهبود تبادلات گازی و رطوبت می‌شوند

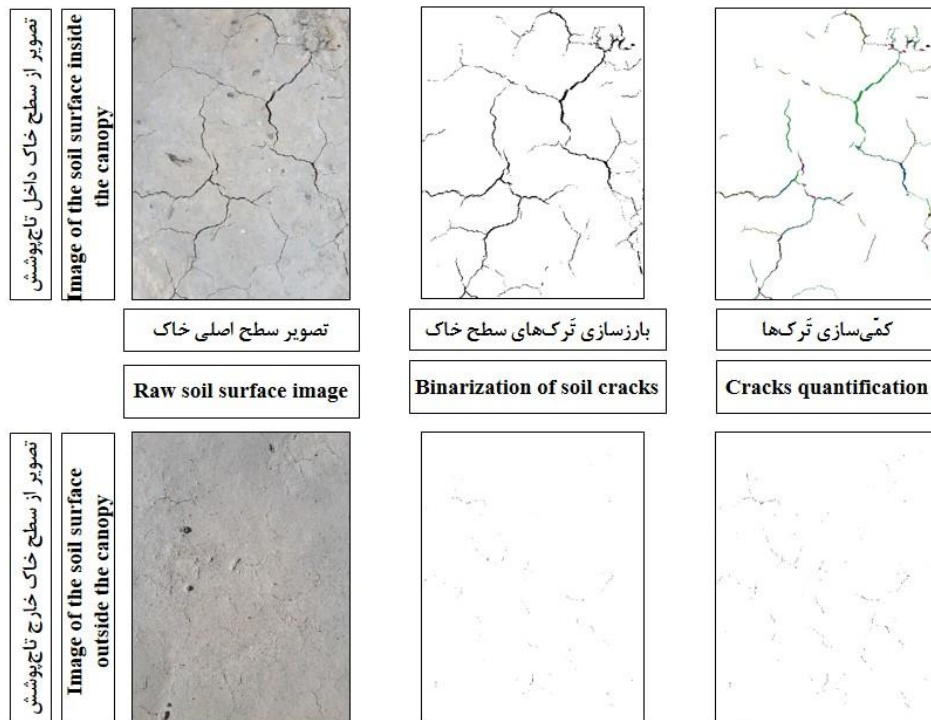
جدول ۵- نتایج آزمون t نمونه‌های مستقل برای تعیین اختلاف میانگین ($p < 0.05$) بین دو گروه داخل و خارج تاج گز بر اجزای خاک

Table 5. Results of an independent samples t-test to determine the mean difference ($p < 0.05$) between the two groups of inside and outside crown of the *Tamarix* on soil components

متغیرها Variable	محدوده نمونه‌برداری		Sampling zone		درجه آزادی df	مقادیر معنی‌داری Sig. t-value
	داخل محدوده تاج‌پوشش خارج محدوده تاج‌پوشش	Outside crown	Inside crown			
تراکم ترک‌ها DC (%)	1.975	0.695	118	62.268	0.001	
نسبت وزنی میانگین مساحت ترک‌ها به محیط آن‌ها $AWMARP$	0.037	0.015	118	24.565	0.001	
میانگین وزنی بعد فرکتالی ترک‌ها $AWMFRAC$	1.392	0.121	118	47.474	0.001	
اتصال ریخت‌شناسی ترک‌ها r	0.292	0.167	118	121.170	0.001	

تاج‌پوشش (میانگین حدوداً ۰/۱۲) حاکی از ترک‌خوردگی نامنظم، پراکنده و غیرفعال بوده که احتمالاً ناشی از خشکی شدید و فقدان پوشش گیاهی است. این یافته با مطالعاتی همخوانی دارد که نشان داده‌اند خاک‌های تحت پوشش گیاهی، به‌ویژه در مناطق خشک، شبکه‌های ترک پیچیده‌تر و پایدارتری را توسعه می‌دهند (Zeng et al., 2024).

یکی از مهم‌ترین یافته‌های این پژوهش، افزایش قابل توجه $AWMFRAC$ در زیر تاج‌پوشش گز (حدود ۹۱ درصد بیش‌تر از خارج از تاج‌پوشش) است. بعد فرکتالی معیاری از پیچیدگی و توانایی شبکه ترک در پرکردن فضا است؛ مقادیر بالاتر نشان‌دهنده الگوهای منظم‌تر و فضای بیشتری برای جابه‌جایی آب، هوا و مواد آلی در خاک است (Xiong et al., 2009). در مقابل، مقادیر بسیار پایین $AWMFRAC$ در خارج از



شکل ۴- نمایش شماتیک مراحل مربوط به استخراج و تعیین کمیّت ترک‌های سطح خاک در داخل و خارج از تاج پوشش توده‌های درختچه‌ای گز مورد بررسی

Figure 4. Schematic representation of the steps involved in the extraction and quantification of soil surface cracks inside and outside the canopy of the studied *Tamarix* shrub stands

مانع فیزیکی در برابر باد عمل می‌کند، بلکه با ایجاد خرداقلیم، شرایط را برای بهبود کیفیت خاک مساعد می‌سازد.

از یافته‌های دیگر این پژوهش، نقش جهت‌گیری جغرافیایی در تغییرات ترک‌خوردگی است. اگرچه تأثیر کلی موقعیت نمونه‌برداری (داخل در مقابل خارج از تاج‌پوشش) بر تمامی شاخص‌ها بسیار قوی‌تر از تأثیر جهت بود، اما برهم‌کنش بین این دو عامل برای $AWMARP$ و r معنی‌دار بود. این یافته نشان می‌دهد که اثر محافظتی تاج‌پوشش گز در جهت‌های مختلف یکسان نیست. به‌طور خاص، جهت‌های شمال‌شرقی و شمال‌غربی بیش‌ترین مقادیر Dc و $AWMFRAC$ را در زیر تاج‌پوشش نشان دادند. این الگو احتمالاً با الگوی بادهای غالب منطقه و میزان تابش خورشیدی و در نتیجه میزان رطوبت خاک سطحی مرتبط است

شاخص r نیز در زیر تاج‌پوشش گز به‌طور معنی‌داری (حدود ۴۳ درصد) بیش‌تر بود. این شاخص نشان‌دهنده پیوستگی شبکه ترک و پتانسیل آن برای ایجاد مسیرهای جریان ترجیحی است. در زیست‌بوم‌های خشک، این ویژگی می‌تواند دوگانه باشد به‌گونه‌ای که از یک سو، اتصال‌پذیری بالا می‌تواند تسهیل‌کننده نفوذ آب باران به لایه‌های عمیق‌تر باشد؛ از سوی دیگر، در شرایط فرسایش بادی، می‌تواند به‌عنوان کانال‌هایی برای حمل ذرات ریز عمل کند. با این حال، در این پژوهش، با توجه به وجود پوشش گیاهی و کاهش سرعت باد در زیر تاج‌پوشش، احتمالاً اثر مثبت این اتصال‌پذیری (یعنی بهبود تبادلات زیست‌فیزیکی) بر اثر منفی آن (حمل ذرات) غلبه دارد. این تفسیر با یافته‌های (Miri and Davidson-Arnott (2021) همخوانی دارد که نشان دادند گز نه‌تنها به‌عنوان یک

دریاچه ارومیه، از طریق ایجاد خرداقلیم زیر تاج پوشش، تأثیر معنی داری بر ریخت شناسی ترک های سطح خاک دارد. یافته ها حاکی از آن است که شاخص های کلیدی ترک خوردگی شامل $AWMARP$ ، $AWMFRAC$ ، Dc و r در زیر تاج پوشش گز به طور آماری بالاتر از مناطق باز هستند. این بهبود ساختاری نشان دهنده تشکیل شبکه ای متراکم تر، پیچیده تر و به هم پیوسته تر از ترک هاست که می تواند عملکرد هیدرولوژیکی و بیولوژیکی خاک را ارتقاء دهد. این تغییرات به ویژه در جهت های شمال شرقی و شمال غربی برجسته تر بود که احتمالاً ناشی از تعامل خرداقلیم زیر تاج پوشش با الگوی بادهای غالب و میزان تابش خورشیدی در این جهت ها است. از دیدگاه مدیریتی، این یافته ها تأیید می کنند که درختچه گز، علی رغم ماهیت غیربومی بودن، در شرایط بحرانی می تواند به عنوان گونه مهندس زیست بوم عمل کند و زمینه را برای احیای اکولوژیکی فراهم آورد. همچنین، شاخص های ریخت شناسی ترک ها می توانند به عنوان معیارهای کمی مؤثری برای ارزیابی موفقیت طرح های احیای اکولوژیکی در مناطق خشک مورد استفاده قرار گیرند. در مجموع، کاشت گز نه تنها یک راهکار فیزیکی برای کاهش فرسایش بادی، بلکه یک استراتژی اکولوژیکی برای بهبود ساختار خاک و پایداری بلندمدت زیست بوم در بستر دریاچه ها/تالاب های خشک شده است. در نهایت، یافته های این پژوهش نشان می دهد که گزهای دست کاشت با ایجاد خرداقلیم مناسب، الگوی ترک خوردگی خاک را از حالت نامنظم و ناکارآمد در مناطق باز به سمت شبکه ای متراکم، پیچیده و به هم پیوسته در زیر تاج خود هدایت می کنند. این تغییرات ساختاری، هرچند ظاهراً جزئی به نظر می رسند، می توانند تأثیرات عمیقی بر پایداری اکولوژیکی و کاهش گردوغبار در این منطقه بحرانی داشته باشند.

(Alizadeh et al., 2023). بر اساس داده های گلباد ایستگاه سینوپتیک ارومیه (Zamani et al., 2020)، بادهای غالب در فصل خشک بیشتر از جهت شمال غربی می وزند. بنابراین، سمت شمال غربی تاج پوشش گزها بیشترین محافظت را در برابر باد و تبخیر داشته که می تواند منجر به رطوبت بالاتر و ترک خوردگی منظم تر شود (Alizadeh et al., 2023). از سوی دیگر، جهت شمال شرقی کمترین تابش مستقیم خورشیدی را در طول روز دریافت می کند که می تواند به کاهش تبخیر و افزایش پایداری رطوبت خاک کمک کند (Alizadeh et al., 2023). این یافته ها هم راستا با یافته های (Alizadeh et al., 2023) بوده که بر اهمیت در نظر گرفتن عوامل جهت گیری در طراحی طرح های احیاء نیز تأکید می کند.

از دیدگاه مدیریتی، یافته های این پژوهش نشان می دهد که کاشت درختچه های گز در بستر خشک شده دریاچه ارومیه تنها به عنوان یک راهکار مکانیکی برای کاهش فرسایش بادی مؤثر نیست، بلکه از طریق ایجاد خرداقلیم، به طور غیرمستقیم بر ساختار فیزیکی خاک تأثیر گذاشته و آن را برای فرآیندهای اکولوژیکی آینده آماده می کند. این امر اهمیت ویژه ای در زمینه زیست بوم های نوپدید (زیست بوم هایی که در پی تخریب شدید، بعضاً با گونه های غیربومی یا مهندسی شده بازسازی می شوند) دارد (Chen et al., 2022). درختچه گز، با وجود اینکه گاهی به عنوان یک گونه مهاجم شناخته می شود، در شرایط بحرانی بستر دریاچه ارومیه می تواند نقش یک گونه مهندس زیست بوم را ایفا کرده و زمینه را برای استقرار گونه های بومی در آینده فراهم آورد.

نتیجه گیری کلی

نتیجه گیری این پژوهش نشان می دهد که حضور درختچه های گز دست کاشت در بستر خشک شده

References

- Alizadeh, L.; Alijanpour, A.; Kheirfam, H. Effect of planting *Tamarix ramosissima* Ledeb. shrubs on soil temperature and humidity in the western dried-up beds of Lake Urmia. *Iranian Journal of Forest* **2023**, *14* (4), 371–388. (In Persian)
- Bahmani, H.; Hamzehpour, N.; Pourmohammad, S.; Mousavi, S. B.; Moosavifar, M. Harnessing salt crusts from Lake Urmia: A sustainable approach to soil stabilisation and dust mitigation. *Soil Use and Management* **2025**, *41* (2), e70087.
- Bu, F.; Liu, J.; Mei, H.; Song, Z.; Wang, Z.; Dai, C.; Qian, W. Cracking behavior of sisal fiber-reinforced clayey soil under wetting-drying cycles. *Soil and Tillage Research* **2023**, *227*, 105596.
- Chen, X.; Wang, Y.; Pei, H.; Guo, Y.; Zhang, J.; Shen, Y. Expansion of irrigation led to inland lake shrinking in a semi-arid agro-pastoral region, China: A case study of Chahannur Lake. *Journal of Hydrology: Regional Studies* **2022**, *41*, 101086.
- Darvishi Bolorani, A.; Sharif, M.; Samany, N. N.; Chehrenegar, B.; Amiraslani, F. Determining the minimum water level required for Lake Urmia to prevent formation of salt storms: A satellite-based analysis. *International Journal of Environmental Research* **2025**, *19* (1), 24.
- Feng, H.; Xing, X.; Xing, J.; Du, J.; Li, D. Performance and modeling of infiltration flow in cracked saline soils. *Journal of Hydrology* **2025**, *656*, 133054.
- Gagliardi, S. Plant traits, microclimate modifications, and ecosystem functioning in managed environments. In *Plant Functional Traits*; Elsevier, 2025; pp 87–100.
- Hanifinia, A.; Abghari, H.; Khosravi, Kh. Spatial analysis of meteorological drought susceptibility with a forest and watershed monitoring approach in Kurdistan Province. *Forest Research and Development* **2025**, *11* (2), 165–181.
- Havrilla, C. A.; Barger, N. N. Biocrusts and their disturbance mediate the recruitment of native and exotic grasses from a hot desert ecosystem. *Ecosphere* **2018**, *9* (7), e02361.
- Haidari, M.; Matinzadeh, M.; Pourhashemi, M.; Nouri, E.; Bagheri Delijani, N. Investigating changes in the physical and chemical characteristics of soil in control and dieback stands in Marivan County, Kurdistan Province, Iran. *Forest Research and Development* **2024**, *10* (1), 95–111.
- Iwaoka, C.; Imada, S.; Taniguchi, T.; Du, S.; Yamanaka, N.; Tateno, R. The impacts of soil fertility and salinity on soil nitrogen dynamics mediated by the soil microbial community beneath the halophytic shrub tamarisk. *Microbial Ecology* **2018**, *75* (4), 985–996.
- Kheirfam, H. Spatial prioritization of wind-erosion-prone areas in the dried-up beds of Lake Urmia using field sampling and in vitro measurement. *Catena* **2022**, *217*, 106507.
- Li, C.; Yang, F.; Zheng, X.; Han, Z.; Pan, H.; Zhou, C.; Ji, C. Changes in distribution and morphology of *Tamarix ramosissima* nebkhas in an oasis-desert ecotone. *Geosciences Journal* **2021**, *25* (5), 661–673.
- Liu, C.; Tang, C. S.; Shi, B.; Suo, W. B. Automatic quantification of crack patterns by image processing. *Computers & Geosciences* **2013**, *57*, 77–80.
- Lozano, Y. M.; Hortal, S.; Armas, C.; Pugnaire, F. I. Complementarity in nurse plant systems: Soil drives community composition while microclimate enhances productivity and diversity. *Plant and Soil* **2020**, *450* (1–2), 385–396.
- Miri, A.; Davidson-Arnott, R. The effectiveness of a single *Tamarix* tree in reducing aeolian erosion in an arid region. *Agricultural and Forest Meteorology* **2021**, *300*, 108324.
- Novak, V. Soil-crack characteristics: Estimation methods applied to heavy soils in the NOPEX area. *Agricultural and Forest Meteorology* **1999**, *98–99*, 501–507.
- Pi, H.; Webb, N. P.; Huggins, D. R.; Sharratt, B. Influence of physical crust cover on the wind erodibility of soils in the inland Pacific Northwest, USA. *Earth Surface Processes and Landforms* **2021**, *46* (8), 1445–1457.
- Rafiejahed, R.; Sagheb-Talebi, K.; Khanjani-Shiraz, B.; Eslamdoust, J. Diversity, composition and occurrence probability of tree-related microhabitats in the decay developmental stage of Hyrcanian intact beech forests (Sika and Shafarood regions). *Forest Research and Development* **2025**, *11* (3), 295–316.
- Ramirez, C.; Wright, A. J. Microclimate and growth advantages in the "Three Sisters" planting food system in an urban garden. *Plant and Soil* **2025**, *506* (1–2), 541–553.

- Ribeiro Filho, J. C.; Andrade, E. M.; Guerreiro, M. S.; Palácio, H. A. Q.; Brasil, J. B. Soil-water-atmosphere effects on soil crack characteristics under field conditions in a semiarid climate. *Hydrology* **2023**, *10* (4), 83.
- Rostami, S.; Alijanpour, A.; Banj Shafiei, A.; Ahmady-Birgani, H.; Beygi Heidarlou, H. Investigation of biological activities for combating desertification in the western shores of Lake Urmia, northwest Iran. *Journal of Arid Land* **2023**, *15* (3), 297–309.
- Sadeghi, S. H. R.; Kheirfam, H.; Zarei Darki, B. Controlling runoff generation and soil loss from field experimental plots through inoculating cyanobacteria. *Journal of Hydrology* **2020**, *585*, 124814.
- Shi, K.; Liao, J.; Zou, X.; Chen, H. Y. H.; Delgado-Baquerizo, M.; Wanek, W.; Ni, J.; Ren, T.; Zhang, C.; Yan, Z.; Ruan, H. Forest development induces soil aggregate formation and stabilization: Implications for sequestration of soil carbon and nitrogen. *Catena* **2024**, *246*, 108363.
- Tang, C. S.; Shi, B.; Liu, C.; Suo, W. B.; Gao, L. Experimental characterization of shrinkage and desiccation cracking in thin clay layers. *Applied Clay Science* **2011**, *52* (1–2), 69–77.
- Tefera, W.; Shiferaw, W.; Kassa, G. Ecological factors influence diversity, structure, and regeneration status of woody plant species in Basso Subwatershed, Gamo Zone, Ethiopia. *Scientifica* **2025**, *2025*, 8890087.
- Vogel, H. J.; Hoffmann, H.; Roth, K. Studies of crack dynamics in clay soil. I. Experimental methods, results, and morphological quantification. *Geoderma* **2005**, *125* (3–4), 203–211.
- Xiong, D.; Long, Y.; Yan, D.; Lu, X.; Ji, Z.; Fang, H. Surface morphology of soil cracks in Yuanmou Dry-hot Valley region, southwest China. *Journal of Mountain Science* **2009**, *6* (4), 373–379.
- Xiong, D.; Yan, D.; Long, Y.; Lu, X.; Han, J.; Han, X.; Shi, L. Simulation of morphological development of soil cracks in Yuanmou Dry-hot Valley region, southwest China. *Chinese Geographical Science* **2010**, *20* (2), 112–122.
- Ye, Z.; Wang, X.; Yang, L.; Zhang, W.; Zhou, J.; Qu, Y.; Chang, V. W. C. Direct observation of biochar aging: Influence of environmental coverage on surface cracks in long-term aged wildfire charcoal. *Environmental Technology & Innovation* **2025**, *40*, 104464.
- Yin, D.; Wang, L. Individual mangrove tree measurement using UAV-based LiDAR data: Possibilities and challenges. *Remote Sensing of Environment* **2019**, *223*, 34–49.
- Zamani, S.; Mahmoodabadi, M.; Yazdanpanah, N.; Farpoor, M. H. Meteorological application of wind speed and direction linked to remote sensing images for the modelling of sand drift potential and dune morphology. *Meteorological Applications* **2020**, *27* (1), e1851.
- Zeng, Z. J.; Tang, C. S.; Cheng, Q.; An, N.; Chen, X. Y.; Luo, Z. Q.; Shi, B. Numerical analysis of environmental influences on evaporation in a cracked soil slope. *Computers and Geotechnics* **2024**, *168*, 106126.
- Zhang, Z. B.; Zhou, H.; Lin, H.; Peng, X. Puddling intensity, sesquioxides, and soil organic carbon impacts on crack patterns of two paddy soils. *Geoderma* **2016**, *262*, 155–164.