

Assessment of Grazing Exclusion as a Strategy for Reducing Physical, Chemical, and Biological Soil Risks in the Rangelands of Sarbisheh Plain, South Khorasan Province

Morteza Saberi^{1*} , Mina Behi², Vahid Karimian³

1. **Corresponding Author**, Associate Professor, Rangeland and Watershed Management Department, Faculty of Water and Soil, University of Zabol, Zabol, Iran

Email: Mortezasaberi@uoz.ac.ir ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1596-9714>

2. MSc Graduate in Range Management, Faculty of Water and Soil, University of Zabol, Zabol, Iran

3. Assistant Professor, Nature Engineering Department, Faculty of Natural Resources, Yasouj University, Yasouj, Iran

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article Article history: Received: 04 June 2025 Revised: 23 July 2025 Accepted: 10 August 2025 Published: 22 December 2026 Keywords: Rangeland management, Soil depth, Soil porosity, Microbial biomass carbon, Soil health indicators.	This study aimed to investigate the effects of livestock exclusion (enclosure) and grazing on the physical, chemical, and biological properties of soil at three depths (0–15, 15–30, and 30–45 cm) in the Sarbisheh rangelands, located in South Khorasan Province, Iran. The study area has an arid climate with an average annual rainfall of approximately 170 mm and is dominated by shrub vegetation. Soil samples were systematically collected from two sites: one enclosed and one grazed. Physical properties (texture, bulk density, porosity, mean particle diameter), chemical properties (organic carbon, organic matter, total nitrogen, phosphorus, potassium, pH, electrical conductivity, lime content, moisture), and biological properties (microbial biomass carbon and nitrogen, basal and stimulated respiration, microbial fraction) were measured. Data were analyzed using a factorial design under a completely randomized framework. Results indicated that both grazing treatment and soil depth had significant effects ($p < 0.01$) on most measured properties. Higher levels of organic carbon, total nitrogen, phosphorus, and biological indicators were observed in the surface soil of the enclosed area, decreasing with depth and in the grazed area. Microbial indices showed strong positive correlations with other soil properties in the enclosed site. Overall, enclosure improved soil structure, fertility, and microbial activity, thereby enhancing rangeland ecosystem function. However, limitations such as the specific climatic conditions, limited sample size, and low vegetation diversity should be considered. Therefore, further studies in ecologically diverse areas are recommended.
How to Cite: Saberi, M. , Behi, M. and Karimian, V. (2026). Assessment of Grazing Exclusion as a Strategy for Reducing Physical, Chemical, and Biological Soil Risks in the Rangelands of Sarbisheh Plain, South Khorasan Province. <i>Journal of Natural Environmental Hazards</i>, 15 (50), 21-40.	
	© The Author/Authors Publisher: University of Sistan and Baluchestan
DOI: 10.22111/jneh.2025.52306.2118	

EXTENDED ABSTRACT

INTRODUCTION

In the current situation, where a large part of the country's rangelands are under the threat of destruction, adopting effective management policies to preserve and restore these valuable resources is an inevitable necessity. Enclosure, as one of the most effective methods of rangeland restoration, requires accurate scientific evaluation in various climatic and soil conditions. On the other hand, recognizing changes in soil properties can provide valuable information for assessing the sustainability and ecological health of the rangeland ecosystem. Therefore, considering the importance of soil properties in evaluating the health of rangeland ecosystems, this study aims to investigate the effect of enclosure and livestock grazing on the physical, chemical, and biological properties of the soil at three different depths in the rangelands of the Sarbisheh Plain in South Khorasan Province.

DATA AND METHODOLOGY

We selected an enclosed area to investigate the effect of enclosure on the physical, chemical, and biological properties of soil in the Sarbisheh Plain rangelands. A similar undergrazed area was considered adjacent to this site for comparison as a control area (free grazing). We attempted to select the control site in such a way that it had the highest similarity to the enclosure site in terms of general topographic conditions and physiographic features. Soil sampling was conducted at three soil depths: 0–15, 15–30, and 30–45 cm. The samples were first sieved with a 2 mm sieve and then divided into two parts. Some parts of the samples were dried in open air to measure the physical and chemical properties (percentage of sand, clay, silt, bulk density, porosity, average particle diameter, organic carbon, organic matter, total nitrogen, available phosphorus, and potassium, acidity, electrical conductivity, percentage of moisture and lime). The other part was stored in a refrigerator containing dry ice and transported to the laboratory for soil biological tests (basal microbial respiration, stimulated respiration, microbial biomass carbon, microbial biomass nitrogen, and microbial contribution) to perform microbial tests on them (Bastani et al., 2023).

RESULTS AND DISCUSSION

The results of the soil's physical properties indicated that the site had a significant effect on most of these properties at the 1% level, including bulk density, porosity, average particle diameter, sand content, and silt content. Also, soil depth had a significant effect on all the studied properties. The comparison of average soil chemical properties between fenced and grazed areas, as well as at different depths, revealed that the highest concentrations of organic carbon and organic matter were observed at the first depth in the fenced area. In contrast, the lowest values of these two indicators were obtained at the third depth of the grazed area. Total nitrogen also had the highest amount at the first depth of the fenced area and generally decreased with increasing depth. Phosphorus had higher values in the fenced area and at shallower depths. Soil acidity varied slightly across all treatments and fell within the neutral to slightly alkaline range. The analysis of variance results for soil biological properties indicated that the region had a significant effect on most biological indicators, including microbial biomass production, microbial biomass carbon, microbial biomass nitrogen, the ratio of carbon to microbial biomass nitrogen, and microbial metabolic efficiency was significant at the 1% level. However, it did not have a significant effect on the respiration rate caused by the addition of substrate. Also, soil depth significantly affected all of these indicators except SIR and MBC, indicating a decrease in microbial activity and density with increasing depth. The correlation results showed there was a strong positive correlation between all soil biological indicators. Rangeland enclosure can impact soil microbial diversity through changes in plant species composition, biomass, soil pH, carbon, and nutrient availability (Zhou et al., 2023). The highest amount of soil microbial biomass, carbon, and nitrogen was observed in the surface layer, indicating a decrease in microbial activity and population in deeper layers. This decrease was more pronounced in the grazed area and

could be due to soil structure degradation, organic matter depletion, and grazing pressure. Previous studies have shown that moderate grazing can lead to increased microbial biomass, but heavy grazing causes it to decrease (Chen et al., 2016; Northup et al., 1999).

CONCLUSION

The results of this study demonstrate that rangeland enclosure, as an effective management strategy, can play a key role in improving the physical, chemical, and biological properties of soil in arid and semi-arid regions. Rangeland enclosure has effectively enhanced the physicochemical and biological properties of soil. The application of enclosure resulted in increased porosity, reduced compaction, improved texture, and increased organic matter and nutrients such as carbon and nitrogen. Also, biological indicators such as microbial respiration, biomass, and microbial nitrogen were more favorable under enclosure conditions. Overall, enclosure serves as a cost-effective management strategy that can significantly enhance soil quality, restore physical structure, improve chemical fertility, and increase soil diversity and biological function. Consequently, it represents a crucial step toward the sustainability of rangeland ecosystems and the long-term utilization of natural resources. It is recommended that the timing, intensity, and duration of enclosure be carefully adjusted in rangeland management planning according to the climatic, soil, and biodiversity characteristics of the region to enhance the effectiveness of this strategy.

ETHICAL CONSIDERATIONS

Conflict of Interest Statement: The authors declare no conflict of interest.

Ethical Statement: This article does not contain any studies with human participants or animals performed by any of the authors.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors gratefully acknowledge the financial support provided by the University of Zabol (Grant code: IR-UOZ-GR-8721) for this research.

REFERENCES

References [in English]

- Bastani, M., Sadeghipour, A., Kamali, N., Zarafshar, M., & Bazoot, S. (2023). How does livestock grazing management affect woodland soil health? *Frontiers in Forests and Global Change*, 6, 1–8.
- Chen, J., Zhou, X., Wang, J., Hruska, T., Shi, W., Cao, J., et al. (2016). Grazing exclusion reduced soil respiration but increased its temperature sensitivity in a meadow grassland on the Tibetan Plateau. *Ecology and Evolution*, 6(3), 675–687. <https://doi.org/10.1002/ece3.1881>
- Northup, B. K., Brown, J. R., & Holt, J. A. (1999). Grazing impacts on the spatial distribution of soil microbial biomass around tussock grasses in a tropical grassland. *Applied Soil Ecology*, 13(3), 259–270. [https://doi.org/10.1016/S0929-1393\(99\)00039-6](https://doi.org/10.1016/S0929-1393(99)00039-6)
- Zhou, W., Li, C., Wang, S., Ren, Z., & Stringer, L. C. (2023). Effects of grazing and enclosure management on soil physical and chemical properties vary with aridity in China's drylands. *Science of The Total Environment*, 877, 162946. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162946>.

مجله علمی پژوهشی مخاطرات محیط طبیعی، دوره ۱۵، شماره ۵۰، شماره پیاپی ۰۴، دی ۱۴۰۵

تحلیل تأثیر قرق به عنوان راهکار کاهش مخاطرات فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک

در مراتع دشت سریش، خراسان جنوبی

مرتضی صابری^{۱*}، مینا بهی^۲، وحید کریمیان^۳

۱. دانشیار، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران (نویسنده مسئول)

ایمیل: Mortezasaberi@uoz.ac.ir / ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1596-9714>

۲. دانش آموخته کارشناسی ارشد مرتعداری، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران

۳. استادیار گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۱۴ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۵/۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۱۹ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۱۰/۰۱ واژه‌های کلیدی: مدیریت مرتع، عمق خاک، تخلخل خاک، کربن زی توده میکروبی، شاخص‌های سلامت خاک.	این مطالعه با هدف بررسی تأثیر قرق و چرای دام بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک در سه عمق (۰-۱۵، ۱۵-۳۰ و ۳۰-۴۵ سانتی‌متر) در مراتع دشت سریش، واقع در استان خراسان جنوبی انجام شد. منطقه مورد مطالعه دارای اقلیم خشک با میانگین بارندگی سالانه حدود ۱۷۰ میلی‌متر و پوشش گیاهی غالب از نوع بوته‌ای است. نمونه‌برداری از دو منطقه قرق و چرا شده به صورت سیستماتیک انجام گرفت و ویژگی‌های فیزیکی (بافت، چگالی ظاهری، تخلخل، میانگین قطر ذرات)، شیمیایی (کربن آلی، ماده آلی، نیتروژن کل، فسفر، پتاسیم، pH، هدایت الکتریکی، آهک، رطوبت) و زیستی (کربن و نیتروژن زی توده میکروبی، تنفس پایه، تنفس برانگیخته، سهم میکروبی خاک) در نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. داده‌ها با استفاده از آزمون فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. نتایج نشان داد که منطقه و عمق خاک اثر معنی‌داری (در سطح ۱ درصد) بر اکثر ویژگی‌ها دارند. در منطقه قرق، مقادیر کربن آلی، نیتروژن کل، فسفر و شاخص‌های زیستی در لایه سطحی بیشتر بود که در اعماق پایین‌تر و منطقه چرای دام کاهش یافتند. شاخص‌های میکروبی در منطقه قرق با سایر ویژگی‌های خاک همبستگی مثبت و معناداری نشان دادند. به طور کلی، قرق با بهبود ساختار، حاصلخیزی و فعالیت زیستی خاک، موجب ارتقاء عملکرد اکوسیستم مرتعی می‌شود و می‌تواند به عنوان راهکاری مؤثر و کم هزینه در مدیریت پایدار مراتع خشک و نیمه خشک مدنظر قرار گیرد. با این حال، شرایط اقلیمی خاص، تعداد محدود نمونه‌ها و تنوع کم پوشش گیاهی از محدودیت‌های این پژوهش محسوب می‌شوند. از این رو، انجام مطالعات تکمیلی در مناطق با شرایط اکولوژیکی متنوع تر توصیه می‌شود.

استناد: صابری، مرتضی، بهی، مینا و کریمیان، وحید. (۱۴۰۵). تحلیل تأثیر قرق به عنوان راهکار کاهش مخاطرات فیزیکی، شیمیایی و زیستی

خاک در مراتع دشت سریش، خراسان جنوبی. مخاطرات محیط طبیعی، ۱۵ (۵۰)، ۴۰-۲۱.

ناشر: دانشگاه سیستان و بلوچستان

© نویسنده / نویسندگان

DOI: 10.22111/jneh.2025.52306.2118



مقدمه

مراعات با پوشش حدود ۴۰ درصد از اراضی غیر یخی زمین نقشی حیاتی در پایداری اکوسیستم‌های جهانی دارند (پترمان و بوژدیگان^۱، ۲۰۲۱). این اکوسیستم‌ها مجموعه گسترده‌ای از خدمات زیست‌محیطی از جمله حفاظت از تنوع زیستی، تشکیل و حفاظت خاک، تنظیم آب و چرخه مواد مغذی را فراهم می‌سازد (بنگسون^۲ و همکاران، ۲۰۱۹؛ سولنبرگر^۳ و همکاران، ۲۰۱۹؛ وانگ^۴ و همکاران، ۲۰۲۲). علاوه بر این اکوسیستم‌های مرتعی سهمی معادل ۳۴ درصد از ذخایر کربن خشکی را به خود اختصاص داده و در کاهش اثرات تغییر اقلیم نقش مؤثری ایفا می‌کنند (بای و کوتروفو^۵، ۲۰۲۲؛ لیو^۶ و همکاران، ۲۰۲۳). با وجود این مزایا، تخریب مراعات یکی از چالش‌های زیست‌محیطی مهم در سطح جهانی به شمار می‌رود. تخمین‌ها نشان می‌دهد که حدود ۴۹ درصد از مراعات جهان دچار درجاتی از تخریب شدید شده‌اند که این امر موجب کاهش عملکرد اکوسیستم و از بین رفتن تنوع زیستی شده است (بارگت^۷ و همکاران، ۲۰۲۱). در ایران مراعات حدود ۸۴ میلیون هکتار را در بر می‌گیرند و رویشگاه بیش از ۷۰۰۰ گونه گیاهی است (کریمیان و بارانی، ۱۴۰۳). در دهه‌های اخیر عوامل متعددی مانند تغییر کاربری اراضی، خشکسالی، مالکیت‌های غیر متمرکز و چرای بی‌رویه دام، موجبات تخریب گسترده پوشش گیاهی و خاک مراعات کشور را فراهم کرده‌اند (اکبرزاده و نیکو، ۱۴۰۲؛ جنیدی و همکاران، ۱۴۰۴).

مطالعات پیشین نشان داده‌اند که سلامت و پایداری اکوسیستم‌های مرتعی به شدت تحت تأثیر مدیریت مرتع به‌ویژه شدت چرا و اعمال قرق قرار دارد (هیو^۸ و همکاران، ۲۰۱۶). چرای مفرط یکی از مهم‌ترین عوامل تخریب مراعات است که با کاهش تنوع گیاهی و زیست‌توده، به افت کیفیت خاک و کارکردهای اکوسیستم منجر می‌شود (ویو^۹ و همکاران، ۲۰۲۱). از طرفی احیای خاک‌های تخریب‌شده امری پیچیده، زمان‌بر و پرهزینه است و گاه ممکن است بازگشت‌ناپذیر باشد (شیدای کرکچ و همکاران، ۱۳۹۸). در نتیجه اعمال سیاست‌های مدیریتی مؤثر همچون قرق مراعات به‌عنوان ابزاری برای بازسازی عملکرد اکوسیستم، بیش از پیش اهمیت یافته است (محمدی‌سامانی و همکاران، ۱۴۰۱).

قرق مراعات، با حذف چرای دام از نواحی مشخص، به‌عنوان روشی کارآمد برای بازیابی پوشش گیاهی، بهبود خواص خاک، افزایش ترسیب کربن و ارتقاء کیفیت اکولوژیکی مورد توجه قرار گرفته است (سان^{۱۰} و همکاران، ۲۰۲۱؛ کیو^{۱۱} و همکاران، ۲۰۲۴؛ ژان^{۱۲} و همکاران، ۲۰۲۰). اثربخشی این روش به شدت وابسته به شرایط بوم‌شناختی، اقلیم، ویژگی‌های خاک و مدت زمان قرق است و نمی‌توان نتایج آن را به تمامی مناطق تعمیم داد. مطالعه ویژگی‌های خاک به‌عنوان شاخصی برای ارزیابی سلامت اکوسیستم مرتعی، از اهمیت زیادی برخوردار است. با توجه به گستردگی و پیچیدگی ویژگی‌های خاک، انتخاب مجموعه‌ای از شاخص‌های کلیدی فیزیکی، شیمیایی و زیستی که نسبت به

1 Petermann & Buzhdygan

2 Bengtsson

3 Sollenberger

4 Wang

5 Bai & Cotrufo

6 Liu

7 Bardgett

8 Hu

9 Wu

10 Sun

11 Qu

12 Zhan

تنش‌های محیطی پاسخ‌گوی سریع باشند، امری ضروری است (حسن^۱ و همکاران، ۲۰۲۰؛ جنیدی و همکاران، ۱۴۰۴). قرق مراتع، در دهه‌های اخیر به طور فزاینده مورد توجه قرار گرفته است (ژان و همکاران، ۲۰۲۳؛ یو^۲ و همکاران، ۲۰۲۱). یافته‌های متناقضی در زمینه تأثیر قرق بر ویژگی‌های خاک و تنوع میکروبی گزارش شده‌اند. برخی مطالعات افزایش معنی‌دار در تنوع میکروبی (وانگ^۳ و همکاران، ۲۰۱۹؛ سو^۴ و همکاران، ۲۰۲۳)، و برخی دیگر کاهش یا تغییرات ناچیز را نشان داده‌اند (گوو^۵ و همکاران، ۲۰۲۳). در واقع، جهت و میزان پاسخ تنوع میکروبی به قرق به شدت تحت تأثیر مدت زمان قرق، گروه میکروبی مورد مطالعه، نوع مرتع، عمق خاک و شرایط آب و هوایی حاکم است (پنگ^۶ و همکاران، ۲۰۲۱). بنابراین، درک جامع از تأثیر قرق بر ویژگی‌های خاک و به ویژه تنوع میکروبی، مستلزم در نظر گرفتن این متغیرهای کلیدی و انجام تحقیقات دقیق و جامع در شرایط مختلف اکولوژیکی است.

مطالعه‌ای که توسط چن^۷ و همکاران (۲۰۲۲) انجام شد، اثرات مدیریت‌های متفاوت قرق، چرای دام دو بار در سال، و چرا در مناطق حصار شده را بر خصوصیات خاک در دو عمق (۳۰-۰ سانتی‌متر و ۱۰۰-۳۰ سانتی‌متر) بررسی نمود. یافته‌های آن‌ها نشان داد که میزان بیومس سطحی و عمقی گیاهان مرتعی و همچنین نسبت ریشه به ساقه آن‌ها، اثرات مثبت و معناداری بر کربن، نیتروژن و فسفر خاک دارد. محققان همچنین اظهار داشتند که نوع مدیریت مراتع، با تأثیرگذاری بر تنوع و درصد پوشش گیاهی، می‌تواند اثرات معناداری بر خصوصیات خاک داشته باشد. در واقع، تراکم و انبوهی پوشش گیاهی به عنوان یک عامل حفاظتی برای خاک عمل می‌کند، پوشش گیاهی متراکم از برخورد مستقیم قطرات باران با سطح خاک جلوگیری کرده و در نتیجه، فرسایش خاک را کاهش می‌دهد. محققین داخلی نیز پژوهش‌های متعددی در زمینه اثر قرق بر ویژگی‌های خاک و پوشش گیاهی انجام داده‌اند. خطیبی و فراهی (۱۴۰۳) تفاوت‌های قابل توجهی را در هدایت الکتریکی، اسیدیته، ماده آلی و پایداری خاکدانه بین مناطق قرق و چرا گزارش کردند. شیدای کرکچ و همکاران (۱۳۹۸) بهبود معنی‌دار در ساختار خاک و پایداری خاکدانه‌ها را پس از قرق مشاهده کردند. در مقابل، غنچه‌پور و همکاران (۱۴۰۲) تفاوت معنی‌داری بین مناطق قرق و چرا از نظر بسیاری از خصوصیات خاک مشاهده نکردند. همچنین در مطالعاتی دیگر، تأثیر مثبت قرق بر غلظت عناصر غذایی و بهبود کیفیت خاک در مراتع گزارش شده است (محمدی‌سامانی و همکاران، ۱۴۰۱؛ حشمتی و قیطوری، ۱۴۰۰؛ قبادی و اخگری، ۱۳۹۹).

در شرایط فعلی که بخش عمده‌ای از مراتع کشور با تهدید تخریب مواجه است، اتخاذ سیاست‌های مدیریتی مؤثر برای حفظ و بازسازی این منابع ارزشمند، ضرورتی اجتناب‌ناپذیر است. قرق به عنوان یکی از مؤثرترین روش‌های احیای مراتع، نیازمند ارزیابی علمی دقیق در شرایط اقلیمی و خاکی گوناگون است. از طرفی، شناخت تغییرات در ویژگی‌های خاک می‌تواند اطلاعات ارزشمندی برای ارزیابی پایداری و سلامت اکولوژیکی اکوسیستم مرتعی فراهم آورد. بنابراین با توجه به اهمیت ویژگی‌های خاک در ارزیابی سلامت اکوسیستم‌های مرتعی، هدف این پژوهش

1 Hasan

2 Yu

3 Wang

4 Su

5 Guo

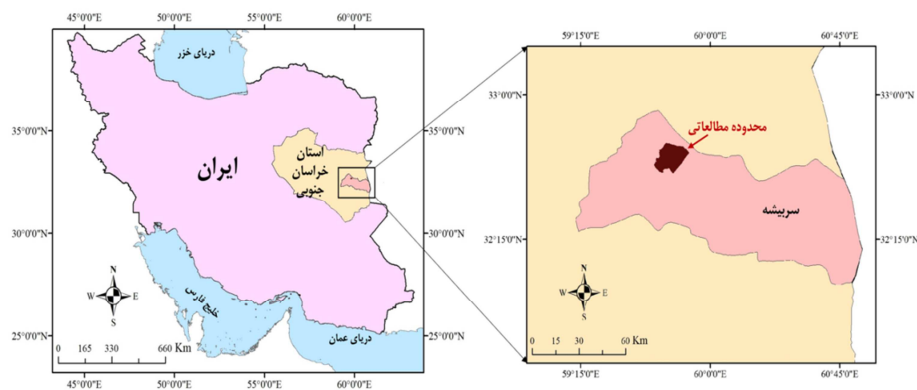
6 Peng

7 Chen

بررسی تأثیر قرق و چرای دام بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک در سه عمق مختلف در مراتع دشت سربیشه در استان خراسان جنوبی است.

داده‌ها و روش‌ها

دشت سربیشه در شمال شهرستان سربیشه واقع شده و فاصله آن تا شهرستان بیرجند مرکز استان خراسان جنوبی، حدود ۶۰ کیلومتر است. این دشت در جهت جنوب شرقی شهرستان بیرجند قرار دارد. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه، بین طول ۳۹° ۵۹° تا ۳۹° ۳۲' و ۵۰° ۵۹' تا ۴۶° ۳۲' درجه عرض جغرافیایی قرار گرفته است. از نظر اقلیمی، منطقه دارای آب و هوای سرد و خشک بوده و متوسط بارندگی سالیانه آن حدود ۱۹۴ میلی‌متر است. همچنین ارتفاع آن از سطح دریا در حدود ۱۸۳۰ متر می‌باشد.



شکل ۱: موقعیت منطقه مورد مطالعه در استان و کشور

نمونه‌برداری خاک

برای بررسی اثر قرق بر خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک محدوده‌ای قرق‌شده در مراتع دشت سربیشه انتخاب شد. به منظور مقایسه، منطقه‌ای مشابه در مجاورت این سایت که تحت چرا قرار داشت، به عنوان منطقه شاهد (چرای آزاد) در نظر گرفته شد. تلاش شد انتخاب سایت شاهد به گونه‌ای باشد که از نظر شرایط کلی توپوگرافی و ویژگی‌های فیزیوگرافی، بیشترین تشابه را با سایت قرق داشته باشد. در هر یک از دو منطقه (قرق و چرای آزاد)، چهار منطقه همگن با شرایط فیزیوگرافی مشابه شناسایی شد. در هر یک از این مناطق، پنج نمونه خاک برداشت گردید؛ به طوری که یک نمونه از مرکز و چهار نمونه دیگر به صورت الگوی بعلاوه (+) در اطراف آن برداشت شدند. نمونه‌برداری از سه عمق خاک شامل ۰-۱۵، ۱۵-۳۰ و ۳۰-۴۵ سانتی‌متر انجام گرفت. نمونه‌های خاک برداشت‌شده از مناطق همگن هر سایت با یکدیگر ترکیب شده و یک نمونه مرکب به دست آمد. این نمونه‌ها ابتدا با الک ۲ میلی‌متری غربال شده و سپس به دو بخش تقسیم شدند. بخشی از نمونه‌ها برای اندازه‌گیری خصوصیات فیزیکی و شیمیایی، در هوای آزاد خشک شدند. بخش دیگر برای انجام آزمایش‌های زیستی خاک، در یخچال حاوی یخ خشک نگهداری و به آزمایشگاه منتقل گردید تا آزمایش‌های میکروبی بر روی آن‌ها انجام شود (کمالی^۱ و همکاران، ۲۰۲۲؛ باستانی^۲ و همکاران، ۲۰۲۳).

1 Kamali

2 Bastani

نمونه برداری خاک در پلات‌های (سه عدد پلات برای هر درجه فرسایش) با ابعاد ۱×۱ مترمربع (با توجه به این که محدوده نمونه برداری عمدتاً با گونه‌های گراس Hordum.sp به شکل مترکم پوشیده شده بودند این ابعاد در نظر گرفته شد) در طول هر ترانسکت و در هر کدام از چهار وضعیت فرسایش انجام گرفت. تعداد پلات‌ها ۲۴ عدد بود (۲ شیب (ترانسکت) × ۴ درجه فرسایش × ۳ پلات). در هر پلات سه نمونه خاک از عمق ۰-۳۰ سانتی‌متری برداشت شد. نمونه‌های خاک هر پلات با هم ترکیب شده تا یک نمونه مرکب به دست آمد. بخشی از نمونه‌های خاک برای اندازه‌گیری خصوصیات زیستی خاک در فریزر در دمای پایین (۲۵- درجه سانتی‌گراد) به مدت یک هفته نگهداری شدند. از ذوب نمونه‌ها قبل از اندازه‌گیری خصوصیات مدنظر جلوگیری شد. مابقی نمونه‌ها بعد از خشک شدن و عبور از الک برای اندازه‌گیری سایر پارامترهای مورد نظر آماده شدند.

خصوصیات فیزیکی-شیمیایی خاک

در این مطالعه، برای بررسی ویژگی‌های فیزیکی، بافت خاک با روش هیدرومتری تعیین شد و درصد شن، رس و سیلت با استفاده از مثلث بافت خاک (شومان^۱ و همکاران، ۲۰۰۲) محاسبه گردید. وزن مخصوص ظاهری خاک به روش کلوخه‌ای، تخلخل از طریق محاسبه بر اساس چگالی حجمی و میانگین قطر ذرات با استفاده از الک و دستگاه شیکر اندازه‌گیری شد (چن و همکاران، ۲۰۲۲). برای اندازه‌گیری خصوصیات شیمیایی، کربن آلی و ماده آلی با روش اکسیداسیون دی‌کرومات به شیوه والکی و بلاک و نیتروژن کل با استفاده از روش کج‌لدال تعیین گردید. فسفر قابل‌دسترس خاک با روش اولسن و پتاسیم قابل‌دسترس با استفاده از استات آمونیوم خنثی استخراج و توسط دستگاه جذب اتمی اندازه‌گیری شد. میزان اسیدیته و هدایت الکتریکی با روش پتانسیومتری، رطوبت خاک با روش وزنی، و میزان آهک خاک به روش تیتراسیون تعیین گردید (باستانی و همکاران، ۲۰۲۳؛ کمالی و همکاران، ۲۰۲۲؛ کیو و همکاران، ۲۰۲۰).

خصوصیات زیستی خاک

برای ارزیابی خصوصیات زیستی خاک، از روش‌های استاندارد و مرجع استفاده شد. تنفس پایه میکروبی با روش تیتراسیون و تنفس برانگیخته به روش انکوباسیون اندازه‌گیری شد. کربن زیست‌توده میکروبی با استفاده از روش تدخین-استخراج و نیتروژن زیست‌توده میکروبی از طریق روش تدخین با کلروفرم و انکوباسیون اندازه‌گیری گردید. همچنین، برای محاسبه سهم میکروبی، نسبت کربن زیست‌توده میکروبی به کربن آلی کل مورد استفاده قرار گرفت (چن و همکاران، ۲۰۲۲).

تجزیه و تحلیل داده‌ها

پس از انجام آنالیزهای آزمایشگاهی بر روی نمونه‌ها، نرمال بودن داده‌ها با استفاده از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف (Kolmogorov-Smirnov) و همگنی واریانس‌ها با آزمون لوین (Levene) بررسی شد. سپس، تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها در قالب طرح کاملاً تصادفی و با استفاده از آزمون فاکتوریل در نرم‌افزار SPSS انجام گرفت. برای بررسی روابط بین پارامترهای مورد مطالعه و ضریب همبستگی از نرم‌افزار R استفاده گردید.

نتایج و بحث

¹ Schuman

تأثیر قرق بر خصوصیات فیزیکی خاک

تجزیه واریانس خصوصیات فیزیکی خاک نشان داد که اثر منطقه بر بیشتر ویژگی‌ها از جمله جرم مخصوص ظاهری، تخلخل، میانگین قطر ذرات، شن و سیلت در سطح ۱ درصد معنی‌دار بود، اما بر میزان رس اثر معنی‌داری نداشت. همچنین، عمق خاک تأثیر معنی‌داری بر تمام ویژگی‌های مورد بررسی داشت، به‌ویژه بر تخلخل، رس، و سیلت که نشان‌دهنده تغییرات فیزیکی قابل توجه در لایه‌های مختلف خاک است. اثر متقابل منطقه و عمق نیز بر اغلب ویژگی‌ها از جمله جرم مخصوص ظاهری، میانگین قطر ذرات، شن، رس و سیلت معنی‌دار بود، در حالی که اثر آن بر تخلخل معنی‌دار نشد (جدول، ۱).

جدول ۱: تجزیه واریانس خصوصیات فیزیکی خاک

متغیر	درجه آزادی	میانگین مربعات	F
منطقه	جرم مخصوص ظاهری	۰/۴۹	۵۱۱۵/۱**
	تخلخل	۶۳۰/۳	۷۲۰/۴**
	میانگین قطر ذرات	۲/۰۵	۲۶۵۲/۲**
	شن	۸۸/۹	۱۰۵/۴**
	رس	۰/۱۵	۰/۴ ^{ns}
عمق	سیلت	۸۳/۶	۱۳۵/۰**
	جرم مخصوص ظاهری	۰/۰۲	۲۹۰/۲**
	تخلخل	۱۳۸/۷	۱۵۸/۶**
	میانگین قطر ذرات	۰/۲۳	۲۹۷/۸**
	شن	۲۱۸/۸	۲۵۹/۳**
منطقه* عمق	رس	۸۶/۲	۲۳۴/۶**
	سیلت	۲۹/۶	۴۷/۹**
	جرم مخصوص ظاهری	۰/۰۰۲	۲۲/۰۸**
	تخلخل	۰/۱۲۵	۰/۱۴ ^{ns}
	میانگین قطر ذرات	۰/۰۰۴	۵/۲*
خطا	شن	۶/۴۳	۷/۶**
	رس	۲/۵۰	۶/۸**
	سیلت	۳/۳۲	۵/۳*
	جرم مخصوص ظاهری	۹/۵۸	-
	تخلخل	۰/۸۷	-
	میانگین قطر ذرات	۰/۰۰۱	-
	شن	۰/۸۴	-
	رس	۰/۳۶	-
	سیلت	۰/۶۱	-

**وجود تفاوت معنی‌دار بین تیمارها در سطح ۱٪، *وجود تفاوت معنی‌دار بین تیمارها در سطح ۵٪، ^{ns}عدم تفاوت معنی‌دار.

نتایج مقایسه میانگین خصوصیات فیزیکی خاک در دو منطقه قرق و چراشده و در سه عمق مختلف، بیانگر تفاوت‌های معنی‌دار در ویژگی‌های مورد بررسی است. در هر دو منطقه، جرم مخصوص ظاهری با افزایش عمق افزایش یافته است؛ به‌طوری‌که بیشترین مقدار در عمق سوم منطقه چراشده (۱/۵۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب) و کمترین مقدار در عمق اول منطقه قرق (۱/۱۴) مشاهده شد. تخلخل خاک در جهت معکوس جرم مخصوص ظاهری تغییر کرد؛ یعنی با افزایش عمق کاهش یافت، که با ویژگی فیزیکی خاک‌های متراکم‌تر در عمق‌های پایین سازگار است. بیشترین تخلخل در عمق اول منطقه قرق (۴۱ درصد) و کمترین آن در عمق سوم منطقه چراشده (۲۲ درصد) مشاهده شد. میانگین قطر ذرات نیز با عمق کاهش یافت و در منطقه چراشده نسبت به منطقه قرق، در تمامی عمق‌ها کمتر بود. در مورد درصد شن، بیشترین مقدار در عمق اول منطقه چراشده (۶۴ درصد) و کمترین آن در عمق سوم منطقه قرق (۴۹ درصد) ثبت شد. در مقابل، درصد رس و سیلت در منطقه قرق به‌طور نسبی بیشتر از

چرا شده بوده و در عمق سوم قرق به بیشترین مقدار خود (رس: ۱۹ درصد، سیلت: ۳۱ درصد) رسید (جدول، ۲). بر اساس نتایج به دست آمده در مطالعه حاضر، موقعیت مکانی و عمق خاک نقش تعیین کننده ای در تغییرپذیری خصوصیات فیزیکی خاک ایفا می کنند. در هر دو منطقه قرق و چرا شده و در سه عمق مختلف، جرم مخصوص ظاهری با افزایش عمق، افزایش یافته است. این روند افزایشی، بیانگر فشردگی بیشتر خاک در لایه های زیرین به دلیل فشار لایه های بالایی و کاهش میزان مواد آلی در عمق است. مطالعه شیدای کرکچ و همکاران (۱۳۹۸) نشان داد که پایداری خاکدانه در لایه سطحی بیشتر از لایه های عمقی است. مطالعات مختلف، اثرات مستقیم و غیرمستقیم شدت چرای دام بر ویژگی های خاک را آشکار کرده اند. لگدمال شدن ناشی از فعالیت دام در طول دوره چرا می تواند منجر به فشردگی خاک شده و در نتیجه، ظرفیت نگهداری آب، میزان هوادهی و شرایط اکسایش-کاهش خاک را به طور قابل توجهی تغییر دهد (لیو و همکاران، ۲۰۱۵؛ کافمن و همکاران، ۲۰۱۳؛ لیو و همکاران، ۲۰۱۵). در مطالعه حاضر تخلخل خاک در جهت عکس جرم مخصوص ظاهری تغییر کرده است؛ به طوری که با افزایش عمق، میزان تخلخل کاهش یافته است. این ویژگی با رفتار فیزیکی خاک های تراکم تر در لایه های عمیق تر همخوانی دارد. همچنین، میانگین قطر ذرات در منطقه چرا شده در تمام عمق ها کمتر از منطقه قرق بوده است؛ که نشان دهنده وجود خاک ریزدانه تر و با بافت سنگین تر در منطقه تحت چرا می باشد. یافته ها نشان می دهند که منطقه قرق، نسبت به منطقه چرا شده، دارای خاکی با تخلخل بیشتر، ذرات ریزتر و درصد بالاتری از رس و سیلت است. در حالی که منطقه چرا شده از خاکی با بافت درشت تر، تخلخل کمتر و تراکم بالاتر برخوردار است. این تفاوت ها احتمالاً ناشی از فشار ناشی از چرای دام و تخریب فیزیکی خاک در منطقه چرا شده است که منجر به کاهش کیفیت ساختاری خاک در آن منطقه شده است. مطالعات پیشین نیز تأیید کرده اند که قرق می تواند موجب بهبود کیفیت خاک در اکوسیستم های مرتعی شود (ژانگ و همکاران، ۲۰۲۲؛ کیو و همکاران، ۲۰۲۴). (در این راستا چرای مفرط می تواند اثرات مخربی از جمله؛ فشردگی بیش از حد سطح خاک، کاهش نفوذپذیری، ایجاد شرایط نامناسب برای رشد ریشه گیاهان، اختلال در تبادلات گازی، کاهش فعالیت زیستی موجودات خاکزی، افزایش فرسایش آبی و بادی و در نهایت، از بین رفتن تدریجی خاک شود (خطیبی و فراهی، ۱۴۰۳).

جدول ۲: مقایسه میانگین خصوصیات فیزیکی

منطقه	عمق	جرم مخصوص	تخلخل	میانگین قطر	شن	رس	سیلت
قرق	اول	۱/۱۴ ^f	۴۱ ^a	۱/۴۳ ^a	۵۸ ^b	۱۴ ^c	۲۷ ^c
	دوم	۱/۲۳ ^e	۳۸ ^b	۱/۲۳ ^b	۵۲ ^d	۱۸ ^b	۲۹ ^b
	سوم	۱/۲۹ ^d	۳۳ ^c	۱/۱۳ ^c	۴۹ ^e	۱۹ ^a	۳۱ ^a
چرا شده	اول	۱/۴۶ ^c	۳۱ ^d	۰/۸۶ ^d	۶۴ ^a	۱۳ ^d	۲۲ ^d
	دوم	۱/۵۱ ^b	۲۷ ^e	۰/۶۷ ^e	۵۴ ^c	۱۸ ^b	۲۶ ^c
	سوم	۱/۵۵ ^a	۲۲ ^f	۰/۴۹ ^f	۵۳ ^d	۲۰ ^a	۲۶ ^c

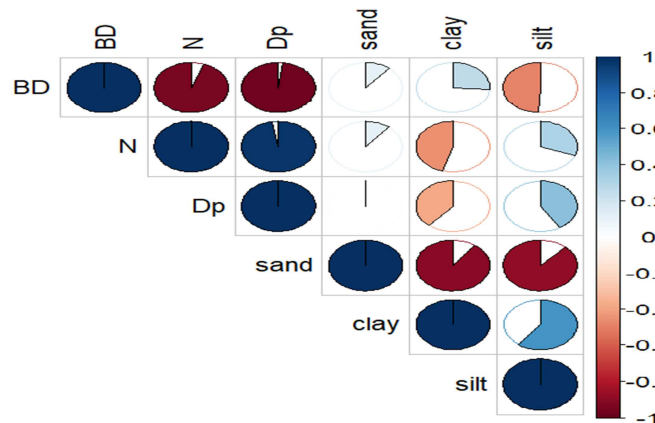
حروف متفاوت در هر ستون نشان دهنده تفاوت معنی دار در هر سایت می باشد.

نتایج تحلیل همبستگی پیرسون (جدول، ۳)، میان متغیرهای فیزیکی خاک (جدول، ۳) نشان داد که بین چگالی ظاهری (BD)، تخلخل (DP) و نیتروژن خاک (N) همبستگی های قوی و معناداری وجود دارد، به طوری که چگالی ظاهری با نیتروژن ($r = -0.94$) و با تخلخل ($r = -0.97$) همبستگی منفی قوی داشت. تخلخل و نیتروژن نیز همبستگی مثبت بالایی ($r = 0.97$) نشان دادند که بیانگر نقش ساختار فیزیکی خاک در پشتیبانی از فرآیندهای تغذیه ای است. این یافته ها بیانگر آن است که افزایش تراکم خاک می تواند به کاهش ظرفیت نگهداری هوا و مواد مغذی منجر شود.

همچنین، همبستگی مثبت بین تخلخل و نیتروژن بر نقش ساختار فیزیکی خاک در پشتیبانی از فرآیندهای تغذیه‌ای دلالت دارد. همچنین درصد رس و سیلت با درصد شن رابطه معکوس قوی داشتند (به ترتیب $r = -0/90$ و $r = -0/88$)، که این هم‌راستا با ویژگی‌های بافتی خاک است. درصد رس با نیتروژن همبستگی متوسط مثبت ($r = 0.45$) نشان داد (شکل، ۲). رابطه مثبت میان درصد رس و نیتروژن احتمالاً به دلیل ظرفیت بالاتر خاک‌های سنگین‌تر در نگهداری مواد مغذی قابل توضیح است. نتایج مطالعه خطی و فراهی (۱۴۰۳) نشان از همبستگی مثبت بین ماده آلی و پایداری خاکدانه، و نیز بین اسیدیته و هدایت الکتریکی دارد. نتایج ویژگی‌های خاک در شرایط چرا و قرق مطالعه حاضر بیانگر این مطلب است که، ساختار فیزیکی خاک نقش کلیدی در کنترل فرآیندهای بیوشیمیایی و ذخیره مواد مغذی ایفا می‌کند، و قرق می‌تواند به‌عنوان یک راهبرد مؤثر در جهت ارتقاء کیفیت خاک و پایداری اکوسیستم‌های مرتعی مورد استفاده قرار گیرد.

جدول ۳: نتایج تجزیه ضریب همبستگی بین متغیرهای فیزیکی خاک

	BD	N	DP	Sand	Clay	Silt
BD	۱					
N	-۰/۹۴	۱				
DP	-۰/۹۷	۰/۹۷	۱			
Sand	۰/۱	۰/۱۰	۰/۰۰۵	۱		
Clay	۰/۲۵	۰/۴۵	-۰/۳۸	-۰/۹۰	۱	
Silt	-۰/۴۹	۰/۳۰	۰/۴۱	-۰/۸۸	۰/۵۹	۱



شکل ۲: همبستگی بین متغیرهای فیزیکی خاک

تأثیر قرق بر خصوصیات شیمیایی خاک

نتایج تجزیه واریانس خصوصیات شیمیایی خاک نشان داد که اثر منطقه بر تمام ویژگی‌های شیمیایی به‌جز اسیدیته در سطح ۱ درصد معنی‌دار بود، به‌ویژه برای کربن آلی، ماده آلی، آهک، نیتروژن کل و فسفر. همچنین، اثر عمق خاک بر اکثر ویژگی‌ها از جمله کربن آلی، ماده آلی، آهک، نیتروژن کل، پتاسیم و هدایت الکتریکی نیز در سطح معنی‌داری بالا ظاهر شد، در حالی که تنها فسفر در عمق‌های مختلف تفاوت معنی‌داری نداشت. اثر متقابل منطقه و عمق نیز برای بیشتر ویژگی‌ها از جمله کربن آلی، نیتروژن کل، فسفر و هدایت الکتریکی معنی‌دار بود، که نشان‌دهنده

وابستگی تغییرات شیمیایی خاک به ترکیب هم زمان مکان و عمق است. اسیدیته تنها ویژگی بود که در بیشتر شرایط تفاوت معنی داری نداشت (جدول، ۴). این نتایج نشان می دهد که وضعیت شیمیایی خاک به شدت تحت تأثیر موقعیت جغرافیایی و عمق خاک قرار دارد.

جدول ۴: تجزیه واریانس خصوصیات شیمیایی خاک

متغیر	درجه آزادی	میانگین مربعات	F
منطقه	۱	۱/۱۳	۶۰۰/۰۹**
	۱	۱/۹۲	۱۹۸/۱**
	۱	۶/۹۹	۹۸/۹**
	۱	۰/۱۳	۱۵۷/۳**
	۱	۱/۱۹	۴۳۵/۷**
	۱	۱۶/۶۶	۶/۸*
	۱	۰/۰۷	۱۷۷/۲**
	۱	۰/۰۰۸	۱/۸ ^{ns}
عمق	۲	۰/۵۷	۳۰۶/۵**
	۲	۲/۱	۲۱۶/۳**
	۲	۵/۱	۷۳/۰۳**
	۲	۰/۱۵	۱۸۴/۴**
	۲	۰/۰۰۷	۲/۴ ^{ns}
	۲	۵۳۰/۱	۲۱۶/۸**
	۲	۰/۰۴	۱۱۳/۴**
	۲	۰/۰۱	۴/۶*
منطقه* عمق	۲	۰/۱۳	۷۱**
	۲	۰/۰۷	۷/۵**
	۲	۰/۶۵	۹/۲**
	۲	۰/۰۱	۲۰/۸**
	۲	۰/۰۳	۱۲/۴**
	۲	۱۱/۱	۴/۵*
	۲	۰/۰۰۴	۱۱/۱**
	۲	۰/۰۰۵	۱/۳ ^{ns}
خطا	۱۸	۰/۰۰۲	-
	۱۸	۰/۰۱	-
	۱۸	۰/۰۷	-
	۱۸	۰/۰۰۱	-
	۱۸	۰/۰۰۳	-
	۱۸	۲/۴	-
	۱۸	۰۰۰	-
	۱۸	۰/۰۰۴	۰

**وجود تفاوت معنی دار بین تیمارها در سطح ۱٪، *وجود تفاوت معنی دار بین تیمارها در سطح ۵٪، ^{ns}عدم تفاوت معنی دار.

نتایج مقایسه میانگین خصوصیات شیمیایی خاک در مناطق قرق و چرا شده و در عمق های مختلف نشان داد که بیشترین مقدار کربن آلی و ماده آلی در عمق اول منطقه قرق مشاهده شد، که بیانگر تجمع بیشتر مواد آلی در سطح خاک تحت مدیریت حفاظتی است. یافته های پژوهش های پیشین نیز مؤید این نتایج هستند (شیدای کرکج و

همکاران، ۱۳۹۸؛ محمدی سامانی و همکاران، ۱۴۰۱). کاهش مقدار کربن و ماده آلی در منطقه چراشده احتمالاً به دلیل تخریب پوشش گیاهی و فعالیت‌های چرای است که با یافته‌های Chen و همکاران (۲۰۲۲) نیز همخوانی دارد. نتایج نشان داد، منطقه قرق در مقایسه با منطقه چراشده از نظر ویژگی‌های شیمیایی به‌ویژه در لایه‌های سطحی در وضعیت بهتری قرار دارد. در مقابل، کمترین مقادیر این دو شاخص در عمق سوم منطقه چراشده به دست آمد. آهک در منطقه چراشده و به‌ویژه در عمق سوم بیشترین مقدار را داشت، در حالی که در قرق مقدار آن کمتر بود. نیتروژن کل نیز در عمق اول منطقه قرق بیشترین مقدار را داشت و به‌طور کلی با افزایش عمق کاهش یافت. فسفر در منطقه قرق و در عمق‌های کمتر، مقادیر بالاتری داشت. هدایت الکتریکی و پتاسیم نیز در منطقه قرق نسبت به چرا شده کمتر بودند. اسیدیت خاک در همه تیمارها تفاوت اندکی داشت و در محدوده خنثی تا کمی قلیایی قرار داشت (جدول ۵). نتایج مطالعه‌ی قبادی و اختری (۱۳۹۹) در حوضه گنبد شهرستان همدان نشان داد که غلظت پتاسیم و روی در منطقه قرق و غلظت منیزیم در منطقه چراشده به‌طور معنی‌داری افزایش یافته است. همچنین، خاک منطقه چرا دارای pH پایین‌تری بود که با یافته‌های خطیبی و فراهی (۱۴۰۳) همخوانی دارد. به نظر می‌رسد یکی از عوامل اسیدی شدن خاک، فصولات دامی باشد. در همین زمینه، یاتس^۱ و همکاران (۲۰۲۰) گزارش کردند که pH خاک در مناطقی با شدت چرای کمتر، بالاتر از مناطقی با چراهای سنگین است. در پژوهش محمدی سامانی و همکاران (۱۴۰۱)، مشخص شد که بیشترین میزان کربن، نیتروژن، فسفر و پتاسیم مربوط به مناطق تحت مدیریت مرتعی بوده و کمترین مقادیر این عناصر در مناطق تحت چرای دام مشاهده شده است. همچنین، در این مطالعه افزایش اسیدیت و هدایت الکتریکی در مناطق چراشده به‌طور معناداری گزارش شد. با این حال، یافته‌های غنچه‌پور و همکاران (۱۴۰۲) در استان کرمان، که به مقایسه‌ی تنوع پوشش گیاهی و خصوصیات خاک بین دو منطقه قرق و چرا پرداختند، نشان داد که اختلاف معنی‌داری بین متغیرهایی نظیر درصد رس، سیلت، شن، هدایت الکتریکی، اسیدیت، آهک، کلسیم، منیزیم و سدیم بین دو منطقه مشاهده نشد. در حشمتی و قیطوری (۱۴۰۰) در زمینه نقش قرق بلندمدت در بهبود ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و پایداری آن در مراتع ییلاقی دالاهو (کرمانشاه) مشخص شد که اجرای پنج سال قرق مداوم منجر به بهبود قابل توجه کیفیت و پایداری خاک می‌شود. وجود برخی تفاوت‌ها و تضادها در نتایج مطالعات مختلف می‌تواند به عواملی همچون شرایط اقلیمی، نوع خاک، مدت زمان اعمال قرق، شدت چرای پیشین و تنوع گیاهی مناطق مورد بررسی نسبت داده شود. این موضوع اهمیت تحلیل‌های چند بعدی را در مطالعات منابع طبیعی و مدیریت مراتع نشان می‌دهد.

جدول ۵: مقایسه میانگین خصوصیات شیمیایی

منطقه	عمق	کربن آلی	ماده آلی	آهک	نیتروژن	فسفر	پتاسیم	هدایت	اسیدیت
قرق	اول	۲/۱۲ ^a	۲/۹۷ ^a	۱۳/۶ ^d	۰/۸ ^a	۱/۸۷ ^d	۱۵۹ ^b	۱/۳ ^e	۷/۹۴ ^b
	دوم	۱/۶۶ ^b	۲/۳۰ ^b	۱۴ ^d	۰/۶۵ ^b	۱/۸۴ ^d	۱۵۱ ^d	۱/۴۴ ^d	۸/۰۷ ^a
	سوم	۱/۳۱ ^d	۱/۸۲ ^c	۱۵/۵ ^b	۰/۴۳ ^e	۲ ^c	۱۴۵ ^e	۱/۴۸ ^c	۸/۰۴ ^{ab}
چرا شده	اول	۱/۴۰ ^c	۲/۲۰ ^b	۱۴/۷ ^c	۰/۵۷ ^c	۲/۴۱ ^a	۱۶۳ ^a	۱/۴۶ ^{cd}	۷/۹۵ ^b
	دوم	۱/۳۱ ^d	۱/۹ ^c	۱۵/۶ ^b	۰/۴۸ ^d	۲/۳۴ ^{ab}	۱۵۳ ^c	۱/۵۲ ^b	۷/۹۸ ^{ab}
	سوم	۱/۱۱ ^e	۱/۳۰ ^d	۱۶ ^a	۰/۳۸ ^f	۲/۳۰ ^b	۱۴۴ ^e	۱/۵۷ ^a	۸/۰۲ ^{ab}

حروف متفاوت در هر ستون نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار می‌باشد.

تحلیل ضرایب همبستگی پیرسون (جدول ۶)، بین ویژگی‌های شیمیایی خاک نشان داد که کربن آلی (OC) با بیشتر متغیرها، از جمله نیتروژن کل (TN)، آهک (CaCO₃) و هدایت الکتریکی (EC)، همبستگی منفی و نسبتاً قوی (به

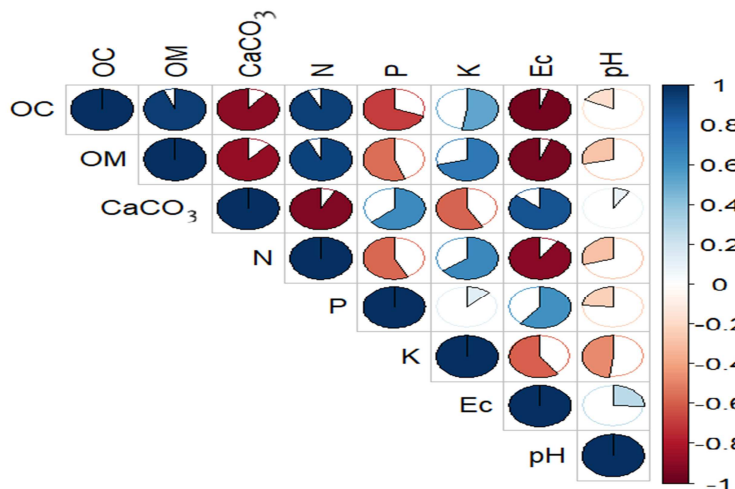
¹ Yates

ترتیب $r = -0.93$ ، $r = -0.89$ و $r = -0.95$ دارد. همچنین، بین مواد آلی (OM) و EC نیز همبستگی منفی بالا مشاهده شد ($r = -0.94$)، که نشان دهنده تأثیر منفی شوری بر محتوای آلی خاک است. در مقابل، همبستگی بین PH و سایر متغیرها عمدتاً ضعیف و غیرمعنادار بود، که نشان می‌دهد اسیدیته خاک در این نمونه‌ها تأثیر کمتری بر سایر خصوصیات شیمیایی داشته است. روابط مثبت بین TN با OM و OC نیز نشان دهنده ارتباط تنگاتنگ چرخه نیتروژن با وضعیت مواد آلی خاک است (شکل، ۳). نتایج تحلیل همبستگی نیز بیانگر آن است که افزایش شوری و کربنات کلسیم منجر به کاهش کیفیت شیمیایی خاک می‌شود. به‌طور خاص، تأثیر منفی شوری بر محتوای آلی خاک مشاهده شده است، در حالی که اسیدیته خاک نقش کمتری در تغییرات سایر ویژگی‌های شیمیایی داشته است. همچنین ارتباط قوی میان چرخه نیتروژن و وضعیت مواد آلی خاک مشاهده گردید، که اهمیت ماده آلی را در پایداری تغذیه‌ای خاک نشان می‌دهد. به‌طور کلی، این یافته‌ها تأکید دارند که افزایش شوری و کربنات کلسیم با کاهش عناصر تغذیه‌ای و کیفیت شیمیایی خاک همراه است.

جدول ۶: نتایج تجزیه ضریب همبستگی بین متغیرهای شیمیایی خاک

	OC	OM	CaCO ₃	TN	P	K	Ec	pH
OC	۱							
OM	-۰/۹۴	۱						
CaCO ₃	۰/۸۹	-۰/۸۷	۱					
TN	-۰/۹۳	۰/۹۲	-۰/۹۲	۱				
P	۰/۶۹	-۰/۵۵	۰/۶۳	-۰/۵۷	۱			
K	۰/۵۲	۰/۷۱	-۰/۵۸	۰/۶۴	۰/۱۲	۱		
Ec	-۰/۹۵	-۰/۹۴	۰/۸۶	-۰/۹۰	۰/۶۰	-۰/۵۹	۱	
pH	-۰/۱۷	-۰/۲۸	-۰/۰۸	-۰/۲۹	-۰/۲۳	-۰/۴۷	۰/۲۶	۱

کربن آلی (OC)، ماده آلی (OM)، آهک (CaCO₃)، نیتروژن کل (TN)، فسفر (P)، پتاسیم (K)، هدایت الکتریکی (EC)، اسیدیته (pH).



شکل ۳: همبستگی بین متغیرهای شیمیایی خاک

تأثیر قرق بر خصوصیات زیستی خاک

نتایج تجزیه واریانس خصوصیات زیستی خاک نشان داد که اثر منطقه بر بیشتر شاخص‌های زیستی از جمله تولید بیوماس میکروبی (MP)، کربن میکروبی خاک (MBC)، نیتروژن میکروبی خاک (MBN)، نسبت C/N میکروبی (MBC/MBN) و کارایی متابولیک میکروبی (MQ) در سطح یک درصد معنی‌دار بود، اما بر سرعت تنفس ناشی از افزودن سوبسترا (SIR) تأثیر معنی‌داری نداشت. همچنین، عمق خاک اثر معنی‌داری بر همه این شاخص‌ها به‌جز SIR و MBC داشت، که بیانگر کاهش فعالیت و تراکم میکروبی با افزایش عمق است. اثر متقابل منطقه و عمق نیز تنها بر MBC، MBN و MQ معنی‌دار بود (جدول، ۷).

جدول ۷: تجزیه واریانس خصوصیات زیستی خاک

متغیر	درجه آزادی	میانگین مربعات	F
منطقه	۱	۰/۰۸	۲۵۶/۳**
	۱	۴/۹۷	۱/۴ ^{ns}
	۱	۹۱۲۶	۲۴۱۵/۷**
	۱	۴/۰۳	۵۲۰/۶**
	۱	۲۸/۲	۱۰/۷**
عمق	۱	۴۳۶/۳	۹۵/۰**
	۲	۰/۰۸	۲۵۳/۴**
	۲	۳/۷	۱/۱ ^{ns}
	۲	۳۳۴۷/۱	۸۸۶/۰**
	۲	۱۰/۷	۱۳۸۷/۳**
منطقه* عمق	۲	۱۷۲۵/۶	۶۵۴/۳**
	۲	۸۹/۹	۱۹/۵**
	۲	۰/۰۰	۰/۴۷ ^{ns}
	۲	۳/۳۵	۰/۹۸ ^{ns}
	۲	۶۶/۵	۱۷/۶**
خطا	۲	۰/۱۱	۱۴/۶**
	۲	۲/۴۹	۰/۹۴ ^{ns}
	۲	۳۲۴/۸	۷۰/۷**
	۱۸	۰/۰۰	-
	۱۸	۳/۳	-
	۱۸	۳/۷	-
	۱۸	۰/۰۰	-
	۱۸	۲/۶	-
	۱۸	۴/۵	-

**وجود تفاوت معنی‌دار بین تیمارها در سطح ۱٪، *وجود تفاوت معنی‌دار بین تیمارها در سطح ۵٪، ^{ns}عدم تفاوت معنی‌دار

نتایج مقایسه میانگین خصوصیات زیستی خاک نشان داد که منطقه قرق در تمامی عمق‌ها از نظر شاخص‌های زیستی وضعیت بهتری نسبت به منطقه چراشده دارد. در منطقه قرق، بالاترین میزان تولید بیوماس میکروبی (MP)، کربن میکروبی خاک (MBC) و نیتروژن میکروبی خاک (MBN) در عمق اول مشاهده شد و این مقادیر با افزایش عمق به‌طور معنی‌داری کاهش یافتند. در مقابل، منطقه چراشده در همه عمق‌ها مقادیر به‌مقاربت پایین‌تری از MBC و MBN داشت و کمترین میزان این شاخص‌ها در عمق سوم دیده شد. نسبت MBC/MBN در منطقه چراشده و به‌ویژه در عمق سوم بالاتر بود. کارایی متابولیک میکروبی (MQ) در منطقه قرق و عمق دوم بیشترین مقدار را نشان داد، در حالی که در منطقه چراشده به‌ویژه در عمق سوم، به کمترین حد خود رسید (جدول، ۸). برای ارزیابی کیفیت خاک، بررسی ویژگی‌هایی ضروری است که در مدت زمان کوتاهی به تنش‌های محیطی پاسخ دهند (حسن و همکاران، ۲۰۲۰). در این میان، ویژگی‌های بیولوژیکی مانند تنفس پایه، پتانسیل معدنی شدن کربن، تنفس میکروبی، سهم میکروبی، ضریب متابولیکی و کربن زیست‌توده میکروبی به تغییرات محیطی در کوتاه

مدت واکنش نشان می‌دهند (جنیدی و همکاران، ۱۴۰۴). نتایج تحلیل خصوصیات زیستی خاک نشان داد که شرایط مدیریتی منطقه و عمق خاک نقش تعیین کننده‌ای در وضعیت زیستی دارند، و ویژگی‌های زیستی نسبت به این عوامل واکنش‌پذیری بالایی از خود نشان می‌دهند. در مطالعه حاضر، ویژگی‌های زیستی خاک در منطقه قرق در تمامی اعماق نسبت به منطقه چراشده وضعیت بهتری داشتند. قرق مراتع می‌تواند از طریق تغییر در ترکیب گونه‌های گیاهی، زیست‌توده، pH خاک، در دسترس بودن کربن و مواد مغذی، بر تنوع میکروبی خاک اثرگذار باشد (ژائو^۱ و همکاران، ۲۰۲۳). بیشترین میزان بیوماس، کربن و نیتروژن میکروبی خاک در لایه سطحی مشاهده شد که نشان‌دهنده کاهش فعالیت و جمعیت میکروبی در لایه‌های عمیق‌تر است. این کاهش در منطقه چراشده بیشتر مشهود بود و می‌تواند ناشی از تخریب ساختار خاک، کاهش مواد آلی و فشار ناشی از چرا باشد. مطالعات پیشین نشان داده‌اند که چرا با شدت متوسط می‌تواند به افزایش زیست‌توده میکروبی منجر شود، اما چرا سنگین باعث کاهش آن می‌شود (چن و همکاران، ۲۰۱۶؛ نورثوپ^۲ و همکاران، ۱۹۹۹). با این حال تحقیقات دیگر به تأثیرات گوناگون شدت چرا بر ترکیب، تنوع و ساختار جامعه میکروبی اشاره کرده‌اند (الیورا^۳ و همکاران، ۲۰۱۶؛ دلگادو-بارکیوریزو^۴ و همکاران، ۲۰۱۶). تغییرات ناشی از چرا می‌تواند عملکردهای خاک را به‌ویژه در اکوسیستم‌های تحت تنش شدید مانند مناطق خشک تحت تأثیر قرار دهد. افزایش تنوع گیاهی ناشی از قرق، با افزایش ترشحات ریشه‌ای و در دسترس بودن مواد مغذی، می‌تواند تنوع میکروبی خاک را ارتقاء دهد. بازخوردهای مثبت بین میکروارگانیسم‌های خاک و جوامع گیاهی نیز در این افزایش مؤثر هستند. مطالعات اخیر تغییرات متنوعی در تنوع میکروبی گزارش کرده‌اند (سو و همکاران، ۲۰۲۳؛ گوو و همکاران، ۲۰۲۳). نسبت نیتروژن زیست‌توده میکروبی به کربن زیست‌توده میکروبی در منطقه چراشده، به‌ویژه در عمق سوم، بالاتر بود؛ که می‌تواند نشان‌دهنده تنش زیستی یا عدم تعادل در ساختار جامعه میکروبی باشد. پژوهشگران معتقدند جهت و شدت پاسخ تنوع میکروبی به قرق به‌طور عمده به مدت‌زمان قرق بستگی دارد و تحت تأثیر نوع میکروارگانیسم، نوع مرتع، عمق خاک و شرایط اقلیمی قرار دارد (آلدسابل^۵ و همکاران، ۲۰۱۵؛ پنگ و همکاران، ۲۰۲۱؛ ویو^۶ و همکاران، ۲۰۲۲).

جدول ۸: مقایسه میانگین خصوصیات زیستی

عمق	MP	SIR	MBC	MBN	MBC/MBN	MQ
قرق						
اول	۰/۶۸ ^a	۰/۸۷ ^a	۱۳۴/۲ ^a	۴/۰۲ ^a	۳۳/۳ ^d	۶۳/۳ ^c
دوم	۰/۵۹ ^b	۰/۸۸ ^a	۱۲۳/۲ ^b	۳/۱۲ ^b	۳۹/۴ ^b	۷۳/۹ ^a
سوم	۰/۴۸ ^d	۰/۵۳ ^a	۹۲/۵ ^d	۱/۵۲ ^d	۶۰/۸ ^a	۶۹/۲ ^b
چرا شده						
اول	۰/۵۶ ^c	۰/۶۸ ^a	۹۷/۲ ^c	۳/۰۷ ^b	۳۱/۷ ^d	۶۹/۴ ^b
دوم	۰/۴۸ ^d	۰/۵۷ ^a	۷۷/۷ ^e	۲/۱۶ ^c	۳۶/۰۱ ^c	۵۹/۳ ^d
سوم	۰/۳۵ ^e	۰/۵۶ ^a	۵۸/۰ ^f	۰/۹۷ ^e	۵۹/۴ ^a	۵۲/۱ ^e

حروف متفاوت در هر ستون نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار می‌باشد.

نتایج تجزیه ضریب همبستگی پیرسون (جدول ۹)، بین شاخص‌های زیستی خاک نشان داد که میان تمامی متغیرهای میکروبی شامل جمعیت میکروبی (MP)، تنفس میکروبی پایه (SIR)، کربن و نیتروژن زی‌توده میکروبی (MBC و MBN)، نسبت MBC/MBN و سهم میکروبی (MQ) همبستگی مثبت و بسیار قوی وجود دارد ($r = -0.94$).

¹ Zhou

² Northup

³ Olivera

⁴ Delgado-Baquerizo

⁵ Aldezabal

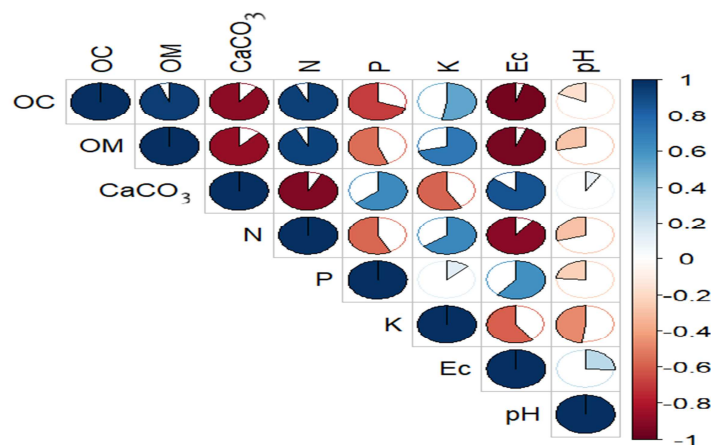
⁶ Wu

۰/۰۱ < P). بیشترین همبستگی بین MBN و SIR ($r = -0/99$) مشاهده شد. همچنین MQ با تمامی شاخص‌های دیگر همبستگی بالایی داشت ($r = -0/93$ تا $r = -0/98$) (شکل، ۴). نتایج همبستگی حاکی از ارتباط نزدیک بین فعالیت تنفسی و میزان نیتروژن میکروبی است. سهم میکروبی نیز با تمامی شاخص‌ها همبستگی بالایی داشت که نقش آن را به‌عنوان شاخصی تلفیقی برای سلامت زیستی خاک برجسته می‌سازد. این روابط نشان می‌دهند که تغییر در یک شاخص می‌تواند به‌طور همزمان سایر ویژگی‌های میکروبی را تحت تأثیر قرار دهد. بنابراین، تحلیل یکپارچه این شاخص‌ها برای ارزیابی دقیق کیفیت زیستی خاک ضروری است. به‌طور کلی، نتایج ویژگی‌های زیستی خاک متأثر از چرای دام و قرق در مطالعه حاضر نشان داد، قرق و کاهش فشار چرای دام موجب بهبود فعالیت و سلامت زیستی خاک شده است.

جدول ۹: نتایج تجزیه ضریب همبستگی بین متغیرهای زیستی خاک

	MP	SIR	MBC	MBN	MBC/MBN	MQ
MP	۱					
SIR	۱/۰۰	۱				
MBC	۰/۹۹	۰/۹۷	۱			
MBN	۰/۹۸	۰/۹۹	۰/۹۵	۱		
MBC/MBN	۰/۹۷	۰/۹۸	۰/۹۳	۰/۹۷	۱	
MQ	۰/۹۷	۰/۹۸	۰/۹۳	۰/۹۷	۰/۹۷	۱

تنفس میکروبی پایه (MP)، تنفس بر انگیخته (SIR)، کربن زیتوده میکروبی (MBC)، نیتروژن زیتوده میکروبی (MBC)، نسبت کربن بر نیتروژن زیتوده میکروبی (MBC/MBN)، سهم میکروبی (MQ)



شکل ۴: همبستگی بین متغیرهای زیستی خاک

نتیجه‌گیری

مطالعه اثرات قرق بر ویژگی‌های خاک، به‌ویژه در شرایط اقلیمی خشک و نیمه‌خشک که مراتع به‌شدت تحت فشار دام قرار دارند، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. این اطلاعات می‌تواند به مدیران منابع طبیعی کمک کند تا تصمیمات علمی‌تری در راستای مدیریت پایدار منابع مرتعی اتخاذ کنند. در این تحقیق، تأثیر قرق بر برخی ویژگی‌های کلیدی خاک مورد بررسی قرار گرفت تا نقش این روش مدیریتی در بهبود کیفیت خاک مراتع به‌صورت دقیق‌تری تبیین شود. محققان بر این باورند که برنامه‌های قرق با هدف مقابله با اثرات نامطلوب چرای بیش از حد و

تسهیل احیای مراتع از طریق حذف چرای دام در مناطق هدف نتایج مطلوبی را در پی دارد (سان^۱ و همکاران، ۲۰۲۱). نتایج این پژوهش به روشنی نشان داد که قرق مراتع، به عنوان یک راهبرد مدیریتی مؤثر، می تواند در بهبود ویژگی های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک در مناطق خشک و نیمه خشک نقش کلیدی ایفا کند. قرق مراتع به طور مؤثری موجب بهبود خصوصیات فیزیکوشیمیایی و زیستی خاک شده است. اعمال قرق افزایش تخلخل، کاهش فشردگی، بهبود بافت و افزایش مواد آلی و عناصر غذایی مانند کربن و نیتروژن را همراه داشته است. همچنین، شاخص های زیستی از جمله تنفس میکروبی، بیوماس و نیتروژن میکروبی در شرایط قرق وضعیت مطلوب تری داشتند. در مجموع، قرق به عنوان یک اقدام مدیریتی و کم هزینه می تواند در ارتقاء کیفیت خاک، بازسازی ساختار فیزیکی، بهبود حاصلخیزی شیمیایی و ارتقاء تنوع و عملکرد زیستی خاک مؤثر باشد و در نتیجه، گامی مهم در جهت پایداری اکوسیستم های مرتعی و بهره برداری بلندمدت از منابع طبیعی به شمار آید. توصیه می شود در برنامه ریزی مدیریت مراتع، زمان بندی، شدت و مدت قرق با توجه دقیق به ویژگی های اقلیمی، خاک شناسی و تنوع زیستی منطقه تنظیم شود تا اثربخشی این استراتژی افزایش یابد.

تقدیر و تشکر

بدین وسیله از حمایت مالی دانشگاه زابل (Grant code: IR-UOZ-GR-8721) برای انجام این پژوهش تشکر و قدردانی می گردد.

منابع

- اکبرزاده، پیمان، و نیکو، شیمیا. (۱۴۰۱). اثر تغییر کاربری اراضی بر کیفیت آب زیرزمینی (مطالعه موردی: حوضه آبخیز دامغان). (مجله /کوهیدرولوژی، ۹(۲)، ۴۳۷-۴۵۹. <https://doi.org/10.22059/ije.2022.340711.1622>
- جنیدی، حامد، بازگیر، الهام، و کمالی، نادیا. (۱۴۰۴). اثرپذیری ویژگی های بیولوژیک خاک مرتع در مواجهه با تغییر کاربری به دیمزار (مطالعه موردی: مراتع کرمانشاه). (پژوهش های فرسایش محیطی، ۱۵(۱)، ۲۵-۴۴.
- حشمتی، مسیب، و قیطوری، محمد. (۱۴۰۰). نقش قرق طولانی مدت مرتع بر بهبود برخی ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خاک و پایداری آن. (پژوهش های خاک، ۳۵(۱)، ۱۵-۲۶. <https://doi.org/10.22092/ijsr.2021.352965.573>
- خطیبی، رسول، و فراهی، محسن. (۱۴۰۳). بررسی اثر قرق بر خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک مراتع (مطالعه موردی: شمال استان گلستان، مراتع صوفیکم). (فصلنامه علوم محیطی، ۲۲(۳)، ۴۸۳-۴۹۴. <https://doi.org/10.48308/envs.2024.1360>
- شیدای کرکج، اسماعیل، رضائی، حسین، نیک نهاده قره ماخر، حمید، جعفری فوتمی، عیسی، و شریفیان، ابوالفضل. (۱۳۹۸). نقش قرق در تغییر پایداری خاکدانه و ساختمان خاک های مرتعی استان گلستان. (تحقیقات مرتع و بیابان ایران، ۲۶(۴)، ۹۰۴-۹۱۷. <https://doi.org/10.22092/ijrdr.2019.120682>
- غنچه پور، ماشالله، صادقی نیا، مجید، باغستانی، ناصر، پور میرزایی، احمد، و کدوری، محمدرضا. (۱۴۰۲). مقایسه تنوع پوشش گیاهی و خاک در دو عرصه قرق و چرا (مطالعه موردی: درمنه زارهای منطقه دهنو، بردسیر، کرمان). (تحقیقات مرتع و بیابان ایران، ۳۰(۱)، ۱۵۲-۱۶۳. <https://doi.org/10.22092/ijrdr.2023.128952>
- قبادی، عیسی، و اختری، داوود. (۱۳۹۹). تأثیر قرق بر برخی خصوصیات شیمیایی و آلی خاک (مطالعه موردی: حوضه گنبد شهر همدان). (علوم و تکنولوژی محیط زیست، ۱۰(۲۲)، ۲۳۱-۲۳۳.

¹ Sun

- کریمیان، وحید، و بارانی، حسین. (۱۴۰۳). شناسایی گیاهان دارویی-صنعتی پرکاربرد مراتع بیابانی و بررسی میزان آگاهی جامعه محلی نسبت به آنها (مطالعه موردی: شهرستان خواف، خراسان رضوی). مدیریت بیابان، ۱۲(۴)، ۴۱-۶۲.
<https://doi.org/10.22034/jdmal.2025.2045459.1490>
- محمدی سمانی، کیومرث، جنیدی جعفری، حامد، و مرادی، پریا. (۱۴۰۱). تغییرپذیری برخی خصوصیات شیمیایی خاک در شرایط مختلف مدیریتی مرتع. تحقیقات مرتع و بیابان/ایران، ۲۹(۲)، ۱۲۶-۱۳۰.
<https://doi.org/10.22092/ijdr.2022.126760>
- Aldezabal, A., Moragues, L., Odriozola, I., Mijangos, I. (2015). Impact of grazing abandonment on plant and soil microbial communities in an Atlantic mountain grassland. *Appl. Soil Ecol.* 96, 251–260. doi: 10.1016/j.apsoil.2015.08.013.
- Bai, Y., & Cotrufo, M. F. (2022). Grassland soil carbon sequestration: Current understanding, challenges, and solutions. *Science*, 377, 603–608. <https://doi.org/10.1126/science.abo2380>
- Bardgett, R. D., Bullock, J. M., Lavorel, S., Manning, P., Schaffner, U., Ostle, N., et al. (2021). Combatting global grassland degradation. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2, 720–735. <https://doi.org/10.1038/s43017-021-00207-2>
- Bengtsson, J., Bullock, J. M., Egoh, B., Everson, C., Everson, T., O'Connor, T., et al. (2019). Grasslands—More important for ecosystem services than you might think. *Ecosphere*, 10(2), e02582. <https://doi.org/10.1002/ecs2.2582>
- Chen, J., Zhou, X., Wang, J., Hruska, T., Shi, W., Cao, J., et al., 2016. Grazing exclusion reduced soil respiration but increased its temperature sensitivity in a Meadow Grassland on the Tibetan Plateau. *Ecol. Evol.* 6, 675–687.
- Chen, L., Baoyin, T., & Xia, F. (2022). Grassland management strategies influence soil C, N, and P sequestration through shifting plant community composition in semi-arid grasslands of northern China. *Ecological Indicators*, 34, 1–12.
- Delgado-Baquerizo, M., Maestre, F.T., Reich, P.B., Jeffries, T.C., Gaitan, J.J., Encinar, D., et al., 2016. Microbial diversity drives multifunctionality in terrestrial ecosystems. *Nat. Commun.* 7, 10541.
- Guo, Q., Wen, Z., Ghanizadeh, H., Fan, Y., Zheng, C., Yang, X., et al. (2023). Stochastic processes dominate the assembly of the soil fungal community in grazing-excluded grasslands in northwestern China. *Journal of Soils and Sediments*, 23, 156–171. <https://doi.org/10.1007/s11368-022-03315-8>
- Hasan, S. S., Zhen, L., Miah, M. G., Ahamed, T., & Samie, A. (2020). Impact of land use change on ecosystem services: A review. *Environmental Development*, 34, 100527.
- Hu, Z., Li, S., Guo, Q., Niu, S., He, N., Li, L., et al. (2016). A synthesis of the effect of grazing exclusion on carbon dynamics in grasslands in China. *Global Change Biology*, 22, 1385–1393. <https://doi.org/10.1111/gcb.13133>
- Kauffman, J.B., Thorpe, A.S., Brookshire, E.N.J., 2004. Livestock exclusion and belowground ecosystem responses in riparian meadows of eastern Oregon. *Ecol. Appl.* 14, 1671–1679.
- Liu, L., Sayer, E. J., Deng, M., Li, P., Liu, W., Wang, X., et al. (2023). The grassland carbon cycle: Mechanisms, responses to global changes, and potential contribution to carbon neutrality. *Fundamental Research*, 3, 209–218. <https://doi.org/10.1016/j.fmre.2022.09.028>
- Liu, N., Kan, H.M., Yang, G.W., Zhang, Y.J., 2015. Changes in plant, soil, and microbes in a typical steppe from simulated grazing: explaining potential change in soil C. *Ecol. Monogr.* 85, 269–286.
- Northup, B.K., Brown, J.R., Holt, J.A., 1999. Grazing impacts on the spatial distribution of soil microbial biomass around tussock grasses in a tropical grassland. *Appl. Soil Ecol.* 13, 259–270.
- Olivera, N.L., Prieto, L., Bertiller, M.B., Ferrero, M.A., 2016. Sheep grazing and soil bacterial diversity in shrublands of the Patagonian Monte, Argentina. *J. Arid Environ.* 125, 16–20.
- Peng, W., Shazhou, A., Mei, K., Chao, L., Yurong, H., Jiyong, L., et al. (2021). Effects of enclosure on plant and soil restoration in the Junggar Desert. *Journal of Resources and Ecology*, 12, 840–848. <https://doi.org/10.5814/j.issn.1674-764x.2021.06.012>
- Petermann, J. S., & Buzhdygan, O. Y. (2021). Grassland biodiversity. *Current Biology*, 31, R1195–R1201. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2021.06.060>
- Qobadi, A., Akhgari, S. and Davood, V., 2020. The Impact of enclosure on some chemical and organic soil properties (Case Study: Gonbad Shahar watershed, Hamadan). *Environmental Science and Technology Quarterly*. 22(10), 221-233. <https://doi.org/10.22034/jest.2021.32769.4059>.
- Qu, Q., Deng, L., Shangguan, Z., Sun, J., He, J., Wang, K., et al. (2024). Belowground C sequestrations response to grazing exclusion in global grasslands: Dynamics and mechanisms. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 360, 108771. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108771>
- Sollenberger, L. E., Kohmann, M. M., Dubeux, J. C. B., & Silveira, M. L. (2019). Grassland management affects the delivery of regulating and supporting ecosystem services. *Crop Science*, 59, 441–459. <https://doi.org/10.2135/cropsci2018.09.0594>
- Su, J., Ji, W., Sun, X., Wang, H., Kang, Y., & Yao, B. (2023). Effects of different management practices on soil microbial community structure and function in alpine grassland. *Journal of Environmental Management*, 327, 116859. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116859>
- Sun, J., Fu, B., Zhao, W., Liu, S., Liu, G., Zhou, H., et al. (2021). Optimising grazing exclusion practices to achieve Goal 15 of the Sustainable Development Goals in the Tibetan Plateau. *Science Bulletin*, 66, 1493–1496. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2021.03.014>
- Wang, Y., Lv, W., Xue, K., Wang, S., Zhang, L., Hu, R., et al. (2022). Grassland changes and adaptive management on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Nature Reviews Earth & Environment*, 3, 668–683. <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00330-8>
- Wang, Z., Zhang, Q., Staley, C., Gao, H., Ishii, S., Wei, X., et al. (2019). Impact of long-term grazing exclusion on soil microbial community composition and nutrient availability. *Biology and Fertility of Soils*, 55, 121–134. <https://doi.org/10.1007/s00374-018-01336-5>

- Wu, Y., Chen, D., Delgado-Baquerizo, M., Liu, S., Wang, B., Wu, J., et al. (2022). Long-term regional evidence of the effects of livestock grazing on soil microbial community structure and functions in surface and deep soil layers. *Soil Biology and Biochemistry*, 168, 108629. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2022.108629>
- Yang, Y., Wu, L., Lin, Q., Yuan, M., Xu, D., Yu, H., et al., 2013. Responses of the functional structure of soil microbial community to livestock grazing in the Tibetan alpine grassland. *Glob. Change Biol.* 19, 637–648.
- Zhan, T., Zhao, W., Feng, S., & Hua, T. (2022). Plant community traits respond to grazing exclusion duration in alpine meadow and alpine steppe on the Tibetan plateau. *Frontiers in Plant Science*, 13, 863246. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.863246>
- Zhou, W., Li, C., Wang, S., Ren, Z. and Stringer, L. C., 2023. Effects of grazing and enclosure management on soil physical and chemical properties vary with aridity in China's drylands. *Science of The Total Environment*, 877, 162946. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162946>.