



Geomorphological Study of the Taherabad and Bajestan Playas and Their Relationship with Mineral Potential, with Special Emphasis on Lithium

Rasoul Dakhili¹ , Leila Goli Mokhtari² , Abdolreza Kashki³

1. (Corresponding Author) Department of Climatology and Geomorphology, Faculty of Geography and Environmental Sciences, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran.

Email: rasoul560@gmail.com

2. Department of Climatology and Geomorphology, Faculty of Geography and Environmental Sciences, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran.

Email: L.mokhtari@hsu.ac.ir

3. Department of Climatology and Geomorphology, Faculty of Geography and Environmental Sciences, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran

Email: a.kashki@hsu.ac.ir

Article Info

Article Type:

Research Article

Article History:

Received:

14 Dec 2025

Received in revised form:

4 Mar 2026

Accepted:

4 June 2026

pp.156-176

Keywords:

Land use,

Playa,

Mineral Potential,

Lithium,

Geomorphological Features,

FDA Model.

ABSTRACT

Lithium, as a strategic element in modern technologies, has gained increasing importance in exploration studies. This study aims to zone lithium potential and analyze the role of geomorphological-geochemical factors in the two playas of Bajestan and Taherabad in central Iran. For this purpose, a set of geomorphological factors, including elevation, slope, curvature, flow accumulation, and topographic roughness, along with remote sensing indices and lithium geochemical data up to a depth of 3 meters, were used. Lithium potential modeling was performed using three machine learning algorithms: FDA, GLM, and GBM, and their performance was evaluated with different statistical indices. The results showed that the FDA model has the best performance, with $AUC=0.845$, $Kappa=0.630$, and $ACC=0.815$, and is significantly superior to GLM ($AUC=0.796$) and GBM ($AUC=0.754$). This superiority demonstrates the FDA's high power in modeling the complex, nonlinear relationships between lithium and geomorphological-hydrological variables. Geomorphological analysis indicates that the Bojestan playa is a transport-driven and high-energy system with an elevation difference of up to 1100 m that controls the weathering, release, and transport of lithium from the source rocks. In contrast, the Taherabad playa, with a lower elevation difference (0–600 m) and low geomorphic energy, is an accumulation-driven system that increases water residence time, promotes gradual evaporation, and leads to sedimentation of fine grains, resulting in a more stable lithium concentration of up to 68 ppm. The positive correlation of lithium with clay elements and its negative correlation with carbonate elements confirm the sedimentary-geochemical control on the final enrichment. Overall, the performance differences between the two playas demonstrate the necessity of region-based exploration strategies, and the FDA model is introduced as an efficient tool for zoning lithium potential.

Cite this article: Goli Mokhtari, L., Kashki, A., & Dakhili, R. (2026). Geomorphological Study of the Taherabad and Bajestan Playas and Their Relationship with Mineral Potential, with Special Emphasis on Lithium. *Quantitative Geomorphological Research*, 15(1). 156-176.

Doi: [10.22034/gmpj.2026.574515.1601](https://doi.org/10.22034/gmpj.2026.574515.1601)

Extended Abstract

Introduction

Playas (daqs), as closed sedimentary environments in arid regions, play an essential role in the accumulation of valuable mineral resources. Globally, these basins are rich sources of evaporite minerals, including sulfates, carbonates, halite, nitrates, barites, bromine, iodine, and strategic elements such as lithium. For example, about 400,000 tons of sodium sulfate, worth \$40 million, are extracted annually from the playas of western Canada, and the Silver Peak brines in the United States are considered one of the most considerable lithium resources in the world. Playas, closed sedimentary environments in arid regions, play an essential role in concentrating valuable mineral elements, especially the strategic element lithium. The Taherabad and Bojestan playas in Khorasan Razavi Province have a high potential for the formation of lithium reserves due to their specific geomorphological, climatic, and hydrological conditions.

Methodology

In this study, an integrated approach combining spatial data, remote sensing, field studies, laboratory analyses, and statistical modeling was used to investigate the role of geomorphological factors in controlling lithium mineral potential in the Taherabad and Bojestan playas. The basic data included 1:25,000 and 1:50,000 topographic maps, 1:100,000 geological maps, and the SRTM digital elevation model, which were used to extract morphometric parameters in ArcGIS 10.4. To analyze spatio-temporal changes in the playas, Landsat 8, Sentinel 2, and ASTER multispectral images were processed, and related spectral indices were extracted. Grid sampling of sediments and groundwater was conducted. Geochemical analyses (ICP-MS and XRF) were performed to determine lithium and associated element concentrations, and mineralogical studies (XRD and SEM) were conducted to identify lithium-bearing phases. Geophysical (ERT and IP) and hydrogeological data were also used as

complementary layers in mineral potential modeling. Finally, using multivariate statistical analyses and FDA, GLM, and GBM models, lithium potential zoning was performed, and the models' performance was evaluated using statistical indices and ROC curves.

Results and discussion

The results of geomorphological analysis show that geomorphology and topography play a decisive role in the lithium concentration pattern in both basins. The Bajestan basin, with a higher elevation range, steeper slope, and rougher terrain, acts as a transport-oriented system in which weathering, release, and lithium transport from highlands to lowlands and evaporative areas are dominant. In contrast, the Taherabad playa, with its lower elevation, gentle slopes, and lower roughness, represents a low-energy, accumulation-oriented system that provides suitable conditions for lithium storage and concentration. The analysis of the curvature and flow accumulation paths indicates that the lowlands and converging areas in both basins are the primary focus of runoff concentration and subsurface flows, which, by increasing water residence time, enhance rock-water reactions and lithium absorption by clays. Geochemical results from the Taherabad playa show significant depth variations in lithium and associated element concentrations, reflecting the influence of dissolution processes, ionic migration, and chemical concentration under evaporative conditions. In the Bajestan basin, the spatial pattern of lithium is highly correlated with the location of watercourses, bedrock, and fine-grained sediment transport processes. PCA results indicate that the first factor (Na, Cl, Mg, Sr) represents evaporative-saline control, but lithium is not significantly correlated with this factor. The second factor, characterized by Li_2O , Al_2O_3 , K_2O , Fe_2O_3 , and TiO_2 , highlights the key role of clay minerals and felsic origin in lithium concentration; a factor that is more dominant in Taherabad.

The results of FDA, GLM, and GBM modeling in both playas show high convergence in identifying zones with high to very high potential. In Bajestan, the central, southern, and southeastern areas were identified as the primary exploration target zones, reflecting the interaction of upland release and ultimate accumulation in low-energy environments. In Taherabad, the concentration of high-potential zones in the central, southern, and southeastern parts of the playa indicates the operation of an accumulation-driven system with firm control of fine-grained sediments, intense evaporation, and high fluid residence times. Quantitative results show that all three models FDA, GLM, and GBM have acceptable power in predicting areas prone to lithium concentration, but the FDA model performs superiorly with the highest accuracy; with AUC = 0.845, Kappa = 0.63, and ACC = 0.815, it has higher resolution and agreement than GLM (AUC = 0.796) and GBM (AUC = 0.754). The high values of SST (0.82) and SPF (0.81) in FDA indicate the high power of this model in correctly identifying real zones with lithium potential and appropriately controlling false-positive error. In contrast, the simultaneous decrease of these indices in GLM and GBM indicates increased uncertainty and a higher risk of missing promising zones.

Conclusion

The results of this study show that the lithium concentration in the playas of Bajestan and Taherabad is the outcome of a direct, structured interaction between geomorphological and geochemical-mineralogical processes. The playa of Bajestan, with its higher altitude (up to about 1100 m) and high topographic roughness, provides effective conditions for the intensification of weathering, the release, and the transport of Li^+ ions from source rocks, due to its high geomorphic energy and its role as a high-energy transport-oriented system. The positive correlation of lithium with Al_2O_3 , K_2O , and TiO_2 indicates the dominant role of silicate-clay minerals of felsic origin in lithium production. In contrast, the playa of Taherabad, with its lower altitude, gentle slopes, lower roughness, and convergent curvature,

although having a lower intensity of initial lithium release, provides more stable conditions for the storage and chemical concentration of lithium due to the high residence time of fluids, closed environments, and fine-grained sediments; So that the lithium concentration reaches about 68 ppm in some areas.

Funding

There is no funding support.

Authors' Contribution

Authors contributed equally to the conceptualization and writing of the article. All of the authors approved the content of the manuscript and agreed on all aspects of the work declaration of competing interest none.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

We are grateful to all the scientific consultants of this paper.

مطالعه ژئومورفولوژیک پلايای طاهرآباد و پلايای بجستان و ارتباط آن با پتانسیل های معدنی با نگرش ویژه بر عنصر لیتیم

رسول دخیلی^۱، لیلا گلی مختاری^۲، عبدالرضا کاشکی^۳

۱- نویسنده مسئول، گروه اقلیم‌شناسی و ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا و علوم محیطی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران. رایانامه: Rasoul560@gmail.com

۲- گروه اقلیم‌شناسی و ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا و علوم محیطی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران. رایانامه: L.mokhtari@hsu.ac.ir

۳- گروه اقلیم‌شناسی و ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا و علوم محیطی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران. رایانامه: a.kashki@hsu.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	لیتیم به عنوان عنصری راهبردی در فناوری‌های نوین، اهمیت فزاینده‌ای در مطالعات اکتشافی پیدا کرده است. این پژوهش با هدف پهنه‌بندی پتانسیل لیتیم و تحلیل نقش عوامل ژئومورفولوژیکی-ژئوشیمیایی، دو پلايای بجستان و طاهرآباد در ایران مرکزی را بررسی می‌کند. بدین منظور، مجموعه‌ای از عوامل ژئومورفولوژیکی شامل ارتفاع، شیب، انحنا، تجمع جریان و زبری توپوگرافی، به همراه شاخص‌های سنجش‌ازدور و داده‌های ژئوشیمیایی لیتیم تا عمق ۳ متر به کار گرفته شد. مدل‌سازی پتانسیل لیتیم با استفاده از سه الگوریتم یادگیری ماشین GLM، FDA و GBM انجام گرفت و عملکرد آن‌ها با شاخص‌های آماری مختلف ارزیابی شد. نتایج نشان داد مدل FDA با مقادیر $AUC=0.845$ ، $Kappa=0.630$ و $ACC=0.815$ بهترین عملکرد را دارد و به طور معناداری از GBM و GLM ($AUC=0.796$) برتر است. این برتری نشان‌دهنده توان بالای FDA در مدل‌سازی روابط غیرخطی پیچیده میان لیتیم و متغیرهای ژئومورفولوژیکی-هیدرولوژیکی است. تحلیل ژئومورفولوژیکی حاکی از آن است که پلايای بجستان یک سیستم انتقال‌محور و پرانرژی با اختلاف ارتفاعی تا ۱۱۰۰ متر است که هوازگی، آزادسازی و انتقال لیتیم از سنگ‌های منبع را کنترل می‌کند. در مقابل، پلايای طاهرآباد با اختلاف ارتفاع کمتر (۶۰۰-۶۰ متر) و انرژی ژئومورفیک پایین، یک سیستم تجمع‌محور است که افزایش زمان ماند آب، تبخیر تدریجی و رسوب‌گذاری ریزدانه‌ها، تمرکز پایدارتر لیتیم تا ۶۸ ppm را سبب می‌شود. همبستگی مثبت لیتیم با عناصر رسی و همبستگی منفی آن با عناصر کربناته، کنترل رسوبی-ژئوشیمیایی بر غنی‌شدگی نهایی را تأیید می‌کند. در مجموع، تفاوت عملکرد دو پلايا ضرورت راهبردهای اکتشافی منطقه‌محور را نشان می‌دهد و مدل FDA به عنوان ابزاری کارآمد برای پهنه‌بندی پتانسیل لیتیم معرفی می‌شود.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۲۳ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۲/۱۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۱۴ صص. ۱۵۶-۱۵۶	
واژگان کلیدی: پلايا، پتانسیل های معدنی، لیتیم، عوارض ژئومورفولوژیک، مدل FDA.	

استناد: گلی مختاری، لیلا، کاشکی، عبدالرضا، و دخیلی، رسول. (۱۴۰۵). مطالعه ژئومورفولوژیک پلايای طاهرآباد و پلايای بجستان و ارتباط

آن با پتانسیل های معدنی با نگرش ویژه بر عنصر لیتیم. پژوهشهای ژئومورفولوژی کمی، ۱۵(۱)، ۱۷۶-۱۵۶.

Doi: 10.22034/gmpj.2026.574515.1601

مقدمه

پلایاها (دق‌ها) به‌عنوان محیط‌های رسوبی بسته در مناطق خشک، نقش مهمی در تجمع منابع معدنی ارزشمند دارند. در سطح جهان، این حوضه‌ها منبع غنی از کانی‌های تبخیری از جمله سولفات‌ها، کربنات‌ها، هالیت، نیتрат‌ها، برات‌ها، برم، ید و عناصر استراتژیک مانند لیتیم هستند. به‌عنوان مثال، سالانه حدود ۴۰۰'۰۰۰ تن سولفات سدیم با ارزشی معادل چهل میلیون دلار از پلایاهای غرب کانادا استحصال می‌شود و شورابه‌های کفه Silver Peak در آمریکا یکی از بزرگترین منابع لیتیم جهان محسوب می‌شوند. تشکیل پلایاها در شرایط تبخیر شدید در حوضه‌های بسته رخ می‌دهد که با ورود سیلاب‌های فصلی و رسوب‌گذاری مواد دانه‌ریز همراه است. این فرآیندها در مطالعات متعددی از جمله پژوهش‌های احمدی (۱۳۶۷)، ترشیزیان و موسوی حرمی (۱۳۷۳ و ۱۳۷۷)، ترشیزیان (۱۳۸۸)، ترشیزیان و همکاران (۲۰۰۹) در ایران، و لست (۱۹۸۹) در کانادا توصیف شده‌اند. تجمع رسوبات در پلایاها عمدتاً تحت تأثیر چرخه‌های تبخیر و بارندگی‌های سطحی صورت می‌گیرد؛ هرچند که فرآیندهای بادی نیز می‌توانند باعث جابه‌جایی مجدد مواد جامد شوند (لاست، ۱۹۸۹). دشت‌ها، دریاچه‌های کویری، پلایاها و دیگر لندفرم‌های مشابه در بسیاری از مناطق خشک و نیمه‌خشک، در اثر مداخلات و فعالیت‌های انسانی با درجات مختلفی از اختلال و ناپایداری مواجه شده‌اند (نوروزی و همکاران، ۱۴۰۴).

پلایاها به‌عنوان محیط‌های رسوبی بسته در مناطق خشک، نقش مهمی در تمرکز عناصر معدنی ارزشمند، به‌ویژه عنصر استراتژیک لیتیم، دارند. پلایای طاهرآباد و بجستان در استان خراسان رضوی به دلیل شرایط خاص ژئومورفولوژیکی، اقلیمی و هیدرولوژیکی، از پتانسیل بالایی برای تشکیل ذخایر لیتیم برخوردارند. با توجه به افزایش تقاضای جهانی برای لیتیم در صنایع باتری‌سازی، انرژی‌های تجدیدپذیر و فناوری‌های سبز، شناسایی و ارزیابی پتانسیل این پلایاها می‌تواند نقش مؤثری در تأمین مواد اولیه، کاهش وابستگی به واردات و توسعه بخش معدن کشور ایفا کند. مطالعات پیشین در حوزه پلایاها و پتانسیل معدنی آن‌ها عمدتاً بر دو محور ژئومورفولوژی و رسوب‌شناسی و ژئوشیمی و کانی‌شناسی متمرکز بوده‌اند.

بیات و همکاران (۱۴۰۱) به بررسی محیط دیرینه پلایای جازموریان در کوآترنری پایانی بر اساس مطالعه مغزه‌های رسوبی در پلایای جازموریان پرداختند. نتایج نشان داد که تاریخچه رسوب‌گذاری این حوضه به‌شدت تحت تأثیر نوسانات اقلیمی هولوسن بوده و تغییرات رخساره‌های رسوبی امکان شناسایی دوره‌های خشک و مرطوب را فراهم می‌کند. نتایج مغزه‌های رسوبی و شواهد رسوب‌شناسی حاکی از غالب بودن شرایط خشک در هولوسن و رطوبت بیشتر در پلیستوسن پایانی است، به‌گونه‌ای که دوره‌های خشک کوتاه‌مدت و ناگهانی در مقایسه با دوره‌های مرطوب فراوان‌تر بوده‌اند. وحدتی‌نسب و همکاران (۲۰۱۶) به بررسی پلایاهای کویر مرکزی ایران و ارتباط آن‌ها با استقرارهای پارینه‌سنگی میانی پرداخته و در این چارچوب، محوطه پارینه‌سنگی میانی چاه‌جام را معرفی کردند. نتایج مطالعات ژئومورفولوژیکی نشان می‌دهد که کویر مرکزی ایران در گذشته شامل چندین دریاچه بزرگ بوده که بقایای آن‌ها امروزه به‌صورت پلایاهای متعدد در سراسر این ناحیه قابل مشاهده است. یافته‌ها حاکی از آن است که شرایط اقلیمی در اواخر پلیستوسن به‌طور قابل‌توجهی مرطوب‌تر از شرایط کنونی بوده و وجود دریاچه‌های گسترده همراه با پوشش گیاهی مناسب، امکان حضور و استقرار جمعیت‌های هومینین را در نواحی‌ای فراهم کرده که امروزه محیط‌های خشک و بیابانی محسوب می‌شوند. سرمست و همکاران (۲۰۱۷) به بررسی توسعه واریش صحرایی و خاک به‌عنوان شاخص‌های تکامل ژئومورفولوژیک در بیابان‌های مرکزی ایران پرداختند. نتایج نشان داد واریش‌های قهوه‌ای تا سیاه از ذرات ریز (۲/۰ تا ۵۰ میکرومتر) با ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) بین ۸/۵ تا ۲۱ cmolc kg^{-1} تشکیل شده‌اند. حضور کانی‌های رسی متنوع در خاک‌ها و واریش صحرایی نشان داد که این شاخص‌ها می‌توانند ابزاری ساده و مؤثر برای بررسی تکامل شکل زمین در محیط‌های گرم و خشک باشند. عرفانیان کاسب و همکاران (۲۰۲۰) به بررسی اثر فرآیندهای سنگ‌شناسی و تکاملی بر تغییرات ژئوشیمیایی آب شور در پلایای شاهرخت-یزدان (شرق ایران-غرب افغانستان) پرداخت. نتایج نشان داد رسوبات پلایا ترکیبی از کانی‌های

آواری (کوارتز، فلدسپات، مسکوویت و کانی‌های رسی) و کانی‌های تبخیری هستند. الگوی نهشت نشان داد کانی‌های کربناته و سولفات‌ه عمدتاً در حاشیه پلایا و هالیت به دلیل حلالیت بالا در مرکز پلایا ته‌نشین شده است که بیانگر کنترل هیدروشیمی و مورفولوژی بر توزیع رسوبات است. شیران و همکاران (۲۰۲۱) تغییرات پارامترهای سطحی پلایای گاوخونی را در پاسخ به خشکسالی بلندمدت ۲۰۱۴-۲۰۱۸ با استفاده از شاخص‌های NDVI و LST بررسی کردند. با بهره‌گیری از روش یکپارچه مبتنی بر مدل فراکتال سلولی و تبدیل موجک پیوسته (CWT)، تغییرات معناداری در توزیع مکانی-زمانی LST و NDVI شناسایی شد. بیشترین ناهنجاری‌ها در ناحیه مرکزی پلایا، بخش‌های غربی و جنوبی، دریاچه نمک، تالاب‌ها و سطوح رسی مشاهده شد که با مناطق دارای بعد فراکتالی بالا و توپوگرافی پیچیده همخوانی دارد و نقش خشکسالی را در افزایش ناهمگنی سطحی تأیید می‌کند. ترابی و همکاران (۲۰۲۳) با استفاده از داده‌های حفاری در دو پلایای بزرگ ایران مرکزی، اولین مدل‌های سه‌بعدی نزدیک به سطح را ارائه کردند. نتایج نشان داد توزیع لایه‌ها نه تنها تابع مورفولوژی سنگ بستر است، بلکه لایه‌های گلی دقیقاً در حوضه‌های مرطوب‌تر شکل گرفته‌اند. مدل ۸ لایه‌ای وجود حداقل چهار دوره تغییر اقلیم شدید در کواترنر را نشان می‌دهد و تکامل پلایاهای ایران مرکزی را با نوسانات اقلیمی منطقه‌ای پیوند می‌دهد. با وجود مطالعات ارزشمند پیشین، تاکنون پژوهش جامع و هدفمندی در خصوص ارتباط بین ژئومورفولوژی پلایاهای ایران و پتانسیل معدنی آن‌ها، به‌ویژه با تمرکز بر عنصر لیتیوم، انجام نشده است. با توجه به رشد فزاینده تقاضای جهانی برای لیتیوم در صنایع باتری‌های لیتیوم-یونی، انرژی‌های تجدیدپذیر و فناوری‌های سبز، شناسایی منابع جدید و اقتصادی این عنصر در داخل کشور از اهمیت راهبردی برخوردار است.

پلایاهای طاهراآباد و بجستان در استان خراسان رضوی، به دلیل شرایط اقلیمی، زمین‌شناسی و ژئومورفولوژیکی منحصربه‌فرد، پتانسیل بالایی برای تمرکز لیتیوم و سایر عناصر ارزشمند دارند. تفاوت‌های بنیادین در رفتار مورفودینامیکی این دو پلایا به‌طوری‌که بجستان یک سیستم انتقالی پرانرژی و طاهراآباد یک سیستم کم‌انرژی تجمعی محسوب می‌شود نشان می‌دهد که مکانیسم‌های انتقال، تمرکز و تثبیت لیتیوم در آن‌ها متفاوت بوده و نیازمند تحلیل‌های ویژه است. نوآوری اصلی این پژوهش در رویکرد بین‌رشته‌ای آن نهفته است؛ به‌گونه‌ای که برای نخستین بار در ایران، ویژگی‌های ژئومورفولوژیک، رسوب‌شناسی و ژئوشیمیایی پلایاها به‌طور همزمان و با تمرکز ویژه بر لیتیوم بررسی می‌شود. این تحقیق با بهره‌گیری از مطالعات میدانی دقیق، نمونه‌برداری سیستماتیک و آنالیزهای آزمایشگاهی به شناسایی مکانیسم‌های تجمع لیتیوم در رسوبات پلایا می‌پردازد و مدل مفهومی جدیدی از ارتباط بین ساختارهای ژئومورفولوژیک و تمرکز این عنصر استراتژیک ارائه می‌دهد. علاوه بر این، استفاده از مدل‌سازی فضایی، داده‌های سنجش از دور، و تحلیل‌های اقلیمی-هیدرولوژیک، امکان پیش‌بینی پهنه‌های مستعد اکتشاف لیتیوم را فراهم می‌سازد. نتایج این پژوهش می‌تواند به‌عنوان الگویی علمی برای مطالعات مشابه در سایر پلایاهای ایران مورد استفاده قرار گیرد و در عین حال، راهکارهایی عملی برای اکتشاف هدفمند، بهره‌برداری پایدار و کاهش اثرات زیست‌محیطی فعالیت‌های معدنی ارائه دهد؛ امری که در نهایت به توسعه اقتصادی و صنعتی کشور کمک خواهد کرد.

مبانی نظری

پلایاها محیط‌های ژئومورفولوژیکی خاصی هستند که در حوضه‌های بسته و مناطق خشک و نیمه‌خشک شکل می‌گیرند و فاقد خروجی سطحی هستند. این ویژگی باعث می‌شود آب‌های ورودی تنها از طریق تبخیر حذف شوند و شرایط لازم برای تمرکز املاح فراهم گردد (مونک و همکاران^۱، ۲۰۱۶). از دیدگاه رسوب‌شناسی، پلایاها شامل رسوبات بسیار ریزدانه نظیر

^۱. Munk et al

^۲Rosen

رس، سیلت و تبخیری‌ها هستند که در دوره‌های مرطوب ته‌نشین شده و در دوره‌های خشک تحت تأثیر تبخیر مجدد قرار می‌گیرند (راسگن^۲، ۱۹۹۴). تغییرات اقلیمی کواترنری نقش مهمی در تکامل پلایاها داشته است، به‌طوری‌که نوسانات بارندگی و دما موجب تغییر در وسعت دریاچه‌ها، نوع رسوبات و شیمی آب شده است (جیمز و همکاران^۳، ۲۰۲۴). پلایاها به دلیل شرایط هیدرولوژیکی خاص خود، محیط‌های بسیار مناسبی برای تمرکز عناصر محلول از جمله لیتیم محسوب می‌شوند، زیرا تبخیر مداوم باعث افزایش غلظت یون‌ها در شورابه‌ها می‌شود (مونک و همکاران، ۲۰۱۶). لیتیم یکی از عناصر کمیاب است که رفتار ژئوشیمیایی آن موجب می‌شود در مراحل پایانی تبخیر آب‌های شور، در فاز مایع باقی بماند و در شورابه‌های غلیظ تجمع یابد (کسلر و همکاران^۴، ۲۰۱۲). منشأ لیتیم در شورابه‌های پلایا معمولاً ترکیبی از هوازدگی سنگ‌های آذرین، فعالیت‌های آتشفشانی و گردش آب‌های زیرزمینی در حوضه‌های بسته است (هافسترا و همکاران^۵، ۲۰۱۳). مطالعات ژئوشیمیایی نشان می‌دهد که نسبت Mg/Li و Cl/Li در شورابه‌ها شاخص مهمی برای ارزیابی اقتصادی بودن ذخایر لیتیم در پلایاها است (لی و همکاران^۱، ۲۰۱۹). در بسیاری از پلایاها، لیتیم نه تنها در شورابه‌ها بلکه در رسوبات رسی نیز ذخیره می‌شود که این موضوع به تعامل لیتیم با کانی‌های رسی مانند ایلیت و اسمکتیت مرتبط است (باری و همکاران^۲، ۲۰۱۸). دینامیک تبخیر و تغلیظ شورابه‌ها در پلایاها به شدت تحت کنترل دما، سرعت باد و عمق آب است که این عوامل مستقیماً بر نرخ تمرکز لیتیم اثر می‌گذارند (راسگن، ۱۹۹۴). مطالعات تطبیقی بین کوه‌های آند مرکزی نشان می‌دهد که پلایاهایی با حوضه‌های بسته عمیق‌تر و فعالیت تکتونیکی بیشتر، پتانسیل بالاتری برای ذخایر لیتیم دارند (هوستون و همکاران^۳، ۲۰۱۱).

روش پژوهش

این پژوهش از نظر هدف در زمره تحقیقات کاربردی قرار می‌گیرد، زیرا با هدف شناسایی و پهنه‌بندی مناطق مستعد تمرکز لیتیم در محیط‌های پلایایی و ارائه چارچوبی برای اکتشاف این عنصر در منطقه مورد مطالعه انجام شده است. از نظر ماهیت و روش، پژوهش حاضر توصیفی-تحلیلی و کمی بوده و بر پایه تلفیق داده‌های سنجش از دور، ژئومورفولوژی، ژئوشیمی، ژئوفیزیک و تحلیل‌های آماری و مکانی انجام شده است. در این تحقیق ابتدا داده‌های مکانی و زمین‌شناسی گردآوری و پردازش شده و سپس با استفاده از تحلیل‌های آماری و مدل‌سازی مکانی، روابط بین متغیرهای ژئومورفولوژیک، هیدروژئولوژیک و ژئوشیمیایی با پتانسیل تمرکز لیتیم مورد بررسی قرار گرفته است.

در این پژوهش، از نقشه‌های توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ و ۱:۵۰۰۰۰ سازمان نقشه‌برداری کشور و نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ سازمان زمین‌شناسی ایران، به همراه DEM استخراج‌شده از داده‌های SRTM، برای تحلیل پارامترهای ژئومورفولوژیک و عوامل مؤثر بر پتانسیل لیتیم استفاده شد. پردازش داده‌ها و استخراج لایه‌های مورفومتری در ArcGIS 10.4 و تحلیل‌های آماری همبستگی با بهره‌گیری از نرم‌افزارهای SPSS و R انجام گرفت. به منظور بررسی تغییرات زمانی-مکانی پلایاها، تصاویر چندطیفی Landsat 8، Sentinel-2 و ASTER پردازش و شاخص‌های طیفی مرتبط استخراج شد و نمونه‌برداری شبکه‌ای از رسوبات و آب‌های زیرزمینی مطابق روش‌های متداول مطالعات پلایاهای غنی از لیتیم انجام

³Jiménez-Bonilla et al

⁴Kesler et al

⁵Hofstra et al

¹Li et al

²Barrie et al

³Houston et al

پذیرفت (لاوستین و همکاران^۴، ۲۰۰۹؛ ریساجر و همکاران^۵، ۲۰۰۳). آنالیز ژئوشیمیایی نمونه‌ها با استفاده از ICP-MS و XRF جهت تعیین غلظت لیتیوم و عناصر همراه انجام شد (رالنسین^۶، ۲۰۱۴؛ دلیستانی^۷، ۲۰۰۱). همچنین، مطالعات کانی‌شناسی با XRD و SEM برای شناسایی کانی‌های لیتیوم‌دار و بررسی ریزساختار رسوبات صورت گرفت (گلدستین و همکاران^۸، ۲۰۱۸؛ بیش و همکاران^۹، ۱۹۸۹؛ مور و همکاران^{۱۰}، ۱۹۹۷). داده‌های ژئوشیمیایی حاصل به‌عنوان متغیر وابسته در تحلیل‌های آماری و مکانی با استفاده از SPSS و R مورد استفاده قرار گرفتند. داده‌های ژئوفیزیکی شامل مقاومت ویژه الکتریکی (ERT) و قطبش القایی (IP) و داده‌های هیدروژئولوژیکی شامل هدایت الکتریکی (EC)، PH و سطح آب زیرزمینی به‌منظور شناسایی محیط‌های شور، مسیرهای جریان آب زیرزمینی و نواحی مستعد تمرکز برین‌های لیتیوم‌دار مورد استفاده قرار گرفتند (لوک و همکاران^{۱۱}، ۱۹۹۶؛ باینلی و همکاران^{۱۲}، ۲۰۰۵). نتایج به‌عنوان لایه‌های مکمل در فرآیند مدل‌سازی پتانسیل معدنی به‌کار گرفته شدند و نقش مهمی در شناسایی مناطق با پتانسیل بالای اکتشاف لیتیوم ایفا کردند (کارانز^{۱۳}، ۲۰۰۹؛ بونهام-کارتر^{۱۴}، ۱۹۹۴).

آنالیزهای آزمایشگاهی

آنالیز XRD

آنالیز پراش پرتو ایکس (XRD) برای شناسایی کانی‌های موجود در رسوبات و پوسته‌های نمکی پلایاها، به‌ویژه کانی‌های رسی لیتیوم‌دار، مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش استانداردترین ابزار برای تعیین نوع و درصد کانی‌ها در مطالعات رسوب‌شناسی و کانی‌شناسی است (مور و همکاران، ۱۹۹۷؛ بیش و همکاران، ۱۹۸۹).

آنالیز XRF

آنالیز فلورسانس پرتو ایکس (XRF) برای تعیین ترکیب شیمیایی عناصر اصلی و فرعی نمونه‌ها استفاده می‌شود و نقش مهمی در شناسایی محیط‌های شور و تبخیری غنی از لیتیوم دارد (پاتس^۱، ۲۰۱۲؛ رولینسون^۲، ۲۰۱۴).

آنالیز ICP-MS

آنالیز ICP-MS برای اندازه‌گیری دقیق غلظت لیتیوم و عناصر کمیاب در نمونه‌های آب و رسوبات به‌کار می‌رود و به‌دلیل حساسیت بالا، ابزار اصلی مطالعات ژئوشیمی لیتیوم محسوب می‌شود (دلکسی^۳، ۲۰۰۱).

آنالیز SEM

میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) برای بررسی ریزساختار، مورفولوژی ذرات و شناسایی کانی‌های ریزدانه حاوی لیتیوم استفاده می‌شود (رید^۴، ۲۰۰۵).

⁴Lowenstein et al

⁵Risacher et al

⁶Rollinson

⁷Dellisanti

⁸Goldstein et al

⁹Bish et al

¹⁰Moore et al

¹¹Loke et al

¹²Binley et al

¹³Carranza

¹⁴Bonham-Carter

¹Potts

²Rollinson

³Dulski

⁴Reed

برای ارزیابی دقت مدل‌ها، داده‌های آزمایشگاهی و میدانی (شامل غلظت لیتیوم) به دو مجموعه آموزش (۷۰٪) و آزمون (۳۰٪) تقسیم می‌شوند.

تحلیل آماری چندمتغیره برای شناسایی متغیرهای مؤثر برای شناسایی متغیرهای مؤثر بر توزیع لیتیوم، از تحلیل آماری چندمتغیره استفاده می‌شود. در این مرحله، داده‌های حاصل از آنالیزهای آزمایشگاهی ICP-MS، XRF، XRD به عنوان متغیر وابسته و لایه‌های ژئومورفولوژیک و شاخص‌های طیفی به عنوان متغیرهای مستقل در نظر گرفته می‌شوند. تحلیل‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS انجام می‌شوند تا ارتباط بین متغیرها مشخص گردد. نتایج این تحلیل‌ها برای انتخاب متغیرهای ورودی به مدل‌های پیش‌بینی پتانسیل معدنی استفاده می‌شوند.

مدل تحلیل تفکیکی انعطاف‌پذیر^۵

تحلیل تفکیکی انعطاف‌پذیر یکی از روش‌های پیشرفته طبقه‌بندی است که در آن، مدل‌های رگرسیونی ناپارامتری در کنار تحلیل تفکیکی غیرخطی و تکنیک‌های طبقه‌بندی، در قالب یک چارچوب یکپارچه به کار گرفته می‌شوند (هستی و همکاران، ۱۹۹۶). این روش به دلیل استفاده از تبدیل‌های غیرخطی، توانایی بالاتری در تفکیک الگوهای پیچیده و غیرخطی نسبت به روش‌های سنتی دارد؛ به گونه‌ای که مرزهای طبقه‌بندی ایجادشده در آن، پیوسته‌تر و منعطف‌تر هستند (هستی و همکاران، ۱۹۹۴). افزون بر این، FDA برای داده‌هایی که از توزیع نرمال پیروی نمی‌کنند نیز کارایی بالایی از خود نشان می‌دهد (سولبرگ و همکاران، ۱۹۹۶).

مدل خطی تعمیم‌یافته آماری^۶

مطالعات انجام‌شده در (گوتهز و همکاران، ۲۰۱۵) نشان داد که مدل خطی تعمیم‌یافته آماری (GLM) در پیش‌بینی احتمال وقوع مخاطرات مؤثر هستند. این مدل‌ها به دلیل ماهیت رگرسیونی، برای متغیرهای عددی مناسب‌اند، اما به متغیرهای کم‌اهمیت و همبسته حساس بوده و وجود آن‌ها می‌تواند کارایی مدل را کاهش دهد (لی و همکاران، ۲۰۱۳). GLM، گسترشی از ساختار رگرسیون معمولی برای توزیع‌های غیرنرمال است و امکان مدل‌سازی روابط غیرخطی و ساده بین متغیرهای با توزیع گوسی و غیرگوسی را فراهم می‌کند (یوسف و همکاران، ۲۰۱۵؛ لی و همکاران، ۲۰۱۳).

مدل رگرسیون تقویت شده تعمیم‌یافته^۱

مدل‌های GBM یا BRT، ترکیبی از روش‌های آماری و یادگیری ماشین هستند که با هدف بهبود عملکرد یک مدل منفرد (درخت ساده) در مسائل دسته‌بندی غیرخطی توسعه یافته‌اند (نقیبی و همکاران، ۲۰۱۸؛ پارک و همکاران، ۲۰۱۹). مطابق (کردستانی و همکاران، ۲۰۱۸)، این مدل‌ها در هنگام آموزش، اهمیت عوامل مؤثر را اولویت‌بندی می‌کنند. این ویژگی باعث می‌شود مدل نسبت به داده‌های پرت حساس نباشد و داده‌های ناقص نیز بتوانند از طریق درخت‌های رگرسیونی و

⁵Flexible Discriminant Analysis – FDA

⁶Solberg et al

⁷GLM

⁸Goetz et al

⁹Li et al

¹GBM

²Park et al

³Märker et al

⁴Chen et al

⁵Qiu et al

الگوریتم‌های تقویتی اصلاح شده و دقت مدل افزایش یابد (یوسف و همکاران، ۲۰۱۵؛ پارک و همکاران، ۲۰۱۹). در مرحله تقویت، تابعی پارامتری به صورت متوالی بر روی گرادینان تابع خطا برازش می‌شود تا مدل‌های جمع‌شونده رگرسیونی به طور تدریجی ساخته شوند (مارکر و همکاران^۳، ۲۰۱۶).

تحلیل عملکرد و کارایی الگوریتم‌ها

در این پژوهش، برای سنجش عملکرد الگوریتم‌ها از شاخص‌های آماری مختلف استفاده شده است. این شاخص‌ها شامل حساسیت (SST)، ویژگی (SPF)، دقت (ACC) و شاخص کاپا می‌باشند که هر یک نقش مهمی در ارزیابی کارایی مدل‌ها دارند. استفاده از این شاخص‌ها امکان بررسی جامع و مقایسه‌ای بین الگوریتم‌های مختلف را فراهم می‌کند. روش محاسبه این شاخص‌های ارزیابی بر اساس معادلات مشخصی انجام می‌شود که پایه و اساس تحلیل‌های آماری پژوهش را تشکیل می‌دهند. این معادلات به طور دقیق عملکرد مدل‌ها را در شناسایی نمونه‌های درست و نادرست مورد سنجش قرار می‌دهند و به تفسیر نتایج حاصل از مدل‌ها کمک می‌کنند (چن و همکاران^۴، ۲۰۱۸).

$$\begin{aligned} \text{SST} &= \text{TP}/(\text{TP}+\text{FN}) && \text{رابطه ۱} \\ \text{SPF} &= \frac{\text{TN}}{\text{TN}+\text{FP}} && \text{رابطه ۲} \\ \text{ACC} &= \frac{\text{TP}+\text{FP}+\text{TN}+\text{FN}}{\text{TP}+\text{FP}+\text{TN}+\text{FN}} && \text{رابطه ۳} \\ \text{Kappa} &= \frac{\text{Pobs}-\text{Pexp}}{1-\text{Pexp}} && \text{رابطه ۴} \end{aligned}$$

در مسائل دسته‌بندی، TP (مثبت واقعی) تعداد نمونه‌هایی است که به درستی به عنوان نمونه‌های مثبت تشخیص داده شده‌اند، و TN (منفی واقعی) تعداد نمونه‌هایی است که درست به عنوان نمونه‌های منفی طبقه‌بندی شده‌اند. در مقابل، FP (مثبت کاذب) نشان‌دهنده نمونه‌هایی است که اشتباهاً به عنوان مثبت پیش‌بینی شده‌اند در حالی که در حقیقت منفی هستند و FN (منفی کاذب) نمونه‌هایی است که اشتباهاً به عنوان منفی پیش‌بینی شده‌اند در حالی که در واقع مثبت‌اند. این چهار خروجی از ماتریس سردرگمی برای سنجش عملکرد الگوریتم‌های طبقه‌بندی به کار می‌روند و پایه محاسبه شاخص‌های ارزیابی مانند دقت، حساسیت و ویژگی هستند (کیو و همکاران^۵، ۲۰۲۴).

مساحت زیر منحنی ROC (AUC)

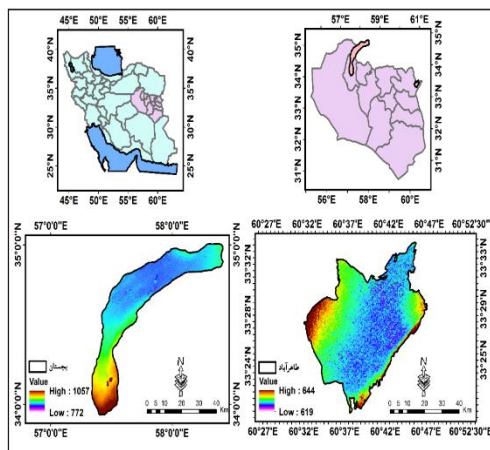
مساحت زیر منحنی ROC یک شاخص عددی است که عملکرد کلی مدل‌های طبقه‌بندی دودویی را نشان می‌دهد. منحنی ROC با رسم نرخ مثبت واقعی (TPR) در مقابل نرخ مثبت کاذب (FPR) برای تمامی آستانه‌های ممکن ساخته می‌شود و AUC مساحت زیر این منحنی را اندازه‌گیری می‌کند. این شاخص مستقل از یک آستانه خاص است و قدرت مدل در تشخیص نمونه‌های مثبت و منفی را به طور کلی بیان می‌کند (فاوکت^۲، ۲۰۰۶). مقدار AUC بین ۰ تا ۱ قرار دارد؛ مقدار ۱ نشان‌دهنده عملکرد بی‌نقص مدل و مقدار ۰/۵ نشان‌دهنده عملکرد برابر با انتخاب تصادفی است. AUC در واقع احتمال این را اندازه می‌گیرد که یک نمونه مثبت تصادفی امتیاز پیش‌بینی بالاتری نسبت به یک نمونه منفی تصادفی داشته باشد. این خاصیت باعث می‌شود AUC یک معیار مناسب برای سنجش توانایی تفکیک مدل باشد (بردلی^۱، ۱۹۹۷).

¹Fawcett

²Bradley

محدوده مورد مطالعه

پلایای بجستان یکی از مهم‌ترین پلایاهای بخش شرق و شمال شرق ایران است که در پهنه خشک استان خراسان رضوی قرار دارد و به دلیل داشتن رسوبات تبخیری، نمکی و رسی از اهمیت ژئومورفولوژیک و پدولوژیک برخوردار است. مطالعات رسوب‌شناسی و تکامل خاک در این پلایا نشان داده‌اند که این واحد زمین‌ریختی نقش مهمی در ذخیره‌سازی اطلاعات تکامل محیطی و تغییرات اقلیمی گذشته دارد (غمزده گنجی و همکاران، ۲۰۱۷). این حوضه در مرکز شهرستان بجستان در استان خراسان رضوی با مختصات تقریبی $34^{\circ}30'59''$ N ، $58^{\circ}11'04''$ E واقع شده و در مرکز حوضه زمین‌ریختی پلایاهای منطقه قرار گرفته است. پلایای بجستان ناحیه‌ای کشیده با جهت‌گیری شمال شرقی-جنوب غربی و طول حدود ۱۴۰ کیلومتر است. ارتفاع این منطقه بین ۸۰۱ متر (کمترین نقطه) و به‌طور میانگین ۸۱۵ متر می‌باشد. این منطقه بخشی از کفه کویر نمک است و در محدوده نم‌کاری به مساحت $34/030$ کیلومترمربع قرار دارد. پلایا طاهرآباد در دهستان پایین ولایت، بخش مرکزی، شهرستان تربت‌حیدریه، استان خراسان رضوی قرار دارد و با مختصات حدود $35^{\circ}15'20''$ N ، $35^{\circ}15'20''$ E مشخص می‌شود. این منطقه جزو حوضه‌های داخلی نئوژن محسوب می‌شود و در آن سنگ‌های اولترابازیک دیده می‌شود. طاهرآباد به عنوان زهکش شبکه‌های سطحی منطقه شناخته می‌شود و بخش عمده آن در خاک ایران واقع است. از نظر تقسیم‌بندی حوضه‌های آبریز شش گانه اصلی کشور، طاهرآباد در حوضه آبریز شرق ایران قرار دارد. این حوضه شامل نوار باریکی در شرق و جنوب شرقی کشور با مساحت $111/845$ کیلومترمربع (معادل ۷ درصد وسعت ایران) است. حوضه‌های آبریز مهم این منطقه شامل طاهرآباد، نم‌زار خواف، و هامون-بیرجند می‌باشند. متوسط بارندگی سالانه در این حوضه ۱۲۰ میلی‌متر و حجم معادل آب آن به $13/5$ میلیارد مترمکعب می‌رسد (ترشیزیان و همکاران، ۱۳۹۶). موقعیت منطقه مورد مطالعه در شکل ۱ ارائه شده است.



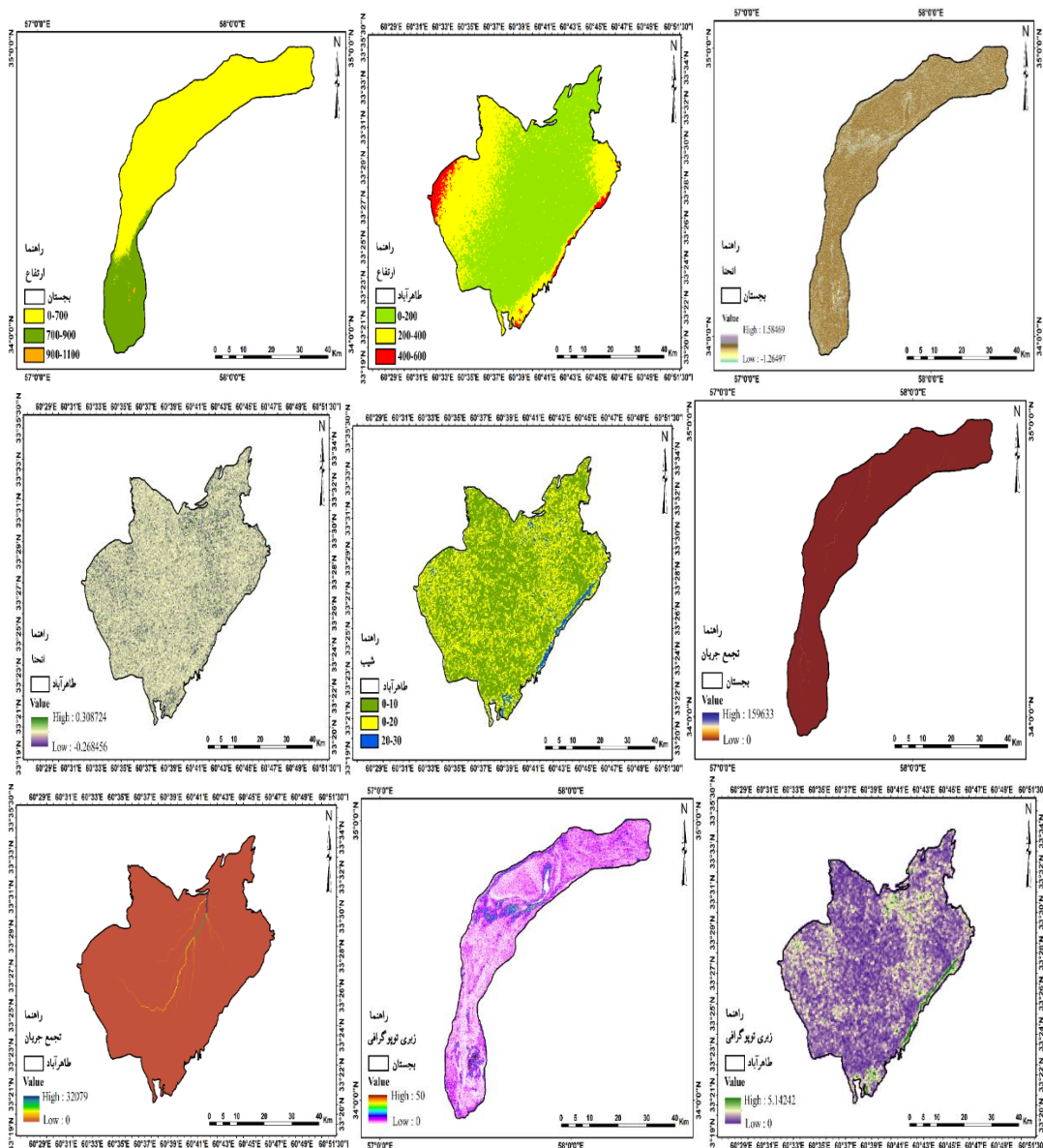
شکل ۱: موقعیت جغرافیایی حوضه‌های بجستان و طاهرآباد

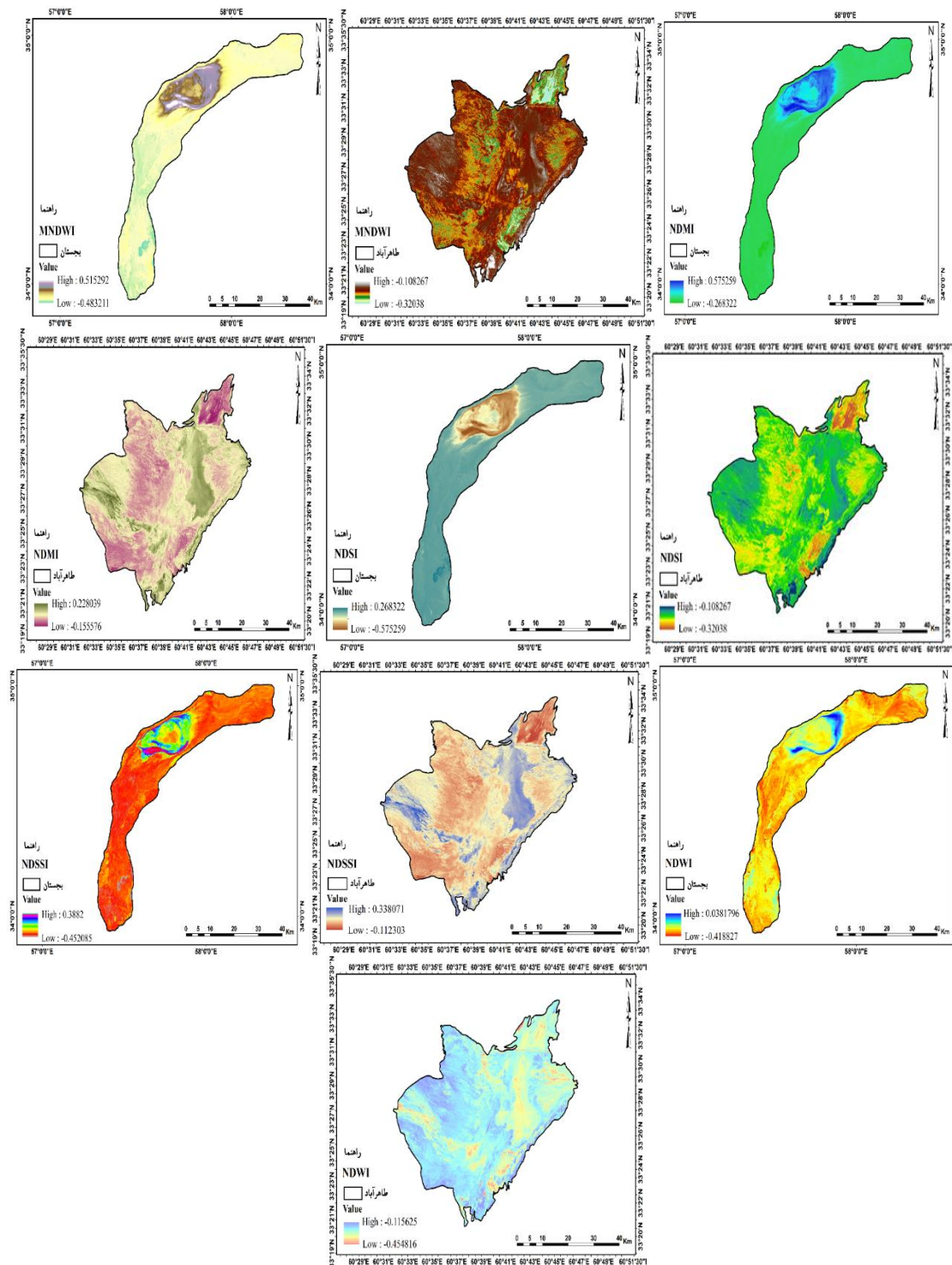
یافته‌ها

عوامل ژئومورفولوژیک موثر بر گسترش لیتیم

نتایج نشان می‌دهد ژئومورفولوژی و توپوگرافی نقش تعیین‌کننده‌ای در الگوی توزیع و تمرکز لیتیم ایفا می‌کنند، به‌گونه‌ای که حوضه‌های مرتفع، بسته و با تبخیر بالا بیشترین پتانسیل غنی‌شدگی را دارند. حوضه بجستان با دامنه ارتفاعی بیشتر، شیب و زبری بالاتر، یک سیستم انتقال‌محور است که هوازدگی، آزادسازی و انتقال لیتیم از سنگ‌های منبع به نواحی پست و تبخیری را تقویت می‌کند. در مقابل، حوضه طاهرآباد با ارتفاع کمتر و انرژی ژئومورفولوژیک پایین‌تر، الگوی تجمع‌محور و نگهدارنده‌تری از لیتیم نشان می‌دهد. تحلیل انحنای شیب و موقعیت توپوگرافیک نشان می‌دهد نواحی پست و همگرا

مسیرهای اصلی تمرکز رواناب و جریان‌های زیرسطحی در هر دو حوضه هستند. این نواحی با افزایش زمان ماند آب و تشدید واکنش‌های سنگ-آب، شرایط مساعدی برای تمرکز یون لیتیم، به‌ویژه در محیط‌های تبخیری، فراهم می‌کنند. در بحستان، تنوع شیب و مسیرهای تجمعی طولانی‌تر موجب انتقال لیتیم به پهنه‌های پایین‌دست گسترده‌تر شده است. در مقابل، در طاهراباد تمرکز لیتیم عمدتاً به گودال‌ها و مناطق پست با توپوگرافی هموار محدود می‌شود. زبری بالای توپوگرافی در بحستان با افزایش انرژی ژئومورفیک و کارایی زهکشی، نقش اصلی در آزادسازی و انتقال لیتیم دارد. در طاهراباد، زبری کمتر و دشت‌های آبرفتی گسترده، محیطی کم‌انرژی و رسوب‌گذار برای تجمع و نگهداری لیتیم فراهم می‌کند. شاخص MNDWI تجمع پایدار آب و نقش تله‌های ژئومورفولوژیک را در طاهراباد و انتقال لیتیم به نواحی کم‌انرژی‌تر را در بحستان تأیید می‌کند. همخوانی الگوهای NDSI، NDSSi و NDWI نشان می‌دهد تبخیر، زمان ماند آب و چرخه‌های ترسالی-خشکسالی، در تعامل با توپوگرافی، کنترل اصلی تمرکز لیتیم در این دو حوضه را بر عهده دارند (شکل ۲).



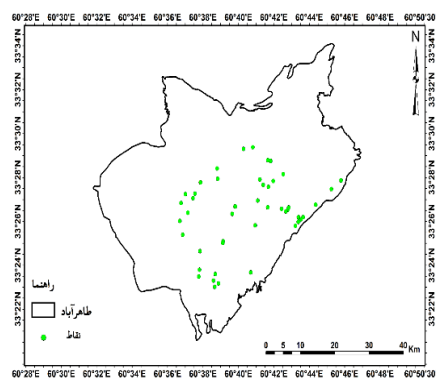


شکل ۲: نقش عوامل ژئومورفولوژیک در کنترل پراکندگی و تمرکز لیتیم در پلایای بجستان و طاهرآباد

نتایج آزمایشگاهی پلایا طاهر آباد

برای مطالعات ژئوشیمیایی پلایای طاهرآباد، نمونه‌برداری در دو مرحله انجام شد که شامل برداشت ۳۰ نمونه از ۱۵ نقطه در اعماق ۰/۵- و ۱-۰/۵ متر و ۲۵ نمونه از ۷ نقطه تا عمق ۳ متر بود. همچنین ۲۹ نمونه سطحی به مجموعه نمونه‌های

عمق ۰/۵-۰ متر افزوده شد. تغییرات غلظت لیتیم در تمامی نمونه‌ها تحلیل و دقت مدل‌های درون‌یابی مقایسه گردید (شکل ۳). پس از حفر چاهک‌ها، در مرحله نخست ۱۵ حلقه چاهک یک‌متری حفر و از هر چاهک در فواصل نیم‌متری، ۳۰ نمونه به روش شیار برداشت و برای آنالیز ICP ارسال شد. نتایج این مرحله مبنای طراحی مرحله دوم نمونه‌برداری قرار گرفت. در مرحله دوم، ۷ حلقه چاهک با عمق‌های متغیر (در مجموع ۱۳/۵ متر) حفر و ۲۵ نمونه در فواصل نیم‌متری برداشت گردید. تمام نمونه‌های مرحله دوم نیز به روش ICP آنالیز شدند.



شکل ۳: نقشه نقاط نمونه برداری

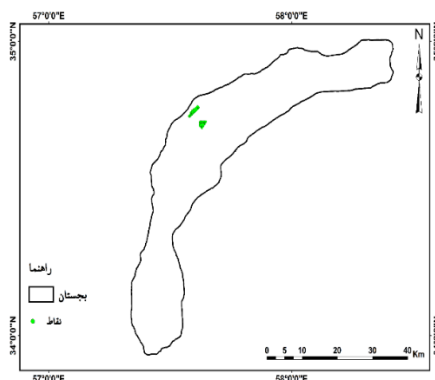
نتایج نمونه‌برداری عمقی نشان می‌دهد که غلظت لیتیم و عناصر همراه آن در لایه‌های مختلف رسوبی تغییرات قابل توجهی دارد که بیانگر نقش مؤثر فرآیندهای انحلال، مهاجرت و تمرکز یونی است. این تغییرات عمقی به‌طور مستقیم تحت تأثیر شرایط هیدروژئوشیمیایی، رطوبت رسوبات و شدت تبخیر قرار دارند. بررسی لایه‌ها نشان می‌دهد که تبادل یونی و تمرکز شیمیایی در برخی افق‌ها تشدید می‌شود. طراحی مناسب نمونه‌برداری امکان شناسایی الگوی رفتاری لیتیم در محیط‌های سطحی و زیرسطحی را فراهم کرد. نتایج تحلیلی این تغییرات در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱: نتایج بررسی تعداد نمونه‌های گرفته شده در عمق‌های مختلف

تعداد نمونه	Depth(m)-new
۲۱	۰/۵
۲۱	۱
۶	۱/۵
۳	۵
۲	۲/۵
۲	۳
۵۵	Grand Total

نتایج آزمایشگاهی پلایا بستان

نتایج نمونه‌برداری ژئوشیمی آبراهه‌ای در حوضه بستان نشان می‌دهد که تمرکز عناصر، به‌ویژه لیتیم، به‌طور معناداری با موقعیت آبراهه‌ها و ویژگی‌های زمین‌شناسی سنگ کف مرتبط است. تراکم بالاتر نمونه‌ها در دامنه‌های جنوبی حوضه، الگوهای غنی‌شدگی مشخص‌تری را در مجاورت محدوده‌های اکتشافی نشان می‌دهد. نمونه‌های برداشت‌شده از حاشیه مسیل‌های فعال، نمایانگر نقش مؤثر فرآیندهای انتقال و تمرکز رسوبات ریزدانه هستند. حذف مواد درشت‌دانه و تمرکز بر بخش ریزدانه (الک ۴۰) باعث افزایش دقت نتایج ژئوشیمیایی شد. در مجموع، تحلیل ۶۴ نمونه رسوب آبراهه‌ای جدول ۲ و شکل ۴ الگوی فضایی معناداری از پتانسیل ژئوشیمیایی حوضه بستان را نشان می‌دهد.



شکل ۴: نقشه نقاط نمونه برداری

آنالیز نمونه‌های رودخانه‌ای

از مجموع ۶۴ نمونه رسوب آبراهه‌ای برداشت‌شده در مرحله نخست مطالعات، حدود ۲۰ درصد از نمونه‌های محدوده واقع در اطراف پلایا انتخاب گردید. از این تعداد، ۱۲ نمونه به‌منظور انجام آنالیز XRF و سه نمونه برای آزمایش XRD و تجزیه شیمیایی به آزمایشگاه ارسال شد. این آزمایش‌ها در آزمایشگاه‌های مجهز آنالیز مواد معدنی دانشکده علوم زمین دانشگاه فردوسی مشهد انجام شد و نتایج حاصل برای تعیین ترکیب عنصری و شناسایی کانی‌های موجود در رسوبات مورد استفاده قرار گرفت.

نتایج آنالیز XRF و هضم اسیدی نشان‌دهنده ناهمگنی ژئوشیمیایی قابل توجه در رسوبات محدوده مورد مطالعه است. اکسیدهای اصلی بیانگر دامنه تغییرات گسترده MgO ، CaO ، Na_2O و Cl نسبت به سایر ترکیبات است. مقایسه با میانگین پوسته بالایی قاره‌ای، غنی‌شدگی قابل ملاحظه TiO_2 و غنی‌شدگی خفیف SiO_2 ، Al_2O_3 ، K_2O ، Na_2O و P_2O_5 را نشان می‌دهد. در مقابل، اکسیدهای FeO ، MgO و CaO نسبت به پوسته بالایی دچار تهی‌شدگی هستند. این الگو بازتاب‌دهنده مقاومت کانی‌های تیتان‌دار در برابر هوازدگی و رفتار متحرک Ca ، Mg و Fe در شرایط هیدروژئوشیمیایی منطقه است.

بحث

آنالیز مؤلفه‌های اصلی

نتایج تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) نشان می‌دهد کنترل ژئوشیمیایی رسوبات پلایاهای بجستان و طاهرآباد حاصل برهم‌کنش چند فرآیند متمایز است که شدت آن‌ها به‌طور مستقیم به شرایط ژئومورفولوژیک و هیدرولوژیک هر حوضه وابسته است. عامل اول با بار عاملی بالای Na ، Cl ، Mg و Sr و Ni نمایانگر غلبه فرآیندهای تبخیری-شور است که در بجستان به دلیل انرژی ژئومورفولوژیک بالاتر، مسیرهای جریان طولانی‌تر و تبخیر شدیدتر، گستره فضایی وسیع‌تری دارد. عدم همبستگی معنادار لیتیم با این عامل نشان می‌دهد که تمرکز لیتیم برخلاف عناصر قلیایی-قلیایی خاکی، صرفاً تابع تبخیر نیست. عامل دوم که با Li_2O ، K_2O ، Al_2O_3 و Fe_2O_3 مشخص می‌شود، نقش کلیدی کانی‌های رسی و منشأ فلسیک را در تمرکز لیتیم برجسته می‌کند.

این عامل در پلایای طاهرآباد غالب‌تر بوده و بازتاب شرایط کم‌انرژی، شیب‌های ملایم، زبری پایین و زمان ماند طولانی سیالات است که جذب و تثبیت لیتیم در رسوبات ریزدانه را تسهیل می‌کند. در بجستان، عامل دوم بیشتر بیانگر مرحله آزادسازی و انتقال لیتیم از سنگ‌های منشأ در ارتفاعات به نواحی پست است تا تمرکز نهایی. عامل سوم (مرتبط با سولفور و منشأ مافیک-سولفیدی) و عامل چهارم (ZnO) ارتباط مستقیمی با لیتیم نشان نمی‌دهند و بازتاب ورودی‌های ژئوشیمیایی مستقل و موضعی هستند. در مجموع، PCA تأیید می‌کند که لیتیم رفتاری متمایز از Na و Mg دارد و تمرکز آن عمدتاً تابع

شرایط رسوبی کم‌انرژی، فازهای رسی و زمان ماند سیالات است؛ الگویی که تفاوت بنیادی بجستان به‌عنوان حوضه انتقال‌محور و طاهرآباد به‌عنوان حوضه تجمع‌محور را به‌خوبی تبیین می‌کند (جدول ۳).

جدول ۳: آنالیز مولفه‌های اصلی نمونه‌های رسوب

پارامتر	عامل ۱	عامل ۲	عامل ۳	عامل ۴
Cr ₂ O ₃	-۰.۰۱۴۲۵۲۶	۰.۰۲۲۵۲۴	-۰.۰۵۲۲۳۸	۰.۱۹۹۴۸۴
Li ₂ O	۰.۰۲۷۷۲۲۸	۰.۰۷۸۴۵۳۳	۰.۱۸۷۳۰۶	-۰.۰۲۳۴۶۶۷
Na	۰.۰۹۱۳۶۹۷	۰.۰۷۷۱۸۵	۰.۱۴۱۴۴۸	-۰.۰۱۹۹۶۵۱
TiO ₂	۰.۰۵۰۵۹۲۰	۰.۰۹۳۰۸۰۴	-۰.۰۱۲۸۱۹	۰.۱۶۳۵۹۳
LOI@۹۵۰C	۰.۰۹۲۷۸۴۹	-۰.۰۲۸۶۱۴۲	۰.۰۷۲۶۷۳	-۰.۰۰۲۹۶۰۲
Al ₂ O ₃	-۰.۰۳۰۶۴۵	۰.۰۹۴۱۸۰۵	۰.۰۲۷۹۳۶	۰.۰۳۸۰۲۶
CaO	-۰.۰۰۹۴۹۸۳	-۰.۰۷۹۲۷۹۲	۰.۰۲۸۰۲۹۶	۰.۰۳۵۲۷۷۷
Cu	-۰.۰۵۶۳۲۳۲	۰.۰۶۱۷۴۵۸	-۰.۰۳۸۶۷۰۷	-۰.۰۰۸۴۲۶۳
MgO	۰.۰۶۹۰۱۴۷	-۰.۰۰۲۰۱۲۸	۰.۰۴۹۴۳۷۳	۰.۰۲۴۳۵۷۰
NiO	۰.۰۶۲۹۴۲۱	-۰.۰۱۰۳۲۳۸	۰.۰۴۵۳۴۰۳	۰.۰۳۳۸۳۶۶
SiO ₂	-۰.۰۸۹۰۲۶۰	۰.۰۱۲۹۰۱۵	-۰.۰۲۷۲۵۱۴	-۰.۰۰۸۴۰۵۰
V ₂ O ₅	۰.۰۸۲۷۳۴۶	۰.۰۰۸۳۱۲	-۰.۰۸۵۵۷۳۹	۰.۰۲۶۹۵۷۷
Cl	۰.۰۹۶۱۷۴۰	-۰.۰۰۲۹۶۳۸	-۰.۰۱۳۴۲۱۷	-۰.۰۱۲۲۵۸۶
Fer ₂ O ₃	-۰.۰۴۲۸۲۷۳	۰.۰۷۸۸۲۰۲	۰.۰۷۲۵۶۳	۰.۰۰۷۶۳۷۴
MnO	-۰.۰۳۴۱۵۴۶	۰.۰۱۶۲۹۸۹	۰.۰۰۱۳۲۲۹	-۰.۰۰۸۲۹۳۶
Pr ₂ O ₃	۰.۰۲۶۱۳۰۳	۰.۰۷۲۰۸۶۹	۰.۰۴۸۴۷۳۷	۰.۰۲۷۹۹۹۱
SrO	۰.۰۵۹۱۳۳۵	-۰.۰۱۵۴۰۸۳	۰.۰۳۶۵۲۶۷	۰.۰۱۸۱۴۸۴
ZnO	۰.۰۲۸۳۷۷۴	۰.۰۱۶۶۹۷۸	۰.۰۱۰۵۹۶۱	۰.۰۸۸۸۴۶۰
BaO	۰.۰۴۷۹۶۸۹	-۰.۰۳۵۱۱۱۹	۰.۰۱۶۰۰۵۰	۰.۰۲۱۹۵۶۴
K ₂ O	-۰.۰۱۵۲۶۴۰	۰.۰۹۵۰۵۰۵	۰.۰۰۱۳۰۳۷	۰.۰۰۶۰۶۸۵
SO ₃	۰.۰۲۸۶۸۳۰	-۰.۰۰۵۸۹۳۴	۰.۰۸۷۳۲۵۴	۰.۰۰۴۴۱۷۸

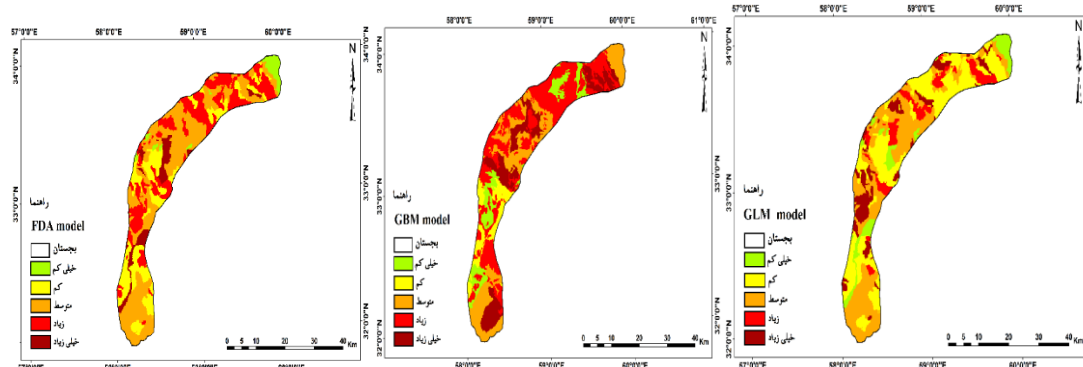
نتایج مدل‌سازی

نتایج پهنه‌بندی پتانسیل لیتیم با استفاده از مدل‌های FDA، GLM و GBM در پلاهای بجستان

همگرایی نتایج حاصل از سه مدل FDA، GLM و GBM در شناسایی پهنه‌های با پتانسیل بالا تا خیلی بالا در مرکز، جنوب و جنوب‌شرق پلاهای بجستان نشان می‌دهد که تمرکز لیتیوم در این حوضه تابع یک رابطه غیرتصادفی و نظام‌مند بین عوامل ژئومورفولوژیک، زمین‌شناسی و ژئوشیمیایی است. این الگو با نتایج مطالعات پیشین در محیط‌های پلاهایی و تبخیری ایران و جهان همخوانی بالایی دارد. یافته‌های این پژوهش با نتایج ترابی و همکاران (۲۰۲۳) در پلاهای مرکزی ایران هم‌راستا است؛ به‌طوری‌که آن‌ها نیز نشان دادند نواحی پست، کم‌شیب و تبخیری، به‌ویژه در حوضه‌های بسته، بیشترین پتانسیل تمرکز عناصر محلول را دارند. تمرکز پهنه‌های با پتانسیل بالا در دشت‌های پست بجستان، مؤید نقش محیط‌های پلاهایی به‌عنوان زون‌های نهایی انباشت عناصر است.

از سوی دیگر، نتایج حاضر با مطالعه عرفانیان کاسب و همکاران (۲۰۲۰) در پلاهای شاهرخت-یزدان قابل مقایسه است؛ آن‌ها نشان دادند که رسوبات تبخیری و ریزدانه (گچ، هالیت و رس‌ها) در مرکز پلاها بیشترین نقش را در تمرکز عناصر ایفا می‌کنند. در بجستان نیز همبستگی مثبت Li با K₂O، Al₂O₃ و TiO₂ تأیید می‌کند که کانی‌های رسی و واحدهای سیلیکاته ریزدانه، میزبان اصلی لیتیوم هستند. مطالعه سرمست و همکاران (۲۰۱۷) بر وارنیش‌های صحرایی نیز نشان داد که افزایش هوازدگی شیمیایی و حضور کانی‌های رسی نظیر اسمکتیت و ایلیت، ظرفیت بالایی برای جذب عناصر لیتوفیل

فراهم می‌کند. این نتیجه با تفسیر مدل‌های GLM و GBM در پژوهش حاضر همخوان است که تمرکز لیتیوم را به نواحی با رسوبات ریزدانه و هوازده نسبت می‌دهند نه صرفاً به محیط‌های تبخیری شور. از دیدگاه ساختاری و هیدروژئولوژیکی، نقش گسل‌ها و مسیرهای جریان در انتقال عناصر محلول، با نتایج روستا و همکاران (۲۰۱۹) در دیپایر نمکی نصرآباد قابل مقایسه است؛ آن‌ها نشان دادند که ساختارهای زمین‌شناسی کنترل اصلی بر جابجایی سیالات و تمرکز موضعی عناصر دارند. در بجنستان نیز هم‌راستایی پهنه‌های پرتانسیل با شکستگی‌ها، به‌ویژه در خروجی مدل GBM، این نقش را تأیید می‌کند. همچنین، تطابق الگوهای مکانی به‌دست‌آمده با شاخص‌های رطوبتی و تبخیری، با نتایج شیران و همکاران (۲۰۲۱) در پلایای گاوخونی همخوانی دارد؛ آن‌ها نشان دادند که تغییرات NDWI، NDMI و NDSI مستقیماً بر الگوی تجمع مواد محلول در پلایاها اثر می‌گذارد. در پژوهش حاضر نیز تمرکز لیتیوم در نواحی با شرایط تبخیری و رطوبتی خاص، همین مکانیسم را تأیید می‌کند. در نهایت، نواحی مرتفع و پرانرژی بیشتر نقش مناطق تأمین و انتقال را داشته و شرایط انباشت پایدار عناصر را فراهم نمی‌کنند. در مجموع، همگرایی نتایج سه مدل FDA، GLM و GBM با یافته‌های شش مطالعه پیشین نشان می‌دهد که تمرکز لیتیوم در پلایای بجنستان حاصل برهم‌کنش آزادسازی در ارتفاعات، انتقال هیدروژئوشیمیایی کارآمد و انباشت نهایی در محیط‌های پلایایی کم‌انرژی و ریزدانه است. این تطابق بین مطالعه‌ای، اعتبار علمی پهنه‌بندی ارائه‌شده را به‌طور قابل توجهی افزایش داده و مرکز، جنوب و جنوب‌شرق بجنستان را به‌عنوان اصلی‌ترین زون‌های هدف اکتشافی لیتیوم معرفی می‌کند (شکل ۵).



شکل ۵: نقشه نهایی پهنه‌بندی پتانسیل لیتیوم در پلایای بجنستان با مدل‌های FDA، GBM و GLM

نتایج پهنه‌بندی پتانسیل لیتیوم با استفاده از مدل‌های FDA، GBM و GLM در پلایای طاهر آباد

نتایج حاصل از سه مدل FDA، GBM و GLM نشان‌دهنده الگوی فضایی منسجم و همگرایی قابل توجهی در توزیع پتانسیل لیتیوم در پلایای طاهرآباد است. هر سه مدل، با وجود تفاوت در ساختار محاسباتی، بیشترین پتانسیل لیتیوم را در مرکز پلایا و بخش‌های جنوبی و جنوب‌شرقی و کمترین پتانسیل را در حاشیه‌های شمالی و شمال‌غربی شناسایی کرده‌اند. این همگرایی بین مدلی نشان می‌دهد که تمرکز لیتیوم در طاهرآباد تابع کنترل‌های زمین‌شناسی، ژئوشیمیایی و محیط رسوبی مشخص بوده و حاصل رفتار تصادفی داده‌ها نیست. الگوی تمرکز لیتیوم در نواحی مرکزی پلایا با نتایج هوستون و همکاران^۱ (۲۰۱۱) در سالارهای آمریکای جنوبی همخوانی دارد؛ آن‌ها نشان دادند که سیستم‌های هیدرولوژیکی بسته،

¹Houston et al

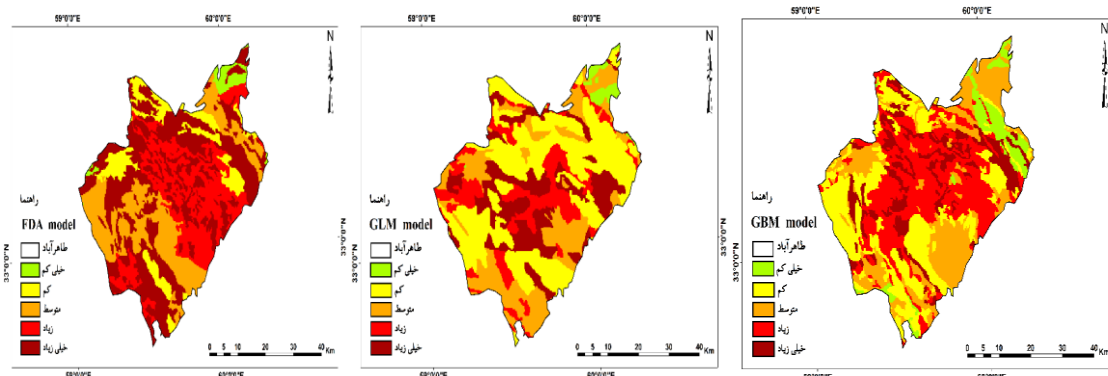
²Munk et al

³Dinis et al

⁴Bradley et al

⁵Zhang et al

تبخیر شدید و زمان ماند بالای سیالات، مهم‌ترین عوامل تمرکز لیتیوم در محیط‌های پلایایی هستند. در طاهرآباد نیز شرایط مشابهی شامل تبخیر شدید، سطح ایستایی کم عمق و تجمع طولانی مدت سیالات شور مشاهده می‌شود. نقش کلیدی کانی‌های رسی و رسوبات ریزدانه در تمرکز لیتیوم که در هر سه مدل، به‌ویژه FDA و GBM برجسته است با نتایج مونک و همکاران^۲ (۲۰۱۶) مطابقت دارد. آن‌ها نشان دادند که جذب لیتیوم عمدتاً توسط فازهای رسی و سیلیکاته صورت می‌گیرد و لیتیوم لزوماً رفتاری مشابه عناصر تبخیری کلاسیک ندارد. همبستگی مثبت Li با Al_2O_3 و K_2O و همبستگی منفی آن با CaO در طاهرآباد، این تفسیر را تقویت می‌کند. از دیدگاه ژئوشیمیایی، نتایج حاضر با مطالعه دینیس و همکاران^۳ (۲۰۲۰) در پلایاهای غنی از لیتیوم هم‌راستا است؛ آن‌ها نشان دادند که محیط‌های کربناته به دلیل شست‌وشوی بالا و ظرفیت جذب پایین، نقش کمتری در تمرکز لیتیوم دارند. این موضوع به‌خوبی توضیح‌دهنده پتانسیل پایین لیتیوم در حاشیه‌های شمالی و شمال غربی پلایای طاهرآباد است که دارای CaO بالاتر و زهکشی فعال‌تر هستند. از نظر ساختاری، تمرکز پهنه‌های پرتانسیل در بخش‌های جنوبی و جنوب شرقی پلایا با نتایج بردلی و همکاران^۴ (۲۰۱۷) قابل مقایسه است؛ آن‌ها نقش گسل‌ها و شکستگی‌ها را در هدایت سیالات غنی از عناصر قلیایی به نواحی پست تأیید کردند. در مدل GBM طاهرآباد نیز، هم‌راستایی زون‌های با پتانسیل بالا با ساختارهای زمین‌شناسی، بیانگر اثر مستقیم این عوامل در تمرکز لیتیوم است. همچنین، گستردگی پهنه‌های با پتانسیل متوسط تا زیاد در مرکز پلایا که به‌ویژه در مدل GLM مشاهده می‌شود، با نتایج ژانگ و همکاران^۵ (۲۰۱۸) سازگار است؛ آن‌ها نشان دادند که تمرکز لیتیوم در پلایاها معمولاً فرآیندی پیوسته و ناحیه‌ای است و به یک نقطه محدود نمی‌شود. در مجموع، نتایج سه مدل FDA، GBM و GLM به‌صورت همگرا نشان می‌دهد که پلایای طاهرآباد یک سیستم انباشت‌محور و کم‌انرژی است که در آن، محیط پلایایی-تبخیری، فراوانی کانی‌های رسی، سیستم هیدرولوژیکی بسته و نقش ساختارهای زمین‌شناسی مهم‌ترین کنترل‌کننده‌های تمرکز لیتیوم هستند. این همخوانی با مطالعات بین‌المللی، اعتبار علمی پهنه‌بندی انجام‌شده را تقویت کرده و مرکز و بخش‌های جنوبی و جنوب شرقی پلایای طاهرآباد را به‌عنوان اصلی‌ترین زون‌های هدف اکتشافی لیتیوم معرفی می‌کند (شکل ۶).



شکل ۶: نقشه نهایی پهنه‌بندی پتانسیل لیتیوم در پلایای طاهرآباد با تلفیق مدل‌های FDA، GLM و GBM

نتایج این پژوهش که بر همگرایی داده‌های ژئوشیمیایی، PCA و مدل‌های یادگیری ماشین تأکید دارد، با مطالعات انجام‌شده در محیط‌های پلایایی-تبخیری جهان همخوانی بالایی نشان می‌دهد گارت^۱ (۲۰۰۴) و کسler و همکاران^۲ (۲۰۱۲) نشان دادند که تمرکز لیتیوم در حوضه‌های بسته، تابع اقامت طولانی سیالات و تبخیر شدید است؛ وضعیتی که به‌خوبی در پلایای طاهرآباد مشاهده می‌شود. همچنین، نقش کلیدی رسوبات رسی به‌عنوان میزبان اصلی لیتیوم که در این مطالعه از طریق

¹Garrett

²Kesler et al

³Hofstra et al

⁴Bradley et al

⁵Tran et al

⁶Carranza

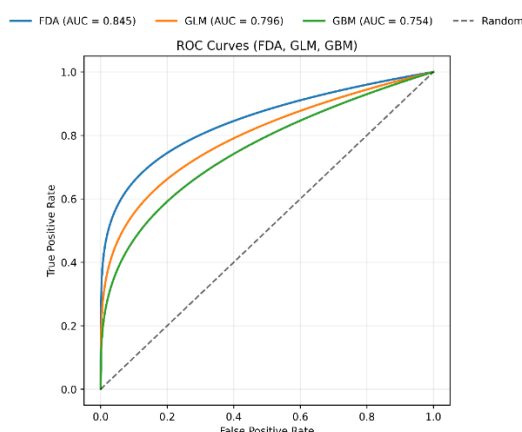
همبستگی Li_2O با Al_2O_3 و K_2O مشخص شد، با نتایج هافسرا و همکاران^۳ (۲۰۱۳) و بردلی و همکاران^۴ (۲۰۱۳) در سالارهای غنی از لیتیوم هم‌راستا است. تاران و همکاران^۵، ۲۰۲۰ نیز تأکید کردند که گسل‌ها و شکستگی‌ها با افزایش گردش سیالات، تمرکز عناصر محلول را تقویت می‌کنند؛ عاملی که در طاهرآباد به‌وضوح در پهنه‌بندی GBM منعکس شده است. از منظر مدل‌سازی، همگرایی مدل‌های آماری و یادگیری ماشین در این تحقیق با یافته‌های کارانزا^۶ (۲۰۱۱) همخوان است که استفاده همزمان از مدل‌های خطی و غیرخطی را برای کاهش عدم قطعیت مکانی توصیه می‌کند. در مجموع، نتایج این پژوهش جایگاه پلایای بجستان و به‌ویژه طاهرآباد را در چارچوب جهانی سامانه‌های تبخیری مستعد لیتیوم تأیید می‌کند.

تحلیل تطبیقی عملکرد مدل‌های FDA، GLM و GBM بر اساس شاخص‌های آماری ارزیابی

نتایج کمی نشان می‌دهد هر سه مدل FDA، GLM و GBM عملکرد قابل قبولی در پیش‌بینی مناطق مستعد تمرکز لیتیوم دارند، اما اختلاف معناداری میان آن‌ها مشاهده می‌شود. بالاترین مقدار $\text{AUC} = 0/845$ مربوط به مدل FDA است که نسبت به GLM $0/769$ و GBM $0/754$ قدرت تفکیک‌پذیری بالاتری را نشان می‌دهد. شاخص Kappa نیز این برتری را تأیید می‌کند؛ به‌طوری‌که مقدار $0/63$ برای FDA بیانگر توافق خوب تا بسیار خوب با واقعیت بوده، در حالی که این شاخص برای GLM و GBM به‌ترتیب به $0/54$ و $0/47$ کاهش یافته است. از نظر دقت کلی، مدل FDA با $\text{ACC} = 0/815$ بیش از $0/81$ طبقه‌بندی صحیح را ثبت کرده و بالاتر از GLM $0/755$ و GBM $0/715$ قرار می‌گیرد. مقدار بالای $\text{SST} = 0/82$ در FDA نشان‌دهنده توان بالای این مدل در شناسایی صحیح زون‌های واقعاً دارای پتانسیل لیتیوم است، در حالی که $\text{SPF} = 0/81$ بیانگر کنترل مناسب خطای مثبت کاذب می‌باشد. کاهش همزمان SST و SPF در مدل‌های GLM و GBM بیانگر افزایش عدم قطعیت و ریسک از دست رفتن زون‌های امیدبخش است. در مجموع، برتری کمی مدل FDA در تمام شاخص‌ها نشان می‌دهد این مدل توانمندتر از دو مدل دیگر در بازنمایی روابط پیچیده و غیرخطی محیط‌های پلایایی بوده و همگرایی نتایج سه مدل، به‌ویژه در بخش‌های مرکزی و جنوبی پلایاها، زون‌های اولویت‌دار اکتشاف لیتیوم را با اطمینان بالاتری مشخص می‌کند (جدول ۴ و شکل ۷).

جدول ۴: مقایسه شاخص‌های ارزیابی عملکرد مدل‌های FDA، GLM و GBM در پهنه‌بندی پتانسیل لیتیوم

مدل‌ها	SST	SPF	ACC	Kappa	AUC (ROC)
FDA	0/820	0/810	0/815	0/630	0/845
GLM	0/760	0/750	0/755	0/540	0/796
GBM	0/720	0/710	0/715	0/470	0/754



شکل ۷: منحنی ROC و مساحت زیر منحنی (AUC) مدل‌های مورد استفاده در مطالعه

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که تمرکز لیتیم در پلایاهای بجستان و طاهرآباد حاصل برهم‌کنش مستقیم و ساختارمند فرایندهای ژئومورفولوژیکی و شیمیایی-کانی‌شناسی است. در پلایای بجستان، ارتفاع بالاتر (تا حدود ۱۱۰۰ متر) و زبری توپوگرافی زیاد، با افزایش انرژی ژئومورفیک، موجب تشدید هوازدگی و آزادسازی مؤثر یون Li^+ از سنگ‌های منبع شده و نقش غالبی در تولید و انتقال لیتیم ایفا می‌کند. همبستگی مثبت لیتیم با K_2O ، Al_2O_3 و TiO_2 نشان می‌دهد که منشأ اصلی لیتیم آزادشده، کانی‌های سیلیکاته-رسی حاصل از هوازدگی سنگ‌های آذرین، دگرگونی و رسوبات ریزدانه است. در مقابل، پلایای طاهرآباد با ارتفاع کمتر و زبری پایین‌تر، اگرچه شدت آزادسازی اولیه لیتیم کمتری دارد، اما به‌واسطه شیب‌های ملایم، انحنای همگرا و محیط‌های بسته، شرایط پایدارتری برای نگهداری و تمرکز شیمیایی لیتیم فراهم می‌کند؛ به‌گونه‌ای که غلظت لیتیم در برخی نواحی به حدود ۶۸ ppm می‌رسد. شاخص‌های NDSSI و NDSI تمرکز شوری و تبخیر شدید را در بخش‌های مرکزی و جنوبی هر دو پلایا تأیید می‌کنند که کانون‌های اصلی غنی‌شدگی لیتیم محسوب می‌شوند. همبستگی منفی لیتیم با CaO و BaO نشان می‌دهد که محیط‌های کربناته و پرانرژی، پتانسیل نگهداری کمتری برای لیتیم دارند. تحلیل NDWI، NDMI و MNDWI نشان می‌دهد که بجستان دارای شرایط خشک و تبخیری پایدار و طاهرآباد دارای رفتار چرخه‌ای ترسالی-خشکسالی است که به تفاوت الگوهای تمرکز لیتیم منجر می‌شود. نتایج مدل‌سازی نشان داد هر سه مدل یادگیری ماشین دارای $\text{AUC} > 0.75$ هستند، اما مدل FDA با $\text{AUC} = 0.845$ و $\text{Kappa} = 0.63$ بهترین توان تفکیک و توافق واقعی را ارائه داده و ماهیت نیمه‌غیرخطی و فضایی کنترل لیتیم را به‌خوبی بازنمایی کرده است. در مجموع، بجستان به‌عنوان یک سیستم انتقال‌محور پرانرژی و طاهرآباد به‌عنوان یک سیستم تجمع‌محور کم‌انرژی معرفی می‌شوند و این تفاوت بنیادی، هم الگوهای ژئوشیمیایی و هم عملکرد برتر مدل FDA در شناسایی پهنه‌های مستعد لیتیم را به‌طور فرآیندمحور توجیه می‌کند. با توجه به نتایج حاصل از تحلیل‌های ژئومورفولوژیکی، ژئوشیمیایی و مدل‌سازی پتانسیل لیتیم در پلایاهای بجستان و طاهرآباد، در این بخش مجموعه‌ای از پیشنهادات کاربردی و مدیریتی ارائه می‌شود. مناطق مرکزی و جنوبی پلایا که دارای NDSSI و NDSI بالا و غلظت لیتیم تا ۶۸ ppm هستند، به‌عنوان زون‌های حساس ژئوشیمیایی معرفی شوند، هرگونه برداشت بی‌رویه آب‌های زیرسطحی یا شورابه‌ها که باعث کاهش زمان ماند آب شود، باید ممنوع گردد، حفظ شرایط نیمه‌بسته پلایا برای تداوم فرآیند تبخیر و تمرکز لیتیم ضروری است، توصیه می‌شود برداشت در پایان دوره‌های خشک انجام شود تا بیشترین غلظت شیمیایی حاصل گردد و از رقیق‌شدگی جلوگیری شود. همچنین بروزرسانی نقشه‌های پتانسیل لیتیم بر اساس تصاویر چندزمانه، توقف برداشت در دوره‌هایی که

شاخص‌ها نشان‌دهنده اختلال در چرخه طبیعی پلایا باشند، استفاده از روش‌های برداشت کم‌عمق و غیرمخرب و پرهیز از حفاری‌های عمیق و گسترده که تعادل هیدروژئوشیمیایی را بر هم می‌زند پیشنهاد می‌گردد.

منابع

- احمدی، ح. (۱۳۶۷). ژئومورفولوژی کاربردی. تهران: انتشارات دانشگاه تهران، شماره ۱۹۵۴، ۵۷۵ ص.
- ترشیزیان، ح. (۱۳۸۸). تکامل شورابه‌ها و تشکیل کانی‌های تبخیری در پلایای ساغند ایران مرکزی و مقایسه آن با دریاچه بزرگ نمک و حوضه دره مرگ در ایالات متحده. *مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران*، ۱۷(۱)، ۴۳-۵۴.
- ترشیزیان، ح. (۱۳۸۹). رسوب‌شناسی و زمین‌ریخت‌شناسی پلایای ساغند، ایران مرکزی، استان یزد. *پژوهش‌های چینه‌نگاری و رسوب‌شناسی*، ۲۷(شماره پیاپی ۴۳)، ۱۳۷-۱۶۲.
- ترشیزیان، ح.، موسوی حرمی، ر. (۱۳۷۸). تجزیه و تحلیل ریخت‌شناسی پلایای بجستان و اطراف آن در شمال خاوری ایران. *فصلنامه تحقیقات علوم جغرافیایی*، شماره‌های ۵۲ و ۵۳، ۲۱۹-۲۴۰.
- ترشیزیان، م.، رضایی، م.، امینی، ع. (۱۳۹۶). بررسی ویژگی‌های اقلیمی و بیلان منابع آب در حوضه‌های بسته شرق و مرکز ایران (مطالعه موردی: مل طاهرآباد، نمکزار خواف و هامون-بیرجند). *فصلنامه پژوهش‌های جغرافیایی طبیعی*، ۴۹(۲)، ۳۲۱-۳۳۸.
- بیات، م.، فتوحی، م.، نگارش، ح.، محمدی، ع. (۱۴۰۱). اقلیم و محیط دیرینه پلایای جازموریان در کواترنری پایانی بر اساس مطالعه مغزه‌های رسوبی. *پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی*، سال ۱۱، شماره ۲، ۸۸-۱۰۷.
- نوروزی، ر.، افتخاری، س. م.، احمدآبادی، ع. (۱۴۰۴). تحلیل فرکتالی آشفستگی هندسی میکروفرم‌های گلی در دشت اشتهارد با استفاده از مدل محیط-مساحت. *پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی*، پذیرفته‌شده، انتشار آنلاین.
- Ahmadi, H. (1988). *Applied geomorphology*. Tehran: University of Tehran Press, Publication No. 1954, 575 p. [in Persian]
- Barrie, C.T., Huminicki, D.M.C., McKenzie, J.M., 2018. The inter-relationship between lithium brines and clays in the playa lake environment. *Ore Geology Reviews*, **99**, 123–139. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.06.012>
- Binley, A., & Kemna, A. (2005). DC resistivity and induced polarization methods. *Hydrogeophysics*, 129–156. https://doi.org/10.1007/1-4020-3102-5_5
- Bish, D. L., & Reynolds, R. C. (1989). Sample preparation for X-ray diffraction. *Reviews in Mineralogy*, 20, 73–99.
- Bonham-Carter, G. F. (1994). *Geographic information systems for geoscientists: Modelling with GIS*. Oxford: Pergamon Press, 398 p.
- Bradley, A. P. (1997). The use of the area under the ROC curve in the evaluation of machine learning algorithms. *Pattern Recognition*, 30(7), 1145–1159.
- Bradley, D. C., McCauley, A. D., & Stillings, L. L. (2013). Mineral-deposit model for lithium–cesium–tantalum pegmatites and brines. *USGS Scientific Investigations Report*.
- Bradley, D. C., McCauley, A. D., & Stillings, L. L. (2017). Mineral-deposit model for lithium-rich brines. *USGS*.
- Carranza, E. J. M. (2009). Geochemical anomaly and mineral prospectivity mapping in GIS. *Elsevier*, 368 p.
- Carranza, E. J. M. (2011). Geocomputation of mineral exploration targets. *Computers & Geosciences*, 37, 1907–1916.
- Chen, W., Shahabi, H., Panahi, M., Khosravi, H., Golebiewski, M. S., & Zhang, Y. (2018). Performance evaluation of random forest, boosting and bagging algorithms for landslide susceptibility mapping. *Catena*, 164, 154–165.
- Dill, H. G. (2001). The geology of aluminum phosphates and sulphates of the alunite group minerals: A review. *Earth-Science Reviews*, 53(1–2), 35–93. [https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(00\)00035-0](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(00)00035-0)

- Dill, H.G., 2001. The geology of aluminum phosphates and sulphates of the alunite group minerals: A review. *Earth-Science Reviews*, 53(1–2), 35–93. [https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(00\)00035-0](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(00)00035-0)
- Dinis, P. A., Silva, C. M., & Cunha, P. P. (2020). Geochemical behavior of lithium in evaporitic and continental saline environments. *Journal of Geochemical Exploration*.
- Dulski, P. (2001). ICP-MS applied to the analysis of geological samples. *Handbook of Instrumental Techniques in Analytical Chemistry*, 289–313.
- Erfanian Kasab, A., Rajabi, M., & Arian, M. (2020). Evaporitic sedimentation, brine geochemistry and playa evolution in the Shahrokht–Yazdan Playa, eastern Iran. *Carbonates and Evaporites*.
- Erfanian Kasab, A., Vahdati Nasab, H., Lahijani, H., & Kehl, M. (2020). Evaporitic sedimentation, brine geochemistry and playa evolution in the Shahrokht–Yazdan Playa, eastern Iran–western Afghanistan. *Carbonates and Evaporites*, 35, 1–17. <https://doi.org/10.1007/s13146-020-00592-3>
- Fawcett, T. (2006). An introduction to ROC analysis. *Pattern Recognition Letters*, 27(8), 861–874.
- Garrett, D. E. (2004). Handbook of lithium and natural calcium chloride. *Elsevier*.
- Ghamzeh Ganji, M., Kehl, M., Frechen, M., & Khormali, F. (2017). Mineralogical and sedimentological evidence for depositional phases and erosion–accumulation processes in arid plains of Iran. *Quaternary International*, 429, 178–193. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2016.11.028>
- Goetz, J., Brenning, A., Roberts, W., & Van Westen, C. J. (2015). Supervised classification of landslide susceptibility using generalized linear models, decision trees and support vector machines. *Landslides*, 12(3), 481–499.
- Goldstein, J. I., Newbury, D. E., Michael, J. R., Ritchie, N. W. M., Scott, J. H. J., & Joy, D. C. (2018). Scanning electron microscopy and X-ray microanalysis. *Springer*, 550 p.
- Hastie, T., & Tibshirani, R. (1996). Discriminant analysis by Gaussian processes. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B*, 58(4), 661–679.
- Hastie, T., Tibshirani, R., & Buja, A. (1994). Flexible discriminant analysis. *Journal of the American Statistical Association*, 89(428), 1255–1270.
- Hofstra, A. H., Todorov, T. I., Mercer, C. N., Adams, D. T., & Marsh, E. E. (2013). Silicate weathering and brine evolution in continental lithium brines. *Economic Geology*, 108, 1691–1707.
- Hofstra, A.H., Todorov, T.I., Mercer, C.N., Adams, D.T., Marsh, E.E., 2013. Silicate weathering and brine evolution. *Economic Geology*, **108**, 1691–1709. <https://doi.org/10.2113/econgeo.108.8.1691>
- Houston, J., Butcher, A., Ehren, P., Evans, K., & Godfrey, L. (2011). The evaluation of brine lithium resources in salar environments. *Economic Geology*, 106, 1225–1246.
- Houston, J., Butcher, A., Ehren, P., Evans, K., Godfrey, L., 2011. The evaluation of brine prospects and resources in salar basins: A hydrogeological approach. *Economic Geology*, 106(6), 1137–1162. <https://doi.org/10.2113/econgeo.106.6.1137>
- Jiménez-Bonilla, A., Giráldez-Cervera, J.V., Aguilar-Camacho, J., Sánchez-García, D., 2024. Hydrological evolution of a Mediterranean playa lake under climate variability and human influence. *Hydrology and Earth System Sciences*, **28**, 5311–5330. <https://doi.org/10.5194/hess-28-5311-2024>
- Kesler, S. E., Gruber, P. W., Medina, P. A., Keoleian, G. A., Everson, M. P., & Wallington, T. J. (2012). Global lithium resources: Relative importance of pegmatite, brine and other deposits. *Ore Geology Reviews*, 48, 55–69.
- Kesler, S.E., Gruber, P.W., Medina, P.A., Keoleian, G.A., Everson, M.P., Wallington, T.J., 2012. Global lithium resources: Relative importance of pegmatite, brine and other deposits. *Ore Geology Reviews*, **48**, 55–69. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2012.05.006>
- Kordestani, M., Arian, M., & Pourghasemi, H. R. (2018). Landslide susceptibility mapping using boosted regression tree and random forest models in Kurdistan Province, Iran. *Geocarto International*, 33(10), 1055–1075.
- Last, W. M. (2002). Geolimnology of saline lakes. *Geoscience Canada*, 29, 75–88.

- Li, C., Cui, P., & Zhang, J. (2013). Application of generalized linear model for landslide susceptibility assessment. *Environmental Earth Sciences*, 70(6), 2821–2834.
- Loke, M. H., & Barker, R. D. (1996). Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections. *Geophysical Prospecting*, 44(1), 131–152. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1996.tb00142.x>
- Lowenstein, T. K., Risacher, F., & Fritz, B. (2009). Lithium brine deposits: Geochemistry, origin, and evolution. *Economic Geology*, 104(3), 389–412. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.104.3.389>
- Maghsoud Bayat, M., Fotouhi, S., Negarash, H., & Mohammadi, A., 2022. Paleoclimate and paleoenvironment of the Jazmurian Playa during the Late Quaternary based on sediment core studies. *Quantitative Geomorphology Research*, 11(2), 88–107. [in Persian]
- Marker, M., & Elith, J. (2016). Boosted regression trees for ecological modeling and prediction. *Ecology Letters*, 19(4), 468–485.
- Moore, D. M., & Reynolds, R. C. (1997). X-ray diffraction and the identification and analysis of clay minerals. *Oxford University Press*, 378 p.
- Munk, L. A., Hynek, S. A., Bradley, D. C., Boutt, D., Labay, K., & Jochens, H. (2016). Lithium brines: A global perspective on resources, geology, and production. *Economic Geology*.
- Munk, L.A., Hofstra, A.H., Bradley, D.C., Mars, J.C., Labay, K.A., Jochens, H., 2016. Lithium brines: Origin, characteristics, and global distribution. *Economic Geology*, 111(6), 1389–1411. <https://doi.org/10.2113/econgeo.111.6.1389>
- Naghizadeh, A., & Akbari, A. (2018). Comparing generalized boosted regression trees and random forests for predicting groundwater level in a confined aquifer. *Journal of Hydrology*, 558, 203–216.
- Norouzi, R., Eftekari, S. M., & Ahmadabadi, A., 2025. Fractal analysis of geometric disorder of mud microforms in the Eshtehard Plain using the perimeter–area model. *Quantitative Geomorphology Research*, In Press, Online Publication. [in Persian]
- Park, S. B., Kim, K. H., & Kim, Y. H. (2019). Machine learning-based prediction of mineral prospectivity using generalized boosted models and random forest. *Applied Earth Science*, 128(2), 195–204.
- Potts, P. J., & West, M. (2012). Evaluation of the performance of X-ray fluorescence spectrometry for the analysis of major and trace elements in geological materials. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 27(11), 1935–1947.
- Qiu, X., Zhang, X., & Li, C. (2024). A comprehensive review of evaluation metrics for classification models in remote sensing and earth sciences. *Remote Sensing of Environment*, 298, 113797.
- Reed, S. J. B. (2005). Electron microprobe analysis and scanning electron microscopy in geology. *Cambridge University Press*, 256 p.
- Risacher, F., Alonso, H., & Salazar, C. (2003). The origin of brines and salts in Chilean salars: A hydrochemical review. *Earth-Science Reviews*, 63(3–4), 249–293. [https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(03\)00037-0](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(03)00037-0)
- Rollinson, H. R. (2014). *Using geochemical data: Evaluation, presentation, interpretation*. London: Routledge, 384 p.
- Rosen, M.R., 1994. The importance of groundwater in playas: A review of playa classifications and processes. *Geological Society of America Special Paper*, 289, 1–18. <https://doi.org/10.1130/SPE289-p1>
- Rousta, M., Khoshnoodmotlagh, S., & Motagh, M. (2019). Surface deformation analysis of the Nasrabad buried salt diapir (central Iran) using InSAR time-series techniques. *Journal of Asian Earth Sciences*, 181, 103861.
- Sarmast, M., Kehl, M., Frechen, M., & Lahijani, H. (2017). Desert varnish characteristics and weathering indicators as evidence of landform evolution in arid environments of central Iran (Jiroft region). *Catena*, 158, 94–110. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.06.017>
- Shabani Araghi, A., & Azizi, G., 2023. Investigation of sedimentary evolution and paleoclimate based

- on sedimentological characteristics and elemental analysis in the Damghan Playa. *Quantitative Geomorphology Research*, 12(1), 95–113. [in Persian]
- Shiran, A., Roustae, I., Olafsson, H., & Zhang, H. (2021). Spatio-temporal assessment of NDVI and land surface temperature changes under prolonged drought conditions in the Gavkhouni Playa, central Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 143(1–2), 113–130. <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03412-0>
- Solberg, A. H. S., Jain, A. K., & Taxt, T. (1996). A comparative study of different methods for classification of satellite images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 34(5), 1133–1145.
- Tarshizian, H. (2009). Evolution of brines and formation of evaporite minerals in the Saghand Playa, central Iran, and comparison with the Great Salt Lake and Death Valley Basin, USA. *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy*, 17(1), 43–54. [in Persian]
- Tarshizian, H. (2010). Sedimentology and geomorphology of the Saghand Playa, central Iran, Yazd Province. *Stratigraphy and Sedimentology Research*, 27 (Serial No. 43), 137–162. [in Persian]
- Tarshizian, H., & Mousavi Harami, R. (1999). Morphological analysis of the Bajestan Playa and its surrounding areas in northeastern Iran. *Quarterly Journal of Geographical Sciences Research*, Nos. 52–53, 219–240. [in Persian]
- Tarshizian, M., Rezaei, M., & Amini, A. (2017). Investigation of climatic characteristics and water resource balance in closed basins of eastern and central Iran (Case study: Taherabad Salt Flat, Khaf Salt Flat, and Hamun–Birjand). *Quarterly Journal of Natural Geography Research*, 49(2), 321–338. [in Persian]
- Torabi, S., Arian, M., Ghorashi, M., & Rajabi, M. (2023). Near-surface three-dimensional geological modeling of central Iranian playas: Implications for Quaternary evolution and sedimentary architecture. *Journal of Asian Earth Sciences*, 245, 105568.
- Torabi, S., Roustae, I., Vahdati Nasab, H., & Olafsson, H. (2023). Near-surface 3D stratigraphic modeling of central Iranian playas based on borehole data: Implications for Quaternary evolution and sediment distribution. *Journal of Asian Earth Sciences*, 245, 105568. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2023.105568>
- Tran, T., Lu, J., & Zhang, Y. (2020). Structural control on fluid flow and element enrichment in closed evaporitic basins. *Journal of Geochemical Exploration*, 210, 106446.
- Vahdati Nasab, H., & Hashemi, M. (2016). Playas and Middle Paleolithic settlement of the Iranian Central Desert: The discovery of the Chah-e Jam Middle Paleolithic site. *Quaternary International*, 408, 22–34. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.11.117>
- Youssef, A. M., Pourghasemi, H. R., & Sefry, S. A. E. (2015). Application of GIS-based weights of evidence, certainty factor, and generalized linear model for landslide susceptibility mapping. *Arabian Journal of Geosciences*, 8(11), 9323–9339.
- Zhang, W., Yan, J., Li, Q., & Wang, Y. (2018). Spatial distribution and enrichment mechanisms of lithium in closed-basin playa systems. *Journal of Geochemical Exploration*, 190, 1–14.