



Analysis of Morphology, Morphotectonics, and Morphometry of the Kalut Salt Domes in Northeast Ardakan (Central Iran)

Mohamad Sharifi Paichoon¹ , Gholam Ali Mozafari² , Golamreaza Tajbakhsh³ , Esmail Mirzaei manesh⁴ 

1. (Corresponding Author) Department of Geography, Yazd University, Yazd, Iran.

Email: mscharifi@yazd.ac.ir

2. Department of Geography, Yazd University, Yazd, Iran.

Email: gmozafari@yazd.ac.ir

3. Department of Geology, Yazd University, Yazd, Iran.

Email: tajbakhsh@yazd.ac.ir

4. Department of Geography, Yazd University, Yazd, Iran.

Email: mirzaie@gmail.com

Article Info

Article Type:

Research Article

Article History:

Received:

3 Nov 2025

Received in revised form:

13 Feb 2026

Accepted:

8 May 2026

pp.1-27

Keywords:

Salt domes,

Diapirism,

Geomorphology,

Morphometric indices,

Tectonic activity,

Morphotectonic

ABSTRACT

The Kalut salt domes in the northeast and southeast of Ardakan are among the most prominent expressions of salt diapirism in Central Iran, forming complex landscapes through interactions with active tectonics and dissolution processes. In this study, by integrating field data, satellite imagery, and GIS analyses, the morphology, morphometry, and morphotectonics of 19 selected domes (14 in the northeast and 5 in the southeast) were examined. Surface geomorphology results revealed a high abundance of salt karst features, including linear karrens, numerous sinkholes, salt polygons, cauliflower-shaped forms, and unstable cliffs, which mainly developed under differential dissolution and structural fractures. River morphotectonic indices (SL, Smr, and VF) indicated moderate to relatively high tectonic activity in the region, with observable effects on drainage patterns and river imposition on some domes. Morphometric analyses showed that in the northeast, elongation and geometric irregularity are largely controlled by strike-slip faults, while the southeast domes exhibit greater rounding and elongation. Overall, the results confirm the decisive role of active tectonics and surface dissolution in controlling the geometry, evolution, and environmental consequences of the Kalut salt domes.

Cite this article: Sharifi Paichoon, M., Mozafari, G., Tajbakhsh, G. R., Mirzaie manesh, E., (2026). Analysis of Morphology, Morphotectonics, and Morphometry of the Kalut Salt Domes in Northeast Ardakan (Central Iran). *Quantitative Geomorphological Research*, 15(1), 1-27.

Doi: [10.22034/gmpj.2026.582046.1610](https://doi.org/10.22034/gmpj.2026.582046.1610)

Extended Abstract

Introduction

Landslide is considered as one of the mass movements, which is the downward movement of a mass of rock, debris and soil on the slope under the influence of gravity. Among the factors that cause the creation and spread of landslides, we can mention the intensity and duration of rainfall, vegetation, topography, soil type, geology, hydrology and human activity. Most of the country of Iran consists of mountainous regions, for this reason, one of the most important natural disasters in Iran is landslides, which every year play a very important role in the destruction of communication roads, residential houses, pastures and gardens, as well as It has erosion and sediment transport in the basins of the country. The Margon watershed in the northwest of Fars province is one of the basins that, due to the natural (geomorphological and geological) and human conditions, has a high capacity for the creation and expansion of landslides. Therefore, the aim of this survey is to map the risk of landslides in the Margon watershed using machine algorithms.

Methodology

In this study, for zoning the risk of landslides in the studied area, from 12 independent variables including DEM, Slope, Distance from the river, Drainage density, Vegetation, Land use, Lithology, Soil type, average annual Rainfall, Distance from the road, Terrain Ruggedness Index and Topographic Wetness Index are used. To prepare a map of the occurrence and non-occurrence of landslides as a dependent variable, the integration of Google Earth data, field observations and recording of landslide and non-slide points with GPS device was used and a total of 119 landslide points were identified. The Create Random Feature tool in ArcGIS software was also used to determine the non-occurrence points of landslides, and 99 non-slide points were considered to model the sensitivity of landslide occurrence. The data is divided into two groups in R software using dismo package and kfold method (70% equivalent

to 83 slide and 69 no slide) and validation (30% equivalent to 36 slide and 30 no slide) and RF, GLM and SVM is run on them. ROC curve and Kappa coefficient were used to evaluate the sensitivity map.

Results and discussion

The variable of Topographic Roughness Index (TRI) and Topographic Wetness Index (TWI) with a VIF value higher than 10 were collinear with other variables, and as a result, they were excluded from the work process. The relative importance of the variables was obtained in the Support Vector Machine and Random Forest models (Distance from the Road) and in the Generalized Linear Model (Slope). By combining the results of these three different models, it is possible to use the strengths of each model and increase the overall prediction accuracy. This ensemble approach helps to provide more accurate and reliable landslide susceptibility maps. In total, using the ensemble of three landslide prediction models (Generalized Linear Regression, Support Vector Machine and Random Forest) can lead to providing more accurate and reliable prediction results. The results of the Random Forest model with the value of the area under the curve (AUC=0.98) and the Kappa coefficient (Kappa=0.739) compared to the Support Vector Machine model with the value of the area under the curve (AUC=0.91) and the Kappa coefficient (Kappa=0.638) and the model A Generalized Linear Model with the value of the area under the curve (AUC=0.79) and Kappa coefficient (Kappa=0.428) has more accurately predicted the probability of landslide occurrence. In other words, models including Random Forest model and Support Vector Machine performed similarly and identified similar landslide prone areas.

Conclusion

The studied area is active in terms of landslides and is influenced by a combination of geomorphological and human factors. There is no clear relationship between DEM and the occurrence of

landslides, so landslides have been observed at low and medium DEM. Regarding the slope, the occurrence of landslides increases up to a slope of 30% due to loose formations and human activities, but at higher slopes due to rock formations and the reduction of human activity, there is a decreasing trend. Proximity to waterways and high permeability of the soil in these areas are likely to cause landslides. increases. Also, the high density of drainage and erosion of rivers over time causes the spread of landslides. In areas with poor vegetation, landslides are more likely to occur, and land use changes, such as road construction and agricultural expansion, exacerbate soil instability. In terms of lithology, more than 70% of landslides occurred in marl and gray shales and limestone. The type of soil also shows that landslides occur mostly in rocky outcrops and inspitisols. With the increase of rainfall and humidity, the probability of landslides increases. Finally, road construction in low DEM is recognized as one of the main causes of landslides.

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.

تحلیل مورفولوژی، مورفوتکتونیک و مورفومتری گنبد‌های نمکی کلات در شمال شرق اردکان (ایران مرکزی)

محمد شریفی پیچون^۱ ✉، غلامعلی مظفری^۲، غلامرضا تاجبخش^۳، اسماعیل میرزایی منش^۴

۱- نویسنده مسئول، گروه جغرافیا، دانشگاه یزد، ایران. رایانامه: mscharifi@yazd.ac.ir

۲- گروه جغرافیا، گروه جغرافیا، دانشگاه یزد، ایران. رایانامه: gmozaafari@yazd.ac.ir

۳- گروه زمین‌شناسی، دانشگاه یزد، ایران. رایانامه: tajbakhsh@yazd.ac.ir

۴- گروه جغرافیا، گروه جغرافیا، دانشگاه یزد، ایران. رایانامه: mirzaie@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	گنبد‌های نمکی کلات در شمال شرق و جنوب شرق اردکان از شاخص‌ترین نمودهای دیابایریسم نمکی در پهنه ایران مرکزی‌اند که در تعامل با تکتونیک فعال و فرایندهای انحلالی، چشم‌اندازهای پیچیده‌ای ایجاد کرده‌اند. در این پژوهش، با تلفیق داده‌های میدانی، تصاویر ماهواره‌ای و تحلیل‌های GIS، مورفولوژی، مورفومتری و مورفوتکتونیک ۱۹ گنبد منتخب (۱۴ گنبد در شمال شرق و ۵ گنبد در جنوب شرق) بررسی شد. نتایج ژئومورفولوژی سطحی، فراوانی بالای عوارض کارست نمکی شامل کارن‌های خطی، فروچاله‌های متعدد، پلیگون‌های نمکی، اشکال گل‌کلمی و پرگاه‌های ناپایدار را نشان داد که عمدتاً تحت کنترل انحلال افتراقی و شکستگی‌های ساختاری شکل گرفته‌اند. شاخص‌های مورفوتکتونیکی رودخانه‌ها SL ، Smr و VF به ترتیب با حداکثر مقادیر ۴۱۱، ۱۴۰ و ۱۰۸، بیانگر فعالیت تکتونیکی متوسط تا نسبتاً بالا در منطقه بوده که اثرات آن بر الگوی آبراهه‌ها و تحمیل رودخانه بر برخی گنبدها قابل مشاهده است. تحلیل‌های مورفومتری نشان داد در شمال شرق، کشیدگی و بی‌قاعدگی هندسی بیشتر تحت کنترل گسل‌های امتدادلغز بوده، درحالی‌که گنبد‌های جنوب شرق گردشگری و کشیدگی بالاتری دارند. بر این اساس، حداکثر ضریب برافراشتگی ۵۴۰۰، حداکثر ضریب کشیدگی ۵۱۰ و حداکثر ضریب دایره‌واری به حدود ۱ بوده است. مجموعه نتایج، نقش تعیین‌کننده تکتونیک فعال و انحلال سطحی را در کنترل هندسه، تکامل و پیامدهای محیطی گنبد‌های نمکی کلات تأیید می‌کند.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۱۲ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۱/۲۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۱۸ صص. ۲۷-۱	
واژگان کلیدی: دیابایریسم، مورفوتکتونیک، کارست نمکی، گنبد‌های نمکی، ژئومورفولوژی، شاخص‌های مورفومتری.	
استناد: شریفی پیچون، محمد؛ مظفری، غلامعلی؛ تاجبخش، غلامرضا و میرزایی منش، اسماعیل (۱۴۰۵). تحلیل مورفولوژی، مورفوتکتونیک و مورفومتری گنبد‌های نمکی کلات در شمال شرق اردکان (ایران مرکزی). پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ۱۵(۱)، ۱-۲۷. Doi:10.22034/gmpj.2026.582046.1610	

مقدمه

گنبد‌های نمکی از برجسته‌ترین و پیچیده‌ترین ساختارهای زمین‌شناسی در حوضه‌های رسوبی غنی از تبخیر بوده و به‌عنوان نمود سطحی دینامیک عمیق زمین، بیانگر فرایندهای بنیادی مرتبط با تکتونیک، رسوب‌گذاری و تحول چشم‌انداز هستند (جاکسون و هادک^۱، ۲۰۱۷؛ دولی^۲ و همکاران، ۲۰۰۲). این ساختارها هنگامی شکل می‌گیرند که لایه‌های ضخیم تبخیری مانند هالیت و گچ در زیر رسوبات جوان‌تر مدفون شده و بر اثر تضاد چگالی با لایه‌های پوششی و رفتار ویسکوالاستیک نمک تحت فشار، ناپایداری ریلی-تیلور آغاز می‌شود (تالبوت^۳، ۱۹۹۸؛ گرادمن^۴ و همکاران، ۲۰۱۲). تنش‌های تکتونیکی با ایجاد شکستگی در پوش سنگ، مسیرهای صعود را برای نمک فراهم کرده و حرکت صعودی عمدتاً تحت کنترل شناوری، بارگذاری افتراقی، نرخ رسوب‌گذاری و خواص مکانیکی لایه‌های بالادست قرار دارد (هادک و جاکسون، ۲۰۰۷؛ جاکسون و هادک، ۲۰۱۷؛ فر^۵ و همکاران، ۲۰۲۲).

با نزدیک شدن نمک به سطح، دیپیرها به صورت توده‌های گنبدی تپه‌های کشیده، جریان‌های نمکی یا یخچال‌های نمکی بروز می‌کنند (تالبوت و آفتابی، ۲۰۰۴). در مناطق بیابانی و نیمه‌بیابانی، گنبد‌های نمکی با نرخ رشد چند میلی‌متر تا چند سانتی‌متر در سال توسعه می‌یابند، اما هم‌زمان تحت فرسایش شدید انحلالی قرار گرفته و انواع کارست نمکی نظیر فروچاله‌ها، دره‌های انحلالی، حوضه‌های فرونشست، کارن‌های نمکی و پوسته‌های پلی‌گونی ایجاد می‌کنند (بروتانس^۶ و همکاران، ۲۰۰۹؛ فیلیپی^۷ و همکاران، ۲۰۱۳). افزون بر این، انحلال نمک موجب افزایش شوری رواناب‌ها، آبخوان‌ها و خاک می‌شود و پیامدهای زیست‌محیطی قابل‌توجهی دارد (نادری و همکاران، ۲۰۱۶). مطالعات اولیه در ایران توسط گانسر^۸ (۱۹۵۷) و اشتوکلین^۹ (۱۹۶۸) پایه‌گذار طبقه‌بندی و تفسیر مورفولوژی گنبد‌های نمکی بوده‌اند. این تحقیقات نشان دادند که شکل سطحی گنبد‌ها بازتابی از دینامیک تکتونیک نمک و فرسایش سطحی است. پژوهش‌های بعدی مانند تالبوت و آفتابی (۲۰۰۴) (۲۰۰۴) نشان دادند که نرخ صعود نمک و شرایط اقلیمی دو عامل اصلی مؤثر بر تفاوت‌های مورفولوژیک میان گنبد‌های نمکی هستند.

پیشرفت فناوری‌های ژئوماتیک، استفاده از DEM، تصاویر ماهواره‌ای و مدل‌سازی عددی، امکان تحلیل کمی ویژگی‌هایی مانند نسبت طول به عرض، شاخص دایره‌واری، شیب، ضریب کشیدگی و نسبت ارتفاع به عرض را فراهم کرده است (جاکسون و تالبوت، ۱۹۹۱). این پارامترها برای تفسیر رفتار نمک تحت تأثیر نیروهای شناوری، مقاومت پوش سنگ، نرخ رسوب‌گذاری و میدان تنش تکتونیکی بسیار حیاتی‌اند (فرناندز و کاوس^{۱۰}، ۲۰۱۴؛ باومن^{۱۱}، ۲۰۲۲). مطالعات اخیر بروتانس (۲۰۰۹ و ۲۰۲۴) نیز ابعاد خردریختی کارست نمکی را مستند سازی کرده و طبقه‌بندی‌های نوینی برای چشم‌اندازهای انحلالی ارائه داده‌اند.

در ایران، پژوهش‌های نسبتاً گسترده‌ای ژئومورفولوژی، انحلال، نرخ توسعه و ارتباط تکتونیکی گنبد‌های نمکی را بررسی کرده‌اند. برای نمونه، نتایج ثروتی (۱۳۸۹)، شایان و همکاران (۱۳۹۱)، زارعی و همکاران (۱۳۹۱)، حسن‌پور و همکاران (۱۳۹۴)، بیات و همکاران (۱۳۹۴) و امینی‌نژاد و همکاران (۱۳۹۵) نشان می‌دهد که بخش قابل‌توجهی از گنبد‌ها از طریق شکستگی‌ها و گسل‌های منطقه‌ای به سطح رسیده یا تحت اثر انحلال و فرسایش شدید تحول یافته‌اند. پژوهش رجبی و همکاران (۱۳۹۵) تفاوت‌های مورفومتریک میان گنبد‌های تک‌شیب و طاقدیسی را تشریح کرده و نقش گسل‌های فعال را در کنترل هندسه و گسترش آن‌ها نشان داده است.

از دیدگاه مورفوتکتونیک، گنبد‌های نمکی بیانگر تعامل پیچیده میان تکتونیک فعال، ضعف مکانیکی لایه‌های

۹ Stöcklin
۱۰ Fernandez & Kaus
۱۱ Baumann

۵ Ferrer
۶ Bruthans
۷ Filippi
۸ Gansser

۱ Jackson & Hudc
۲ Dooley
۳ Talbot
۴ Gradmann

تبخیری و رفتار فیزیکی نمک هستند. مطالعاتهادک و جاکسون (۲۰۰۷) (۲۰۰۷) چارچوبی برای فهم تکامل تکتونیک نمک ارائه کرد و دثولی و همکاران (۲۰۲۲) از طریق مدل سازی قیاسی این چارچوب را گسترش دادند. پژوهش های مختلف در سطح جهان نشان می دهد گسل ها معمولاً محل تمرکز خروج نمک هستند (میشل و همکاران، ۲۰۱۳؛ بریتانی و همکاران، ۲۰۱۳). در ایران نیز نقش گسل های اصلی مانند گسل سرا سری زاگرس در شکل گیری گنبدهای نمکی به طور گسترده گزارش شده است (آرین و همکاران، ۲۰۱۵؛ رزاقیان و همکاران، ۲۰۱۵). داده های لرزه ای و مطالعات اخیر نیز نشان داده اند که دیاپیرها اغلب چند مرحله تغییر شکل دارند و الگوهای پیچیده چین خوردگی و شکستگی در آنها مشاهده می شود (علی و همکاران، ۲۰۲۳؛ گوتیرز^۱ و همکاران، ۲۰۲۳؛ تایکسل^۲ و همکاران، ۲۰۲۴).

ایران با بیش از ۲۰۰ گنبد نمکی بیرون زده، یکی از غنی ترین مناطق دنیا از نظر دیاپیریسم نمکی است. مهم ترین منشأ این گنبدها، سری تبخیری هرمز (ادیارکارا-کامبرین آغازین) و در درجه دوم سازند گچساران (الیگو سن-میوسن) است (کنت^۳، ۱۹۷۹؛ جهانی، ۲۰۰۷؛ کالوت^۴، ۲۰۱۲). بسیاری از این گنبدها به ویژه در زاگرس و خلیج فارس هنوز به لحاظ تکتونیکی فعال اند (عابدی و همکاران، ۲۰۲۱؛ قاسمی و همکاران، ۱۳۹۹؛ مهرابی و همکاران، ۱۳۹۸). مطالعات محمدی و همکاران (۱۳۹۸) در باره تغییرات مورفومتری گنبدهای نمکی سازند هرمز در جنوب و جنوب غرب ایران نشان داد که این گنبدها دارای دو جهت رخنمون اصلی بوده و پارامترهای گردشگری و مساحت گنبدهای نمکی در تضاد با ارتفاع آنها قرار دارد؛ به گونه ای که با افزایش ارتفاع سطح میزبان، ارتفاع گنبدها افزایش و از مساحت و گردشگری آنها کاسته می شود. پژوهش های منطقه ای درباره اثرات زیست محیطی، از جمله افزایش شوری آبخوان ها و رواناب، اهمیت مدیریت و پایش این ساختارها را نشان داده اند (فیض نیا و همکاران، ۱۳۹۲؛ زارعی و همکاران، ۱۳۹۱). در سالهای اخیر هم با استفاده از تصاویر ماهواره ای مطالعات خوبی در مورد گنبدهای نمکی در سطح جهان و ایران انجام شده است که تکنیک SAR از جمله مهمترین آنها بوده است (شامی^۵ و همکاران، ۲۰۲۴؛ یانز^۶ و همکاران، ۲۰۲۴؛ پرز ویلار^۷ و همکاران، ۲۰۲۵؛ گوتیرز^۸ و همکاران، ۲۰۲۵). در ایران نیز الفتی و همکاران (۱۳۹۴) به تخمین شکل و عمق گنبدهای نمکی با استفاده از تف سیر داده های گرانی سنجی پرداختند. توکلی (۱۳۹۹) نیز به بارز سازی واحدهای سنگ شناختی و پوشش گیاهی در گنبدهای نمکی کنار سیاه و جهانی با استفاده از روش RBD پرداخت.

در حوضه کلوت در شمال شرق اردکان (ایران مرکزی)، مجموعه ای از گنبدهای نمکی با اهمیت ژئومورفولوژیک، تکتونیکی و زمین گردشگری شکل گرفته است. هدف پژوهش حاضر تحلیل کمی مورفولوژی، مورفومتری و مورفوتکتونیک این گنبدها با استفاده از روش های سنجش از دور و داده های ژئوماتیکی است. تمرکز کار بر بررسی نقش گسل های فعال، انحلال افتراقی و فرایندهای سطحی در کنترل هندسه و تکامل این گنبدها است. این تحلیل یکپارچه می تواند در درک بهتر سازوکارهای تشکیل، ارزیابی مخاطرات محیطی و برنامه ریزی ژئوتوریسم منطقه مؤثر باشد.

موقعیت جغرافیایی و ویژگی های زمین شناسی منطقه مورد مطالعه

گنبدهای نمکی کلوت در شمال شرق اردکان بخشی از پهنه ایران مرکزی هستند و به طور عمده در امتداد محور تاقدیس های هم روند و یا در راستای گسل های فعال منطقه رخنمون یافته اند. این گنبدها براساس داده های نقشه های زمین شناسی در دوره آئوسن و طی فعالیت های زمین ساختی سنوزوئیک شکل گرفته اند و از طریق تأمین نمک و کلریدها نقش مؤثری در شور شدن کویرهای پیرامونی و آب های سطحی و زیرزمینی داشته اند؛ به گونه ای که کف بسیاری از

^۷ Pérez-Villar

^۸ Gutiérrez

^۴ Callot

^۵ Shami

^۶ Yáñez

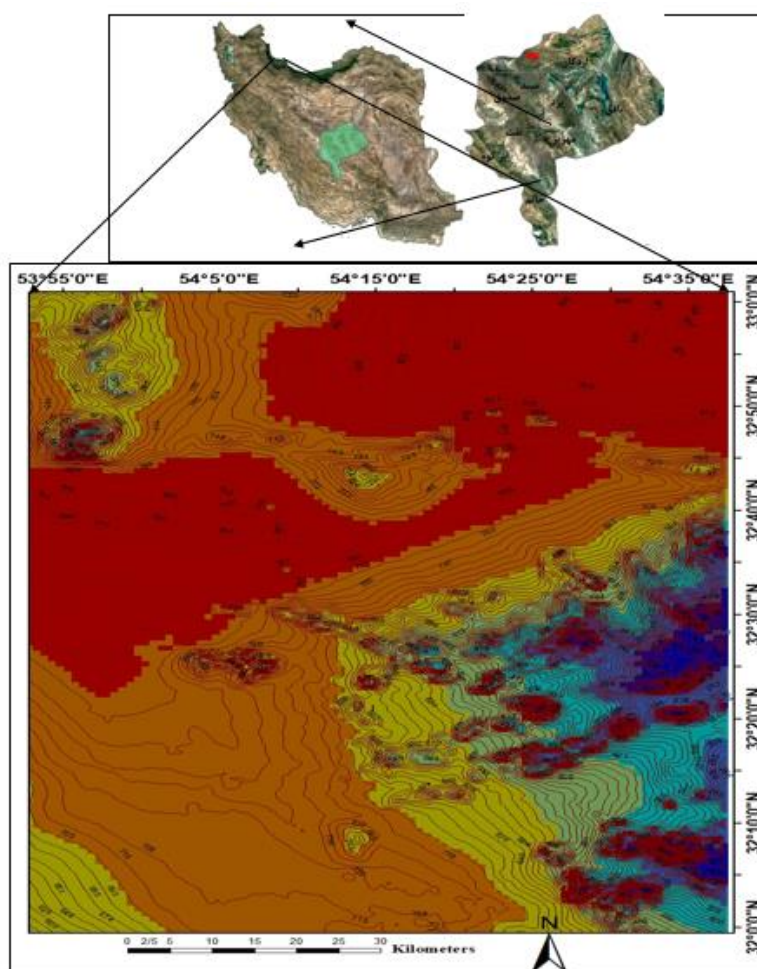
^۱ Gutierrez

^۲ Teixell

^۳ Kent

کوبرهای اطراف، متشکل از رسوبات نمکی ناشی از این دیپیرها است (ارفع‌نیا و صفائی، ۱۳۸۴). در بخش مرکزی حوضه کلوت، واقع در حدود ۷۰ کیلومتری شمال‌شرق اردکان، توده‌های نمک عمدتاً به صورت دیپیرهای سوراخ‌کننده در رسوبات پوششی نفوذ کرده و در سطح زمین به صورت پراکنده و منفصل ظاهر شده‌اند. محدوده جغرافیایی منطقه از شمال به مهدی‌آباد، از جنوب به یزد، از غرب به عقدا و از شرق به خرائق محدود می‌شود. در مقیاس گسترده‌تر، مرزهای منطقه از شمال به نایین، شرق به طبس، جنوب به یزد و میبد و از غرب به اصفهان می‌رسد. موقعیت جغرافیایی آن در طول‌های شرقی $10^{\circ}54'E$ تا $30^{\circ}54'E$ و عرض‌های شمالی $32^{\circ}32'N$ تا $32^{\circ}50'N$ قرار دارد.

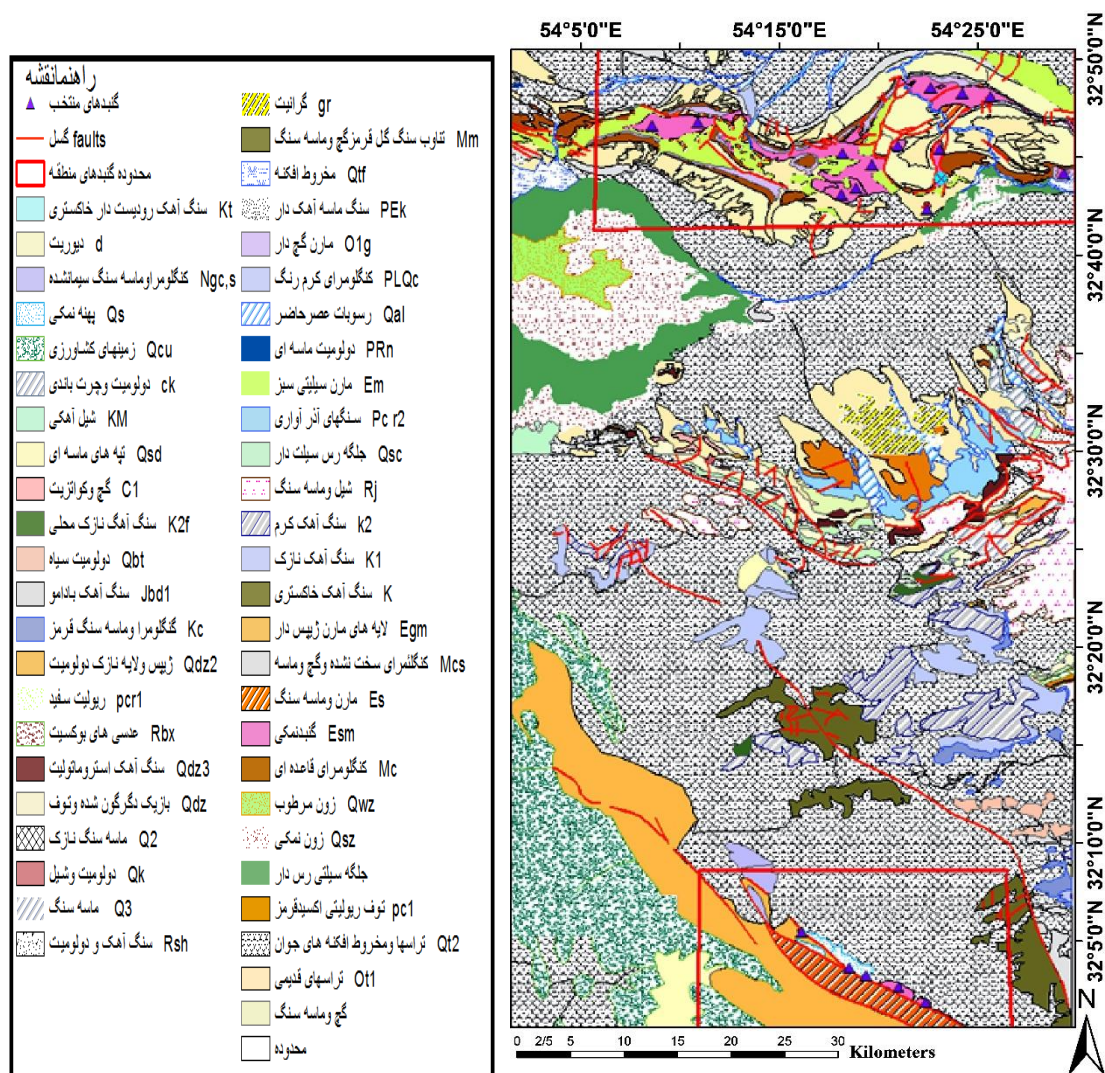
علاوه بر گنبدهای اصلی شمال‌شرق اردکان، مجموعه‌ای از گنبدهای نمکی دیگر نیز در جنوب‌شرق اردکان و در امتداد یک گسل سراسری توسعه یافته‌اند. این گنبدها در گستره طولی $54^{\circ}16'$ تا $54^{\circ}25'$ طول شرقی و $32^{\circ}30'$ تا $32^{\circ}37'$ شمالی رخمون دارند (شکل‌های ۱ و ۲). منطقه مورد مطالعه از نظر توپوگرافی دارای اختلاف ارتفاع قابل توجهی است؛ به‌طوری که بلندترین نقطه آن ۲۴۹۱ متر و پست‌ترین نقطه ۹۶۱ متر بوده و میانگین ارتفاع حدود ۱۷۲۶ متر است. گنبدهای شمال‌شرق اردکان از شمال به کلوت جمال‌خانه و شور‌زارهای دشت‌های شمالی، از جنوب‌غرب به کویر سیاه‌کوه، از غرب به ارتفاعات کلوت چاه‌پلنگ و از شرق به کلوت چشمه‌شور و ریگزین محدود می‌شود. گنبدهای جنوب‌شرقی نیز میان کوه نمک، روستای رحمت‌آباد، ارتفاعات حوض جعفر، هفتم و نواحی حسن‌آباد تا واله‌آباد محصور شده‌اند.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

از میان ارتفاعات مهم منطقه می‌توان به کوه‌های دره‌انجیر، بتیزر، گاره، کمرنگ، دندان، علی‌آباد، چقات، آستی، انبار، چقا سرخ، کلوت جمال‌خانه و کلوت چاه‌پلنگ اشاره کرد. بلندترین ارتفاع محدوده کوه دره‌انجیر با ۲۱۶۰ متر و پست‌ترین نقطه در حاشیه دریاچه فصلی کلوت با ۷۶۸ متر قرار دارد.

از دیدگاه زمین‌شناسی، حوضه کلوت طی کوهزایی لارامید دچار بالآمدگی شده و ساختار اولیه آن در آغاز پالئوسن شکل گرفته است (ارفع‌نیا و صفائی، ۱۳۸۴). منطقه شامل مجموعه‌ای از ساختارهای دیپیری، تاقدیسی و ناودیسی جوان سنوزوئیک است. شواهد صحرایی نشان می‌دهد روند غالب دیاپیریسم در این حوضه خاوری-باختری بوده و همخوانی آشکاری با محور چین‌خوردگی‌های ناشی از فاز کوهزایی اواسط الیگوسن دارد. شدیدترین فاز چین‌خوردگی در پلیوسن رخ داده و بخش عمده خیزش دیاپیرها نیز مربوط به همین دوره است؛ تاحدی که تاقدیس‌های دیپیری با شیب لایه‌های ۶۰ تا ۸۵ درجه در این زمان شکل گرفته‌اند (جاکسون و تالبوت، ۱۹۹۴). در این منطقه ۱۸ تاقدیس و ۸ ناودیس اصلی شناسایی شده است. ناودیس‌های وسیع با هسته گلسنگی سرخ و تاقدیس‌های دیپیری با هسته نمکی از ویژگی‌های ساختاری منطقه‌اند (هوبر^۱، ۱۹۹۵). روند ساختاری مذکور با روند ظهور دیاپیرها همخوان بوده و نشان‌دهنده ارتباط مستقیم آن با فاز نخست کوهزایی الیگوسن است. پتانسیل خیزش نمک با میزان برجستگی اولیه توده نمکی ارتباط مستقیم دارد؛ لذا شرایط برای تشکیل دیاپیرها در بخش مرکزی حوضه مناسب‌تر بوده و در حواشی به تدریج دشوارتر شده است. ضخامت زیاد رسوبات پلیوسن در حواشی نیز گواهی بر بالآمدگی مرکز حوضه و ایجاد فروآویزهای حاشیه‌ای همزمان با خیزش نمک‌ها است (جاکسون و تالبوت، ۱۹۹۴). چینه‌شناسی منطقه نشان‌دهنده مجموعه‌ای از رسوبات پالئوژن و نئوژن شامل گلا سنگ‌های نمک‌دار، ماسه‌سنگ‌ها و لایه‌های نمکی است. در ابتدای پلیوسن، بر اثر رخداد یک فازکوه‌زایی شدید، سازند کنگلومرای خاکستری رنگی به صورت دگرشیب روی سازند گلسنگی سرخ را می‌پوشاند. این رسوبات به صورت مخروط‌افکنه و احتمالاً با ضخامت زیادی در حاشیه حوضه کلوت تشکیل شده‌اند و با نهشته شدن آنها رسوبگذاری ترشیری در این حوضه پایان می‌پذیرد (بربریان و کینگ^۲، ۱۹۸۰). دیاپیرهای منطقه عمدتاً روند خاوری-باختری دارند، اما در برخی موارد به سمت شمالی-جنوبی چرخش یافته‌اند. رخنمون این دیاپیرها معمولاً در امتداد گسیختگی‌های آشکار و پنهان لایه‌های پوششی یا در محور تاقدیس‌ها شکل گرفته است. بنابراین، دیاپیرهای منطقه به دو گروه تقسیم می‌شوند: (۱) دیاپیرهای نفوذی در میان رسوبات فوقانی، و (۲) گنبد‌های وابسته به گسل‌ها که با حرکات گسلی به سمت بالا رانده شده‌اند (ارفع‌نیا و صفائی، ۱۳۸۴).

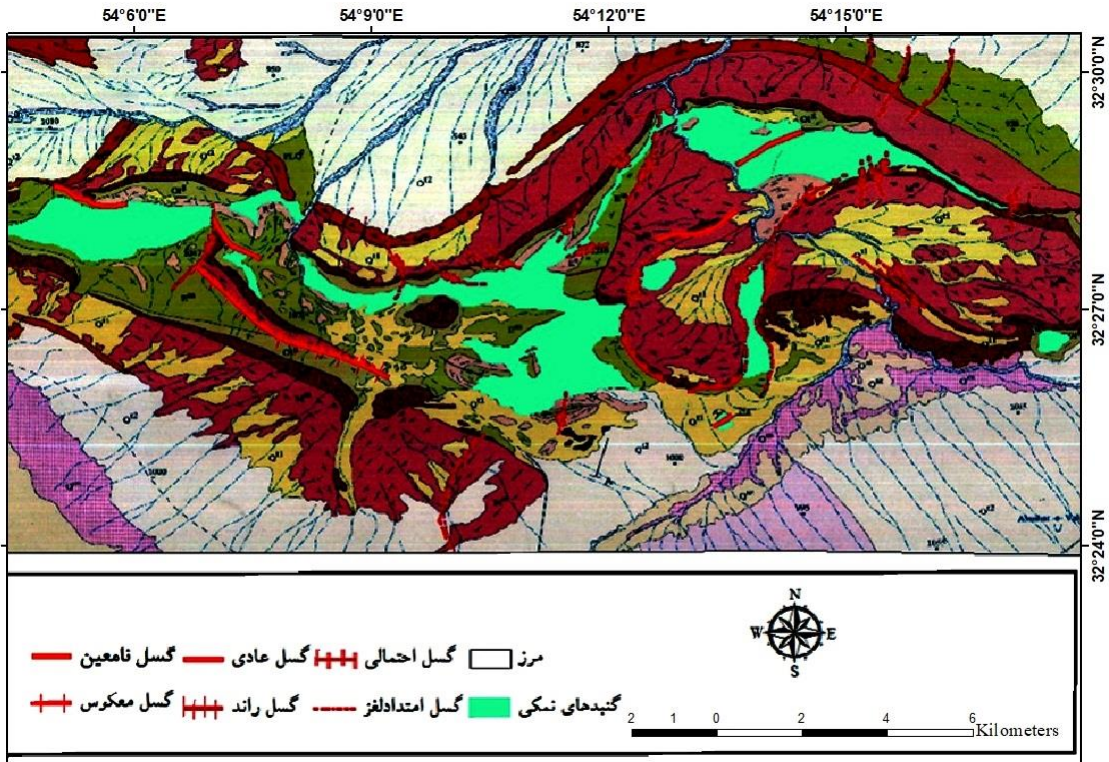


شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی گنبد‌های نمکی در مناطق شمال‌شرقی و جنوب‌شرقی اردکان

ویژگی‌های گسل‌های منطقه

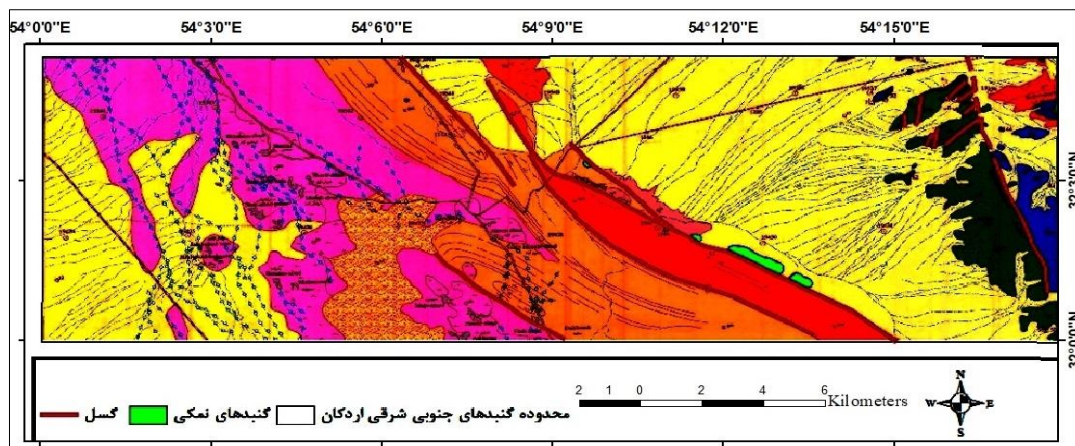
گسل‌های منطقه از مهم‌ترین ساختارهای تکتونیکی هستند و در سه گروه اصلی دسته‌بندی می‌شوند: الف) گسل‌های با روند شمال‌باختر-جنوب‌خاور و ساز و کار معکوس تا راست‌الغز راست‌گرد؛ ب) گسل‌های شمال‌خاور-جنوب‌باختر با رفتار چپ‌گرد و در برخی موارد کششی و ج) گسل‌های خاوری-باختری اغلب با ساز و کار راست‌الغز راست‌گرد. از میان گسل‌های بیرون حوضه که بر منطقه تأثیرگذارند می‌توان به گسل دهشیر و انار اشاره کرد (شاه‌پسند، ۱۳۸۲). در یک تقسیم‌بندی، گسل‌های اصلی کلوت اردکان شامل دو گروه هستند:

۱. **گسل‌های مستقل از دیابایریسم (پیش‌دیابیری):** این گسل‌ها بر اثر فشارهای جانبی ناشی از چپ‌گردی نتوژن بالایی شکل گرفته‌اند و در برخی نقاط مسیر مناسبی برای نفوذ نمک فراهم کرده‌اند (ارفع‌نیا، ۱۳۷۷).



شکل ۳. موقعیت گنبد‌های نمکی و ارتباط آنها نسبت به انواع گسل‌ها در منطقه شمال شرقی اردکان

گسل‌های حاصل از دی‌پایرسم: این گسیختگی‌ها در اثر سرعت و تنش زیاد خیزش نمک ایجاد شده‌اند و موجب دگرشکلی و نهایتاً شکست لایه‌های پوششی شده‌اند (کوی^۱، ۱۹۹۵).



شکل ۴. موقعیت گنبد‌های نمکی و ارتباط آنها نسبت به انواع گسل‌های اصلی در منطقه جنوب شرقی اردکان

¹ Koyi

داده‌ها و روش‌شناسی تحقیق

در این پژوهش، داده‌ها و اطلاعات مورد نیاز با استفاده از مطالعات کتابخانه‌ای، مطالعات میدانی، تصاویر ماهواره‌ای و نقشه‌های توپوگرافی و زمین‌شناسی جمع‌آوری شدند. نقشه‌های توپوگرافی با مقیاس ۱:۵۰,۰۰۰ شامل مناطق کوه نمک، پتکستان، کلوت جمال‌خانه و غرب کلوت جمال‌خانه، و نقشه‌های زمین‌شناسی با مقیاس‌های ۱:۱۰۰,۰۰۰ (مهدی‌آباد و اردکان) و ۱:۲۵۰,۰۰۰ (اردکان) به همراه تصاویر هوایی، منابع اصلی اطلاعات فضایی و زمینی را فراهم کردند. بازدیدهای میدانی متعدد نیز برای تایید رخنمون‌های گنبد‌های نمکی، اندازه‌گیری ویژگی‌های مورفولوژیکی و ثبت پدیده‌های زمین‌ریخت‌شناسی سطحی انجام شد (شکل ۶).

با توجه به تعداد بالای گنبد‌های نمکی در منطقه، از میان تمامی گنبد‌ها چهارده گنبد شاخص به عنوان نمونه برای مطالعات تکمیلی انتخاب شدند. معیارهای انتخاب شامل اندازه و ارتفاع گنبد‌ها، میزان برونزدگی آنها، پراکندگی جغرافیایی، فاصله از رودخانه‌ها و جاده‌ها، بهره‌برداری انسانی و نزدیکی به گسل‌های موجود بوده است تا نمونه‌های مورد مطالعه به طور جامع نمایانگر شرایط منطقه باشند. برای سهولت تحلیل، محدوده مطالعه به هفت بخش تقریباً مساوی تقسیم گردید و از هر بخش گنبدی که شاخص‌تر بودند انتخاب شدند تا تمامی منطقه تحت پوشش قرار گیرد (شکل ۵).

در مرحله مطالعات مورفومتری، با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و نقشه‌های توپوگرافی، نقشه‌های رقومی ارتفاعی و خطوط ارتفاعی منطقه تهیه شد و پروفیل‌های طولی رودخانه‌ها رسم گردید. همچنین مسیر آبراهه‌ها و محل تقاطع آنها با گنبد‌های نمکی مشخص شد. شاخص‌های مورفومتری شامل مساحت، محیط، ارتفاع بیشینه و کمینه، ارتفاع نسبی، محور طولی و عرضی، شعاع و فاصله تا نزدیک‌ترین گسل برای تمامی گنبد‌ها محاسبه شد. این شاخص‌ها پایه محاسبه شاخص‌های آماری شامل ضریب کشیدگی، ضریب دایره‌واری و ضریب برافراشتگی بودند که برای هر گنبد و هر گروه (شمال شرق و جنوب شرق اردکان) به صورت جداگانه ارائه شد (روابط زیر):

$$\Delta H = H_{max} - H_{min} \quad \text{(رابطه ۱)}$$

$$FCIR = \frac{4\pi A}{P^2} \quad \text{(رابطه ۲)}$$

$$ER = \frac{L_{max}}{L_{min}} \quad \text{(رابطه ۳)}$$

$$CF = \frac{\Delta H}{A} \quad \text{(رابطه ۴)}$$

در روابط فوق، A مساحت گنبد‌ها به کیلومتر مربع، P محیط گنبد‌ها به کیلومتر، Hmin حداقل ارتفاع گنبد‌ها، Hmax حداکثر ارتفاع گنبد‌ها می‌باشد.

در ادامه، نمودارهای همبستگی (پیرسون) و خطوط رگرسیون برای تحلیل دقیق روابط بین شاخص‌ها و بررسی تفاوت‌های مورفومتری میان دو گروه گنبد‌ها تهیه گردید. شواهد میدانی مانند پادگانه‌های رودخانه‌ای، پدیده‌های حمل رودخانه‌ها نسبت به گنبد‌ها و ویژگی‌های پیچان رودها نیز برای تحلیل مورفوتکتونیک مورد استفاده قرار گرفت. داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار GIS تحلیل شدند و نتایج در قالب جداول و نمودارهای توصیفی ارائه گردید. برای شاخص‌های آماری، علاوه بر محاسبات ریاضی، نمودارهای طولی و شماتیک از پیچ و خم رودخانه‌ها تهیه شد.

برای بررسی تأثیر مورفوتکتونیک و شرایط تکتونیک منطقه، شاخص‌های مختلف شامل گرادیان طولی رودخانه، سینوسیته کانال رودخانه، سینوسیته کوهستان و شاخص پهنای کف دره به ارتفاع دره محاسبه شد. گرادیان طولی رودخانه (SL) در مناطقی که حرکات تکتونیک فعال در تغییر شکل زمین مؤثرند، زیاد است. مقادیر زیاد SL در سنگهای دارای مقاومت کم و یا در سنگهای از لحاظ مقاومت یکسان می‌تواند بیانگر حرکات تکتونیک فعال و جوان باشد. شاخص SL با قدرت رود نیز ارتباط دارد. نیروی قابل دسترس رود در محدوده مشخص کانال، متغیر هیدرولوژیکی مهمی است؛ زیرا با

توانایی رود در کف بستر آن و همچنین حمل مواد حاصل از فرسایش ارتباط دارد و شرایط لازم برای میزان ارتباط فعالیت تکتونیکی با مقاومت سنگ و توپوگرافی را فراهم می کند (مقصودی و همکاران، ۱۳۹۰). شاخص گرادیان طولی رودخانه بر اساس معادله زیر (رابطه ۵) به دست آمده است (کلر و پینتر^۱، ۲۰۱۱):

$$SL = \frac{\Delta H}{\Delta L} \times L \quad \text{(رابطه ۵)}$$

که در آن: ΔH اختلاف ارتفاع بین دو نقطه از پروفیل (متر)؛ ΔL طول رودخانه بین آن دو نقطه (متر) و L طول از نقطه میانی تا بالادست (متر) است.

شاخص SL به سه کلاس طبقه بندی می شود (ال همدونی و همکاران، ۲۰۰۸): کلاس ۱: $SL > 500$: فعالیت تکتونیکی زیاد؛ کلاس ۲: $300 < SL < 500$: فعالیت متوسط؛ کلاس سوم ۳: $SL < 300$: فعالیت کم. شاخص سینوسیته کانال رودخانه (S_{mr}): این شاخص با استفاده از رابطه زیر محاسبه شده است (Adams et al; 1999):

$$S = \frac{C}{V} \quad \text{(رابطه ۶)}$$

که در آن C طول واقعی کانال و V طول خط مستقیم دره (متر) است. شاخص نسبت پهنای کف دره به ارتفاع دره (VF): برای به دست آوردن این شاخص از رابطه زیر (رابطه ۷) استفاده شده است (گورابی، ۱۳۸۶):

$$VF = \frac{2VFW}{(Eld-Esc)+(Erd-Esc)} \quad \text{(رابطه ۷)}$$

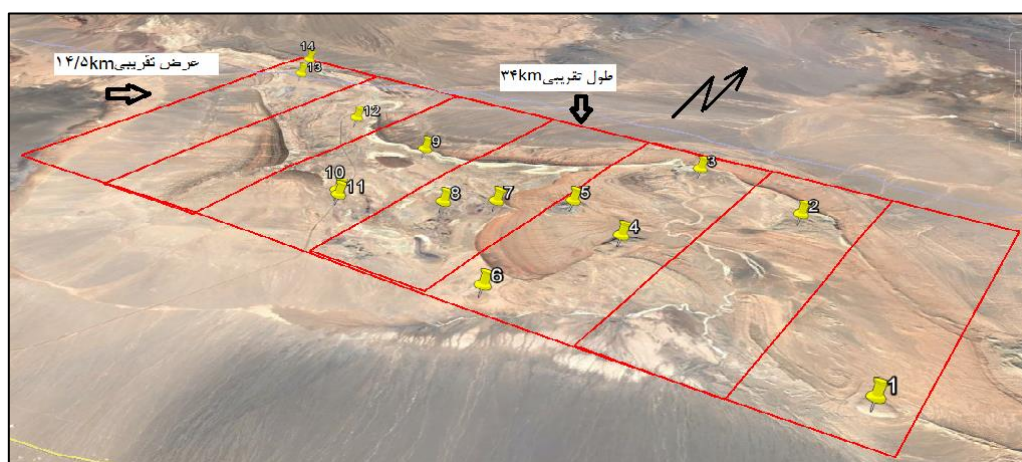
که در آن VFW : پهنای کف دره یا عرض بستر دره، $ERD \& Eld$: ارتفاع دیواره سمت راست دره و سمت چپ دره از سطح دریا، ESC : ارتفاع کف دره از سطح دریا

بر پایه رابطه فوق می توان دره های V شکل و U شکل را از یکدیگر تفکیک کرد. چنانچه مقدار شاخص به دست آمده پایین باشد، نشان دهنده V شکل بودن دره، فعال بودن آن و بالا راندگی زیاد و به تبع آن عمل حفر است (مقصودی و همکاران، ۱۳۹۰). همچنین اگر مقدار شاخص مزبور بزرگ باشد، بیانگر دره هایی با کف پهن و مسطح و نرخ فعالیت تکتونیکی پایین است. باید توجه داشت که مقادیر شاخص VF به لیتولوژی حوضه آبریز، اندازه و ابعاد آن و نیز دبی رود نیز بستگی دارد (ال همدونی و همکاران، ۲۰۰۷). مقادیر شاخص VF به سه کلاس تقسیم می شود.

کلاس ۱: ($VF < 0.5$) کلاس ۲: ($0.5 < VF < 1$) کلاس ۳: ($VF > 1$)

مطالعات میدانی مکمل تحلیل تصاویر ماهواره ای بود و شامل برر سی رخنمون گنبدهای نمکی، پلیگون های نمکی، اشکال گل کلمی، فروچاله ها، کارن ها، پوشش های رسوبی و پوشش گیاهی منطقه بود. همچنین بازدید از مناطق استخراج نمک برای ارزیابی اثر فعالیت های انسانی بر مورفولوژی و پراکندگی گنبدها انجام شد. در نهایت، داده های به دست آمده در یک چارچوب تحلیلی یکپارچه مورفومتري، مورفوتکتونیک و تصاویر ماهواره ای مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند (شکل ۶). این روش شناسی امکان ارزیابی پراکندگی، شاخص های هندسی و مورفولوژیکی، ارتباط با گسل ها و رودخانه ها و تغییرات زمانی گسترش نمک را فراهم نمود و چارچوبی جامع برای فهم بهتر ساختار و تکامل گنبدهای نمکی منطقه ایجاد کرد.

¹ Keller & Pinter



شکل ۵. موقعیت قرارگیری ۱۴ گنبد اصلی مورد مطالعه در شمال شرق اردکان



شکل ۶. فلوچارت روش انجام پژوهش به صورت گام به گام

نتایج و یافته های پژوهش

نتایج ژئومورفولوژی گنبدهای نمکی

بررسی های متعدد میدانی و تطبیق با نقشه های توپوگرافی و زمین شناسی و همچنین تصاویر گولارث نشان می دهد تعداد زیادی گنبد نمکی در شمال شرق شهر اردکان وجود دارد که به صورت ساختار یا رخنمون های لاک پستی در دو پهنه ی اصلی منطقه ظاهر شده اند. سطح بسیاری از گنبدها دارای حفرات ریز و درشت، شکستگی ها و آثار انحلال است که سبب تمرکز نمک در سطح و در نتیجه افزایش شوری خاک پیرامونی می شود. شدت این اثر شور کنندگی تابع چند عامل است از قبیل وسعت و ضخامت توده نمکی، توپوگرافی و شیب دامنه ها، میزان بارش و رواناب های فصلی، و دخالت انسانی در برداشت نمک و تخریب مکانیکی آنهاست. این عوامل هم در جابه جایی رسوبات نمکی و هم در گسترش لکه های شور در دشت های پیرامونی نقش تعیین کننده دارند. مورفولوژی سطحی یک سری لندفرمهای خاصی را بوجود آورده است که مهمترین آنها به شرح زیر آمده است:

مورفولوژی گنبدهای نمکی

کارن های نمکی: کارن ها عمدتاً به صورت شیارها و کانال های خطی موازی روی سطوح لخت و شیب دار نمکی دیده می شوند. این ریزریخت ها حاصل تمرکز رواناب بارندگی و فرسایش بادی روی هالیت است و نشان می دهد سطح گنبدها در مرحله ی فعال انحلال قرار دارد. مشاهدات میدانی کارنهایی که بر سطوح نمکی نقش بسته اند در بسیاری از موارد خطوط و شیارهایی موازی و منظمی را تشکیل داده است. در دو طرف شیارهای کوچک شکل گرفته در مواردی لبه های تیزی نیز مشاهده می شود و در برخی دیگر برجستگی های هرم مانند کوچکی دیده می شود (شکل ۷ عکس الف).

فروچاله ها: فروچاله ها فراوان ترین فرم کارستی در منطقه مورد مطالعه هستند که هم روی تاج گنبدها و هم در حاشیه ی آنها مشاهده می شوند. تمرکز خطی برخی فروچاله ها بیانگر کنترل ساختاری یعنی شکستگی یا همان گسل است. این چاله ها در اثر وقوع ریزش های جوی بر بالای گنبدها و انحلال سنگ های نمک و نفوذ آب به درون لایه های خاک به وجود آمده اند. در واقع متغیرهای اصلی سنگ شناسی، زمین شناسی، و اقلیمی در به وجود آمدن فروچاله ها دخالت داشته اند. بدیهی است که نقش آب حاصل از بارندگی در شکل زائی فرو چاله ها انکار ناپذیر است. می توان گفت که تجمع و پراکندگی این عوارض در ارتباط با شیب سازندها و لیتولوژی تشکیل دهنده کوه های نمکی شمال شرق اردکان است. از نظر مورفولوژی، فروچاله های میله ای، مخروطی و کاسه ای، هم به شکل متقارن و هم نامتقارن قابل مشاهده اند. از دیدگاه مخاطرات، فروچاله ها می توانند ورودی غارهای نمکی یا زهکش عمقی باشند و در صورت ریزش، تهدیدی برای مسیرهای دسترسی و سازه های پیرامونی محسوب شوند (شکل ۷ عکسهای ب، پ و ت).

اشکال گل کلمی: اشکال گل کلمی بر اثر تبخیر شدید آبها ناشی از بارندگی و تبلور مجدد نمک، بویژه در فصل گرم سال یا به عبارتی در دماهای تقریباً زیاد ایجاد می شوند. این نوع عارضه در مکانهایی مشاهده می شود که نمک از خلوص بیشتری برخوردار و کوه نمکی ناخالصی ناچیزی دارد. به همین دلیل نمک تقریباً سفید رنگی به چشم می خورد. البته گاهی اوقات تحت تاثیر عناصر محلی متصل به نمک، نمک به رنگ آن عناصر در می آید. به طور کلی، اشکال گل کلمی زمانی شکل می گیرد که نمک شسته شده در فصل بارش، در کف دره ها و دامنه های کم شیب تجمع یافته و با تبخیر شدید به فرم های برجسته و خوشه ای در می آید. رنگ روشن تر در این نواحی نشان دهنده خلوص بالاتر کانی هالیت است (شکل ۷ عکس س).

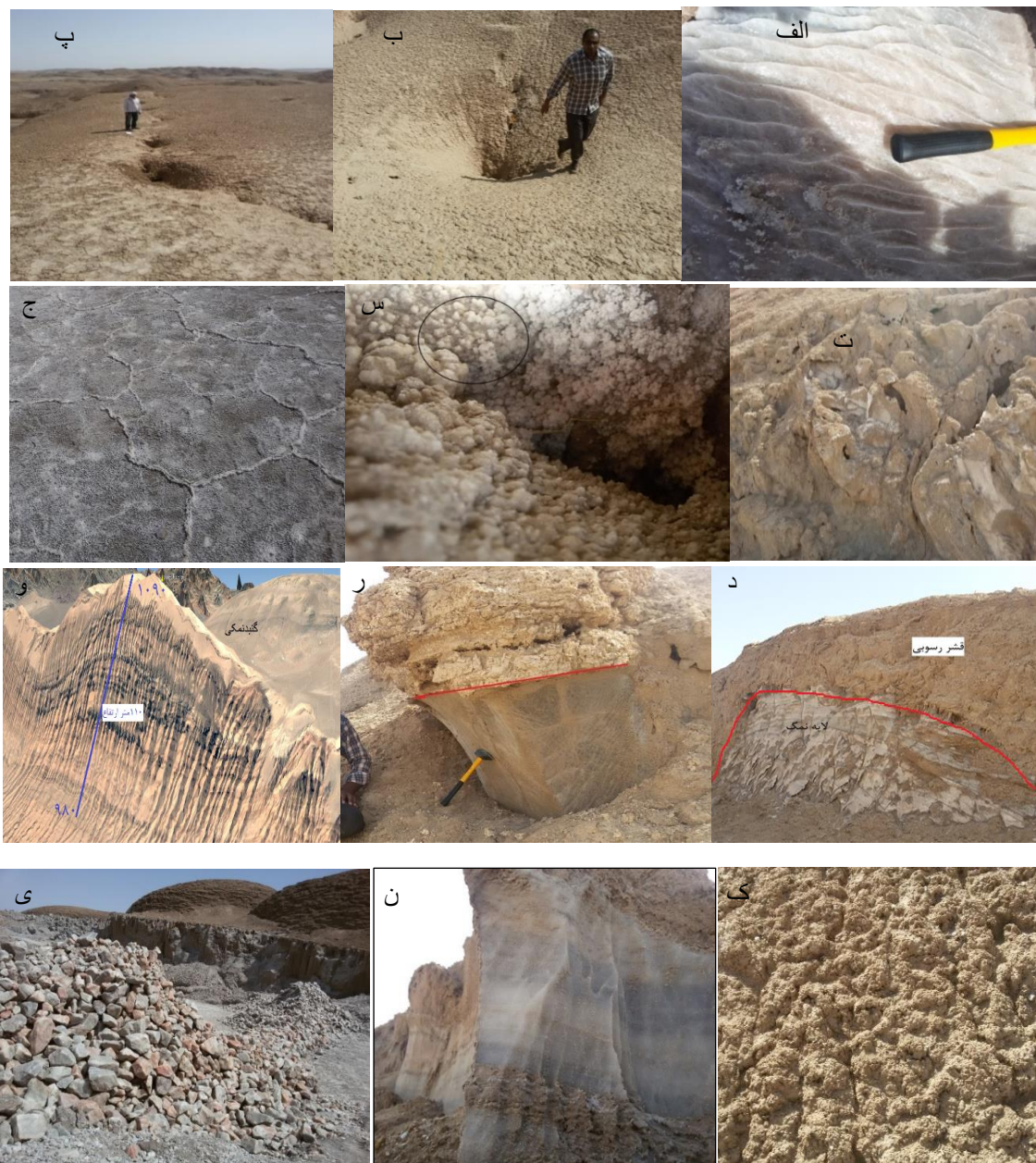
پلیگون های نمکی: پلیگون های نمکی یا اشکال چندضلعی عمدتاً در مناطقی دیده می شوند که یا نمک خالص نزدیک سطح قرار دارد یا برداشت انسانی باعث تراکم رسوبات و بیرون زدگی نمک از درزها شده است. این اشکال در منطقه مورد مطالعه به وفور دیده می شود. نمک از لابه لای درز و شکافهای ایجاد شده در سطح خاک نمایان شده و اشکال چندضلعی

نامنظم را بوجود می‌آورند. با بر اساس مشاهدات و مطالعات میدانی، این اشکال در مناطقی که برداشت سنگ نمک صورت گرفته است و لایه‌های خاک و رسوبات به همراه نمک در اثر رفت و آمد ماشین آلات سفت و سخت شده و نمک از لایه‌های درز و شکافها بیرون آمده است، شکل می‌گیرد. تنوع رنگ سفید تا قرمز در پلیگون‌ها تابع ناخالصی‌های رسی و اکسیدهای آهن است. از آنجا که در معادن، نمک از اعماق پایین استخراج می‌شود نمک دارای خلوص بیشتری بوده و پلیگون‌ها به رنگ سفید و قرمز دیده می‌شود (شکل ۷ عکس ج).

پوشش رسوبی: مطالعات میدانی نشان داد که بر روی سطح خارجی همه گنبد‌های نمکی و در اطراف توده‌های نمکی قشرهایی از رسوبات (کلاهای رسوبی یا پوش سنگ) وجود دارد که عمدتاً جنس‌های مختلفی مانند مارن‌ها، ماسه سنگ و گنگومرا دارند که به هنگام صعود نمک به سمت بالا حرکت کرده و روی گنبد‌ها قرار گرفته‌اند. در پاره‌ای موارد نمک هنگام بالا آمدن قشر رسوبی را بالا آورده و دچار شکستگی کرده و آن را کنار زده است و صعود نمک اشکال قارچی شکلی را با پایه نمک و کلاهای رسوبی بوجود آورده است که شاخصی از رشد فعال دیپیر است. شکل (۷)، عکسهای د، ر) قشر رسوبی در یک برش جاده و همچنین یک فرازش نمک به صورت اشکال قارچی که در آن جنس پایه از نمک و کلاهای رسوبات در روی آن را نمایش می‌دهد.

کویرها و کفه‌های نمکی: در مناطق پست و چاله‌های منطقه مورد مطالعه و پیرامون کوه‌های نمکی، که عمدتاً شامل چاله‌های کویری می‌شود، سطح خاک و کفه‌های کویری بر اثر آب‌های شور ناشی از شسته شدن و انحلال گنبد‌ها، به صورت شوره‌زار و سرزمین‌های پف کرده و کویرهای نمکی نمایان شده‌اند. این زمین‌ها به دلیل چاله‌ای بودن، به مثابه سطوح اساس گنبد‌ها عمل کرده و آب ناشی از بارش‌ها را در خود جای می‌دهند. پس از تبخیر آب و خشک شدن کفه‌های نمکی، اشکال متعدد و متنوعی مانند کویرهای شخم‌زده و چند ضلعی‌های نمکی بوجود می‌آیند (شکل ۷ عکس ک). این پهنه‌ها خاک پفکی و سست دارند که هم مستعد فرسایش آبی و هم بادی‌اند و در نتیجه می‌توانند نمک را به نواحی دورتر منتقل کنند.

پرتگاه: در توده‌های نمکی و رسوبات اطراف آنها به واسطه بالا آمدن گنبد‌های نمکی و به همراه آن بالا آمدن رسوبات، پرتگاههایی شکل گرفته‌اند که با شیب تند به سطح دشتهای پیرامون خود ختم می‌شوند. توده‌های نمکی به واسطه تاثیر گسل‌های حاصل از نیروهای تکتونیک و عوامل مختلف فرسایش به شدت ناپایدار شده است. شکل (۷) تصویر و) مورفولوژی پرتگاه را نشان می‌دهد که در مجاورت گنبد‌های نمکی پرتگاههایی به بلندی حدود ۱۱۰ متر وجود آمده است.



شکل ۷. تصاویر مورفولوژی گنبد‌های نمکی در منطقه مورد مطالعه، عکس الف) کارنهای نمکی؛ عکسهای ب، پ و ت تصاویر انواع مختلف از فروچاله‌ها روی سطح گنبد‌های نمکی؛ عکس س) اشکال گل‌کلمی ایجاد شده بر اثر تبلور مجدد نمک بر روی برخی گنبد‌ها؛ عکس ج) تصویر برداشت شده از پلیگون‌های نمکی؛ عکسهای د و ر) تصاویر قشر رسوبی روی گنبد‌ها؛ عکس و) تصویر پرتگاه نمکی برداشت شده از تصاویر گوگل ارث؛ عکس ک) تصویر کویر پف کرده و بالآمده در مجاورت گنبد‌ها؛ عکس ن) فرسایش و تخریب گنبد‌ها پس از فرسایش قشر رویی آنها، عکس ی) نمایش یک معدن نمک و برداشت سنگ‌های نمکی

اثرات ژئوتکتونیک بر گنبدهای نمکی

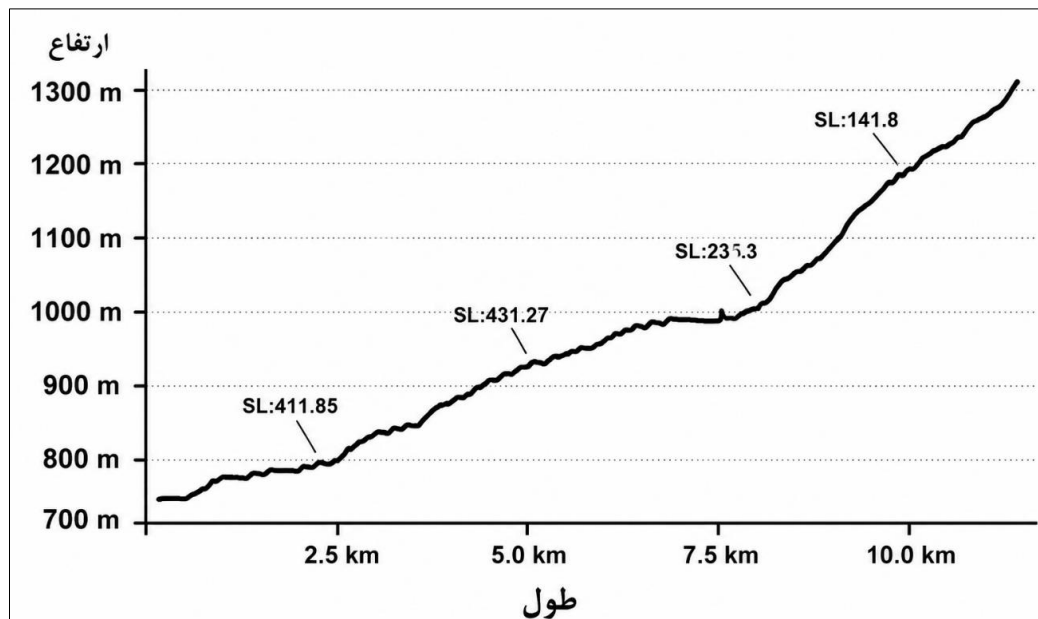
شاخص گرادیان طولی رودخانه (SL)

محاسبات نشان داد که مقادیر SL در منطقه بین 141.86 تا ۴۱۱.۸۵ تغییر می‌کند و میانگین کل رودخانه در محدوده‌ی گنبدهای نمکی 305.09 است (جدول ۱). بر اساس تحلیل نقشه‌ها و مقادیر به دست آمده از شاخص گرادیان طولی می‌توان بیان داشت که زیرحوضه‌های ارتفاعی پایین‌تر از ۸۰۰ متر، مقادیر بالایی از گرادیان طولی رودخانه را نشان می‌دهند (جدول ۱) و در کلاس ۲ قرار می‌گیرند، در حالی که زیرحوضه‌های بالاتر از ۱۱۰۰ متر کمترین گرادیان طولی را داشته‌اند و در کلاس ۳ قرار می‌گیرند. این الگو بیانگر این است که بخش‌های پایین‌دست در مجاورت گنبدها و گسل‌ها، با نرخ بالاآمدگی و عدم تعادل فرسایشی بیشتری مواجه هستند (شکل ۸).

جدول ۱. طبقه‌بندی SL رودخانه کلوت اردکان

کلاس	SL	L (m)	ΔL (m)	ΔH (m)	بازه ارتفاعی (m)
2	411.85	5560.6	1350.12	100	900–800
2	431.27	4875.4	1130.45	100	1000–900
3	235.39	2308.7	980.76	100	1100–1000
3	141.86	979.64	690.55	100	1200–1100
2	305.09	—	—	—	میانگین

از آنجا که این رودخانه در طول مسیر خود در رسوبات کنگلوکرا و گل گچ دار به همراه رسهای نئوژن در جریان است زیرشاخه‌هایی که در ارتفاع بالاتر از ۸۰۰ متر قرار دارند با میزان SL ۴۱۱.۸۵ بالاترین و زیرشاخه‌هایی که در ارتفاع بالاتر از ۱۲۰۰ متر با میزان SL ۱۴۱.۸۶ کمترین میزان فعالیت تکتونیکی در محدوده مورد مطالعه را داشته است. بطور کلی نتایج حاصله میزان SL زیر شاخه‌های ارتفاع پایین در کلاس دو و زیرشاخه‌های ارتفاع بالا در کلاس سه قرار می‌گیرند (شکل ۸).



شکل ۸. نمایش نیمرخ طولی رودخانه اصلی منطقه و مقادیر SL در بخشهای مختلف آن

شاخص سینوسیته کانال رودخانه (S_{mr})

برای رودخانه کلوت اردکان مقادیر سینسوزیته در حدود 1.40 به دست آمده است (جدول ۲)؛ یعنی رودخانه حالت پیچان رودی نسبتاً توسعه یافته دارد و از نظر مورفوتکتونیک، فعالیت تکتونیکی نسبتاً بالا را تایید می کند .

جدول ۲. سینوسیته کانال رودخانه

حوضه	C (m)	V (m)	S
کلوت اردکان	31059.14	22081.12	1.40

به طور کلی، الگو و نیمرخ طولی و عرضی کانال رودخانه‌ها نسبت به شیب بسیار حساس است. بر این اساس، سینوسیته رود با افزایش مقدار کج شدگی برای رسیدن به یک مقدار ثابت کاهش و با کاهش کج شدگی این مقدار نیز افزایش پیدا می کند. به شکل عمومی، میزان سینوسیته با کاهش شیب افزایش می یابد که این تغییر بیانگر تغییر و کاهش در نرخ فعالیت زمین ساختی منطقه محسوب می شود. به همین ترتیب با افزایش شیب، مورفولوژی کانال رود به شکل شاخه شاخه نزدیکتر می شود که این امر دلیل مناسبی جهت استنباط بر خاستگی زمین ساختی است (گله داری و غلامی، ۱۳۷۴). هرچه میزان شاخص S از یک بیشتر باشد نشان دهنده فعالیت تکتونیکی فعال است. نتایج محاسبات این شاخص در جدول (۳) منطقه مورد مطالعه به میزان ۱,۴۰ می باشد که نشان دهنده فعال بودن تکتونیک در منطقه است.

جدول ۳. شاخص های سینوسیته کانال رودخانه

نام حوضه	C	V	S
کلوت اردکان	۳۱۰۵۹,۱۴	۲۲۰۸۱,۱۲	۱,۴۰

شاخص نسبت پهنای کف دره به ارتفاع دره (VF)

این شاخص فاصله از جبهه کوهستان برای هر دره و با استفاده از رابطه زیر بدست می‌آید (گورابی، ۱۳۸۶).

$$V_f = \frac{2V_{fw}}{(E_{ld} - E_{sc}) + (E_{rd} - E_{sc})}$$

که در آن VF: پهنای کف دره یا عرض بستر دره $ERD \& Eld$: ارتفاع دیواره سمت راست دره و سمت چپ دره از سطح دریا و ESC: ارتفاع کف دره از سطح دریا را نشان می‌دهد.

بر اساس این رابطه، می‌توان دره‌های V شکل و U شکل را از یکدیگر تفکیک کرد. چنانچه مقدار شاخص V_f به دست آمده پایین باشد، نشان دهنده V شکل بودن دره، عمل حفر و بالا راندگی زیاد است (مقصودی و همکاران، ۱۳۹۰). همچنین اگر مقدار شاخص مزبور به نسبت بزرگ باشد، بیانگر دره‌هایی با کف پهن و مسطح است. بعلاوه، مقادیر شاخص V_f تحت تاثیر اندازه حوضه و نیز دبی رود یا دره و نوع سنگ متفاوت می‌باشد (الهمدونی و همکاران، ۲۰۰۷). مقادیر شاخص V_f به سه کلاس تقسیم می‌شود.

کلاس ۱: زمانی که مقدار V_f کمتر از ۰٫۵ باشد.

کلاس ۲: زمانی که مقدار V_f بین ۰٫۵ و ۱ قرار گیرد.

کلاس ۳: زمانی که مقدار V_f بزرگ‌تر از ۱ باشد.

برای محاسبه این شاخص در سه مقطع بالا دست، مقطع میانی و مقطع پایین دست از رودخانه اصلی VF محاسبه شد. که نتایج آن در جدول (۴-۴) درج شده است. در این مطالعه با توجه به اینکه میانگین V_f کمتر از ۱ می‌باشد نشان از V شکل بودن دره رودخانه و فعالیت تکتونیکی نسبتا بالا در محدوده مورد مطالعه می‌باشد و کمترین مقدار V_f برای مقطع بالادست به میزان ۰٫۶۸ و بالاترین آن برای مقطع پایین دست به میزان ۱٫۰۸ بدست آمده است (جدول ۴).

جدول ۴. شاخص پهنای کف دره به ارتفاع آن

نام گنبدهای نمکی	Smf	LS	Lmf
گنبد شماره ۱	۱٫۰۹	۶۹۱٫۴۸	۷۵۴٫۲
گنبد شماره ۸	۱٫۲	۱۱۶۷٫۰۳	۱۴۹۳٫۶
گنبد شماره ۱۴	۱٫۰۶	۱۳۳۷٫۰۷	۱۴۳۰٫۵۱

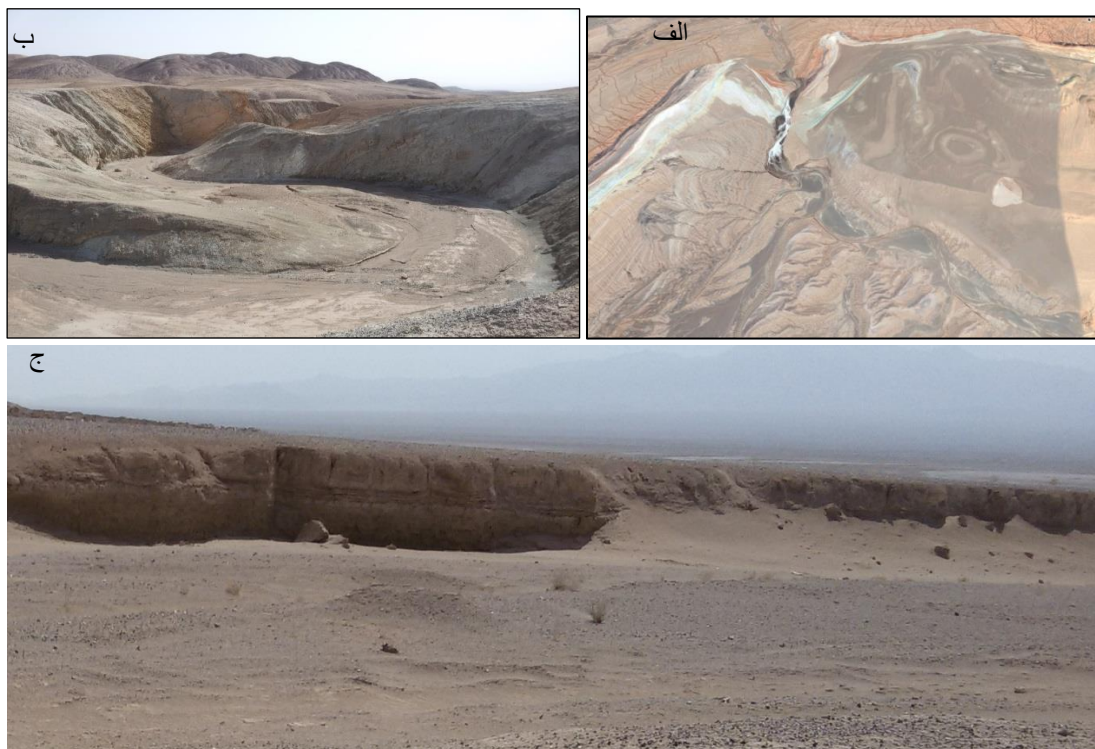
شواهد اثرات نئوتکتونیک بر گنبدهای نمکی

آنالیز نقشه‌ها، تصاویر ماهواره‌ای و مطالعات میدانی شواهد مستقیم اثرات فعالیت‌های نئوتکتونیکی را در منطقه مورد مطالعه نشان داد که مهمترین آنها عبارتند از وجود پادگانه‌های رودخانه‌ای نسبتا مرتفع در مجاورت گنبدها، عارضه عدم انطباق رودخانه با توپوگرافی و تحمیل رودخانه نسبت به گنبد نمکی و همچنین شکل‌گیری نمیرخ‌های پریپچ و خم در رودخانه‌های منطقه. در زیر این شواهد با تفصیل مورد بررسی قرار گرفته‌اند:

الف) وجود پادگانه‌های رودخانه‌ای: از شواهد تکتونیک فعال در هر منطقه‌ای بویژه در مناطق با شیب کمتر، وجود پادگانه یا پادگانه‌های مرتفع در مجاورت رودخانه‌ها است. در منطقه مورد مطالعه، این پادگانه‌ها به شکل منقطع در امتداد کانال رودخانه اصلی، در بیشتر موارد رد یک سوی کانال و گاهی هم در امتداد هر دو ساحل کانال رود قابل مشاهده است (شکل ۸ عکس ج). لیتولوژی یکسان و هموار بودن و کم شیب بودن منطقه، نشانه عدم دخالت لیتولوژی و حتی دینامیک آبهای جاری در ایجاد این عوارض است.

ب) پدیده تحمیل رودخانه نسبت به گنبدهای نمکی: در پیشین رود، عدم انطباق، حاصل تقدم مسیر شبکه آب بالا رود بر ایجاد عوارض ناهمواری بستر حداقل در میان‌رود و پایین‌رود است. در تمام موارد برای ایجاد پیشینه‌رود چند شرط لازم است. در درجه اول حرکات زمین ساخت باید به کندی صورت بگیرد؛ چون در غیر این صورت امکان انحراف شبکه آب از مسیر اولیه وجود دارد؛ همچنین، باید جریان آب از چنان قدرتی بهره‌مند باشد که نقش بالا آمدن ناهمواری‌ها را از بین ببرد (محمودی، ۱۳۷۴). در محدوده گنبدهای نمکی شمال شرق اردکان، از یک سو، خشکه‌رودها به صورت موقتی و فصلی در ایام بارندگی‌ها شکل می‌گیرند و از دیگر سو، گنبدهای نمکی همواره با کندی و آرامی در حال بالا آمدن بوده است. از این رو، رودخانه‌های قبلی بر گنبدهای نمکی خود را تحمیل کرده‌است (شکل ۹ تصویر الف). انحلال نمکها در طول دوره مرطوب پدیده تحمیل را تسریع و تشدید نموده است.

ج) پیچان رودها: بالا آمدن نمکها، چه به شکل گنبد یا سایر اشکال برجسته توپوگرافیکی سبب تغییرات شدید و وسیعی در امتداد مسیر کانالهای رودخانه‌ای در منطقه مورد مطالعه شده است. اثرات فعالیت تکتونیکی جدید در ایجاد پیچ‌وخم‌های رودخانه‌ها و شکل‌گیری قوس‌های بزرگ محدب و مقعر در پیچ‌های آن به خوبی در مطالعات میدانی و در آنالیز تصاویر ماهواره ای مشاهده گردید. البته قابل ذکر است که انحلال نمکها و سستی سنگهای منطقه سبب تشدید این عارضه‌ها گردیده است (شکل ۹ عکس ب).



شکل ۹. تصاویر نشان‌دهنده اثرات نئوتکتونیک بر گنبدهای نمکی؛ تصویر الف) نمایش تحمیل رودخانه بر گنبد نمکی؛ تصویر ب) عکس یکی از پیچان رودهای واقع در منطقه گنبدهای نمکی؛ تصویر ج) عکس یکی از پادگانه‌های بالآمده در مجاورت رودخانه اصلی

مورفومتری گنبدهای نمکی شمال شرق و جنوب شرق اردکان

مورفومتری به معنای تعیین ابعاد و اندازه پدیده‌های مختلف است. از منظر ژئومورفولوژی، دانش تحلیل کمی سطح زمین است که با استفاده از تکنیک‌های ریاضی، آماری و پردازش تصویر به بررسی و کمی‌سازی ویژگی‌های مورفولوژیکی، هیدرولوژیکی، اکولوژیکی و سایر ویژگی‌های سطح زمین می‌پردازد. گنبدهای نمکی شمال شرقی اردکان در اندازه‌های مختلفی در منطقه مورد مطالعه پراکنده هستند. در نقشه‌های زمین‌شناسی در بخش‌هایی که گنبدها اندازه کوچک‌تری دارد؛ به صورت مجموعه گنبدهای نمکی نشان داده شده‌اند. از این رو، برای شناسایی و تطبیق گنبدها با نقشه‌های زمین‌شناسی، عکس‌های هوایی و تصاویر ماهواره‌ای کارهای میدانی زیادی انجام شد و از نزدیک و به شکل مستقیم برخی شاخص‌های کمی گنبدها از قبیل (مختصات جغرافیایی، ارتفاع نسبی، ضخامت لایه‌ها و امتداد محور طولی گنبدها اندازه‌گیری شد و این پارامترها با گنبدهای دیگری که در جنوب شرقی اردکان واقع شده‌اند مقایسه شد. بعد از تطبیق گنبدها با نقشه‌های زمین‌شناسی (۱:۱۰۰۰۰۰)، نقشه توپوگرافی (۱:۵۰۰۰۰) و شناسایی کامل آنها سایر داده‌های اولیه مثل طول گسل، مساحت، محیط، شعاع و فاصله تا نزدیکترین گسل استخراج شد. جهت بررسی مورفومتری گنبدها، ضریب دایره‌واری، ضریب کشیدگی، ضریب برافراشتگی و ارتفاع نسبی آنها محاسبه شد. نتیجه محاسبات مورفومتری گنبدهای نمکی در منطقه در جدول شماره (۱ و ۲) نمایش داده شده است.

ضریب دایره‌واری: در منطقه شمال شرقی اردکان تعداد ۱۴ گنبد و در جنوب شرقی اردکان نیز ۵ گنبد مورد مطالعه قرار گرفته و سپس به مقایسه این دو گروه از گنبدها پرداخته شده و محاسبات آماری مرتبط با ضریب دایره‌واری آنها انجام گرفته است. با توجه به جداول شماره (1 و 2) از مجموع چهارده گنبد انتخابی، ضریب دایره‌واری بین ۰/۴۰ تا ۰/۹۸ متغیر است. بالاترین میزان ضریب گردی ۰/۹۸، ۰/۹۵، ۰/۹۴ و ۰/۹۳ است که به ترتیب از بزرگ به کوچک مربوط به گنبدهای شماره ۶، ۸، ۵ و ۷ می‌باشد و کمترین میزان ضریب گردی ۰/۴۰ و ۰/۶۶ می‌باشد که به ترتیب متعلق به گنبد شماره ۴ و ۱۰ می‌باشد. بالاترین میزان گردشگی به میزان ۰/۹۸ مربوط به گنبد شماره شش و کمترین آن به میزان ۰/۴۰ مربوط به گنبد شماره چهار است. قرارگیری دو گسل امتداد لغز در دو طرف گنبد شماره ۴ باعث شده است که این گنبد بیشتر در امتداد دو گسل کشیده شده و از گردشگی آن کاسته شود. همانطور که اشاره شد گنبدهای جنوبی ۵ مورد هستند که به ترتیب از جنوب شرقی به شمال غربی از یک تا ۵ شماره گذاری شده‌اند. در گنبدهای جنوب شرقی اردکان ضریب دایره‌واری بین ۰/۵۲ و ۱ متغیر است و گنبد شماره یک بالاترین و گنبد شماره ۲ کمترین ضریب دایره‌واری را دارد (جدول 2).

محاسبه ضریب کشیدگی: از مجموع ۱۴ گنبد مطالعه شده در منطقه شمال شرقی اردکان، گنبد شماره ۴ و ۱۰ به ترتیب با ۲/۰۶ و ۲/۰۵ بالاترین ضریب کشیدگی را دارند و گنبدهای ۷ و ۹ نیز به ترتیب با ۱/۰۱ و ۱/۰۹ کمترین میزان کشیدگی را نشان دادند. به نظر می‌رسد کشیدگی بیشتر گنبدها در اثر مجاورت با گسل‌ها و در امتداد آنها صورت گرفته است. در واقع، نمک‌ها در امتداد شکستگی‌های گسل و در درز و شکاف‌های به وجود آمده در هنگام فعالیت، از توان صعود و بالآمدگی بیشتری برخوردار بوده‌اند. مشاهدات نشان داد که گسل‌های امتداد لغز بیشترین تاثیر را در کشیدگی گنبدها داشته است. نتایج ضریب کشیدگی در گنبدهای جنوب شرقی در جدول شماره (2) آورده شده است. بر این اساس، گنبد شماره ۲ با مقدار ۵/۱۰ بالاترین میزان ضریب کشیدگی را دارد و گنبد شماره ۵ با ۱/۳۰ کمترین میزان ضریب کشیدگی را دارد. نتیجه مقایسه دو گروه از گنبدها نشان داد که گنبدهای جنوبی با ۵/۱ از ضریب کشیدگی بیشتری برخوردار است.

ضریب برافراشتگی: بررسی‌ها و آنالیز گنبدهای نمکی شمال شرق اردکان نشان داد که گنبدهای شماره ۸ و ۹ با مقدار ۵۴۰۰ و ۱۷۶/۵ به ترتیب بالاترین مقدار ضریب برافراشتگی و گنبدهای ۱۰ و ۱۱ نیز با مقدار ۵/۲۳ و ۱۹/۱۲ کمترین مقدار برافراشتگی را دارند. مطابق اصول و مبانی نظری، در گنبدهای نزدیک به گسل به خاطر تزریق نمک در امتداد گسل‌ها گنبدها دارای کشیدگی زیادتری هستند. اما در گنبدهای دور از گسل‌ها، مقاومت روباره‌ها در برابر حرکت صعودی نمک موجب توزیع نمک در سطح و جهات مختلف می‌شود. در نتیجه مساحت، دایره‌واری گنبدها و برافراشتگی آنها بیشتر می‌شود. مقادیر این ضریب در گنبدهای جنوب شرقی نشان داد که گنبد شماره ۵ با مقدار ۱۰/۸ بالاترین و گنبد شماره ۴ با ۱/۶ کمترین ضریب برافراشتگی را داراست. نتیجه مقایسه دو گروه از گنبدها نشان داد که گنبدهای شمال شرقی با مقدار ۵۴۰۰ ضریب برافراشتگی بیشتری در مقایسه با گنبدهای مناطق جنوبی‌تر دارد.

ارتفاع گنبدهای نمکی: بررسی گنبدهای نمکی از نظر ارتفاع نشان داد که بالاترین ارتفاع در گنبدهای شمال شرقی از سطح دریا ۱۱۸۵ متر و در گنبدهای جنوب شرقی ۱۱۹۵ متر است و کمترین ارتفاع در گنبدهای شمال شرقی ۸۸۱ متر و در گنبدهای جنوب شرقی ۱۱۱۸ متر است. از نظر ارتفاع نسبی، بالاترین ارتفاع گنبدهای شمال شرقی ۱۶۷ متر و کمترین ارتفاع ۲۱ متر به دست آمد. بالاترین ارتفاع نسبی گنبدهای جنوب شرقی ۵۰ متر و کمترین ارتفاع ۱۰ متر اندازه‌گیری شد (جدول ۵). از مقایسه بالاترین میزان ارتفاع نسبی گنبدهای شمالی و جنوبی منطقه مورد مطالعه بر می‌آید که گنبدهای

شمال شرقی تقریباً ۳ برابر گنبد‌های جنوب شرقی ارتفاع دارند. همچنین، با بررسی نیمرخ طولی برخی از گنبدها از جمله گنبد شماره یک مشاهده گردید که برخی از گنبد‌های منطقه در حدود دو هزار متر طول دارند. تحلیلها نشان داد که این گونه از گنبدها جایی ایجاد شده‌اند که نمک‌ها به هنگام صعود با گسل‌ها برخورد کرده و هم جهت با آنها کشیده شده‌اند.

جدول ۵. پارامترهای مورفومتری گنبد‌های نمکی شمال شرق اردکان

ردیف	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	مساحت / km ²	محیط / Km	ارتفاع max	ارتفاع min	ارتفاع نسبی	محور طولی	محور عرضی	شعاع /m	ضریب کشیدگی ی	ضریب دایره واری	ضریب برافراشت گی	فاصله از نزدیک ترین گسل Km
۱	۳۲°۴۰'	۵۴°۲۵'	۱.۸	۲.۹۳	۱۱۳۸	۱۰۲۶	۱۲۷	۱.۱۲	۰.۸۵	۱۸۶	۱.۳۱	۰.۹۲	۶۸.۴	۱.۴
۲	۳۲°۴۷'	۵۴°۳۲'	۵.۴	۸.۱۳	۱۰۹۶	۹۴۷	۱۴۹	۳.۷۰	۲.۹۲	۱۳۸۸	۱.۲۶	۰.۸۶	۲۷.۵۹	۰
۳	۳۲°۴۸'	۵۴°۲۲'	۴.۲	۸.۵۲	۱۰۴۸	۸۸۱	۱۶۷	۳.۴۰	۲.۲۸	۱۳۳۳	۱.۴۹	۰.۹۲	۳۷.۵۷	۰
۴	۳۲°۴۲'	۵۴°۲۵'	۳.۶	۱۱.۱۸	۱۰۸۴	۹۳۰	۱۵۷	۲.۶۸	۱.۳	۲۳۹۹	۲.۰۶	۰.۴۰	۴۴.۱	۰
۵	۳۲°۵۵'	۵۴°۲۳'	۱.۲	۳.۹۸	۱۰۷۰	۹۵۶	۱۱۴	۱.۷۱	۱.۲۴	۷۵۰	۱.۲۷	۰.۹۴	۹۵.۷	۱
۶	۳۲°۴۴'	۵۴°۲۱'	۳.۶	۲۰.۵	۱۰۲۵	۹۷۹	۴۶	۰.۷۹۶	۰.۷۸	۳۴۴	۱.۱۲	۰.۹۸	۱۲.۷	۰
۷	۳۲°۴۴'	۵۴°۱۹'	۶.۷	۴.۸۴	۱۱۳۴	۱۰۵۸	۷۶	۱.۷۳	۱.۲۳	۷۰۲	۱.۰۱	۰.۹۳	۱۱.۳۳	۰
۸	۳۲°۴۳'	۵۴°۱۸'	۰.۵	۲.۴۹	۱۱۷۱	۱۰۸۸	۸۳	۲.۱۳	۱.۹۴	۵۳	۱.۴	۰.۹۵	۱۷۶.۶	۲.۴
۹	۳۲°۵۳'	۵۴°۱۶'	۰.۳	۰.۳۷	۱۱۳۰	۱۰۷۶	۵۴	۱.۴	۰.۶۰	۳۸	۱.۰۹	۰.۹۲	۱۶۳.۶	۳.۸
۱۰	۳۲°۳۰'	۵۴°۱۷'	۴.۱	۸.۶۹	۱۱۸۵	۱۱۶۴	۲۱	۳	۱.۴۶	۱۳۰۰	۲.۰۵	۰.۶۶	۵.۲	۰
۱۱	۳۲°۴۴'	۵۴°۱۴'	۱.۴	۴.۷۹	۱۱۵۰	۱۱۱۵	۳۵	۱.۸۴	۱.۵۲	۷۶۴	۱.۲۱	۰.۷۶	۲۴.۸	۰.۵
۱۲	۳۲°۵۲'	۵۴°۱۳'	۱.۸	۱.۴۶	۹۶۴	۹۴۱	۲۳	۰.۷۹۳	۰.۵۹۳	۲۳۲	۱.۳۱	۰.۲۷	۱۲.۸	۰.۹
۱۳	۳۲°۴۷'	۵۴°۰۸'	۴.۶	۰.۳۸	۱۱۰۷	۱۰۳۴	۸۳	۰.۹۰	۰.۷۹	۵۱	۱.۱۳	۰.۸۶	۱۷.۷	۰
۱۴	۳۲°۴۸'	۵۴°۰۸'	۱.۳	۳.۷	۱۱۶۳	۱۰۶۳	۱۰۰	۱.۳۶	۱.۱	۱۲۲	۱.۲۳	۱.۱۹	۷۵	۱.۶

جدول ۶. پارامترهای مورفومتری گنبد‌های نمکی جنوب شرقی اردکان

ردیف	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	مساحت / km ²	محیط / Km	ارتفاع max	ارتفاع min	ارتفاع نسبی	محور طولی	محور عرضی	شعاع /m	ضریب کشیدگی ی	ضریب دایره واری	ضریب برافراشت گی	فاصله از نزدیک ترین گسل Km
۱	۳۲°۱۷'	۵۴°۲۱'	۰.۶۰	۲.۸۹	۱۲۰۷	۱۱۵۷	۵۰	۱۲۵۰	۱۱۲۵	۳۳۷	۱.۸۰	۱.۰۲	۸۳.۳	۰.۰۷۸
۲	۳۲°۱۷'	۵۴°۱۶'	۱.۶۹	۶.۳۷	۱۱۹۵	۱۱۶۴	۳۱	۳۱۰۰	۴۵۳	۹۹۰	۵.۱۰	۰.۵۲	۱۸.۸	۰
۳	۳۲°۱۳'	۵۴°۲۲'	۰.۱۵	۱.۴۱	۱۱۳۴	۱۱۲۴	۱۰	۵۷۳	۳۰۱	۲۱۸	۱.۵۴	۰.۷۱	۷.۱	۰.۰۵۵
۴	۳۲°۳۷'	۵۴°۱۵'	۰.۳۳	۲.۱۰	۱۱۳۶	۱۱۲۳	۱۳	۸۲۹	۶۱۳	۲۴۳	۱.۴۴	۰.۹۳	۱.۶	۰.۰۲۶
۵	۳۲°۳۰'	۵۴°۱۹'	۰.۱۳	۱.۳۳	۱۱۳۲	۱۱۱۸	۱۴	۴۳۳	۲۹۴	۲۲۱	۱.۳۰	۰.۹۲	۱۰.۸	۰.۰۶۷

جدول ۷. مقایسه نتایج همبستگی گنبد‌های جنوب شرق و شمال شرق اردکان

ردیف	همبستگی گروه گنبد‌ها	مساحت با نزدیکترین گسل	ضریب برافراشتگی با نزدیکترین گسل	ضریب برافراشتگی با مساحت	ضریب کشیدگی با نزدیکترین گسل	ضریب کشیدگی بامساحت
۱	شمال شرقی اردکان	۰.۶۱	۰.۱	۰.۴	۰.۶۴	۰.۴۱
۲	جنوبی شرقی اردکان	۰.۵۰	۰.۴۷	۰.۰۵	۰.۵۷	۰.۹

جدول ۸. اختلاف پارامترهای مورفومتری بین گنبدهای جنوبی و شمال شرقی اردکان

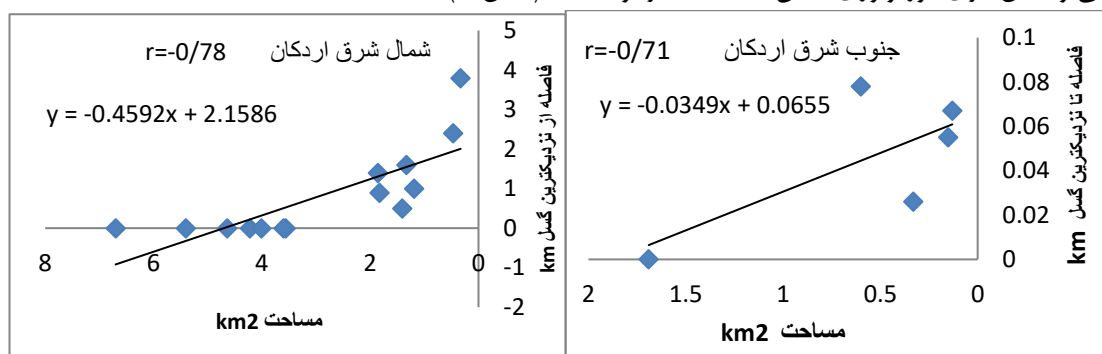
	فاصله از نزدیک ترین گسل (کیلومتر)	ضریب برافراشتگی	ضریب دایره واری	ضریب کشیدگی	شعاع (متر)	محور عرضی	محور طولی	ارتفاع نسبی	ارتفاع (حداقل)	ارتفاع (حداکثر)	محیط (کیلومتر)	مساحت (کیلومتر مربع)
گنبدهای شمال شرقی اردکان	۰.۰۰۰۶	۴۳.۸	۰.۸	۲.۲	۴۰.۲	۵۵.۷	۱۳۳.۷	۳۴	۱۱۳۷	۱۱۶۱	۲.۸	۲.۹
گنبدهای جنوب شرقی اردکان	۰.۸	۵۵.۲	۰.۸	۱.۴	۶۹.۰	۱.۳	۱.۹	۸۸.۲	۱۰۱۸	۱۱۰۵	۴.۵	۰.۵۸
اختلاف	۱۳۳۳	۱.۲	۱	۱.۵	۱.۷	۴۲۸	۶۵۱	۳.۸	۱.۱۱	۱.۰۵	۱.۶	۵

مقایسه پارامترهای مورفومتری گنبدهای نمکی شمال شرقی و جنوبی شرقی اردکان

پس از اندازه‌گیری پارامترهای کمی شامل مساحت، محیط، ضریب کشیدگی، ضریب دایره‌واری، ضریب برافراشتگی، فاصله از نزدیکترین گسل، تراکم گسل‌ها در شعاع ۵ کیلومتری گنبدها و ارتفاع نسبی گنبدها (جدول ۷ و ۸)، سعی شد که مقایسه‌ای بین این پارامترها در گنبدهای شمالی و جنوبی منطقه صورت بگیرد و مهمتر از آن همبستگی بین بسیاری از این پارامترها مشخص گردد. از این رو، مقادیر همبستگی آنها در اکسل مشخص و نمودار آنها ترسیم گردید که در زیر مهمترین همبستگی بین عناصر و مولفه‌های کمی گنبدها آورده شده است:

بررسی همبستگی بین مساحت گنبدها نمکی و فاصله از نزدیکترین گسل

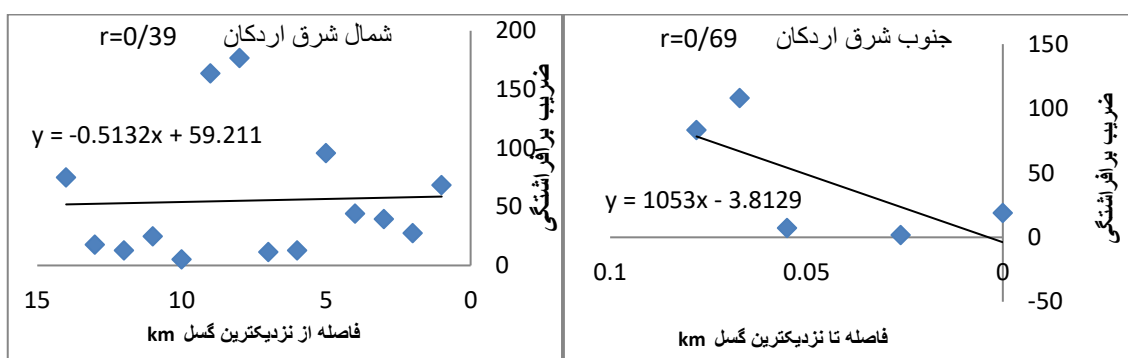
ارزیابی و تحلیل ارتباط بین مساحت گنبدهای نمکی شمال شرقی اردکان و فاصله آنها از نزدیکترین گسل نشان داد که بین این دو مؤلفه رابطه مستقیم با ضریب همبستگی -0.78 وجود دارد. این رابطه و مقدار برای مساحت گنبدها و فاصله از نزدیکترین گسل در گنبدهای جنوب شرقی اردکان ضریب همبستگی -0.71 است. بنابراین، بین دوری و نزدیکی گنبدها به گسل‌ها و میزان مساحت آنها نوعی همبستگی معکوس برقرار است. در واقع، فعالیت گسل‌ها در رشد و گسترش هر دو گروه از گنبدهای شمال شرقی و جنوب شرقی اردکان تاثیرگذار بوده است. هر چند که مقادیر این تاثیر در گنبدهای شمال شرقی و شکل‌گیری مورفولوژی خاص گنبدها بیشتر بوده است (شکل ۱۰).



شکل ۱۰. همبستگی بین مساحت و فاصله تا نزدیکترین گسل گنبدهای شمال شرقی و جنوب شرقی اردکان

بررسی رابطه بین میزان برافراشتگی با نزدیکترین گسل

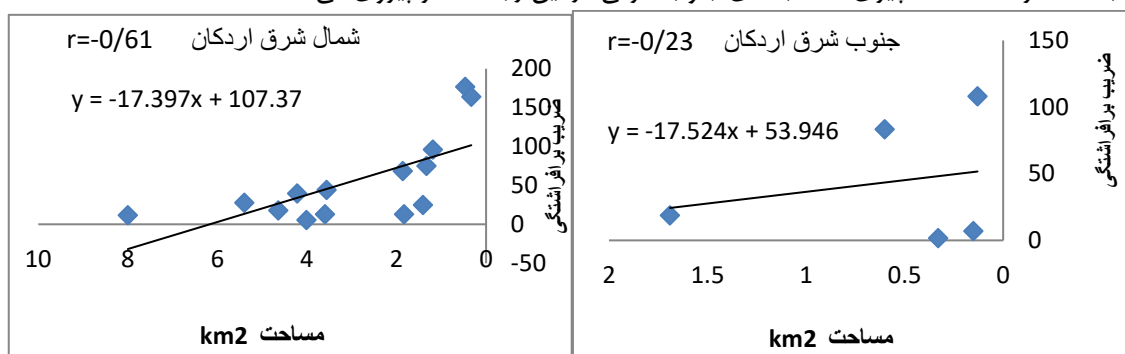
نمودار همبستگی بین میزان برافراشتگی با فاصله از گسل نشان می‌دهد که بین گنبدهای نمکی شمال شرقی اردکان ضریب همبستگی 0.39 و گنبدهای جنوبی با ضریب همبستگی 0.69 برقرار است که بیانگر تاثیر گسل‌ها در برافراشتگی و میزان آن است. تحلیل‌ها نشان داد که این تاثیر در برافراشتگی گنبدهای شمال شرقی نسبت به گنبدهای جنوب شرقی کمتر بوده است (شکل ۱۱).



شکل ۱۱. همبستگی بین فاصله از نزدیکترین گسل و ضریب برافراشتگی گنبدهای شمال شرق و جنوب شرق اردکان

بررسی رابطه بین برافراشتگی و مساحت گنبدها

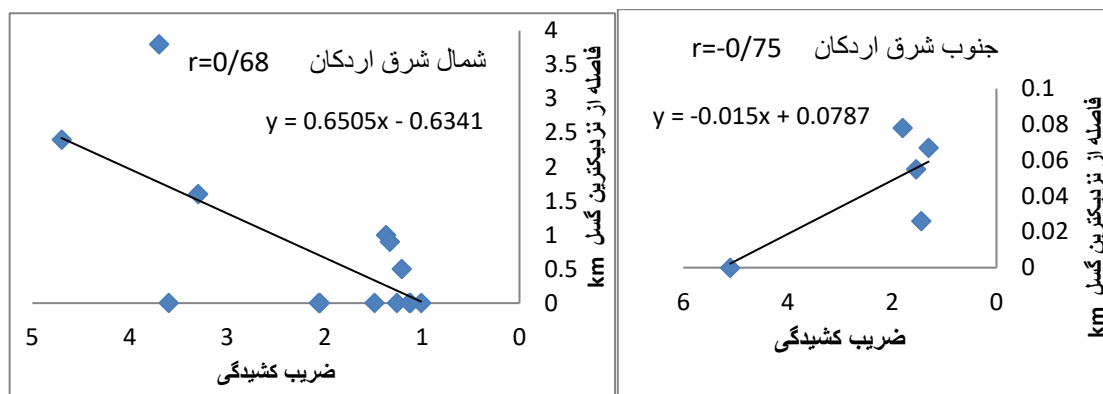
محاسبات و تحلیل‌های آماری نشان داد که بین ضریب برافراشتگی و مساحت گنبدها در منطقه شمال شرقی میزان همبستگی $-0/61$ ($p < 0.05$) و بین گنبدهای جنوب شرق اردکان میزان همبستگی $-0/23$ ($p > 0.05$) برقرار است که حاکی از رابطه همبستگی معکوس بین دو مولفه مذکور است. هر چند که مقدار این همبستگی در گنبدهای شمال شرقی بیشتر بوده است (شکل ۱۲). بعلاوه، در گنبدهای شمال شرقی همراه با افزایش مساحت گنبدها میزان ضریب کشیدگی گنبدها کمتر شده است، چیزی که گنبدهای جنوب شرقی از این رابطه کمتر پیروی می‌کند.



شکل ۱۲. همبستگی بین مساحت گنبدها و ضریب برافراشتگی گنبدهای شمال شرق و جنوب شرق اردکان

بررسی رابطه بین ضریب کشیدگی گنبدها و فاصله از گسل

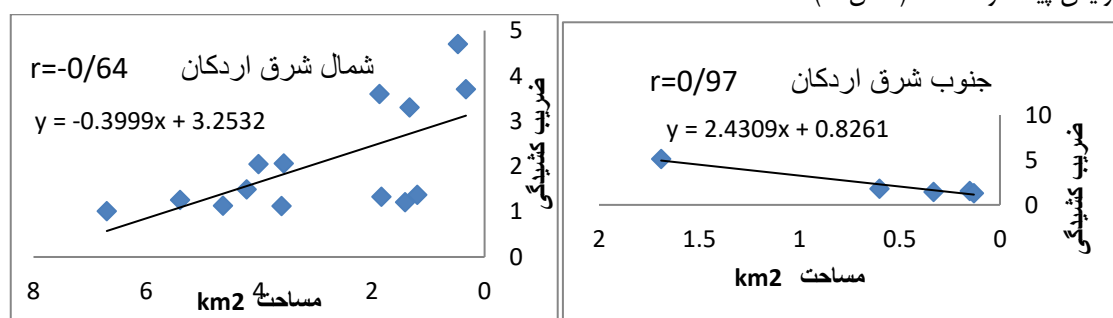
تحلیل‌های آماری نشان داد که بین دو پارامتر فاصله از گسل و ضریب کشیدگی گنبدهای نمکی در منطقه شمال شرقی اردکان ضریب همبستگی $0/68$ و در گنبدهای جنوبی ضریب همبستگی $-0/75$ وجود دارد. بر اساس نتایج حاصله از این مطالعات، بین کشیدگی گنبدهای شمال شرقی و میزان فاصله آنها از گسل‌ها رابطه مستقیم برقرار است به نحوی که هر اندازه فاصله گنبدها از گسل‌های مجاور کمتر بوده است، میزان ضریب کشیدگی گنبدها نیز بیشتر بوده است که این خود نشان‌دهنده تاثیر مستقیم گسل‌ها بر گنبدهای نمکی است. اما این رابطه در گنبدهای جنوب شرقی به شکل قوی‌تر و البته معکوس بوده است (شکل ۱۳).



شکل ۱۳. همبستگی بین ضریب کشیدگی و فاصله از نزدیکترین گسل گنبد‌های شمال شرق و جنوب شرق اردکان

بررسی رابطه بین ضریب کشیدگی با مساحت گنبد‌ها

تحلیل‌های آماری نشان داد که بین ضریب کشیدگی و مساحت گنبد‌ها در شمال شرقی اردکان همبستگی معکوس به مقدار $-0/64$ بوده و در گنبد‌های جنوبی این میزان به مقدار $0/97$ رسیده است. بدین ترتیب، رابطه مستقیم و قوی‌تری بین ضریب کشیدگی و مساحت گسل‌ها در گنبد‌های جنوبی منطقه مورد مطالعه وجود دارد. همچنین، در هر دو گروه، بویژه در گنبد‌های جنوب شرقی، هر چقدر مساحت گنبد‌ها بیشتر بوده است؛ به همان میزان نیز ضریب کشیدگی گنبد‌ها نیز افزایش پیدا کرده است (شکل ۱۴).



شکل ۱۴. همبستگی بین مساحت گنبد‌ها و ضریب کشیدگی گنبد‌های شمال شرق و جنوب شرق اردکان

بحث و نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که گنبد‌های نمکی شمال شرق و جنوب شرق اردکان نمونه‌ای بارز از تعامل میان فرآیندهای دیاپیرسم نمکی، تکتونیک فعال، فرسایش انحلالی و شرایط اقلیمی خشک هستند. الگوی پراکنش گنبد‌ها، امتداد غالب خاوری-باختری و همخوانی آنها با محور چین‌خوردگی‌ها و گسل‌های منطقه، نشان می‌دهد که صعود نمک‌ها عمدتاً تحت کنترل ساختارهای تکتونیکی و شکستگی‌های پوسته‌ای صورت گرفته است. این موضوع با مدل‌های ارائه‌شده توسط (هاداک و جاکسون ۲۰۰۷)، جاکسون و هاداکی (۲۰۱۷) و دولی و همکاران (۲۰۲۲) مبنی بر نقش گسل‌ها در تمرکز تنش و ایجاد مسیرهای صعود نمک همخوانی دارد. همچنین کشیدگی بیشتر برخی گنبد‌ها در مجاورت گسل‌های امتدادلغز، مؤید آن است که تنش‌های برشی و حرکات امتدادلغز در شکل‌گیری هندسه کنونی گنبد‌ها نقش تعیین‌کننده داشته‌اند. بررسی مورفولوژی سطحی گنبد‌ها نشان داد که اشکال کارستی نظیر کارن‌های نمکی، فروچاله‌ها، پلیگون‌های نمکی و اشکال گل‌کلمی، مهم‌ترین لندفرم‌های منطقه را تشکیل می‌دهند. توسعه گسترده این اشکال نشان‌دهنده فعال بودن

فرآیندهای انحلالی و تبخیری در منطقه است. وجود کارن‌های خطی و شیارهای موازی بر سطح گنبدها بیانگر تمرکز رواناب‌های فصلی و انحلال فعال هالیت است؛ فرآیندی که توسط بوتانس و همکاران (۲۰۰۹) و فیلیپی و همکاران (۲۰۱۳) نیز به عنوان مهم‌ترین عامل تحول چشم‌اندازهای کارست نمکی معرفی شده است. علاوه بر این، فراوانی فروچاله‌ها و تمرکز آنها در امتداد شکستگی‌ها نشان می‌دهد که ساختارهای تکتونیکی نه تنها در صعود نمک بلکه در توسعه کارست نمکی نیز نقش مستقیم دارند. این نتایج با مطالعات تالبوت و آفتابی (۲۰۰۴) درباره ارتباط انحلال نمک و فعالیت تکتونیکی در گنبدهای نمکی ایران مطابقت دارد.

شاخص‌های مورفوتکتونیکی محاسبه شده نیز بیانگر فعال بودن نئوتکتونیک منطقه است. مقادیر نسبتاً بالای شاخص SL در زیرحوضه‌های پایین دست و مجاور گسل‌ها نشان می‌دهد که این بخش‌ها تحت تأثیر بالاآمدگی فعال و عدم تعادل فرسایشی قرار دارند. همچنین مقدار سینوسیته رودخانه ($Smr=1.40$) و غالب بودن دره‌های V شکل با مقادیر پایین Vf ، نشان‌دهنده جوان بودن چشم‌انداز ژئومورفیک و تداوم حرکات تکتونیکی است. وجود پادگانه‌های رودخانه‌ای مرتفع، پیچان‌رودها و پدیده تحمیل رودخانه بر گنبدهای نمکی نیز شواهد مستقیمی از تداوم بالاآمدگی دیپیرها و تأثیر آنها بر شبکه زهکشی منطقه محسوب می‌شود. چنین شرایطی در مطالعات میشل^۱ و همکاران (۲۰۱۳) نیز به عنوان یکی از مهم‌ترین پیامدهای تکتونیک نمک معرفی شده است.

تحلیل مورفومتری گنبدها نشان داد که میان پارامترهایی نظیر ضریب کشیدگی، دایره‌واری، برافراشتگی و فاصله از گسل‌ها ارتباط معناداری وجود دارد. گنبدهای نزدیک به گسل‌ها کشیده‌تر و کم‌دایره‌تر بوده‌اند، در حالی که گنبدهای دورتر از گسل‌ها برافراشتگی و دایره‌واری بیشتری نشان داده‌اند. این الگو بیانگر آن است که در مجاورت گسل‌ها، نمک در امتداد شکستگی‌ها به صورت خطی تزریق شده و سبب افزایش کشیدگی گنبدها شده است، اما در نواحی دور از گسل، مقاومت پوش سنگ باعث توزیع شعاعی نمک و شکل‌گیری گنبدهای مدورتر شده است. چنین رفتاری با مدل‌های فیزیکی فرناندز و کاوس^۲ (۲۰۱۴) درباره کنترل میدان تنش بر مورفولوژی دیپیرها سازگار است.

از دیدگاه محیطی نیز نتایج پژوهش اهمیت زیادی دارد. انحلال شدید گنبدهای نمکی و انتقال رسوبات شور به دشت‌های اطراف، موجب گسترش شوره‌زارها، تخریب خاک و افزایش شوری رواناب‌ها و آبخوان‌ها شده است. این موضوع با یافته‌های نادری و همکاران (۲۰۱۶) و پژوهش‌های داخلی زارعی و همکاران (۱۳۹۱) همخوانی دارد که گنبدهای نمکی را یکی از عوامل اصلی شورشدگی محیط‌های خشک ایران معرفی کرده‌اند. در نتیجه، گنبدهای نمکی اردکان نه تنها به عنوان ساختارهای ژئومورفولوژیک و تکتونیکی اهمیت دارند، بلکه از منظر مخاطرات محیطی، مدیریت منابع آب و توسعه ژئوتوریسم نیز دارای ارزش ویژه‌اند.

منابع

- اسلامی، سعید، مقامی، غ ر، و محمودی، م. (۱۴۰۱). مطالعه تأثیرات دیپایریسم نمکی در ژئومورفولوژی جنوب استان سمنان در ایران مرکزی، فصلنامه زمین‌ساخت، 6(24)، 1-16. <https://doi.org/10.22077/jt.2024.6364.1156>
- الفتی، ا، آقاجانی، ح، و حاجیان، ع. (۱۳۹۴). تخمین شکل و عمق گنبدهای نمکی با استفاده از تفسیر داده‌های گرانیسنجی به روش شبکه‌های عصبی مصنوعی چندلایه، فیزیک زمین و فضا، ۴۱ (۳)، ۴۳۹-۴۵۲.
- <https://doi.org/10.22059/jesphys.2015.53697>
- امینی‌نژاد، غ ر، زندی‌فر، س، و فرودی جهرمی، م ر. (۱۳۹۵). مطالعه مورفولوژی گنبدهای نمکی دشتی در جنوب بوشهر، جغرافیا و آمایش شهری و منطقه‌ای، 6(19)، 181-200. <https://doi.org/10.22111/GAIJ.2016.2546>

- توکلی، ح. (۱۳۹۹). بازسازی واحدهای سنگ شناختی و پوشش گیاهی در گنبدهای نمکی کنار سیاه و جهانی با استفاده از روش *RBD*، جغرافیا و روابط انسانی، ۳ (۳)، ۱۴۳-۱۴۸. <https://doi.org/20.1001.1.26453851.1399.3.3.10.9>
- ثروتی، م. ر. (۱۳۸۰). گنبدهای نمکی ایران به عنوان یک واحد ژئومورفولوژی، نشریه بیابان، ۶ (۱)، ۸۷-۱۰۶.
- ثروتی، م. ر، حمدی، ب، یزجری، ک، و ادیب‌پور، م. (۱۳۸۹). بررسی مورفولوژی گنبد نمکی جهانی در جنوب غرب فیروزآباد، فصلنامه جغرافیای طبیعی، ۳ (۷)، ۱۵-۳۲.
- قاسمی، ا، ثروتی، م. ر، بهرامی، ش، و رحیم‌زاده، ب. (۱۳۹۹). ارزیابی میزان فعالیت گنبدهای نمکی منطقه لارستان با استفاده از شاخصهای تکتونیکی و روش سری زمانی *SBAS*، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ۸ (۴)، ۲۰۷-۲۲۰. <https://doi.org/10.22034/gmpj.2020.106431>
- شایان، س، زارع، م. ر، شریفی‌کیا، م، و امیری، ش. (۱۳۹۱). شناسایی و تحلیل اشکال ژئومورفولوژیکی مرتبط با تحول گنبدهای نمکی (مطالعه موردی: گنبد نمکی کرسیا - دشت داراب)، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ۲، ۷۳-۸۶. <https://doi.org/20.1001.1.22519424.1391.1.2.5.9>
- زارعی، ف، و مهدیزاده، ر. (۱۳۹۷). تأثیر گنبد نمکی جهانی بر کیفیت منابع آبی مجاور، فیروزآباد فارس، پژوهش‌های دانش زمین، ۹ (۳۴)، ۱-۱۴. <https://doi.org/10.29252/esrj.9.2.1>
- محمدی، پ، نعمتی، ف، و سهرابی مفرد، م. (۱۳۹۸). بررسی تغییرات مورفومتري در سطوح میزبان و روند رخنمون گنبدهای نمکی سری هرمز، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ۷ (۴)، ۱۹۷-۲۱۳. <https://doi.org/20.1001.1.22519424.1398.7.4.12.6>
- مهرابی، ع، پورخسروانی، م، و محبی، ا. (۱۳۹۸). ارزیابی نقش تکتونیک در بروزند گنبدهای نمکی منطقه زاگرس، پژوهشهای ژئومورفولوژی کمی، ۸ (۳)، ۱۶۵-۱۸۲. <https://doi.org/20.1001.1.22519424.1398.8.3.10.5>
- Abedi, F., Amirian-Chakan, A., Faraji, M., Taghizadeh-Mehrjardi, R., Kerry, R., Razmjoue, D., & Scholten, T. (2021). Salt dome related soil salinity in southern Iran: Prediction and mapping with averaging machine learning models. *Land Degradation & Development*, 32(3), 1540-1554. <https://doi.org/10.1002/ldr.3811>
- Amini-Nejad, G., Zandifar, S., & Foroudi Jahromi, M. R. (2016). Morphological study of the Dashti salt dome in southern Bushehr. *Geography and Urban & Regional Planning*, 6(19), 181-200. [In Persian]. <https://doi.org/10.22111/GAIJ.2016.2546>
- Baumann, T. S., Kaus, B., Popov, A., & Urai, J. (2022). Modeling of the 3D stress state of typical salt formations. In *The Mechanical Behavior of Salt X* (pp. 363-371). CRC Press.
- Bruthans, J., Filippi, M., Asadi, N., Zare, M., Šlechtá, S., & Churácková, Z. (2009). Surficial deposits on salt diapirs (Zagros Mountains and Persian Gulf Platform, Iran): Characterization, evolution, erosion and the influence on landscape morphology. *Geomorphology*, 107(3-4), 195-209. [10.1016/j.geomorph.2008.12.006](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.12.006)
- Bruthans, J., Filippi, M., Slavík, M., Závada, P., & Zare, M. (2024). Rapid evolution of salt glacier caves on a mountain diapir in a semiarid climate. *Geomorphology*, 448, 109058. [10.1016/j.geomorph.2024.109058](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2024.109058)
- Callot, J. P., Trocmé, V., Letouzey, J., Albouy, E., Jahani, S., & Sherkati, S. (2012). Pre-existing salt structures and the folding of the Zagros Mountains. <https://doi.org/10.1144/SP363.27>
- Dooley, T. P., Jackson, M. P. A., & Hudec, M. R. (2022). The salt glacier: A dynamic component of salt tectonic systems. *GSA Bulletin*, 134(5-6), 1147-1166. <https://doi.org/10.1306/08072222013>

- Eslami, S. R., Maghami Moghim, G., & Mahmoudi, M. (2022). Study of the effects of salt diapirism on the geomorphology of southern Semnan Province in Central Iran. *Zamin-Sakht Quarterly*, 6(24), 1-16. . [In Persian]. <https://doi.org/10.22077/jt.2024.6364.1156>
- Fernandez, N., & Kaus, B. J. (2014). Influence of pre-existing salt diapirs on 3D folding patterns. *Tectonophysics*, 637, 354-369. [10.1016/j.tecto.2014.10.021](https://doi.org/10.1016/j.tecto.2014.10.021)
- Ferrer, O., Carola, E., & McClay, K. (2022). Structural control of inherited salt structures during inversion of a domino basement-fault system from an analogue modelling approach. *EGU sphere*, 2022, 1-34. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2022-1183>
- Filippi, M., Bruthans, J., Jager, O., Zare, M., & Asadi, N. (2013). Project Namak: Some of the most spectacular findings in the Iranian salt karst. In 16th International Congress of Speleology (p. 48).
- Gansser, A. (1957). The geology of the central Elburz (Iran). *Revue de Géographie Physique et de Géologie Dynamique*, 1(4), 1-20.
- Gutiérrez, F., & Lizaga, I. (2016). Sinkholes, collapse structures and large landslides in an active salt dome submerged by a reservoir: The unique case of the Ambal ridge in the Karun River, Zagros Mountains, Iran. *Geomorphology*, 254, 88-103. [10.1016/j.geomorph.2015.11.020](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.11.020)
- Gutierrez, F., Zarei, M., Hudec, M. R., & Deirnik, H. (2023). Normal faulting and landsliding in morpho-structural domes related to buried salt stocks, Zagros Mountains, Iran. *Insights into salt breakout. Marine and Petroleum Geology*, 155, 106376. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2023.106376>
- Gutiérrez, F., Ilyati, I., & Zarei, M. (2025). Surface karst geomorphology in the Jahani salt extrusion, Zagros Mountains, Iran. *Geomorphology*, 109859. [10.1016/j.geomorph.2025.109859](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2025.109859)
- Gutiérrez, F., Haghighi, M. H., Ilyati, I., Motagh, M., & del Val, M. (2025). Diapiric and tectonic geomorphology of the river-damming Jahani salt extrusion associated with the strike-slip Kareh Bas Fault, including DInSAR displacement data (Zagros Mountains, Iran). *Geomorphology*, 488, 109955. [10.1016/j.geomorph.2025.109955](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2025.109955)
- Gradmann, S., Beaumont, C., & Ings, S. J. (2012). Coupled fluid flow and sediment deformation in margin-scale salt-tectonic systems: 1. Development and application of simple, single-lithology models. *Tectonics*, 31(4). [10.1029/2011TC003035](https://doi.org/10.1029/2011TC003035)
- Hudec, M. R., & Jackson, M. P. (2007). Terra infirma: Understanding salt tectonics. *Earth-Science Reviews*, 82(1-2), 1-28. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2007.01.001>
- Jackson, M. P. A., & Hudec, M. R. (2017). *Salt tectonics: Principles and practice*. Cambridge University Press.
- Jackson, M. P. A., & Talbot, C. J. (1991). A glossary of salt tectonics. The University of Texas at Austin, Bureau of Economic Geology, Geological Circular, 91-4, 1-44.
- Jahani, S., Callot, J. P., de Lamotte, D. F., Letouzey, J., & Leturmy, P. (2007). The salt diapirs of the eastern Fars Province (Zagros, Iran): A brief outline of their past and present. In *Thrust belts and foreland basins: From fold kinematics to hydrocarbon systems* (pp. 289-308). Springer Berlin Heidelberg.
- Jahani, S., Callot, J. P., Letouzey, J., & Frizon de Lamotte, D. (2009). The eastern termination of the Zagros Fold-and-Thrust Belt, Iran: Structures, evolution, and relationships between salt plugs, folding, and faulting. *Tectonics*, 28(6). <https://doi.org/10.1029/2008TC002418>
- Kent, P. E. (1979). The emergent Hormuz salt plugs of southern Iran. *Journal of Petroleum Geology*, 2(2), 117-144. <https://doi.org/10.1111/j.1747-5457.1979.tb00698.x>

- Naderi, M., Raeisi, E., & Zarei, M. (2016). The impact of halite dissolution of salt diapirs on surface and ground water under climate change, South-Central Iran. *Environmental Earth Sciences*, 75(8), 708.
- Nekouei, E., & Zarei, M. (2017). Karst hydrogeology of Karmustadj salt diapir, southern Iran. *Carbonates and Evaporites*, 32(3), 315-323.
- Pérez-Villar, G., Gutiérrez, F., Bausilio, G., & Di Martire, D. (2025). Integrating DInSAR and detailed mapping for characterizing ground displacement in the Cardona salt extrusion related to diapiric uplift, disolutional lowering, landsliding and sinkholes. *Engineering Geology*, 352, 108068. [10.1016/j.enggeo.2025.108068](https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2025.108068)
- Shami, S., Shahriari, M. A., Nilfouroushan, F., Forghani, N., Salimi, M., & Reshadi, M. A. M. (2024). Surface displacement measurement and modeling of the Shah-Gheyb salt dome in southern Iran using InSAR and machine learning techniques. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 132, 104016. [10.1016/j.jag.2024.104016](https://doi.org/10.1016/j.jag.2024.104016)
- Servti, M. R. (2001). Salt domes of Iran as a geomorphological unit. *Desert Journal*, 6(1), 87-106. . [In Persian].
- Servati, M. R., Hamdi, B., Yazjardi, K., & Adibpour, M. (2010). *Natural Geography Quarterly*, 3(7), 15-32. . [In Persian].
- Stöcklin, J. (1968). Structural history and tectonics of Iran: A review. *AAPG Bulletin*, 52(7), 1229-1258.
- Shayan, S., Zare, M. R., Sharifi-Kia, M., & Amiri, S. (2012). Identification and analysis of geomorphological forms related to the evolution of salt domes (Case study: Kersia salt dome–Darab Plain). *Quantitative Geomorphology Research*, 2, 73-86. . [In Persian]. <https://doi.org/20.1001.1.22519424.1391.1.2.5.9>
- Talbot, C. J. (1998). Extrusions of Hormuz salt in Iran. Geological Society, London, Special Publications, 143(1), 315-334. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1998.143.01.21>
- Talbot, C., & Aftabi, P. (2004). Geology and models of salt extrusion at Qum Kuh, central Iran. *Journal of the Geological Society*, 161(2), 321-334. <https://doi.org/10.1144/0016-764903-102>
- Yáñez, G., Hernández-Gómez, J. J., Trujillo-Alcántara, A., & Orozco-del-Castillo, M. G. (2024). Application of Riemannian Seismic Ray Path Tracing in Salt Dome Prospecting. *Applied Sciences*, 14(13), 5653. <https://doi.org/10.3390/app14135653>
- Zarei, M., & Mahdizadeh, R. (2018). The impact of the Jahani salt dome on the quality of adjacent water resources in Firoozabad, Fars. *Earth Science Research*, 9(34), 1-14. [In Persian]. <https://doi.org/10.29252/esrj.9.2.1>