

## Research Paper



# Morphometric Evaluation of Alluvial Fans Around Salt Diapirs in the Fars Zagros



Seyed Hamidreza Fatemi<sup>1</sup> , Fariba Karami<sup>\*2</sup> , Davoud Mokhtari<sup>3</sup> , Shahram Bahrami<sup>4</sup>

1-PhD Student of Geomorphology, Department of Geomorphology, Faculty of Planning and Environment Sciences, University of Tabriz, Tabriz, [h.fatemi1994@gmail.com](mailto:h.fatemi1994@gmail.com).

2-Prof. of Geomorphology, Department of Geomorphology, Faculty of Planning and Environment Sciences, University of Tabriz, Tabriz, [fkarami@tabrizu.ac.ir](mailto:fkarami@tabrizu.ac.ir).

3- Prof. of Geomorphology, Department of Geomorphology, Faculty of Planning and Environment Sciences, University of Tabriz, Tabriz, [d\\_mokhtari@tabrizu.ac.ir](mailto:d_mokhtari@tabrizu.ac.ir).

4- Assoc. Prof. of Geomorphology, Department of Geomorphology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, [sh\\_bahrami@sbu.ac.ir](mailto:sh_bahrami@sbu.ac.ir)

## Keywords

**Salt Domes, Alluvial Fans Morphometry, Fan Conicality Index Revised, Active Tectonics, Zagros Fold-Thrust Belt, Lar Region.**

## ABSTRACT

## Introduction

Salt domes represent one of the most influential halokinetic structures in evaporite-bearing fold-thrust belts, exerting strong control over surface geomorphological processes. The upward movement of ductile salt masses not only deforms overlying sedimentary layers but also modifies drainage organization, slope gradients, sediment pathways, and the development of piedmont depositional landforms such as alluvial fans. In the Zagros Fold-Thrust Belt, particularly in the Fars segment, salt diapirism associated with the Hormuz Formation has played a fundamental role in shaping mountain fronts and adjacent depositional systems. The growth and lateral expansion of salt domes lead to localized uplift, differential erosion, drainage diversion, and spatial confinement of sedimentary environments, which are directly reflected in the morphology and morphometry of alluvial fans and their upstream drainage basins. Despite the recognized importance of salt tectonics in landscape evolution, quantitative geomorphometric studies focusing on salt dome-controlled alluvial fan systems remain limited. Therefore, the main objective of this study is to evaluate the geomorphological effects of salt domes on alluvial fan development through a comparative morphometric analysis of alluvial fans and their contributing drainage basins in the Fars region of the Zagros Mountains.

## Methodology

This study utilizes an integrated geomorphometric approach combining remote sensing, GIS analysis, and statistical evaluation. Using a 12.5m ALOS PALSAR DEM in ArcGIS Pro, 45 alluvial fans and their upstream drainage basins around active Hormuz salt domes were analyzed. To evaluate halokinetic and tectonic controls on landscape evolution, ten morphometric indices were calculated: fan area (Fa), sweep angle (Sa), width-to-length ratio (W/L), revised fan conicality index (FCIR), and topographic slope (Fs) for the alluvial fans; and basin area (Ba), shape index (Bs), hypsometric integral (Hi), circularity ratio (Cr), and mean slope (BS) for the drainage basins.

Receive: 2026/02/26

Accepted: 2026/06/27

Published: 2026/09/23

\*Correspondin Author: Fariba Karami. [fkarami@tabrizu.ac.ir](mailto:fkarami@tabrizu.ac.ir)

How to cite this article: Fatemi, S.H., Karami, F., Mokhtari, D & Bahrami, Sh. (2026). Morphometric Evaluation of Alluvial Fans Around Salt Diapirs in the Fars Zagros. *Hydrogeomorphology*, 13(48) 156 – 186 .

DOI: [10.22034/hyd.2026.71757.1842](https://doi.org/10.22034/hyd.2026.71757.1842)



Copyright: © by the authors

Publisher: University of Tabriz

## Results and Discussion

The results indicate pronounced variability in the morphometric characteristics of alluvial fans developed around salt domes. Fans located adjacent to actively rising salt domes exhibit larger fan areas (Fa), wider sweep angles (Sa), and higher FCIR values, reflecting strong structural control, and deformation of depositional surfaces. Higher fan topographic slope (Fs) near salt domes indicate increased uplift rates and enhanced erosional energy in upstream catchments. Drainage basin morphometric analysis reveals that contributing drainage basins of alluvial fans, are generally smaller, more elongated, and characterized by lower basin circularity ratios (Cr) and higher basin shape indices (Bs). Elevated hypsometric integral (Hi) values and steeper basin (BS) indicate geomorphologically young basins undergoing active uplift and incision. Correlation analysis demonstrates strong relationships between fan area (Fa) and basin area (Ba), while higher FCIR values are closely associated with increased basin slope and hypsometric integral. These findings highlight the strong coupling between halokinetic uplift, drainage basin evolution, and alluvial fan morphodynamics.

## Conclusions

Results of this study reveal that lateral movements of salt domes towards downslope (alluvial fan apexes) have resulted in diversion of stream flow on the alluvial fan apexes and also in burying some parts of fans. These salt dome movements have played an important role in increasing sweep angle, width-to-length ratio, and FCIR values of studied alluvial fans. The salt dome activity also plays a dominant role in controlling the morphometry of contributing drainage basins of alluvial fans. Variations in fan geometry are directly linked to halokinetic uplift and structural deformation associated with salt diapirism. Among the applied indices, the revised fan conicality index (FCIR), fan slope, and hypsometric integral proved particularly effective in detecting the geomorphic signature of salt tectonics. Overall, this study demonstrates that integrated fan–basin morphometric analysis provides a robust quantitative framework for identifying and evaluating salt dome–controlled geomorphological processes in actively deforming orogenic belts.

## مقاله پژوهشی



# ارزیابی مورفومتری مخروط افکنه‌های پیرامون گنبد‌های نمکی زاگرس فارس



سید حمیدرضا فاطمی<sup>۱</sup>، فریبا کرمی<sup>۲\*</sup>، داود مختاری<sup>۳</sup>، و شهرام بهرامی<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی دکتری، گروه ژئومورفولوژی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. [h.fatemi1994@gmail.com](mailto:h.fatemi1994@gmail.com)

۲- استاد ژئومورفولوژی، گروه ژئومورفولوژی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. [fkarami@tabrizu.ac.ir](mailto:fkarami@tabrizu.ac.ir)

۳- استاد ژئومورفولوژی، گروه ژئومورفولوژی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. [d\\_mokhtari@tabrizu.ac.ir](mailto:d_mokhtari@tabrizu.ac.ir)

۴- دانشیار ژئومورفولوژی، گروه ژئومورفولوژی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. [sh\\_bahrami@sbu.ac.ir](mailto:sh_bahrami@sbu.ac.ir)

## چکیده

گنبد‌های نمکی کمربند چین‌خورده-رانده زاگرس، تأثیر چشمگیری بر شبکه زهکشی و تکامل لندفرم‌ها دارند. پژوهش حاضر با هدف تحلیل کمی تأثیر رشد و پویایی دیاپیرهای نمکی بر هندسه، شیب و شاخص‌های مورفومتری مخروط‌افکنه‌ها و حوضه‌های آبریز مرتبط در زاگرس فارس (شهرستان لارستان) انجام شده است. در این تحقیق، ۴۵ مخروط‌افکنه در حاشیه سه گنبد نمکی چاه‌بانو (غیرفعال)، شاه‌غیب و گهنه (فعال) با رویکردی تلفیقی شامل داده‌های سنجش‌ازدور، مدل رقومی ارتفاعی ALOS PALSAR (۱۲.۵ متر)، پردازش در ArcGIS Pro، تحلیل‌های آماری و بازدید میدانی بررسی شدند. شاخص‌های مورفومتری مخروط‌افکنه و حوضه محاسبه و تحلیل شد. نتایج نشان‌دهنده مقادیر بالای زاویه جاروب، نسبت عرض به طول و ضریب مخروط‌گرایی اصلاح‌شده (FCIR) در مخروط‌افکنه‌هاست که بیانگر فعالیت‌های جانبی و تکتونیک فعال گنبد‌هاست. مخروط‌افکنه‌های مجاور گنبد فعال شاه‌غیب به دلیل کنترل ساختاری قوی و بالاآمدگی، دارای مقادیر بالاتر FCIR، شیب توپوگرافی و شکل نامتقارن‌تر هستند. همچنین مقادیر بالاتر انتگرال هیپسومتری (Hi) و شاخص شکل (BS) در حوضه‌های این گنبد، نشان‌دهنده جوانی ژئومورفیک و فعالیت تکتونیک بیشتر آن است. در مقابل، گنبد چاه‌بانو ویژگی‌های فرسایشی پیشرفته‌تر و مخروط‌افکنه‌هایی با هندسه متعادل‌تر را نشان می‌دهد. در نهایت، این یافته‌ها تأییدکننده نقش غالب و متمایز پویایی هالوکینتیک (تکتونیک نمکی) در ناهنجاری‌های هندسی و تحول مورفومتری سیستم‌های مخروط‌افکنه‌ای در زاگرس فارس است.

## کلیدواژه‌ها

گنبدنمکی، مورفومتری مخروط افکنه، ضریب مخروط‌گرایی اصلاح شده، تکتونیک فعال، زاگرس چین‌خورده، منطقه لار

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۲/۰۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۰۶

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۷/۰۱

\*فریبا کرمی

ارجاع به این مقاله: فاطمی، سیدحمیدرضا؛ کرمی، فریبا؛ مختاری، داود و بهرامی، شهرام (۱۴۰۵). ارزیابی مورفومتری مخروط

افکنه‌های پیرامون گنبد‌های نمکی زاگرس فارس. هیدروژنومورفولوژی، دوره ۱۳(۴۸): 156 – 186.

رایانامه: [fkarami@tabrizu.ac.ir](mailto:fkarami@tabrizu.ac.ir)

شناسه دیجیتال مقاله: 10.22034/hyd.2026.71757.1842



Copyright: ©2025 by the authors

Publisher: University of Tabriz

## مقدمه

مخروط افکنه‌ها اشکال رسوبی بادبزی شکلی هستند که در خروجی رودخانه‌ها و آبراهه‌های کوهستانی تشکیل می‌شوند و حاصل تکرار چرخه‌های رسوب‌گذاری و فرسایش ناشی از فرایندهای رودخانه‌ای و جریان‌های جرمی هستند. مطالعات ژئومورفولوژیکی مخروط افکنه‌ها از دهه‌ی ۱۹۶۰ شروع شد (اسماعیلی و همکاران، ۱۳۹۷: ۱۶۵). از نظر ژئومورفولوژیکی، مخروط افکنه پیکره‌ای رسوبی با هندسه مخروطی است که از نقطه خروجی حوضه به سمت دشت‌های پست گسترش می‌یابد (هاروی<sup>۱</sup>، ۲۰۱۸: ۱؛ ژو<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۲۵: ۵). در مناطق خشک، مخروط افکنه‌ها به‌عنوان مخازن مهم آب زیرزمینی و خاک حاصلخیز شناخته می‌شوند و بخش‌های پایینی آن‌ها به دلیل توپوگرافی ملایم، بستر مناسبی برای توسعه شهری فراهم می‌کنند (اولیویرا جونیور<sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۱۹: ۸۲۰؛ گورابی و همکاران، ۲۰۲۱: ۱۴۵۰). مخروط افکنه‌ها از عوارض متنوع ژئومورفولوژیکی است که به دلیل تخلخل زیاد از جنبه‌ی تشکیل و تغذیه‌ی طبیعی سفره‌های آب زیرزمینی اهمیت فراوانی دارند و گسترش تمدن‌ها و مناطق مسکونی را در حاشیه‌ی خود با بهره‌برداری از این منابع آبی به وسیله‌ی حفر قنات و چاه به دنبال داشته است (اصغری پوردشت بزرگ و همکاران، ۱۳۹۷: ۶۵). از این‌رو، ارزیابی و تحلیل دقیق مخروط افکنه‌ها نقش مهمی در برنامه‌ریزی سرزمین و مدیریت منابع دارد (ژو<sup>۴</sup> و همکاران، ۲۰۲۵: ۶). فرایند شکل‌گیری، رشد و حتی متروکه‌شدن مخروط افکنه‌ها به‌شدت تحت تأثیر فعالیت‌های تکتونیکی و تغییرات محیطی قرار دارد (بروک<sup>۵</sup> و همکاران، ۲۰۱۸: ۲۰۴۰). به همین دلیل، این اشکال رسوبی شواهدی ارزشمند از تعامل نیروهای درونی و بیرونی زمین به شمار می‌آیند (سون<sup>۶</sup> و همکاران، ۲۰۰۷: ۵۳؛ واکر<sup>۷</sup> و فتاحی، ۲۰۱۱: ۱۲۶۰). ناهمگونی مورفولوژیکی مخروط افکنه‌ها حاصل تأثیر عوامل متعددی مانند جنس سنگ‌بستر، الگوی بارندگی و به‌ویژه فعالیت‌های تکتونیکی است (بهرامی، ۲۰۱۳: ۲۲۰؛ مائو<sup>۸</sup> و همکاران، ۲۰۲۴: ۱). به‌دلیل حساسیت بالای مورفولوژی مخروط افکنه‌ها نسبت به فرایندهایی مانند گسل‌خوردگی، بالاراندگی و چین‌خوردگی، این اشکال به‌عنوان شاخص‌های قابل اعتماد فعالیت تکتونیکی شناخته می‌شوند (جمال‌آبادی و همکاران، ۱۳۹۷: ۳۷).

شناسایی حرکات هالوکینتیکی که همزمان با رسوب‌گذاری نمک رخ می‌دهند، برای درک پویایی تغییرشکل‌های هالوکینتیکی پس از نهشته شدن نمک اهمیت اساسی دارد. توده‌های نمکی می‌توانند بسیار متحرک باشند و هم به‌صورت عمودی و هم به‌صورت جانبی به سمت نواحی با بار کمتر جریان پیدا کنند؛ این حرکت می‌تواند هم در زیرسطح و هم در سطح زمین رخ دهد. حرکت نمک باعث ایجاد تغییر شکل در سطح زمین می‌شود؛ به‌طوری که در نواحی برداشت یا کاهش حجم نمک معمولاً فرونشست رخ می‌دهد و در نواحی تجمع یا تورم نمک بالاآمدگی ایجاد می‌شود. همچنین در مناطقی که جریان جانبی نمک وجود دارد، جابه‌جایی افقی (برای مثال گسترش سنگ‌ها) مشاهده می‌شود (گوتیرز<sup>۹</sup> و همکاران، ۲۰۱۹: ۱۸۰). گنبد‌های نمکی یکی از محیط‌های ساختاری مهم است که مخروط افکنه‌ها در مجاورت آن‌ها توسعه می‌یابند. این ساختارها در نواحی مختلف ایران از جمله زاگرس جنوبی، ایران مرکزی و شمال‌غرب کشور گسترش دارند (رجبی و شیری‌طرز، ۱۳۸۸: ۴۸). تکتونیک نمک را می‌توان در دو اصل ساده زمین‌شناسی خلاصه کرد: اول، تفاوت تنش‌ها، محرک اصلی تکتونیک نمک است؛ این موضوع باعث می‌شود هالوکینز (حرکت نمک) فرایندی بسیار منفعل‌تر از آنچه پیش‌تر تصور می‌شد، باشد. دوم، نمک لایه‌ای بسیار ضعیف و ناپایدار در زیرسطح است؛ جریان جانبی و سر خوردن آن، پوش سنگ را در نواحی کشش با خود جابه‌جا می‌کند و در نواحی فشاری مانند یک دکولمان عمل می‌کند (جکسون<sup>۱۰</sup> و همکاران، ۲۰۱۵: ۳۷۵). کمپلکس هرمز از طریق نمک‌گیرها و پلاگ‌های نمکی و اندریت رخنمون‌یافته در فارس و زاگرس چین‌خورده شناخته شده است. ظهور این پلاگ‌های تبخیری هرمز ارتباط نزدیکی با گسل‌های رانده‌ی اصلی موازی با روند چین‌ها دارد. پلاگ‌ها همچنین در امتداد گسل‌های چاقویی<sup>۱۱</sup> یا در حوضه‌های کششی در امتداد گسل‌های امتدادلغز شمال-جنوب ایجاد شده تشکیل می‌شوند. مکانیسم محرک هالوکینز و برون‌زدگی هرمز، فشار جانبی وارد بر گنبد‌های نمکی پیش‌ساخته بوده است. در زاگرس، سری هرمز فقط به‌صورت پلاگ‌های نمکی جابه‌جا شده

<sup>1</sup> Harvey<sup>2</sup> Zhou<sup>3</sup> Oliveira Junior<sup>4</sup> Zhou<sup>5</sup> Brooke<sup>6</sup> Sohn<sup>7</sup> Walker<sup>8</sup> Mao<sup>9</sup> Gutiérrez<sup>10</sup> Jackson<sup>11</sup> Tear Fault

رخمون یافته است. (لتوزی<sup>۱</sup> و شرکتی، ۲۰۰۴: ۷۵۳). نمک در حال جریان یکی از پیچیده‌ترین و از نظر بصری چشمگیرترین تغییر شکل‌های زمین‌شناسی در دماهای پایین را که در سطح زمین دیده می‌شود، ایجاد می‌کند. نمک در اعماق کم پوخته (حدود ۳ تا ۵ کیلومتر) بسیار ضعیف بوده و شکل‌پذیری بالایی دارد (بهرودی و کویی<sup>۲</sup>، ۲۰۰۳: ۷۱۹). در ایران، گنبد‌های نمکی در حال جریان تا ارتفاع ۱۰۰۰ متر بالاتر از چشم‌انداز اطراف رشته کوه زاگرس بالا می‌آیند (وارن<sup>۳</sup>، ۲۰۰۰). هالوکینز ناشی از نمک هرمز با سن پرکامبرین پسین تا کامبرین آغازین در کمربند چین‌خورده-رانده زاگرس و خلیج فارس اتفاق افتاده است. داده‌های زمین‌شناسی و ژئوفیزیکی نشان می‌دهند که کمربند چین‌خورده-رانده زاگرس در حال حاضر فعال است و با نرخ حدود ۲۰ تا ۳۰ میلی‌متر در سال کوتاه‌شدگی را تجربه می‌کند (بهرودی و کویی<sup>۴</sup>، ۲۰۰۳). در زاگرس، هندسه گنبد‌های نمکی تحت تأثیر تغییرات عمدتاً در اثر تکتونیک کششی پوسته ضخیم در پالئوزوئیک و همچنین گسل‌های کششی کم‌عمق‌تر در ترشیری ایجاد شده‌اند (کارمیناتی<sup>۵</sup> و همکاران، ۲۰۱۶: ۲۳۶). بالآمدگی در گنبد‌های نمکی اغلب با گسل‌خوردگی در لایه‌های پوشاننده همراه است (شامی و همکاران، ۲۰۲۴: ۲). گنبد‌های نمکی هرمز عمدتاً در بخش جنوب‌شرقی کمربند چین‌خورده زاگرس و در خلیج فارس متمرکز شده‌اند. رخمون‌های چشمگیر ساختارهای نمکی، این منطقه را به یکی از برجسته‌ترین و تماشایی‌ترین نواحی هالوکینتیکی جهان تبدیل کرده‌است (حسن‌پور و همکاران، ۲۰۱۸: ۱۲۷). گنبد‌های نمکی زاگرس فارس، ضمن ایجاد ساختارهای تکتونیک پیچیده، تأثیر قابل توجهی بر تکامل لندفرم‌های اطراف از جمله مخروط افکنه‌ها دارند. این گنبد‌های نمکی از دو منبع متفاوت منشأ گرفته‌اند: ۱- نمک فارس دگرزاد با سن الیگوسن پسین تا میوسن آغازین و ۲- نمک فارس دگرزاد با سن الیگوسن تا میوسن آغازین که بر روی سنگ‌بنای بلوری پرکامبرین و به‌طور مستقیم نهشته شده است (تکنیک و همکاران، ۲۰۲۴: ۱-۲). فعالیت تغییرشکل عمودی فعال گنبد‌های نمکی (یعنی بالآمدگی و فرونشست) می‌تواند باعث تغییر در شبکه آبراهه‌ای نیز بشود. این تغییرات شامل انحراف مسیر رودخانه‌ها، مسدود شدن کانال‌ها یا حتی از بین رفتن کامل مسیر کانال‌ها شود. همچنین گنبد‌های نمکی در حال صعود می‌توانند توسعه گذرگاه‌های چند سطحی غارها را که در اثر انحلال نمک و در ارتباط با سطح ایستابی نسبتاً ثابت شکل می‌گیرند را کنترل کنند (گوتیرز<sup>۶</sup> و همکاران، ۲۰۱۹: ۱۸۱). حرکات دیاپیری می‌تواند موجب تغییر شیب سطح، جابه‌جایی کانال‌ها، افزایش شوری خاک و پیچیدگی الگوی رسوب‌گذاری مخروط افکنه‌ها شود (کالوت<sup>۷</sup> و همکاران، ۲۰۰۷: ۳۱۰؛ جهانی و همکاران، ۲۰۰۹: ۲). به‌طور کلی، مطالعات داخلی و خارجی نشان داده‌اند که تعامل میان تکتونیک فعال، دیاپیرسم نمکی و فرایندهای سطحی، عامل اصلی تنوع مورفومتری و تکامل مخروط افکنه‌ها در این نواحی است (ملکی و حیدری، ۱۳۹۶؛ قاسمی، ۱۳۹۹؛ بهرامی و همکاران، ۱۴۰۳؛ نجفی و همکاران، ۱۴۰۴؛ تومچیک<sup>۸</sup> و همکاران، ۲۰۲۴؛ قهرمان و ناگی<sup>۹</sup>، ۲۰۲۴).

مطالعات انجام‌شده در زمینه تأثیر فعالیت‌های تکتونیک بر مخروط‌افکنه‌ها نشان می‌دهد که این فرایندها نقش مهمی در شکل‌گیری، تحول و ویژگی‌های مورفومتری این عوارض ژئومورفولوژیک دارند. نتایج پژوهش‌های انجام‌شده در ایران بیانگر آن است که فعالیت‌های تکتونیک می‌توانند موجب تغییر در زاویه جاروب، ویژگی‌های نیم‌رخ طولی و عرضی، چندبخشی شدن مخروط‌افکنه‌ها، بریدگی رأس، تشکیل خندق‌های فرسایشی، بالآمدگی رسوبات کواترنری و ایجاد مخروط‌افکنه‌های تلسکوپی شوند (مختاری و همکاران، ۱۳۸۷). همچنین مشخص شده است که گسل‌های فعال نقش مهمی در کنترل ویژگی‌های مورفومتری و تکامل مخروط‌افکنه‌ها دارند و بسیاری از رأس‌های مخروط‌افکنه‌ها با گسل‌های اصلی منطقه منطبق هستند (مقصودی و همکاران، ۱۳۹۱؛ کرمی و همکاران، ۱۳۹۲).

بررسی‌های انجام‌شده در دامنه‌های مختلف رشته‌کوه بزقوش نیز نشان داده‌اند که فعالیت‌های نئوتکتونیک در ایجاد مخروط‌افکنه‌های چندنسلی و تحول مورفولوژیک آن‌ها نقش اساسی ایفا کرده‌اند (کرمی و همکاران، ۱۳۹۲). همچنین ارزیابی‌های صورت‌گرفته در مرز ساختاری البرز جنوبی، وجود شرایط تکتونیک فعال و تأثیر آن بر مورفولوژی مخروط‌افکنه‌ها را تأیید کرده‌اند (امیراحمدی و ابراهیمی،

<sup>1</sup> Letouzey<sup>2</sup> Koyi<sup>3</sup> Warren<sup>4</sup> Koyi<sup>5</sup> Carminati<sup>6</sup> Gutiérrez<sup>7</sup> Callot<sup>8</sup> Tomczyk<sup>9</sup> Nagy

۱۳۹۴). مطالعات دیگری نیز رابطه مستقیم میان حجم مخروط‌افکنه‌ها و شدت فعالیت‌های تکتونیکی را نشان داده و بیان کرده‌اند که بخش قابل توجهی از مناطق مورد بررسی تحت تأثیر فرایندهای تکتونیکی فعال قرار دارند (جمال‌آبادی و همکاران، ۱۳۹۷).

علاوه بر این، نقش عوامل تکتونیکی و اقلیمی دوره کواترنری در تحول مخروط‌افکنه‌ها مورد تأکید قرار گرفته است؛ به گونه‌ای که فعالیت‌های آتشفشانی و تکتونیکی در شکل‌گیری و تکامل مخروط‌افکنه‌ها سهم قابل توجهی داشته‌اند (نوحی و همکاران، ۱۳۹۸). بررسی شاخص‌های مورفومتریکی و تغییرات شیب قاعده مخروط‌افکنه‌ها نیز نشان داده است که فرایندهای رودخانه‌ای در مخروط‌افکنه‌های بلندتر و کم‌شیب‌تر غالب هستند، در حالی که فعالیت‌های تکتونیکی در شکل‌گیری الگوی کلی آن‌ها نقش کنترل‌کننده دارند (قهرمان و همکاران، ۱۴۰۱). همچنین ارزیابی‌های اخیر از مخروط‌افکنه‌های دامنه‌های جنوبی رشته‌کوه خرقان، تفاوت میزان فعالیت تکتونیکی در بخش‌های مختلف منطقه را آشکار ساخته است (نجفی و همکاران، ۱۴۰۴).

در کنار مطالعات مرتبط با مخروط‌افکنه‌ها، پژوهش‌های متعددی بر نقش تکتونیک در تکامل گنبد‌های نمکی تأکید کرده‌اند. نتایج این مطالعات نشان می‌دهد که فعالیت گسل‌ها، چین‌خوردگی‌ها و نیروهای فشاری حاکم بر کمر بند چین‌خورده - رانده زاگرس، شرایط لازم برای صعود، برونزد و تکامل گنبد‌های نمکی را فراهم می‌کنند (مهرابی و همکاران، ۱۳۹۸؛ لتوزی<sup>۱</sup> و شرکتی، ۲۰۰۴). همچنین مشخص شده است که تعامل میان ویژگی‌های مکانیکی لایه‌های تبخیری و فرایندهای تکتونیکی، موجب شکل‌گیری ساختارهایی نظیر گنبد‌های نمکی، تاق‌دیس‌ها و گسل‌های مرتبط با نمک می‌شود و الگوی پراکنش این ساختارها را کنترل می‌کند.

مطالعات جدیدتر نیز بر نقش تکتونیک نمکی در تحول ساختاری زاگرس تأکید دارند. نتایج این پژوهش‌ها نشان می‌دهد که حرکت و تغییر شکل توده‌های نمکی، به‌ویژه در امتداد گسل‌های اصلی، بر هندسه گسل‌ها، توسعه ساختارهای زمین‌شناسی و الگوی تغییر شکل منطقه اثرگذار است (تقی‌خانی و همکاران، ۲۰۲۴؛ اسنیدرو و همکاران، ۲۰۲۵). همچنین رشد سریع تاق‌دیس‌ها و فعالیت گنبد‌های نمکی می‌تواند موجب ناپایداری دامنه‌ها و وقوع فرایندهای ژئومورفولوژیکی گسترده شود (گوتیرز<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۲۳).

در سطح جهانی نیز پژوهش‌های متعددی بر اهمیت فعالیت‌های تکتونیکی در کنترل ویژگی‌های مورفومتری مخروط‌افکنه‌ها تأکید کرده‌اند. این مطالعات نشان می‌دهند که تغییرات تکتونیکی، در کنار عوامل اقلیمی و هیدرولوژیکی، نقش تعیین‌کننده‌ای در شکل‌گیری، تکامل و تنوع فضایی مخروط‌افکنه‌ها دارند (بهرامی، ۲۰۱۳؛ کاراتاش<sup>۳</sup> و بولتون<sup>۴</sup>، ۲۰۱۹؛ گارسیا<sup>۵</sup> و همکاران، ۲۰۲۱؛ هان<sup>۶</sup> و یو<sup>۷</sup>، ۲۰۲۵؛ یو<sup>۸</sup>، ۲۰۲۵). نتایج این پژوهش‌ها بیانگر آن است که پاسخ مورفولوژیک مخروط‌افکنه‌ها به تغییرات محیطی حاصل برهم‌کنش پیچیده میان عوامل تکتونیکی، اقلیمی و فرسایشی است.

با وجود مطالعات فراوان درباره تأثیر تکتونیک بر مورفومتری مخروط‌افکنه‌ها و همچنین نقش تکتونیک در تکامل گنبد‌های نمکی، پژوهش‌های اندکی به بررسی مستقیم تأثیر تکتونیک گنبد‌های نمکی بر ویژگی‌های مورفومتری مخروط‌افکنه‌های پیرامونی پرداخته‌اند. نتایج مطالعات محدود موجود نشان می‌دهد که شاخص‌های مورفومتری مخروط‌افکنه‌ها، از جمله زاویه جاروب، نسبت طول به عرض و شیب مخروط، لزوماً رابطه مستقیمی با شکل گنبد‌های نمکی یا مقادیر انگرال هیپسومتری ندارند و پویایی حرکت نمک می‌تواند موجب پیچیدگی پاسخ مورفومتری مخروط‌افکنه‌ها شود (قاسمی، ۱۳۹۹).

بر این اساس، خلأ پژوهشی قابل توجهی در زمینه تبیین نحوه اثرگذاری تکتونیک نمکی بر ویژگی‌های مورفومتری مخروط‌افکنه‌ها، به‌ویژه در زاگرس فارس، وجود دارد. منطقه مورد مطالعه این پژوهش در محدوده شهرستان لار و در بخش جنوبی زاگرس فارس واقع شده

<sup>1</sup> Letouzey

<sup>2</sup> Gutiérrez

<sup>3</sup> Karataş

<sup>4</sup> Boulton

<sup>5</sup> Garcia

<sup>6</sup> Han

<sup>7</sup> Yu

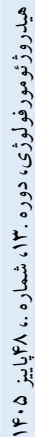
<sup>8</sup> Yu

است؛ منطقه‌ای که بخشی از کمربند چین خورده - رانده زاگرس به شمار می‌رود و به دلیل فراوانی گنبد‌های نمکی فعال، شرایط مناسبی برای بررسی ارتباط میان تکتونیک نمکی و تحول ژئومورفولوژیکی مخروط‌افکنه‌ها فراهم می‌کند.

رسالت اصلی این پژوهش، شناسایی و تبیین میزان تأثیر فرایندهای تکتونیکی مرتبط با گنبد‌های نمکی بر ویژگی‌های مورفومتری مخروط‌افکنه‌های پیرامونی و پر کردن خلأ موجود در مطالعات پیشین است. در این راستا، پژوهش حاضر با بهره‌گیری از شاخص‌های مورفومتری مخروط‌افکنه‌ها و شاخص‌های ژئومورفیک مرتبط با فعالیت تکتونیکی، تلاش می‌کند نقش تکتونیک نمکی را در تحول و تکامل مخروط‌افکنه‌های منطقه لار در زاگرس فارس ارزیابی و تفسیر کند.

### موقعیت منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در استان فارس، شهرستان لارستان در جنوب ایران واقع شده است که از غرب به شهر لار و از شمال به شهر زرین دشت محدود می‌شود. منطقه مورد مطالعه شامل ۴۵ مخروط افکنه و حوضه‌های مرتبط با آن است که در حاشیه سه گنبد نمکی (چاه‌بانو، شاه‌غیب و گهنه) بین  $27^{\circ} 33' 57''$  تا  $28^{\circ} 03' 48''$  عرض شمالی و  $54^{\circ} 26' 40''$  تا  $55^{\circ} 04' 12''$  طول شرقی واقع شده است. تمام گنبد‌های نمکی مورد مطالعه متعلق به سری سازند هرمز هستند که به‌طور کلی شامل نمک، انیدریت، دولومیت تیره، ماسه‌سنگ، سیلت و مارن می‌باشد (فخاری و سهرابی، ۱۳۷۴؛ صداقت و همکاران، ۱۳۸۴؛ مصی‌بیگی و همکاران، ۱۳۸۵، میرتوحیدی و حدادان، ۱۳۸۸؛ سیفوری‌پور و همکاران، ۱۳۸۸؛ لتوزی و شرکتی، ۲۰۰۴). قدیمی‌ترین واحد رخنمون‌یافته در منطقه، گنبد‌های نمکی وابسته به سازند هرمز با سن پرکامبرین تا کامبرین است. این مجموعه شامل مارن صورتی، گچ توده‌ای، دولومیت سیاه بیتومینه، سنگ‌آهک سیاه، شیل سرخ، سنگ‌آهک قهوه‌ای، سنگ‌های آذرین نظیر دیاباز، بازالت و آندزیت و همچنین نمک توده‌ای است. خاصیت پلاستیک و نمک موجب صعود دیابیری و شکل‌گیری گنبد‌های نمکی شده که نقش مهمی در تکامل ساختارهای منطقه دارند (صداقت و همکاران، ۱۳۸۴). اقلیم منطقه مورد مطالعه شامل دو تیپ خشک و فرا خشک می‌باشد. بیشتر منطقه مورد مطالعه در تیپ خشک‌تحرك‌پذیری قرار دارد.

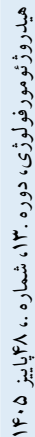


هیدروژن مومو فلوژی، دوره ۱۳، شماره ۴۸، پاییز ۱۴۰۵

هیدروژن مومو فلوژی، دوره ۱۳، شماره ۴۸، پاییز ۱۴۰۵

هیدروژن مومو فلوژی، دوره ۱۳، شماره ۴۸، پاییز ۱۴۰۵

هیدروژن مومو فلوژی، دوره ۱۳، شماره ۴۸، پاییز ۱۴۰۵



هیدروژن مومو فلوژی، دوره ۱۳، شماره ۴۸، پاییز ۱۴۰۵

هیدروژن مومو فلوژی، دوره ۱۳، شماره ۴۸، پاییز ۱۴۰۵

نزدیک‌ترین ایستگاه‌های هواشناسی به منطقه مورد مطالعه، ایستگاه‌های زرین‌دشت و لار هستند. میانگین سالانه بارش و دما در ایستگاه سینوپتیک زرین‌دشت (دوره آماری ۲۰۰۷-۲۰۲۵) در شمال منطقه مورد مطالعه، به ترتیب ۲۰۶/۸۳ میلی‌متر و ۲۴/۵ درجه سانتیگراد، و در ایستگاه سینوپتیک لار (دوره آماری ۲۰۰۷-۲۰۲۵) در جنوب منطقه مورد مطالعه به ترتیب ۱۹۷/۷۷ میلی‌متر و ۲۴/۹ درجه سانتیگراد است. پوشش گیاهی منطقه مورد مطالعه فقیر و بیشتر به صورت پوشش گیاهی غالباً پراکنده و تنک است و تنها در برخی نواحی محدود تراکم نسبی دارد. بیشتر گونه‌های گیاهی قابل مشاهده در منطقه عبارتند از کروج، ترات، پیچیلوک، کُنا، دیوخار گرمسیری، درمنه درشتی، لباشیر، اسفند رومی بنفش، آسمانی سیخک‌دار، قیچ لوبیایی، گیشدر پیچ، طارون، خارشتر، اشنان و میلک می‌باشد (عزیزی و همکاران، ۱۴۰۲: ۱۶۹).

### مواد و روش‌ها

در این پژوهش، به منظور تحلیل مورفومتری مخروط افکنه‌ها و حوضه‌های آبریز مرتبط با آن‌ها، از ترکیبی از روش‌های کتابخانه‌ای، تحلیل‌های مبتنی بر سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS)، تحلیل‌های آماری و بازدید میدانی استفاده شد. در گام نخست، از طریق روش کتابخانه‌ای، مطالعات پیشین مرتبط با شاخص‌های مورفومتری مخروط افکنه‌ها و حوضه‌های آبریز گردآوری شد و شاخص‌های مناسب با اهداف پژوهش استخراج گردید. در مرحله بعد، به منظور تعیین محدوده مخروط افکنه‌ها و حوضه‌های آبریز بالادست آن‌ها، از تصاویر ماهواره‌ای Google Earth با قدرت تفکیک ۱ متر در نرم‌افزار Google Earth Pro استفاده شد. بر این اساس، مرز هر مخروط افکنه و حوضه آبریز متناظر به صورت مجزا ترسیم و پس از تبدیل به لایه‌های برداری، به محیط ArcGIS Pro 3.5.4 منتقل شد. سپس، به منظور انجام تحلیل‌های کمی، از مدل رقومی ارتفاعی (DEM) با قدرت تفکیک مکانی ۱۲/۵ متر استفاده شد. پردازش‌های مکانی و محاسبه پارامترهای مورفومتریک در محیط نرم‌افزار ArcGIS Pro انجام گرفت. شاخص‌های مورفومتریک مخروط افکنه‌ها شامل مساحت، زاویه جاروب، نسبت عرض به طول، شیب متوسط، ضریب مخروط‌گرایی و ضریب مخروط‌گرایی اصلاح‌شده، و همچنین شاخص‌های مورفومتریک حوضه‌های آبریز شامل مساحت حوضه، شاخص شکل حوضه، انتگرال هیپسومتری، ضریب گردواری و شیب متوسط حوضه، به صورت جداگانه برای هر مخروط افکنه و حوضه آبریز مرتبط با آن در محیط نرم‌افزار Excel محاسبه شد. شاخص‌های مورفومتری برای ارزیابی فعالیت نسبی زمین‌ساختی مخروط افکنه‌ها در جدول (۱) شاخص‌های مورفومتری برای ارزیابی فعالیت نسبی زمین‌ساختی حوضه‌های آبریز در جدول (۲) ارائه شده است.

به منظور بررسی تفاوت‌های آماری بین گروه‌های مختلف مخروط افکنه‌ها و حوضه‌های آبریز و ارزیابی معناداری تغییرات شاخص‌های مورفومتریک، از روش‌های آماری استنباطی استفاده گردید. در این راستا، آزمون واریانس یک‌طرفه<sup>۱</sup> به منظور مقایسه میانگین شاخص‌های مورفومتریک بین بیش از دو گروه و بررسی وجود تفاوت معنادار آماری به کار گرفته شد. همچنین، در مواردی که مقایسه بین دو گروه مستقل مدنظر بود، از آزمون تی تست استفاده شد. تحلیل‌های آماری در سطح معنی‌داری ۰/۰۵ انجام گرفت. در نهایت، به منظور صحت‌سنجی نتایج حاصل از تحلیل‌های دورسنجی، GIS و تحلیل‌های آماری، بازدید میدانی از محدوده مورد مطالعه انجام شد و ویژگی‌های ژئومورفولوژیک و هندسی مخروط افکنه‌ها مشاهده و مورد بررسی قرار گرفت. روند جریانی پژوهش در شکل (۳) ارائه شده است.

<sup>1</sup> One-Way ANOVA

جدول (۱): شاخص‌های مورفومتری برای ارزیابی فعالیت نسبی تکتونیک مخروط افکنه‌ها

Table (1): Morphometric Indices for Assessing the Relative Tectonic Activity of Alluvial Fans

| منبع                                | اجزای شاخص                                                                                                                              | شاخص‌های کمی                      |
|-------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|
| (ژو <sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۲۵)   | مساحت پلانیمتری کل مخروط افکنه                                                                                                          | مساحت مخروط افکنه                 |
| (بهرامی، ۲۰۱۳)                      | زاویه بین دو جهت رأس مخروط افکنه                                                                                                        | زاویه جاروب                       |
| (قهرمان و ناگی <sup>۲</sup> ، ۲۰۲۴) | W: بیشترین مقدار عرض مخروط افکنه<br>L: فاصله عمودی بین رأس تا قاعده مخروط افکنه (طول)                                                   | $W/L \text{ Ratio} = \frac{W}{L}$ |
| کرمی و همکاران (۱۳۹۲)               | $\Delta H = H_{max} - H_{min}$<br>$H_{max}$ : بیشترین ارتفاع مخروط افکنه<br>$H_{min}$ : کمترین ارتفاع مخروط افکنه<br>L: طول مخروط افکنه | $Sl = \frac{\Delta H}{L} * 100$   |
| بهرامی و همکاران، ۱۴۰۳              | FCI: ضریب مخروط‌گرایی                                                                                                                   | $FCIR =  FCI - 1 $                |

جدول (۲): شاخص‌های مورفومتری برای ارزیابی فعالیت نسبی تکتونیک حوضه‌های آبریز

Table (2): Morphometric Indices for Evaluating the Relative Tectonic Activity of Drainage Basins

| منبع                                           | اجزای شاخص                                                                                                 | شاخص کمی                                                |
|------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| (کین <sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۱۸)             | مساحت کل پلانیمتری حوضه آبریز                                                                              | مساحت حوضه آبریز                                        |
| (ناصری و همکاران، ۱۴۰۴)                        | Bl: طول حوضه از سرچشمه تا دهانه یا خروجی حوضه<br>Bw: عرض حوضه که در وسیع‌ترین نقطه‌ی آن اندازه گیری می‌شود | $B_s = \frac{Bl}{Bw}$                                   |
| (عثمان <sup>۴</sup> و عمر <sup>۵</sup> ، ۲۰۲۳) | Hmax: حداکثر ارتفاع حوضه<br>Hmean: میانگین ارتفاع حوضه<br>Hmin: حداقل ارتفاع حوضه                          | $H_i = \frac{H_{mean} - H_{min}}{H_{max} - H_{min}}$    |
| -                                              | براساس DEM                                                                                                 | شیب متوسط حوزه آبریز                                    |
| (بهرامی، ۲۰۲۲)                                 | A: مساحت حوضه آبریز برحسب کیلومتر مربع<br>P: محیط حوضه آبریز برحسب کیلومتر مربع                            | $CR = \left( \frac{4 \times \pi \times A}{P^2} \right)$ |

<sup>1</sup> Zhou

<sup>2</sup> Nagy

<sup>3</sup> Kain

<sup>4</sup> Othman

<sup>5</sup> Omar



شکل (۳): روند تجربانی پژوهش

Figure (3): Research Workflow

## نتایج

نتایج مربوط به مساحت ( $F_a$ )، زاویه جاروب ( $S_a$ )، نسبت عرض به طول ( $W/L$ )، ضریب مخروط گرایی اصلاح شده ( $FCIR$ ) و شیب مخروط افکنه ( $F_s$ ) در جدول (۳) ارائه شده است. نتایج جدول (۳) نشان می‌دهد که مساحت مخروط افکنه‌ها از ۰/۰۱۷ تا ۱۳/۲ کیلومتر مربع متغیر است که بیشترین مقدار آن مربوط به مخروط افکنه شماره ۱ گنبد نمکی چاهبانو و کمترین مقدار آن مربوط به مخروط افکنه شماره ۲ گنبد نمکی شاه‌غیب است. زاویه جاروب مخروط افکنه‌ها هم از ۷۲ تا ۱۶۲ درجه متغیر است که بیشترین مقدار آن مربوط به مخروط افکنه ۱۰ چاهبانو و کمترین مقدار آن مربوط به مخروط افکنه شماره ۷ گنبد نمکی شاه‌غیب است. مقدار پارامتر نسبت عرض به طول بین ۰/۱۷۹ تا ۲/۱۲۰ متغیر است که بیشترین مقدار آن مربوط به شماره ۹ گنبد نمکی شاه‌غیب و کمترین مقدار آن هم مرتبط با مخروط افکنه شماره ۷ گنبد نمکی مذکور است. مقدار ضریب پارامتر ضریب مخروط گرایی اصلاح‌شده از ۰/۰۱۱۱ تا ۵/۰۰۹۸ متغیر است که بیشترین مقدار آن مرتبط با مخروط افکنه شماره ۱۷ گنبد نمکی شاه‌غیب است و کمترین مقدار آن مرتبط با مخروط افکنه شماره ۸ گنبد نمکی کهنه می‌باشد. مقدار پارامتر شیب مخروط افکنه‌ها از ۱۹/۳۲ درصد تا ۱/۶۳ درصد متغیر است که بیشترین مقدار آن مربوط به مخروط افکنه شماره ۱۲ گنبد نمکی کهنه و کمترین مقدار آن مربوط به مخروط افکنه شماره ۱ گنبد نمکی چاهبانو می‌باشد.

جدول (۳): پارامترهای کمی مخروط افکنه‌های گنبد‌های نمکی منطقه مورد مطالعه

Table (3): Quantitative Parameters of the Alluvial Fans of the Salt Domes in the Study

| نام مخروط افکنه | مساحت مخروط افکنه (کلیومتر مربع) | زاویه جاروب (°) | نسبت عرض به طول | ضریب مخروط گرایی | ضریب مخروط گرایی اصلاح شده | شیب مخروط افکنه (%) |
|-----------------|----------------------------------|-----------------|-----------------|------------------|----------------------------|---------------------|
| چاه بانو ۱      | ۱۳/۲                             | ۱۱۹             | ۰/۴۰۰           | ۳/۲۷۸۸           | ۲/۲۷۸۸                     | ۱/۶۳                |
| چاه بانو ۲      | ۰/۷۴                             | ۱۵۲             | ۰/۷۹۲           | ۱/۸۵۷۵           | ۰/۸۵۷۵                     | ۴/۶۲                |
| چاه بانو ۳      | ۴/۸۴                             | ۱۵۱             | ۰/۸۵۲           | ۲/۴۷۴۱           | ۱/۴۷۴۱                     | ۲/۶۹                |
| چاه بانو ۴      | ۰/۷                              | ۹۴              | ۱/۰۱۰           | ۱/۰۱۵۰           | ۰/۰۱۵۰                     | ۳/۱۲                |
| چاه بانو ۵      | ۱/۴۴                             | ۱۰۳             | ۰/۸۸۹           | ۱/۷۰۶۱           | ۰/۷۰۶۱                     | ۳/۶۳                |
| چاه بانو ۶      | ۰/۸۹                             | ۱۴۲             | ۱/۱۹۸           | ۱/۳۶۴۵           | ۰/۳۶۴۵                     | ۴/۶۵                |
| چاه بانو ۷      | ۲                                | ۱۱۱             | ۱/۵۲۰           | ۰/۸۱۱۰           | ۰/۱۸۹۰                     | ۴/۴۸                |
| چاه بانو ۸      | ۰/۵۹                             | ۱۱۲             | ۰/۸۴۷           | ۱/۹۶۲۷           | ۰/۹۶۲۷                     | ۳/۷۷                |
| چاه بانو ۹      | ۰/۲۳                             | ۸۳              | ۰/۴۸۸           | ۲/۶۹۱۱           | ۱/۶۹۱۱                     | ۲/۴۹                |
| چاه بانو ۱۰     | ۰/۵۲                             | ۱۶۲             | ۱/۴۶۲           | ۱/۶۲۷۷           | ۰/۶۲۷۷                     | ۲/۹۷                |
| کهنه ۱          | ۰/۳۴                             | ۹۹              | ۱/۵۳۸           | ۰/۸۴۶۰           | ۰/۱۱۵۴۰                    | ۷/۹۷                |
| کهنه ۲          | ۰/۰۳                             | ۱۲۶             | ۱/۴۴۶           | ۱/۱۶۰۴           | ۰/۱۶۰۴                     | ۱۸/۵۴               |
| کهنه ۳          | ۰/۰۲                             | ۱۱۳             | ۰/۹۹۵           | ۲/۰۴۴۴           | ۱/۰۴۴۴                     | ۱۲/۲۷               |
| کهنه ۴          | ۰/۴۱                             | ۱۲۲             | ۰/۵۷۶           | ۲/۲۱۷۴           | ۱/۲۱۷۴                     | ۴/۵۴                |
| کهنه ۵          | ۰/۱۹                             | ۸۴              | ۰/۶۲۱           | ۱/۸۸۳۶           | ۰/۸۸۳۶                     | ۱۴/۳۱               |
| کهنه ۶          | ۰/۰۵                             | ۹۱              | ۰/۴۵۳           | ۲/۹۰۶۲           | ۱/۹۰۶۲                     | ۱۳/۰۹               |
| کهنه ۷          | ۰/۴۸                             | ۷۶              | ۱/۲۴۷           | ۰/۸۶۸۵           | ۰/۱۳۱۵                     | ۵/۰۴                |
| کهنه ۸          | ۰/۱۴                             | ۸۴              | ۰/۷۹۶           | ۱/۰۱۱۱           | ۰/۰۱۱۱                     | ۷/۲۸                |
| کهنه ۹          | ۰/۷۶                             | ۷۶              | ۱/۰۸۹           | ۰/۹۳۸۷           | ۰/۰۶۱۳                     | ۴/۸۲                |
| کهنه ۱۰         | ۰/۰۷۷                            | ۱۰۱             | ۱/۰۷۶           | ۱/۳۴۶۲           | ۰/۳۴۶۲                     | ۱۱/۶۶               |
| کهنه ۱۱         | ۰/۰۷۹                            | ۹۴              | ۰/۵۹۲           | ۲/۱۶۴۹           | ۱/۱۶۴۹                     | ۱۴/۸۹               |
| کهنه ۱۲         | ۰/۰۱۳                            | ۱۳۰             | ۰/۷۰۷           | ۲/۲۴۶۰           | ۱/۲۴۶۰                     | ۱۹/۳۲               |
| کهنه ۱۳         | ۰/۳۵                             | ۹۳              | ۰/۵۵۴           | ۲/۵۰۶۱           | ۱/۵۰۶۱                     | ۸/۱۷                |
| کهنه ۱۴         | ۰/۱۶                             | ۱۱۳             | ۱/۰۶۵           | ۱/۴۵۸۵           | ۰/۴۵۸۵                     | ۴/۷۳                |
| شاه غیب ۱       | ۵                                | ۱۰۱             | ۱/۰۵۵           | ۱/۱۸۸۲           | ۰/۱۸۸۲                     | ۳/۳۱                |
| شاه غیب ۲       | ۰/۲۳                             | ۱۳۹             | ۰/۸۵۲           | ۳/۲۲۴۴           | ۲/۲۲۴۴                     | ۵/۶۳                |
| شاه غیب ۳       | ۵/۶۹                             | ۱۰۹             | ۱/۲۸۹           | ۰/۹۳۴۱           | ۰/۰۶۵۹                     | ۳/۲۶                |

|                  |       |     |        |        |        |       |
|------------------|-------|-----|--------|--------|--------|-------|
| شاه‌غیب ۴        | ۶/۷۴  | ۱۲۲ | ۰/۸۳۳  | ۱/۷۸۴۶ | ۰/۷۸۴۶ | ۲/۵۳  |
| شاه‌غیب ۵        | ۰/۰۳  | ۷۲  | ۰/۴۵۴  | ۲/۵۹۲۰ | ۱/۵۹۲۰ | ۵/۱۲  |
| شاه‌غیب ۶        | ۰/۳۴  | ۷۷  | ۰/۲۲۲  | ۴/۷۲۰۰ | ۳/۷۲۰۰ | ۳/۳۶  |
| شاه‌غیب ۷        | ۲/۴۷  | ۷۲  | ۰/۱۷۹  | ۵/۷۴۳۶ | ۴/۷۴۳۶ | ۲/۶۱  |
| شاه‌غیب ۸        | ۴/۹۳  | ۱۱۴ | ۱/۱۰۹  | ۱/۴۹۴۴ | ۰/۴۹۴۴ | ۲/۹۸  |
| شاه‌غیب ۹        | ۵/۲۲  | ۱۵۲ | ۲/۱۲۰  | ۰/۸۲۹۱ | ۰/۱۷۰۹ | ۴/۲۱  |
| شاه‌غیب ۱۰       | ۳/۲۹  | ۹۷  | ۱/۹۷۶  | ۰/۶۰۸۴ | ۰/۳۹۱۶ | ۵/۰۷  |
| شاه‌غیب ۱۱       | ۰/۰۸  | ۷۶  | ۰/۳۱۱  | ۳/۹۴۷۶ | ۲/۹۴۷۶ | ۴/۶۴  |
| شاه‌غیب ۱۲       | ۰/۴۹  | ۱۱۵ | ۰/۹۹۴  | ۱/۴۱۲۵ | ۰/۴۱۲۵ | ۴/۷۰  |
| شاه‌غیب ۱۳       | ۰/۴۱  | ۱۴۸ | ۰/۹۴۶  | ۱/۸۷۳۷ | ۰/۸۷۳۷ | ۲/۴۶  |
| شاه‌غیب ۱۴       | ۰/۱۱  | ۱۴۰ | ۰/۶۶۹  | ۲/۹۳۹۱ | ۱/۹۳۹۱ | ۲/۷۲  |
| شاه‌غیب ۱۵       | ۰/۶۹  | ۱۵۶ | ۰/۷۸۳  | ۲/۶۳۵۱ | ۱/۶۳۵۱ | ۳/۲۰  |
| شاه‌غیب ۱۶       | ۲/۱   | ۹۵  | ۰/۵۱۱  | ۲/۰۲۱۰ | ۱/۰۲۱۰ | ۳/۳۶  |
| شاه‌غیب ۱۷       | ۲/۱۲  | ۱۴۴ | ۰/۳۹۰  | ۶/۰۰۹۸ | ۵/۰۰۹۸ | ۳/۱۴  |
| شاه‌غیب ۱۸       | ۱/۶۵  | ۱۳۰ | ۰/۴۷۸  | ۴/۸۸۶۴ | ۳/۸۸۶۴ | ۳/۸۳  |
| شاه‌غیب ۱۹       | ۰/۴۸  | ۱۳۴ | ۱/۱۲۶  | ۱/۳۸۸۶ | ۰/۳۸۸۶ | ۵/۰۳  |
| شاه‌غیب ۲۰       | ۰/۸۶  | ۱۳۵ | ۰/۶۰۵  | ۲/۶۱۱۸ | ۱/۶۱۱۸ | ۳/۴۸  |
| شاه‌غیب ۲۱       | ۰/۰۹  | ۱۵۴ | ۰/۳۴۵  | ۵/۹۹۲۸ | ۴/۹۹۲۸ | ۵/۲۱  |
| میانگین          | ۱/۵۸  | ۱۱۴ | ۰/۸۸   | ۲/۲۵   | ۱/۳۰   | ۵/۷۹  |
| بیشترین مقدار    | ۱۳/۲  | ۱۶۲ | ۲/۱۲۰  | ۶/۰۰۹۸ | ۵/۰۰۹۸ | ۱۹/۳۲ |
| کمترین مقدار     | ۰/۰۱۳ | ۷۲  | ۰/۱۷۵۸ | ۰/۶۰۸  | ۰/۰۱۱  | ۱/۶۳  |
| انحراف معیار     | ۲/۵۲  | ۲۶  | ۰/۴۳   | ۱/۳۹   | ۱/۳۴   | ۴/۳۱  |
| ضریب تغییرات (%) | ۱۵۹   | ۲۳  | ۵۰     | ۶۲     | ۱۰۳    | ۷۴    |

همچنین نتایج نشان می‌دهد در پارامترهای مرتبط با حوضه‌های آبریز مخروط افکنه‌های حاشیه گنبدهای نمکی بیشترین مساحت (برحسب کیلومتر مربع) مربوط به حوضه آبریز مخروط افکنه شماره ۱ گنبد نمکی چاه‌بانو (۲۳/۵۴ کیلومتر مربع) و کمترین مقدار مرتبط با حوضه آبریز مخروط افکنه شماره ۲ گنبد نمکی شاه‌غیب (۰/۱۷ کیلومتر مربع) می‌باشد. در شاخص شکل حوضه بیشترین مقدار مربوط به حوضه آبریز مخروط افکنه شماره ۶ گنبد نمکی کهنه با مقدار ۳/۵۴۵۷ و کمترین مقدار مربوط به حوضه آبریز مخروط افکنه شماره ۲ گنبد نمکی مذکور با مقدار ۰/۰۲۷۵ می‌باشد. بیشترین مقدار شاخص انتگرال هیپسومتری مربوط به حوضه آبریز مخروط افکنه شماره ۲۱ گنبد نمکی شاه‌غیب است که مقدار آن برابر با ۰/۷۵ و کمترین مقدار آن مرتبط با حوضه آبریز مخروط افکنه شماره ۱ گنبد

نمکی چاه‌بانو است که مقدار آن برابر با ۰/۲۳۶ می‌باشد. در شاخص ضریب گردواری حوضه آبریز بیشترین مقدار مرتبط با حوضه آبریز مخروط افکنه شماره ۱۹ گنبد نمکی شاه‌غیب است که مقدار آن برابر با ۰/۸۱۳۸ می‌باشد و کمترین مقدار آن مرتبط با حوضه آبریز مخروط افکنه شماره ۷ گنبد نمکی مذکور با مقدار ۰/۱۴۲۹ است. در نهایت در پارامتر شیب متوسط حوضه آبریز (برحسب درصد) بیشترین مقدار شیب متوسط حوضه آبریز مربوط مخروط افکنه شماره ۱۱ گنبد نمکی کهنه با مقدار ۶۸/۸۳ درصد و کمترین مقدار آن مربوط به حوضه آبریز مخروط افکنه شماره ۴ گنبد نمکی شاه‌غیب ۱۲/۹۸ درصد می‌باشد. جدول (۴) پارامترهای کمی مرتبط با حوضه‌های آبریز مخروط افکنه‌های حاشیه گنبدهای نمکی منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

جدول (۴): پارامترهای کمی حوضه‌های آبریز مخروط افکنه‌های گنبدهای نمکی منطقه مورد مطالعه

Table (4): Quantitative Parameters of the Drainage Basins of the Alluvial Fans of the Salt Domes in the Study Area

| نام حوضه آبریز | مساحت<br>(کیلومتر مربع) | شکل حوضه | انگزال هیپسومتری | ضریب گردواری | شیب متوسط حوضه آبریز<br>(%) |
|----------------|-------------------------|----------|------------------|--------------|-----------------------------|
| چاه‌بانو ۱     | ۲۳/۵۴                   | ۰/۶۶۰۱   | ۰/۲۳۶۴           | ۰/۳۶۰۶       | ۲۶/۵۰                       |
| چاه‌بانو ۲     | ۱/۲۵                    | ۲/۲۱۷۱   | ۰/۳۳۳۰           | ۰/۳۸۷۴       | ۲۶/۸۶                       |
| چاه‌بانو ۳     | ۲/۴۰                    | ۲/۰۶۲۱   | ۰/۳۸۰۱           | ۰/۳۹۶۷       | ۲۷/۲۳                       |
| چاه‌بانو ۴     | ۱/۰۷                    | ۱/۸۸۸۷   | ۰/۴۲۸۲           | ۰/۴۰۰۹       | ۳۲/۴۹                       |
| چاه‌بانو ۵     | ۱/۵۸                    | ۱/۴۷۸۸   | ۰/۳۵۵۳           | ۰/۴۲۸۳       | ۲۷/۳۸                       |
| چاه‌بانو ۶     | ۱/۴۲                    | ۱/۵۶۷۹   | ۰/۳۱۵۰           | ۰/۵۰۶۵       | ۲۷/۵۰                       |
| چاه‌بانو ۷     | ۵/۴۷                    | ۱/۶۹۳۹   | ۰/۳۴۹۵           | ۰/۴۴۷۵       | ۲۸/۸۱                       |
| چاه‌بانو ۸     | ۰/۵۹                    | ۱/۶۴۸۷   | ۰/۳۲۱۱           | ۰/۵۹۸۶       | ۳۰/۱۹                       |
| چاه‌بانو ۹     | ۰/۲۲                    | ۱/۷۸۷۱   | ۰/۲۵۲۸           | ۰/۶۲۵۵       | ۲۳/۳۱                       |
| چاه‌بانو ۱۰    | ۰/۳۱                    | ۱/۶۸۷۱   | ۰/۳۰۲۲           | ۰/۵۴۵۳       | ۲۰/۸۷                       |
| کهنه ۱         | ۰/۷۵                    | ۳/۰۴۰۵   | ۰/۵۰۴۲           | ۰/۴۲۴۰       | ۴۶/۶۹                       |
| کهنه ۲         | ۰/۱۴                    | ۰/۰۲۷۵   | ۰/۴۵۸۳           | ۰/۴۶۲۵       | ۳۴/۱۱                       |
| کهنه ۳         | ۰/۱۷                    | ۳/۱۵۸۰   | ۰/۵۴۸۴           | ۰/۴۲۶۲       | ۳۳/۳۵                       |
| کهنه ۴         | ۲/۸۰                    | ۰/۶۴۵۷   | ۰/۴۶۸۳           | ۰/۶۷۴۲       | ۳۸/۵۶                       |
| کهنه ۵         | ۰/۲۳                    | ۲/۰۵۷۱   | ۰/۶۸۱۴           | ۰/۵۶۵۳       | ۳۴/۰۶                       |
| کهنه ۶         | ۰/۰۳                    | ۳/۵۴۵۷   | ۰/۴۳۳۵           | ۰/۴۳۲۵       | ۴۷/۴۲                       |
| کهنه ۷         | ۰/۷۶                    | ۳/۱۱۵۰   | ۰/۴۲۸۶           | ۰/۴۰۶۸       | ۲۲/۳۹                       |
| کهنه ۸         | ۰/۲۶                    | ۱/۳۱۷۵   | ۰/۵۳۹۹           | ۰/۵۲۴۱       | ۲۵/۵۹                       |
| کهنه ۹         | ۱/۶۲                    | ۱/۲۹۴۵   | ۰/۶۰۷۸           | ۰/۵۹۰۸       | ۴۲/۳۷                       |
| کهنه ۱۰        | ۰/۱۸                    | ۱/۳۰۱۴   | ۰/۵۱۱۷           | ۰/۷۱۱۲       | ۶۲/۳۱                       |
| کهنه ۱۱        | ۰/۰۹                    | ۱/۶۸۶۴   | ۰/۵۵۰۳           | ۰/۵۶۵۴       | ۶۸/۸۳                       |

|               |       |        |        |        |       |
|---------------|-------|--------|--------|--------|-------|
| کهنه ۱۲       | ۰/۰۶  | ۲/۴۸۹۲ | ۰/۴۲۷۰ | ۰/۶۲۰۹ | ۶۲/۶۱ |
| کهنه ۱۳       | ۰/۲۷  | ۰/۹۷۴۱ | ۰/۴۱۰۳ | ۰/۷۶۶۹ | ۵۹/۳۳ |
| کهنه ۱۴       | ۰/۲۸  | ۲/۲۹۴۴ | ۰/۲۸۲۵ | ۰/۵۲۳۹ | ۵۳/۳۰ |
| شاهغیب ۱      | ۵/۴۲  | ۰/۲۹۸۶ | ۰/۲۹۸۶ | ۰/۱۷۰۱ | ۱۳/۵۰ |
| شاهغیب ۲      | ۰/۰۱۷ | ۰/۵۳۸۶ | ۰/۵۳۸۶ | ۰/۸۰۰۸ | ۴۱/۸۲ |
| شاهغیب ۳      | ۱۳/۹۷ | ۰/۳۴۴۳ | ۰/۳۴۴۳ | ۰/۴۱۰۴ | ۱۵/۸۰ |
| شاهغیب ۴      | ۱۰/۹۵ | ۰/۳۰۶۹ | ۰/۳۰۶۹ | ۰/۳۰۳۷ | ۱۲/۹۸ |
| شاهغیب ۵      | ۰/۱۹  | ۰/۴۷۹۵ | ۰/۴۷۹۵ | ۰/۴۷۵۰ | ۱۵/۳۳ |
| شاهغیب ۶      | ۰/۸۵  | ۰/۵۰۹۶ | ۰/۵۰۹۶ | ۰/۴۱۳۲ | ۲۰/۰۶ |
| شاهغیب ۷      | ۴/۹۳  | ۰/۳۶۹۴ | ۰/۳۶۹۴ | ۰/۱۴۲۹ | ۱۴/۸۵ |
| شاهغیب ۸      | ۱۱/۶۸ | ۰/۳۶۵۱ | ۰/۳۶۵۱ | ۰/۵۳۸۳ | ۲۰/۱۸ |
| شاهغیب ۹      | ۱۰/۴۶ | ۰/۳۵۳۵ | ۰/۳۵۳۵ | ۰/۳۶۸۱ | ۱۶/۹۴ |
| شاهغیب ۱۰     | ۹/۵۲  | ۰/۳۸۸۳ | ۰/۳۸۸۳ | ۰/۳۱۷۳ | ۱۵/۰۷ |
| شاهغیب ۱۱     | ۰/۰۳  | ۰/۷۳۸۱ | ۰/۷۳۸۱ | ۰/۵۷۲۹ | ۲۴/۲۳ |
| شاهغیب ۱۲     | ۰/۱۰  | ۰/۶۲۰۴ | ۰/۶۲۰۴ | ۰/۷۷۵۶ | ۲۷/۳۶ |
| شاهغیب ۱۳     | ۰/۰۵  | ۰/۵۸۹۷ | ۰/۵۸۹۷ | ۰/۷۶۱۹ | ۳۲/۵۴ |
| شاهغیب ۱۴     | ۰/۹۳  | ۰/۶۶۱۱ | ۰/۶۶۱۱ | ۰/۶۶۹۸ | ۱۶/۲۷ |
| شاهغیب ۱۵     | ۴/۲۱  | ۰/۴۳۷۰ | ۰/۴۳۷۰ | ۰/۱۷۴۱ | ۱۴/۹۲ |
| شاهغیب ۱۶     | ۳/۱۵  | ۰/۵۳۸۷ | ۰/۵۳۸۷ | ۰/۳۳۸۸ | ۱۸/۷۳ |
| شاهغیب ۱۷     | ۲/۱۹  | ۰/۴۵۲۸ | ۰/۴۵۲۸ | ۰/۲۴۳۴ | ۱۶/۷۹ |
| شاهغیب ۱۸     | ۱/۰۳  | ۰/۶۱۰۱ | ۰/۶۱۰۱ | ۰/۴۸۵۸ | ۱۶/۸۴ |
| شاهغیب ۱۹     | ۰/۰۵۸ | ۰/۵۵۴۶ | ۰/۵۵۴۶ | ۰/۸۱۳۸ | ۳۸/۷۰ |
| شاهغیب ۲۰     | ۰/۰۲  | ۰/۶۰۸۱ | ۰/۶۰۸۱ | ۰/۵۰۶۱ | ۳۶/۶۳ |
| شاهغیب ۲۱     | ۰/۰۶۳ | ۰/۷۵۴۴ | ۰/۷۵۴۴ | ۰/۶۸۰۸ | ۱۵/۳۳ |
| میانگین       | ۲/۷۸  | ۱/۲۰   | ۰/۴۶   | ۰/۵۰   | ۲۹/۹۳ |
| بیشترین مقدار | ۲۳/۵۴ | ۳/۵۴۶  | ۰/۷۵۴  | ۰/۸۱۳۸ | ۶۸/۸۳ |
| کمترین مقدار  | ۰/۰۱۷ | ۰/۰۲۷  | ۰/۲۳۶  | ۰/۱۴۲۹ | ۱۲/۹۸ |
| انحراف معیار  | ۴/۷۷  | ۰/۹۱   | ۰/۱۳   | 0.17   | ۱۴/۵۷ |
| ضریب تغییرات  | ۱۷۱   | ۷۶     | ۲۹     | ۳۴     | ۴۹    |

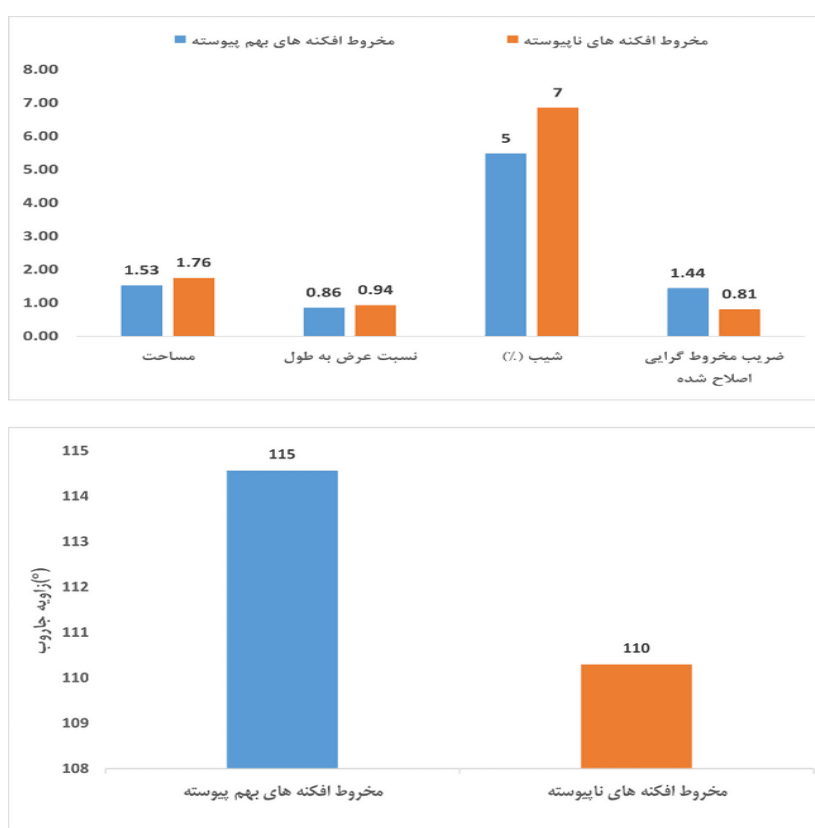
میانگین پارامترهای کمی محاسبه شده مخروط افکنه‌ها، بین سه گنبد نمکی (چاه‌بانو، کهنه و شاه‌غیب) باهم مقایسه شد (جدول ۱). مقایسه میانگین پارامترهای کمی مرتبط با مخروط افکنه‌های حاشیه گنبد‌های نمکی نشان می‌دهد که میانگین مساحت مخروط افکنه‌ها در حاشیه گنبد نمکی چاه‌بانو (۲/۵۱۵ کیلومتر مربع)، بیشتر از مخروط افکنه‌های حاشیه گنبد‌های نمکی کهنه و شاه‌غیب است. همچنین میانگین زاویه جاروب در مخروط افکنه‌های حاشیه گنبد نمکی چاه‌بانو (۱۲۲/۹۰ درجه)، بیشتر از مخروط افکنه‌های حاشیه دو گنبد نمکی دیگر است. میانگین نسبت عرض به طول مخروط افکنه‌های حاشیه گنبد نمکی چاه‌بانو (۰/۹۴۶)، بیشتر از مخروط افکنه‌های حاشیه دو گنبد نمکی کهنه و شاه‌غیب است. میانگین شیب مخروط افکنه‌های حاشیه گنبد نمکی کهنه (۱۰۰/۴۷) بیشتر از شیب مخروط افکنه‌های حاشیه گنبد نمکی جاه بانو و شاه‌غیب است. مقدار میانگین ضریب مخروط‌گرایی اصلاح شده در مخروط افکنه‌های حاشیه گنبد نمکی کهنه بیشتر از مخروط افکنه‌های حاشیه گنبد نمکی چاه‌بانو و شاه‌غیب است (شکل ۴). همچنین مقایسه میانگین پارامترهای کمی محاسبه شده مرتبط با حوضه‌های آبریز بالادست مخروط افکنه‌های حاشیه گنبد‌های نمکی نشان می‌دهد که مقدار میانگین پارامترهای مساحت، شاخص شکل حوضه و انتگرال هیپسومتری در حوضه‌های بالادست مخروط افکنه‌ها در گنبد نمکی شاه‌غیب (به ترتیب ۳/۸۰۱ کیلومتر مربع، ۲/۳۹۱ و ۰/۵۰۱) بیشتر از گنبد‌های نمکی چاه‌بانو و کهنه بیشتر است. همچنین مقدار میانگین شاخص ضریب گردواری حوضه آبریز و شیب متوسط حوضه آبریز برحسب درصد در حوضه‌های بالادست مخروط افکنه‌های حاشیه گنبد نمکی کهنه به ترتیب (۰/۵۵۰ و ۰/۴۵) نسبت به حوضه‌های آبریز بالادست مخروط افکنه‌های حاشیه گنبد‌های نمکی چاه‌بانو و شاه‌غیب بیشتر است (شکل ۵).



شکل (۴): مقایسه میانگین پارامترهای کمی مخروط افکنه‌های حاشیه گنبد‌های نمکی مورد مطالعه

Figure (4): Comparison of the Mean Quantitative Parameters of the Alluvial Fans along the Margins of the Studied Salt Domes

براساس الگوی فضایی و نحوه گسترش جانبی مخروط افکنه‌ها در حاشیه گنبد‌های نمکی، مخروط افکنه‌های مورد مطالعه به دو گروه اصلی تقسیم شدند. گروه نخست شامل مخروط افکنه‌های بهم‌پیوسته (دارای همپوشانی) است که به دلیل همپوشانی جانبی و تداخل پهنه‌های رسوبی، مرز مشخص و مستقلى میان مخروط افکنه‌های مجاور نشان نمی‌دهند. گروه دوم را مخروط افکنه‌های ناپیوسته (فاقد همپوشانی) تشکیل می‌دهند که هر مخروط افکنه به‌صورت واحدی مجزا با مرزهای هندسی مشخص توسعه یافته است. نتایج نشان می‌دهد که میانگین شاخص‌های مساحت مخروط افکنه، شاخص نسبت عرض به طول و شیب مخروط افکنه در مخروط افکنه‌های ناپیوسته به‌ترتیب (۱/۷۶ کیلومتر مربع، ۰/۹۴ و ۷ درصد) بیشتر از میانگین شاخص‌های مذکور در مخروط افکنه‌های بهم‌پیوسته است، در حالی که میانگین شاخص‌های ضریب مخروط‌گرایی اصلاح شده و زاویه جاروب (به‌ترتیب ۱/۴۴ و ۱۱۵ درجه) در مخروط افکنه‌های بهم‌پیوسته بیشتر از شاخص‌های مذکور در مخروط افکنه‌های ناپیوسته است (شکل ۶).



کل (۵): مقایسه میانگین پارامترهای کمی حوضه‌های آبریز مخروط افکنه‌های حاشیه گنبد‌های نمکی مورد مطالعه

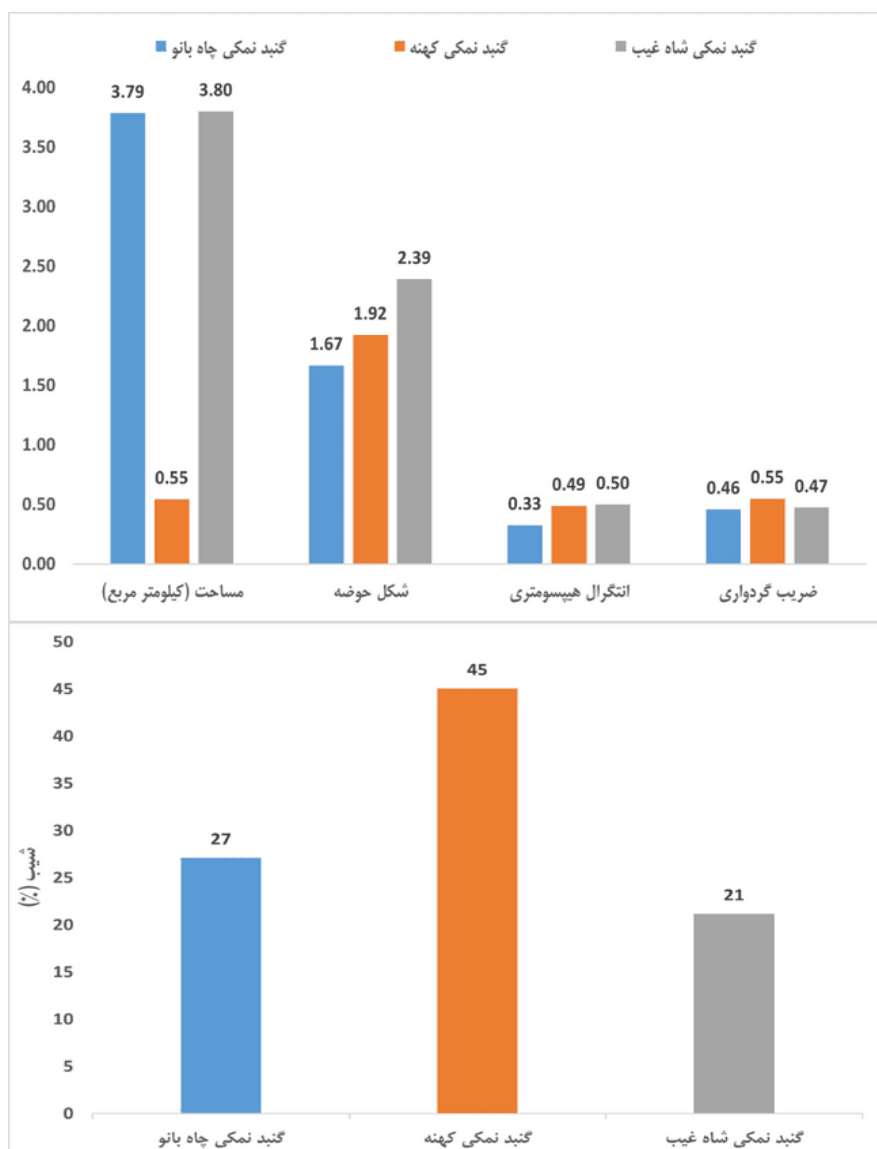
Figure (5): Comparison of the Mean Quantitative Parameters of the Drainage Basins of the Alluvial Fans along the Margins of the Studied Salt Domes

### تحلیل آماری پارامترهای کمی مخروط افکنه‌های منطقه مورد مطالعه

#### آزمون ANOVA

برای بررسی تفاوت میان ویژگی‌های ژئومورفومتری مخروط افکنه‌های مرتبط با ساختارهای مختلف زمین‌شناسی، آزمون تحلیل واریانس یک‌طرفه بر روی پارامترهای کمی شامل مساحت (Af)، زاویه جاروب (Sa)، نسبت عرض به طول (W/L)، شیب (Sl) و ضریب مخروط‌گرایی اصلاح‌شده (CFIR) انجام شد. در این راستا، مخروط افکنه‌های مرتبط با سه گنبد نمکی مورد آزمون قرار گرفت. نتایج آزمون ANOVA نشان داد که میانگین مقادیر دو پارامتر شیب و ضریب مخروط‌گرایی اصلاح‌شده در مخروط افکنه‌های حاشیه سه

گنبد نمکی (چاه‌بانو، کهنه و شاه‌غیب) دارای تفاوت معناداری است. میانگین سایر پارامترهای کمی محاسبه شده در مخروط افکنه‌های حاشیه سه گنبد نمکی مذکور دارای تفاوت معناداری نیست (جدول ۵). همچنین برای بررسی تفاوت میان ویژگی‌های ژئومورفومتری حوضه‌های آبریز بالادست مخروط افکنه‌ها در سه گنبد نمکی مورد مطالعه، آزمون تحلیل واریانس یک‌طرفه بر روی پارامترهای کمی شامل مساحت (A)، شاخص شکل حوضه (Bs)، شاخص انتگرال هیپسومتری (Hi)، شیب (Slope) و شاخص ضریب گردواری (Cr) انجام شد. نتایج آزمون ANOVA نشان داد که میانگین مقادیر دو پارامتر انتگرال هیپسومتری و شیب در حوضه‌های آبریز مخروط افکنه‌های حاشیه سه گنبد نمکی (چاه‌بانو، کهنه و شاه‌غیب) دارای تفاوت معناداری است. میانگین سایر پارامترهای کمی محاسبه شده در حوضه‌های آبریز مخروط افکنه‌های حاشیه سه گنبد نمکی مذکور دارای تفاوت معناداری نیست (جدول ۶).



شکل (۶): مقایسه پارامترهای کمی مخروط افکنه‌های بهم پیوسته (دارای همپوشانی) و ناپیوسته (فاقد همپوشانی) در حاشیه گنبد‌های نمکی مورد مطالعه همپوشانی و ناپیوسته (فاقد همپوشانی) در حاشیه گنبد‌های نمکی مورد مطالعه

Figure (6): Comparison of the Quantitative Parameters of Coalesced (Overlapping) and Un-coalesced (Non-overlapping) Alluvial Fans around the Studied Salt Domes

جدول (۵): مقایسه میانگین پارامترهای کمی مخروط افکنه‌های حاشیه گنبد‌های نمکی منطقه مورد مطالعه در آزمون Anova و آزمون Tukey's post-hoc و کدهای مربوطه (کد ۱: گنبد نمکی چاه بانو، کد ۲: گنبد نمکی کهنه و کد ۳: گنبد نمکی شاه غیب)

Table (5): Comparison of the Mean Quantitative Parameters of the Alluvial Fans along the Margins of the Salt Domes in the Study Area

Using ANOVA and Tukey's Post-hoc Test, with Corresponding Codes (Code 1: Chah Banu Salt Dome, Code 2: Kahneh Salt Dome, and Code 3: Shah Ghayeb Salt Dome)

| ضریب مخروط‌گرایی اصلاح‌شده | شیب   | نسبت عرض به طول | زاویه جاروب | مساحت مخروط‌افکنه | پارامتر                       |                                                    |
|----------------------------|-------|-----------------|-------------|-------------------|-------------------------------|----------------------------------------------------|
| ۰/۰۲۷                      | *     | ۰/۷۲۱           | ۰/۶۱        | ۰/۰۴۲             | ANOVA TEST (بین سه گنبد نمکی) |                                                    |
| ۰/۹۳۶                      | *     | ۰/۹۸۰           | ۰/۰۸۹       | ۰/۶۵              | ۱-۲                           | TUKEY'S POST-HOC TEST<br>گنبد‌های نمکی برای مقایسه |
| ۰/۱۳۷                      | ۰/۹۳۵ | ۰/۷۴۵           | ۰/۸۸۰       | ۰/۸۶۸             | ۱-۳                           |                                                    |
| ۰/۹۳۶                      | *     | ۰/۹۸۰           | ۰/۰۸۹       | ۰/۶۵              | ۲-۱                           |                                                    |
| ۰/۰۳۴                      | *     | ۰/۸۲۷           | ۰/۱۱۰       | ۰/۸۱              | ۲-۳                           |                                                    |
| ۰/۱۳۷                      | ۰/۹۳۵ | ۰/۷۴۵           | ۰/۸۸۰       | ۰/۸۶۸             | ۳-۱                           |                                                    |
| ۰/۰۳۴                      | *     | ۰/۸۲۷           | ۰/۱۱۰       | ۰/۸۱              | ۳-۲                           |                                                    |

جدول (۶): مقایسه میانگین پارامترهای کمی حوضه‌های آبریز مخروط افکنه‌های گنبد‌های نمکی منطقه مورد مطالعه در آزمون Anova و آزمون Tukey's post-hoc و کدهای مربوطه (کد ۱: گنبد نمکی چاه بانو، کد ۲: گنبد نمکی کهنه و کد ۳: گنبد نمکی شاه غیب)

Table (6): Comparison of the Mean Quantitative Parameters of the Drainage Basins of the Alluvial Fans of the Salt Domes in the Study Area Using ANOVA and Tukey's Post-hoc Test, with Corresponding Codes (Code 1: Chah Banu Salt Dome, Code 2: Kahneh Salt Dome, and Code 3: Shah Ghayeb Salt Dome)

| ضریب گردواری | شیب   | انتگرال هیپسومتری | شکل حوضه | مساحت | پارامتر                       |                                                    |
|--------------|-------|-------------------|----------|-------|-------------------------------|----------------------------------------------------|
| ۰/۳۷۱        | *     | ۰/۰۰۱             | ۰/۲۵۳    | ۰/۱۰۵ | ANOVA TEST (بین سه گنبد نمکی) |                                                    |
| ۰/۴۸۸        | *     | ۰/۰۰۳             | ۰/۸۶۴    | ۰/۲۲۰ | ۱-۲                           | TUKEY'S POST-HOC TEST<br>گنبد‌های نمکی برای مقایسه |
| ۰/۹۹۷        | ۰/۳۰۱ | ۰/۰۰۱             | ۰/۲۶۹    | ۱     | ۱-۳                           |                                                    |
| ۰/۴۸۸        | *     | ۰/۰۰۳             | ۰/۸۶۴    | ۰/۲۲۰ | ۲-۱                           |                                                    |
| ۰/۴۰۲        | *     | ۰/۹۵۳             | ۰/۵۰۰    | ۰/۱۱۵ | ۲-۳                           |                                                    |
| ۰/۹۹۷        | ۰/۳۰۱ | ۰/۰۰۱             | ۰/۲۶۹    | ۱     | ۳-۱                           |                                                    |
| ۰/۴۰۲        | *     | ۰/۹۵۳             | ۰/۵۰۰    | ۰/۱۱۵ | ۳-۲                           |                                                    |

## آزمون T

نتایج آزمون T مستقل برای مقایسه پارامترهای مورفومتری مخروط افکنه‌های بهم‌پیوسته و ناپیوسته نشان داد که در هیچ‌یک از پارامترهای مورد بررسی، تفاوت معناداری بین دو گروه وجود ندارد، به طوریکه مقادیر احتمال دوطرفه (Sig. 2-tailed) برای تمام پارامترهای مساحت مخروط افکنه، زاویه جاروب، نسبت عرض به طول، ضریب مخروط‌گرایی اصلاح‌شده و شیب مخروط افکنه بیش از سطح معناداری ۰/۰۵ به‌دست آمدند (جدول ۷). همچنین آزمون تی مستقل برای مقایسه پارامترهای مورفومتری حوضه‌های آبریز مخروط افکنه‌های بهم‌پیوسته و ناپیوسته انجام شد. نتایج نشان داد که هیچ‌یک از پارامترهای مورد بررسی، تفاوت معناداری بین دو گروه مذکور را نشان نمی‌دهند، به طوریکه مقادیر احتمال دوطرفه برای تمام پارامترهای مساحت حوضه آبریز، شاخص شکل حوضه، شاخص انتگرال هیپسومتری، شاخص ضریب گردواری حوضه آبریز شیب متوسط حوضه آبریز بیش از سطح معناداری ۰/۰۵ به‌دست آمدند (جدول ۸).

جدول (۷): نتایج آزمون T مستقل بین پارامترهای کمی مخروط افکنه‌های بهم‌پیوسته و ناپیوسته

Table (7): Results of the Independent T-Test for the Quantitative Parameters of Coalesced and Un-coalesced Alluvial Fans

| پارامتر                    | P. Value ( (Sig.(2-Tailed)) |
|----------------------------|-----------------------------|
| مساحت                      | ۰/۸۰۹                       |
| زاویه جاروب                | ۰/۸۷۰                       |
| نسبت عرض به طول            | ۰/۶۳۳                       |
| ضریب مخروط‌گرایی اصلاح‌شده | ۰/۳۸۰                       |
| شیب مخروط افکنه            | ۰/۱۹۴                       |

جدول (۸): نتایج آزمون T مستقل بین پارامترهای کمی حوضه‌های آبریز مخروط افکنه‌های بهم‌پیوسته و ناپیوسته

Table (8): Results of the Independent T-Test for the Quantitative Parameters of the Drainage Basins of Coalesced and Un-coalesced Alluvial Fans

| پارامتر                      | P. Value ( (Sig.(2-Tailed)) |
|------------------------------|-----------------------------|
| مساحت حوضه آبریز             | ۰/۵۴۳                       |
| شاخص شکل حوضه آبریز          | ۰/۶۲۵                       |
| شاخص انتگرال هیپسومتری       | ۰/۶۹۵                       |
| شاخص ضریب گردواری حوضه آبریز | ۰/۱۶۵                       |
| شیب متوسط حوضه آبریز         | ۰/۷۲۰                       |

## ضریب همبستگی پیرسون

برای تحلیل رابطه بین متغیرهای مورفومتری مخروط افکنه‌ها و حوضه‌های آبریز متناظر آن‌ها در محدوده‌ی گنبدهای نمکی منطقه مورد مطالعه، از ضریب همبستگی پیرسون استفاده شد. این تحلیل با هدف بررسی میزان همبستگی و هم‌تغییری بین پارامترهای کمی نظیر مساحت، شیب، ضریب شکل، و سایر شاخص‌های ژئومورفومتری انجام گرفت. نتایج به‌دست‌آمده بیانگر وجود روابط معنادار

آماري بين برخي از پارامترهاي مخروط افكنه و حوضه‌هاي آبريز است كه مي‌تواند در تبیین فرایندهای زمین‌ریخت‌شناسی مؤثر باشد (جدول ۹). نتایج ماتریس همبستگی پیرسون نشان داد كه بین مساحت مخروط افكنه و مساحت حوضه آبريز رابطه مستقیم و معنادار در سطح اطمینان ۹۹ درصد وجود دارد. این رابطه بیانگر نقش کلیدی وسعت حوضه آبريز در كنترل گسترش سطح مخروط افكنه‌ها در منطقه مورد مطالعه است. در مقابل، بین مساحت مخروط افكنه با شیب مخروط افكنه، انتگرال هیپسومتری حوضه آبريز، ضریب گردواری حوضه آبريز و شیب متوسط حوضه آبريز رابطه معكوس و معنادار در سطوح اطمینان ۹۵ و ۹۹ درصد مشاهده شد كه نشان‌دهنده کاهش توسعه سطحی مخروط افكنه‌ها در شرایط پرشیب و جوان ژئومورفیک است. با این حال، بین مساحت مخروط افكنه با زاویه جاروب مخروط افكنه، نسبت عرض به طول مخروط افكنه، ضریب مخروط‌گرایی اصلاح‌شده و شاخص شكل حوضه آبريز رابطه معناداری مشاهده نشد. زاویه جاروب مخروط افكنه با هیچ‌يك از پارامترهاي مورد بررسی، اعم از پارامترهاي مخروط افكنه و شاخص‌هاي مورفومتری حوضه آبريز، رابطه معناداری نشان نداد. این امر بیانگر آن است كه زاویه جاروب بیشتر تحت تأثیر شرایط محلی جریان و الگوی رسوب‌گذاری بوده و وابستگی مستقیمی به ویژگی‌های کلی حوضه آبريز ندارد. بین نسبت عرض به طول مخروط افكنه و ضریب مخروط‌گرایی اصلاح‌شده رابطه معكوس و معنادار در سطح اطمینان ۹۹ درصد وجود دارد. همچنین بین نسبت عرض به طول مخروط افكنه و انتگرال هیپسومتری حوضه آبريز رابطه معكوس و معنادار در سطح اطمینان ۹۵ درصد مشاهده شد، در حالی كه با سایر پارامترها رابطه معناداری وجود ندارد. رابطه بین شیب مخروط افكنه و شیب متوسط حوضه آبريز رابطه مستقیم و معنادار در سطح اطمینان ۹۹ درصد را نشان می‌دهد. در مقابل، بین شیب مخروط افكنه با مساحت مخروط افكنه و مساحت حوضه آبريز رابطه معكوس و معنادار در سطح اطمینان ۹۵ درصد مشاهده شد. ضریب مخروط‌گرایی اصلاح‌شده تنها با نسبت عرض به طول مخروط افكنه رابطه معكوس و معنادار در سطح اطمینان ۹۹ درصد را نشان داد. با این حال، این پارامتر با سایر متغیرهاي مورد بررسی رابطه معناداری نشان نداد. رابطه بین شاخص شكل حوضه آبريز و ضریب گردواری حوضه آبريز رابطه معكوس و معنادار در سطح اطمینان ۹۹ درصد است. انتگرال هیپسومتری با مساحت مخروط افكنه و مساحت حوضه آبريز رابطه معكوس و معنادار در سطح اطمینان ۹۹ درصد مشاهده شد. همچنین بین این پارامتر و نسبت عرض به طول مخروط افكنه رابطه معكوس و معنادار در سطح ۹۵ درصد وجود دارد. ضریب گردواری حوضه آبريز با مساحت مخروط افكنه، مساحت حوضه آبريز، شاخص شكل حوضه آبريز هیپسومتری رابطه معكوس و معنادار در سطح اطمینان ۹۹ درصد است كه بیانگر ارتباط نزدیک بین هندسه حوضه‌ها و اطمینان و انتگرال میزان تكامل ژئومورفیک آن‌ها است. شیب متوسط حوضه آبريز با ضریب گردواری حوضه آبريز رابطه مستقیم و معنادار در سطح اطمینان ۹۹ را نشان داد.

جدول (۹): ماتریس همبستگی پیرسون بین پارامترهای کمی مخروط افکنه‌ها و حوضه‌های آبریز مرتبط با آن‌ها در حاشیه گنبد‌های نمکی منطقه مورد مطالعه

Table (9): Pearson Correlation Matrix between the Quantitative Parameters of Alluvial Fans and Their Corresponding Drainage Basins Around the Salt Domes in the Study Area

| پارامتر                    | مساحت مخروط افکنه | زاویه جاروب | نسبت عرض به طول | شیب مخروط افکنه | ضریب مخروط‌گرایی اصلاح‌شده | مساحت حوضه آبریز | شاخص شکل حوضه | انتگرال هیپسومتری | ضریب گردواری حوضه آبریز | شیب متوسط حوضه آبریز |
|----------------------------|-------------------|-------------|-----------------|-----------------|----------------------------|------------------|---------------|-------------------|-------------------------|----------------------|
| مساحت مخروط افکنه          | ۱                 |             |                 |                 |                            |                  |               |                   |                         |                      |
| زاویه جاروب                | ۰/۱۲۰             | ۱           |                 |                 |                            |                  |               |                   |                         |                      |
| نسبت عرض به طول            | ۰/۱۰۹             | ۰/۲۱۸       | ۱               |                 |                            |                  |               |                   |                         |                      |
| شیب مخروط افکنه            | -۰/۳۸۰*           | -۰/۱۴۸      | ۰/۰۴۶           | ۱               |                            |                  |               |                   |                         |                      |
| ضریب مخروط‌گرایی اصلاح‌شده | -۰/۰۱۴            | ۰/۰۷۴       | -۰/۷۱۵**        | -۰/۱۶۹          | ۱                          |                  |               |                   |                         |                      |
| مساحت حوضه آبریز           | ۰/۹۳۸**           | ۰/۰۶۴       | ۰/۱۹۹           | -۰/۳۴۱*         | -۰/۰۷۱                     | ۱                |               |                   |                         |                      |
| شاخص شکل حوضه              | ۰/۰۴۰             | -۰/۱۳۵      | -۰/۱۳۶          | -۰/۰۹۸          | ۰/۲۹۰                      | ۰/۰۳۹            | ۱             |                   |                         |                      |
| انتگرال هیپسومتری          | -۰/۴۹۲**          | -۰/۰۶۳      | -۰/۲۹۸*         | ۰/۲۳۱           | ۰/۲۸۸                      | -۰/۴۸۴**         | -۰/۱۶۷        | ۱                 |                         |                      |
| ضریب گردواری حوضه آبریز    | -۰/۴۴۵**          | ۰/۱۰۱       | -۰/۰۵۳          | ۰/۲۰۹           | -۰/۱۱۶                     | -۰/۴۲۵**         | -۰/۷۱۳**      | -۰/۴۳۹**          | ۱                       |                      |
| شیب متوسط حوضه آبریز       | -۰/۳۶۷*           | -۰/۱۲۴      | -۰/۰۱۱          | ۰/۶۴۶**         | -۰/۲۵۲                     | -۰/۳۷۰           | -۰/۲۸۹        | ۰/۱۰۸             | ۰/۵۰۴**                 | ۱                    |

\*\* . Correlation is significant at the 0.01 level.

\* . Correlation is significant at the 0.05 level.

## بحث

بررسی کمی ۴۵ مخروط افکنه تشکیل شده در حاشیه گنبد‌های نمکی مورد مطالعه نشان می‌دهد که فعالیت‌های تکتونیکی گنبد‌های نمکی تأثیر قابل توجهی بر ویژگی‌های مورفومتری مخروط افکنه‌های پیرامونی آن‌ها داشته‌اند. مقایسه داده‌ها نشان داد که میانگین شاخص‌های زاویه جاروب، نسبت عرض به طول، و ضریب مخروط‌گرایی اصلاح‌شده مخروط افکنه‌های حاشیه گنبد‌های نمکی مورد مطالعه بالا است. دلیل بالا بودن پارامترهای مذکور به پویایی و حرکات عمودی و جانبی گنبد‌ها مربوط می‌شود. بررسی شواهد میدانی و تصاویر Google Earth نشان داد که گنبد‌های نمکی به سمت پایین دست (بالادست مخروط افکنه‌ها) حرکت کرده (شکل ۷) و از شواهد این حرکات می‌توان به وجود شکاف‌های کششی عمود بر جهت حرکت نمک (شکل ۸) و همچنین وجود فروچاله‌ها در بالادست

مخروط افکنه‌ها اشاره کرد (شکل ۹). علاوه بر آن، انحلال نمک و حرکت آن به سمت پایین دست بطور مداوم باعث جابجایی و تغییر مسیر آبراهه‌ها روی گنبدها و همچنین بالادست مخروط افکنه‌ها شده و این موضوع در افزایش زاویه جاروب مخروط افکنه‌های حاشیه گنبدهای نمکی تأثیر مهمی داشته است. نکته جالب دیگر در ارتباط با گنبدهای نمکی آن است که حرکت مداوم آن‌ها به سمت پایین دست باعث مدفون کردن بخش بالادست مخروط افکنه‌ها در گذشته شده است که این موضوع در بهم ریختگی و بی‌قوارگی (افزایش شاخص FCIR) مخروط افکنه‌های حاشیه گنبدهای نمکی تأثیر مهمی داشته است (شکل ۱۰). نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهد که از میان گنبدهای مورد مطالعه، گنبد نمکی شاه‌غیب نسبت به دو گنبد دیگر دارای فرسایش کمتر، حرکات جانبی و پویایی بیشتری است. این موضوع با نتایج مطالعه (شامی و همکاران، ۲۰۲۴) که بیانگر فعالیت‌های جانبی و تکتونیک فعال گنبد نمکی شاه‌غیب است، منطبق است. شواهد ژئومورفولوژیک نشان داد که گنبد نمکی چاه‌بانو نسبت به دو گنبد دیگر فرسایش یافته‌تر است. تفاوت در جوانی و میزان فرسایش گنبدهای نمکی مذکور بطور قابل توجهی باعث تفاوت در مقدار میانگین بعضی از شاخص‌های مورفومتری مربوط به مخروط افکنه‌ها و حوضه‌های آبریز آن‌ها شده است. به‌عنوان مثال میانگین پارامترهای BS و Hi در گنبد نمکی شاه‌غیب با توجه به نتایج جدول ۴ (به‌ترتیب ۲/۳۹۱ و ۰/۵۰۱) نسبت به دو گنبد نمکی دیگر بسیار بالاتر است که بیانگر جوان‌تر بودن و فرسایش کمتر گنبد نمکی شاه‌غیب نسبت به دو گنبد نمکی دیگر می‌باشد. با این وجود، میانگین شاخص Hi و BS در حوضه‌های آبریز گنبد نمکی فرسایش یافته و قدیمی‌تر چاه‌بانو (به‌ترتیب ۰/۳۳ و ۱/۶۷) کمتر از میانگین شاخص‌های مذکور در دو گنبد نمکی کهنه و شاه‌غیب است که نشان می‌دهد حوضه‌های آبریز تشکیل شده روی گنبد نمکی چاه‌بانو، بزرگ‌تر، پیرتر و دارای شکل دایره‌ای‌تری نسبت به دو گنبد نمکی دیگر هستند. نتایج نشان می‌دهد که میانگین شاخص FCIR در مخروط افکنه‌های حاشیه گنبد نمکی شاه‌غیب با توجه به نتایج جدول ۳ (۱/۸۶) بسیار بیشتر از میانگین این پارامتر در حاشیه دو گنبد نمکی چاه‌بانو و کهنه (به‌ترتیب ۰/۹۲ و ۰/۷۴) است. بالا بودن مقدار شاخص FCIR در مخروط افکنه‌های حاشیه گنبد نمکی شاه‌غیب می‌تواند ناشی از جابجایی زیاد مسیر جریان در رأس مخروط افکنه‌ها و همچنین حرکت جانبی زیاد این گنبد و نقش آن در مدفون کردن بالادست مخروط افکنه‌ها باشد. نتایج همچنین نشان می‌دهد میانگین مساحت، زاویه جاروب و نسبت عرض به طول مخروط افکنه‌های حاشیه گنبد نمکی فرسایش یافته چاه‌بانو بیشتر از میانگین پارامترهای مذکور در مخروط افکنه‌های حاشیه دو گنبد نمکی کهنه و شاه‌غیب است. به‌نظر می‌رسد سن بیشتر و به تبع آن فرسایش بیشتر گنبد نمکی چاه‌بانو باعث تکامل بیشتر مخروط افکنه‌ها و افزایش مساحت، زاویه جاروب و نسبت عرض به طول آن‌ها شده است. با وجود اینکه حوضه‌های آبریز تشکیل شده بر روی گنبدهای نمکی شاه‌غیب بسیار کشیده‌تر از حوضه‌های سایر گنبدهای نمکی است، اما میانگین مساحت آن‌ها نسبت به میانگین مساحت حوضه‌های آبریز تشکیل شده بر روی سایر گنبدهای نمکی بیشتر است. این موضوع به‌دلیل حرکت جانبی بسیار زیاد گنبد نمکی شاه‌غیب است که باعث ایجاد حوضه‌های آبریز باریک ولی بسیار کشیده شده است که در افزایش مساحت حوضه‌های آن نقش اساسی داشته است (شکل ۱۱).

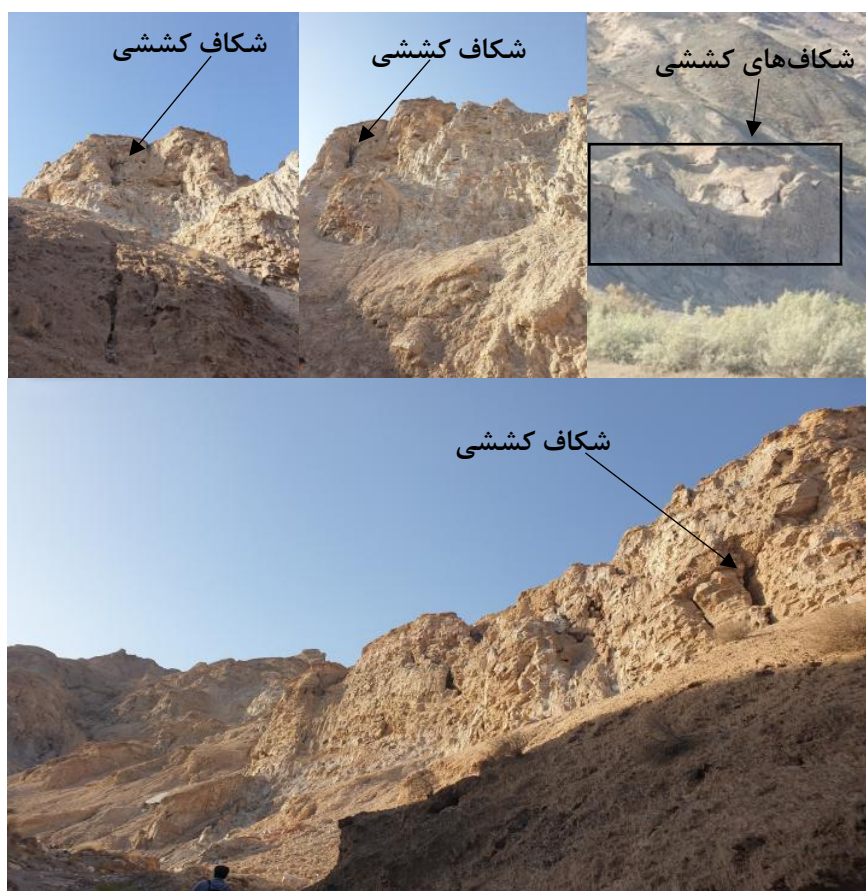


شکل (۷): حرکت گنبد نمکی به سمت بالادست مخروط افکنه‌ها

الف) حرکت گنبد نمکی شاه‌غیب و ب) حرکت گنبد نمکی کهنه

Figure (7): Upstream Movement of The Salt dome Toward the Alluvial Fan Apexes

A) Movement of the Shahgheyb Salt Dome and B) Movement of the Kahneh Salt Dome



شکل (۸): تصاویر میدانی از شکاف های کششی به وجود آمده در اثر حرکت گنبد نمکی کهنه

Figure (8): Field images of Tensile Fractures Formed Due to the Movement of the Kahneh Salt Dome

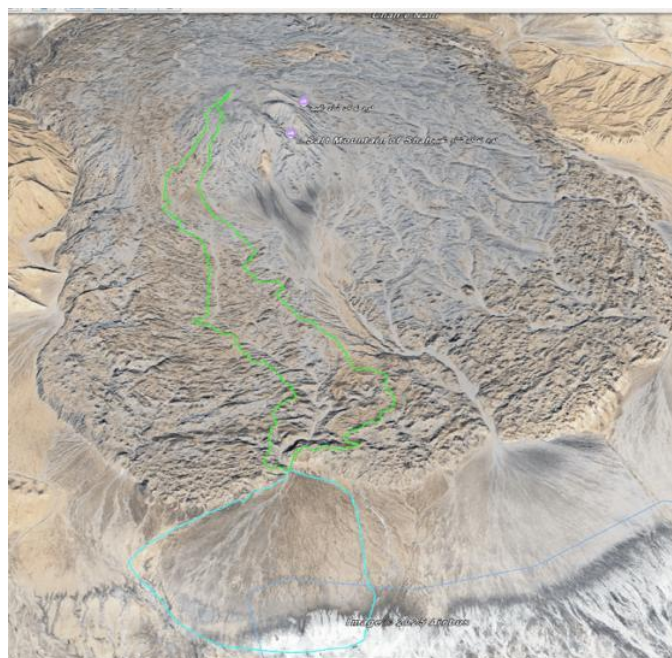


شکل (۹): فروچاله ایجاد شده در بالادست مخروط افکنه ها در گنبد نمکی شاهغیب

Figure (9): Sinkhole Formed upstream of the Alluvial Fans in the Shahgheyb Salt dome



شکل (۱۰): حرکت گنبد نمکی به سمت پائین دست و مدفون کردن بخشی از مخروط‌افکنه شماره ۱۸ در حاشیه گنبد نمکی شاه‌غیب  
Figure (10): Downslope Movement of Salt Dome and Burying Parts of Alluvial Fan 18 Around the Shah Ghayeb Salt Dome



شکل (۱۱): نمونه‌ای از حوضه‌های آبریز باریک و کشیده (در بالادست مخروط‌افکنه شماره ۱) روی گنبد نمکی شاه‌غیب  
Figure (11): An Example of Narrow and Elongated Drainage Basin (Upstream of Alluvial Fan 1) on the Shah Ghayeb Salt Dome

این نتایج با مطالعه (جهانی و همکاران، ۲۰۰۷) که نشان داد گنبد نمکی چاه‌بانو در دسته گنبدهای نمکی غیرفعال (گروه E) و فرسایش یافته‌تر قرار دارد، مطابقت دارد. دو گنبد نمکی کهنه و شاه‌غیب در مطالعه (جهانی و همکاران، ۲۰۰۷) در گروه گنبدهای نمکی با فعالیت کم یا کمتر فرسایش یافته (گروه B, C) قرار دارند. جوان‌تر بودن و فرسایش کمتر دو گنبد مذکور و همچنین پویایی و فعالیت‌های جانبی بیشتر آن‌ها باعث تشکیل حوضه‌های آبریز کشیده‌تر و کمتر فرسایش یافته (مقدار بیشتر Hi) در آن‌ها شده است. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که تکامل مورفولوژیکی مخروط افکنه‌ها در حاشیه گنبدهای نمکی منطقه مورد مطالعه، نتیجه برهم‌کنش هم‌زمان عوامل مورفومتری حوضه‌های آبریز و فرایندهای ساختاری-تکتونیکی مرتبط با فعالیت گنبدهای نمکی است. رشد و بالآمدگی این گنبدها با ایجاد ناپیوستگی‌های ساختاری، تغییر شیب‌های موضعی و محدودسازی فضای رسوب‌گذاری، شرایط ویژه‌ای را برای شکل‌گیری و گسترش مخروط افکنه‌ها فراهم کرده است.

بررسی روابط همبستگی نشان داد که اگرچه مساحت حوضه آبریز نقش اصلی را در تأمین رسوب و توسعه سطحی مخروط افکنه‌ها ایفا می‌کند، اما وجود روابط معکوس و معنادار بین مساحت مخروط افکنه و پارامترهایی نظیر شیب مخروط افکنه، شیب متوسط حوضه آبریز و انتگرال هیپسومتری، بیش از آنکه بیانگر غلبه صرف فرایندهای فرسایشی باشد، نشان‌دهنده کنترل غالب فرایندهای تکتونیکی فعال بر تکامل مخروط افکنه‌ها است. جوانی ژئومورفیک حوضه‌ها در این منطقه، در ارتباط مستقیم با بالآمدگی و فعالیت گنبدهای نمکی، موجب افزایش شیب، ناپایداری دامنه‌ها و در نتیجه، ایجاد مخروط افکنه‌های بی‌قواره (با مقادیر بالای FCIR) شده است. توسعه مخروط افکنه‌های نامنظم با زاویه جاروب بالا در حاشیه گنبدهای نمکی را می‌توان پیامد مستقیم فعالیت‌های تکتونیکی و تغییرات پیوسته در شرایط توپوگرافیک و ساختاری منطقه دانست. نقش پویایی گنبدهای نمکی در تغییر مسیر جریان و ایجاد ناپایداری‌های دامنه‌ای قابل توجه است. تحلیل شاخص‌های هندسی مخروط افکنه‌ها نشان داد که نسبت عرض به طول مخروط افکنه و ضریب مخروط‌گرایی اصلاح‌شده دارای ارتباط معنادار با یکدیگر هستند، در حالی که وابستگی معناداری به ابعاد حوضه آبریز نشان نمی‌دهند. این موضوع بیانگر آن است که هندسه مخروط افکنه‌ها بیش از آنکه تابع ویژگی‌های کلی حوضه باشند، تحت تأثیر شرایط رسوب‌گذاری، محدودیت‌های فضایی و ساختار جریان‌ها قرار دارند. حضور گنبدهای نمکی با تغییر مسیر آبراهه‌ها و ایجاد موانع ساختاری، نقش مهمی در کنترل الگوی گسترش و کشیدگی مخروط افکنه‌ها ایفا می‌کند. از سوی دیگر، عدم مشاهده روابط معنادار بین زاویه جاروب مخروط و اغلب شاخص‌های مورفومتری، نشان می‌دهد که این پارامتر بیشتر بازتاب‌دهنده شرایط محلی جریان و فرایندهای ساختاری است به‌تنهایی به‌عنوان شاخصی از تکامل حوضه آبریز یا ابعاد آن تلقی شود. همچنین، وجود رابطه معنادار بین شیب مخروط افکنه و نمی‌تواند

افکنه و شیب متوسط حوضه آبریز بیانگر آن است که ویژگی‌های توپوگرافیک حوضه بالادست به‌طور مستقیم بر مورفولوژی مخروط افکنه‌ها تأثیرگذار است. در این چارچوب، فعالیت گنبدهای نمکی با افزایش شیب، نقش مهمی در تنظیم این رابطه ایفا می‌کند. در مجموع، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که تکامل مخروط افکنه‌ها در مناطق تحت تأثیر گنبدهای نمکی، صرفاً تابع پارامترهای مورفومتری حوضه نیست، بلکه کنترل‌های ساختاری-تکتونیکی نقش تعیین‌کننده‌ای در شکل‌گیری الگوی نهایی آن‌ها دارند.

### نتیجه‌گیری

بررسی حاضر نشان می‌دهد که رشد جانبی و حرکت گنبد نمکی به سمت پائین دست (راس مخروط افکنه‌ها) باعث تغییر مسیر جریان در بالادست مخروط افکنه‌ها و همچنین مدفون کردن بخشهایی از مخروط افکنه‌ها شده است که این موضوع در افزایش مقدار شاخص‌های زاویه جاروب، نسبت عرض به طول، و ضریب مخروط‌گرایی مخروط افکنه‌های مورد مطالعه موثر بوده است. مخروط افکنه‌های حاشیه گنبدهای نمکی منطقه مورد مطالعه، حاصل تعامل هم‌زمان عوامل مورفومتری حوضه‌های آبریز و فرایندهای تکتونیکی مرتبط با فعالیت گنبدهای نمکی هستند. مساحت حوضه آبریز به‌عنوان مهم‌ترین عامل کنترل‌کننده توسعه سطحی مخروط افکنه‌ها شناخته شد، در حالی که افزایش شیب‌ها و جوانی ژئومورفیک حوضه‌ها موجب محدود شدن گسترش افقی آن‌ها می‌شود. همچنین نتایج بیانگر آن

است که ویژگی‌های هندسی مخروط افکنه‌ها الزاماً بازتاب مستقیم ابعاد حوضه آبریز نیستند، بلکه به شدت تحت تأثیر شرایط رسوب‌گذاری، محدودیت‌های فضایی و کنترل‌های ساختاری ناشی از گنبد‌های نمکی قرار دارند. این موضوع اهمیت در نظر گرفتن عامل تکتونیک نمکی را در تحلیل‌های مورفومتری مخروط افکنه‌ها برجسته می‌سازد. در نهایت، این پژوهش نشان می‌دهد که برای درک صحیح تکامل مخروط افکنه‌ها در کمربند‌های زمین‌ساختی فعال، لازم است شاخص‌های مورفومتری در کنار شواهد ساختاری و تکتونیکی مورد بررسی قرار گیرند. چنین رویکردی می‌تواند به بهبود تحلیل‌های ژئومورفولوژیکی و افزایش دقت مطالعات کاربردی در زمینه ارزیابی مخاطرات طبیعی و برنامه‌ریزی محیطی در مناطق تحت تأثیر گنبد‌های نمکی کمک کند.

## References

- Amirahmadi, A., Ebrahimi, M. (2015). The Influence of Active Tectonic on the Alluvial Fan Morphology Using Geomorphological Indicators at Structural Boundaries in Southern Alborz, Geographic Space (49), 15, 259-288. (In Persian).
- Asgharipour Dasht Bozorg, N. , Servati, M. R. , Kardavani, P. and Shayan, S. (2019). Zoning Suitable Areas for Artificial Recharge Aquifers of Sabzab and Gotvand Plains Using Fuzzy Model and Matching of the Alluvial Fan. *Journal of Hydrogeomorphology*, 5(17), 65-84. (In Persian).
- Azizi, S.B., bahrami, S., Khaleghi, S., Mehrabian, A., (2023). The role of alluvial fan geomorphology on the density and canopy of vegetation( case study: the southeast alluvial fan of the Shah Ghaib salt dome, Larestan, Fars). *Quantitative Geomorphological Research*, 12(2), 166-183. (In Persian).
- Bahrami, S., Maghsoudi, M. Bahrami, K. 2012. Evaluating the Effect of Tectonic on the Entrenchment of Alluvial Fans' Head Around Danekkhoshk Anticline. *Geography & Development*, 10 (28), 23-40. (In Persian).
- Bahrami, S. (2013). Tectonic controls on the morphometry of alluvial fans around Danekkhoshk anticline, Zagros, Iran. *Geomorphology*, 180, 217–230. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.10.012>. .
- Bahrami, S. (2022). Analysis of confluence angle of drainages and its relation to morphometric properties of drainage basins in the Zagros Simply Folded Belt, Iran. *Geomorphology* 400, 108091. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.108091>.
- Bahrami, S., Ehteshami Moeinabadi, M, Fatemi, S.H.R. (2024). Quantitative analysis of morphometry of alluvial fans developed along Dehshir strike-slip fault. Volume 13 (2), 71-88. (In Persian).
- Bahrudi, A., & Koyi, H. A. (2003). Effect of spatial distribution of Hormuz salt on deformation style in the Zagros fold and thrust belt: An analogue modelling approach. *Journal of the Geological Society of London*, 160, 719–733. <https://doi.org/10.1144/0016-764902-135>.
- Brooke, S.A.S., Whittaker, A.C., Armitage, J.J., D'Arcy, M., Watkins, S.E. (2018). Quantifying Sediment Transport Dynamics on Alluvial fans from Spatial and Temporal changes in grain size, Death Valley, California. *J. Geophys. Res. Earth* 123, 2039–2067. <https://doi.org/10.1029/2018JF004622>.
- Callot, J.P., Jahani, S. and Letouzey, J. (2007) The Role of Pre-Existing Diapirs in Folds and Thrust Belt Development. In: Lacombe, O., Lave, J., Roure, F. and Verges, J., Eds., *Thrust Belts and Foreland Basins. From Fold Kinematics to Hydrocarbon Systems*, Springer, Berlin, 307-323. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-69426-7\\_16](https://doi.org/10.1007/978-3-540-69426-7_16).
- Carminati, E., Aldega, L., Bigi, S., Minnelli, G., Shaban, A., (2016). Not so simple “simply-folded Zagros”: The role pf pre-collisional extensional faulting, salt tectonics and multi-stage thrusting in the sarvestan transfer zone (Fars, Iran). *Tectonophysi*, 671, 235-247. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2016.01.033>.

- esmaili, R. , Ghorayashvandi, M. and Jokar Sarhangi, E. (2019). The Identification and Ranking of Flood-Prone Areas in the Alluvial Fans, North of Izeh, Khuzestan Province. *Journal of Hydrogeomorphology*, 5(17), 163-183. (In Persian).
- Fakhari, M, Shariary, S., (1995). Geological Map of Bandar-Abbas 1:250000. Department Geology, Exploratin Directorate, National Iranian Oil Company, Tehran, Iran, Sheet Number I-13.
- Garcia\_Estève, C., Caniven, Y., Cattin, R., Dominguez, S., Sylvain, R. (2021). Morphotectonic Evolution of an Alluvial Fan: Results of a Joint Analog and Numerical Modeling Approach. *Geoscience* 11 (10). 412. <https://doi.org/10.3390/geosciences11100412>.
- Ghahraman, K., Nagy, B. (2023). Flood risk on arid alluvial fans: a case study in the Joghatay Mountains, Northeast Iran. *J. Mt. Sci.* 20, 1183–1200. <https://doi.org/10.1007/s11629-022-7635-8>.
- Ghahraman, K., Nagy, B. (2024). Tectonic controls on the morphometry of alluvial fans in an arid region, northeast Iran, *Phycical Geograpy* (45), 5, 581-604. <https://doi.org/10.1080/02723646.2024.2370653>.
- Ghasemi, A. (2020). Geomorphological and tectonic analysis of salt domes (case study: Larestan region, Fars Province) (Doctoral dissertation). Department of Physical Geography, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. (In Persian).
- Ghasemi, A. , Servati, M. , Bahrami, S. and rahimzadeh, B. (2019). Geometric Analysis of Salt Diapirs using Geomorphologic Indices (Case Study: Salt Diapirs in Lar Region of Fars Province). *Geography and Environmental Planning*, 30(3), pp. 137-154. (In Persian).
- Goorabi, A., Karimi, M., Norini, G., 2021. Semi-automated method for the mapping of alluvial fans from DEM. *Earth Sci. Inf.* 14, 1447–1466. <https://doi.org/10.1007/s12145-021-00616-3>.
- Gutirrés, F., Sevil, J., Silva, P.G., Roca, E., Escosa, F., (2019). Geomorphic and stratigraphic evidence of Quaternary diapiric activity enhanced by fluvial incision. Navarrés salt wall and graben system, SE Spain. *Geomorphology* 342, 176-195. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.06.002>.
- Gutirrés, F., Deirnik, H., Zarei, M., Medialdea, A., (2023). Geology, geomorphology and geochronology of the coseismic? Emad Deh rock avalanche associated with a growing anticline and a rising salt diapir, Zagros Mountains, Iran. *Geomorphology* 421, 108527. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2022.108527>.
- Han, P., Yu, G.A. (2025). Morphometry of alluvial fans in an alpine valley basin in southeast Tibet: Spatial heterogeneity, controls, and implications. *Catena* 250, 108799. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2025.108799>.
- Harvey, A. (2018). Alluvial fans, in: Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences. Elsevier, 1-13. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.11066-8>.
- Hassanpour, J., Jahani, S., Ghassemi, M.R., Alavi, S.A., Zeinali, F. (2018). Evolution of the Karebas Fault System and adjacent folds, central Zagros fold-and-thrust belt, Iran: Role of preexisting halokinesis (diapirs and minibasins) and detachment levels. *Journal of Asian Earth Sciences* 164, 125-142. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2018.06.024>.
- Jackson, M.P.A., Hudec, M.R., Harrison, C., (2015). Salt tectonics: Principles and practice. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781139003988>
- 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, O. Lacombe, J. Lavé, F. Roure, J. Vergés (eds.), *Frontiers in Earth Sciences*, Springer, Netherlands, 289–308. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-69426-7\\_15](https://doi.org/10.1007/978-3-540-69426-7_15).
- Jabbari, I., Moradi, S., Bahrami, K. (2025). The Influence of the Evolution Pattern of the Alluvial Fans North of Kermanshah City on Foundation Settlement, *Geogrphy and planning*, DOI:10.22034/gp.2026.64512.3326

- Jahani, S., Callot, J.P., Letouzey, J., De Lamotte, D.F. (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). 1-22. <https://doi.org/10.1029/2008TC002418>.
- Jamalabadi, J. Zanganeh Asadi, M.A., Amirahmadi, A. (2012). Quantitative Relationships between the Volume of Alluvial Fans and its Relation to Active Tectonics (Case study: Alluvial Fans of Southern Slopes of Joghatay Mountains). *Geography and Environmental Planning* 29 (3), 35-56. (In Persian).
- Kain, C.L., Rigby, E.H., Mazengarb, C., (2018). A combined morphometric, sedimentary, GIS and modelling analysis of flooding and debris flow hazard on a composite alluvial fan, Caveside, Tasmania. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2017.10.005>.
- Karami, F., Bayati Khatibi, M., Nikjo, M., Mokhtari, D. (2013). Analysis of Active Tectonic in The North Basins of Shahrechai (Mianeh). *Geographic Space*, 13(42), 33-53. (In Persian).
- Karami, F., Rajabi, M., Asgari, M. (2013). Neotectonic Analysis in the North Slope of Bozqoosh Mountains, by Using Geomorphological Methods. *Geographical Research* 28 (2), 141-158. (In Persian).
- Karataş, A., Boulton, S. (2019). Morphometric characteristics of alluvial fans in Southern Turkey: implications for fault activity in the Anatolia, Arabia, Africa Triple Junction Region. *Academia Journal of Environmental Science* 7(3), 009-029. <https://doi.org/10.15413/ajes.2019.0104>.
- Khodabakhshnezhad, A., Arian, M., (2016). Salt Tectonics in the Southern Iran. *International Journal of Geosciences* 7, 367-377. <https://doi.org/10.4236/ijg.2016.73029>.
- Kumar, R., Suresh, N., Sangode, S. J., Kumaravel, V. (2007). Evolution of the Quaternary alluvial fan system in the Himalayan foreland basin: Implications for tectonic and climatic decoupling. *Quaternary International*, 159. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2006.08.010>.
- Letouzey, J., Sherkati, S., (2004). Salt Movement, Tectonic Events, and Structural Style in the Central Zagros Fold and Thrust Belt (Iran). *Proceedings of the 24th Annual Gulf Coast Section SEPM Foundation, Interactions and Bob F. Perkins Research Conference on Salt Sediments Hydrocarbon Prospectivity*, Houston, 5-8 December 2004, 753-778. <https://doi.org/10.5724/gcs.04.24.0753>.
- Mao, Z., Wu, M., Lu, H., Pang, L., Zhao, J., Jiang, Y., Lü, Y., Zheng, X., Li, Y. (2024). Climatically-driven development of late Quaternary fluvial geomorphology in the arid inland of Asia. *Geomorphology* 464, 109380. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2024.109380>.
- Masibeygi, M., Shahrabi, Z., Goodarzi, M., (2006). Geological Map of Chahgheyb 1:100000. Department Geology, Exploratin Directorate, National Iranian Oil Company, Tehran, Iran, Sheet Number 7045.
- Mehrabi, A., pourkhosravani, M., Mohebi, A. (2020). Assessment the role of tectonics in the outcrops of the Zagros area salt domes. *Quantitative Geomorphological Research*, 8(3), 165-182. (In Persian).
- Mokhtari, D., Karami, F. and Bayati Khatibi, M. (2007). Differential Features of Alluvial Fans Controlled by Quaternary Tectonic Activities around Misho-Dagh Mountainous Area (Northwest of Iran). *The Journal of Spatial Planning and Geomatics*, 11(0), 257-292. (In Persian).
- Maghsoudi, M., Ebrahimkhani, N., Yamani, M. (2012). The Effect of Neotectonic on Haji Arab Fan (Qazvin Plain) by sedimentologic and morphometric data. *Geography* (33), 87-106. (In Persian).
- Naseri, F., Bahrami, S., Salehipour Milani, Najafi, Esmaeil., Faraji Monfared, Abolfazl., & Ahmadi, Mehdi. (2025). Spatial distribution of alluvial fans for evaluating tectonic activity: A case study from the Southern Kharqan mountain range, Hamadan Province. *Journal of Applied Research in Geographical Sciences*, 25 (76), 92-109. DOI: <http://dx.doi.org/10.61186/jgs.25.76.8>
- Oliveira Junior, J.C., Furquim, S.A.C., Nascimento, A.F., Beirigo, R.M., Barbiero, L., Valles, V., Couto, E.G., Vidal-Torrado, P. (2019). Salt-affected soils on elevated landforms of an alluvial megafan, northern Pantanal, Brazil. *CATENA* 172, 819–830. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.09.041>.

- Othman, A.T., Omar, A.A., (2023). Evaluation of relative active tectonics by using geomorphic indices of the Bamo anticline, Zagros Fold-Thrust Belt, Kurdistan Region of Iraq. *Heliyon* 9, e17970. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17970>.
- Rajabi, M. and Shiri Tarzam, A. (2009). Salt Tectonic and its Geomorphical Manifestation in Azarbaijan CaseStudy: Salt Domes of North - West Tabriz. *Geography and Development*, 7(16), 47-70. (In Persian).
- Sedaghat, M.E., Kashani, F., Allahmadadi, S., Haddadan, M., (2005). Geological Map of Bezanjan 1:100000. Geological Survey & Mineral Exploration of Iran, Tehran, Iran, Sheet Number 6946.
- Seyfforipour, S., Navazi, M., Hadoddi, N., Maffi, A., Mirtohidi, I., Haddadn, M., (2009). Geological Map of Rostagh 1:100000. Geological Survey & Mineral Exploration of Iran, Tehran, Iran, Sheet Number 7046.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2024.104016>.
- Snidero, M., Muñoz, J.A., Santolaria, P., Carrera, N., Butille, M., (2025). Structural evolution of the Handun salt diapir, Zagros fold and thrust belt, southern Iran. *Marine and Petroleum Geology* 171, 107172. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2024.107172>.
- Sohn, M.F., Mahan, S.A., Knott, J.R., Bowman, D.D. (2007). Luminescence ages for alluvial-fan deposits in Southern Death Valley: Implications for climate-driven sedimentation along a tectonically active mountain front. *Quaternary International, Dating Quaternary sediments and landforms in Drylands* 166, 49–60. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2007.01.002>.
- Taghikhani, H., Yassaghi, A., Madanipour, S., Najafi, M., (2024). Salt tectonics along the High Zagros Fault in Iran, faulting through welded salt walls. *Journal of Asian Earth Sciences* 259, 105928. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2023.105928>.
- Teknik, V., Ghods, A.R., Inan, S., Rezaeian, M., Akdoğan, R., Ghomi, S. (2024). Potential Field Imaging of Salt and Basement Structures in the Southern Zagros Foreland Basin. *Pure and Applied Geophysics*, Volume 181, 3071-3101. <https://doi.org/10.1007/s00024-024-03576-z>.
- Tomczyk, A. M., Ewertowski, W. M., Ewertowski, W., Śledź, S. (2024). Annual dynamics of periglacial alluvial fans mapped and quantified using time series of UAV data in Svalbard. *Catena* 247, 108531. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108531>.
- Walker, R.T., Fattahi, M. (2011). A framework of Holocene and late Pleistocene environmental change in eastern Iran inferred from the dating of periods of alluvial fan abandonment, river terracing, and lake deposition. *Quat. Sci. Rev.* 30, 1256–1271. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2011.03.004>.
- Wang, P., Zhang, W., Zhu, Y., Liu, Y., Li, Y., Cao, S., Hao, Q., Liu, S., Kong, X., Han, Z, Li, B. (2024). Evolution of groundwater hydrochemical characteristics and formation mechanism during groundwater recharge: a case study in the Hutuo River alluvial–pluvial fan, North China Plain. *Sci. Total Environ.* 915, 170159. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170159>.
- Warren, J. (2000). Evaporites, brines and base metals: Low-temperature ore emplacement controlled by evaporite diagenesis. *Australian Journal of EarthSciences*. <https://doi.org/10.1046/J.14400952.2000.00781.X>
- Yu, G.A., (2025). Alluvial fan morphodynamics: Advances and future prospects. *Earth-Science Reviews* 270, 105229. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2025.105229>.
- Zhou, X., Chen, Y., Sun, W., Yang, X., Wang, Y., Li, C., Tang, G. (2025). Delineating individual alluvial fans and morphological analysis based on digital elevation models. *Geomorphology* 473, 109629. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2025.109629>.