University of Tehran Press

Environmental ***Hazards*** **Management**

Home Page: https://jhsci.ut.ac.ir

Iranian Hazardology Association
Online ISSN: 2383-0530

The Role of Structural Controls in the Formation and Development of Dolines: (A Case Study of the Noakoh Anticline, Kermanshah Province, Iran)

Areaou Cheraghi[1] | Shahram Bahrami[2*] | Somayeh Khaleghi[3] | Kazem Nosrati[4]

1. Department of Physical Geography, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. Email: a_cheraghi@sbu.ac.ir
2. Corresponding Author, Department of Physical Geography, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. Email: sh_ Bahrami@sbu.ac.ir
3. Department of Physical Geography, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. Email: s_khaleghi@sbu.ac.ir
4. Department of Physical Geography, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. Email: k_nosrati@sbu.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:
Research Article

Article History:
Received: 07 June 2026
Revised: 02 July 2026
Accepted: 06 July 2026
Published: 11 July 2026

Keywords:
Noakoh Anticline,
Azimuth Orientation,
Tectonic Structures,
Doline Morphometry.

ABSTRACT

Geological structures such as faults, fractures, and other tectonic lineaments are among the key factors controlling the formation and development of dolines. These structures enhance permeability and intensify dissolution processes in carbonate rocks. The Novakoh anticline is located in the Folded Zagros Belt, Kermanshah Province, which is influenced by the convergence of the Turan and Arabian platforms and is mainly composed of the Asmari-Shahbazan limestone unit. The present study investigates the influence of tectonic structures and topographic slope on the formation and morphometric characteristics of dolines in this area. A total of 36 dolines were analyzed using drone-based mapping, and the parameters of area, depth, elongation ratio, and orientation angle were calculated for each doline. Dolines were divided into two groups based on axis orientation: the first group trends northeast–southwest (52.7%), and the second group trends northwest–southeast (36.1%). Dominant elongation trend of dolines (NE–SW) is closely corresponds to the main trend of lineaments of Noakoh anticline (NE-SW). Comparative analysis indicates that the dolines in the first group have higher mean area (5825 m²), depth (6.91 m), and elongation coefficient (1.69) than those in the second group. In addition, rose diagram analysis revealed that the orientations of lineaments, doline axes, the topographic slopes surrounding the dolines, are predominantly northeast–southwest, indicating the effects of fold axis, fractures orientation and topographic slopes on their formation and morphology.

Cite this article: Cheraghi, A.; Bahrami, Sh.; Khaleghi, S. & Nosrati, K. (2026). The Role of Structural Controls in the Formation and Development of Dolines: (A Case Study of the Noakoh Anticline, Kermanshah Province, Iran). *Environmental Hazards Management*, 13 (1), 67-80. DOI: http//doi.org/10.22059/jhsci.2026.416040.941

© The Author(s).
Publisher: University of Tehran Press.
DOI: http//doi.org/10.22059/jhsci.2026.416040.941

Introduction

Karst systems are among the most important and sensitive geomorphological environments, where the dissolution of carbonate rocks gives rise to a variety of landforms, including dolines. As the most common karst features, dolines provide valuable information about landscape evolution, hydrological conditions, and geological processes within a region. Previous studies have shown that, in addition to lithology, geological structures such as faults and fractures play a significant role in controlling the location, shape, size, and orientation of dolines. The Noakoh anticline, located within the Folded Zagros Belt, provides an ideal setting for investigating these relationships due to the presence of carbonate formations, active faults, and a dense fracture network. The main objective of this study is to evaluate the influence of lineaments and tectonic structures on the formation and development of

dolines in the area. It is hypothesized that the orientation and morphometric characteristics of dolines are directly controlled by geological structures and that increasing fracture density contributes to a greater number of dolines and enhanced elongation. The findings can improve our understanding of geomorphological hazards and support the sustainable management of karst environments.

Method

To investigate the morphometric characteristics of dolines in the Noakoh anticline, a high-resolution Digital Elevation Model (DEM) with a spatial resolution of 13 cm, derived from UAV imagery, was utilized. The locations and boundaries of the dolines were determined through detailed field surveys. For each doline, morphometric parameters including area, depth,elongation ratio, and major-axis orientation were measured. Doline area, major and minor axes, and depth were extracted using ArcGIS 10.8. The elongation ratio was calculated by dividing the length of the major axis by that of the minor axis. In addition, the orientation of each doline axis was determined using RockWorks 17 software. These parameters provided a basis for evaluating the relationship between doline morphology and the geological structures of the study area, particularly the influence of faults and fractures on doline formation and development.

Results and Discussion

The morphometric characteristics of 36 sampled dolines in the Noakoh anticline, including area, depth, elongation ratio, and axis orientation, were analyzed. Based on their major-axis direction, the dolines were classified into two groups: northeast–southwest (NE–SW) and northwest–southeast (NW–SE). The first group, characterized by a NE–SW trend, represents more than half of the studied dolines. On average, these dolines exhibit larger areas, greater depths, and higher elongation ratios than those belonging to the second group. Rose diagram analysis further revealed that the orientations of doline, lineaments trend, and topographic slopes are predominantly concentrated in the NE–SW direction.

The results indicate that the dominant elongation of dolines in the Noakoh anticline follows a NE–SW trend, which closely corresponds to the orientation of regional lineaments and the prevailing topographic slope. This spatial agreement highlights the significant role of tectonic structures, particularly faults and fractures, in controlling the formation and development of dolines. By increasing rock permeability and directing groundwater flow, faults and joints create favorable conditions for enhanced dissolution and the expansion of karst voids, ultimately influencing the elongation pattern of the dolines.

The observed alignment between doline orientation and topographic slope suggests that, in addition to tectonic controls, topographic factors have also controlled the evolution of these landforms. Dolines with a NE–SW trend, which coincide with the dominant direction of topographic slope, generally display greater depth, larger surface area, and stronger elongation. This pattern implies that the concentration of surface runoff and water infiltration along structurally controlled pathways has intensified dissolution processes, leading to the more extensive development of these dolines.

Furthermore, the presence of secondary trends in the rose diagrams, particularly within the plunging segment of the anticline, reflects the influence of secondary fractures and transverse faults on the local geomorphology. Overall, the findings suggest that the morphometric characteristics and spatial distribution of dolines in the Noakoh anticline result from the combined interaction of tectonic structures, topographic slope, and the carbonate lithology of the region.

Conclusion

The results of this study demonstrate that the orientation and morphometric characteristics of dolines in the Noakoh anticline are significantly controlled by tectonic structures and topographic slope. The alignment of doline axes with regional lineaments and the dominant direction of topographic slope emphasizes the key role of faults and fractures in the formation and evolution of these karst landforms. In general, the dolines of the Noakoh anticline are not only products of dissolution processes but also reflect the structural framework of the region. Therefore, integrating tectonic and geomorphological analyses can help to a better understanding of karst evolution and support the sustainable management of karst landscapes in the Zagros Mountains.

Author Contributions
The authors have adhered to ethical standards in the conduct and reporting of this research.

Data Availability Statement
Data available on request from the authors.

Acknowledgements
The authors would like to thank all participants of the present study.

Ethical Considerations
The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Conflict of Interest
The authors declare no conflict of interest.

انتشارات دانشگاه تهران

مدیریت مخاطرات محیطی

سایت نشریه: https://jhsci.ut.ac.ir

شاپا الکترونیکی: ۴۱۶۸-۲۴۲۳

نقش کنترل‌های ساختاری در شکل‌گیری و توسعه‌ی دولین‌ها (مطالعهٔ موردی: تاقدیس نواکوه، استان کرمانشاه)

آرزو چراغی[۱] | شهرام بهرامی[۲*] | سمیه خالقی[۳] | کاظم نصرتی[۴]

۱. گروه جغرافیای طبیعی، دانشکدهٔ علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه a_cheraghi@sbu.ac.ir

۲. نویسندهٔ مسئول، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکدهٔ علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه sh_bahrami@sbu.ac.ir

۳. گروه جغرافیای طبیعی، دانشکدهٔ علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه s_khaleghi@sbu.ac.ir

۴. گروه جغرافیای طبیعی، دانشکدهٔ علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه k_nosrati@sbu.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقالهٔ پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:
تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۱۷
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۴/۱۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۱۵
تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۴/۲۰

کلیدواژه:
تاقدیس نواکوه،
زاویهٔ جهت‌گیری (آزیموت)،
ساختار تکتونیکی،
مورفومتری دولین.

چکیده

ساختارهای زمین‌شناسی مانند گسل‌ها، شکستگی‌ها و دیگر خطواره‌های تکتونیکی، از عوامل اساسی در شکل‌گیری و گسترش دولین‌ها محسوب می‌شوند. این ساختارها با افزایش نفوذپذیری، موجب تشدید فرایندهای انحلالی در سنگ‌های کربناته می‌شوند. تاقدیس نواکوه در زون چین‌خوردهٔ زاگرس (استان کرمانشاه) واقع شده است که تحت تأثیر همگرایی پلتفرم‌های توران و عربستان قرار دارد و اغلب از واحدهای آهک آسماری- شهبازان تشکیل شده است. پژوهش حاضر با هدف بررسی تأثیر ساختارهای تکتونیکی و شیب توپوگرافی بر ایجاد دولین‌ها و ویژگی‌های مورفومتری آنها، به تحلیل ۳۶ دولین در این منطقه پرداخته است. داده‌های مورد استفاده از نقشه‌برداری پهپادی استخراج شده و پارامترهای مساحت، عمق، نسبت کشیدگی و زاویهٔ جهت‌گیری برای هر یک محاسبه شد. یافته‌ها نشان می‌دهد که دولین‌ها بر اساس جهت‌گیری محور به دو گروه تقسیم می‌شوند: گروه اول با روند شمال شرق- جنوب غرب (۵۲/۷ درصد) و گروه دوم با روند شمال غرب- جنوب شرق (۳۶/۱ درصد). روند غالب کشیدگی دولین‌ها (شمال شرق- جنوب غرب) با روند غالب خطواره‌های تاقدیس نواکوه (شمال شرق- جنوب غرب) همراستاست. نتایج حاکی از آن است که دولین‌های گروه نخست از نظر میانگین مساحت (۵۸۲۵ متر مربع)، عمق (۶/۹۱ متر) و ضریب کشیدگی (۱/۶۹)، مقادیر بیشتری نسبت به گروه دوم دارند. همچنین تحلیل رزدیاگرام‌ها نشان داد که جهت‌گیری خطواره‌ها، محور دولین‌ها و شیب توپوگرافی اطراف دولین‌ها، اغلب دارای روند شمال شرق- جنوب غرب هستند که بیانگر تأثیر محور چین، جهت شکستگی‌ها و شیب توپوگرافی بر تشکیل و فرم آنهاست.

استناد: چراغی، آرزو؛ بهرامی، شهرام؛ خالقی، سمیه و نصرتی، کاظم (۱۴۰۴). نقش کنترل‌های ساختاری در شکل‌گیری و توسعه‌ی دولین‌ها (مطالعهٔ موردی: تاقدیس نواکوه، استان کرمانشاه). *مدیریت مخاطرات محیطی*، ۱۳ (۱)، ۶۷-۸۰.

DOI: http//doi.org/10.22059/jhsci.2026.416040.941

© نویسندگان **ناشر:** مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.
DOI: http//doi.org/10.22059/jhsci.2026.416040.941

مقدمه

سیستم‌های کارستی از پیچیده‌ترین، پویاترین و در عین‌حال حساس‌ترین محیط‌های ژئومورفولوژیک زمین به شمار می‌روند که در آنها برهم‌کنش فرایندهای انحلالی، شرایط هیدرولوژیکی، ویژگی‌های لیتولوژیک و ساختارهای زمین‌شناسی سبب شکل‌گیری مجموعه‌ای متنوع از اشکال سطحی و زیرسطحی می‌شود. این سیستم‌ها به‌دلیل واکنش‌پذیری زیاد سنگ‌های کربناته در برابر آب‌های اسیدی ضعیف، به‌سرعت به تغییرات محیطی و ساختاری پاسخ می‌دهند و از این‌رو، پژوهش آنها از دیدگاه ژئومورفولوژی، زمین‌ساخت و مدیریت محیطی اهمیت ویژه‌ای دارد. در میان اشکال مختلف کارستی، دولین‌ها رایج‌ترین و شاخص‌ترین عوارض سطحی هستند که اهمیت زیادی در تبیین تکامل چشم‌اندازهای کارستی، کنترل الگوی زهکشی سطحی و زیرسطحی و همچنین ارزیابی مخاطرات ژئومورفولوژیک دارند (باکالوویچ، ۲۰۰۵). سازندهای کارستی حدود ۱۱ درصد از مساحت ایران را شامل می‌شوند و نقش مهمی در تأمین منابع آب دارند (قدیمی و همکاران، ۱۴۰۲). دولین‌ها به‌طور معمول به‌صورت فرورفتگی‌های بسته با اشکال دایره‌ای، بیضوی یا کشیده در سطح زمین ظاهر می‌شوند و از نظر ژنتیکی می‌توانند حاصل انحلال تدریجی سنگ بستر، فرونشست تدریجی پوشش‌های سطحی، فروپاشی ناگهانی سقف فضاهای زیرسطحی یا ترکیبی از این فرایندها باشند (دی، ۲۰۱۰). تحقیقات فراوانی در جهان دربارهٔ تأثیر ساختارهای زمین‌شناسی بر دولین و فروچاله‌ها انجام گرفته است که از آن میان می‌توان به موارد زیر اشاره کرد. شوسترشیچ (۲۰۰۲) در پژوهشی روی دولین‌های فروریزشی و گسل‌های انحرافی در کارست کلاسیک اسلوونی و تحلیل دولین‌های فروریزشی بر پایهٔ نظریهٔ عمومی سیستم‌ها، فرایندهای تشکیل و تکامل دولین‌های فروریزشی و ارتباط آنها با گسل‌های انحرافی را بررسی کرد. نتایج نشان داد که فروریزش سقف غار عامل اصلی توسعهٔ دولین‌های فروریزشی است و تشکیل این دولین‌ها در امتداد گسل‌های انحرافی، بیانگر کریدورهای جریان زیرزمینی و سازمان‌یافتگی غارهای کارستی است. فایور و ریفشتک (۲۰۰۲) با بررسی پراکنش فضایی دولین‌ها در رشته‌کوه ولبیت کرواسی و ارتباط آنها با جهت‌های تغییر شکل و میدان‌های تنش نشان دادند که پراکنش دولین‌ها با تغییر شکل‌های اخیر و میدان تنش منطقه ارتباط نزدیکی دارد و جهت‌های تغییر شکل و تنش به‌دست‌آمده با GPS، نقشه‌برداری زمین‌شناسی و جهت حرکت ریزصفحهٔ آدریاتیک همخوانی دارد. سیسکا و همکاران (۲۰۱۶) با تحلیل‌های زمین‌آماری و مدل کریجینگ در محیط GIS به مدل‌سازی و ارزیابی احتمال فروریزش دولین‌های کارستی در منطقهٔ سانگو (تنسی آمریکا) بر اساس ویژگی‌های مورفومتریک بیرونی آنها پرداختند. نتایج پژوهش آنها نشان داد که شاخص‌هایی مانند مدور بودن و راستای محور طولی فروچاله‌ها موازی با درزه‌های سیستماتیک، پتانسیل ریزش را به‌شدت افزایش می‌دهند و مناطق با حساسیت زیاد اغلب در جهت شمال شرقی–جنوب غربی توسعه یافته‌اند. اوزتورک و همکاران (۲۰۱۸) با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ و تحلیل‌های GIS به بررسی تأثیر ساختارهای تکتونیکی، شیب و زهکشی بر توزیع و ویژگی‌های مورفومتریکی دولین‌ها در کوه آناماس پرداختند. نتایج نشان داد که ساختارهای تکتونیکی، به‌ویژه گسل‌ها و سیستم درزه‌ها، مهم‌ترین عامل کنترل‌کنندهٔ تراکم، جهت‌گیری و شکل دولین‌ها هستند. شنر و همکاران (۲۰۲۳) در پژوهشی توسعهٔ مورفوتکتونیکی کارست‌های سطحی در توروس غربی ترکیه را با تمرکز بر ویژگی‌های مورفومتری ۷۰۹۳ دولین و ۷۴ پولیه بررسی کردند. برای این منظور، با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ و تحلیل‌های GIS، پارامترهای مورفومتری شامل مساحت، شاخص دایره‌ای، نسبت کشیدگی و جهت محور فرورفتگی‌ها محاسبه شد. نتایج نشان داد که امتداد غالب دولین‌ها و پولیه‌ها در راستاهای E–W ، NW–SE و NE–SW است و این راستاها با ساختارهای تکتونیکی منطقه مطابقت دارند. دنیزمن (۲۰۲۳) با استفاده از تحلیل فضایی مبتنی بر GIS، ارتباط بین غارها، فرورفتگی‌های کارستی و شکستگی‌ها را در کارست ائوژنتیک فلوریدا بررسی کرد. در این پژوهش، جهت‌گیری گذرگاه‌های غار، محور اصلی فرورفتگی‌ها، پراکنش فضایی آنها و الگوی شکستگی‌ها با بهره‌گیری از داده‌های GIS، LiDAR و آزمون کولموگروف– اسمیرنوف تحلیل شد. نتایج نشان داد که بین جهت‌گیری گذرگاه‌های غار و محور اصلی فرورفتگی‌های کارستی همبستگی متوسط تا زیاد وجود دارد و توسعهٔ کارست سطحی و زیرسطحی با کنترل ساختاری و روندهای غالب شکستگی ارتباط دارد. کونچا–دیماس و همکاران (۲۰۲۶) با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی مبتنی بر LiDAR، نقش عوامل ژئومورفولوژی بر توسعهٔ کارست و دولین‌های رشته‌کوه گاراف در اسپانیا را بررسی کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد که هیچ ارتباط فضایی

مستقیمی بین وقوع دولین‌ها و نزدیکی به خطواره‌های ساختاری وجود ندارد؛ اما دولین‌ها اغلب در مجاورت آبراهه‌ها و مناطقی با تراکم زیاد شبکهٔ زهکشی توسعه یافته‌اند.

کمربند چین‌خوردهٔ زاگرس، از فعال‌ترین نواحی تکتونیکی ایران است که با گسترش وسیع سازندهای کربناته و تاریخچهٔ پیچیدهٔ دگریختی، شرایط بسیار مساعدی برای توسعهٔ اشکال کارستی فراهم کرده است. با وجود پژوهش‌های گسترده در زمینهٔ زمین‌شناسی ساختاری و تکتونیک این کمربند، بررسی نقش کمّی و فضایی خطواره‌ها در شکل‌گیری دولین‌ها از دیدگاه ژئومورفولوژی ساختاری همچنان محدود باقی مانده است. در این میان، تاقدیس نواکوه با وجود گسل‌های فعال و شبکه‌ای متراکم از شکستگی‌ها، نمونه‌ای مناسب برای بررسی ارتباط بین ساختارهای تکتونیکی و توسعهٔ دولین‌ها به شمار می‌رود.

مشاهدات میدانی و تحلیل‌های مورفولوژیک در منطقهٔ مذکور نشان می‌دهد که بسیاری از دولین‌ها دارای کشیدگی مشخص و جهت‌گیری منطبق بر روند خطواره‌های اصلی هستند. با این‌حال، تاکنون پژوهش جامعی که به‌صورت نظام‌مند و یکپارچه رابطهٔ بین جهت خطواره‌ها، ویژگی‌های توپوگرافی و مورفومتری دولین‌ها را تحلیل کند انجام نگرفته است. از این‌رو، پژوهش حاضر با هدف تبیین نقش ساختارهای تکتونیکی در شکل‌گیری و توسعهٔ دولین‌ها در منطقهٔ نواکوه انجام گرفت. فرض اصلی این تحقیق آن است که جهت‌گیری محوری دولین‌ها به‌طور معناداری با راستای خطواره‌های غالب همراستاست و افزایش تراکم شکستگی‌ها و گسل‌ها موجب افزایش فراوانی، کشیدگی و تمرکز دولین‌ها می‌شود. نوآوری این پژوهش در ارائهٔ چارچوبی ژئومورفولوژیک- ساختاری برای تبیین تأثیر تکتونیک در توسعهٔ دولین‌ها در غرب ایران است؛ چارچوبی که می‌تواند در تحلیل مخاطرات ژئومورفولوژیک، برنامه‌ریزی کاربری زمین و مدیریت پایدار محیط‌های کارستی کاربرد داشته باشد.

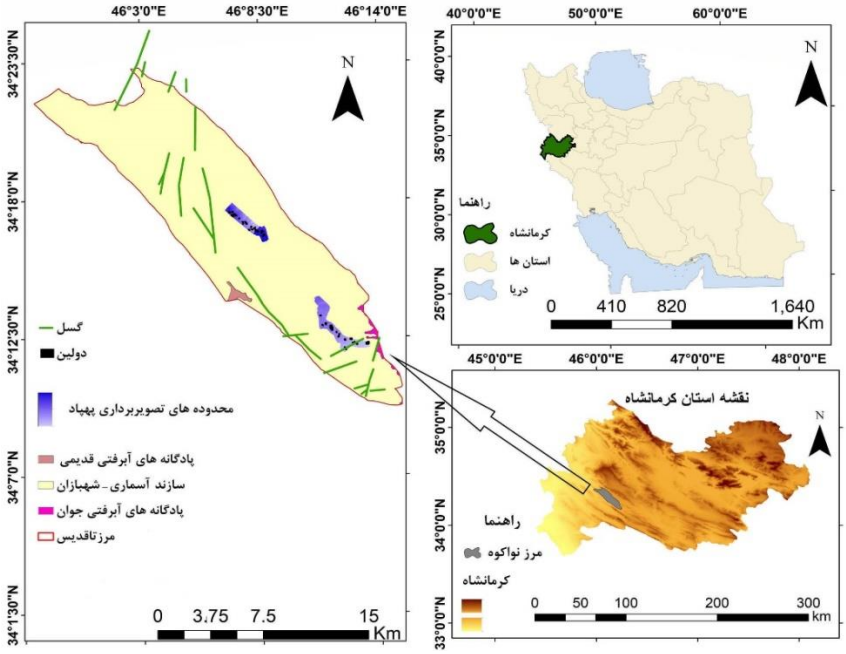
منطقهٔ پژوهش

تاقدیس نواکوه در زون چین‌خوردهٔ زاگرس و در استان کرمانشاه واقع شده است. منطقهٔ پژوهش حدود ۱۹۵ کیلومتر مربع مساحت دارد و در محدودهٔ جغرافیایی ۳۴ درجه و ۱۰ دقیقه تا ۳۴ درجه و ۲۳ دقیقهٔ عرض شمالی و ۴۵ درجه و ۵۸ دقیقه تا ۴۶ درجه و ۱۴ دقیقهٔ طول شرقی قرار دارد (شکل ۱). آب‌وهوای منطقه از نوع نیمه‌خشک تا مدیترانه‌ای با زمستان‌های خنک و تابستان‌های خشک است. به لحاظ هیدرولوژیکی، همهٔ رودخانه‌های تشکیل‌شده روی تاقدیس، موقت هستند. پوشش گیاهی این منطقه شامل گونه‌های مختلفی از جمله بلوط، بادام وحشی، بنه، گلابی، زالزالک، ون و گیلاس وحشی است. ارتفاعات ۸۰۰ تا ۲۲۰۰ متری دارای پوشش جنگلی (اغلب بلوط) و ارتفاعات بالاتر از ۲۲۰۰ متری، پوشش مرتعی است. از نظر سنگ‌شناسی، تاقدیس نواکوه اغلب از واحد آسماری- شهبازان شامل سنگ‌های آهکی و دولومیتی تشکیل شده است (شکل ۱). سیستم چین‌خوردهٔ زاگرس، متشکل از مجموعه‌ای از تاقدیس‌ها و ناودیس‌ها، در طی دورهٔ میوسن شکل گرفته و تکامل یافته است. گسل‌های منطقه شامل سه مجموعه گسل‌های عرضی، طولی و مورب‌اند. یکی از گسل‌های اصلی طولی منطقه، گسل معکوس دامنهٔ جنوب غرب تاقدیس نواکوه است. بعضی از گسل‌های مورب دارای مؤلفهٔ امتدادلغز نیز هستند (اژدری و شاوردی، ۲۰۰۵). مجموعهٔ چین‌خوردهٔ زاگرس تحت تأثیر همگرایی دو پی‌سنگ پایدار شامل پلتفرم توران در شمال شرق و پلتفرم عربستان در جنوب غرب قرار دارد. در این سامانه، نیروهای تکتونیکی و فشارهای زمین‌ساختی سبب شکل‌گیری انواع مختلفی از سیستم‌های چین‌خورده شده‌اند که هر یک نقش مشخصی در ایجاد و تکامل شکستگی‌ها و درزه‌ها ایفا می‌کند. تاقدیس نواکوه دارای فرود محوری به‌سمت جنوب شرق است و بخش شمال غربی (مرکزی) تاقدیس قدیمی‌تر و فرسایش‌یافته‌تر است. به‌طور کلی، شیب ساختمانی و توپوگرافی در پهلوی جنوب غربی بیشتر از پهلوی شمال شرقی آن است (بهرامی، ۲۰۱۲). در این چارچوب، جهت غالب درزه‌ها و شکاف‌ها نسبت به شیب توپوگرافی نقش مهمی در کنترل حرکت رواناب، کاهش سرعت جریان آب و افزایش نفوذپذیری دارد.

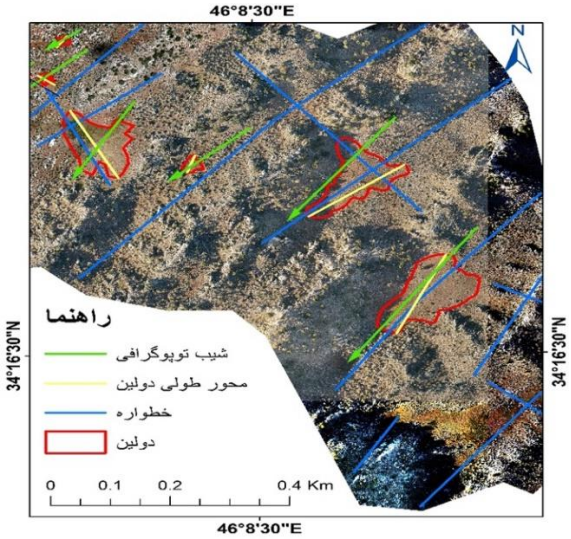
مواد و روش‌ها

تحلیل مورفومتریک و نقشه‌های مورفومتریک دولین‌ها به‌طور معمول به‌عنوان ابزاری کمّی در مناطق کارستی استفاده می‌شود (بوندسان و همکاران، ۱۹۹۲). این تحلیل‌های مورفومتریک برای یافتن ارتباط بین ویژگی‌ها و ساختار دولین به کار می‌روند (تلبیس و همکاران، ۲۰۱۶) و امکان ایجاد فرضیه‌هایی دربارهٔ تکامل و پویایی سیستم‌های کارستی را فراهم می‌کنند. به‌تازگی،

تکنیک‌های جدیدی مانند مدل‌های رقومی زمین، داده‌های اسکن لیزری هوایی، روش‌های سنجش از دور و داده‌های ارتفاعی رقومی استخراج‌شده از SRTM، ASTER و LIDAR برای بررسی مورفومتری دولین استفاده شده‌اند (اوزتورک و همکاران، ۲۰۱۸). در این پژوهش به‌منظور درک و توصیف دقیق ویژگی‌های مورفومتری دولین‌ها و توپوگرافی آنها، دو پهنه از تاقدیس انتخاب و با استفاده از پهپاد، تصاویر هوایی از آنها تهیه شد و سپس بر اساس آن DEM ۱۳ سانتی‌متری از دو پهنهٔ مذکور تهیه شد. بر اساس DEM مذکور و همچنین پژوهش‌های میدانی، موقعیت دولین‌ها تعیین شد (شکل ۲)؛ بنابراین برای هر شکل، یک مجموعه داده شامل مساحت، عمق، نسبت کشیدگی و زاویهٔ جهت‌گیری دولین‌ها محاسبه شد. محورهای بلند و کوتاه دولین‌ها، عمق و مساحت آنها با استفاده از برنامهٔ Arc GIS 10.8 به دست آمد و نسبت‌های کشیدگی (R_E) نیز که نسبت بین محورهای بلند و کوتاه دولین‌هاست (بوندسان و همکاران، ۱۹۹۲) و شاخصی از شکل مسطح است (ویلیامز، ۱۹۷۲) محاسبه شد. افزون‌بر این، زاویه‌های جهت‌گیری دولین‌ها به‌عنوان آزیموت خطی که دو نقطهٔ دور (محور طولی) را در داخل دولین به هم متصل می‌کند در برنامهٔ Rock Works 17 به دست آمد.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی تاقدیس نواکوه، موقعیت دولین‌ها، گسل‌ها و سازندهای زمین‌شناسی منطقهٔ پژوهش



شکل ۲. نمونه‌ای از تصویر تهیه‌شده با پهپاد که در آن بعضی از خطواره‌ها، دولین‌ها و جهت شیب توپوگرافی مشخص شده است.

یافته‌های پژوهش

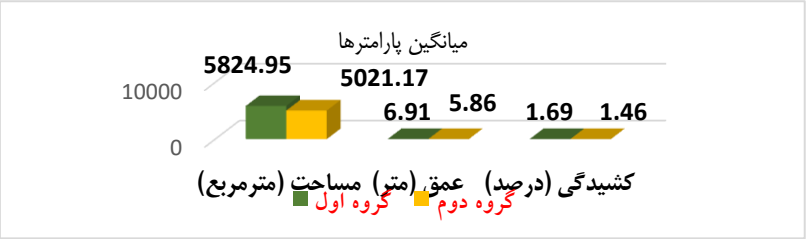
مشخصات مورفومتری دولین‌ها

داده‌های مربوط به ۳۶ دولین نمونه‌برداری‌شده از تاقدیس نواکوه، شامل پارامترهای کشیدگی، عمق، مساحت و جهت محور، در جدول ۱ ارائه شده است. این داده‌ها مبنای تحلیل‌های آماری و بررسی الگوهای پراکنش و کشیدگی دولین‌ها قرار گرفته‌اند. افزون‌بر این، تحلیل جهت محور دولین‌ها امکان ارزیابی ارتباط ساختاری آنها را با روند تاقدیس و سیستم‌های شکستگی منطقه فراهم می‌آورد. همچنین رزدیاگرامِ جهت محور (کشیدگی) نشان‌دهندهٔ تمرکز غالب محورها در دو روند اصلی ساختاری است (شکل ۴).

جدول ۱. مشخصات مورفومتری و جهت محور ۳۶ دولین تحت بررسی

نمونه‌ها	نسبت کشیدگی	عمق (متر)	مساحت (متر مربع)	جهت محور
۱	۱/۴۷	۸/۳	۵۲۸۴/۰۲	شمال غرب– جنوب شرق
۲	۱/۱۶	۹/۳	۲۵۰۵/۹۴	شمالی– جنوبی
۳	۱/۸۷	۲/۴	۱۷۷۲/۹۴	شمال شرق– جنوب غرب
۴	۲/۲۷	۷/۵	۸۲۱۶/۱۵	شمال غرب– جنوب شرق
۵	۱/۲۱	۱/۸	۸۰۹/۴۸	شمال غرب– جنوب شرق
۶	۱/۶۱	۷/۵	۵۵۴۲/۰۰	شمال غرب– جنوب شرق
۷	۱/۴۶	۴/۲	۷۷۹/۶۰	شمال شرق– جنوب غرب
۸	۲/۱۱	۱/۲	۵۴۵/۵۵	شمال شرق– جنوب غرب
۹	۱/۷۹	۱/۵	۴۲۵/۵۱	شمال شرق– جنوب غرب
۱۰	۲/۰۰	۵/۴	۷۱۰/۷۳	شمال شرق– جنوب غرب
۱۱	۲/۵۷	۳/۱	۶۵۲/۵۷	شمال شرق– جنوب غرب
۱۲	۱/۳۵	۴/۵	۲۱۳۷/۷۹	شمالی– جنوبی
۱۳	۲/۵۶	۴/۹	۱۴۷۱/۵۴	شمال شرق– جنوب غرب
۱۴	۱/۵۸	۳/۳	۱۶۳/۸۷	شمال غرب– جنوب شرق
۱۵	۱/۷۹	۵/۱	۱۴۶۱/۷۶	شمال شرق– جنوب غرب
۱۶	۱/۴۳	۳/۶	۳۷۸/۵۶	شمال غرب– جنوب شرق
۱۷	۱/۴۰	۲/۴	۲۸۹/۷۳	شمال شرق– جنوب غرب
۱۸	۱/۲۴	۶/۳	۱۷۲۰/۷۳	شمال غرب– جنوب شرق
۱۹	۱/۴۹	۷/۶	۱۱۰/۴۰	شمال غرب– جنوب شرق
۲۰	۱/۱۸	۴/۵	۸۵۰/۷۸	شمال شرق– جنوب غرب
۲۱	۱/۴۹	۱۹/۲	۱۲۳۳۹/۷۶	شمال شرق– جنوب غرب
۲۲	۱/۷۰	۱۳/۸	۱۶۰۲۵/۷۱	شمال شرق– جنوب غرب
۲۳	۱/۴۵	۱/۲	۵۴۹/۸۲	شمال شرق– جنوب غرب
۲۴	۱/۴۲	۳/۵	۲۹۲۰/۲۰	شمال شرق– جنوب غرب
۲۵	۱/۵۸	۲۰/۷	۲۹۳۹۲/۶۸	شمال شرق– جنوب غرب
۲۶	۱/۳۸	۹/۱	۱۳۸۶۵/۳۴	شمال شرق– جنوب غرب
۲۷	۱/۳۹	۵/۷	۲۷۸۰/۹۳	شمال غرب– جنوب شرق
۲۸	۱/۳۲	۹/۷	۸۵۰۱/۷۷	شمال غرب– جنوب شرق
۲۹	۱/۲۰	۶/۱	۲۱۴۲۶/۶۰	شمال غرب– جنوب شرق
۳۰	۱/۱۴	۴/۷	۶۷۵۱/۴۴	شمالی– جنوبی
۳۱	۱/۲۶	۱۱/۸	۱۰۰۹۵/۳۰	شمال شرق– جنوب غرب
۳۲	۱/۷۰	۹/۲	۳۴۹۳/۵۰	شمال شرق– جنوب غرب
۳۳	۱/۶۰	۳/۱	۱۶۲۱/۷۴	غربی– شرقی
۳۴	۱/۵۳	۲/۷	۲۵۲۵/۸۱	شمال غرب– جنوب شرق
۳۵	۱/۳۷	۸/۱	۱۳۰۳۰/۹۶	شمال شرق– جنوب غرب
۳۶	۱/۲۶	۶/۱	۷۸۱۴/۸۴	شمال غرب– جنوب شرق

با توجه به داده‌های جدول ۱، دولین‌های نمونه‌برداری‌شده بر اساس جهت‌گیری محور به دو گروه اصلی تقسیم شدند: گروه نخست با محور شمال شرق- جنوب غرب که حدود ۵۲/۷ درصد از کل نمونه‌ها را شامل می‌شود و گروه دوم با محور شمال‌غرب- جنوب شرق که حدود ۳۶/۱ درصد دولین‌ها را در بر می‌گیرد. میانگین پارامترهای مساحت، عمق و کشیدگی این دو گروه به‌شرح زیر است (شکل ۳).



شکل ۳. نمودار میانگین پارامترهای مورفومتری دولین‌ها در گروه اول (با محور شمال شرق- جنوب غرب) و دوم (با جهت شمال غرب- جنوب شرق)

نتایج نشان می‌دهد که دولین‌های با روند شمال شرق- جنوب غرب، از نظر میانگین مساحت (۵۸۲۴/۹۵ مترمربع)، عمق (۶/۹۱ متر) و ضریب کشیدگی (۱/۶۹)، مقادیری بیشتری نسبت به گروه دوم (با روند شمال‌غرب- جنوب‌شرق) دارند. این تحلیل بیانگر آن است که دولین‌های کارستی با جهت‌گیری شمال‌شرق- جنوب‌غرب، به‌دلیل همراستایی با خطواره‌های شمال شرقی- جنوب غربی و همچنین با شیب توپوگرافی، دارای ابعاد و کشیدگی بیشتری هستند که نشان‌دهندهٔ نقش مؤثر شیب توپوگرافی در توسعهٔ مساحت، عمق و کشیدگی این دولین‌هاست.

رزدیاگرام خطواره‌های محدودهٔ تحقیق

بر اساس تصاویر پهپاد، جهت‌گیری غالب خطواره‌های مناطق تحت بررسی دارای زوایای ۴۵ و ۲۲۵ درجه (شمال شرق- جنوب غرب) است (شکل ۵ الف). افزون‌بر آن، روند تعداد زیادی از خطواره‌ها دارای جهت شمال غرب- جنوب شرق است که موازی با محور تاقدیس است.

رزدیاگرام جهت کشیدگی محور دولین‌ها

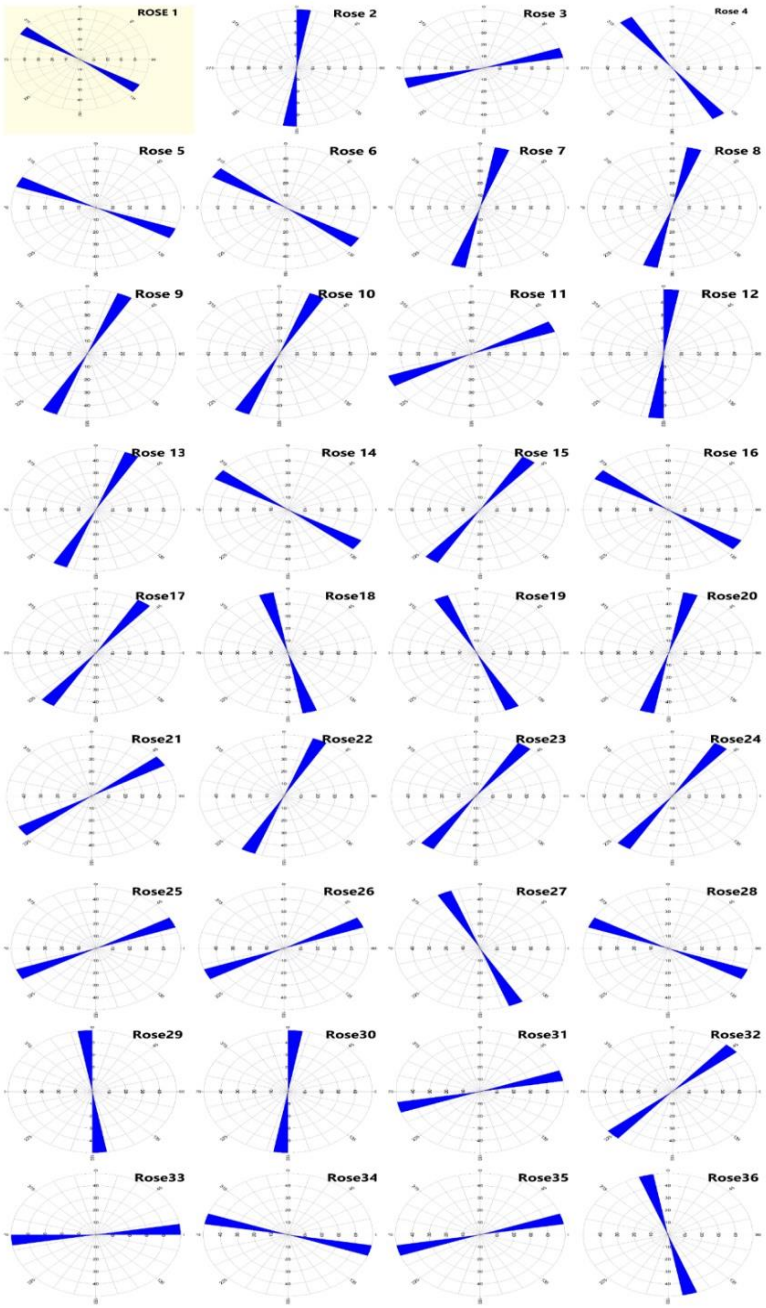
رزدیاگرام حاصل، نشان‌دهندهٔ توزیع داده‌ها در چند راستای مشخص و تشکیل یک الگوی چندوجهی است. بیشترین فراوانی جهت‌ها در زوایای ۳۰ تا ۶۰ درجه و جهت مقابل آن، یعنی ۲۱۰ تا ۲۴۰ درجه قرار دارد که نشان‌دهندهٔ راستای غالب شمال شرقی- جنوب غربی برای کشیدگی دولین‌هاست. همچنین در کنار جهت غالب، جهت‌های فرعی دیگری نیز در محدودهٔ ۱۲۰ تا ۱۵۰ درجه و ۳۰۰ تا ۳۳۰ درجه دیده می‌شود (شکل ۵ ب).

نمودار رزدیاگرام شیب توپوگرافی عمومی اطراف دولین‌ها

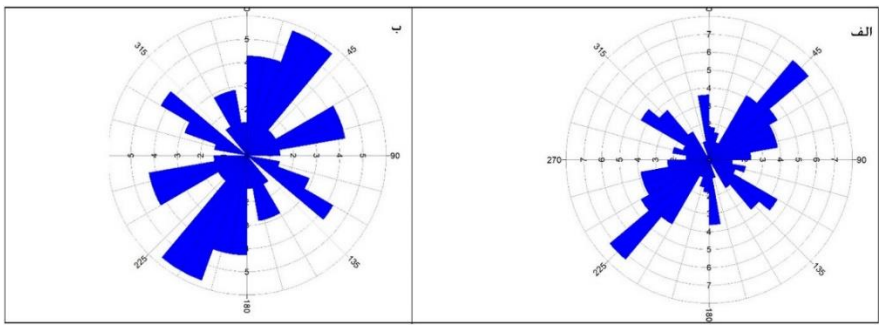
شیب توپوگرافی دامنه‌های تاقدیس نواکوه اغلب موازی با شیب لایه‌های زمین‌شناسی آن است. به‌طور کلی، از جنوب شرق تاقدیس به‌طرف شمال غرب تاقدیس بر شیب توپوگرافی افزوده می‌شود. میانگین شیب دامنه‌های شمال شرق و جنوب غرب به ترتیب ۲۲/۲۱ و ۲۱/۷۱ درصد است. نتایج مربوط به شیب توپوگرافی محدودهٔ اطراف دولین‌ها نشان می‌دهد که جهت غالب شیب توپوگرافی اطراف دولین‌ها، جنوب غرب به شمال شرق است (شکل ۶ الف).

رزدیاگرام شیب توپوگرافی عمومی اطراف دولین‌های بخش مرکزی تاقدیس

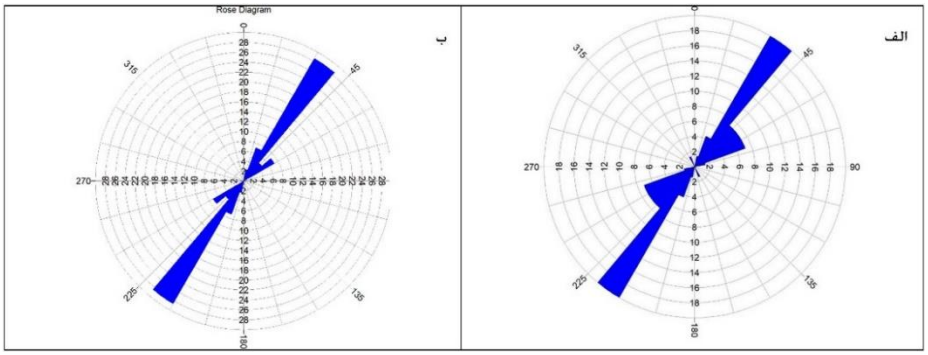
شکل ۶ ب نشان می‌دهد که جهت‌گیری غالب شیب‌های توپوگرافی در اطراف دولین‌های بخش مرکزی تاقدیس نواکوه، در راستای جنوب غرب- شمال‌شرق (زوایای ۴۵ و ۲۲۵ درجه) است. این جهت‌گیری با شیب‌های پهلوی شمال شرقی تاقدیس که عمود بر محور تاقدیس است مطابقت دارد.



شکل ٤. رزدیاگرام جهت محور ٣٦ دولین بررسی‌شده



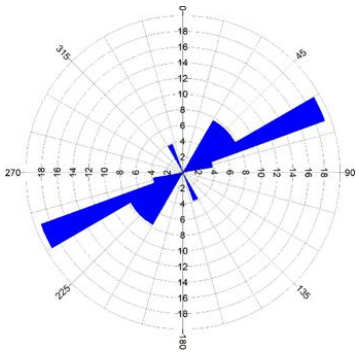
شکل ۵. الف) رزدیاگرام خطواره‌های محدودهٔ تحت بررسی (تهیه‌شده از تصاویر پهپاد)؛ ب) رزدیاگرام جهت کشیدگی محور دولین‌های منطقهٔ پژوهش



شکل ٦. الف) رزدیاگرام شیب توپوگرافی عمومی اطراف دولین‌های منطقهٔ نمونه‌برداری؛ ب) رزدیاگرام شیب توپوگرافی عمومی اطراف دولین‌های بخش مرکزی تاقدیس

رزدیاگرام جهت شیب توپوگرافی عمومی اطراف دولین‌های بخش فرود محوری تاقدیس

تاقدیس نواکوه دارای رشد جانبی به‌سمت جنوب شرق است و بنابراین فرود محوری جنوب شرق این تاقدیس از نظر سنی جوان‌تر بوده و شیب توپوگرافی آن ملایم‌تر است. در منطقهٔ فرودمحوری تاقدیس، شیب غالب توپوگرافی با شیب‌های پهلویی تاقدیس (در جهت جنوب غرب به شمال شرق) همسو است؛ با این‌حال، سازوکار فرودمحوری به‌سمت جنوب شرق، سبب ایجاد شیب‌های توپوگرافی فرعی با فراوانی کمتر در راستای فرود محوری شده است (شکل ۷).



شکل ۷. رزدیاگرام شیب توپوگرافی عمومی اطراف دولین‌های بخش فرود محوری تاقدیس

بحث

نتایج حاصل از تحلیل مورفومتری ۳۶ دولین در تاقدیس نواکوه نشان می‌دهد که کشیدگی غالب این لندفرم در راستای شمال شرق– جنوب غرب متمرکز است. این الگو نشان‌دهندهٔ وجود روند فضایی مشخصی در توزیع دولین‌هاست که احتمال تصادفی بودن آن اندک است. این جهت هم با روند اصلی خطواره‌های منطقه همخوانی دارد و هم با جهت شیب توپوگرافی عمومی اطراف دولین‌ها تطابق چشمگیری نشان می‌دهد. این انطباق بیانگر آن است که شکل‌گیری و تکامل این دولین‌ها تحت کنترل مستقیم ساختارهای زمین‌ساختی قرار داشته است. این نتیجه با یافته‌های والتهم و همکاران (۲۰۰۵) و فورد و ویلیامز (۲۰۰۷) همخوانی دارد. در منطقهٔ نواکوه، افزون‌بر کنترل‌های ساختاری، همراستایی جهت دولین‌ها با شیب توپوگرافی نیز به‌طور مشخص مشاهده شد که بیانگر شرایط محلی خاص در تاقدیس نواکوه است. در تاقدیس‌های زاگرس دو دسته گسل کششی و فشاری ایجاد شده‌اند. گسل‌های موازی با محور تاقدیس و عمود بر محور تاقدیس گسل‌های کششی هستند، درحالی که گسل‌ها یا شکستگی‌های مورب (اریب) فشاری هستند (مباشر و بابایی، ۲۰۰۸) (شکل ۸). بر اساس رویکرد ژئومورفولوژی تکتونیک، گسل‌ها و شکستگی‌ها موجب نفوذپذیری آب و جریان‌ها در تودهٔ سنگ و هدایت آن می‌شوند و شرایط را برای تشدید انحلال و توسعهٔ فضاهای زیرسطحی فراهم می‌کنند (وایت، ۱۹۸۸؛ پالمر، ۱۹۹۱). در چنین موقعیتی، دولین‌ها هم‌جهت با روند ساختارهای غالب توسعه می‌یابند و جهت کشیدگی آنها بازتابی از الگوی شکستگی حاکم بر منطقه است (آلِمداغ، ۲۰۲۴).

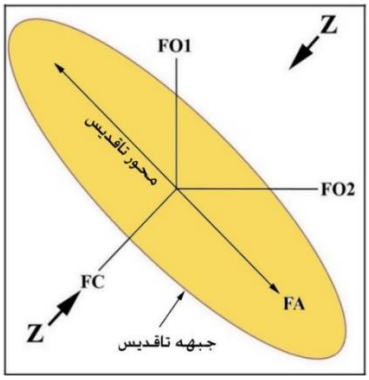
در منطقهٔ پژوهش، روند شمال شرق– جنوب غرب دولین‌ها افزون‌بر تطابق با رزدیاگرام خطواره‌ها، با جهت شیب توپوگرافی

عمومی نیز همراستاست. این همراستایی نشان می‌دهد که دو عامل مستقل از جمله ساختار زمین‌ساختی و شیب توپوگرافی دامنه به‌طور هم‌افزا در کنترل توسعهٔ دولین‌ها نقش داشته‌اند. همگرایی صفحهٔ عربستان و اوراسیا که عامل اصلی شکل‌گیری کمربند چین‌خوردهٔ زاگرس بوده است (بحرودی و کویی، ۲۰۰۴)، با ایجاد زون‌های خردشدگی و گسل‌های معکوس، بستر مناسبی برای تشدید انحلال کارستی فراهم کرده است. چنین الگویی در دیگر نواحی فعال تکتونیکی نیز گزارش شده است و نشان‌دهندهٔ نقش تعیین‌کنندهٔ ساختار تکتونیکی در تشکیل اشکال کارستی است (دو وال و همکاران، ۲۰۰۹؛ ورس، ۲۰۱۷).

تحلیل مقایسه‌ای دو گروه دولین در منطقهٔ پژوهش بیانگر آن است که دولین‌های کشیده‌شده در راستای شمال شرق– جنوب غرب، به‌طور میانگین مساحت، عمق و ضریب کشیدگی بیشتری نسبت به دولین‌های با روند شمال غرب– جنوب شرق دارند. این تفاوت را می‌توان ناشی از همراستایی این گروه با شیب توپوگرافی غالب منطقه دانست؛ به‌گونه‌ای که شیب دامنه‌ها با افزایش تمرکز رواناب و نفوذپذیری عمقی، شدت انحلال را در امتداد شکستگی‌های همراستا افزایش داده است. با این‌حال، این اختلاف را نمی‌توان تنها به شیب توپوگرافی نسبت داد؛ زیرا تراکم و آرایش شکستگی‌ها و میزان خردشدگی سنگ بستر نیز می‌تواند در توسعهٔ بیشتر این دولین‌ها مؤثر باشد. بنابراین به نظر می‌رسد تفاوت مورفومتری مشاهده‌شده، حاصل برهم‌کنش عوامل ساختاری و ژئومورفولوژیکی باشد نه تأثیر یک عامل منفرد. با اینکه ارتباط میان شیب توپوگرافی و توسعهٔ دولین‌ها در پژوهش پلان (۲۰۰۵) نیز گزارش شده است، در پژوهش حاضر، تأثیر ساختارهای تکتونیکی نسبت به شیب مهم‌تر به نظر می‌رسد. در منطقهٔ پژوهش، کنترل ساختاری افزون‌بر جهت، بر ابعاد مورفومتری دولین‌ها نیز اثرگذار است. وجود روندهای فرعی در رزدیاگرام‌ها، به‌ویژه در بخش فرود محوری تاقدیس، بیانگر تأثیر شکستگی‌های ثانویه و گسل‌های عرضی بر مورفولوژی موضعی منطقه است. این الگوی چندجهتی نشان می‌دهد که شبکهٔ شکستگی‌ها هم در مقیاس منطقه‌ای و هم در مقیاس محلی، اثر هدایت‌کننده در توزیع و کشیدگی دولین‌ها دارد. وجود گسل‌های عرضی در زاگرس که به‌عنوان ساختارهای تنظیم‌کننده عمل می‌کنند (بربریان، ۱۹۹۵؛ علوی، ۲۰۰۷)، می‌تواند تبیین‌کنندهٔ این جهات فرعی باشد. این نتایج با مفهوم «دولین‌های کنترل‌شده توسط گسل» همخوانی دارد؛ مفهومی که بر تمرکز تنش و افزایش نفوذپذیری در زون‌های شکستگی به‌عنوان عامل اصلی شکل‌گیری دولین‌ها تأکید می‌کند (سوسترسیچ، ۲۰۰۲).

از دیدگاه ژئومورفولوژی تکاملی، تمرکز دولین‌های عمیق‌تر و کشیده‌تر در راستا و هم‌جهت با شیب و خطواره‌های غالب، می‌تواند نشان‌دهندهٔ مرحلهٔ پیشرفته‌تری از تحول کارست در این بخش‌ها باشد. در مقابل، دولین‌هایی که کمتر با شیب توپوگرافی غالب همخوانی دارند، احتمالاً تحت تأثیر ساختارهای ثانویه شکل گرفته‌اند و شدت انحلال در آنها کمتر بوده است. این تفاوت‌ها بازتابی از ناهمگنی در شدت خردشدگی سنگ بستر در تاقدیس است (کلِر و پینتر، ۲۰۰۲).

در مجموع، نتایج نشان می‌دهد که الگوی فضایی و مورفومتری دولین‌های نواکوه حاصل تعامل سه عامل اصلی است: ساختارهای تکتونیکی، شیب توپوگرافی و لیتولوژی کربناته. با این‌حال، در میان این عوامل، کنترل‌های تکتونیکی، در تعیین جهت کشیدگی و ابعاد دولین‌ها اثر بیشتری دارند.



شکل ۸. نمایش شماتیک گسل‌ها و شکستگی‌های مربوط به تاقدیس‌های زاگرس: (Z): جهت اصلی کوتاه‌شدگی و فشار ساختمانی؛ (FA): گسل‌های موازی با محور تاقدیس (کششی)؛ (FC): عمود بر محور تاقدیس (کششی)؛ (FO1 و FO2): گسل‌های مورب (فشاری) (مباشر و بابایی، ۲۰۰۸).

نتیجه‌گیری

تحلیل ساختاری و مورفومتری ۳۶ دولین در تاقدیس نواکوه نشان داد که جهت‌گیری و ابعاد این اشکال کارستی به‌طور معناداری تحت تأثیر ساختارهای تکتونیکی و شیب توپوگرافی قرار دارد. تمرکز کشیدگی محور دولین‌ها در راستای شمال‌شرق- جنوب‌غرب که با روند خطواره‌ها و جهت شیب عمومی همخوانی دارد، بیانگر تأثیر شکستگی‌ها و گسل‌ها و همچنین جهت شیب توپوگرافی بر تشکیل و فرم آنهاست. این یافته با چارچوب نظری پژوهش‌های پیشین در زمینهٔ کنترل ساختاری کارست سازگار است. افزون‌بر این، نتایج آماری نشان داد که دولین‌های همراستا با شیب توپوگرافی غالب، میانگین مساحت، عمق و کشیدگی بیشتری دارند. این مطلب اثر تقویت‌کنندهٔ شیب توپوگرافی را در کنار ساختارهای زمین‌شناسی برجسته می‌کند؛ بنابراین در مناطق کارستی فعال از نظر تکتونیکی، تحلیل همزمان پارامترهای مورفومتری، شبکهٔ شکستگی‌ها و شیب توپوگرافی برای درک فرایندهای تکاملی ضروری است. در نهایت، دولین‌های تاقدیس نواکوه را می‌توان هم به‌عنوان اشکال انحلالی سطحی و هم لندفرم‌های حساس به ساختار شکستگی‌های منطقه در نظر گرفت. این رویکرد می‌تواند در ارزیابی مخاطرات فرونشست، برنامه‌ریزی کاربری زمین و مدیریت پایدار محیط‌های کارستی زاگرس کاربرد عملی داشته باشد و مبنایی برای پژوهش‌های مشابه در بقیهٔ مناطق کارستی فعال فراهم آورد.

ملاحظات اخلاقی

نویسندگان مقاله اصول اخلاقی را در اجرا و انتشار این پژوهش علمی رعایت کرده‌اند.

مشارکت نویسندگان

تمامی نویسندگان مقاله در همهٔ مراحل نگارش، تجزیه‌وتحلیل و نگارش مقاله مشارکت داشته‌اند.

حامی مالی

این پژوهش حامی مالی ندارد.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله هیچ‌گونه تضاد منافعی ندارد.

همانند جویی

براساس استعلام از ایرانداک، نتیجهٔ همانندجویی مقاله ۵ درصد است.

References

[1] Alavi, M. (2007). Structures of the Zagros orogenic belt. *Journal of Earth Sciences*, 18, 1–21.

[2] Alemdağ, H., Köroğlu, F., Aydın, Z. Ö., Şeren, A., Babacan, A. E., & Ersoy, A. F. (2024). Deciphering of karst geomorphology and sinkhole (doline) structures using multiple geophysical and geological methods (Trabzon, NE Türkiye). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, *83*(7), 286.

[3] Azhdari, A., Shaverdi, T. (2005). 1:100000 geologic map of Kerend (sheet 5258). Geological Survey and Mineral Exploration of Iran.

[4] Bahrami, S. (2012). Morphotectonic evolution of triangular facets and wine-glass valleys in the Noakoh anticline, Zagros, Iran: Implications for active tectonics. *Geomorphology*, *159,160*, 37-49.

[5] Bahroudi, A., & Koyi, H. (2004). Tectono-sedimentary framework of the Zagros. *Journal of Petroleum Geology*, *27*, 257–271.

[6] Bakalowicz, M. (2005). Karst groundwater: a challenge for new resources. *Hydrogeology Journal, 13*, 148–160.

[7] Berberian, M. (1995). Master blind thrust faults of the Zagros. *Geophysical Journal International, 123*, 805–826.

[8] Bondesan, A., Meneghel, M., & Sauro, U. (1992). Morphometric analysis of dolines. *International Journal of Speleology*, *21*, 1-55.

[9] Concha-Dimas, A., González-Martín, A., & Bach-Plaza, J. (2026). Updated doline inventory and revision of geomorphological aspects that influence karst development at the Garraf Mountain Range, Catalonia, *Spain. Geological Acta*, *24*, 1-21.

[10] Day, M.J. (2010). Human interaction with karst landscapes. *Acta Carsologica*, 39, 11–28.

[11] De Waele, J., Plan, L., & Audra, P. (2009). Recent developments in surface and subsurface karst geomorphology: An introduction. *Geomorphology*, *106*, 1–8.

[12] Denizman, C. (2003). Morphometric and spatial distribution parameters of karstic depressions, Lower Suwannee River Basin, Florida. *Journal of Cave and Karst Studies, 65*:29–35.

[13] Faivre, S. & Reiffsteck, P. (2002). From doline distribution to tectonic movements. Example of the Velebit mountain range, Croatia.- *Acta Carsologica*, *31*(3), 139–154.

[14] Filin, S., & Avni, Y., (2012). Morphological indicators of tectonics. *Geomorphology*, 169–170, 1–13.

[15] Ford, D., & Williams, P. (2007). *Karst hydrogeology and geomorphology*. John Wiley & Sons.

[16] Ghadimi, M., Keynezhad, A., & Narouei, R. (2024). The effect of karstification on water resource hazards management based on physicochemical factors of water (case study: Valiabad – Hezarcham), Iran. *Environmental Hazards Management*, *10*(4), 335-354. (in Persian). DOI: http//doi.org/10.22059/jhsci.2024.373119.819.

[17] Keller, E.A., & Pinter, N. (2002). *Active Tectonics*. Prentice Hall.

[18] Mobasher, K., & Babaie, H.A. (2008). Kinematic significance of fold- and fault-related fracture systems in the Zagros mountains, southern Iran. *Tectonophysics, 451*, 156–169.

[19] Öztürk, M.Z., Şener, M.F., Şener, M., & Şimşek, M. (2018). Structural controls on distribution of dolines on Mount Anamas (Taurus Mountains, Turkey). *Geomorphology, 317*, 107–116.

[20] Palmer, A.N. (1991). Origin and morphology of limestone caves. *Geological Society of America Bulletin, 103*, 1–21.

[21] Plan, L., & Decker, K. (2006). Quantitative karst morphology of the Hoch schwab plateau, Eastern Alps, Austria. Zeitschrift für Geomorpholgie Suppl, *147*, 29–54.

[22] Şener, M. F., Şimşek, M., Utlu, M., Öztürk, M. Z., & Sözbilir, H. (2023). Morphotectonic development of surface karst in Western Taurus (Türkiye). Carbonates and Evaporites, 38(4), 78.

[23] Siska, P.P., Goovaerts, P., & Hung, I. K. (2016). Evaluating susceptibility of karst dolines (sinkholes) for collapse in Sango, Tennessee, USA. *Progress in physical geography*, *40*(4), 579-597.

[24] Šušteršič, F., (2002). Collapse dolines and fault zones. *Acta Carsologica, 31*, 35–47.

[25] Telbisz, T., Látos, T., Deák, M., Székely, B., Koma, Z. & T. Standovár, (2016). The advantage of lidar digital terrain models in doline morphometry compared to topographic map based datasets – Aggtelek karst (Hungary) as an example. *Acta Carsologica*, *45*, 1,

[26] Veress, M. (2017). Solution DOLINE development on GLACIOKARST in alpine and Dinaric areas. *Earth Science Reviews, 173*, 31–48.

[27] Waltham, T., Bell, F., & Culshaw, M., (2005). Sinkholes and Subsidence: Karst and Cavernous Rocks in Engineering and Construction. *Springer*.

[28] White, W.B., (1988). Geomorphology and Hydrology of Karst Terrains. *Oxford University Press.*

[29] Williams, P. (1972). Morphometric analysis of polygonal karst in New Guinea. *Geological Society of America Bulletin, 83*(3), 761–796.