

Research Paper



Identification, Density and Physiographic Characteristics of Dolines in Different Altitude Classes (Zagros Karst Areas)



Gholam Hassan Jafari^{1*}, Frozan Naseri²



This paper is an open access and licenced under the CC BY NC licence.



DOI: 10.22034/GP.2023.14557

Reference to this article: jafari, G; Naseri, F. (2023). Identification, density and physio-graphic characteristics of Dolans in different altitude classes (Zagros karst areas). *Geography and Planning*, 27(84), 25-34.

Keywords

Dolin, Karst, Morphometry, Zagros heights, Compaction coefficient, Circular ratio

ABSTRACT

Doline is one of the most characteristic and basic surface and morphological forms of karst, as a result of the chemical effect of water on limestone that occurs in different shapes and sizes. Dolines differ in morphological characteristics. In the present study, after identifying the valleys in the karst areas of the Zagros, their dispersion and change of morphological characteristics such as length, width, area and depth in relation to altitude and climate, citing documentary sources such as geological maps 1: 100000, digital elevation model layer with strength 12.5 m resolution, satellite imagery, 1: 50,000 topographic maps, and 49-year-old Esfzari temperature and precipitation databases were analyzed in Arc GIS, Mapper Global, and Excel software. The study of different parameters of Zagros valleys in different altitudes and climates indicates that their shape and depth have been affected by Quaternary climate change. At lower altitudes, where water is more involved in dissolution than low temperatures, the dolines are nearly circular in shape and stretch at higher altitudes and the lower the temperature and the greater the likelihood of the doline turning into a glacial-doline circus, the more elongated the doline becomes. The compression coefficient of the dolines also indicates that their elongation and length increase with increasing height; in this way, at an altitude distance of 500-1000 meters, the ratio of circles for every 1000 meters increase in height increases by 0.8 and the compression coefficient decreases by 0.9. At an altitude distance of 1000-2000 meters, with each increase of 100 meters, the ratio of circles is 0.44 and the compression coefficient is 0.1. In the 3700-3000 m floor, the circular ratio decreases by 1.2 with each elevation of 1000 m, and the compaction increases by 1.3. By examining glacial circuses in the abstract and determining permanent snowfall, reliable boundaries for Quaternary climate change can be estimated; however, due to the harmonization of processes in the creation of karst landforms, the boundary of karst-fiction system change can't be estimated through the characteristics of karst landforms.

Received: 2022/01/11

Accepted: 2022/04/27

Available: 2023/09/16

* Corresponding Author: Gholam Hassan Jafari

E-mail: jafarihas@znu.ac.ir

1. Associate professor, Geography Department, Faculty of Humanities, University of Zanjan, Zanjan, Iran.

2. Ms.C in Hydrogeomorphology, Geography Department, Faculty of Humanities, University of Zanjan, Zanjan & PHD student, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University of Tehran.

Extended Abstract

Introduction

Karst is the result of various processes of limestone areas, in different climatic, geological and hydrological conditions. The karstification is in fact the dissolution in carbonate rocks that is affected by a variety of factors, and solubility is a process that occurs with the flow of water into rocks (from stone or inside it) according to physical and chemical characteristics (water and stone). During this process, the liquid soluble minerals are shipped in water by solubility, creating a free space in the rock. The most important carbonate rock is limestone (Waltam and Fokes, 2005). The karstic phenomena result from the interference of the internal morphodynamic (geological and lithological structure) and exterior (climate, altitude, vegetation, and time) (Nojavan et al, 2017: 54). Dolines are one of the most significant and fundamental forms of superficial and morphological forms of karst, as a result of the chemical effects of water on limestone racks. Dolines represent the tectonic activity as well as the activation of the process of dissolution and erosion in the karstic environments (Rezaei Moghadam and Ghadri, 2011). Doline is one of the most significant and fundamental forms of superficial and morphological karst, resulting in the chemical effects of water on limestone stones, which occur in different shapes and sizes.

Methodology

Dolines are different in terms of morphological features such as length, width, area, depth, and height. Accordingly, in order to investigate the changes in such features in relation to the height of the doline highlands of Zagros, based on documents such as geological maps 1: 100000, a digital model of elevation model with a power of 12.5 meters, satellite imagery and topographic maps of 1: 50000 in Arc GIS software and Global Mapper were measured and the morphometric characteristics were measured and Excel software was analyzed. Doline physiographic parameters, such as compression coefficient and circular ratio were estimated, and was studied in different altitudes.

Discussions

Doline morphometric characteristics were studied at a height of 200 m and in low altitudes (500-1300) and high altitudes (1900-3700). The study of relationships indicates that with increasing altitude, the compaction density of dolines is lower and their circular ratio is higher; the higher the altitude, the dolines form a circle close to the circle and the karstification conditions at higher altitudes create Devils whose shape is closer to the circle. The correlation between the height with compression and the circular ratio of dolines in the altitudes of 1900- 3700 is direct and very high. Changes in these coefficients vary at different heights. With this in mind, the Devlin distribution was studied in four levels of elevation. At an altitude of 1000-500, the ratio of circle per 1000 meters increase in height is increased by 0.8 and the compression coefficient decreases 0.9. At an altitude of 1000-2000 with an increase of 100 meters, the circular ratio is 0.44 and the compression coefficient is 0.1. On the 3700-3000-meter class, the circular ratio increases by increasing the height of each 1000 meters, by 1.2 and compression by 1.3. Altogether, up to 3000 meters high, the compression coefficient decreased and increased from that height to the next. The dolines circular ratio is higher at elevations of less than 1000 meters, which is closer to the altitude and doline takes a more circular shape. The result of both the circular ratio and the compression coefficient indicates that the circus-doline is much larger than the other dolines in the Zagros.

Conclusion

Investigating different parameters of Zagros dolines in different altitudes indicates that their shape and depth are influenced by quaternary climate changes. At lower altitudes, where water plays a greater role in dissolution than low temperatures, the dolines have a shape close to the circle and they are pulled up in higher regions, and the lower the temperature and the probability of converting doline to the circus-doline, doline takes on a larger shape. The doline compression coefficient indicates that their elongation and length increase with increasing height. Permanent snowlineing is done abstractly and abstractly. If the analysis of karstic landforms is necessary, processes must be considered in the same way and it is not possible to use mathematical logic to change the karstification boundaries during quaternary.

Key words: Doline, Karst, Morphometry, Elevation, Zagros, Compression coefficient, Circular ratio.

References

- Baryakh, A. A., & Fedoseev, A. K. 2011. Sinkhole formation mechanism. *Journal of Mining Science*, 47(4), 404-412.
- Gomez, M., Liedl, R. Stefan. C. 2019. A New GIS-Based Model for Karst Dolines Mapping Using LiDAR; Application of a Multidepth Threshold Approach in the Yucatan Karst, Mexico. *Remote sensing journal*.10. 3390.pp 1-14.
- Gregorič, A. C. (2021). Typical Doline and Surface Landforms of Kras (Slovenia): Karst Landscape Features and Possibilities for Their Conservation. *Geoheritage*, 13(2), 1-9.
- Hyland, S. E. 2005. Analysis of sinkhole susceptibility and karst distribution in the northern Shenandoah Valley, Virginia: implications for low impact development (LID) site suitability models (Doctoral dissertation, Virginia Tech).
- Mihevc, A. 1998. Dolines, Their Morphology and Origin: Case Study: Dolines from the Kras, West Slovenia (the Škocjan Karst). *Comitato Glaciologico Italiano*.
- 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.
- Veress, M. (2020). The Evolution and Development of Solution Dolines with Horizontal Growth and the Processes of Their Floors: A Case Study on the Plate-Shaped Dolines of the Bükk Mountains, Aggtelek Karst and Pádis Plateau. *Earth*, 1(1), 49-74.
- Waltham, A. C. & Fookes, P. G. 2003. Engineering classification of karst ground conditions. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 36(2), 101, 118.





پرویشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

مقاله پژوهشی



شناسایی، تراکم و خصوصیات فیزیوگرافی دولین‌ها در طبقات ارتفاعی مختلف (مناطق کارستی زاگرس)



غلامحسن جعفری^{۱*}، فروزان ناصری^۲



این مقاله به صورت دسترسی باز و با لایسنس CC BY NC کپی‌رایت کاملاً قابل استفاده است.



ارجاع به این مقاله: جعفری، غلام حسن؛ ناصری، فروزان. (۱۴۰۲). شناسایی، تراکم و خصوصیات فیزیوگرافی دولین‌ها در طبقات ارتفاعی مختلف (مناطق کارستی زاگرس). *نشریه علمی جغرافیا و برنامه‌ریزی*، ۲۷ (۸۴)، ۲۵-۳۴.

DOI: 10.22034/GP.2023.14557



چکیده

دولین یکی از شاخص‌ترین و اساسی‌ترین اشکال سطحی و مورفولوژیکی کارست، در نتیجه تأثیر شیمیایی آب بر سنگ‌های آهکی است که در شکل‌ها و اندازه‌های مختلفی به وجود می‌آید. دولین‌ها از لحاظ ویژگی‌های مورفولوژیکی متفاوت هستند. در تحقیق حاضر پس از شناسایی دولین‌ها در مناطق کارستی زاگرس، پراکندگی و تغییر ویژگی‌های مورفولوژیکی آن‌ها مانند طول، عرض، مساحت و عمق در ارتباط با ارتفاع و اقلیم، با استناد به منابع اسنادی همچون نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰، لایه مدل رقمی ارتفاع با قدرت تفکیک ۱۲/۵ متر، تصاویر ماهواره‌ای، نقشه‌های توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰ و پایگاه داده‌های اسفزاری ۴۹ ساله دما و بارش، در نرم‌افزارهای Arc GIS، Global Mapper و Excel مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفت. بررسی پارامترهای مختلف دولین‌های زاگرس در طبقات ارتفاعی و اقلیمی مختلف دال بر این است که شکل و عمق آن‌ها از تغییرات اقلیمی کوتاه‌تری متأثر شده است. در ارتفاعات پایین‌تر که آب بیشتر از دمای کم در انحلال نقش داشته، دولین‌ها شکل نزدیک به دایره دارند و در مناطق مرتفع‌تر کشیده می‌شوند و هرچه دما پایین‌تر و احتمال تبدیل دولین به سیرک یخچالی-دولین بیشتر باشد، دولین شکل کشیده‌تری به خود گرفته است. همچنین ضریب فشردگی دولین‌ها دال بر این است که کشیدگی و طول آن‌ها با افزایش ارتفاع بیشتر می‌شود؛ به این صورت که در فاصله ارتفاعی ۱۰۰۰-۵۰۰ متر، نسبت دایره‌ای به ازای هر ۱۰۰۰ متر افزایش ارتفاع، ۰/۸ بیشتر می‌شود و ضریب فشردگی ۰/۹ کاهش می‌یابد. در فاصله ارتفاعی ۱۰۰۰-۲۰۰۰ متر، با افزایش هر ۱۰۰ متر، نسبت دایره‌ای ۰/۴۴ و ضریب فشردگی ۰/۱ کمتر می‌شود. در طبقه ۳۷۰۰-۳۰۰۰ متر، نسبت دایره‌ای با افزایش هر ۱۰۰۰ متر ارتفاع، ۱/۲ کاهش و فشردگی ۱/۳ افزایش می‌یابد. با بررسی مجرد و انتزاعی سیرک‌های یخچالی و تعیین برف‌مرز دائمی، می‌توان برای تغییرات اقلیمی کوتاه‌تری، مرزهای قابل اعتمادی برآورد نمود؛ ولی به دلیل هم‌سو عمل کردن فرایندها در ایجاد لندفرم‌های کارستی، نمی‌توان مرز تغییر سیستم کارستی-فیکاسیون را از طریق ویژگی‌های لندفرم‌های کارستی برآورد نمود.

کلیدواژه‌ها

دولین، کارست، مورفومتری، ارتفاعات زاگرس، ضریب فشردگی، نسبت دایره‌ای

دریافت شده: ۱۴۰۰/۱۰/۲۱

پذیرفته شده: ۱۴۰۱/۰۲/۰۷

منتشر شده: ۱۴۰۲/۰۶/۲۵

* نویسنده مسئول: غلامحسن جعفری

رایانامه: jafarihas@znu.ac.ir

۱. دانشیار گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران.

۲. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد هیدروژئومورفولوژی دانشگاه زنجان و دانشجوی دکتری دانشگاه شهید بهشتی تهران.

مقدمه

در گستره ایران لندفرم‌های ژئومورفولوژیکی متعددی وجود دارد که علت پیدایش آن‌ها را نمی‌توان با شرایط اقلیمی الان یا فرایندهای کنونی، تحلیل و تفسیر نمود و برای تبیین وجودی آن‌ها به شرایط متفاوتی نسبت به امروز متوسل شد. شرایط متفاوت نیازمند بررسی دقیق تحولات اقلیمی دوره کواترنری است؛ در طی این دوره، اقلیم کره زمین و از جمله ایران چندین بار دستخوش تحولات مهم گشته و در نتیجه در بعضی از مکان‌ها، فرم زمین به شدت، متأثر از این گونه تحولات شده است. مهم‌ترین تغییر ناشی از تحولات اقلیمی کواترنری، پیشروی و پسروی یخچال‌های دائمی، در عرض‌های بالا و ارتفاعات کره زمین بوده است (معمد، ۱۳۸۲: ۶۷). شدت نوسانات اقلیمی این دوران به حدی است که از آن به‌عنوان تغییرات اقلیمی یاد می‌کنند؛ تحولات آب‌وهوایی مذکور منجر به پیدایش دوره‌های یخچالی (یخبندان) و بین یخچالی (غیر یخچالی) گردیده (زمردیان، ۱۳۸۵: ۱۴) و شواهد ژئومورفولوژیکی انکارناپذیری را برجای گذاشته است (بیگل و همکاران، ۱۳۹۳؛ ولایتی، ۱۳۷۴: ۱۲).

کارست حاصل فرایندهای متعدد پهنه‌های آهکی، در شرایط اقلیمی، زمین‌شناسی و هیدرولوژیکی متفاوت است. کارستی-فیکاسیون در واقع همان عمل انحلال در سنگ‌های کربناتی است که از عوامل مختلفی متأثر می‌شود و انحلال‌پذیری، فرایندی است که با جریان یافتن آب در سنگ‌ها (از روی سنگ یا داخل آن) با توجه به خصوصیات فیزیکی و شیمیایی (آب و سنگ) اتفاق می‌افتد. در طول این فرایند کانی‌های انحلال‌پذیر به صورت محلول توسط آب حمل شده و بدین ترتیب فضای خالی در سنگ ایجاد می‌شود. بیشترین کانی‌های انحلال‌پذیر کلسیت، ژپس، انیدریت و هالیت هست که به دلیل گسترش زیاد سنگ‌های کربناتی در سطح زمین توجه فراوانی به آن‌ها می‌شود (قبادی، ۱۳۸۸: ۱۴۳). مهم‌ترین سنگ کربناتی، سنگ آهک است (ولتام و فوکس، ۲۰۰۵). پدیده‌های کارستی حاصل دخالت مشترک مورفودینامیک درونی (ساختار زمین‌شناسی و لیتولوژی) و بیرونی (اقلیم، ارتفاع، پوشش گیاهی و زمان) است (نوجوان و همکاران، ۱۳۹۶: ۱۳). شرایط شکل‌گیری و توسعه کارست، از نظر وایت (۱۹۸۸)، وضعیت مناسب سنگ‌شناسی و ضخامت لایه‌های کربناته، ارتفاع (پستی‌وبلندی)، اقلیم (فشار CO₂، دما و بارش) و تکتونیک (گسل‌ها، درز و شکاف‌ها) است. در واقع درجه توسعه کارست در نواحی مختلف ناشی از تغییر عوامل فوق‌الذکر می‌باشد و هر چه تأثیر این عوامل در ناحیه‌ای فزون‌تر باشد، کارست توسعه بیشتری می‌یابد (علایی‌طالقانی و رحیم‌زاده، ۱۳۸۹). علاوه بر سنگ قابل انحلال، وجود آب و رطوبت، از عوامل دیگر اثرگذار در توسعه کارست هست. فرم‌های کارستی در مناطقی توسعه می‌یابند که میزان رطوبت بالا باشد (نوجوان و همکاران، ۱۳۹۶: ۵۴).

رخنمون‌های سنگ‌های کربناته در حدود پانزده میلیون کیلومتر مربع از نواحی قاره‌ای بدون یخ کره زمین را شامل می‌شود (ویلیامز، ۲۰۰۸: ۱۷).

نواحی کارستی دارای خصوصیات ویژه و اشکال زمین‌ریختی بخصوص در سطح و زیر سطح زمین هستند (مقیمی، ۱۳۹۱: ۸). دولین‌ها یکی از شاخص‌ترین و اساسی‌ترین اشکال سطحی و مورفولوژیکی کارست، در نتیجه تأثیر شیمیایی آب بر سنگ‌های آهکی می‌باشند. دولین‌ها بیانگر فعالیت‌های زمین‌ساختی و همچنین فعال بودن فرایند انحلال و فرسایش در محیط‌های کارستی هستند (رضایی‌مقدم و قدری، ۱۳۹۰). مکان‌هایی که دو یا چند گسل، یکدیگر را قطع نموده‌اند، مناسب‌ترین نقطه شروع برای فرایندهای کارستی است. البته حفره‌های فروکش (دولین‌ها)، از درون‌ریزی سقف غارها و مجاری زیرزمینی، در اعماق کم، نیز به وجود می‌آید تعداد حفره‌های فروکش در پهنه‌هایی که از نظر ترکیب زمین‌شناسی یکنواخت هستند، به عمق کارستی شدن بستگی دارد (مقیمی، ۱۳۹۱: ۱۰۵).

دوره کواترنری وارث تغییرات اقلیمی و تناوب دوره‌های یخچالی و بین یخچالی بوده است و بر این اساس ارتفاع خط برف‌مرز دائمی همواره جابه‌جا می‌شده است؛ چنین تغییراتی به همراه کاهش دما و افزایش بارش، می‌تواند کارستی-فیکاسیون را به شدت تحت تأثیر قرار داده باشد؛ به عبارتی با توجه به تغییرات اقلیمی و اشکال و مورایث یخچالی به‌جامانده از گذشته، می‌توان چنین انتظار داشت که فرایند انحلال و توسعه اشکال کارستی در دوره‌های سرد کواترنری شرایط مطلوب‌تری داشته‌اند و این احتمال می‌رود که بتوان مرز سیستم کارستی-فیکاسیون را در مناطق مرتفع ایران، همانند مرز ارتفاع برف‌مرز دائمی، ردیابی نمود. به همین منظور دولین به‌عنوان یک عارضه کارستی در محدوده زاگرس انتخاب شد و به با توجه به خصوصیات مورفومتری آن در ارتفاعات مختلف، به بررسی نقش دما (بر اثر تغییر ارتفاع) بر سیستم کارستی-فیکاسیون پرداخته شد.

در ارتباط با نحوه تشکیل و توسعه دولین‌ها و عوامل اثرگذار بر آن‌ها در نقاط مختلف جهان، پژوهش‌های بسیاری انجام شده است و هر کدام با توجه به منطقه مورد مطالعه نتایجی را بیان داشته‌اند؛ به‌طوری‌که میهوس^۱ (۱۹۹۷) در منطقه کراس در غرب اسلوونی، هایلند^۲ (۲۰۰۵) در دره‌ای در ویرجینا، بریاک^۳ (۲۰۱۱) در پرم در روسیه، مورفولوژی دولین‌ها و تشکیل و توسعه آن‌ها را با توجه به عواملی مانند ضخامت خاک، سنگ‌بستر، شیب و فاصله از گسل مورد بررسی قراردادند. سیسکا و همکاران^۴ (۲۰۱۶) در تنسی در ایالات‌متحده آمریکا و گومز و همکاران^۵ (۲۰۱۹) در منطقه کارستی یوکاتان در مکزیک با بررسی پارامترهایی مانند محور اصلی دولین، گردی، طول و عرض، به ترتیب نقشه حساسیت کارست به فروپاشی و نقشه دولین‌های منطقه را تهیه و ترسیم نمودند. ویرس^۶ (۲۰۲۰) تکامل و توسعه دولین‌های صفحه‌ای شکل را در چارچوب یک مطالعه موردی بررسی نمود. نتایج تحقیق نشان داد که دولین‌های دایره شکل هم از نظر سطحی و هم از نظر تعداد افزایش یافته‌اند. این اتفاق در مکان‌هایی رخ داده است که زهکشی آب و انتقال مواد از سنگ بستر متوقف شده است. گریگوریک^۷ (۲۰۲۱) لندفرم‌های معمولی دولین و سطح کراس اسلوونی را جهت بررسی ویژگی‌ها و امکانات

5. Gomez et al

6. Veress

7. Gregorič

1. Mihvec

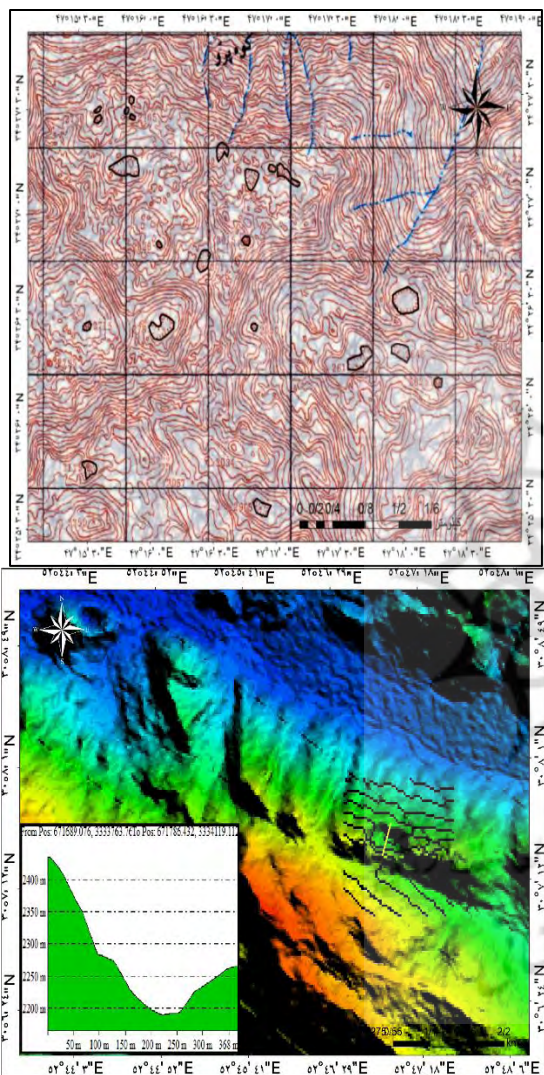
2. Hyland

3. Baryakh

4. Siska et al

در روابط فوق Cc : فشردگی، $\pi=3/14$ ، Rc : نسبت دایره‌ای، p : محیط حوضه و A : مساحت حوضه است.

جهت تجزیه و تحلیل اثرات عناصر اقلیمی (دما و بارش) بر انحلال نواحی کارستی از داده‌های ۴۹ ساله پایگاه اسفزاری در نرم‌افزار MATLAB استفاده شد و در محیط Arc GIS، با استفاده از روش میان‌یابی (Inverse Distance Weighting) نقشه هم‌دما و هم‌بارش ترسیم و سپس با تلفیق دولایه دما و بارش نقشه اقلیمی زاگرس نیز ترسیم و تجزیه و تحلیل شد.



شکل (۱): نمایشی از دولین‌های مشخص شده: A در نرم‌افزار ArcGIS (مأخذ: نقشه ۱:۵۰۰۰۰، II.۵۴۵۸) در نرم‌افزار Global Mapper

ضریب فشردگی: این ضریب نشان‌دهنده نسبت محیط واقعی حوضه (p) به محیط دایره‌ای با مساحت یکسان (P) است و زمانی که شکل حوضه دایره کامل است، برابر واحد بوده و در شرایطی که شکل حوضه مربع است، این ضریب به ۱/۱۲۸ می‌رسد. ممکن است میزان فشردگی برای حوضه‌های کشیده از ۳ نیز بیشتر شود (زاهدی و بیاتی خطیبی، ۱۳۹۳: ۵۵).

چشم‌انداز کارست برای حفاظت از آن‌ها مورد بررسی قرار داد و بیان داشت که دولین‌ها و دیگر ویژگی‌های چشم‌انداز کارست سطحی یک عنصر ژئومورفولوژیکی بسیار مهم تنوع زمینی کراس هستند، مفهومی که باید در اهداف حفاظتی در سطح قانونی و عملی ادغام شود. استفاده از تنوع جغرافیایی به عنوان یک مفهوم می‌تواند در تحقق این اهداف موثرتر باشد.

قربانی و همکاران (۱۳۸۹) و قربانی و اوق (۱۳۹۱) در پژوهش‌هایی، تقریباً مشابه به پژوهش حاضر، دولین‌های شاهو در غرب ایران را به ترتیب با توجه به ارتفاع و اقلیم مورد بررسی قرار دادند. مطالعات آن‌ها نشان می‌دهد که وجود فروچاله‌های کارستی از ارتفاع مشخصی به بالا، حاکی از شواهد فرایند یخچالی و مجاور یخچالی است و در دوره‌های سرد پلیستوسن از ارتفاع ۱۸۰۰ متر به بالا (مرزبرف دائمی)، شرایط برای توسعه انحلال فروچاله‌های کارستی فراهم بوده است. علاوه بر پژوهش‌های فوق، رضایی‌مقدم و همکاران (۱۳۸۹)، رضایی‌مقدم و قدری (۱۳۹۰)، در منطقه تخت سلیمان، ثروتی و همکاران (۱۳۹۱) در منطقه گازورخانی کرمانشاه، عابدینی و همکاران (۱۳۹۴) در منطقه پرآو بیستون، زمان‌زاده و همکاران (۱۳۹۷) در منطقه پرآو و شاهو در کرمانشاه، شریعتی و همکاران (۱۳۹۸) در اطراف سد گلورد در بهشهر، شکر بهجتی و همکاران (۱۴۰۰) در منطقه گراژین در جنگل خیرود کنار نوشهر مازندران، دولین‌ها را با توجه عوامل و پارامترهایی مانند لیتولوژی، اقلیم، تکنونیک و پارامترها و مدل‌های مختلف مورد مطالعه قرار دادند و در اکثر موارد تمرکز تحقیقات بر مسئله اثرگذاری تغییر اقلیم بر تحول کارست «بخصوص دولین» در بخش‌های کوچکی از زاگرس یا نواحی دیگر از ایران و جهان است و در سطح کلان کمتر به موضوع پرداخته شده است. در این تحقیق تغییر و تحولات دولین با افزایش ارتفاع، در کل واحد مورفوتکتونیک زاگرس، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

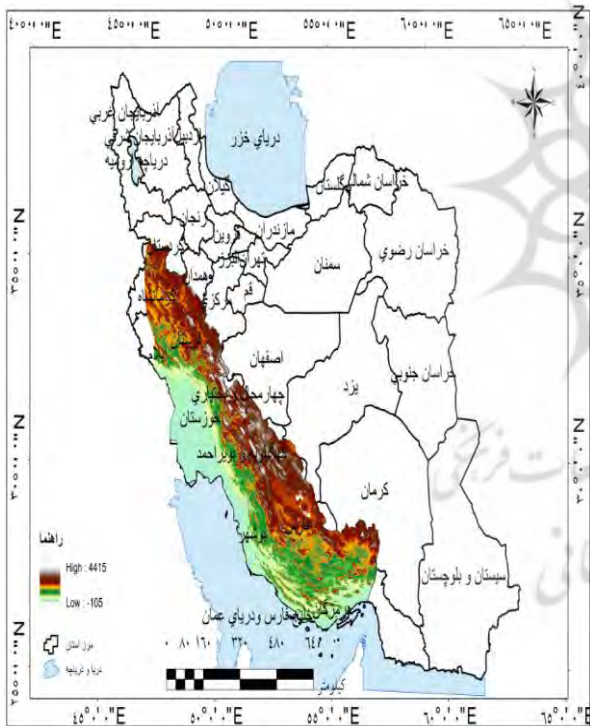
روش

دولین به فروافتادگی‌هایی نواحی کارستی گفته می‌شود که به صورت منحنی بسته با زهکش داخلی و ارتفاع کم قسمت مرکزی (نسبت به اطراف) مشخص می‌شود. براساس تعریف فوق تعداد ۲۴۲ دولین با استفاده از نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰، لایه مدل رقومی ارتفاع با قدرت تفکیک ۱۲/۵ متر و نقشه‌های توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰ در نرم‌افزارهای Arc GIS، در توده کوهستانی زاگرس شناسایی شد. محدوده شیب فایلی آن‌ها ترسیم و برای ترسیم نیمرخ طولی و عرضی دقیق در مدل رقومی ارتفاع وارد از نرم‌افزار Global Mapper استفاده شد. به کمک این نرم‌افزار طول، عرض، عمق و ارتفاع دولین‌ها برآورد گردید. پارامترهایی مانند محیط، مساحت، طول، عرض و ارتفاع آن‌ها اندازه‌گیری شد. (شکل ۱). پس از به دست آوردن پارامترهای فوق، دو شاخص ضریب فشردگی و نسبت دایره‌ای آن‌ها با استفاده از روابط ۱ و ۲ برآورد گردید و رابطه بین دو شاخص مذکور با ارتفاع در نرم‌افزار Excel تجزیه و تحلیل گردید.

$$Cc = P / 2\sqrt{\pi A} \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$R_c = 4 \times \pi \times A / p^2 \quad \text{رابطه (۲)}$$

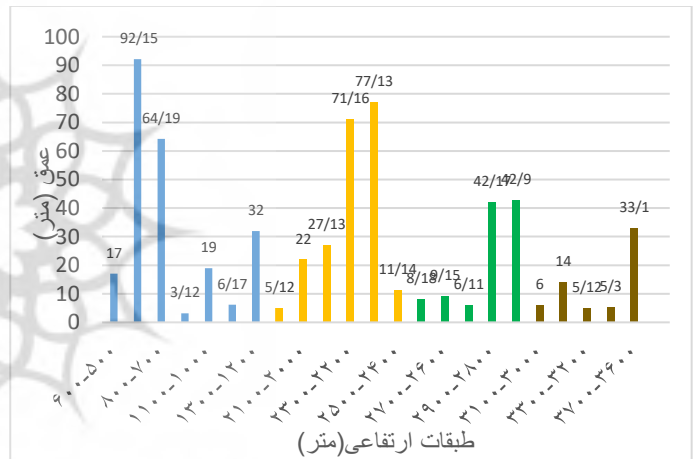
جهت آن مجدداً غربی-شرقی می‌شود و آنگاه در شمال تنگه هرمز، به علت پیش‌آمدگی رأس مسندام، به‌صورت قوسی با انحنای شمالی درمی‌آید. بخش باریکی از زاگرس در مشرق تنگه هرمز نیز کشیده شده و در آنجا خاتمه می‌یابد (علایی‌طالقانی ۱۳۹۱: ۱۵۳)، (شکل ۳). از نظر تکتونیکی، وضعیت ساختمانی این رشته‌کوه به‌صورتی است که در سمت نواحی جنوبی زاگرس، لندفرم‌های کارستی جدیدتر و جوان‌تر (احتمالاً الیگوسن) وجود دارد. وجود آهک‌های آسماری در زاگرس جنوبی نیز بستر مناسبی را برای تشکیل رخساره‌های کارستی فراهم آورده است (حریریان، ۱۳۶۹: ۹۶). در ناحیه زاگرس سازندهای کارستی فراوان رخمون دارند و ۹۰ درصد از ارتفاعات آن را سنگ‌های کربناتی تشکیل می‌دهند. با توجه به حرکات تکتونیکی و ایجاد گسل‌ها و چین‌خوردگی و به دنبال آن درز و شکاف‌ها در سنگ‌های کربناتی زاگرس و همچنین آب‌وهوای سرد در آخرین دوره یخبندان، باعث ایجاد چرخه ژئومورفولوژیک کارست در حالت‌های متفاوت و در بخش‌های مختلف شده است. شواهد مرحله جوان این چرخه ژئومورفیک کارست به‌صورت شیارها و فروچاله‌ها و جویبارهایی که در این سنگ‌ها جریان یافته، به وجود آورده که در سرتاسر زاگرس قابل مشاهده است (مقیمی، ۱۳۹۱: ۱۴)، (شکل ۴).



شکل (۳): موقعیت مکانی زاگرس (منبع: نگارندگان، ۱۴۰۰).

نسبت دایره‌ای: نسبت دایره‌ای حوضه (Rc) عبارت است از نسبت مساحت حوضه (A) به مساحت دایره‌ای (") که محیط آن مساوی محیط حوضه (P) باشد (علیزاده، ۱۳۹۳: ۴۹۹).

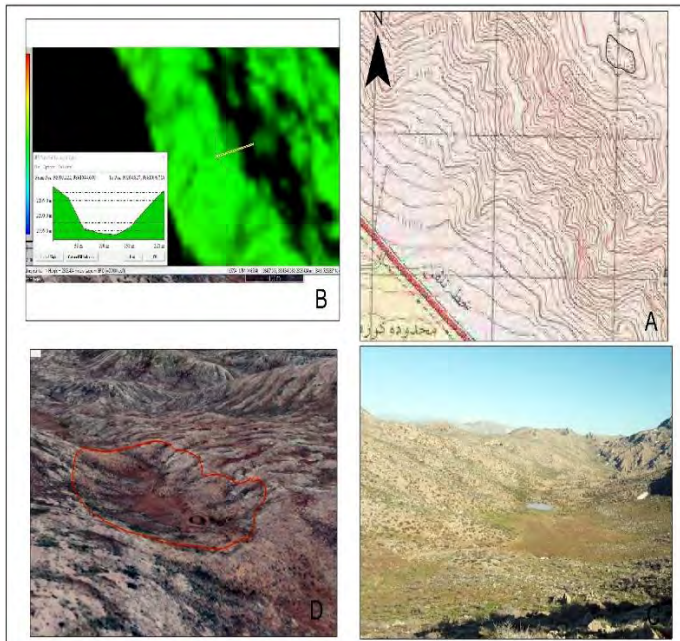
بررسی داده‌های خام عمق دولین در ارتباط با ارتفاع، دال بر این است که هرچند در ارتفاعات مختلف عمق دولین‌ها تفاوت دارد ولی در داده‌های خام قابل بررسی نیستند؛ بر این اساس پس از برآورد عمق دولین‌ها، میانگین عمق آن‌ها در طبقات ارتفاعی ۱۰۰ متری میانگین‌گیری شد و سپس رابطه خطی رگرسیونی بین ارتفاع به‌عنوان متغیر مستقل با میانگین عمق دولین، به‌عنوان متغیر وابسته برآورد گردید. با توجه به نحوه توزیع آن‌ها، جهت بررسی دقیق‌تر، میانگین‌ها در چهار طبقه ارتفاعی (۱۳۰۰-۵۰۰، ۲۵۰۰-۱۹۰۰، ۳۰۰۰-۲۵۰۰ و ۳۷۰۰-۳۰۰۰) تقسیم‌بندی شد (شکل ۲). یکی از پارامترهای دیگری که بر ضریب فشردگی و نسبت دایره‌ای دولین‌ها اثر بگذارد، وضعیت قرارگیری دولین‌ها نسبت به گسل‌ها است. غالباً محور بلند (طول) حفره‌های فروکش، در امتداد طویل‌ترین گسل ظاهر می‌شود (مقیمی، ۱۳۹۱: ۱۰۵). در همین راستا، لایه‌های گسل و دولین در نرم‌افزار Arc GIS باهم تلفیق و مورد بررسی قرار گرفت.



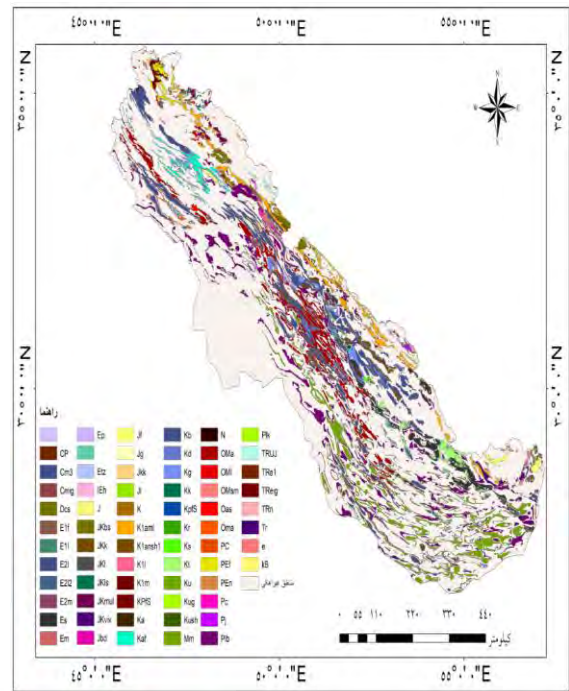
شکل (۲): نمودار میانگین عمق دولین‌ها در طبقات ارتفاعی.

منطقه مورد مطالعه

بزرگ‌ترین ایالت کارستی ایران، در زاگرس غربی و جنوب غربی واقع شده است به‌گونه‌ای که بالغ بر ۳۵۰ هزار کیلومتر مربع از ارتفاعات مذکور را این‌گونه ناهمواری‌ها فراگرفته‌اند. زاگرس در نیمکره شمالی، در شرق نصف‌النهار گرینویچ لندن، در غرب قاره آسیا و در کمربند کوهزایی آلپ-همالیا در عرض جغرافیایی ۲۶ درجه و ۴۹ دقیقه و ۲۳ ثانیه تا ۳۵ درجه و ۴۷ دقیقه و ۵۹ ثانیه شمالی و طول جغرافیایی ۴۵ درجه و ۵۵ دقیقه و ۳۱ ثانیه تا ۵۶ درجه و ۴۱ دقیقه و ۵۵ ثانیه شرقی قرار دارد. سیستم اصلی آن از شرق مدیترانه شروع شده، تمام جنوب ترکیه را طی می‌کند و کوه‌های توروس و آنتی‌توروس را در برگرفته و سپس وارد عراق می‌شود. این سیستم در ترکیه جهت غربی-شرقی دارد. با ورود به خاک عراق، روند شمال غربی-جنوب شرقی پیدا می‌کند و با همین روند نیز در بخش غربی ایران امتداد می‌یابد و از شمال غرب تا جنوب شرق کشور پهناور ایران را در سیطره‌ی خود قرار داده است (قاسمی‌فر و ناصرپور، ۱۳۹۰). زاگرس هنگامی که به فارس می‌رسد،



شکل (۵): نمایی از یک دولین در کوه‌های شاهو واقع در روانسر استان کرمانشاه: A: نقشه توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰ B: DEM: C: عکس JPEG: D: تصویر ماهواره لندست ۸.



شکل (۴): موقعیت زمین‌شناسی زاگرس (منبع: نگارندگان، ۱۴۰۰).

از نظر اقلیمی زاگرس در دوره‌های سرد پلیستوسن در نیمه شمال غربی فرایند یخچالی و مجاور یخچالی و فرایند رودخانه‌ای و در نیمه جنوب شرقی آن، فرایند رودخانه‌ای دست‌اندرکار تغییر چهره ناهمواری بوده‌اند ولی در حال حاضر در نیمه شمال غربی زاگرس از نظر آب و هوایی، ویژگی عمومی ناحیه کوهستانی را دارد؛ به همین دلیل فرایند مجاور یخچالی در سطح میاناب‌ها و فرایند رودخانه‌ای از عناصر اصلی شکل‌زایی محسوب می‌شوند (علایی طالقانی، ۱۳۹۱: ۱۶۴).

تجزیه و تحلیل داده‌ها

با کمک لایه‌های موجود در واحد ژئومورفیک زاگرس تعداد ۲۴۲ دولین شناسایی و استخراج گردید؛ سپس مؤلفه‌های مورفومتری مساحت، محیط، طول، عرض، ارتفاع و عمق آن‌ها برآورد شد (شکل ۵)، (جدول ۱).

جدول (۱): مؤلفه‌های مورفومتری دولین‌ها.

عمق (متر)	ارتفاع (متر)	محیط (متر مربع)	مساحت (متر مربع)	عرض (متر)	طول (متر)
۲	۵۲۰	۱۵۱	۱۵۶۵	۴۰	۵۳
۹۸	۳۶۶۷	۶۶۸۲	۸۹۵۹۴۹	۶۵۱	۱۶۴۲

الف) بررسی تراکم دولین‌ها در طبقات ارتفاعی مختلف

مجموعاً مساحت آن‌ها ۱۷/۹۱ کیلومتر مربع و توزیع آن‌ها در سطح زاگرس، بسیار ناچیز است (۰/۶۴ کیلومتر مربع در هر ده هزار کیلومتر مربع). رابطه بین دولین به‌عنوان یک متغیر وابسته با ارتفاع به‌عنوان یک متغیر مستقل به شکل رابطه (۳) است و تراکم دولین‌ها در هر طبقه، با افزایش ارتفاع، بیشتر شده است. (جدول ۲).

$$22 = 0.41 \text{ رابطه (۳)}$$

$$Y = 5/96X - 3/17$$

جدول (۲): نسبت تراکم دولین‌ها در طبقات ارتفاعی در زاگرس.

نسبت تراکم (متر مربع بر کیلومتر مربع)	مساحت طبقه ارتفاعی (کیلومتر مربع)	تعداد دولین	مساحت طبقه ارتفاعی (کیلومتر مربع)
۱۹/۷۳	۴۷۶۳۳/۸۴	۲	۹۴۰۰۰۰
۹۰/۸۱	۵۶۷۰۷/۹۴	۵۹	۵۱۵۰۰۰۰
۲/۵۹	۵۳۸۸۵/۸۶	۵	۱۴۰۰۰۰
۱۴/۸۵	۶۱۹۱۶/۱۸	۲	۹۲۰۰۰۰
۱۱/۲۷	۴۲۹۳۲/۳۵۴	۷۵	۴۸۴۰۰۰
۲۷/۰۳	۱۴۶۹۷/۸۹	۸۹	۴۰۷۰۰۰
۵۹/۸	۲۵۳۸/۰۵	۶	۱۵۲۰۰۰
۶۱/۵	۴۳۸/۸۲	۴	۲۷۰۰۰۰



شکل (۷): نمودار همبستگی میان ارتفاع با فشردگی و نسبت دایره‌ای در طبقه ارتفاعی ۱۹۰۰-۳۷۰۰ متر (منبع: نگارندگان، ۱۴۰۰).

(ب) بررسی دولین‌ها با توجه به نسبت دایره‌ای و فشردگی

در مرحله بعد، خصوصیات مورفومتری دولین‌ها در فاصله ارتفاعی ۲۰۰ متر و سپس با توجه به تجمعی بودن آن‌ها، در دو گروه ارتفاع کم (۱۳۰۰-۵۰۰) و ارتفاع زیاد (۱۹۰۰-۳۷۰۰) طبقه‌بندی شد و بین ارتفاع به‌عنوان متغیر مستقل با نسبت دایره‌ای و فشردگی دولین به‌عنوان متغیر وابسته، روابط رگرسیونی خطی برآورد گردید (جدول ۳). بررسی روابط دال بر این است که با افزایش ارتفاع، درصد فشردگی دولین‌ها کمتر و نسبت دایره‌ای آن‌ها بیشتر شده است (شکل ۶ و ۷).

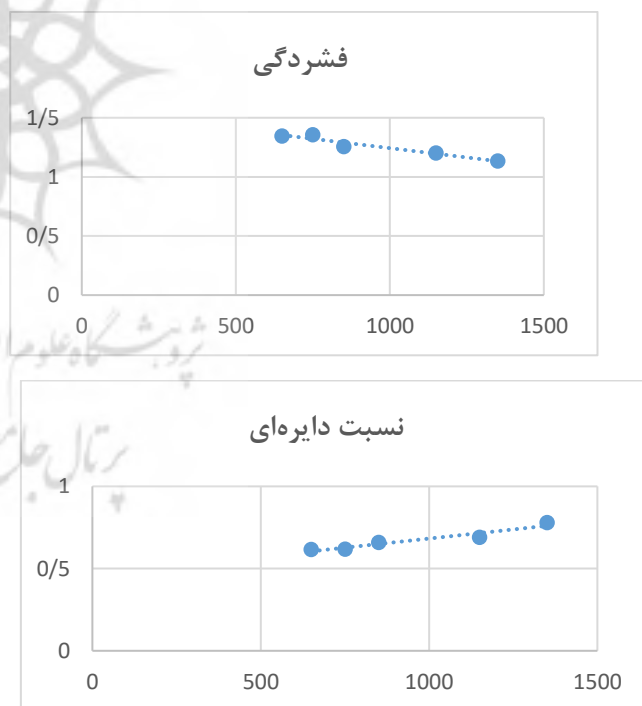
جدول (۳): روابط همبستگی میان ارتفاع و پارامترهای فشردگی و نسبت

طبقات	پارامترها	رابطه همبستگی Y	ضریب تبیین R2
۵۰۰-۱۳۰۰	نسبت دایره‌ای	$0.0002x + 0.4609$	۰/۹۲۵
	فشردگی	$-0.0003x + 1/5584$	۰/۹۲۵
۱۹۰۰-۳۷۰۰	نسبت دایره‌ای	$-0.0001x + 1/0.98$	۲/۴۴۳۱
	فشردگی	$0.0001x + 0.9209$	۰/۴۳۶۸

همبستگی بین ارتفاع با فشردگی و نسبت دایره‌ای دولین‌ها در طبقه ارتفاعی ۱۹۰۰-۳۷۰۰ مستقیم و بسیار زیاد است. تغییرات این ضرایب در ارتفاعات مختلف، متفاوت است. با توجه به این موضوع، توزیع دولین‌ها در چهار طبقه ارتفاعی بررسی گردید. در فاصله ارتفاعی ۵۰۰-۱۰۰۰ نسبت دایره‌ای به ازای هر ۱۰۰۰ متر افزایش ارتفاع، ۰/۸ بیشتر می‌شود و ضریب فشردگی ۰/۹ کاهش می‌یابد. در فاصله ارتفاعی ۱۰۰۰-۲۰۰۰ با افزایش هر ۱۰۰ متر، نسبت دایره‌ای ۰/۴۴ و ضریب فشردگی ۰/۱ کمتر می‌شود. در طبقه ۳۷۰۰-۳۰۰۰ متر، نسبت دایره‌ای با افزایش هر ۱۰۰۰ متر ارتفاع، ۱/۲ کاهش و فشردگی ۱/۳ افزایش می‌یابد. همچنین نسبت دایره‌ای دولین‌ها در ارتفاع کمتر از ۱۰۰۰ متر با افزایش ارتفاع بیشتر می‌شود، یعنی به یک نزدیک‌تر شده است و دولین شکل دایره‌ای‌تری می‌گیرد. در کل از ارتفاع ۱۰۰۰ متر به بالا، نسبت دایره‌ای کاهش پیدا می‌کند و به‌خصوص مقدار کاهش نسبت دایره‌ای دولین‌های واقع در ارتفاع ۳۰۰۰ متر به بالا، بیشتر می‌شود. نتیجه اینکه چه نسبت دایره‌ای و چه ضریب فشردگی، دال بر این مطلب هست که سیرک-دولین‌ها کشیده‌تر از سایر دولین‌های موجود در زاگرس هستند (جدول ۴).

جدول (۴): روابط همبستگی میان ارتفاع و پارامترهای فشردگی و نسبت دایره‌ای در دولین‌ها.

طبقة	پارامترها	رابطه همبستگی Y	ضریب تبیین R2
۵۰۰-۱۰۰۰	نسبت دایره‌ای	$0.0008x + 0.06$	۰/۷۳۶
	ضریب فشردگی	$0.0009x + 1/98$	۰/۸۱۹۱



شکل (۶): نمودار همبستگی میان ارتفاع با فشردگی و نسبت دایره‌ای در طبقه ارتفاعی ۵۰۰-۱۳۰۰ متر (منبع: نگارندگان، ۱۴۰۰).

ارتفاع در سطوح ارتفاعی بین ۱۹۰۰ تا ۲۵۰۰ متر با ضریب تبیین ۰/۴۶، همان روند ارتفاع پایین‌تر از ۱۳۰۰ متر را دارد، با این تفاوت که مقدار تغییرات عمق دولین‌ها در هر صد متر به ۰/۷ متر کاهش می‌یابد. نکته قابل توجه در این ارتباط، تغییراتی است که عمق دولین‌ها در ارتفاع بین ۲۵۰۰ تا ۳۰۰۰ متر داشته‌اند. در اینجا عمق دولین با افزایش ارتفاع بیش از ۰/۸۶ متر کاهش داشته است. از ارتفاع ۳۰۰۰ متر به بالا با ضریب تبیین ۰/۷۹ دوباره شرایط به‌گونه‌ای می‌شود که با افزایش هر صد متر ارتفاع ۷/۲ متر عمق دولین افزایش می‌یابد. (جدول ۶).

نسبت دایره‌ای	$-0.4495x + 1.24$	۰/۹۵۴۷
ضریب فشردگی	$-0.001x + 1.30$	۰/۷۷۳۹
نسبت دایره‌ای	$0.5 - 0.9x$	۰/۳۰۴۳
ضریب فشردگی	$-0.001x + 1.50$	۰/۴۲۴۷
نسبت دایره‌ای	$-0.0013x + 4.76$	۰/۹۹۶۴
ضریب فشردگی	$0.0012x - 2.54$	۰/۹۸۹۶

جدول (۶): روابط همبستگی میان ارتفاع و عمق دولین‌ها.

طبقات ارتفاعی	Y رابطه همبستگی	R ² ضریب تبیین
۵۰۰-۱۳۰۰	$7/89x + 0.145$	۰/۵۶
۱۹۰۰-۲۵۰۰	$0.55x - 0.068$	۰/۴۶
۲۵۰۰-۳۰۰۰	$67/16x + 0.02$	۰/۸۶
۳۰۰۰-۳۷۰۰	$211/0.5x - 0.72$	۰/۷۹

د) بررسی دولین‌ها بر اساس دما و بارش

با توجه به قرارگیری محدوده مطالعاتی در مسیر جریان‌های مرطوب و سیکلون‌های مدیترانه‌ای و سودانی، دامنه‌های غربی زاگرس نسبت به دامنه‌های شرقی، بارش و رطوبت بیشتری دریافت می‌شود (علیچانی، ۱۳۸۲: ۲۳۶)؛ به‌گونه‌ای که بارش سالانه بین ۲۵۰ تا ۹۰۰ میلی‌متر و دمای سالانه بین ۱- تا ۲۶ درجه سانتی‌گراد متغیر است که انتظار می‌رود اثرگذاری متفاوتی بر لندفرم‌های کارستی داشته باشند؛ به همین منظور، نقشه‌های دما و بارش کنونی ترسیم و سطوح وابسته به هر کدام به پنج طبقه تقسیم‌بندی شد. دما از بیشتر به کمتر و بارش از مقدار کمتر به بیشتر، به ترتیب در طبقات یک تا پنج قرار گرفتند؛ در طبقه‌بندی دما، مناطقی که بیشترین دما را داشتند برای تشکیل کارست، کمترین امتیاز را به خود اختصاص دادند و مناطقی با دمای پایین که بهترین شرایط را برای توسعه کارست دارند، بالاترین امتیاز را گرفتند. در بارش، مناطقی با حداکثر بارش و بهترین وضعیت برای توسعه کارست، بالاترین امتیاز را می‌گیرند. پس از ترسیم نقشه‌های دما، بارش و طبقه‌بندی آن‌ها، طبقات به ترتیب از طبقه اول تا پنجم به‌عنوان بسیار نامساعد (دما ۲۶-۲۰ و بارش ۲۹۷-۱۵۴)، نامساعد (دما ۱۵-۲۰ و بارش ۴۴۰-۲۹۷)، متوسط (دما ۱۵-۱۰ و بارش ۵۸۳-۴۴۰)، مساعد (دما ۱۰-۵ و بارش ۷۲۶-۵۸۳) و بسیار مساعد (دما ۵-۱ و بارش ۷۲۶-۸۷۲) در نظر گرفته شد. در طبقه بسیار مساعد با کمترین دما و بیشترین بارش، انتظار می‌رود بهترین شرایط جهت شکل‌گیری و توسعه دولین وجود داشته باشد. از طبقه بسیار مساعد به پایین، به ترتیب میزان دما افزایش و مقدار بارش کاهش می‌یابد و شرایط نیز جهت انحلال در کارست نامطلوب‌تر می‌شود؛ در طبقه بسیار نامساعد انتظار می‌رود تراکم و توسعه کارست به حداقل برسد. البته این نکته را باید در نظر داشت که طبقه بسیار مساعد دارای پهنه‌ی کمتری نسبت به بقیه طبقات است، به همین دلیل درصد پراکندگی اشکال کارستی نیز در آن کمتر می‌شود. در نهایت با تلفیق دولایه دما و بارش، نقشه اقلیمی کنونی منطقه ترسیم گردید. پراکندگی

بررسی داده‌های میانگین نسبت دایره‌ای و ضریب فشردگی در طبقات ارتفاعی مختلف دال بر این است که این دو پارامتر عکس هم عمل کرده‌اند و روند تغییرات نسبت دایره‌ای در اثر تغییر ارتفاع در تمامی طبقات ارتفاعی غیر از طبقه ۵۰۰ تا ۱۳۰۰ کاهش یافته است. مقدار ضریب تبیین و ضریب تغییرات نسبت دایره‌ای بر اثر افزایش ارتفاع در طبقات مختلف می‌تواند در بررسی تفاوت تغییرات نسبت دایره‌ای بر اثر ارتفاع مورد توجه قرار گیرد. دامنه تغییرات ضریب تبیین در طبقات ارتفاعی مختلف بین ۰/۵۵ تا ۰/۹۳ متغیر است؛ طبقات ارتفاعی ۳۰۰۰ تا ۳۷۰۰ و ۲۵۰۰ تا ۳۰۰۰ متر به ترتیب بیشترین ضریب تبیین (۰/۹۳ و ۰/۸۷) را داشته‌اند. ضریب تغییرات به ازای ارتفاع در طبقه ارتفاعی ۳۰۰۰ تا ۳۷۰۰ متر (۰/۱۳)، بیشترین مقدار را به خود اختصاص داده است. دامنه ضریب اثرگذاری ارتفاع بر نسبت دایره‌ای بین ۰/۱۳ تا ۰/۰۰۲ متغیر بود (جدول ۵).

جدول (۵): روابط همبستگی میان ارتفاع و میانگین پارامترهای فشردگی و نسبت دایره‌ای در دولین‌ها.

طبقات ارتفاعی	ضرایب	روابط همبستگی Y	ضریب تبیین R ²
نسبت دایره‌ای		$0.002x + 0.54$	۰/۵۷
ضریب فشردگی		$-0.003x + 1.45$	۰/۵۲
نسبت دایره‌ای		$-0.002x + 1.2$	۰/۵۹
ضریب فشردگی		$0.006x - 0.02$	۰/۵۷
نسبت دایره‌ای		$-0.003x + 1.59$	۰/۵۵
ضریب فشردگی		$0.004x + 0.19$	۰/۶۶
نسبت دایره‌ای		$-0.0013x + 4.79$	۰/۹۳
ضریب فشردگی		$0.001x - 1.86$	۰/۸۷

ج) بررسی عمق دولین‌ها

یکی از پارامترهای دیگری که در مورد مورفومتری دولین‌ها و تغییر آن بر اثر ارتفاع مورد بررسی قرار گرفته، تغییراتی عمق دولین‌ها با توجه به ارتفاع است. در ارتفاع ۵۰۰ تا ۱۳۰۰ متر با ضریب تبیین ۰/۵۶، عمق دولین با افزایش صد متر ارتفاع، یک و نیم متر بیشتر می‌شود. تغییر عمق دولین با افزایش

جدول (۷): پراکندگی اشکال سطحی کارستی با توجه به گسل در زاگرس.

فاصله از گسل	دولین	
	مساحت (کیلومتر مربع)	درصد
کمتر از یک کیلومتر	۰/۰۴۷	۰/۲۷
یک تا ۵ کیلومتر	۲/۲۴	۱۲/۵۵
۵-۱۰ کیلومتر	۳/۷۶	۲۱/۰۵
۱۰-۲۰ کیلومتر	۱۱/۳۹	۶۳/۶۵
۲۰-۶۰ کیلومتر	۰/۴۴	۲/۴۷

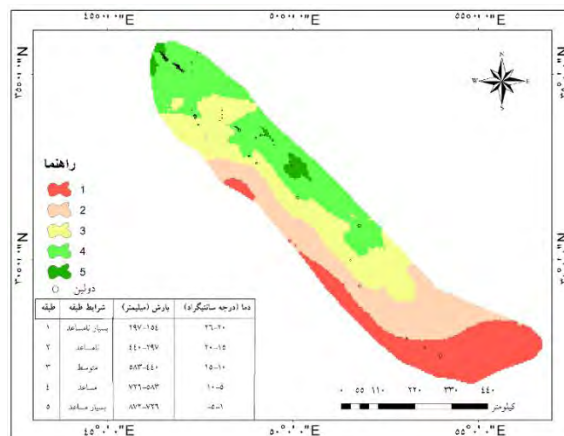
بحث و نتیجه‌گیری

بررسی نتایج به‌دست‌آمده از دولین‌ها در طبقات ارتفاعی مختلف نشان می‌دهد که دولین‌ها به‌عنوان یک لندفرم کارستی، نه‌تنها از نظر پراکندگی بلکه از نظر شکل و خصوصیات فیزیوگرافی، از ارتفاع به‌عنوان یک عامل اثرگذار بر کارست، تأثیر پذیرفته است و بردارهای وابسته به آن با تغییر طبقات ارتفاعی، تغییر کرده‌اند؛ افزایش تراکم دولین‌ها با توجه به افزایش ارتفاع، دال بر این است که نسبت سطحی دولین در طبقات ارتفاعی بالا افزایش داشته است، هرچند مساحت طبقه ارتفاعی کمتر شده است و کم بودن مساحت در این طبقات نتوانسته مانع از تأثیرگذاری ارتفاع بر کارستی-فیکاسیون شود.

تفسیر پراکندگی دولین‌ها با توجه به تکتونیک نیز نشان می‌دهد که تحول کارست با توجه به درز و شکاف‌ها بیشتر می‌شود و فرایند انحلال بخصوص در کارست عمقی، در نزدیک گسل‌ها افزایش می‌یابد. می‌توان گفت سنگ‌های کربناته به‌طور مستقیم نفوذناپذیر و به‌طور غیرمستقیم نفوذپذیر هستند؛ به این معنا که شکستگی‌ها و درز و شکاف‌ها موجب نفوذ نزولات جوی به درون سنگ‌ها می‌شوند و مهم‌ترین عامل هدایت آب در سنگ‌های کربناته هستند. وجود گسل‌ها به‌صورت سیستم گسلی موجب تأثیرگذاری بر پهنه‌های سنگی اطراف می‌شود. مسلماً بافاصله از این خطوط، از میزان درز و شکاف کاسته می‌شود؛ از این‌رو فاصله از گسل نیز به‌عنوان یک متغیر در کارستی شدن در نظر گرفته می‌شود.

بررسی نسبت دایره‌ای و فشردگی دولین‌ها در طبقات مختلف نشان می‌دهد که هرچه ارتفاع بیشتر شود، دولین‌ها شکلی نزدیک به دایره به خود می‌گیرند و شرایط کارستی-فیکاسیون در ارتفاعات بالاتر، دولین‌هایی را به وجود آورده که شکل آن‌ها به دایره نزدیک‌تر است. با توجه به اشکال (۶) و (۷) در طبقه ارتفاعی ۱۳۰۰-۵۰۰ با افزایش هر ۱۰۰۰ متر ارتفاع، نسبت دایره‌ای دولین‌ها ۰/۲ بیشتر و فشردگی ۰/۳ کمتر می‌شود. در طبقه ارتفاعی ۱۹۰۰-۳۷۰۰ با افزایش هر ۱۰۰۰ متر ارتفاع، نسبت دایره‌ای ۰/۱ کاهش و فشردگی ۰/۱ افزایش می‌یابد؛ دلیل آن را می‌توان به شرایط اقلیمی شکل‌گیری دولین‌ها نسبت داد، چراکه در ارتفاعات بالا یخچال‌ها یک عامل تأثیرگذار مهم در شکل‌گیری دولین تلقی می‌شوند و تأثیر انحلال در عمق نسبت به سطح بیشتر می‌شود. براساس یافته‌های جعفری و حضرتی (۱۳۹۷)، ارتفاع برف‌مرز دائمی زاگرس در دوران کواترنری ۲۷۱۹ متر بوده است که با توجه به آن، دولین‌های واقع در ارتفاع بیشتر، نقش دولین-سیرک داشته‌اند

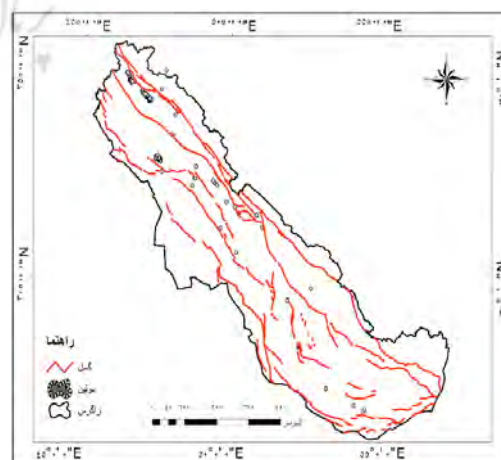
دولین‌ها بر اساس اقلیم نشان‌دهنده این است که بیشترین درصد دولین‌ها در طبقه چهار ۶۹/۰۴٪ و در طبقه سه ۲۷/۷۳٪ شکل گرفته و توسعه یافته‌اند که شامل مناطق مرتفع زاگرس می‌باشد (شکل ۸).



شکل (۸): پراکندگی دولین‌ها در طبقات اقلیمی

ز) بررسی دولین‌ها نسبت به تکتونیک

از مواردی که می‌تواند بر مورفومتری دولین‌ها اثر بگذارد وضعیت تکتونیک منطقه است که از طریق گسل‌ها قابل‌رديابی است. به همین منظور نقشه گسل‌های موجود در زاگرس تهیه (شکل ۱۰) و سپس براساس فاصله طبقه‌بندی شدند. پراکندگی دولین‌ها با توجه به فاصله از گسل به این صورت می‌باشد که درصد بیشتر آن‌ها در فاصله ۲۰ کیلومتری از گسل‌ها قرار دارند (جدول ۷). پس از تلفیق لایه‌های گسل و دولین و بررسی ضرایب فشردگی و دایره‌ای آن‌ها با توجه به دولین و نزدیکی به گسل چنین استنباط می‌شود که اولاً دولین‌ها به‌ندرت بر روی گسل شکل گرفته‌اند و مورفومتری آن‌ها کمتر تحت تأثیر امتداد نزدیک‌ترین گسل قرار داشته است. اثر گسل‌ها در طی زمان بیش‌ازحدی بوده که فرم اثرگذاری آن‌ها را بتوان در محدوده زاگرس به‌وسیله دولین ردیابی نمود؛ این نوع اثرگذاری بیشتر به‌صورت تنگه‌ها و دره‌های U شکل در طبیعت ظاهر شده است.



شکل (۱۰): پراکندگی دولین‌ها نسبت به فاصله از گسل در زاگرس (منبع:

نگارندگان، ۱۴۰۰).

لندفرمی همچون سیرک یخچالی - به‌عنوان بهترین وارث اقلیم کواترنری - که در برآورد برف‌مرز دوره‌های سرد کواترنری می‌توان به آن‌ها متوسل شد و با منطق ریاضی تغییرات برف‌مرز کواترنری را برآورد نمود؛ ولی برآورد تغییرات مرزی کارستی-فیکاسیون نواحی کوهستانی در طی کواترنری با منطق ریاضی امکان‌پذیر نیست، چراکه در ایجاد چنین لندفرم‌هایی، عوامل متعددی دخالت دارند و چه‌بسا نبود یا کسری یکی با مازاد دیگری جبران گردد؛ کاهش دما به‌عنوان یک عامل در تسریع عمل انحلال، می‌تواند با مازاد آب جبران گردد. زمانی که از انحلال صحبت می‌شود آن‌هم در یک دوره طولانی مثل کواترنری، دیگر زمان نجومی اهمیت خود را در مقابل زمان رخدادی از دست می‌دهد. روی این اصل تغییرات مرزی کارستی-فیکاسیون را باید با منطق فازی ردیابی کرد. در مجموع می‌توان گفت که در تعیین مرز عوارض سطحی نمی‌توان از منطق ریاضی استفاده کرد؛ هرچند یخچال معمولاً با خط مبنای صفر درجه تحلیل می‌شود، اما خط هم‌دمای صفر درجه نمی‌تواند مبنای تغییرات صورت گرفته در کارست باشد. کارست به‌عنوان یک سیستم ژئومورفولوژیک، با وجود تبعیت از بردارهای خطی، به دلیل تغییر بسیار تدریجی عوامل اثرگذار در سطوح ارتفاعی مختلف، نمی‌تواند مرز دقیقی داشته باشد. با بررسی پارامترهای مختلف مورفومتری دولین‌های ارتفاعات زاگرس در طبقات ارتفاعی و اقلیمی مختلف می‌توان گفت که شکل و عمق آن‌ها به‌عنوان پارامترهایی هستند که از تغییرات اقلیمی کواترنری متأثر شده‌اند. در ارتفاعات پایین‌تر که آب بیشتر از دما، در انحلال نقش داشته، دولین‌ها شکل نزدیک به دایره گرفته‌اند و در مناطق مرتفع‌تر بخصوص جاهایی که احتمال تسلط یخچال‌های کواترنری قطعی‌تر است، دولین‌ها کشیده می‌شوند و هرچه دما پایین‌تر و احتمال تبدیل دولین به سیرک یخچالی بیشتر باشد، دولین شکل کشیده‌تری به خود می‌گیرد. بررسی ضریب فشردگی و نسبت دایره‌ای دولین‌ها نسبت به ارتفاع، نشان‌دهنده این است که کشیدگی و طول آن‌ها با افزایش ارتفاع بیشتر می‌شود. در ارتفاع کمتر ۱۰۰۰ متر، منابع آب فراوان‌تر، در ارتفاع بین ۱۰۰۰ تا ۳۰۰۰ کاهش دما و بارش بیشتر و از ارتفاع ۳۰۰۰ به بالا، کاهش دما، بیشترین نقش را در خصوصیات فیزیوگرافی دولین‌ها داشته‌اند. بررسی مورفومتری دولین‌ها در ارتباط با گسل‌های زاگرس، دال بر این است که دولین‌ها در فاصله کمتر از ۲۰ کیلومتر از گسل متمرکزند؛ به این صورت که از تعداد ۲۴۲ دولین با مجموع مساحت تقریبی ۱۷/۸۷ کیلومتر مربع، حدوداً ۹۷/۵ درصد در این فاصله قرار گرفته و تنها کمتر از ۳ درصد در فاصله بیشتر از ۲۰ کیلومتر قرار دارند. همچنین شکل‌گیری دولین‌ها متأثر از درز و شکاف‌های منشعب از آن‌ها بوده است و روند گسل‌ها نقش چندانی در مورفومتری آن‌ها نداشته است.

و شکل دایره‌ای‌تری به خود گرفته‌اند. با توجه به تفسیر و بررسی جدول (۴)، به‌طور کلی تا ارتفاع ۳۰۰۰ متری با افزایش ارتفاع، ضریب فشردگی کاهش و از این ارتفاع به بعد، افزایش داشته است. کاهش ضریب فشردگی بر اثر افزایش ارتفاع بین ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ متر ۹ برابر تغییرات آن در ارتفاع ۱۰۰۰ تا ۳۰۰۰ متر است؛ یعنی تغییر شکل دولین‌ها از کشیده به دایره، در ارتفاع کمتر از ۱۰۰۰ متر، بسیار سریع‌تر اتفاق افتاده است که این افزایش سریع دال بر اثرگذاری عاملی غیر از دما بر کارست است. از ارتفاع ۱۰۰۰ تا ۳۰۰۰ متر، کاهش ضریب فشردگی (۰/۱ به ازای هر ۱۰۰۰ متر) بیشتر ناشی از کاهش دمایی است که با افزایش ارتفاع رخ داده و در نهایت اثری است که بر سیستم کارستی می‌گذارد. ضریب فشردگی از ارتفاع ۳۰۰۰ متر به بالا، بر اثر افزایش ارتفاع (۱/۲ درازای هر ۱۰۰۰ متر ارتفاع) بیشتر می‌شود؛ یعنی دولین‌هایی که نقش سیرک-دولین را داشته‌اند، شکل کشیده‌تری نسبت به دولین‌هایی دارند که فقط انحلال در دماهای بالاتر نقش مؤثری در شکل‌گیری آن‌ها داشته است. همچنین تفسیر این‌گونه داده‌ها در جدول (۵) دال بر این است که به‌جز دولین‌های واقع در ارتفاع بین ۵۰۰ تا ۱۳۰۰ متر که با افزایش ارتفاع شکل دایره‌ای کامل‌تری به خود می‌گیرند، در بقیه طبقات ارتفاعی با افزایش ارتفاع، شکل دولین از دایره‌ای به بیضی متمایل‌تر می‌شود. ضریب فشردگی نیز در تمامی طبقات ارتفاعی غیر از طبقه ارتفاعی ۵۰۰ تا ۱۳۰۰ متر، روند افزایشی داشته است. بیشترین ضریب تبیین اثرگذاری ارتفاع بر ضریب فشردگی دولین، در طبقه ارتفاعی ۳۰۰۰ تا ۳۷۰۰ متر (۰/۸۷) است و مقدار اثرگذاری ارتفاع بر افزایش ضریب فشردگی در این طبقه (۰/۱) به ازای هر ۱۰۰۰ متر) بود. ضریب بین دامنه اثرگذاری ارتفاع بر تغییر ضریب فشردگی بین ۰/۰۰۱ تا ۰/۰۰۶ متغیر بود. ضریب تبیین اثرگذاری ارتفاع بر این متغیر بین ۰/۵۲ تا ۰/۸۷ نوسان داشته است.

تفسیر نتایج تغییرات عمق دولین‌ها با توجه به ارتفاع نشان می‌دهد که ضریب تبیین روابط خطی بین عمق دولین با ارتفاع، عدد مطلوبی نیست؛ ولی ضرایب تبیین روابط خطی بین میانگین عمق دولین در طبقات ارتفاعی بافاصله ۱۰۰ متر با متغیر ارتفاع، مقبول‌تر می‌گردد (جدول ۶)؛ با این تفاوت که مقدار تغییرات در تمامی سطوح ارتفاعی، یکسان نیست و با توجه به اینکه این سطوح ارتفاع در همه بخش‌های زاگرس به‌احتمال‌قوی در طول دوره یخچالی تحت تأثیر فرایندهای یخچالی قرار داشته‌اند؛ می‌توان چنین تغییراتی را ناشی از سیرک-دولین بودن عوارض دانست. یافته‌های قربانی و اوتق (۱۳۹۱)، در بررسی دولین‌های شاهو در کردستان، نشان می‌دهد که دولین‌ها در دوران یخچالی نقش دوگانه سیرک-دولین داشته‌اند که می‌تواند دال بر اثر شرایط یخچالی کواترنری بر عمق بیشتر دولین‌ها باشد.

نتیجه‌گیری

با توجه به اثرگذاری دمای کم بر سرعت انحلال سنگ‌های آهکی، چنین انتظار می‌رود که در راستای تحولات اقلیمی و تغییرات دمایی کواترنری و تأثیر ارتفاع بر دمای محیط، تغییرات مرز سیستم کارستی-فیکاسیون را همانند تغییر برف‌مرز دائمی بتوان ردیابی نمود. تجزیه و تحلیل خصوصیات فیزیوگرافی دولین‌های زاگرس در این ارتباط، دال بر این است که برخلاف

قربانی، محمدصدیق؛ اونق، محمد. (۱۳۹۱). بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی کوتاه‌تر بر تحول کارست شاهو شمال غرب کرمانشاه. کنفرانس ملی پژوهش‌های کاربردی منابع آب ایران، ۳۰۰-۳۱۲.

قربانی، محمدصدیق؛ اونق، محمد. (۱۳۹۱). پهنه‌بندی تحول و حساسیت کارست با استفاده از مدل رگرسیون خطی چندمتغیره در منطقه کارستی شاهو. پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، شماره ۱، ۱۹-۳۲.

قربانی، محمدصدیق؛ محمودی، فرج‌الله؛ یمانی، مجتبی؛ مقیمی، ابراهیم. (۱۳۸۹). نقش تغییرات اقلیمی کوتاه‌تر در تحول ژئومورفولوژیکی فروچاله‌های کارستی (مطالعه موردی: ناهمواری‌های شاهو، غرب ایران). پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، شماره ۷۴، ۱۶-۱.

معمد، احمد. (۱۳۸۲). جغرافیای کوتاه‌تر، انتشارات سمت تهران، چاپ اول.

مقیمی، همایون. (۱۳۹۱). هیدرولوژی کارست. انتشارات دانشگاه پیام نور تهران، چاپ اول.

نوجوان، محمدرضا؛ شاهزیدی، سمیه سادات؛ رامشت، محمدحسین. (۱۳۹۶). ژئومورفولوژی کارست، انتشارات سمت، چاپ اول.

ولایتی، سعداله. (۱۳۹۴). کارست ژئومورفولوژی. انتشارات صحرا، چاپ اول.

ویلیامز، پاول. (۲۰۰۸). کارست و غارهای میراث جهانی. ترجمه رضا خوش‌رفتار، انتشارات دانشگاه زنجان، (۱۳۹۰).

Baryakh, A. A., & Fedoseev, A. K. 2011. Sinkhole formation mechanism. *Journal of Mining Science*, 47(4), 404-412.

Gomez, M., Liedl, R. Stefan. C. 2019. A New GIS-Based Model for Karst Dolines Mapping Using LiDAR; Application of a Multidepth Threshold Approach in the Yucatan Karst, Mexico. *Remote sensing journal*. 10. 3390. pp 1-14.

Gregorič, A. C. (2021). Typical Doline and Surface Landforms of Kras (Slovenia): Karst Landscape Features and Possibilities for Their Conservation. *Geoheritage*, 13(2), 1-9.

Hyland, S. E. 2005. Analysis of sinkhole susceptibility and karst distribution in the northern Shenandoah Valley, Virginia: implications for low impact development (LID) site suitability models (Doctoral dissertation, Virginia Tech).

Mihevč, A. 1998. Dolines, Their Morphology and Origin: Case Study: Dolines from the Kras, West Slovenia (the Škocjan Karst). *Comitato Glaciologico Italiano*.

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.

Veress, M. (2020). The Evolution and Development of Solution Dolines with Horizontal Growth and the Processes of Their Floors: A Case Study on the Plate-Shaped Dolines of the Bükk Mountains, Aggtelek Karst and Pádis Plateau. *Earth*, 1(1), 49-74.

Waltham, A. C. & Fookes, P. G. 2003. Engineering classification of karst ground conditions. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 36(2), 101, 118.

ثروتی، محمدرضا؛ رستمی، مژگان؛ نصرتی، کاظم؛ احمدی، محمود. (۱۳۹۳). شناخت عوامل مؤثر بر پراکنش و رخداد فروچاله‌ها در منطقه گازورخانی کرمانشاه با استفاده از رگرسیون لجستیک. *فصلنامه جغرافیا و توسعه*، شماره ۳۶، ۱۸۱-۱۹۴.

جعفریگلو، منصور؛ یمانی، مجتبی؛ عباس نژاد، احمد؛ زمان‌زاده، سید محمد؛ ناظوری، سمیه. (۱۳۹۳). بازسازی برف‌مرزهای یخچالی کوتاه‌تر در کوهستان بیدخوان (استان کرمان). *فصلنامه علمی پژوهشی بین‌المللی انجمن جغرافیایی ایران*، شماره ۴۰، ۹۳-۱۰۷.

جعفری، غلام‌حسن؛ حضرتی، نسری. (۱۳۹۷). بازسازی برف‌مرز کوتاه‌تری واحد ژئومورفیک زاگرس ایران، فصلنامه جغرافیا و پایداری محیط، شماره ۲۸، ۳۳-۴۹.

حریریان، محمود. (۱۳۶۹). کلیات ژئومورفولوژی ایران. انتشارات دانشگاه آزاد اسلامی.

رضایی‌مقدم، محمدحسین؛ قدری، محمدرضا. (۱۳۹۰). تحلیل‌های کمی دولین‌ها در زمین‌های کارستی (مطالعه موردی منطقه تخت سلیمان). *فصلنامه پژوهش جغرافیا و برنامه‌ریزی*، شماره ۳۵، ۱۱۳-۱۳۵.

رضایی‌مقدم، محمدحسین؛ قدری، محمدرضا؛ مؤید، محسن. (۱۳۸۹). بررسی دولین‌های منطقه تخت سلیمان به روش تحلیل خوشه‌ای. *فصلنامه برنامه‌ریزی و آمایش فضا*، شماره ۴، ۲۱۱-۱۹۰.

زاهدی، مجید؛ بیاتی خطیبی، مریم. (۱۳۹۳). هیدرولوژی. انتشارات سمت، چاپ چهارم.

زمان‌زاده، سید محمد؛ پاریزی، اسماعیل؛ امینی، مهدی. (۱۳۹۷). مدل‌سازی مؤلفه‌های مورفومتری دولین‌ها و ارائه شاخص بعد فراکتال در مطالعه گسل‌های مناطق کارستی (مطالعه موردی: مناطق کارستی بین پروا و شاهو). *فصلنامه پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی*، شماره ۴، ۱-۱۶.

زمردیان، محمدجعفر. (۱۳۸۵). ژئومورفولوژی ایران (فرآیندهای اقلیمی و دینامیک‌های بیرونی). انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد، جلد ۲.

شریعتی، شهرام؛ اصغری، محبوبه؛ ناصری، حمیدرضا؛ کهنسال قدیم وند، نادر. (۱۳۹۸). استفاده از ژئوشیمی و هیدروژئوشیمی برای ارزیابی توسعه کارست سازند لار در محدوده سد گلود. *نشریه پژوهش‌های دانش زمین*، شماره ۳۸، ۱۴۸-۱۶۴.

شکر بهجتی، سمیرا؛ اسفندیاری، فریبا؛ رستمی، عباس. (۱۴۰۰). شناسایی و بررسی خصوصیات مورفومتریک و خاک دولین‌ها در شمال ایران (مطالعه موردی: منطقه گراژین از جنگل آزمایشی خیرود کنار، نوشهر مازندران). *پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی*، (۱۱)۰، ۱-۱۹.

عابدینی، موسی؛ چراغی کامرانی، معصومه؛ اقبال، محمدرضا. (۱۳۹۴). بررسی عوامل مؤثر در شکل‌گیری فروچاله‌ها در سازندهای کارستی با استفاده از رگرسیون خطی چندمتغیره در محیط ArcGIS و SPSS (مورد مطالعه: ناهمواری‌های بیستون-پراو). *فصلنامه جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی*، شماره ۴، ۴۱-۶۲.

علائی‌طالقانی، محمود. (۱۳۹۱). ژئومورفولوژی ایران. انتشارات قومس تهران، چاپ هفتم.

علائی‌طالقانی، محمود؛ رحیم‌زاده، زهرا. (۱۳۸۹). بررسی تحول کارست در منطقه زاگرس. *کنفرانس ملی پژوهش‌های کاربردی منابع آب ایران*، ۳۱۳-۳۲۳.

علیزاده، امین. (۱۳۹۳). اصول هیدرولوژی کاربردی. انتشارات دانشگاه امام رضا (ع)، چاپ ۳۹. علیجانی، بهلول. (۱۳۸۲). آب هوای ایران، تهران، انتشارات پیام نور.

قاسمی‌فر، الهام؛ ناصرپور، سمیه. (۱۳۹۰). پهنه‌بندی اقلیمی ناحیه زاگرس، انتشارات سپهر، شماره ۸۹، ۶۰-۵۴.

قبادی، محمدحسین. (۱۳۸۸). زمین‌شناسی مهندسی کارست، انتشارات دانشگاه بوعلی سینا همدان، چاپ اول.