

A Comparison of Morphometry and the Effects of Formation Mechanisms on the Morphometry of Gypsum and Limestone Sinkholes

Hamideh Gholamhaydari ¹, Mozghan Entezari ² *

1- PhD Candidate Natural geography department, Geography and planning Faculty, university of Isfahan, Isfahan, Iran

2- Associate Professor, Natural geography department, Geography and planning Faculty, university of Isfahan, Isfahan, Iran

(*Corresponding Author Email: entezary54@yahoo.com)

Abstract:

The presence of soluble formations promotes the formation of karstic forms. Among the most important types of these forms are sinkholes. Since the Gachsaran Formation in Jaber and Maroon plains comprise the gypsum layers, the gypsum sinkholes have occurred inside them and the karst zones of Parau and Shahou heights in Kermanshah Province have also formed on the carbonate layers. The field studies confirm that there are major differences in the morphometry and formation mechanism of gypsum and calcareous sinkholes. The present study aimed to investigate the effect of the formation mechanism of these phenomena on their morphometry and the differences and similarities of the two phenomena (gypsum and Calcareous sinkholes). In this study, the parameters of the sinkholes, including the general shape of the sinkholes, diameter, depth, slope, perimeter, and the area of each sinkhole were collected. According to the Basu method, the gypsum sinkholes are categorized as elongated and bowl-shaped types, and on the basis of the Switch method, they are classified as bowl-shaped, pit-like, and funnel-shaped sinkholes. While another investigation conducted on the calcareous sinkholes indicates that these phenomena are mainly categorized in the form of oval and elongated sinkholes, and some of them are formed in the bowl-shaped types (based on the Basu Method). Besides, according to the Switch method, they are classified as bowl-shaped forms as well. Then, the relationship between these components was evaluated by using the multivariate linear regression statistical method and stepwise multiple linear regression analysis. One of the important results in this study was the direct relationship between the morphometry of the shapes and their mechanism of formation. The plastic property of the Gachsaran Formation is the cause of the placement of this formation in synclines. It causes variation in the position of gypsum layers. So, gypsum layers had different places and different positions. The relationship between gypsum layers and effective water flows and the very high rate of dissolution of gypsum (compared to lime) causes gypsum sinkholes to have different mechanisms of formation and variation in form, even in a specific study area. As a result, modeling for gypsum sinkholes is more complex than limestone sinkholes.

Introduction:

Karst is a geomorphic and hydrological system that is formed by the dissolution of soluble rocks such as limestone, dolomite, and gypsum (Eziot et al., 2014). Gypsum and anhydrite are among the rock types which can be karstified easily and quickly (White, 1988). There is a close relationship between karst geomorphology and its evolution so that karst morphology phenomena are abundant and developed in the area (Ghobadi 2009, Karimi 2010). Generally, four different mechanisms are

characterized for the formation of sinkholes. The mechanisms are solutions from above, collapse from the bottom, soil transport, and removal of buoyant support. Sometimes the formation of the sinkholes is due to a combination of different mechanisms. It seems that the above-mentioned mechanisms can also be applied to gypsum sinkholes; the only difference is the formation speed of the landform (Gunay, 2002). This research attempted to investigate the structural and morphometric differences and similarities between the gypsum and calcareous sinkholes and to compare their mechanisms of formation.

Methodology:

Due to the considerable difference between the dimensions of the gypsum and calcareous sinkholes in this study, two methods were applied to study and extract the sinkhole forms. In a study carried out by Zamanzadehh et al. (2019), the sinkholes of the study areas were extracted based on DEM10 and CCLs methods. Given the much smaller size of gypsum karstic sinkholes in comparison to the calcareous sinkholes, the CCLs method cannot be used to investigate the morphometric features of the gypsum sinkholes in the study areas of Maroon and Jaber plains. Thus, field studies are the only way to identify these sinkholes. After the field investigation and measuring the characteristics of sinkholes in both study areas, the required parameters were prepared by SPSS software.

Results:

In this research, Basu and Switch methods were used to determine the morphology of the sinkholes. According to the calculations, most of the sinkholes of the Maroon plain are categorized in elongated forms, and the most frequent sinkholes of the Jaber plain are of the circular category, while in Zamanzadehh et al. (2019), based on the Basu method, the least and the most frequent sinkholes are of circular and oval types, respectively. Also, some of the sinkholes are classified as elongated ones. Using the Switch method, in the Maroon and Jaber plains, 14% of the sinkholes are of pit-like type, 13% of them are funnel-shaped, and 73% of them are categorized as bowl-shaped, while in the case of calcareous sinkholes (Zamanzadehh et al., 2019), all of them are bowl-shaped. However, based on the studies and observations, it should be noted that the vicinity of marl and gypsum, and marl collapse within the gypsum sinkholes can cause major changes in the morphometry of the sinkholes and disrupt these assumptions.

Conclusion:

According to the results of the conducted research on the gypsum sinkholes, the components of the area with large diameter, the area with small diameter, a deep area, and a large diameter demonstrate the most significant correlation. The results of Zamanzadehh et al. (2019) confirm that the components of the perimeter with large diameter, small diameter with perimeter, large diameter with the area, an area with perimeter, and small diameter with an area have the most significant correlation.

The results of simple regression analysis of second and third-degree equations between morphometric parameters of gypsum sinkholes show that there is the highest correlation rate among some parameters such as perimeter and area, small diameter and large diameter of gypsum sinkholes, while the obtained results of Zamanzadehh et al. (2019) confirms that the maximum significant relationship is between the area and perimeter components. The results of stepwise multiple linear regression analysis among the morphometric components of the sinkholes show that the highest

quantity of the coefficient of determination is related to the area, small diameter and large diameter, and depth, and the lowest quantity of the coefficient of determination is related to the slope with depth, and large and small diameters. However, according to Zamanzadehh et al. (2019), the maximum quantity of significant relationship is related to perimeter parameter with the parameters of large and small diameters, and the least quantity of significant relationship is related to the components of the slope with depth, small diameter, and large diameter.

The reason for the difference between the dimensions of calcareous and gypsum sinkholes can be owing to the thickness of gypsum and calcareous layers. The presence of the limestone on the crest of the elevations and the existence of gypsum sinkholes in the synclines, as well as the thickness of calcareous layers, compared to the gypsum layers, and the difference in dissolution rate of these two layers are the main factors behind the differences in the formation mechanism of these features. The presence of the creeks on the formations and gypsum layers of the Maroon plain form the elongated sinkholes. In the Jaber plain, where most of the sinkholes are formed on the knick line, the intersection point of a hillside concentrated flow and the gypsum layer has created circular sinkholes. However, it should be noted that the presence of gypsum layers with marl layers and their vicinity changes the appearance of these sinkholes rapidly (due to the collapse of marl) and basically influences their morphometry. The dissolution is the most important factor for the formation of calcareous sinkholes, and the fault factor is the only parameter that has caused a high proportion of oval and elongated sinkholes in comparison with circular sinkholes. However, due to the plasticity and thickness of the gypsum layers in the Gachsaran Formation, the effects of tectonic activities on these layers are damping, and the faults do not affect the formation of the sinkholes. One of the most significant reasons that have led to the higher correlations of calcareous sinkholes to gypsum sinkholes stems from the formation type of them.

Keywords: Modeling, Elongation Coefficient, Regression Analysis, Maroon Plane, Jaber Plane.

References:

- Basso, A., Bruno, E., Parise, M., & Pepe, M. (2012). Morphometric Analysis of Sinkholes in a Karst Coastal Area of Southern Apulia (Italy). *Journal of Environmental Earth Sciences*, 70(6), 1-16.
- Bondesan, A., Meneghel, M., & Sauro, U. (1992). Morphometric Analysis of Dolines. *International Journal of Speleology*, 21(1), 1-55.
- Bruno, E., Calcaterra, D., & Parise, M. (2008). Development and Morphometry of Sinkholes in Coastal Plains of Apulia, Southern Italy. Preliminary Sinkhole Susceptibility Assessment. *Journal of Engineering Geology*, 99(3-4), 198-209.
- Chen, H., Oguchi, T., & Wu, P. (2018). Morphometric Analysis of Sinkholes Using a Semi-Automatic Approach in Zhijin County, China. *Arabian Journal of Geoscience*, 11(15), 1-14.
- Cvijić, J. (1893). *Das Karstphänomen: Versuch Einer Morphologischen Monographie*. Stuttgart.
- Ford, D., & Williams, P. D. (2013). *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. London: John Wiley & Sons.
- Ghobadi, M. (2009). *Karst Engineering Geology*. Hamedan: Bu Ali Sina University Publications.
- Gutiérrez, F., Parise, M., De Waele, J., & Jourde, H. (2014). A Review on Natural and Human-Induced Geohazards and Impacts in Karst. *Journal of Earth-Science Reviews*, 138, 61-88.
- Jahanfar, A., Bhrami, Sh., & Zangene Asadi, M. (2018). Morphometric and Morphological Analysis

- in the Calcareous Mass of Perav and Bistoon. *Journal of Geographic Space*, 18(63), 165-180.
- Karimi, H. (2010). *Relationship Between Construction System and Karsting*. The Second International Symposium on Karstic Water Resources in Tehran, Iran.
 - Montjane, A. K., Tshibubuze, A., Woldai, T., & Heath, L. (2020). The Influence of Geological Fractures on Karstic Sinkhole Development in Eastern Areas of Centurion, South Africa. *Journal of Environmental Earth Sciences*, 79(21), 1-19.
 - Ozdemir, A. (2015). Sinkhole Susceptibility Mapping Using a Frequency Ratio Method and GIS Technology near Karapınar, Konya-Turkey. *Procedia Earth and Planetary Science*, 15, 502-506.
 - Ozyurt, N. N., Lutz, H. O., Hunjak, T., Mance, D., & Roller-Lutz, Z. (2014). Characterization of the Gacka River Basin Karst Aquifer (Croatia): Hydrochemistry, Stable Isotopes and Tritium-Based Mean Residence Times. *Journal of Science of the Total Environment*, 487, 245-254.
 - Panno, S. V., & Luman, D. E. (2018). Characterization of Cover-Collapse Sinkhole Morphology on a Groundwater Basin-Wide Scale Using Lidar Elevation Data: A New Conceptual Model for Sinkhole Evolution. *Journal of Geomorphology*, 318, 1-17.
 - Rezaemoghadam, M., & Ghadri, M. (2011). A Quantitative Analysis of Sinkholes in Karstic Areas (Case Study: Takht Soleiman Area). *Journal of Geography & Planning*, 35, 113-135.
 - Waltham, T., Bell, F. G., & Culshaw, M. (2007). Sinkholes and Subsidence: Karst and Cavernous Rocks in Engineering and Construction. *Environmental and Engineering Geoscience*, 13(1), 83-84.
 - Zaman Zade, M., Parizi, E., & Amini, M. (2018). Modelling of the Morphometric Parameters of the Sinkholes and Presenting Fractal Indices in Study of Karstic Zone Faults, (Case Studies: Karstic Zones Between Perav and Shahou). *Journal of Quantitative Geomorphology Studies*, 6(4), 1-16.



پیش‌درآمدی بر مقایسه مورفومتری و تأثیر مکانیسم شکل‌گیری بر مورفومتری فروچاله‌های گچی و آهکی

حمیده غلام‌حیدری، دانشجوی دکتری گروه جغرافیای طبیعی، جغرافیا و برنامه‌ریزی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران
h.heidary.5961@gmail.com

مژگان انتظاری*، دانشیار گروه جغرافیای طبیعی، جغرافیا و برنامه‌ریزی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران
entezary54@yahoo.com

چکیده

وجود سازندهای انحلال‌پذیر زمینه‌ساز شکل‌گیری اشکال کارستی است. یکی از مهم‌ترین این اشکال، فروچاله‌ها هستند. لایه‌های گچی سازند گچساران در دشت جابر و دشت مارون بستر شکل‌گیری فروچاله‌های گچی هستند و مناطق کارستی ارتفاعات پرآب و شاهو در استان کرمانشاه نیز در بستر لایه‌های کربناته شکل گرفته‌اند. مطالعات میدانی انجام‌شده مؤید این مسئله است که تفاوت‌های عمده‌ای در مورفومتری و سازوکار تشکیل فروچاله‌های گچی و آهکی وجود دارد؛ در این پژوهش سعی شده است تأثیر مکانیسم شکل‌گیری این فروچاله‌ها بر مورفومتری آنها بررسی و تفاوت‌ها و شباهت‌های این دو پدیده مطالعه شود. در این بررسی با انجام مطالعات میدانی، پارامترهای ظاهری فروچاله‌ها از جمله فرم کلی فروچاله‌ها، قطر، عمق، شیب دیواره، محیط و مساحت هر فروچاله برداشت شد؛ سپس با داده‌های موجود و براساس روش باسو^۱ فروچاله‌های گچی در دسته فروچاله‌های کشیده و کاسه‌ای شکل و براساس روش سویچ^۲ در دسته کاسه‌ای، چاله‌مانند و قیفی شکل قرار گرفت؛ این در حالی است که در مطالعه‌های دیگر که درباره فروچاله‌های آهکی انجام شده است، فروچاله‌های آهکی براساس روش باسو عمدتاً در دسته فروچاله‌های بیضی‌شکل و کشیده و تعدادی نیز در دسته فروچاله‌های کاسه‌ای و براساس روش سویچ نیز این فروچاله‌ها در دسته کاسه‌ای شکل قرار گرفتند. در ادامه با استفاده از روش آماری رگرسیون خطی چندمتغیره و تحلیل رگرسیون خطی چندگانه گام‌به‌گام^۳، رابطه بین این مؤلفه‌ها ارزیابی شد. از نتایج مهمی که در این مطالعه به دست آمده، ارتباط مستقیم بین مورفومتری اشکال و سازوکار تشکیل آنهاست. خاصیت پلاستیکی سازند گچساران، عامل قرارگیری این سازند در ناودیس‌هاست که سبب تنوع در موقعیت قرارگیری لایه‌های گچ نسبت به جریان‌های مؤثر آب می‌شود؛ همچنین میزان بسیار زیاد انحلال گچ نسبت به آهک باعث می‌شود فروچاله‌های گچی سازوکار مختلف شکل‌گیری و تنوع در فرم، حتی در یک منطقه مطالعاتی خاص داشته باشند و در نتیجه مدل‌سازی برای فروچاله‌های گچی را نسبت به فروچاله‌های آهکی پیچیده‌تر کند.

واژه‌های کلیدی: مدل‌سازی، ضریب کشیدگی، آنالیز رگرسیون، دشت مارون، دشت جابر

1. A. Basso
2. Cvijić
3. Stepwise

*نویسنده مسئول

Copyright©2021, University of Isfahan. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0>), which permits others to download this work and share it with others as long as they credit it, but they can't change it in any way or use it commercially.

Doi: [10.22108/GEP.2021.126632.1385](https://doi.org/10.22108/GEP.2021.126632.1385)

مقدمه

واژه کارست به مجموعه‌ای از فرایندهای زمین‌شناسی و پدیده‌های حاصل از انحلال سنگ‌های انحلال‌پذیر گفته می‌شود که با تجزیه و انحلال ساختمان این سنگ‌ها، رژیم آب‌شناختی بی‌همتایی شکل می‌گیرد و به تشکیل لندفرم‌های ویژه‌ای می‌انجامد (وزارت نیرو- تماب، ۱۳۷۳). کارست یک سیستم ژئومورفیک و هیدرولوژیک است که با انحلال سنگ‌های انحلال‌پذیر مانند سنگ آهک، دولومیت و ژپس شکل می‌گیرد (Ozyurt et al., 2014: 30); به بیانی کارست نوعی چشم‌انداز است که در سنگ‌های کربناته (آهک، دولومیت و مرمر) یا تبخیری (ژپس، انیدریت و سنگ نمک) تشکیل می‌شود (Ford and Williams, 2013: 2).

باید دانست که توسعه یک سیستم کارستی به عوامل متعددی مانند اقلیم، لیتولوژی و عوامل ساختمانی (چین، گسل و درزه) بستگی دارد (زمان‌زاده و همکاران، ۱۳۹۷: ۲). جریان آب و ساختارهای تکتونیکی از مهم‌ترین عوامل کارستی شدن سنگ‌های انحلال‌پذیر هستند (قبادی، ۱۳۸۸: ۴۵). شش نوع فروچاله از نظر نحوه تشکیل و چهار مکانیسم مختلف برای تشکیل این فروچاله‌ها را نیز والتام و فوکس^۱ (2005) معرفی کرده‌اند. این شش نوع فروچاله، فروچاله‌های انحلالی^۲، رمبشی^۳، ریزشی^۴، دفن‌شده^۵، پوش‌سنگی^۶ و بلعشی^۷ و چهار مکانیسم تشکیل آنها، انحلال از بالا^۸، ریزش از زیر^۹، انتقال خاک‌های رویین^{۱۰} و برداشته‌شدن نیروی نگهدارنده^{۱۱} هستند. براساس بررسی‌های انجام‌شده روی فروچاله‌ها می‌توان گفت میان ژئومورفولوژی کارست و تکامل آن ارتباط نزدیکی وجود دارد (کریمی، ۱۳۸۹: ۲); به بیانی فرم فروچاله‌ها ارتباط مستقیمی با نحوه تشکیل آنها دارد؛ اما باید به این نکته نیز توجه داشت که گاهی مکانیسم‌های تشکیل فروچاله‌ها، ترکیبی از مکانیسم‌های مختلف است که این تداخل مکانیسم تشکیل بر مورفومتری فروچاله‌ها نیز تأثیر خواهد داشت. مطالعه مورفومتری فروچاله‌ها امکان یک تحلیل کمی از محیط‌های کارستی را فراهم می‌کند و مقایسه پارامترهای متنوع فروچاله‌ها نیز ممکن است نتایج غیرمنتظره داشته باشد و به ارائه فرضیاتی درباره نحوه تکامل و دینامیک ژئواکوسیستمی کارستی منجر شود (Bondesan et al., 1992: 1).

1. Waltham & Fookes
2. Solution sinkholes
3. Collaps sinkholes
4. Dropout sinkholes
5. Buried sinkholes
6. Caprock sinkholes
7. Suffosion sinkholes
8. Solution from above
9. Collaps from below
10. Soil transport
11. Removal of buoyant support

مطالعات گوناگون با اهداف مختلفی دربارهٔ فروچاله‌ها انجام شده است که در اینجا به تعدادی از مطالعات مرتبط با این پژوهش اشاره می‌شود.

در بررسی مورفومتری فروچاله‌های بخش جنوبی آفولیا که در جنوب غربی ایتالیا واقع شده، مشخص شده است وجود گسل‌ها بر میزان تکامل و شکل‌گیری فروچاله‌ها و همچنین شکل ظاهری آنها تأثیر دارد (Basso et al., 2012). همچنین می‌توان به پژوهشی اشاره کرد که در فلات اوبروک دربارهٔ فروچاله‌ها انجام شده است. در این مطالعه اینگونه استنباط شده است که در شکل‌گیری و توزیع فروچاله‌ها عوامل زمین‌شناسی، ارتفاع، جهت شیب، تراکم گسل، فاصله از گسل و شیب و سطح آب زیرزمینی نقش عمده‌ای ایفا می‌کنند (Ozdemir, 2015: 502).

در یک مطالعه پژوهشگران فروچاله‌های منطقهٔ گازورخانی کرمانشاه را بررسی و مورفومتری فروچاله‌ها را مطالعه کردند و این پدیده را در دسته‌های ساده، مرکب و پیچیده قرار دادند. بررسی‌ها نشان داد این پدیده در شیب بالاتر از ۲۰ درجه تشکیل نخواهد شد (ثروتی و همکاران، ۱۳۹۳: ۱۹۴).

در مطالعه‌ای دیگر دربارهٔ مناطق کارستی جنوب غربی چین با استفاده از یک روش شناسایی و اندازه‌گیری به‌وسیلهٔ DEM مشتق‌شده از تصاویر ASTER و STRM و نقشه‌های توپوگرافی، بر این مسئله تأکید شده که شکل کلی فروچاله‌ها تابع خطوط گسل است (Hao Chen et al., 2018: 412).

در پژوهشی که در بررسی و تکامل فروچاله‌ها با تصاویر لیدار انجام شده، الگویی ارائه شده است که براساس آن از ابتدای شکل‌گیری فروچاله‌ها به‌واسطهٔ وجود شکاف در بستر سنگ تا فروریزش آن را شبیه‌سازی کرده‌اند (Panno and Luman, 2018: 1).

پژوهشگران در خط ساحلی آپولیا در جنوب ایتالیا، اشکال کارستی را براساس تحول و تکامل و مورفومتری با استفاده از پارامترهای عمق، طول و عرض بررسی کردند. مسئله‌ای که در این پژوهش بر آن تأکید شده، تعامل بین محیط‌زیست انسانی و این اشکال کارستی و آثار منفی این پدیده‌ها بر سازه‌های انسان‌ساخت است. در این پژوهش به اهمیت مطالعهٔ دقیق زمین‌شناسی و ژئومکانیکی پیش از ساخت‌وساز و تعمیر و پرکردن حفره‌ها در صورت مجاورت با سازه‌ها اشاره شده است (Bruno et al., 2019: 198).

در مطالعه‌ای دربارهٔ بهنهٔ دولومیتی واقع در منطقهٔ مطالعاتی سنتوریون در آفریقای جنوبی، عامل اصلی شکل‌گیری و تکامل فروچاله‌های منطقه، وجود شکستگی‌ها و درزهای ناشی از فعالیت‌های تکتونیک و تسریع حرکت سیالات در این شکاف‌ها معرفی شده است (Montjane et al., 2020: 1).

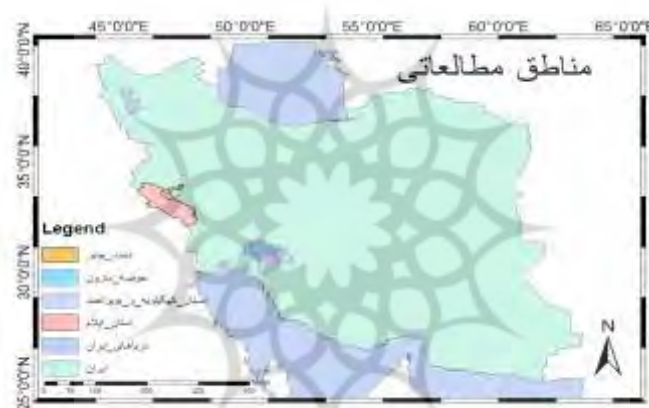
برای شناخت عوامل مؤثر بر پراکندگی و وقوع فروچاله‌های دشت کرمانشاه از روش‌های کمی Curvature, RTP استفاده شده و نتایج نشان داده است که متأثر از گسل فروچاله‌های مرکبی شکل گرفته‌اند که ۸۹ درصد کل فروچاله‌های منطقه را شامل می‌شود. بنا بر نتایج این پژوهش عامل اصلی شکل‌گیری فروچاله‌های این منطقه، وجود گسل و میزان گسلش است (حیدری و همکاران، ۱۳۹۹: ۲۱۵).

در پژوهش حاضر با توجه به موقعیت قرارگیری فروچاله‌های گچی و تأثیر مستقیم آنها بر سازه‌ها، تأسیسات و سکونتگاه‌ها و با در نظر گرفتن این مسئله که فروچاله‌های گچی به دلیل ابعاد کوچک قابلیت بررسی با روش‌های

سنجش از دور را ندارند، سعی شده است مناسب‌ترین پارامترها برای مدل‌سازی تعیین شوند؛ به این وسیله می‌توان این پدیده‌ها را که فقط از راه بازدیدهای میدانی قابلیت بررسی دارند، براساس مدل ارائه‌شده بررسی کرد تا در نهایت تفاوت‌ها و شباهت‌های موجود در مورفومتری فروچاله‌های گچی و آهکی و میزان تأثیر نقش مکانیسم تشکیل فروچاله‌ها در مورفومتری این دو نوع فروچاله بررسی شود.

منطقه پژوهش

در این پژوهش دو منطقه دشت مارون و دشت جابر در محدوده سازند گچساران برای بررسی فروچاله‌های گچی مطالعه شده‌اند. دشت مارون واقع در حوضه مارون، در بخش چین‌خورده ساده رشته‌کوه زاگرس در استان‌های خوزستان و کهگیلویه و بویراحمد، در طول شرقی ۵۰ درجه و ۲۹ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۴۸ دقیقه و عرض شمالی ۳۰ درجه و ۳۰ دقیقه و ۳۱ درجه و ۲۰ دقیقه و در نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ بهبهان قرار دارد (مؤمنی‌پور، ۱۳۹۵: ۳۵). دشت جابر بدره واقع در طول جغرافیایی ۴۶ درجه و ۶ دقیقه تا ۴۷ درجه و ۱۷ دقیقه شمالی و عرض جغرافیایی ۳۳ درجه و ۱۶ دقیقه شمالی تا ۳۳ درجه و ۳۸ دقیقه شرقی در شمال غربی استان ایلام قرار گرفته است (شکل ۱).



شکل ۱. محدوده‌های مطالعه‌شده گچ (دشت‌های مارون و جابر)

Fig. 1. Study areas (Gypsum), (Maroon and Jaber planes)

منطقه سوم (پرآو) با وسعت ۷۲/۳۴ کیلومترمربع و موقعیت $۴۷^{\circ} ۱۳'$ تا $۴۷^{\circ} ۲۰'$ طول شرقی و $۳۴^{\circ} ۲۴'$ تا $۲۸'$ عرض شمالی، منطقه چهارم (خالک) با مساحت ۱۰۲/۵۹ کیلومترمربع و موقعیت $۴۷^{\circ} ۰۵'$ تا $۴۷^{\circ} ۱۳'$ طول شرقی و $۳۴^{\circ} ۲۸'$ تا $۳۴^{\circ} ۳۳'$ عرض شمالی و منطقه پنجم (کندوله) با مساحت ۳۶ کیلومترمربع و موقعیت $۴۷^{\circ} ۰۱'$ تا $۴۷^{\circ} ۰۶'$ طول شرقی و $۳۴^{\circ} ۳۳'$ تا $۳۴^{\circ} ۳۶'$ عرض شمالی به ترتیب در شرق، شمال شرق و شمال شهرستان کرمانشاه واقع شده‌اند. منطقه ششم (بخش شمالی شاهو) نیز با وسعت ۲۴۵/۸۱ کیلومترمربع و موقعیت $۴۶^{\circ} ۲۵'$ تا $۴۶^{\circ} ۳۶'$ طول شرقی و $۳۴^{\circ} ۵۵'$ تا $۳۵^{\circ} ۰۳'$ عرض شمالی در شمال شهرستان جوانرود قرار دارد (شکل ۲).

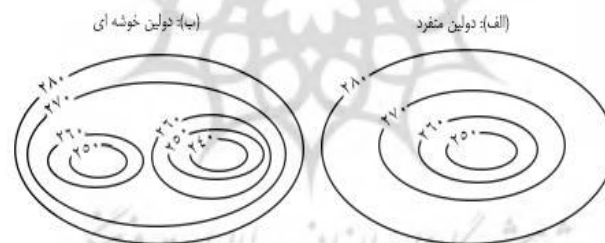


شکل ۲. محدوده‌های مطالعه‌شده (آهکی) (زمان‌زاده و همکاران، ۱۳۹۷: ۴)

Fig. 2. Location of study areas (lime) (Zamanzadeh et al., 2018)

روش‌شناسی پژوهش

با توجه به تفاوت بسیار زیادی که بین ابعاد فروچاله‌های گچی و آهکی در این مطالعه وجود دارد، از دو روش متفاوت برای بررسی و استخراج شکل و فرم فروچاله‌ها استفاده شده است. در پژوهش زمان‌زاده و همکاران (۱۳۹۷)، فروچاله‌های مناطق مطالعه‌شده براساس DEM ده متر و روش CCLS^۱ استخراج شد. استخراج اتوماتیک فروچاله‌ها با استفاده از روش CCLS را نخستین بار لیانگ و دیو^۲ (۲۰۱۳) ابداع کردند. در این روش برای استخراج فروچاله‌ها، نخست خطوط کانتور بسته‌ای که دست‌کم یک منحنی میزان دیگر را دربرمی‌گیرد و ارتفاع آن بیش از منحنی یا منحنی‌های داخلی است، به مثابه فروچاله و بیرونی‌ترین خط منحنی میزان را به مثابه مرز آن در نظر می‌گیرند (شکل ۳).



شکل ۳. نمایش فروچاله‌های منفرد و خوشه‌ای روی خطوط کانتور بسته (Liang et al., 2014: 1075)

Fig. 3. Single and clustered sinkholes on the contour lines (Liang et al., 2014: 1075)

این در حالی است که برای بررسی مورفومتری فروچاله‌های گچی دو محدوده مطالعاتی دشت مارون و جابر، با توجه به ابعاد بسیار کوچک‌تری که این عوارض کارستی نسبت به فروچاله‌های آهکی دارند، نمی‌توان از روش CCLS بهره گرفت؛ زیرا عوارضی با ابعاد فروچاله‌های گچی در DEM نمایش داده نمی‌شوند و استفاده از خطوط کانتور برای این فروچاله‌ها مؤثر واقع نمی‌شود؛ بنابراین تنها راه شناسایی این فروچاله‌ها، بررسی‌های میدانی است. پس از بررسی‌های میدانی انجام‌شده، مشخصات ظاهری فروچاله‌ها از جمله قطر، عمق، شیب دهانه، مساحت دهانه و محیط دهانه فروچاله‌های دو منطقه مطالعاتی برای انجام تحلیل‌های مورد نیاز با نرم‌افزار SPSS تحلیل شد. در ابتدا با استفاده

1. Closed contour lines
2. Liang and Du

از داده‌های برداشت‌شده، فروچاله‌های دو محدوده مطالعاتی با روش‌های باسو و سویچ^۱ دسته‌بندی شد. تعیین شکل در روش باسو به صورت دوبعدی انجام می‌شود؛ بدین صورت که براساس ضریب کشیدگی^۲ (R)، فروچاله‌ها به سه طبقه دایره‌ای (ضریب کشیدگی ۱ یا نزدیک به ۱)، بیضی‌شکل (ضریب کشیدگی ۱/۲۱ تا ۱/۶۵) و کشیده (بیش از ۱/۸) تقسیم‌بندی می‌شوند (Basso et al., 2012: 8)؛ سپس در نرم‌افزار SPSS تحلیل رگرسیونی پارامترهای مورفومتری فروچاله‌ها انجام شد. برای این منظور از روش‌های خطی تک‌متغیره، درجه ۲، درجه ۳ و چندمتغیره استفاده شد و مناسب‌ترین مدل‌ها که ارزش رجحانی بیشتری داشتند، ارائه شدند. در ادامه داده‌های به‌دست‌آمده در هر مرحله با نتایج حاصل از مطالعه‌ای مقایسه شدند که زمان‌زاده و همکاران (۱۳۹۷) انجام دادند.

یافته‌های پژوهش

جدول ۱ نتیجه آنالیز توصیفی مؤلفه‌های برداشت‌شده از فروچاله‌ها از جمله محیط، مساحت، عمق، شیب، قطر بزرگ و قطر کوچک است که در بازدید میدانی برداشت شده‌اند و در نرم‌افزار SPSS دامنه، حداقل، حداکثر، چولگی، میانگین و انحراف معیار محاسبه شد تا به این وسیله ضریب کشیدگی فروچاله‌های گچی به دست آید.

جدول ۱. آنالیز توصیفی مؤلفه‌های مورفومتری فروچاله‌های گچی

Table 1. Descriptive analysis of morphometric components of gypsum sinkholes

منطقه	شاخص‌های آماری	مساحت (مترمربع)	محیط (متر)	عمق (متر)	شیب (درصد)	قطر بزرگ (متر)	قطر کوچک (متر)	ضریب کشیدگی (قطر بزرگ / قطر کوچک) (متر)
مارون	دامنه	۴۳/۲۸۲۳	۶۴۷	۱۴	۲۶۰	۱۹۶	۷۹	۳/۳
	حداقل	۴	۳	۱	۴۰	۴	۱	۱
	حداکثر	۲۸۲۷/۴۳	۶۵۰	۱۵	۳۰۰	۲۰۰	۸۰	۴/۳
	میانگین	۵۶۵/۳۶۴۲	۱۲۵/۱۲	۴/۴۷۱۹۳۵	۸۳/۸	۲۴/۶۵	۱۶/۴	۱/۴۷
	انحراف معیار	۱۶۵۲/۳۳۹	۴۳/۷۲۴۱	۳/۲	۳۴/۹۸۳۱۷	۳۲/۸۷۷۷۸	۱۵/۵۸۸۹	۰/۹۵۳۴۱۱
	چولگی	۶/۷۲۰۳۰۱	۶/۵۱۸۶۷۵	۳/۱	۳/۶۹۴۹۷۳	۳/۳۷۲۳۴۱	۲/۱۸۷۲۸۸	۱/۹۶۳۸۳۴
جابر	دامنه	۲/۷۸۵۲	۳۳۱/۶۶	۵/۲۹	۱۳۰	۸۸/۵	۹۹	۲/۵۷
	حداقل	۷۷/۱	۲/۵	۵	۱۰	۱/۵	۱	۱
	حداکثر	۹۸/۷۸۵۳	۳۱۴/۱۶	۳۰	۱۴۰	۱۰۰	۱۰۰	۳/۵۷

1. Basso and Cvijić

2. Elongation ratio

۱/۱	۱۸/۳۵	۱۸/۹۶۸۰۹	۵۸/۲۱۴۲۹	۳/۵	۶۷/۳	۶۳۰/۱۸۴	میانگین
۰/۴۹۷۶۰۶	۲۱/۹۵۹۷۴	۲۱/۷۵۹۴۱	۳۹/۴۵۹۲۵	۵/۶۷۳۳۳	۷۴/۰۵۰۰	۱۴۷۶/۲۳۵	انحراف معیار
۴/۷۰۷۹۲۹	۲/۱۵۵۶۳۱	۲/۱۴۳۹۴	۲/۵۵۵۱۶۶	۲/۵۸۴۳۱۳	۱/۹۲۰۵۵۹	۳/۵۶۳۹۴۱	چولگی

جدول ۲ شامل نتیجه آنالیز توصیفی مؤلفه‌های برداشت‌شده از فروچاله‌های آهکی است که زمان‌زاده و همکاران (۱۳۹۷) این مشخصات را با استفاده از DEM در محیط Arc Map استخراج کرده‌اند. در نهایت نگارندگان با استفاده از این مشخصات، دامنه، حداقل و حداکثر، چولگی، میانگین و انحراف معیار را محاسبه کرده‌اند.

جدول ۲. آنالیز توصیفی مؤلفه‌های مورفومتری فروچاله‌های آهکی (زمان‌زاده و همکاران، ۱۳۹۷: ۵)

Table 2. Descriptive analysis of morphometric components of Calcareous sinkholes (Zamanzadeh et al., 2018: 5)

منطقه	شاخص‌های آماری	مساحت (مترمربع)	محیط (متر)	عمق (متر)	شیب (درصد)	قطر بزرگ (متر)	قطر کوچک (متر)	ضریب کشیدگی (قطر بزرگ / قطر کوچک)
پراو	دامنه	۹۰۲۶۶۰/۹	۵۸۹۸/۹	۸۷	۴۲/۳۱	۱۸۲۶	۹۴۸	۱/۸۳
	حداقل	۸۴۴/۳۱	۱۲۴	۷	۹/۶۳	۴۰	۲۶	۱
	حداکثر	۹۰۳۵۰۵/۲	۶۰۲۲/۹	۹۴	۵۱/۹۴	۱۸۶۶	۹۷۴	۲/۸۳
	میانگین	۹۰۶۸۹/۱	۱۲۱۹/۵	۳۰/۸	۲۹/۷	۳۶۷/۵	۲۳۵/۸	۱/۵۳
	انحراف معیار	۱۷۲۹۵۱/۷	۱۱۷۵/۲	۲۰/۳	۹/۴	۳۵۳/۲	۱۹۳/۹	۰/۴۲
	چولگی	۳/۸	۲/۶	۱/۵	-۰/۲۳	۲/۷	۲/۲	۱
خالک	دامنه	۱۲۵۸۸۹۶/۹	۶۴۱۹/۳	۷۶	۳۹/۲۹	۲۰۳۱	۹۸۷	۱/۴۷
	حداقل	۶۴۷۴/۲	۳۰۵/۸	۸	۱۱/۰۷	۱۱۲	۷۸	۱/۰۶
	حداکثر	۱۲۶۵۳۷۱/۲	۶۷۲۵/۲	۸۴	۵۰/۳۶	۲۱۴۳	۱۰۶۵	۲/۵۳
	میانگین	۱۱۴۲۲۵/۶	۱۳۵۳/۷	۲۲/۳	۲۲/۹	۴۳۷/۲	۲۵۶/۶	۱/۶
	انحراف معیار	۲۶۰۸۴۶/۷	۱۳۱۰/۳	۱۶/۱	۸/۶	۴۱۶	۱۹۷/۶	۰/۴۰
	چولگی	۴/۴	۳/۵	۲/۸	۱/۴	۳/۵	۳/۴	۰/۵۳
کندوله	دامنه	۳۶۸۲۶۷/۵	۳۲۸۶/۶	۵۰	۲۷/۵۱	۱۰۵۹	۵۲۱	۱/۳۶
	حداقل	۱۰۴۰/۶	۴۰۱	۷	۷/۱	۱۳۳	۹۲	۱
	حداکثر	۳۷۸۶۷/۴	۳۶۸۷/۶	۵۷	۳۴/۶۱	۱۱۹۲	۶۱۳	۲/۳۶
	میانگین	۷۷۷۶/۹	۱۱۵۲/۴	۲۵/۴	۲۲/۶	۳۵۷/۶	۲۳۰/۵	۱/۴۹
	انحراف معیار	۱۰۱۹۷۲/۴	۹۳۰/۵	۱۴/۳	۶/۹	۲۸۵/۴	۱۵۱/۴	۰/۳۵
	چولگی	۱/۷	۱/۵۳	۰/۷۱	-۰/۴۲	۱/۵	۱/۱۹	۰/۷۲
دامنه	۱۴۰۸۴۴۰/۱	۵۸۸۸/۲	۱۲۹	۲۴/۶	۲۲۸۱	۹۰۷	۴/۷۹	

۱/۰۲	۶۱	۹۰	۷/۲۶	۸	۲۵۹/۳	۴۶۵۵	حداقل	شاهو
۵/۸	۹۶۸	۲۳۷۱	۳۱/۹۲	۱۳۷	۶۱۴۷/۵	۱۴۱۳۰۹۵/۱	حداکثر	
۱/۷۵	۲۶۱/۱	۴۷۴/۲	۲۰/۲	۲۲/۲	۱۳۹۶/۳	۱۲۰۷۱۵/۸	میانگین	
۰/۸۷	۱۸۳/۰۵	۴۵۹/۶	۶/۱	۲۰/۹	۱۲۹۳/۹	۲۳۲۸۸۳/۷	انحراف معیار	
۲/۸	۱/۸	۲/۶	۰	۳/۹	۲	۴/۲	چولگی	

بر اساس محاسبات انجام شده بر اساس روش باسو، عمده فروچاله‌های گچی دشت مارون در دسته فروچاله‌های کشیده و بیشترین تعداد فروچاله‌های گچی دشت جابر در دسته فروچاله‌های دایره‌ای شکل قرار می‌گیرند؛ این در حالی است که در مطالعه زمان‌زاده و همکاران (۱۳۹۷) بر اساس روش باسو، کمترین و بیشترین نوع فروچاله مربوط به فروچاله‌های دایره‌ای شکل و بیضی شکل است که البته تعداد کمی از این فروچاله‌ها نیز در دسته فروچاله‌های کشیده قرار گرفته‌اند. شکل ۴ انواع مورفولوژی فروچاله‌ها به روش باسو و همکاران (2012) را نشان می‌دهد. در روش سویچ نیز با استفاده از نسبت‌های عمق به قطر، فروچاله‌های گچی دشت مارون و جابر در سه طبقه فروچاله‌های کم عمق یا حوضچه‌های کاسه‌ای شکل با کف پهن (قطر/ عمق بیش از ۲)، فروچاله‌های عمیق تر و پرشیب تر قیفی شکل (قطر/ عمق بین ۱/۵ تا ۲) و فروچاله‌های چاهک مانند (قطر/ عمق کمتر از ۱/۵) معمولاً با پهنای کمتر از عمق، قرار می‌گیرند (Cvijić, 1893: 70; Bondesan et al., 1992: 5; Ford and Williams, 2013: 321). بر اساس محاسبات انجام شده (جدول ۳) در مناطق مطالعاتی دشت مارون و جابر، ۱۴ درصد از فروچاله‌ها در دسته فروچاله‌های چاهک مانند، ۱۳ درصد در دسته فروچاله‌های قیفی شکل و ۷۳ درصد در دسته فروچاله‌های کاسه‌ای قرار دارند؛ اما در مطالعه فروچاله‌های آهکی (زمان‌زاده و همکاران، ۱۳۹۷) تمامی فروچاله‌ها در دسته کاسه‌ای شکل قرار گرفتند (جدول ۴). جدول‌های ۳ و ۴ شامل نتایجی هستند که به روش‌های سویچ و باسو تهیه شده‌اند.

جدول ۳. شکل‌شناسی فروچاله‌های گچی مناطق مطالعه شده

Table 3. Morphology of gypsum sinkholes

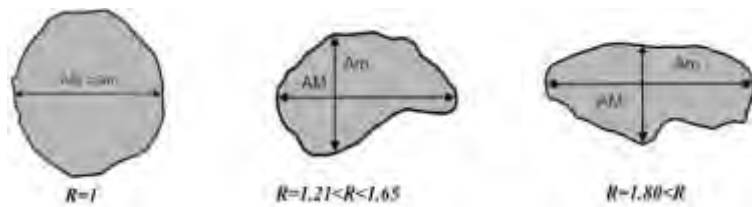
روش سویچ		روش باسو										منطقه
چاهک مانند		قیفی شکل		کاسه‌ای شکل		کشیده		بیضی شکل		دایره‌ای		
درصد	تعداد	درصد	تعداد	درصد	تعداد	درصد	تعداد	درصد	تعداد	درصد	تعداد	
۷۸	۴۷	۱۱	۷	۶	۶	۳۷	۲۲	-	-	۶۳	۳۸	دشت مارون
۶۴	۳۱	۱۵	۷	۲۱	۱۰	۱۰	۵	-	-	۹۰	۴۳	دشت جابر

جدول ۴. شکل‌شناسی فروچاله‌های آهکی مناطق مطالعه شده (زمان‌زاده و همکاران، ۱۳۹۷: ۸)

Tab 4. Morphology of Calcareous sinkholes (Zamanzadeh et al., 2018: 8)

روش سویچ			روش باسو			منطقه
چاهک مانند	قیفی شکل	کاسه‌ای شکل	کشیده	بیضی شکل	دایره‌ای	
-	-	۳۲	۹	۱۵	۸	پراو

-	-	۲۲	۹	۱۱	۲	خالک
-	-	۲۳	۷	۹	۷	کندوله
-	-	۴۷	۱۸	۲۲	۷	شاهو



شکل ۴. انواع مورفولوژی فروچاله‌ها (Basso et al., 2012: 8- با کمی تغییر)

Fig. 4. Types of sink morphology (Modified after Basso et al., 2012: 8)

نکته مهم این است که براساس اظهارات فورد و ویلیامز (2013)، فروچاله‌های انحلالی معمولاً کاسه‌ای شکل هستند و فرم کاسه‌ای شکل آنها بر این دلالت دارد که از مرکز فروچاله‌ها توده بزرگ‌تری از سنگ نسبت به اطرافشان جابه‌جا شده است؛ بنابراین می‌توان بیان کرد که احتمالاً آن دسته از فروچاله‌های مناطق مطالعاتی که جزو فروچاله‌های کاسه‌ای محسوب می‌شوند، در اثر پدیده انحلال شکل گرفته‌اند و فروچاله‌هایی که شیب زیادی در دیواره و مساحت کمتری در دهانه دارند، فروچاله‌های ریزشی هستند (Ford and Williams, 2013: 322). هرچند که با استناد به مطالعات و مشاهدات انجام‌شده باید به این نکته اشاره کرد که مجاورت مارن و گچ و ریزش مارن در درون فروچاله‌های گچی، تغییرات اساسی در مورفولوژی فروچاله‌ها ایجاد می‌کند و این معادلات را به هم می‌ریزد. در این ارتباط می‌توان گفت که آنچه در دشت جابر می‌بینیم، فرایندی از تغییرات فروچاله در گذر زمان در مجاورت مارن است. فروچاله بزرگ دشت جابر، نمونه‌ای از فروچاله ریزشی است که در ابتدا لایه‌های زیرین دچار انحلال شده و سپس لایه‌های فوقانی ریزش کرده و فروچاله شکل گرفته است (شکل‌های ۵ و ۶). در ادامه، مجاورت این فروچاله‌ها با مارن باعث پرشدن فروچاله‌ها شده است و به مرور زمان، شکل ۷ نمایان می‌شود؛ بنابراین شکل ظاهری فروچاله‌های کنونی بیشتر فرمی اصلاح‌شده به‌واسطه مارن در گذر زمان است.



شکل ۵. نمونه‌ای از فروچاله دشت جابر در مرحله اولیه تشکیل

Fig. 5. A sinkhole in Jaber plain at the early stages of formation



شکل ۶. نمونه‌ای از فروچاله‌های دشت جابر که در مراحل اولیه پر شدن به وسیله مارن است

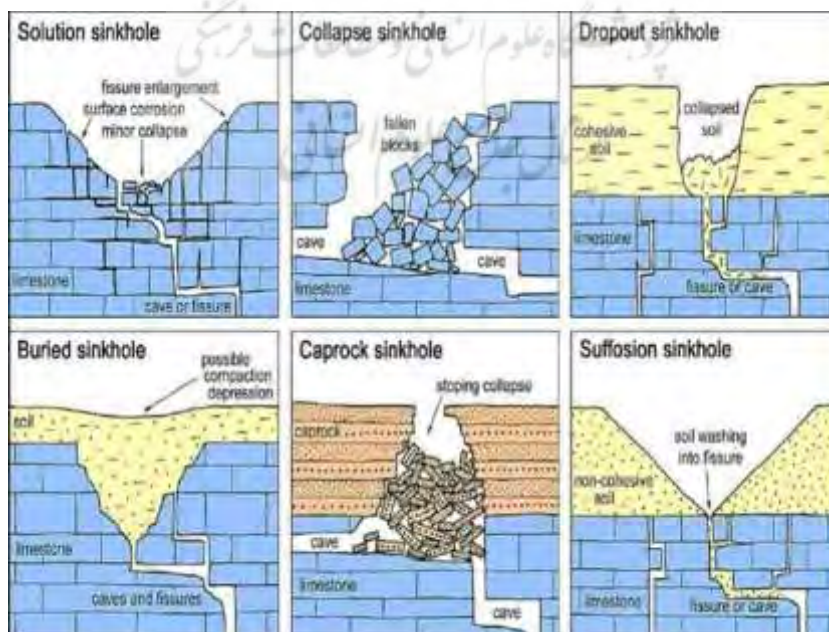
Fig. 6. A sinkhole in Jaber plain at the early stages of filling by marl



شکل ۷. نمونه‌ای از فروچاله‌های دشت جابر که با مارن مدفون شده است

Fig. 7. A sinkhole in the Jaber Plain, buried by Marne

شکل ۸ شامل انواع فروچاله‌هاست که والتام و فوکس (۲۰۰۵) دسته‌بندی کرده‌اند. در این شکل سازوکار و مورفولوژی انواع فروچاله‌ها به نمایش درآمده است.



شکل ۸. دسته‌بندی انواع فروچاله‌ها و سازوکار تشکیل آنها (Waltham and Fookes, 2005: 106)

Fig. 8. Classification of types of sinkholes and their formation mechanism (Waltham and Fookes, 2005: 106)

نمونه‌های عینی آنچه والتام و فوکس (2005) در دسته‌بندی خود ارائه کرده‌اند، در دشت مارون و جابر دیده می‌شود که در اشکال ۹ تا ۱۳ ارائه شده‌اند؛ شکل ۹، فروچاله‌ای کشیده در دشت مارون است که به نظر می‌رسد حاصل سازوکار شکل‌گیری انحلال در شیب دامنه‌ای باشد که علت کشیده‌بودن آن صرفاً شکل‌گیری فروچاله در شیب دامنه است. شکل ۱۰، نمونه‌ای از فروچاله‌های قیفی‌شکل است که در دسته‌بندی والتام و فوکس با عنوان فروچاله‌های ریزشی^۱ شناخته می‌شود. شکل ۱۱، نمونه‌ای از فروچاله کاسه‌ای‌شکل است که با عنوان فروچاله انحلالی^۲ در دسته‌بندی قرار می‌گیرد. شکل ۱۲، نمونه عینی رومبشی^۳ است و شکل ۱۳، نمونه‌ای از فروچاله انحلالی است که در سازند آهکی شکل گرفته است.



شکل ۹. نمونه‌ای از فروچاله‌های کشیده

Fig. 9. Oval sinkhole



شکل ۱۰. نمونه‌ای از فروچاله‌های قیفی‌شکل (دشت مارون)

Fig. 10. Funnel-shaped collapses

1. Collapes sinkhole
2. Solution Sinkhole
3. Caprock sinkhole



شکل ۱۱. نمونه‌ای از فروچاله‌های کاسه‌ای شکل

Fig. 11. Bowl-shaped sinkholes



شکل ۱۲. نمونه‌ای از فروچاله‌های چاهک‌مانند (دشت جابر)

Fig. 12. Well-shaped sinkholes



شکل ۱۳. نمونه‌ای از فروچاله‌های آهکی در منطقه شاهو (عکس از حسام ملکی، ۱۳۹۲)

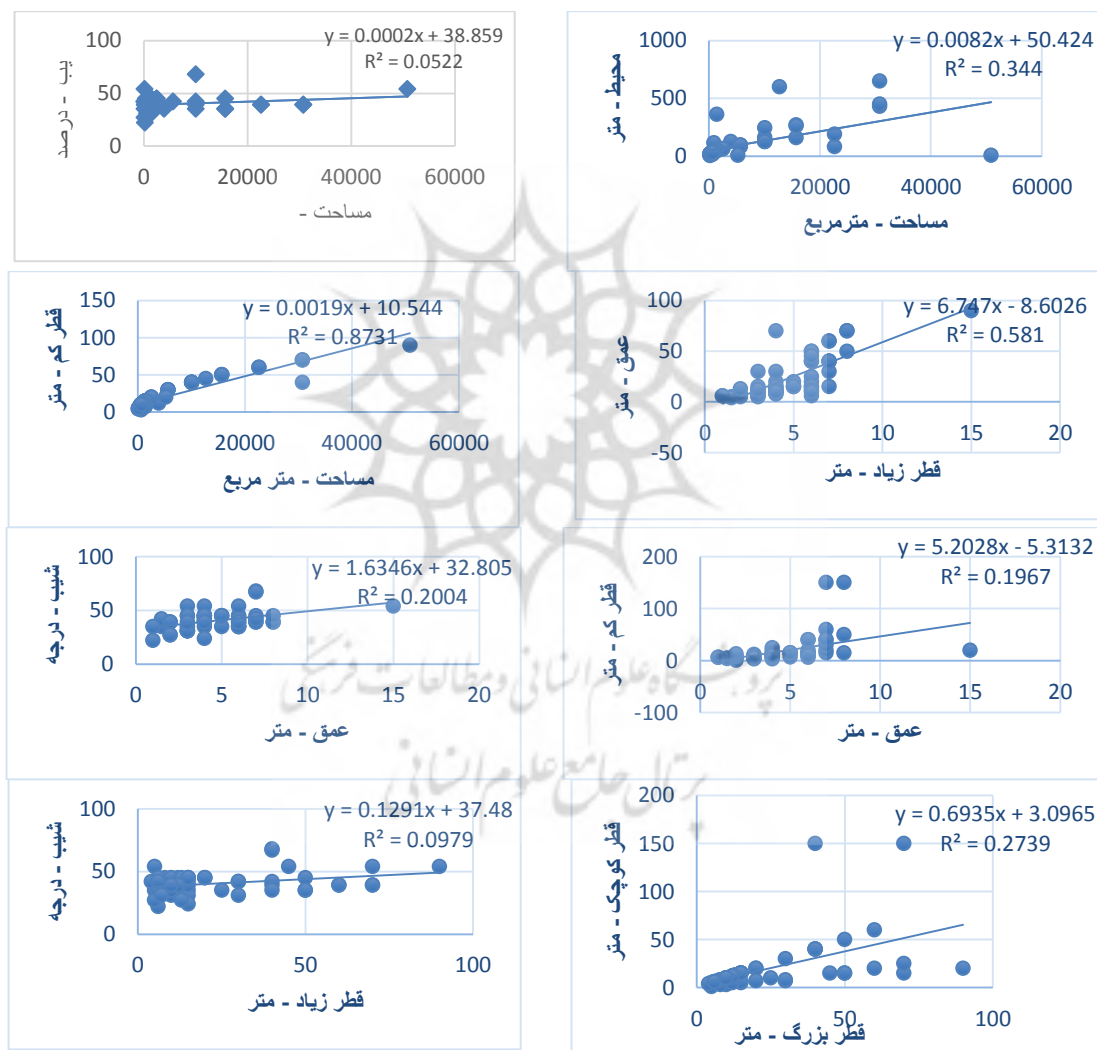
Fig. 13. Limestone sinkholes in Shahu area (Maleki, 2013)

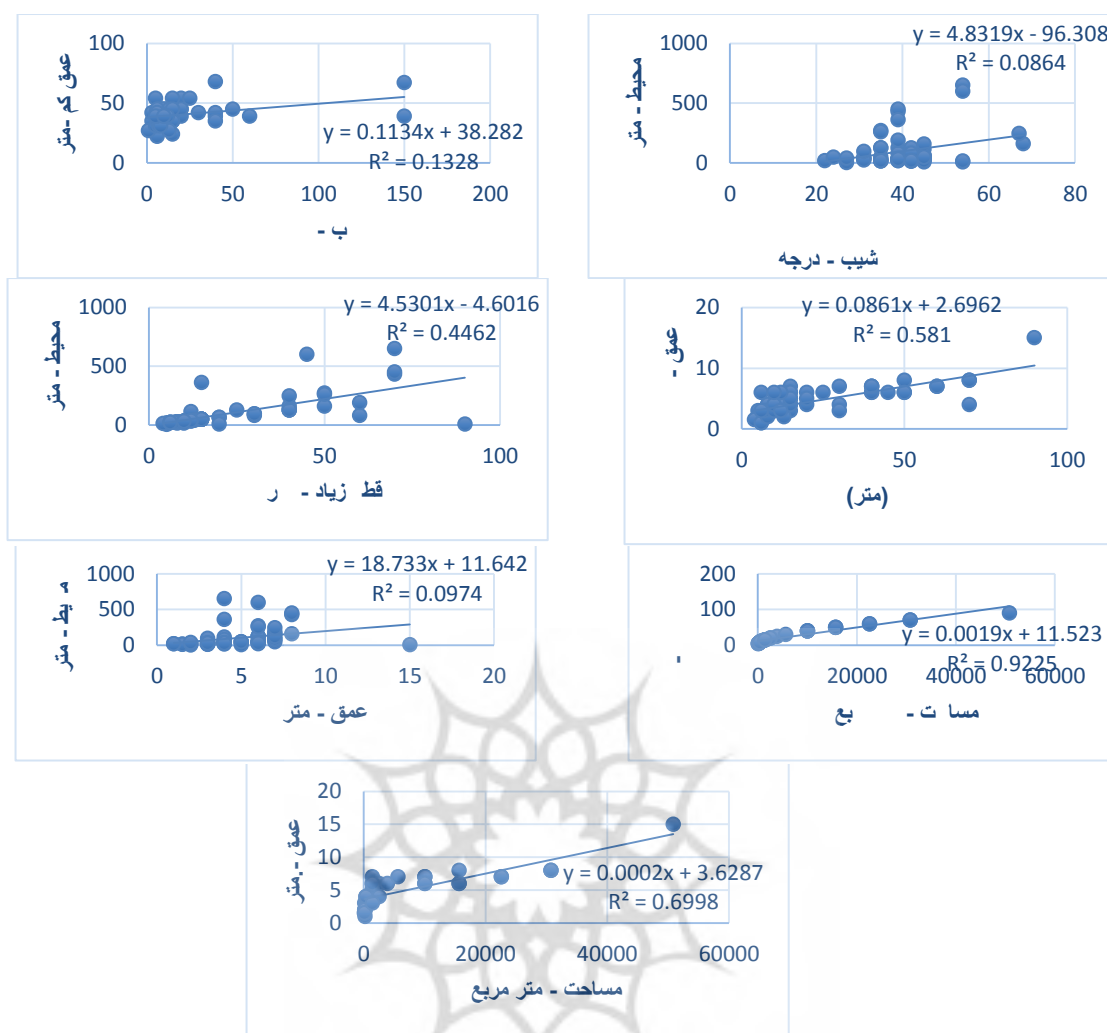
تحلیل رگرسیون مؤلفه‌های مورفومتری فروچاله‌ها

به منظور بررسی و تعیین ضریب تبیین، تک تک پارامترهای برداشت شده در بازدید میدانی بررسی و رگرسیون و

ضریب همبستگی تمامی پارامترها دوبه‌دو محاسبه شده‌اند (شکل ۱۴). هدف از این محاسبات، تعیین بیشترین ضریب تبیین بین هریک از پارامترهای فروچاله‌ها با پارامتر دیگر است. این محاسبات نشان داد مؤلفه‌های مساحت با قطر بزرگ، مساحت با قطر کوچک، عمق با مساحت و عمق با قطر بزرگ به ترتیب با ضرایب تبیین ۰/۸۷۳، ۰/۶۹۹ و ۰/۵۸۱ از بیشترین میزان همبستگی معنادار برخوردارند (شکل ۱۴).

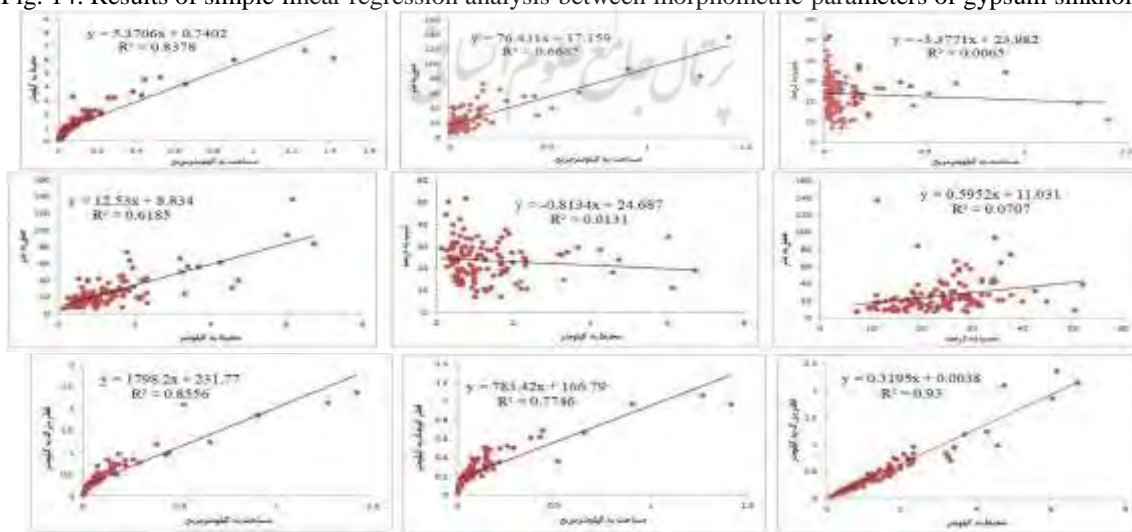
زمان‌زاده و همکاران (۱۳۹۷) نیز با استفاده از داده‌های موجود این مراحل را به انجام رسانده‌اند که در نتیجه مؤلفه‌های محیط با قطر بزرگ، قطر کوچک با محیط، قطر بزرگ با مساحت، مساحت با محیط و قطر کوچک با مساحت به ترتیب با ضرایب تبیین ۰/۹۳، ۰/۸۶، ۰/۸۵، ۰/۸۳ و ۰/۷۷ از بیشترین میزان همبستگی معنادار برخوردارند (شکل ۱۵).

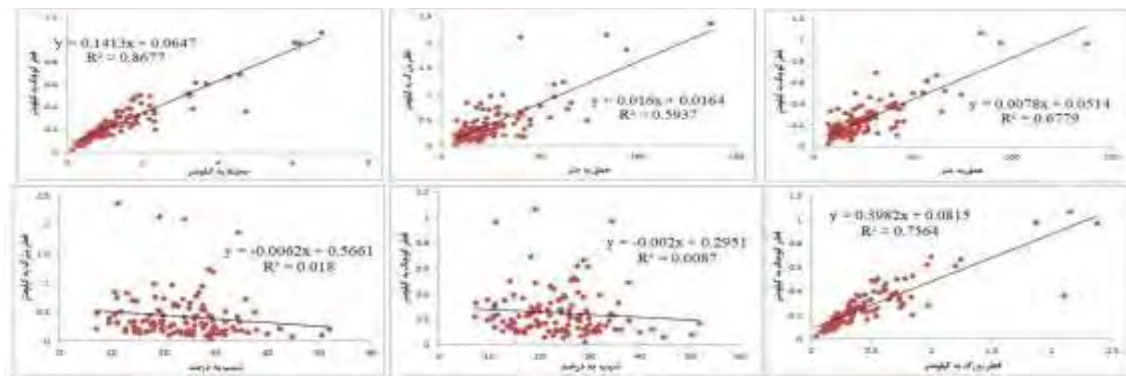




شکل ۱۴. نتایج تحلیل رگرسیون ساده خطی بین پارامترهای مورفومتری فروچاله‌های گچی

Fig. 14. Results of simple linear regression analysis between morphometric parameters of gypsum sinkholes





شکل ۱۵. نتایج تحلیل رگرسیون ساده خطی بین پارامترهای مورفومتری فروچاله‌های آهکی

(زمان‌زاده و همکاران، ۱۳۹۷: ۹)

Fig. 15. Results of simple linear regression analysis between morphometric parameters of calcareous sinkholes (Zamanzadeh et al., 2018: 9)

پس از بررسی میزان همبستگی بین پارامترهای فروچاله‌های گچی و آهکی، آنالیز رگرسیون ساده روابط درجه ۲ و ۳ بین پارامترهای فروچاله‌های گچی را نگارندگان و فروچاله‌های آهکی را زمان‌زاده و همکاران (۱۳۹۷) انجام داده‌اند. براساس نتایج جدول ۵، بین پارامترهایی مانند محیط و مساحت و قطر کوچک و قطر بزرگ فروچاله‌های گچی بیشترین میزان همبستگی وجود دارد. نتایج این محاسبات نشان‌دهنده آن است که حداکثر ارتباط معنادار در سطح احتمال خطای کمتر از ۰/۱ بین مؤلفه‌های مساحت و قطر بزرگ برای روابط درجه ۲ و ۳ با ضرایب تبیین ۰/۹۹۷ و ۰/۹۹۸ و خطای برآورد ۰/۰۷ و ۰/۰۸ است. این نتایج همچنین نشان می‌دهد کمترین ارتباط معنادار درجه ۲ و ۳، بین محیط و شیب با ضرایب تبیین ۰/۲۵ و ۰/۰۸۱ و خطای برآورد ۰/۲۲ و ۰/۲۲ است. نتایج به‌دست‌آمده در بررسی‌های زمان‌زاده و همکاران (۱۳۹۷) مؤید این مسئله است که حداکثر ارتباط معنادار در سطح احتمال خطای کمتر از ۰/۰۱، بین مؤلفه‌های مساحت و محیط برای روابط درجه ۲ و ۳ با ضرایب تبیین ۰/۹۴۰ و ۰/۹۴۵ و خطای برآورد ۰/۰۵ و ۰/۰۴ است. این نتایج همچنین نشان می‌دهد کمترین ارتباط معنادار درجه ۲ و ۳، بین مساحت و شیب با ضرایب تبیین ۰/۰۷ و ۰/۰۰۹ و خطای برآورد ۰/۲۰۵ و ۰/۲۰۶ است (جدول ۶).

جدول ۵. نتایج آنالیز رگرسیون ساده روابط درجه ۲ و ۳ بین پارامترهای مورفومتری فروچاله‌های گچی

Table 5. Results of simple regression analysis of 2nd and 3rd degree relationships between morphometric parameters of gypsum sinkholes

پارامتر	نوع مدل	ضریب همبستگی	ضریب تبیین	خطای برآورد	مقدار F	معنی‌داری	ضرایب مدل			
							b^3	b^2	b^1	b^0
مساحت و محیط	درجه ۲	۰/۵۹۵	۰/۴۳۵	۰/۰۰۸	۱۵/۵۹۵	۰/۰۰۰	-	-۰/۳۹	۰/۰۶۳	۰/۰۰۱
	درجه ۳	۰/۵۹۷	۰/۳۵۸	۰/۰۰۸	۱۰/۳۱۱	۰/۰۰۰	-۰/۱۱۶	۰/۰۶۳	۰/۰۴۳	۰/۰۰۱
مساحت و عمق	درجه ۲	۰/۹۸۷	۰/۹۷۴	۰/۰۲۶	۶۷۵/۳۷۹	۰/۰۰۰	۱/۶۳۴	-۰/۷۳۱	۰/۰۸۰	۰/۰۰۰
	درجه ۳	۰/۹۹۵	۰/۹۹۰	۰/۰۱۷	۱۱۰۹	۰/۰۰۰	۲/۳۶۴	-۱/۸۴	۰/۰۵۰	-۰/۰۳۱
مساحت و شیب	درجه ۲	۰/۵۹۶	۰/۳۵۵	۰/۱۳۱	۹/۹۲۷	۰/۰۰۰	-	-۴/۹۲۱	۴/۹۲۰	۱/۲۰۹
	درجه ۳	۰/۶۶۷	۰/۴۵۹	۱	۹/۹۸۰	۰/۰۰۰	۲۳/۱۸۰	-۳۴/۵۵۱	۱۶/۷۰۳	-۲/۵۹۸
مساحت و قطر بزرگ	درجه ۲	۰/۹۹۹	۰/۹۹۷	۰/۰۰۸	۷۱۰۴/۴	۰/۰۰۰	-	۰/۹۲۴	۰/۸۳	-۰/۰۰۷
	درجه ۳	۰/۹۹۹	۰/۹۹۸	۰/۰۰۷	۶۳۷۵/۴	۰/۰۰۰	-۲/۱	۳/۵۵	-۰/۴۶۳	۰/۰۲

-	۶۸/۸۰۸	-۷/۳۷۹	۰/۱۷۳	۰/۰۰۰	۰/۱۷۳	۰/۱۲۸	۰/۳۸۴	۰/۸۶۶	درجه ۲	مساحت و قطر
۱۲۴۸	۲۰۲/۴	۹/۳۶۲	-۰/۱۰۴	۰/۰۰۰	۱۱/۵۳	۰/۱۱۷	۰/۴۷۹	۰/۷۰۵	درجه ۳	کوچک
-	-۰/۲۱۹	۰/۲۲۵	۰/۰۰۶	۰/۰۰۰	۱۰/۳۴	۰/۰۱۸	۰/۳۶۵	۰/۶۰۴	درجه ۲	محیط و عمق
-۰/۲۴۹	۰/۱۴۶	۰/۰۹۵	۰/۰۱۸	۰/۰۰۰	۶/۹۶۸	۰/۰۱۸	۰/۳۷۴	۰/۶۱۲	درجه ۳	
-	-۰/۲۲۰	۰/۲۴۰	-۰/۰۱۸	۰/۰۰۰	۰/۴۵۵	۰/۰۲۲	۰/۰۲۵	۰/۱۵۷	درجه ۲	محیط و شیب
-۲/۳۵۲	۳/۷۸۵	-۱/۹۵۷	۰/۳۶۸	۰/۰۰۰	۱/۰۲۳	۰/۰۲۲	۰/۰۸۱	۰/۲۸۴	درجه ۳	
-	-۰/۴۴۷	۰/۴۵۷	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۲۷/۲۶	۰/۰۱۴	۰/۶۰۲	۰/۷۷۶	درجه ۲	محیط و قطر بزرگ
-۲/۵۷۸	-۳/۶۵۹	۱/۱۲	۰/۰۳۳	۰/۰۰۰	۲۲/۳۸	۰/۰۱۳	۰/۶۵۷	۰/۸۱۱	درجه ۳	
-	-۴/۶۰۶	۱/۱۴	-۰/۰۰۴	۰/۰۰۰	۲۲/۵۳	۰/۰۱۵	۰/۵۵۶	۰/۷۴۶	درجه ۲	محیط و قطر کوچک
-۱۰/۶/۶	۱۸/۴۶۹	-۰/۲۹۰	۰/۰۲۰	۰/۰۰۰	۱۳/۴۴۳	۰/۰۱۴	۰/۵۹۹	۰/۷۷۴	درجه ۳	
-	-۰/۲۲۳	۰/۵۶۹	۰/۴۴۲	۰/۰۰۱	۷/۸۹۱	۰/۰۹۲	۰/۳۰۵	۰/۵۵۲	درجه ۲	شیب و عمق
-۰/۹۴۱	-۱/۶۰۵	۱/۰۶۱	۰/۳۹۸	۰/۰۰۴	۵/۲۴۴	۰/۰۹۳	۰/۳۱۰	۰/۵۵۷	درجه ۳	
	-۰/۰۰۶	۰/۲۶۷	۰/۵۳۵	۰/۰۸۱	۲/۶۹۴	۰/۰۱۳	۰/۱۳۰	۰/۳۶۱	درجه ۲	شیب و قطر بزرگ
-۹/۰۵۶	۱۱/۲۲۷	۲/۰۸۰	۰/۶۳۵	۰/۱۰۷	۲/۱۹۱	۰/۰۱۳	۰/۱۵۸	۰/۳۹۸	درجه ۳	
-	۱۳/۷	-۰/۹۹۶	۰/۵۷۶	۰/۱۸۴	۱/۷۷۴	۰/۰۱۰۶	۰/۰۹	۰/۳	درجه ۲	شیب و قطر
-۶۷۹/۹۸	۱۳۷/۴	۸/۳۶۷	۰/۴۱۲	۰/۰۹۲	۱/۳۲۲	۰/۰۱۰۵	۰/۱۶۶	۰/۴۰۷	درجه ۳	کوچک
-	۶۰/۵۵۶	-۵/۷	۰/۲۰۳	۰/۰۰۰	۱۹	۰/۰۱۰۷	۰/۵۱۴	۰/۷۱۷	درجه ۲	قطر کوچک و قطر
-۹۵۹/۳	-۱۴۷/۱۵	۷/۱۳	-۰/۱۰	۰/۰۰۰	۱۶/۷	۰/۰۹۹	۰/۵۸۹	۰/۷۶۷	درجه ۳	بزرگ

جدول ۶. نتایج آنالیز رگرسیون ساده روابط درجه ۲ و ۳ بین پارامترهای مورفومتری فروچاله‌های آهکی (زمان‌زاده و همکاران، ۱۳۹۷: ۱۰)

Table 6. Results of simple regression analysis of 2nd and 3rd degree relationships between morphometric parameters of calcareous sinkholes (Zamanzadeh et al., 2018: 10)

پارامتر	نوع مدل	ضریب همبستگی	ضریب تبیین	خطای برآورد	مقدار F	معناداری	ضرایب مدل			
							b^3	b^2	b^1	b^0
مساحت و محیط	درجه ۲	۰/۹۶۹	۰/۹۴۰	۰/۰۵	۹۴۳/۳	۰/۰۰۰	۰/۰۱	۰/۰۰۵	۰/۰۲	-
	درجه ۳	۰/۹۷۲	۰/۹۴۵	۰/۰۴	۶۹۲/۹	۰/۰۰۰	-۰/۰۲	۰/۰۸	-۰/۰۰۹	۰/۰۰۴
مساحت و عمق	درجه ۲	۰/۸۶۷	۰/۷۵۱	۰/۱۰۳	۱۸۲/۶	۰/۰۰۰	-۰/۰۰۴	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰	-
	درجه ۳	۰/۸۷۳	۰/۷۶۳	۰/۱۰۱	۱۲۸/۶	۰/۰۰۰	۰/۰۶	-۰/۰۰۵	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰
مساحت و شیب	درجه ۲	۰/۰۸۲	۰/۰۰۷	۰/۲۰۵	۰/۴۱	۰/۶۶۵	۰/۱۳۴	-۰/۰۰۱	۰/۰۰۰	-
	درجه ۳	۰/۰۹۴	۰/۰۰۹	۰/۲۰۶	۰/۳۵	۰/۷۸۳	۰/۲۴۶	-۰/۰۱۶	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰
مساحت و قطر بزرگ	درجه ۲	۰/۹۵۱	۰/۹۰۵	۰/۰۶۳	۵۷۷/۶	۰/۰۰۰	-۰/۰۲	۰/۱۷۳	۰/۱۵۶	-
	درجه ۳	۰/۹۵۱	۰/۹۰۵	۰/۰۶۴	۳۸۱/۹	۰/۰۰۰	-۰/۰۲	۰/۱۷۱	۰/۱۵۸	-۰/۰۰۱
مساحت و قطر کوچک	درجه ۲	۰/۹۵۴	۰/۹۱۰	۰/۰۶۲	۶۱۴/۲	۰/۰۰۰	۰/۰۲	-۰/۱۵۱	۱/۲۹	-
	درجه ۳	۰/۹۵۵	۰/۹۱۲	۰/۰۶۱	۴۱۲/۳	۰/۰۰۰	-۰/۰۰۷	۰/۱۴۱	۰/۵۱۴	۰/۵۲۲
محیط و عمق	درجه ۲	۰/۷۸۷	۰/۶۱۹	۰/۷۴۵	۹۸/۱۵	۰/۰۰۰	۰/۰۹۲	۰/۰۴۷	۰/۰۰۰	-
	درجه ۳	۰/۷۹۴	۰/۶۳۰	۰/۷۳۷	۶۸/۱۶	۰/۰۰۰	۰/۵۰۰	۰/۰۰۸	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰
محیط و شیب	درجه ۲	۰/۱۲۰	۰/۰۱۴	۱/۱۹	۰/۸۸۹	۰/۴۱۴	۱/۴۳	۰/۰۰۵	۰/۰۰۰	-
	درجه ۳	۰/۱۳۴	۰/۰۱۸	۱/۲۰	۰/۷۳۰	۰/۵۳۶	۲/۲۶	-۰/۱۰۷	۰/۰۰۴	۰/۰۰۰

-	-۰/۳۹۶	۳/۶۸	-۰/۱۱۲	۰/۰۰۰	۹۳۶/۱	۰/۲۹۷	۰/۹۳۹	۰/۹۶۹	درجه ۲	محیط و قطر بزرگ
-۰/۴۶۶	۱/۰۵	۲/۶۴	۰/۰۴۷	۰/۰۰۰	۶۵۰/۲	۰/۲۹۲	۰/۹۴۲	۰/۹۷۱	درجه ۳	
-	۱/۵۱	۴/۸۰	-۰/۰۳۷	۰/۰۰۰	۴۱۶/۲	۰/۴۳۰	۰/۸۷۳	۰/۹۳۴	درجه ۲	محیط و قطر کوچک
۱/۱۱	-۰/۱۵۷	۵/۴۳	-۰/۰۹۴	۰/۰۰۰	۲۷۵/۶	۰/۴۳۱	۰/۸۷۳	۰/۹۳۴	درجه ۳	
-	-۰/۰۱۳	۱/۲۸	۳/۰۵	۰/۰۰۸	۵/۰۲	۱۸/۴۷	۰/۰۷۷	۰/۲۷۷	درجه ۲	شیب و عمق
-۰/۰۰۲	۰/۱۶۵	-۳/۲۴	۳۶/۵۷	۰/۰۰۶	۴/۳۸	۱۸/۳۲	۰/۰۹۹	۰/۳۱۴	درجه ۳	
-	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۴۹۶	۰/۳۱۲	۱/۱۷	۰/۳۹۶	۰/۰۱۹	۰/۱۳۸	درجه ۲	شیب و قطر بزرگ
۰/۰۰۰	۰/۰۰۱	-۰/۰۲۶	۰/۶۹۰	۰/۴۶۹	۰/۸۵۰	۰/۳۹۷	۰/۰۲۱	۰/۱۴۴	درجه ۳	
-	۰/۰۰۰	۰/۰۰۳	۰/۲۴۳	۰/۴۹۷	۰/۷۰۴	۰/۱۸۲	۰/۰۱۲	۰/۱۰۷	درجه ۲	شیب و قطر کوچک
۰/۰۰۰	۰/۰۰۱	-۰/۰۱۸	۰/۳۹۱	۰/۵۷۶	۰/۶۶۳	۰/۱۸۲	۰/۰۱۶	۰/۱۲۸	درجه ۳	
-	-۰/۱۰۱	۰/۵۹۴	۰/۰۳۳	۰/۰۰۰	۲۱۷/۸	۰/۰۸۵	۰/۷۸۳	۰/۸۸۵	درجه ۲	قطر کوچک و قطر بزرگ
۰/۰۵۹	-۰/۲۸۳	۰/۷۲۴	۰/۰۱۳	۰/۰۰۰	۱۴۵/۶	۰/۰۸۵	۰/۷۸۴	۰/۸۸۶	درجه ۳	

نتایج تحلیل رگرسیون خطی چندگانه قدم‌به‌قدم^۱ بین مؤلفه‌های مورفومتری فروچاله‌های گچی به شرح جدول ۷ است. در این محاسبات برخلاف محاسباتی که تاکنون انجام و هر متغیر با متغیر دیگر سنجیده شده، چهار مؤلفه عمق، مساحت، محیط و شیب متغیر وابسته در نظر گرفته و به‌ازای هر متغیر سایر متغیرها متغیر مستقل تعریف شده و در نهایت سطح معناداری آنها محاسبه شده است تا این روش نیز برای تعیین ارتباط بین متغیرها استفاده شود و مکمل و تأییدکننده سایر روش‌ها باشد. براساس محاسبات انجام‌شده در جدول یادشده، بیشترین ضریب تبیین مربوط به مساحت، قطر کوچک و قطر بزرگ و عمق با مقدار عددی ضریب تبیین ۰/۹۹۷ با خطای برآورد ۰/۰۲۴ و کمترین میزان ضریب تبیین مربوط به شیب با عمق و قطر بزرگ و کوچک است که میزان ضریب تبیین آن، ۰/۵۸۴ و میزان خطای برآورد، ۰/۰۹۱ است.

جدول ۷. خلاصه مدل‌های خطی چندمتغیره مؤلفه‌های مورفومتری فروچاله‌های گچی در مناطق مطالعاتی

Table 7. Summary of multivariate linear models of morphometric components of gypsum sinkholes in study areas

متغیر وابسته	ضریب همبستگی	ضریب تبیین	ضریب تعدیلی	خطای برآورد	متغیر مستقل	ضرایب غیراستاندارد		مقدار Beta	سطح معناداری
						مقدار B	خطای استاندارد		
عمق	۰/۹۰۱	۰/۸۱۳	۰/۷۹۷	۰/۷۲۰	مساحت	۰/۵۴۸	۰/۰۸۵	۰/۵۴۳	۰/۰۰۰
					قطر کوچک	۱/۹۴۹	۰/۴۱۵	۰/۳۸۰	۰/۰۰۰
					شیب	۰/۳۶۳	۰/۱۱۷	۰/۲۴۴	۰/۰۰۴
					مقدار ثابت	-۰/۰۸۹	۰/۰۶۸	-	۰/۲۰۱
مساحت	۰/۹۸۹	۰/۹۹۷	۰/۹۵۷	۰/۰۲۴	قطر بزرگ	۱/۱۷۲	۰/۰۵۲	۱/۱۰۲	۰/۰۰۰
					قطر کوچک	-۱/۰۱۴	۰/۱۷۴	-۰/۲۰۰	۰/۰۰۰
					عمق	-۰/۰۱۸	۰/۰۵۰	-۰/۰۱۰	۰/۷۴۲
					مقدار ثابت	-۱/۰۵۱	۰/۰۱۰	-	۰/۰۰۰
	۰/۸۷۸	۰/۷۷۱	۰/۷۵۸	۰/۰۱۱	قطر بزرگ	-۰/۰۹۲	۰/۰۱۴	-۰/۶۲۷	۰/۰۰۰

1. Stepwise

محیط					قطر کوچک	۰/۷۵۵	۰/۰۶۸	-۱/۰۶۴	۰/۰۰۰
					مقدار ثابت	۰/۰۱۱	۰/۰۰۴	-	۰/۰۱۰
شیب	۰/۵۸۴	۰/۳۴۲	۰/۲۸۵	۰/۰۹۱	عمق	۰/۶۴۵	۰/۱۹۵	۰/۶۵۷	۰/۰۰۲
					قطر بزرگ	-۰/۲۵۷	۰/۱۸۹	-۰/۳۵۶	۰/۱۸۱
					قطر کوچک	-۰/۵۹۷	۰/۶۳۶	-۰/۱۷۳	۰/۳۵۵
					مقدار ثابت	۰/۴۷۵	-۰/۰۳۹		۰/۰۰۰

یافته‌های حاصل از مدل‌سازی مؤلفه‌های فروچاله‌های آهکی در مطالعهٔ زمان‌زاده و همکاران (۱۳۹۷) که در جدول ۸ ارائه شده است نیز نشان می‌دهد حداکثر ارتباط معناداری به پارامتر محیط با پارامترهای قطر بزرگ و قطر کوچک با ضریب تبیین ۰/۹۶۵ و خطای برآورد ۰/۲۲ و حداقل ارتباط معناداری به مؤلفهٔ شیب با عمق، قطر کوچک و قطر بزرگ با ضریب تبیین ۰/۴۲۶ و خطای برآورد ۶/۵ مربوط است.

جدول ۸. خلاصهٔ مدل‌های خطی چندمتغیرهٔ مؤلفه‌های مورفومتری فروچاله‌های آهکی در مناطق مطالعاتی

(زمان‌زاده و همکاران، ۱۳۹۷: ۱۱)

Table 8. Summary of Multivariate Linear Models of Morphometric Components of Calcareous Depressions in Study Areas (Zamanzadeh et al., 2018: 11)

متغیر وابسته	ضریب همبستگی	ضریب تبیین	ضریب تعدیلی	خطای برآورد	متغیر مستقل	ضرایب غیر استاندارد		مقدار Beta	سطح معناداری
						مقدار B	خطای استاندارد		
عمق	۰/۹۱۳	۰/۸۳۴	۰/۸۳۰	۷/۸۵	مساحت	۳۸/۳۹	۷/۳۱	۰/۴۱۱	۰/۰۰۰
					قطر کوچک	۵۱/۸۸	۸/۲۲	۰/۴۹۴	۰/۰۰۰
					شیب	۰/۷۷۳	۰/۰۸۴	۰/۳۴۵	۰/۰۰۰
					مقدار ثابت	-۱۰/۰۲	۲/۶۰	-	۰/۰۰۰
مساحت	۰/۹۴۳	۰/۸۹۰	۰/۸۸۷	۰/۰۶۸	قطر بزرگ	۰/۳۱۶	۰/۰۳۲	۰/۶۱۴	۰/۰۰۰
					قطر کوچک	۰/۲۱۸	۰/۰۷۹	۰/۱۹۴	۰/۰۰۷
					عمق	۰/۰۰۲	۰/۰۰۱	۰/۱۸۵	۰/۰۰۰
					مقدار ثابت	-۰/۱۳۲	۰/۰۱۱	-	۰/۰۰۰
محیط	۰/۹۸۳	۰/۹۶۵	۰/۹۶۵	۰/۲۲	قطر بزرگ	۱/۹۱	۰/۱۰۴	۰/۶۳۳	۰/۰۰۰
					قطر کوچک	۲/۵۱	۰/۲۲۶	۰/۳۸۱	۰/۰۰۰
					مقدار ثابت	-۰/۱۲۵	۰/۰۳۵	-	۰/۰۰۰
شیب	۰/۶۵۳	۰/۴۲۶	۰/۴۱۲	۶/۵	عمق	۰/۵۱۱	۰/۰۵۶	۱/۱۴	۰/۰۰۰
					قطر بزرگ	-۱۰/۱۹	۳/۰۷	-۰/۴۷۴	۰/۰۰۱
					قطر کوچک	-۲۹/۲۱	۷/۵۳	-۰/۶۲۳	۰/۰۰۰
					مقدار ثابت	۲۲/۳۱	۱/۰۳۶	-	۰/۰۰۰

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

یکی از تفاوت‌های عمده موجود بین فروچاله‌های آهکی و گچی، ابعاد این فروچاله‌هاست. میانگین قطر فروچاله‌های گچی در محاسبات انجام‌شده، ۲۲ متر و میانگین عمق این فروچاله‌ها، ۵ متر و همچنین میانگین قطر فروچاله‌های آهکی، ۴۰۹ متر و میانگین عمق آنها، ۲۵ متر به دست آمده است. براساس نتایج حاصل‌شده در این مطالعه، وجود فروچاله‌های آهکی روی ستیغ ارتفاعات و قرارگیری فروچاله‌های گچی در ناودیس‌ها و همچنین ضخامت لایه‌های آهکی نسبت به لایه‌های گچی و تفاوت در سرعت انحلال این دو لایه، عوامل اصلی وجود تفاوت در سازوکار تشکیل این عوارض و اندازه فروچاله‌هاست.

براساس آنالیزهای توصیفی انجام‌شده روی مؤلفه‌های مورفومتری فروچاله‌های گچی و آهکی و روش باسو و سویچ در دو منطقه مطالعاتی گچی و ۴ منطقه مطالعاتی آهکی این نتیجه حاصل شد که در ارتباط با فروچاله‌های گچی، هر منطقه شرایط و مشخصات خاص خود را دارد؛ اما در ارتباط با چهار منطقه آهکی نتایج حاصل‌شده مشابه است. وجود آبراه‌ها روی سازندها و لایه‌های گچی دشت مارون باعث ایجاد فروچاله‌های کشیده شده و در دشت جابر نیز که عمده فروچاله‌ها روی خط کنیک شکل گرفته‌اند، محل تلاقی یک جریان متمرکز دامنه‌ای و لایه گچی موجب ایجاد فروچاله‌های دایره‌ای شکل شده است؛ در حالی که از ملزومات شکل‌گیری فروچاله‌های آهکی، قرارگیری آنها در مناطق کم‌شیب و مسطح است؛ بنابراین تنوع مکانیسم کمتری نسبت به گچ دارند.

نتایج حاصل‌شده از مطالعات میدانی مؤید این مسئله است که عمق فروچاله‌های دشت جابر بیشتر بوده که علت آن، ضخیم‌بودن لایه‌های گچ دشت جابر نسبت به دشت مارون و از آن مهم‌تر، قرارگیری این لایه‌ها در خط کنیک و در معرض یک جریان متمرکز قدرتمند دامنه‌ای است؛ اما فروچاله‌های دشت مارون شیب بیشتری دارند و از لحاظ پارامتر مساحت نیز، فروچاله‌های دشت جابر مساحت بیشتری دارند. با توجه به فرم کنونی فروچاله‌ها، ۷۳ درصد از فروچاله‌های منطقه در اثر پدیده انحلال، ۱۴ درصد از فروچاله‌ها با توجه به اینکه دهانه فروچاله‌ها شیب بسیار زیاد و مساحت کمتری دارند، در اثر ریزش و ۱۳ درصد با ترکیبی از این دو مکانیسم شکل گرفته است. این فروچاله‌ها فرم کلی قیفی دارند.

درباره فروچاله‌های آهکی با توجه به مورفومتری متفاوت آنها می‌توان اینگونه بیان کرد که مهم‌ترین عامل ایجاد آنها، انحلال است و عامل گسل تنها پارامتری است که سبب شده است فروچاله‌های بیضی‌شکل و کشیده درصد زیادی از فرم فروچاله‌ها را نسبت به فروچاله‌های دایره‌ای به خود اختصاص دهند. علت وجود این اختلاف مهم، خاصیت پلاستیکی سازند گچساران و قرارگیری این سازند در ناودیس‌هاست. تنوع در موقعیت قرارگیری لایه‌های گچ و همچنین میزان بسیار زیاد انحلال گچ نسبت به آهک سبب می‌شود فروچاله‌های گچی سازوکار مختلف شکل‌گیری و تنوع در فرم داشته باشند. در مطالعه ویسی و همکاران (۱۳۹۸) درباره فروچاله‌های آهکی نیز این نتیجه حاصل شده است که فروچاله‌های منطقه شاهرز از نوع انحلالی و کشیده‌اند و کشیدگی آنها به سبب وجود گسل در این منطقه است؛ همچنین وجود درزها، شکاف‌ها و گسل‌های منطقه سبب توسعه‌یافتگی سیستم کارستی شده است.

نتایج کمی حاصل از تحلیل رگرسیون خطی تک‌متغیره، روابط درجه ۲ و ۳ و تحلیل رگرسیون خطی چندگانه گام‌به‌گام بین مؤلفه‌های مورفومتری فروچاله‌های گچی و آهکی نشان می‌دهد پارامترهای مساحت، قطرهای بزرگ و

کوچک و عمق، فاکتورهای مناسبی برای مدل‌سازی فروچاله‌های گچی، و مساحت، محیط، عمق، شیب، قطر بزرگ، قطر کوچک و ضریب کشیدگی فروچاله‌ها، پارامترهای مناسبی برای مدل‌سازی فروچاله‌های آهکی هستند. همان‌طور که گفته شد فرایند انحلال و تأثیر گسل، عامل اصلی تنوع در مورفومتری فروچاله‌های آهکی و عوامل متعددی چون ریزش، انحلال و ترکیبی از ریزش و انحلال علت شکل‌گیری و مورفومتری متنوع فروچاله‌های گچی است؛ بنابراین یکی از مهم‌ترین دلایلی که باعث شده است پارامترهای بیشتری از فروچاله‌های آهکی نسبت به فروچاله‌های گچی همبستگی زیاد داشته باشند، نحوه شکل‌گیری این فروچاله‌هاست. پیشنهاد می‌شود برای بررسی فروچاله‌های گچی علاوه بر بررسی مورفومتری فروچاله‌ها، به شرایط و وضعیت لایه‌های گچی نسبت به جریان‌های مؤثر آب، میزان ضخامت لایه‌ها و میزان تأثیرپذیری فروچاله‌ها از لایه‌های مارن نیز در مدل‌سازی توجه شود؛ زیرا این پارامترها سبب تغییر معادلات مدل‌سازی حتی در یک منطقه مطالعاتی خاص می‌شود؛ این در حالی است که فرایند شکل‌گیری فروچاله‌های آهکی فاقد این حجم از پیچیدگی است.

براساس پژوهش کمی رضایی مقدم و قدری (۱۳۹۰) روی فروچاله‌های آهکی منطقه تخت سلیمان، عمق فروچاله‌ها رابطه معناداری با ارتفاع آنها و عامل ارتفاع نقش مؤثری در مساحت فروچاله‌ها دارد؛ اما فعالیت‌های زمین‌ساخت در محدوده مطالعه شده سبب شده است ارتفاع فروچاله‌ها رابطه معناداری با مساحت آنها نداشته باشد. گفتنی است درباره مدل‌سازی و مورفومتری فروچاله‌های گچی مطالعه‌ای یافت نشد.

منابع

- 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، جغرافیا و توسعه، دوره ۶، شماره ۳۶، ۱۸۱-۱۹۴.
- حیدری، زهرا، قدیمی، مهرنوش، رضایی عارفی، مرتضی، حیدری، زینب، (۱۳۹۹). شناخت عوامل مؤثر بر پراکنش و وقوع فروچاله‌ها با استفاده از شاخص‌های کمی مورفومتری؛ مطالعه موردی (دشت کرمانشاه)، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال ۹، شماره ۲، ۲۱۵-۲۲۶.
- رضایی مقدم، محمدحسین، قدری، محمدرضا، (۱۳۹۰). تحلیل کمی فروچاله‌ها در زمین‌های کارستی؛ مطالعه موردی: منطقه تخت سلیمان، نشریه جغرافیا و برنامه‌ریزی، دوره ۱۶، شماره ۳۵، ۱۱۳-۱۳۵.
- زمان‌زاده، سید محمد، پاریزی، اسماعیل، امینی، مهدی، (۱۳۹۷). مدل‌سازی مؤلفه‌های مورفومتری فروچاله‌ها و ارائه شاخص بعد فرکتال در مطالعه گسل‌های مناطق کارستی؛ مطالعه موردی: مناطق کارستی بین پراو و شاهو، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال ۶، شماره ۴، ۱-۱۶.
- قبادی، محمدحسین، (۱۳۸۸). زمین‌شناسی مهندسی کارست، چاپ دوم، همدان، انتشارات دانشگاه بوعلی سینا.
- کریمی، حاجی، (۱۳۸۹). ارتباط سیستم ساختمانی و کارست‌شدگی، مجموعه مقالات دومین سمپوزیوم بین‌المللی

منابع آب کارست در ایران، تهران.

مؤمنی‌پور، مهدی، (۱۳۹۵)، مطالعهٔ نئوتکتونیک و فرسایش حوضهٔ مارون با تکنیک ژئومورفومتری، پژوهش‌های فرسایش محیطی، سال ۶، شماره ۳، ۳۳-۵۱.

ویسی، عبدالکریم، مقیمی، ابراهیم، مقصودی، مهران، یمانی، مجتبی، حسینی، سید موسی، (۱۳۹۸). ارزیابی توسعه‌یافتگی آبخوان‌های کارستی در ارتباط با ژئومورفولوژی دولین‌ها و ویژگی‌های هیدرودینامیکی؛ مطالعهٔ موردی: توسعهٔ کارستی شاهو، هیدروژئومورفولوژی، سال ۵، شماره ۱۹، ۱۰۱-۱۲۳.

وزارت نیرو (تماب)، (۱۳۷۳). فرهنگ چندزبانهٔ واژه‌های کارست، سازمان تحقیقات منابع آب.

- Bondesan, A., Meneghel, M., Sauro, U., (1992). **Morphometric analysis of dolines**, International Journal of Speleology, 21 (1), pp 1-55.
- Basso, A., Bruno, E., Parise, M., Pepe, M., (2012). **Morphometric analysis of sinkholes in a karst coastal area of southern Apulia (Italy)**, Environmental Earth Sciences, 70 (6), pp 1-16.
- Bruno, E., Domenico Calcaterra, M., (2008), **Development and morphometry of sinkholes in coastal plains of Apulia, southern Italy**, Preliminary sinkhole susceptibility assessment, Engineering Geology, 99 (3): 198-209.
- Ford, D., Williams, P.D., (2013). **Karst hydrogeology and geomorphology**, London, 562 p.
- Gutiérrez, F., Parise, M., De Waele, J., Jourde, H., (2014). **A review on natural and human-induced geohazards and impacts in karst**, Earth-Science Reviews, 138, pp 61-88.
- Chen, H., Oguchi, T., Wu, P., (2018). **Morphometric analysis of sinkholes using a semi – automatic approach in Zhijin County, China**, Arabian journal of Geoscience, 11: 412.
- Liang, F., Du, Y., (2013). **An automated method to extract typical karst landform entities from contour lines on topographic maps**, Proceedings of Geomorphometry, 112, pp 46- 49.
- Liang, F., Du, Y., (2013). **An automated method to extract typical karst landform entities from contour lines on topographic maps**, Proceedings of Geomorphometry, 112, pp 46- 49.
- Montjane, A., Tshibubuze, A., Woldai, T., Heath, L., (2020). **The influence of geological fractures on karstic sinkhole development in eastern areas of Centurion, South Africa**, Environmental Earth Sciences, 1-15.
- Ozdemir, A., (2015). **Sinkhole Susceptibility Mapping Using a Frequency Ratio Method and GIS Technology Near Karapınar, Konya-Turkey**, Procedia Earth and Planetary Science, 15, pp 502-506.
- Ozyurt, N.N., Lutz, H.O., Hunjak, T., Mance, D., Roller-Lutz, Z., (2014). **Characterization of the Gacka River basin karst aquifer (Croatia): Hydrochemistry, stable isotopes and tritium-based mean residence times**, Science of The Total Environment, 487, pp 245-254.
- Panno, S., Luman, D., (2018). **Characterization of cover-collapse sinkhole morphology on a groundwater basin-wide scale using lidar elevation data: A new conceptual model for sinkhole evolution**, Geomorphology, DOI: 10.1016/j.geomorph.2018.05.013.
- Cvijić, J., (1893). **Das Karstphänomen: Versuch einer morphologischen Monographie**. Stuttgart.
- Whaltham, a.c., fookes, p.g., (2005). **Abstract Engineering classification of karst ground condition** □ Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 36, 101 □ 118.
- Whaltham, T., Bell, F.G., Culshaw, M., (2007). **Sinkholes and subsidence: karst and cavernous rocks in engineering and construction**, Environmental and Engineering Geoscience, 13 (1), pp 83-84.

