

Simulation of Climatic Conditions within the Caves Through a Controlled Laboratory Environment to Estimate the Annual Dissolution Rate of Karstic Shapes Inside Katala Khor and Saholan Caves

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Mokhtari D.¹ PhD,
Rezaei Moghaddam MH.¹ PhD,
Karimi Soltani P.² PhD,
Abdolmaleki T.^{*1} MA

How to cite this article

Mokhtari D, Rezaei Moghaddam MH, Karimi Soltani P, Abdolmaleki T. Simulation of Climatic Conditions within the Caves Through a Controlled Laboratory Environment to Estimate the Annual Dissolution Rate of Karstic Shapes Inside Katala Khor and Saholan Caves. Geographical Researches. 2019;34(4):567-576.

¹Department of Geomorphology, Faculty of Planning and Environmental Science, University of Tabriz, Tabriz, Iran

²Department of Geography, Faculty of Literature and Humanities, Razi University of Kermanshah, Kermanshah, Iran

*Correspondence

Address: No. 44, Karami Alley, Godarzi Cross, Sheykh Akbari St, Shahr-e Rey, Tehran, Iran. Postal Code:1841873177
Phone: +98 (21) 55902186
Fax: +98 (21) 55902186
ta.abdolmaleki@gmail.com

Article History

Received: January 26, 2019
Accepted: November 2, 2019
ePublished: December 11, 2019

ABSTRACT

Aims & Backgrounds Katala Khor Cave near Garmab (Zanjan) and Saholan Cave in southeast Mahabad, two Iranian tourist caves, attract a large number of tourists annually. Indiscriminate entry and higher number of tourists into the fragile and sensitive environment of the caves increase the concentration of carbon dioxide and disturb the chemical equilibrium inside the cave and it also has devastating effects, like erosion and corrosion, on Karst forms inside the cave. Therefore, this paper attempts to investigate the annual dissolution rate of cave forms by simulating and reconstructing climatic conditions inside a controlled laboratory environment.

Methodology To achieve the objectives of the study, data on temperature, relative humidity and CO₂ content within the caves in question during two 15-day periods in February due to low number of tourists and April due to high tourist presence inside the caves were collected using triple tool of temperature, humidity, and CO₂ gauge model (AZ 77535). Next, by simulating the same conditions in a controlled laboratory environment, the amount of annual dissolution of the forms inside the caves was calculated using weighting method.

Findings The amount of dissolution and scaling of forms is 0.9445 g / year for Katala Khor and 2.20 g / year for Saholan Cave. Of this amount, 0.7661 g is 81.12% of total dissolution for Katala Khor Cave and 1.6991 g is 84.45% for Saholan Cave are attributed to tourists' presence.

Conclusion Maximum presence of tourists in Katala Khor and Saholan Caves caused the micro-climates in which the increased level of the concentration of de-carbohydrate increases the temperature of cave and decreases the moisture. As a result of these changes, the formation process of karstic shapes within the caves is disrupted, resulting in the destruction and shattering of the forms.

Keywords Cave Climatic Simulation; Cave Tourism; Saholan Cave; Katala Khor Cave

CITATION LINKS

[Ahmadi & Khoshraftar; 2011] Evaluation of geotourism capabilities of katala khor cave in Zanjan using the techniques SWOT; [Asghari Moghaddam, et al; 2006] Studying of geomorphology, geology and genesis of Sahoolan water cave northwest of Iran; [Baker; 2014] The jenolan environmental monitoring program; [Baldini, et al; 2006] Carbon dioxide sources, sinks, and spatial variability in Shallow temperate zone caves: Evidence from Ballynamindra cave Irelands; [Behniyafar & Qanbarzadeh; 2016] Karst geomorphology: Processes, forms and management of karst environments; [Calaforra, et al; 2003] Environmental control for determining human impact and permanent visitor capacity in a potential show cave before tourist use; [De Freitas; 2010] The role and importance of cave microclimate in the sustainable use and management of show caves; [Sebela, et al; 2013] Impact of peak period visits on the Postojna cave (Slovenia) microclimate; [Ek & Gewalt; 1985] Carbon dioxide in cave atmospheres. new result in belgium and comparison with some other countries; [Gillieson; 2005] Caves, processes, development, management; [Hutacharern; 2004] The effects of human impacts on cave and karst Biodiversity: Thailand Component; [Karimi Soltani & Rezaei; 2015] Daily and monthly fluctuation of carbon dioxide in Ali-Sadr cave of Hamedan and tourists' health; [Lang, et al; 2016] Carbon dioxide seasonality in dynamically ventilated caves: The roles of modes and advective fluxes; [Lang, et al; 2017] A show cave management: Anthropogenic CO₂ in atmosphere of Vypustek cave; Moravian karst, Czech Republic; [Linan, et al; 2008] Carbon dioxide concentration air within the Narja cave (Malaga, Andalusia, Spain); [Maleki, et al; 2015] The role of the tourists in the karst dissolution of the secondary shapes inside caves, case study: Hamedan Ali-Sadr cave; [Maleki & Karimi Soltani; 2015] Tourists and their role in microclimatic changes inside the caves case study: Ali-Sadr cave (Hamedan, Iran); [Maleki, et al; 2014] Tourists and their role in microclimatic changes inside the caves case study: Ali-Sadr cave (Hamedan, Iran); [Michie; 1997] An investigation of the climate, carbon dioxide and dust in Jenolan caves, N.S.W; [Mokhtari; 2015] Geotourism; [Moroni; 2013] Radon and carbon dioxide monitoring as approach to touristic exploitation of caves; [Rezaei & Nakhaei; 2008] Spleogenesis of Katala khor cave in Zanjan province; [Song, et al; 2000] The influences of cave tourism on CO₂ and temperature in Baiyun cave, Hebei, China

شبیه‌سازی شرایط اقلیمی درون غارها در محیط آزمایشگاهی کنترل شده، جهت برآورد مقدار انحلال سالانه اشکال کارستی درون غارهای کتله‌خور و سهولان

داود مختاری PhD

گروه ژئومورفولوژی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

محمدحسین رضایی مقدم PhD

گروه ژئومورفولوژی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

پیمان کریمی سلطانی PhD

گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه رازی کرمانشاه، ایران

طیبه عبدالملکی MA

گروه ژئومورفولوژی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

چکیده

اهداف و زمینه‌ها: غار کتله‌خور در نزدیکی شهر گرماب (زنجان) و غار سهولان در جنوب شرق مهاباد، سالانه پذیرای تعداد زیادی از گردشگران هستند. تعداد بالای گردشگران و ورود بی‌رویه آنها به محیط‌های حساس و شکننده غارها، سبب بالارفتن غلظت دی‌اکسیدکربن موجود در غار شده و تعادل شیمیایی درون غار به هم خورده و اثرات مخربی بر اشکال و سازندهای کارستی درون غار به جای گذاشته است که به تدریج سبب تحلیل، خوردگی و پوسته‌شدن اشکال کارستی درون غار می‌شود. از این رو در این مقاله تلاش شده است تا با شبیه‌سازی و بازسازی شرایط اقلیمی درون غارها در محیط آزمایشگاهی کنترل‌شده، مقدار انحلال سالانه اشکال درون غارها محاسبه شد.

روش‌شناسی: دما، رطوبت نسبی و دی‌اکسیدکربن موجود در درون غارهای موردنظر در دو دوره ۱۵ روزه در بهمن ماه به سبب تعداد کم گردشگر و ماه فروردین به دلیل حضور بالای گردشگر در درون غارها با استفاده از دستگاه ۳ کاره دما، رطوبت و CO₂ سنخ اندازه‌گیری شد. در مرحله بعد، با شبیه‌سازی همین شرایط در محیط آزمایشگاهی کنترل‌شده، مقدار انحلال سالانه اشکال درون غارها به شیوه وزنی محاسبه گردید.

یافته‌ها: مقدار انحلال و پوسته‌شدن اشکال برای غار کتله‌خور ۹۴۴۵/۹۴۴۵ گرم در سال و برای غار سهولان ۲۰۱۲/۰۱۲ گرم در سال بود. از این مقدار ۷۶۶۱/۷۶۶۱ گرم، معادل ۸۱/۱۲٪ کل انحلال برای غار کتله‌خور و ۱۶۹۹۱/۱۶۹۹۱ گرم معادل ۸۴/۴۵٪ برای غار سهولان، سهم گردشگران بود.

نتیجه‌گیری: ورود حداکثری گردشگران به درون غارهای کتله‌خور و سهولان، ریزاقلیم‌هایی را به وجود آورد که غلظت دی‌اکسیدکربن در آنها افزایش یافته، درجه حرارت غار بالا می‌رود و رطوبت نسبی کاهش می‌یابد. در اثر این تغییرات، روند شکل‌گیری اشکال کارستی درون غارهای مورد نظر مختل می‌شود و تخریب و شکسته‌شدن اشکال را به دنبال دارد.

کلیدواژه‌ها: شبیه‌سازی اقلیمی غارها، گردشگری در غارها، غار سهولان، غار کتله‌خور

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۱/۰۶

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۸/۱۱

نویسنده مسئول: ta.abdolmaleki@gmail.com

مقدمه

غارها از جمله اشکال ژئومورفولوژیکی حساس و شکننده هستند.

محیط غارها به سبب طبیعت بسته‌ای که دارند بدون حضور و دخل و تصرف انسان چندان مورد تهدید واقع نمی‌شوند اما با حضور و دخل و تصرف انسان این اکوسیستم‌های طبیعی مورد تهدید قرار می‌گیرند [Moroni, 2013]. حدود ۵۰۰ غار بزرگ توریستی با بیش از ۵۰۰۰۰ بازدیدکننده در سال، در جهان وجود دارد و بیش از ۲۵۰ میلیون بازدیدکننده سالانه بلیط برای بازدید از آنها را پرداخت می‌کند [Cigna, 2013] هر انسان به‌طور متوسط ۱۰۳ PPM / ۴۰٪ دی‌اکسیدکربن از طریق تنفس آزاد می‌کند [Ek & Gewalt, 1958]. فرایندهای دم و بازدم گردشگران سبب تجمع حجم زیادی از گاز دی‌اکسیدکربن در غارها می‌شود. فعالیت‌های بازدیدکنندگان هم در محیط غار و نیز هم بر مواد طبیعی و مبادله انرژی بین درون و بیرون غارها تأثیر دارد. بازدید از غارها موجب هوازدگی جدی اسپلئودم‌ها (غارنهبسته‌ها) و تغییر یافتن رنگ‌های اصلی‌شان و گاهی اوقات به‌طور کامل آسیب دیده یا تخریب می‌شوند [Song, 2000]. هر جهانگرد وارده به غار مقدار گرمایی برابر ۸۰ تا ۱۲۰ وات ساطع می‌کند که در نتیجه منجر به افزایش دمای غار خواهد شد. در بعضی از غارها درجه حرارت گذرگاه‌ها هنگام ورود جهانگردان ۱/۵ تا ۲ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد. بنابراین ورود جمعیت به‌صورت گروهی به درون غارها مشکلات جدی را برای موجودات غارزی به وجود می‌آورد. زیرا اقلیم غار به شدت تغییر می‌کند. افزایش دی‌اکسیدکربن در اثر ورود جهانگردان موجب تغییرات وسیع در فرایند انحلالی خواهد شد. زیرا غلظت CO₂ در بعضی از غارها به چهار برابر می‌رسد [Behniyafar, 2016]. افزایش CO₂ ناشی از جهانگردان غار و ازدحام آنها در اطراف اسپلئودم‌های غاری منجر به تجزیه آنها خواهد شد. عبور سیاحان از غار آلتامیرا (Altamira)، واقع در اسپانیا، منجر به افزایش درجه حرارت هوا به مقدار ۲ درجه سانتی‌گراد، سه برابر شدن مقدار CO₂، از ۴٪ تا ۱۲٪ و نیز منجر به کاهش رطوبت نسبی از ۹۰٪ به ۷۵٪ گردید این امر به خصوص در پوسته پوسته‌ای شدن دیواره‌های غار موثر است [Gillieson, 2005]. مطالعات انجام‌یافته در ایران نشان می‌دهد؛ سهم گردشگران در تغییرات مقادیر دی‌اکسیدکربن، درجه حرارت و رطوبت نسبی به شکل روزانه و ماهانه مشهود است به طوری که حضور گردشگران در غار علیصدر همدان و فعالیت دم و بازدم آنها مقادیر عناصر اقلیمی درون غارها را تغییر داده و سبب دگرگون شدن ریز اقلیم درون غار از جمله افزایش درصد دی‌اکسیدکربن با منشأ انسانی، و افزایش مقدار انحلال و پوسته‌شدن اشکال ثانویه دورن غار علیصدر شده است [Maleki, 2015; Maleki, 2014, karimi, 2015; Soltani & Rezaei, 2015]. اختلال در تعادل شیمیایی تزئینات داخلی غارها و کاسته‌شدن از ضخامت آنها، اثر گردشگری بر CO₂ و دما و اقلیم غار [Song, 2000; Michie, 1997; 2013; Baker, 2014; Sebela, 2014]. اثر سریع گردشگری بر دمای غار [Baker, 2014; Calaforra, 2003] و افزایش مقدار تمرکز دی‌اکسیدکربن از مهم‌ترین آثار شناخته‌شده حضور گردشگران در غارها است [Linan, 2008]. نقش و اهمیت ریز اقلیم غار در استفاده پایدار و مدیریت

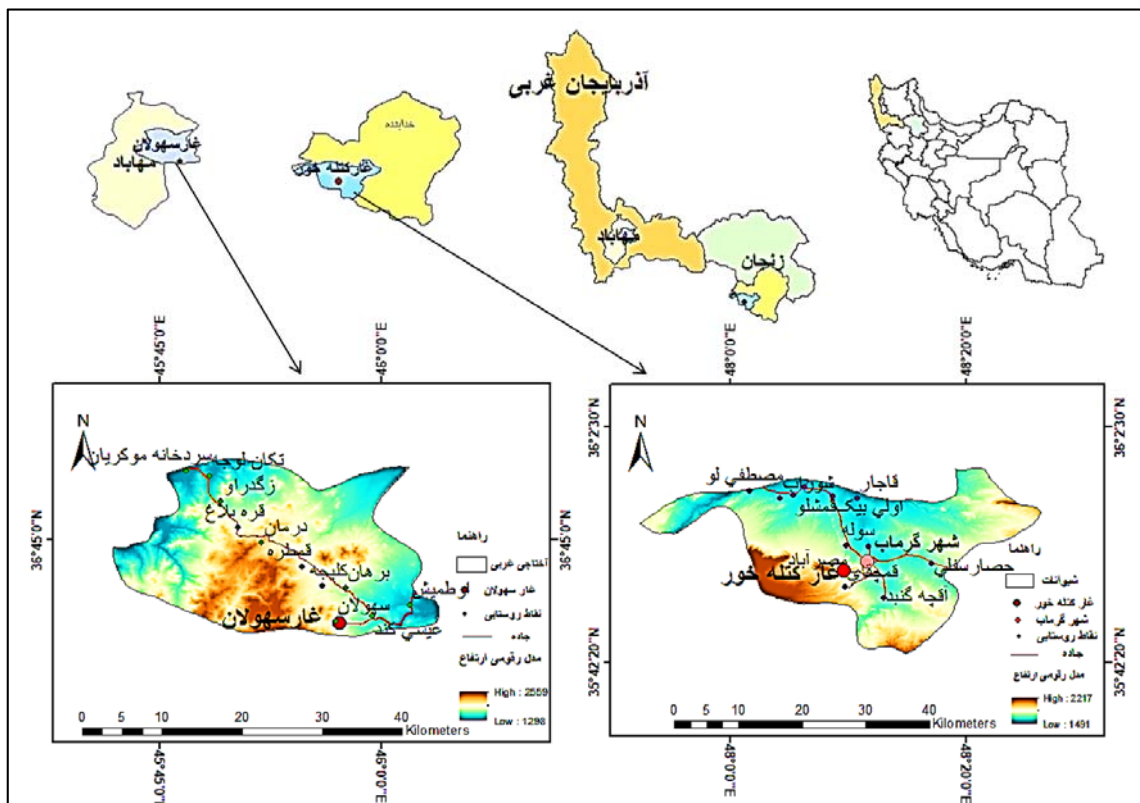
۲۲۲۲ متر قرار گرفته و دارای دو بخش خشک و آبدار است که سطح آبدار آن در داخل غار حدود ۱۷۵۰ متر بالاتر از سطح دریاهای آزاد و تقریباً ۲۰ متر پایین‌تر از ورودی اصلی غار است [Asghari Moghaddam, 2006] (شکل ۱). غار سهولان از لحاظ زمین-شناسی ساختاری در زون خوی-مه‌آباد قرار دارد و از نظر لیتولوژیکی کوه دربرگیرنده غار، از دولومیت‌ها و آهک‌های دولومیتی به سن پرمین (سازند روته) تشکیل یافته است. براساس طبقه‌بندی اقلیمی به روش‌های دومارتن و آمبرژه، منطقه فرارگیری غار به ترتیب در حد واسط بین اقلیم‌های خشک و مدیترانه‌ای و نیمه‌مرطوب سرد تعیین شده است [Asghari Moghaddam, 2006]. غار کتله‌خور در موقعیت جغرافیایی ۴۸° و ۸' طول شرقی و ۳۵° و ۵۰' عرض شمالی در جنوب شهر کوچک گرماب شهرستان خدابنده و در ۱۴۰ کیلومتری جنوب استان زنجان در شمال غرب ایران قرار گرفته است. این غار از طریق جاده زنجان-سلطانیه-خدابنده و همچنین جاده اصلی زنجان بیجار قابل دسترسی است [Ahmadi, 2011]. این غار در آهک‌ها دوره الیگومیوسن و در سازند آهکی قم در کوه سقزلو قرار گرفته است. اقلیم محلی نیمه‌خشک با زمستان سرد است. متوسط بارندگی سالیانه حدود ۳۰۰ میلی‌متر و عمدتاً به شکل برف است. غار کتله‌خور یک غار سه طبقه است. محدوده ارتفاعی طبقات از ۱۷۰۵ تا ۱۷۴۲، ۱۶۸۵ تا ۱۷۰۵ و ۱۶۷۰ تا ۱۶۸۵ متر بالای سطح دریا است [Rezaei, 2008] (شکل ۱).

غارهای توریستی باید با تعیین سطح مطلوب یا دامنه شرایط زیست‌محیطی و حفظ آنها مورد توجه قرار گیرد [Smith, 2011; De Freitas, 2010]. تغییرات فصلی در مقادیر دی‌اکسیدکربن در غار، فاصله بین گروه‌های بازدید از غار، از جمله عوامل دیگر تأثیرگذار در ارزیابی اثر گردشگری بر محیط غارهاست [Lang, 2016; Lang, 2017].

در این پژوهش، تلاش شده است تا با اندازه‌گیری دی‌اکسیدکربن، دما و درصد رطوبت نسبی موجود در هوای درون غارهای سهولان و کتله‌خور، غار سهولان به‌عنوان دومین غار آبی کشور و همچنین غار کتله‌خور، به‌عنوان طولانی‌ترین غار ایران و دومین غار مهم توریستی کشور که سالانه پذیرای تعداد زیادی از گردشگران هستند، و تفکیک نقش گردشگران در تغییرات مقادیر این عناصر اقلیمی و بازسازی این شرایط در محیط کنترل‌شده آزمایشگاهی، نقش گردشگران در مقدار انحلال سالانه اشکال کارستی درون غار محاسبه گردد.

روش‌شناسی

غار آبی سهولان در جنوب استان آذربایجان غربی و جنوب شرق شهرستان مه‌آباد در ۳۹° و ۲۱' عرض شمالی و ۴۵° و ۵۷' و ۱۳ طول شرقی واقع شده است. دسترسی به این غار از طریق جاده مه‌آباد-بوکان تا سه راهی روستای عیسی‌کندی و از آن پس از جاده فرعی به سمت روستای سهولان امکان‌پذیر بوده که طول آن حدود ۴۰ کیلومتر است. غار در دامنه کوهی به نام کونه کوتر به ارتفاع



شکل ۱) موقعیت منطقه مورد مطالعه: غار کتله‌خور و غار سهولان

و تأثیر گردشگران در تغییرات مقادیر دی‌اکسیدکربن، درجه حرارت و رطوبت نسبی در هر دو دوره برداشت‌ها به دست آورده شد. مرحله دوم کار شامل فعالیت‌های آزمایشگاهی است. در این مرحله برای فعالیت‌های آزمایشگاهی ۶ نمونه سنگ (برای هر غار سه نمونه) از مناطق کم ارتفاع، متوسط ارتفاع و مرتفع غارهای کتله‌خور و سهولان برداشت گردید و جهت انجام آزمایشات آماده‌سازی شدند. بعد از کدگذاری نمونه‌ها، ویژگی‌های دقیق شیمیایی آنها شامل کربنات سنجی به روش برنارد و XRD تعیین گردید. در جدول ۳ نتایج حاصل از آزمایش کربنات سنجی نمونه‌ها ارایه شده است. هدف از انجام آزمایشات XRD، تعیین انواع کانی‌های رسی در نمونه‌های مختلف است، زیرا نمونه‌هایی که ترکیب شیمیایی آنها انواع کانی‌های رسی وجود داشته باشد از ضریب انحلال کمتری برخوردار هستند [Maleki, 2015]. در نتایج حاصل از XRD نمونه‌ها در این پژوهش، هیچکدام از انواع کانی‌های رسی وجود نداشته و یا درصد وجود آنها بسیار جزئی بوده است. نتیجه XRD نمونه‌های مناطق کم ارتفاع هر دو غار نشان داده شده است. همان‌گونه که در نمودار ۱ و ۲ دیده می‌شود ترکیب شیمیایی غالب این نمونه کربنات کلسیم است.



شکل ۲) تصویری از دالان‌های کم ارتفاع غار سهولان و کتله‌خور

فعالیت‌های انجام گرفته جهت محاسبه مقدار انحلال و نقش گردشگران در آن، شامل دو مرحله است. مرحله اول شامل جمع‌آوری داده‌های مربوط به درجه حرارت، رطوبت نسبی و غلظت دی‌اکسیدکربن موجود در درون غارهای کتله‌خور و سهولان و نقش گردشگران در تغییر مقادیر این عناصر است. برای این منظور با توجه به تغییرات درجه حرارت، رطوبت نسبی و غلظت دی‌اکسیدکربن در دالان‌ها و تالارها با ابعاد مختلف و همچنین بالارفتن دقت کار فضای درون غار به سه بخش منطقه کم ارتفاع (ارتفاع سقف بین ۲-۵ متر از سطح زمین و آب)، متوسط ارتفاع (ارتفاع سقف بین ۲ متر) و مرتفع (ارتفاع سقف بیش از ۵ متر) تقسیم گردید. در شکل ۲ تصویری از دالان‌ها و تالارهای کم ارتفاع هر دو غار به‌طور نمونه آورده شده است. برداشت‌ها با استفاده از دستگاه سه کاره دما، رطوبت و Co2 سنج (AZ 77535) در دو دوره ۱۵ روزه، همزمان با تردد حداقلی گردشگران در درون غارها (غارکتله‌خور) و (غار سهولان) در ماه بهمن و تردد حداکثری گردشگران در درون غارها در ماه فروردین صورت پذیرفت. لازم به ذکر است برداشت‌ها با استفاده از دو دستگاه و همزمان برای هر دو غار انجام گرفته است. مجموع آمار تعداد گردشگر ۱۵ روزه ماه فروردین ۱۳۹۷ برای غار کتله‌خور ۱۴۲۲۴ نفر و غار سهولان ۳۳۰۵۱ نفر است. تعداد آمار گردشگر در ۳۰ روز ماه بهمن سال ۱۳۹۶ غار کتله‌خور طبق آمار اداره کل میراث فرهنگی و گردشگری زنجان ۶۴ نفر و در غار سهولان در ۳۰ روز ماه بهمن سال ۱۳۹۶ طبق آمار اداره کل میراث فرهنگی و گردشگری مهاباد ۱۱۵۰ نفر است. برداشت‌ها به شکل روزانه و در سه نوبت صبح (قبل از ورود گردشگران)، ظهر و شب (بعد از خروج گردشگران) در هر دو غار صورت گرفته است (جدول ۱ و ۲). در نهایت، با به دست آوردن تفاضل بین برداشت‌ها و اندازه‌گیری‌های حاصل از ماه فروردین، از برداشت‌ها و اندازه‌گیری‌های حاصل از ماه بهمن، نقش

جدول ۱) میانگین برداشت‌های دما، رطوبت نسبی و دی‌اکسیدکربن برای شبیه‌سازی در شرایط آزمایشگاهی، غار کتله‌خور

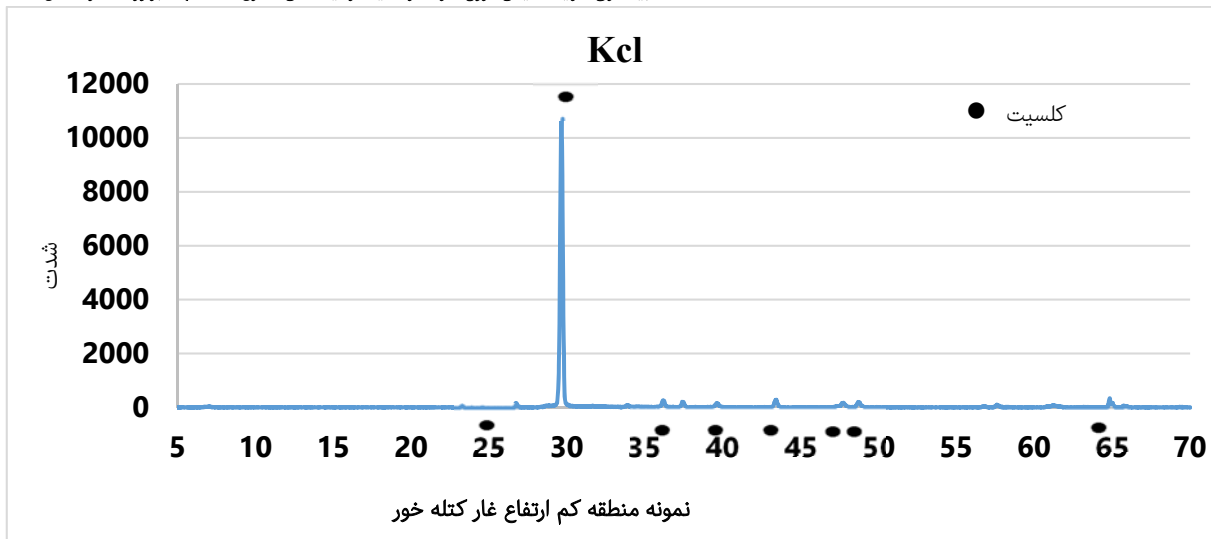
فصل برداشت‌ها	دی‌اکسیدکربن (PPM)	درجه حرارت (C°)	رطوبت نسبی (درصد)
میانگین برداشت‌های فصل زمستان	۲۰۹	۱۲/۳	۹۹/۹
میانگین برداشت‌های فصل بهار	۱۱۰۷	۱۵/۷	۹۸/۸
میانگین فصول	۶۵۸	۱۴	۹۹/۳۵
بیشینه دی‌اکسیدکربن ثبت شده	۲۱۷۵	-	-
کمینه دی‌اکسیدکربن ثبت شده	۱۶۷	-	-

جدول ۲) میانگین برداشت‌های دما، رطوبت نسبی و دی‌اکسیدکربن برای شبیه‌سازی در شرایط آزمایشگاهی، غار سهولان

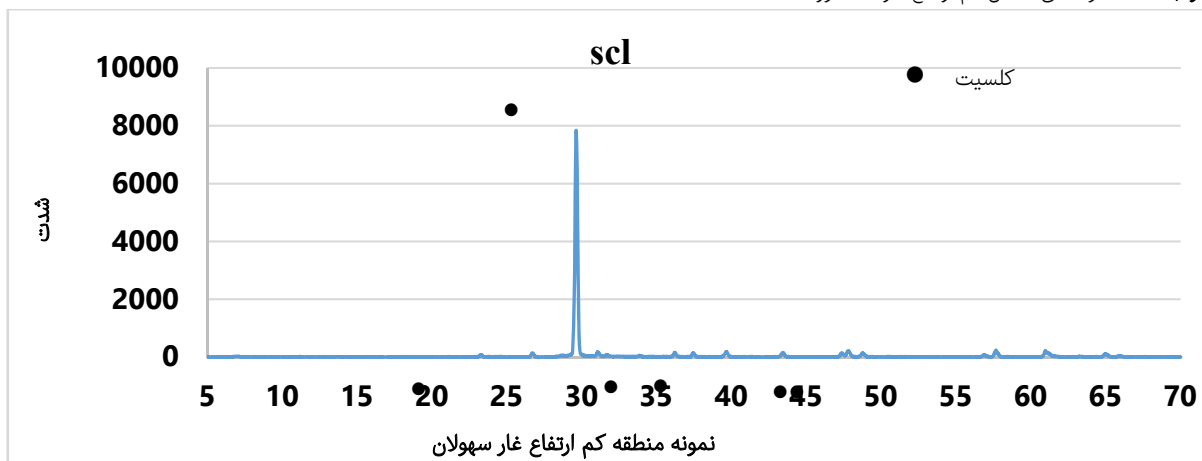
فصل برداشت‌ها	دی‌اکسیدکربن PPM	درجه حرارت (C°)	رطوبت نسبی (درصد)
میانگین برداشت‌های فصل زمستان	۲۳۱	۱۴	۹۹/۹
میانگین برداشت‌های فصل بهار	۱۴۸۶	۱۵/۴	۹۶/۸
میانگین فصول	۸۵۸	۱۴/۷	۹۸/۳۵
بیشینه دی‌اکسیدکربن ثبت شده	۲۷۱۰	-	-
کمینه دی‌اکسیدکربن ثبت شده	۱۷۲	-	-

جدول ۳) نتایج کربنات سنجی نمونه‌ها به روش برنارد (درصد)

کد نمونه‌ها	Kcl	Kcm	Kch	Scl	Scm	Sch
درصد کربنات کلسیم	۹۳/۸۸	۸۹/۹۰	۸۷/۷۶	۹۵/۹۲	۹۴/۳۰	۹۱/۸۴



نمودار (۱) XRD نمونه‌های مناطق کم ارتفاع غار کتله‌خور



نمودار (۲) XRD نمونه‌های مناطق کم ارتفاع غار سهولان

سنگ‌های تهیه‌شده از اشکال کارستی مناطق متوسط ارتفاع و بالاخره کدهای Kch و Sch نمونه سنگ‌های تهیه‌شده از اشکال کارستی مناطق مرتفع غار کتله‌خور و غار سهولان است.



شکل (۳) تصویری از محفظه‌های شیشه‌ای و ابزار مورد استفاده در آزمایشگاه

بعد از این مرحله، فعالیت‌های آزمایشگاهی آغاز شد. به این ترتیب که دو محفظه شیشه‌ای تهیه گردید و در هر یک از محفظه‌ها، سه نمونه تهیه‌شده از دالان‌های با ارتفاع کم، متوسط ارتفاع و مرتفع غارهای کتله‌خور و سهولان تعبیه شد. از هر کدام از محفظه‌ها برای تزریق متوسط دی‌اکسیدکربن برداشت‌شده در طی اندازه‌گیری‌های ۹۰ روزه برای هر غار استفاده گردید. با تعبیه نمونه‌ها در محفظه‌های شیشه‌ای، تزریق دی‌اکسیدکربن در تاریخ ۱۳۹۷/۹/۴ آغاز و به مدت ۹۰ روز کامل تا تاریخ ۱۳۹۷/۱۲/۴ ادامه پیدا کرد (شکل ۳). در این مدت، مقادیر دما و درصد رطوبت نسبی برداشت‌شده از درون غارها نیز در داخل محفظه‌های شیشه‌ای کنترل شد. بعد از خروج نمونه‌ها از محفظه‌های شیشه‌ای و نگهداری ۱۲ ساعته آنها در کوره آزمایشگاهی، نمونه‌ها مجدداً وزن‌کشی شدند و مقدار انحلال به شیوه وزنی به دست آمد.

کدهای Kcl نمونه سنگ تهیه‌شده از اشکال کارستی مناطق کم ارتفاع غار کتله‌خور و Scl نمونه سنگ تهیه‌شده از اشکال کارستی مناطق کم ارتفاع غار سهولان است. کدهای Kcm و Scm نمونه

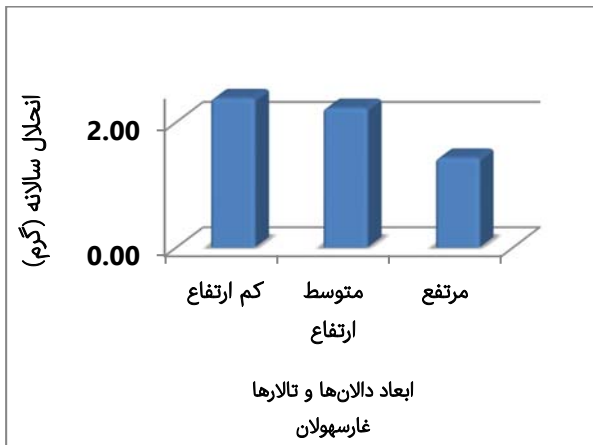
یافته‌ها

برآورد مقدار انحلال

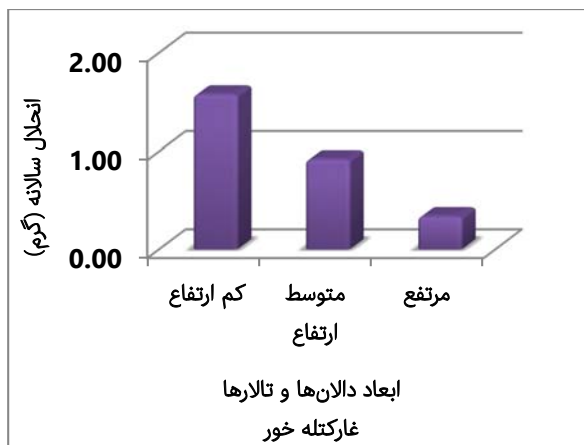
نتایج نهایی مقادیر انحلال و پوسته پوسته شدن نمونه‌ها ابتدا به صورت گرم در طی سه ماه و سپس سالانه ذکر شده است جدول ۴ و در ادامه مقادیر انحلال سالانه نمونه‌ها به تفکیک ابعاد دالان‌ها و همچنین، تفکیک سهم گردشگران تشریح شده است.

جدول ۴) نتایج نهایی مقادیر انحلال نمونه‌ها دو غار کتله‌خور و سهولان

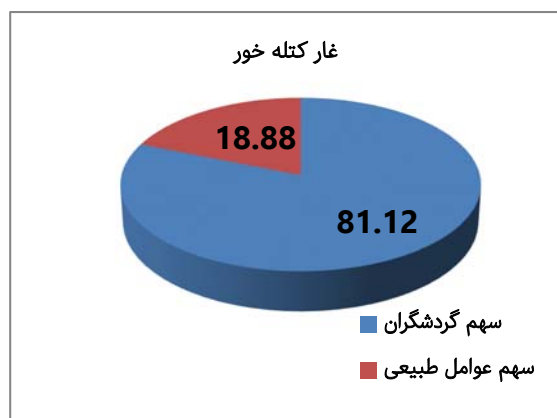
کد نمونه‌ها	وزن اولیه نمونه‌ها (گرم)	وزن ثانویه نمونه‌ها (گرم)	مقدار انحلال طی ۳ ماه (گرم)	مقدار انحلال سالانه (گرم)
Kcl (دالان‌های کم ارتفاع کتله‌خور)	۸۴/۰۵۵۳	۸۳/۶۶۱۳	۰/۳۹۴	۱/۵۷۶
Kcm (دالان‌های متوسط ارتفاع کتله‌خور)	۴۹/۴۶۶۵	۴۹/۲۳۶۵	۰/۲۳	۰/۹۲
Kch (دالان‌های مرتفع کتله‌خور)	۱۵۸/۸۷۲۱	۱۵۸/۷۸۷۷	۰/۰۸۴۴	۰/۳۳۷۶
Scl (دالان‌های کم ارتفاع سهولان)	۵۹/۳۱۹۰	۵۸/۷۲۳۹	۰/۵۹۵۱	۲/۳۸۰۴
Scm (دالان‌های متوسط ارتفاع سهولان)	۱۰۹/۲۰۶۶	۱۰۸/۶۵۰۴	۰/۵۵۶۲	۲/۲۲۴۸
Sch (دالان‌های مرتفع سهولان)	۵۲/۳۴۷۸	۵۱/۹۹۰۱	۰/۳۵۷۷	۱/۴۳۰۸



نمودار ۳) مقادیر انحلال سالانه در نمونه سنگ‌های دالان‌ها و تالارهای غار سهولان



نمودار ۴) مقادیر انحلال سالانه در نمونه سنگ‌های دالان‌ها و تالارهای غار کتله‌خور



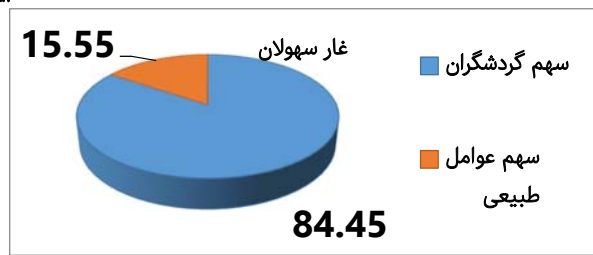
نمودار ۵) درصد سهم گردشگران از مقدار انحلال نمونه‌ها، غار کتله‌خور

طبق نتایج، بیشترین مقادیر انحلال و پوسته پوسته شدن سالانه نمونه‌ها، به ترتیب در نمونه سنگ‌های دالان‌های کم ارتفاع و متوسط ارتفاع در هر دو غار است (نمودار ۳ و ۴) و بیشترین میزان انحلال سالانه مربوط به غار سهولان با میانگین سالانه ۲/۰۱۲ گرم است که می‌توان نتیجه گرفت این امر با توجه به بالابودن غلظت دی‌اکسید کربن به همراه رطوبت نسبی در غار آبی سهولان، سبب ایجاد محیطی اسیدی‌تر نسبت به غار (خشک) کتله‌خور شده و در نتیجه خوردگی، انحلال و پوسته پوسته شدن اشکال موجود در غار آبی سهولان، نسبت به غار کتله‌خور بیشتر خواهد بود.

سهم گردشگران از مقادیر انحلال نمونه‌ها

مقدار متوسط دی‌اکسید کربن ثبت شده از غارهای سهولان و کتله‌خور در برداشت‌های بهار و زمستان به ترتیب در غار کتله‌خور PPM ۱۱۰۷، ۲۰۹ PPM و در غار سهولان PPM ۱۴۸۶، ۲۳۱ PPM بوده است. با به دست آوردن تفاضل بین متوسط دی‌اکسید کربن ثبت شده در بهار و زمستان ارقام PPM ۸۹۸ برای غار کتله‌خور و PPM ۱۲۵۵ برای غار سهولان، به عنوان سهم گردشگران از مقدار غلظت دی‌اکسید کربن درون غارهای کتله‌خور و سهولان به دست می‌آید. بر

درغارهای سهولان و کتله‌خور در فصل بهار، جهت بررسی میزان ارتباط و همبستگی عناصر، از تست همبستگی پیرسون استفاده شد. ضریب همبستگی پیرسون، از معیارهای مورد استفاده در تحلیل همبستگی متغیرها است و شدت رابطه و همچنین نوع روابط (مستقیم یا معکوس) را نشان می‌دهد. مقدار این ضریب بین +۱ و -۱ است. اگر مقدار به دست آمده مثبت باشد به معنی این است که تغییرات دو متغیر به‌طور هم جهت اتفاق می‌افتد یعنی با افزایش در هر متغیر، متغیر دیگر نیز افزایش می‌یابد و برعکس اگر مقدار r منفی شد یعنی اینکه دو متغیر در جهت عکس هم عمل می‌کنند یعنی با افزایش مقدار یک متغیر مقادیر متغیر دیگر کاهش می‌یابد و برعکس. اگر مقدار به دست آمده صفر شد نشان می‌دهد که هیچ رابطه‌ای بین دو متغیر وجود ندارد و اگر +۱ شد همبستگی مثبت کامل و اگر -۱ شد همبستگی کامل و منفی است. در هر دو غار در فصل بهار، بین میزان دی‌اکسیدکربن با میزان رطوبت نسبی و دما همبستگی معنی‌داری مشاهده شد. به این صورت که همبستگی بین میزان دی‌اکسیدکربن و رطوبت قوی و غیر مستقیم و میزان آن در غار کتله‌خور ($R = -0.917$ و $P < 0.0001$) و در غار سهولان میزان آن ($R = -0.878$ و $P < 0.0001$) است، به این مفهوم که با افزایش دی‌اکسیدکربن، میزان رطوبت کاهش پیدا می‌کند یا با کاهش دی‌اکسیدکربن، میزان رطوبت افزایش می‌یابد، در نمودارهای مربوط به دی‌اکسیدکربن و میزان رطوبت در هر دو غار شیب به سمت پایین و و رابطه عکس قابل مشاهده است. اما بین دی‌اکسیدکربن و دما در هر دو غار رابطه‌ای معنادار ولی مستقیم قوی مشاهده شد و مقدار آن در غار کتله‌خور ($R = 0.936$ و $P < 0.0001$) و در غار سهولان ($R = 0.939$ و $P < 0.0001$) است. به این مفهوم که هر دو با هم افزایش یا کاهش می‌یابند، در نمودارهای مربوط به دی‌اکسیدکربن و میزان دما (در هر دو غار)، رابطه مستقیم قابل مشاهده است. همچنین بین دما و رطوبت هم رابطه‌ای معنادار و غیر مستقیم قوی مشاهده شد، در غار کتله‌خور ($P < 0.0001$) و $R = -0.951$ و در غار سهولان ($P < 0.0001$) و $R = -0.958$ است، در نمودارهای مربوط به رطوبت نسبی و میزان دما (در هر دو غار)، رابطه مذکور قابل مشاهده است، یعنی با افزایش یکی دیگری کاهش می‌یابد یا برعکس (نمودار ۷ و ۸). در فصل زمستان برای هر دو غار ارتباط و همبستگی معناداری بین عناصر مشاهده نشد.



نمودار (۶) سهم گردشگران از مقدار انحلال نمونه‌ها (برحسب درصد)، غار سهولان



شکل (۴) خوردگی، تغییر رنگ، روییدن خزه و کاهش شفافیت اشکال کارستی درون غارهای سهولان و کتله‌خور

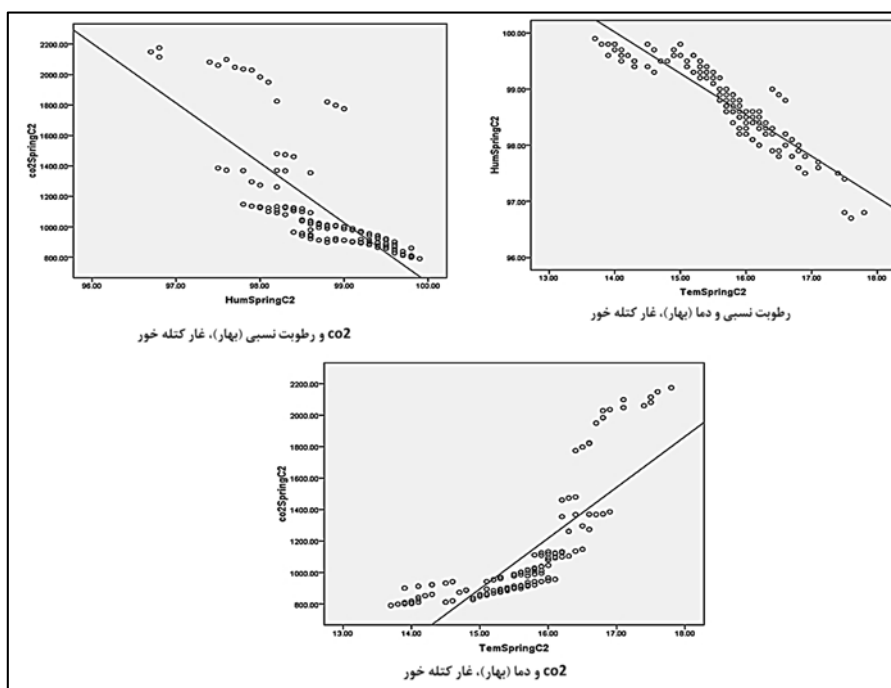
تحلیل آماری داده‌ها

برای اطمینان از شبیه عملکرد انحلال تجزیه و تحلیل برای تمام برداشت‌های دی‌اکسیدکربن، درجه حرارت و درصد رطوبت نسبی در فصول زمستان و بهار براساس ابعاد دالان‌ها تحلیل‌های آماری از قبیل آنالیز واریانس صورت گرفت (جدول ۶ و ۵). بر این اساس بیشینه دی‌اکسیدکربن ناشی از حضور گردشگران به سبب حرکت کند آن در هر دو غار بلافاصله بعد از خروج گردشگران از دالان‌ها و تالارها ظاهر می‌شود. ارتباط بین دالان‌ها و تالارها (با ارتفاع مختلف) با مقادیر غلظت دی‌اکسیدکربن، درجه حرارت و رطوبت نسبی در فصل بهار معنی‌دار نیست، می‌توان این‌طور نتیجه گرفت به علت تعداد بالای گردشگر در بهار مقادیر غلظت دی‌اکسیدکربن و درجه حرارت در تمام فضای هر دو غار یکسان افزایش یافته است و انحلال در سراسر غارها یکسان صورت می‌گیرد. طبق نتایج در فصل بهار به علت تعداد بالای گردشگر و میزان زیاد دی‌اکسیدکربن در تمامی نقاط فضاهای غارها انحلال بالا بوده و می‌توان از هر ارتفاعی از غارها اقدام به نمونه‌برداری جهت انجام آزمایشات نمود. این درحالی است که در فصل زمستان ارتباط معنی‌داری بین دالان‌ها و تالارها (با ارتفاع مختلف) با مقادیر غلظت دی‌اکسیدکربن مشاهده شد. در واقع همزمان با حضور حداقلی و یا عدم حضور گردشگران غلظت دی‌اکسیدکربن در دالان‌ها و تالارهای مختلف غار متفاوت است.

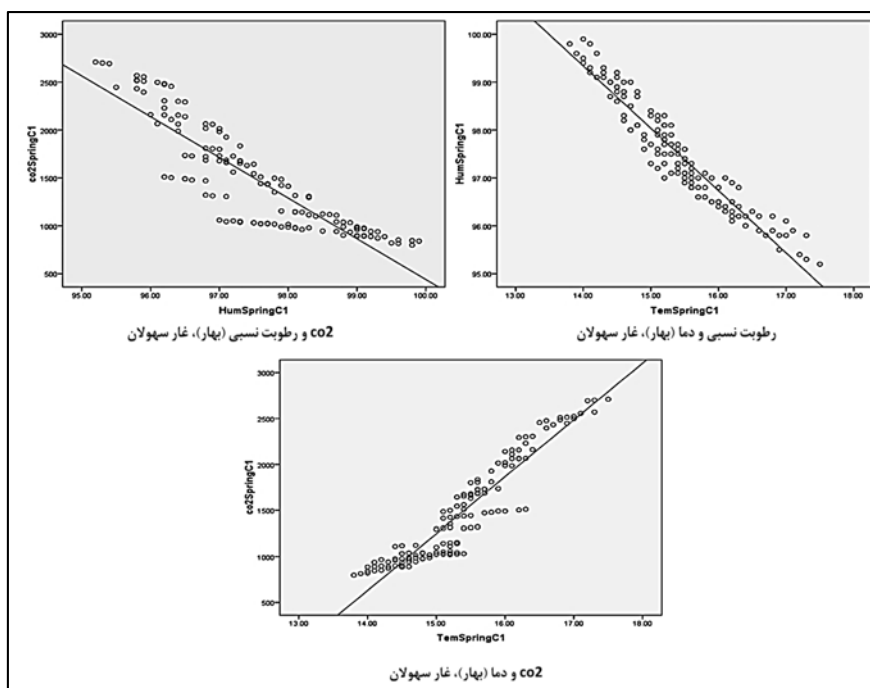
جدول (۵) نتایج آنالیز واریانس دی‌اکسیدکربن، رطوبت نسبی و درجه حرارت براساس ابعاد دالان‌ها غار کتله‌خور

متغیر	فصل برداشت	ابعاد و ارتفاع دالان‌ها	
		سطح معنی‌دار	آنالیز واریانس
دی‌اکسیدکربن	بهار	۰/۸۳۵	
دی‌اکسیدکربن	زمستان	۰/۰۰۰	نتایج نشان می‌دهد در فصل بهار به علت تعداد بالای گردشگر میزان دی-
رطوبت نسبی	بهار	۰/۴۰۴	اکسیدکربن و درجه حرارت در تمامی فضای غار یکسان افزایش یافته و مقادیر
رطوبت نسبی	زمستان	۱	رطوبت نسبی کاهش داشته است.
درجه حرارت	بهار	۰/۳۹۴	
درجه حرارت	زمستان	۰/۰۰۰	

متغیر	فصل برداشت	سطح معنی‌دار	آنالیز واریانس
دی‌اکسیدکربن	بهار	۰/۸۷۶	نتایج نشان می‌دهد در فصل بهار به علت تعداد بالای گردشگر میزان دی‌اکسیدکربن و درجه حرارت در تمامی فضای غار یکسان افزایش یافته و مقادیر رطوبت نسبی کاهش داشته است.
دی‌اکسیدکربن	زمستان	۰/۰۰۰	
رطوبت نسبی	بهار	۰/۵۳۴	
رطوبت نسبی	زمستان	۱	
درجه حرارت	بهار	۰/۳۵۸	
درجه حرارت	زمستان	۰/۰۰۰	



نمودار ۷) نمودارهای همبستگی بین عناصر دی‌اکسیدکربن، دما و رطوبت نسبی غار کنتله خور



نمودار ۸) نمودارهای همبستگی بین عناصر دی‌اکسیدکربن، دما و رطوبت نسبی غار سهولان

بازدید می‌کنند، دی‌اکسیدکربن حاصل از بازدم گردشگران به مرور به دی‌اکسیدکربن طبیعی درون غارها اضافه شده و غلظت دی‌اکسیدکربن موجود در غارها را افزایش می‌دهد. غار کتله‌خور به‌عنوان طولانی‌ترین غار ایران (۱۲۸۶۰ متر طول) و دومین غار مهم توریستی ایران و همچنین غار سهولان بعد از غار علیصدر همدان دومین غار آبی بزرگ ایران، سالانه پذیرای تعداد بالای گردشگر هستند. این غارها دارای اشکال کارستی بسیار زیبا و جذابی هستند. با حضور تعداد بالای گردشگر میزان دی‌اکسیدکربن بالا رفته و این امر نقش مهمی را در فرایند انحلالی و پوسته پوسته شدن اشکال کارستی غار ایفا می‌کند. در پژوهش حاضر، طبق نتایج به دست آمده با مطالعه دو غار کتله‌خور و سهولان، ورود حداکثری گردشگران به درون غارها ریز اقلیم‌هایی را به وجود آورد که غلظت دی‌اکسیدکربن افزایش‌یافته، درجه حرارت غار بالا می‌رود و رطوبت نسبی کاهش می‌یابد. در اثر این تغییرات در ریزاقلیم غارها، محیط اسیدی درون آن ایجاد شده و به تدریج خوردگی، انحلال، پوسته پوسته شدن، تغییر رنگ و کاهش شفافیت و زیبایی اشکال کارستی درون غارها می‌شود (شکل ۴). ممکن است، به مرور زمان در درازمدت سبب پایین آمدن و از بین رفتن سقف آهکی غار شود. اشکال جالب و جذاب درون غارها از جمله مواردی است که سبب جذب گردشگران به درون غار و بازدید از این اشکال منحصر به فرد و زیبا می‌شود، تخریب و از بین رفتن این اشکال، به تدریج موجب کاهش تعداد گردشگران خواهد شد و حتی بر اقتصاد ناحیه‌ای نیز می‌تواند تأثیرگذار باشد و سرمایه‌گذاری و تبلیغات برای بالابردن آمار تعداد گردشگران، در طولانی مدت تأثیر منفی دارد.

تشکر و قدرانی: با تشکر از مدیریت‌ها و کارکنان محترم، غارهای سهولان و کتله‌خور.

تأییدیه اخلاقی: موردی از سوی نویسندگان گزارش نشده است.

تعارض منافع: موردی از سوی نویسندگان گزارش نشده است.

سهم نویسندگان: داود مختاری (نویسنده اول)، نگارنده بحث/پژوهشگر اصلی (۳۰٪)؛ محمدحسین رضایی‌مقدم (نویسنده دوم)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر اصلی (۲۰٪)؛ پیمان کریمی سلطانی (نویسنده سوم)، روش‌شناس/پژوهشگر کمکی (۲۵٪)؛ طیبه عبدالملکی (نویسنده چهارم)، تحلیلگر آماری/پژوهشگر کمکی (۲۵٪)

منابع مالی: مقاله مستخرج از رساله دکتری است.

منابع

- Ahmadi M, Khoshraftar R (2011). Evaluation of geotourism capabilities of katalekhore cave in Zanjan using the techniques SWOT. *Geographical Notion*. 5(9):61-74. [Persian]
- Asghari Moghaddam A, Moayyed M, Nadiri A (2006). Studying of geomorphology, geology and genesis of Sahooalan water cave northwest of Iran. *Journal of Geography and Planning*. (22):59-91. [Persian]
- Baker AW (2014). The jenolan environmental monitoring program. *Proceedings of the Linnean Society of New*

در این پژوهش، جهت برآورد مقدار انحلال و پوسته پوسته شدن سالانه اشکال درون غارهای کتله‌خور و سهولان و بازسازی شرایط اقلیمی درون آنها در محیط آزمایشگاهی، اقدام به جمع‌آوری داده‌های مربوط به دما، رطوبت نسبی و دی‌اکسیدکربن موجود در درون غارها گردید. نتایج تجزیه و تحلیل این داده‌ها نشان داد که حضور گردشگران باعث افزایش انحلال اشکال کارستی در هر دو غار می‌گردد. طبق نتایج غلظت دی‌اکسیدکربن در فصل بهار همزمان با تردد حداکثر گردشگران در ساعات مختلف برداشت‌های روزانه، و همزمان با افزایش تعداد گردشگران به درون غارهای کتله‌خور و سهولان به تدریج بر غلظت دی‌اکسیدکربن موجود در درون غارها افزوده می‌شود. نتایج این بخش از پژوهش با نتایج حاصل از پژوهش ملکی و کریمی سلطانی [Maleki & Karimi Soltani, 2015] در غار علیصدر، و بالدینی و همکاران [Baldini, 2006] در غار بالی نامینترا در ایرلند منطبق است. در هر دو پژوهش مذکور فضای درون غار براساس ابعاد دالان‌ها و تالارها به سه بخش تقسیم شده است و در هنگام حضور حداقلی و یا عدم حضور گردشگران غلظت دی‌اکسیدکربن در دالان‌ها و تالارهای با ابعاد مختلف متفاوت بوده است. نکته قابل توجه، در این پژوهش‌ها افزایش مقدار تمرکز دی‌اکسیدکربن مقارن با ماه فروردین (بهار) و روزهای با تراکم بالای بازدیدکنندگان بوده که سبب افزایش میزان دی‌اکسیدکربن و افزایش دما و کاهش رطوبت نسبی شده است، این ارتباط و همبستگی بین عناصر اقلیمی در هر دو غار در قسمت تحلیل‌های آماری داده‌ها بیان شد. با توجه به مقادیر بیشینه غلظت دی‌اکسیدکربن در فصل زمستان همزمان با ورود حداقلی گردشگر، ppm ۲۵۱ در غار کتله‌خور و ppm ۳۵۷ در غار سهولان و مقایسه آن با بیشینه غلظت دی‌اکسیدکربن در فصل بهار همزمان با ورود حداکثر گردشگر ppm ۲۱۷۵ برای غار کتله‌خور و ppm ۲۷۱۰ در غار سهولان، و افزایش احتمالی گردشگران در سال‌های آتی و با توجه به افزایش تعداد گردشگران و بازدیدکنندگان از غار غلظت دی‌اکسیدکربن درون غار نیز افزایش می‌یابد. افزایش دی‌اکسیدکربن علاوه بر تأثیر بر اشکال کارستی درون غارها، می‌تواند سلامت گردشگران درون غار را تهدید کرده و این امر از تعداد گردشگران بکاهد و در نتیجه سیاست‌های افزایش جذب گردشگر و افزایش درآمد نتیجه عکس بدهد و درآمد حاصل از گردشگران کاهش یابد. با توجه به یافته‌ها و نتایج این پژوهش دو پیشنهاد در جهت کاهش مسایل و مشکلات غارهای گردشگری و توریست‌پذیر ارائه می‌شود:

۱- ارائه برنامه‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت مدیریتی جهت بررسی مسایل و مشکلات غارهای توریست‌پذیر ۲- تعیین و شناسایی ظرفیت غارها از لحاظ تعداد گردشگران و بازدیدکنندگان طوری که به اکوسیستم و اشکال درون غار زبانی وارد نگردد.

نتیجه‌گیری

در غارهای مورد بازدید گردشگری، که روزانه گردشگران زیادی از آنها

- modes and advective fluxes. *Theoretical and Applied Climatology*. 129(3-4):1355-1372.
- Lang M, Faimon J, Pracny P, Kejíková S (2017). A show cave management: Anthropogenic CO₂ in atmosphere of Vypustek cave (Moravian karst, Czech Republic). *Journal for Nature Conservation*. (35):40-52.
- Linan C, Vadilo I, Francisco C (2008). Carbon dioxide concentration air within the Narja cave (Malaga, Andalusia, Spain). *International Journal of Speleology*. 37(2):99-106.
- Maleki A, Ghobadi M, Karimi Soltani P (2015). The role of the tourists in the karst dissolution of the secondary shapes inside caves, case study: Hamedan Ali-Sadr cave. *Geography and environmental sustainability*. 5(3):1-15. [Persian]
- Maleki A, Karimi Soltani P (2015). Tourists and their role in microclimatic changes inside the caves case study: Ali-Sadr cave (Hamedan, Iran). *Journal of Biodiversity and Environmental Sciences*. 6(3):535-541.
- Maleki A, Karimi Soltani P, Abdolmaleki A (2014). Tourists and their role in microclimatic changes inside the caves case study: Ali-Sadr cave (Hamedan, Iran). *The National Conference on Geology and Exploration of Resources*. 2015, 11 May: Shiraz. pp. 70-77. [Persian]
- Michie NA (1997). An investigation of the climate, carbon dioxide and dust in Jenolan caves, N.S.W. [dissertation]. Macquarie: Macquarie University.
- Mokhtari D (2015). *Geotourism*. 5th ed. (Vol. 1). Tabriz: Tabriz University Press. [Persian]
- Moroni M (2013). Radon and carbon dioxide monitoring as approach to touristic exploitation of caves. *5eme colloque national du patrimoine Geologique*. 2013, 7-9 May: Tunis. pp. 1-11. [Persian]
- Rezaei M, Nakhaei M (2008). Spleogenesis of Katalahkhor cave in Zanjan province. *Iranian Journal of Geology*. 2(6):11-19. [Persian]
- Song L, Wei X, Liang F (2000). The influences of cave tourism on CO₂ and temperature in Baiyun cave, Hebei, China. *International Journal of Speleology*. 29B (1-4):77
- South Wales. (136):19-34.
- Baldini JUL, Baldini LM, McDermott F, Clipson N (2006). Carbon dioxide sources, sinks, and spatial variability in Shallow temperate zone caves: Evidence from Ballynamindra cave Irelands. *Journal of Cave and Karst Studies*. (68):4-11.
- Behniyafar A, Qanbarzadeh H (2016). *Karst geomorphology: Processes, forms and management of karst environments*. (Vol 1). Mashhad: Negaran Sabz. [Persian]
- Calaforra JM, Fernández-Cortés A, Sánchez- Martos F, Gisbert J, Pulido-Bosch A (2003). Environmental control for determining human impact and permanent visitor capacity in a potential show cave before tourist use. *Environmental Conservation*. 30(2):160-16.
- De Freitas CR (2010). The role and importance of cave microclimate in the sustainable use and management of show caves. *Acta Carsologica*. 39(3):477-489.
- Šebela S, Prelovšek M, Turk J (2013). Impact of peak period visits on the Postojna cave (Slovenia) microclimate. *Theoretical and Applied Climatology*. 111(1-2):51-64.
- Ek C, Gewalt M (1985). Carbon dioxide in cave atmospheres. new result in belgium and comparison with some other countries. *Earth Surface Processes and Landforms*. 10(2):173-187.
- Gillieson D (2005). *Caves, processes, development, management*. Velayati S, Behniyafar A, translator. Mashhad: Sokhan Gostar. [Persian]
- Hutacharern C (2004). *The effects of human impacts on cave and karst Biodiversity: Thailand Component*. Thailand: ARCBC.
- Karimi Soltani P, Rezaei K (2015). Daily and monthly fluctuation of carbon dioxide in Ali-Sadr cave of Hamedan and tourists' health. *The National Conference on Geology and Exploration of Resources*. 2015, 11 March: Shiraz. 31-36. [Persian]
- Lang M, Faimon J, Godissart J, Ek C (2016). Carbon dioxide seasonality in dynamically ventilated caves: The roles of