

## نقش اقلیم بر تنوع و تکامل مورفولوژیکی کارن‌های کارست کربناته با استفاده از تکنیک ژئومورفومتری در پهنه‌های اقلیمی حوضه کلات، شرق کپه داغ

حمید نژاد سلیمانی

دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران

رضا دوستان\*

استادیار اقلیم شناسی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران

سعدالله ولایتی

استاد دانشگاه فردوسی مشهد، ایران

ابوالفضل بهنیافر

دانشیار جغرافیای طبیعی، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران

مهناز جهادی طرقي

استادیار جغرافیای طبیعی، دانشگاه پیام نور، مرکز مشهد، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۲/۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۲/۲۰

### چکیده

بررسی نقش شرایط اقلیمی بر نحوه تنوع و تکامل مورفولوژیکی کارن‌های کارستی در سازندهای کربناته موضوعی قابل توجه در ژئومورفولوژی اقلیمی بوده و تا کنون هیچ مقاله‌ای در این مورد در کارست‌های کربناته شرق کپه داغ انجام نشده است. در حالیکه اثر اقلیم بر تکامل یافتگی اشکال اپی کارست مهم‌تر از شرایط لیتولوژیکی و تکتونیک می‌باشد؛ بنابراین در مقاله حاضر با بهره‌گیری از روش تجربی و آزمایشگاهی (کلسیم‌تریک و درصد خلوص آهک) و بر مبنای مدل زون بندی اقلیمی به بررسی نقش اقلیم بر تنوع و تکامل مورفولوژیکی کارن‌های منطقه پرداخته می‌شود. در فرآیند پژوهش، ابتدا نقشه پهنه‌بندی اقلیمی منطقه پژوهش، از طریق ۲۵ ایستگاه هواشناسی با دوره آماری ۳۵ ساله در محیط جی‌آی‌اس تهیه شد و چهار پهنه اقلیمی از منطقه تعیین گردید. سپس با استفاده از نمونه‌برداری تعداد ۲۴۰ کارن اپی کارستی، با مورفولوژی (خطی، بیت کارن و تربیت کارن)، اطلاعات ژئومورفومتری آن‌ها برداشت و تحلیل شد. نتایج بدست آمده نشان داد که هر اندازه اقلیم حاکم بر سنگ کارست، مرطوب‌تر باشد، نه تنها تعداد کارن‌ها در واحد سطح بیشتر می‌شوند، بلکه، تنوع مورفولوژیکی و تکامل یافتگی آن‌ها نیز توسعه می‌یابد. در واقع تغییر اقلیم، نقش بسیار مؤثری بر ژنز و توسعه مورفولوژیکی کارن‌های اپی کارست داشته و بین پهنه‌های اقلیمی مرطوب‌تر و تنوع‌پذیری مورفولوژیکی و تکامل یافتگی کارن‌ها در سازندهای کارستی، رابطه مستقیمی وجود دارد، بطوریکه در پهنه اقلیمی (Q4) با شرایط اقلیم مرطوب، انواعی از کارن‌های خطی، سه وجهی، بیت کارن‌ها و حتی وند کارن‌ها با مقیاس‌های مزو و ماکرو تشکیل شده‌اند. در حالیکه در پهنه های اقلیمی نیمه‌خشک فقط کارن‌های خطی و کندویی آنهم فقط با مقیاس میکرو تشکیل می

شوند. این موضوع نشان‌دهنده نقش مؤثر گردش دمایی و رطوبتی بیشتر در کارست‌های ارتفاعات بالاتر حوضه با اقلیم‌های مرطوبتر است. همچنین سنجش مورفومتری کارن‌ها نشان داد که مقدار قطر، عمق و عرض کارن‌های خطی، تریت کارن‌ها و پیت کارن‌ها در پهنه‌های اقلیمی معتدل و مرطوب (Q3، Q4) واقع در ارتفاعات بالای حوضه به سه تا ۱۰ برابر اندازه کارن‌های اقلیم خشک و نیمه خشک (Q1، Q2) می‌رسد.

**واژگان کلیدی:** پهنه‌بندی اقلیمی، مورفولوژی کارن‌ها، کارست کربناته، حوضه کلات.

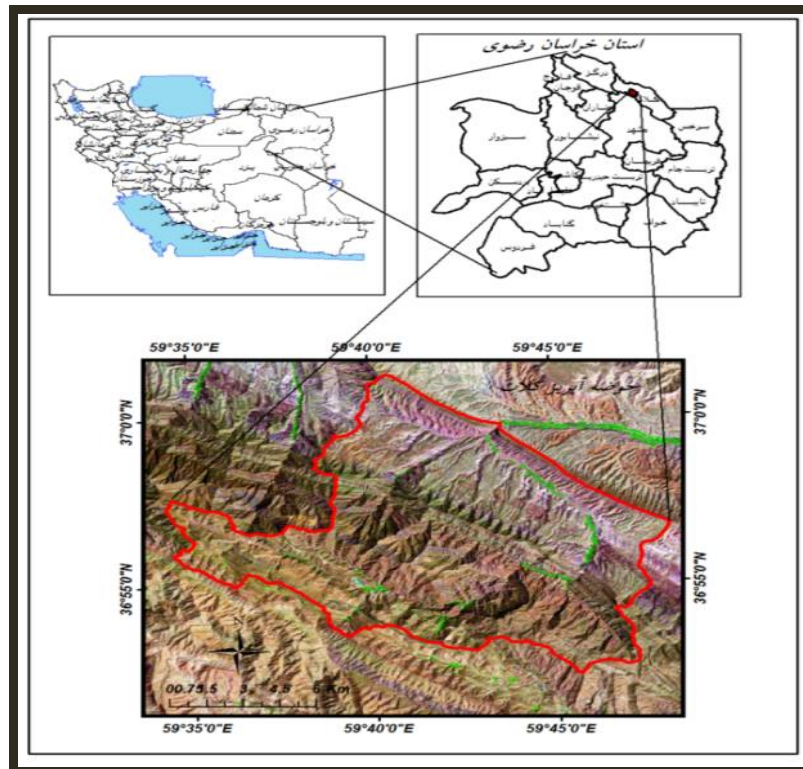
## مقدمه

عملکرد کارست زایی در سنگ‌های کربناته، بشدت تحت تأثیر شرایط اقلیمی به‌ویژه رطوبت و دما است. نقش اقلیم در ژنز و توسعه مورفولوژیکی اشکال کارست هم به‌صورت مستقیم (شرایط رطوبتی و دمایی) و هم غیرمستقیم (بیوکارست) مهم است. اگرچه بر طبق نظر ژئومورفولوژیست‌ها (وایت، ۲۰۰۰: ۱۴۷؛ بیکر، ۲۰۱۶: ۴۵) سه عامل مهم کارست زایی یعنی: اقلیم، لیتولوژی و سیستم‌های درز و شکستگی (تکتونیک)، بر ژنز و تنوع مورفولوژیکی اشکال اپی کارست مؤثر می‌باشند، ولی فرآیند انحلال در شکل‌گیری و تکامل‌یافتگی پدیده‌های کارستی بیشتر بوده که خود تحت تأثیر شرایط اقلیمی است (بهنیافر و قنبرزاده، ۲۰۲۲: ۱۳۹۵). در واقع هر نوع ذخایر رطوبتی و اشکال مختلف آن بر سطوح سنگ‌های کارست ساز می‌تواند بر شکل‌گیری لند فرم‌های کارستی و توسعه آن‌ها مؤثر باشد. از سوی دیگر بیش از ۱۳ درصد مساحت کشور ما را سازندهای کارستی‌ساز تشکیل می‌دهند (بهنیافر و قنبرزاده، ۲۰۱۸: ۲۷۵) و از این نظر هرگونه مطالعات علمی بر روی توده‌های کارستی، از لحاظ ذخایر آبی و تحولات مورفولوژیک اشکال کارست هائز اهمیت است. نفوذ رطوبت و جریان هوا به درون سیستم‌های درز و شکستگی این سنگ‌های کارستی منجر به سرعت کارستی فیکاسیون می‌شود. در بین لند فرم‌های منطقه اپی کارست، کارن‌ها یکی از مهم‌ترین و متنوع‌ترین اشکال مورفولوژیکی محسوب می‌شوند و به‌ویژه در شرایط اقلیمی مرطوب‌تر در سنگ‌های آهکی با خلوص ۵۰ درصد به بالا به‌خوبی تشکیل می‌شوند (فورد و ویلیامز؛ ۲۰۰۷: ۱۲۳). تنوع مورفولوژیکی کارن‌ها، حتی در کارست‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک نیز نسبت به سایر لند فرم‌های دیگر اپی کارستی بیشتر است ولی در اقلیم نیمه مرطوب و معتدل تنوع و تکامل یافتگی آن‌ها بیشتر می‌شوند؛ بنابراین، اغلب ژئومورفولوژیست‌های کارست تأکید دارند که از بین شش عامل مؤثر بر کارست زایی یعنی (اقلیم، انحلال، لیتولوژی، تکتونیک، توپوگرافی و پوشش گیاهی)، مهم‌ترین آن‌ها را عوامل اقلیمی (رژیم بارش و دما) دانسته‌اند زیرا رطوبت نقش مؤثری بر انحلال داشته و درجه حرارت نیز نقش اساسی در فشار جزئی (CO<sub>2</sub>) در توده کارست دارد. فرآیندهای انحلالی در سنگ‌های کارست ساز به‌ویژه (کربناته، تبخیری‌ها و سیلیکاته‌ها) بهتر انجام می‌شود. همچنین، فرآیندهای زمین‌شناسی و لیتولوژیکی شامل (ساختار سنگ، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی سنگ و تکتونیک) (ولایتی و خانعلی‌زاده، ۱۳۹۰؛ بهنیافر و قنبرزاده، ۱۳۹۸؛ میلانویچ، ۱۹۸۱) و فرآیندهای هیدروژئومورفیک و هیدرولوژیکی یعنی جریان یافتن آب بر سطوح سنگ کارست و گردش آب در درون توده سنگ منجر به تشدید فرآیند انحلالی و توسعه اشکال کارست می‌شود. بوگلی (۲۰۰۵) از کارست ژئومورفولوژیست‌های آلمانی کشف کرده بود که

هرگاه دو جریان آب با دماهای مختلف با یکدیگر در سنگ کارست برخورد نمایند منجر به تشدید فرآیند انحلالی خواهد شد و این موضوع را تحت عنوان قانون خوردگی هیدرولوژیکی یا خوردگی اقلیمی نامیده است. حتی تمامی فرآیندهای بیو کارستی، تحت تأثیر اقلیم بوده و اغلب در محل سطح تماس قشر خاک، پوشش گیاهی و سنگ کربناته تشکیل می شوند و اسیدهای موجود در محیط ریشه گیاهان بر توسعه انحلال سنگ کربناته مؤثر می باشند. سؤال اصلی این پژوهش آن است که شرایط اقلیمی در سازندهای کارستی چه تأثیری بر تنوع و تکامل مورفولوژیکی انواع کارن‌های اپی کارستی منطقه مورد مطالعه دارند؟ هدف اصلی این پژوهش اثرات شرایط اقلیمی (رژیم بارش و دمای) متفاوت بر کارست زایی از لحاظ مورفولوژی لند فرم، تنوع و تکامل انواع کارن‌های اپی کارست است. تغییرات اقلیمی به‌ویژه در کارست‌های کوهستانی نقش مؤثری بر تنوع اشکال کارست دارند و تاکنون این موضوع در کارست‌های شرق کپه داغ مورد بررسی قرار نگرفته بود به همین خاطر با مراجعه به پژوهش‌های ارتباط اقلیم با اشکال کارست در سطح ملی و جهانی مشخص گردید که بیشترین تعداد مقالات مربوط به این موضوع به کارست شناسان اروپا و آمریکای شمالی اختصاص داشته (راوبار، ۲۰۱۸:۸۷) چرا که تغییرات اقلیمی بر تنوع اشکال کارست و حتی حجم آبخان کارستی این مناطق مؤثر بوده است. به‌طور قطع نقش تغییرات اقلیمی بر کارست‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک کشور ما نیز از اهمیت زیادی به‌ویژه برای برنامه‌ریزی آمایش سرزمین دارند.

### منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز کلات در شرق زون کپه داغ با جهت شمال غربی - جنوب شرقی واقع شده است. از نظر موقع سیاسی این حوضه در شمال شهر مشهد از استان خراسان رضوی و از نظر موقع طبیعی، حد شمالی آن به ناودیس کلات، از شرق به کوه‌های هزار مسجد، از جنوب به پایکوه‌های مشهد و از غرب به ارتفاعات لائین نو محدود می‌باشد. فاصله جلیل‌آباد در شمال این حوضه با شهر مشهد ۱۳۰ کیلومتر است که از طریق جاده کوهستانی مشهد به جلیل‌آباد کلات نادری قابل دسترسی است. از نظر موقع ریاضی، در ۵۹ درجه و ۳۴ دقیقه تا ۵۹ درجه و ۵۸ دقیقه طول شرقی و ۳۶ درجه و ۵۹ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۰۶ دقیقه عرض شمالی واقع شده است (شکل ۱). وسعت این حوضه طبق مساحی در نقشه‌های توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ برابر با ۱۶۸/۵ کیلومترمربع و حداکثر ارتفاع آن ۲۸۰۵ و حداقل ارتفاع با ۶۲۰ متر می‌باشد. بیشتر سازندهای زمین‌شناسی منطقه را سنگ‌های آهکی کربناته و دولومیتی تشکیل می‌دهند (۷۶/۳ کیلومترمربع) و تیپ‌های اقلیمی منطقه از خشک و نیمه‌خشک تا مرطوب ارتفاعات را شامل است. میانگین دمای سالانه منطقه از ۱۲/۵ درجه سانتی‌گراد در خروجی حوضه تا ۱۱ درجه سانتی‌گراد در ارتفاعات جنوب غربی متفاوت است. میانگین بارش سالانه از ۳۱۳ میلی‌متر در پایین دست حوضه تا ۴۶۵ میلی‌متر در ارتفاعات متغیر است.



مأخذ: نگارندگان

شکل ۱: تصویر ماهواره‌ای حوضه آبریز کلات و موقعیت آن در استان خراسان رضوی و کشور

## داده‌ها و روش‌ها

روش کار در این پژوهش از نوع تجربی و مبتنی بر مدل تکاملی وایت در پهنه‌های اقلیمی است. به طوری که با استفاده از زون بندی اقلیمی منطقه از طریق نرم‌افزار (Arc.Gis 10.4) و همپوشانی ژئومورفومتری انواع کارن‌های کارستی (طول، عرض، عمق و ارتفاع) در هر پهنه اقلیمی و آنالیز آزمایش‌های کلسیمتریک، در سازندهای کربناته به تنوع مورفولوژیکی کارن‌ها پرداخته شده است. فرآیند پژوهش طبق جدول (۱) بدین صورت انجام گرفته است که ابتدا از طریق داده‌های ۲۵ ایستگاه‌های هواشناسی با دوره ۳۵ ساله، منطقه مورد مطالعه، نقشه زون بندی اقلیمی در محیط آرک جی آی تهیه شد و خروجی آن به صورت یک لایه رقمی پهنه بندی اقلیمی حوضه بر اساس همگنی (تطابق سازی) دو مدل (دمارتون و آمبرژه) تعیین گردید. در مرحله دوم، سازندهای کارستی منطقه شناسایی و مساحات آن‌ها از طریق تصاویر هوایی تعیین گردید (جدول ۲) و با ۱۶ نمونه برداری از انواع سنگ‌های کربناته منطقه (بر روی ۴ سازند) نسبت‌های کلسیت و درصد خلوص سنگ کربناته در آزمایشگاه مورد بررسی قرار گرفت. در مرحله سوم برداشت‌های میدانی از نوع ژئومورفومتری سه نوع کارن‌های کارست سطحی و همپوشانی آن‌ها (با شش متغیر هندسی) در پهنه‌های مختلف اقلیمی حوضه انجام گردید. برای این منظور در هر زون اقلیمی از منطقه، تعداد ۸۰ کارن کارستیک با سه نوع مورفولوژی (پیت کارن، تریت کارن و خطی)، نمونه برداری شد و در مجموع تعداد ۲۴۰ نمونه برداری از کارن‌های کارست سطحی با سه نوع مورفولوژی مختلف در چهار نوع پهنه اقلیمی منطقه ژئوتومتری شده و مورد سنجش و مقایسه قرار گرفتند تا

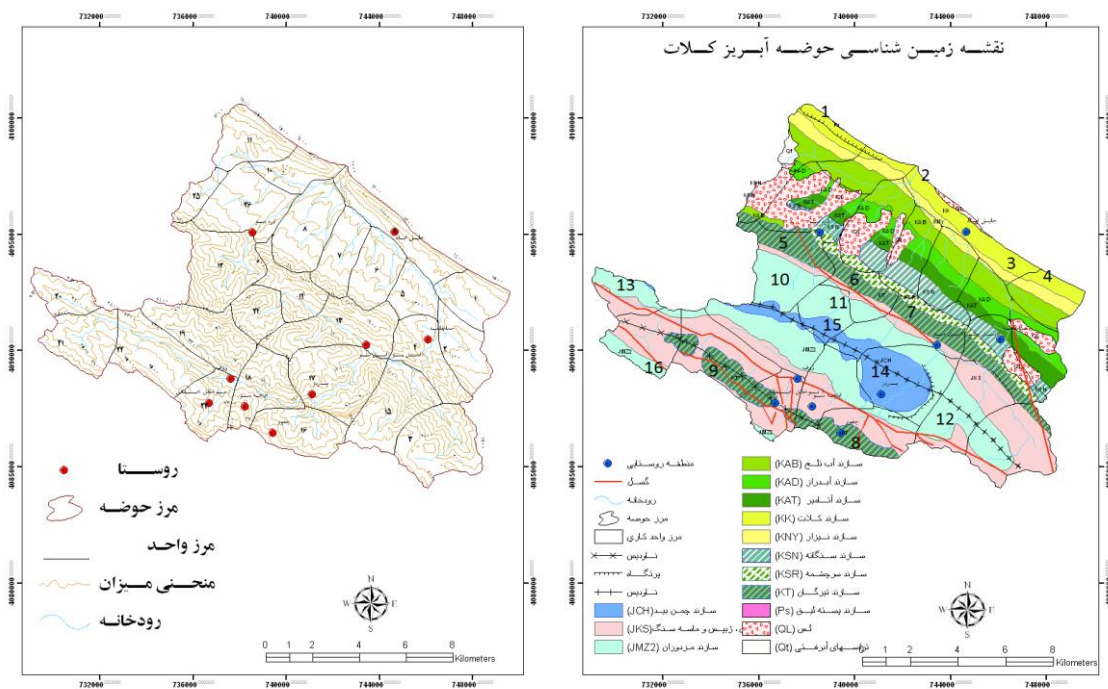
شاخص تکاملی آن‌ها و تراکم کارن در واحد سطح برای هر زون اقلیمی تعیین شود. قابل ذکر است که همه نمونه‌های برداشت شده فقط بر روی سازندهای آهکی کارست ساز در زون‌های اقلیمی مختلف انجام گرفته است تا اثرات دقیق اقلیم بر توسعه کارن‌ها مشخص شوند. در مرحله چهارم، با استفاده از شش شاخص هندسی کارن‌ها، درجه تکاملی آن‌ها با توجه به مدل تکاملی وایت، در اقلیم مختلف مشخص گردید. همچنین آثار بیو کارن‌ها نیز با توجه به سنجش شرایط رطوبتی و دمایی در پهنه‌های اقلیمی متفاوت انجام شد. مهم‌ترین ابزارهای پژوهش عبارتند از: نقشه‌های توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰، نمونه‌برداری از ۲۴۰ کارن کارستی و سنجش هندسی آن‌ها، کلسیم‌تریکی سازندهای کارستی، نقشه زون بندی اقلیمی حوضه و مدل تکاملی وایت.

**جدول ۱:** فرآیند پژوهش در بررسی نقش اقلیم بر تنوع و تکامل مورفولوژیکی کارن‌های کارستی منطقه

مرحله ۱	زون بندی اقلیمی (مدل‌های دمارتون و آمبرژه) - با ۲۵ ایستگاه و دوره ۳۰ ساله (۱۳۶۸-۱۳۹۸)
مرحله ۲	نمونه‌برداری از سازندهای کارستی برای انتخاب سنگ کارست خالص‌تر (سازندهای مزدوران، چمن‌بید، کلات و تیرگان). از هر سازند ۴ نمونه‌برداری در بخش‌های مختلف از سطح سنگ تا عمق ۱۰ سانتی‌متر
مرحله ۳	ژئومورفومتری و برداشت از ۲۴۰ نمونه‌برداری از سه نوع کارن‌های کارستی با مورفولوژی خطی، پیت کارن و سه وجهی یا تریت کارن‌ها در چهار زون اقلیمی متفاوت از منطقه
مرحله ۴	هم‌پوشانی مورفومتریکی کارن‌ها با پهنه‌های اقلیمی و مقایسه مورفولوژیکی کارن‌ها با مدل تکاملی وایت در چهار پهنه اقلیمی برای تشخیص درجه تکاملی کارن‌ها در اقلیم مختلف.

مآخذ: نگارندگان

با توجه به اینکه برای زون بندی اقلیمی هر منطقه، سازمان هواشناسی جهانی در مناطق کوهستانی حداکثر فاصله ایستگاه‌ها را ۱۰ تا ۱۲ کیلومتر پیشنهاد کرده است (دوستان، ۱۳۹۹: ۹۹)، از این نظر برای تهیه پهنه‌های اقلیمی منطقه از داده‌های ۲۵ ایستگاه هواشناسی با دوره ۳۵ ساله (۱۳۶۵-۱۳۹۹) در داخل و محدوده پیرامونی حوضه کلات با همین مقیاس، استفاده گردید و نقشه پهنه‌های اقلیمی حوضه در محیط (Arc Gis 10.4) با مدل‌های آمبرژه (Q2) و دمارتون (IA) تهیه شد. همچنین تعداد ۱۶ کانون نمونه‌برداری از ۴ نوع سنگ کارست ساز کربناته مشخص و تعداد ۲۴۰ نمونه برداری از انواع کارن‌های کارستی (لاپیه‌ها) برای هم‌پوشانی ژئومورفومتری آن‌ها در پهنه‌های اقلیمی مختلف حوضه مورد نقشه‌برداری و سنجش قرار گرفتند (شکل ۲).



مآخذ: نگارندگان

**شکل ۲:** نقشه پراکنش ۱۶ کانون نمونه‌برداری از سازندهای کارستی برای بررسی و تعیین کلسیمتریک (نسبت خلوص سنگ کارست) و عملیات ژئومورفومتری کارن‌ها (سازندهای کارستی و توپوگرافی حوضه).

**جدول ۲:** مشخصات لیتولوژیکی سازندهای کارست ساز در منطقه مورد مطالعه (محاسبات بر اساس تصاویر هوایی ۱:۲۰۰۰۰ بلوک شرق کشور و نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ کلات، سازمان زمین‌شناسی کشور ۱۳۹۹)

ردیف	نام سازند و علامت	لیتولوژی	مساحت کارستها به کیلومتر مربع	دوره
۱	آبرفتی (Qt)	نهبشته‌های مخروط افکنه‌ای و لس‌ها		کواترنری
۲	نئوزن (N)	ماسه‌سنگ قرمز و لای سنگ‌شور		میوسن - نئوزن
۳	چهل کمان (Pch)	سنگ‌آهک نخودی رنگ روشن با مارن		پالئوسن - پالئوژن
۴	پسته لیق (Pel)	کنگومریت، ماسه‌سنگ قرمز و شیل		پالئوسن - پالئوژن
۵	کلات (KK)	سنگ‌آهک ماسه‌ای نخودی رنگ	۱۳٫۶	کرتاسه
۶	نیزار (Kny)	ماسه‌سنگ با شیل‌های سبز زیتونی		کرتاسه
۷	آب تلخ (Kab)	مارن، شیل خاکستری با گچ		کرتاسه
۸	آب دراز (Kad)	سنگ‌آهک - گچ سفید خاکستری، مارن		کرتاسه
۹	اتامیر (Kat)	ماسه‌سنگ، شیل، گلو کونیتی		کرتاسه
۱۰	سنگانه (Ksa)	شیل خاکستری تیره تا سیاه		کرتاسه
۱۱	سرچشمه (Ksar)	مارن و شیل خاکستری		کرتاسه
۱۲	تیرگان (Ktr)	سنگ‌آهک بیوکلاستیک	۱۸/۵	کرتاسه
۱۳	شوریجه (Ksh)	شیل قرمز قهوه‌ای، گچ و ماسه‌سنگ		کرتاسه
۱۴	مزدوران (Jmz)	سنگ‌آهک دولومیتی	۳۱/۷	ژوراسیک
۱۵	چمن بید (Jch)	سنگ‌آهک میکریتی با مارن	۱۲/۵	ژوراسیک

## پیشینه پژوهش

مطالعات انجام گرفته در مورد نقش شرایط اقلیمی بر ژنز و تنوع مورفولوژی اشکال کارست سطحی بیشتر بر روی انواع کارن‌ها (لایپه‌ها) متمرکز شده است، زیرا این لند فرم‌های کارست سطحی از متنوع‌ترین مناظر کارستی محسوب می‌شوند. در اینجا به اختصار آخرین تحقیقات پیرامون ارتباط شرایط اقلیمی با کارن‌های کارستی را مورد بررسی قرار می‌دهیم.

ارتباط بین اقلیم و توسعه‌یافتگی اشکال کارست سطحی توسط والتهم و کوکس (۲۰۰۳) در مقاله‌ای تحت عنوان مهندسی اشکال کارست انجام شده است. اگرچه بیشتر مطالعات انجام شده در مورد نقش اقلیم بر مناظر کارستی توسط ژئورفولوژیست‌های آلمانی و آمریکایی صورت گرفته‌اند (بوگلی، ۲۰۰۵)، ولی اغلب این تحقیقات، به‌طور تخصصی و جزئی‌تر در طی سه دهه اخیر به خاطر نقش تغییرات اقلیمی بر فرآیندهای کارستیفیکاسیون انجام شده است. برای نمونه (فورد و ویلیامز، ۲۰۰۷) در پژوهش‌هایی که بر روی اثر اقلیم بر تنوع مورفولوژیکی کارست‌های مناطق مرطوب چین مطالعه کرده بودند، با این نتیجه رسیدند که شرایط اقلیمی (به‌ویژه دما و رطوبت) تأثیر زیادی بر تنوع اشکال کارست و نحوه تکاملی آن‌ها دارد به طوری که شرایط اقلیم مرطوب حاره‌ای حتی از تراکم درز و ترک‌ها، در کارست شدگی اثر بیشتری دارد. بیکر (۲۰۱۶)، در مقاله‌ای با عنوان کارست و تغییرات اقلیمی، به نقش دما و رطوبت بر کارست زایی و تنوع اشکال کارست پرداخته است و نشان داد هر اندازه شرایط رطوبتی بیشتر باشد کارن‌ها و حفرات کارستی تکامل یافته‌تر می‌شوند. وایت (۲۰۱۹) یکی از جالب‌ترین طبقه‌بندی‌های مربوط به کارن‌ها را بر اساس شرایط اقلیمی (رطوبت و دما) در کتاب ژئومورفولوژی کارست‌ها انجام داده است که اثر اقلیم را بر تکامل یافتگی کارن‌ها با تمرکز بر روی ابعاد و مقیاس فضایی آن‌ها بررسی کرده است.

بیشتر پژوهش‌های مربوط به نقش اقلیم بر کارست زایی و تنوع اشکال کارست سطحی در کارست‌های کربناته زاگرس، البرز و بینالود انجام شده‌اند. برای مثال، زنگنه‌اسدی و همکاران (۱۳۸۱) به طبقه‌بندی اشکال کارست سطحی حوضه اخلمد در زون بینالود پرداخته و نتیجه می‌گیرد هر اندازه ارتفاع کارست کربناته بیشتر می‌شود اثر اقلیم به‌ویژه باران و برف بر کارست زایی افزایش می‌یابد. قربانی و همکاران (۱۳۸۹) نقش تغییرات اقلیمی کواترن را بر تحولات ژئومورفیکی فروچاله‌های کارستی شاهو در کارست‌های غرب ایران بررسی نموده‌اند و نتیجه گرفتند که شرایط اقلیمی مرطوب‌تر موجب توسعه فروچاله‌ها شده است. خوش‌رفتار و همکاران (۱۳۹۵) در کارست‌های برفک گیلان، به نقش رطوبت بر تشکیل اشکال اپی کارست کار کرده‌اند. خضری و همکاران (۱۳۹۶) بر روی پهنه‌بندی تحولات کارستی منطقه مهاباد به نقش اقلیم بر مورفونژ کارست پرداخته‌اند. رضایی عارفی و همکاران (۱۳۹۹) در توده‌های کارست کربناته کپه‌داغ مطالعه کرده و رابطه تکامل یافتگی کارست‌ها را با شرایط اقلیمی مرطوب‌تر بررسی کرده‌اند. (لشنی‌زند و غلامرضایی، ۱۳۹۰) روی متغیرهای بارشی در دوره‌های ماهانه، فصلی و سالانه کارست‌های خرم‌آباد مطالعه کرده و در

بین متغیرهای دمائی، متغیر حداقل مطلق دما را موثرترین عامل در کارست زایی تشخیص دادند که همراه با متغیر رطوبتی در شکل‌گیری اشکال کارست و توسعه آن‌ها نقش داشته‌اند.

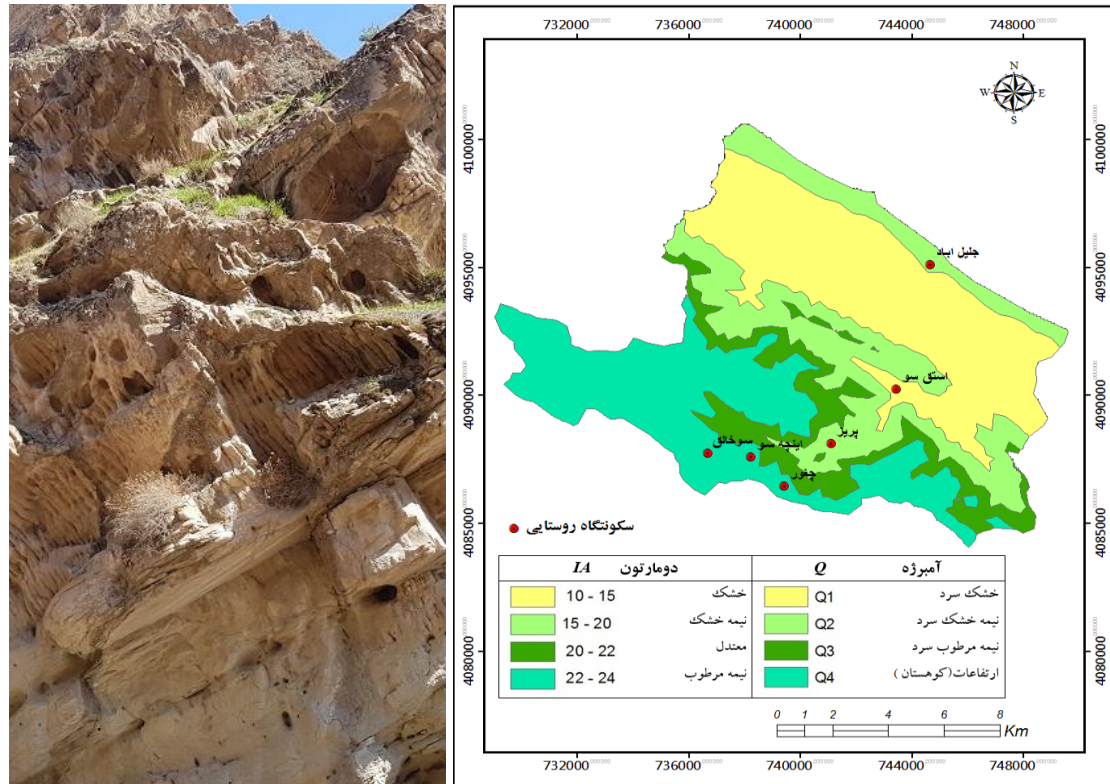
مجموع سازندهای کربناته کارست ساز منطقه طبق محاسبات انجام شده بر روی عکس‌های هوایی و نقشه زمین‌شناسی حوضه کلات، برابر با ۷۶/۳ کیلومترمربع (۷۶۳۰ هکتار) است که شامل چهار سازند کلات (kk)، تیرگان (Ktr)، مزدوند (Jmz) و چمن بید (Jch) است (جدول ۲). با توجه به تهیه نقشه پهنه‌های اقلیمی منطقه (در محیط Arc GIS)، چهار تیپ اقلیمی با روش‌های آمبرژه و دمارتون مشخص گردید (شکل ۳) و با ۱۶ نمونه‌برداری از منطقه نسبت کلسیمتری سازندها در آزمایشگاه تعیین شد. همچنان که در (جدول ۳) ملاحظه می‌شود، بیشترین نسبت کلسیت با میانگین ۴۰/۵ درصد مربوط به سازند مزدوران است که ۴۱/۵ درصد از مساحت سازندهای کارستی شونده حوضه را به خود اختصاص داده است. سپس سازندهای تیرگان، با میانگین نسبت کلسیت ۳۹/۵ درصد و سازند کلات با ۳۸/۶ درصد و سازند چمن بید با ۳۷/۵ درصد به ترتیب با درجه ناخالصی بیشتر در مراحل بعدی قرار می‌گیرند. این موضوع اثبات می‌کند که شکل‌گیری انواعی از کارن‌های کارستی در سازندهای مزدوران، تیرگان و کلات به‌ویژه در اقلیم مرطوب منطقه بیشتر است زیرا نسبت خلوص سنگ کارست در تشکیل کارن‌ها نقش اساسی دارد (کالیک، ۲۰۱۱؛ رضایی و همکاران، ۱۳۹۹)؛ بنابراین هر اندازه از شرایط اقلیمی خشک به طرف اقلیم معتدل و نیمه مرطوب کوهستانی حوضه پیش برویم به دلیل خلوص سنگ کربناته میزان تکامل یافتگی اشکال کارن‌ها توسعه یافته‌تر می‌شود.

**جدول ۳:** نتایج آزمایشگاهی مقادیر نسبت کلسیت از ۱۶ کانون نمونه‌برداری از سازندهای کارستی شونده منطقه مورد مطالعه

شماره نمونه‌برداری	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
درصد کلسیت	۳۸/۷	۳۸/۸	۳۸/۳	۳۸/۵	۳۹	۳۹/۵	۴۰/۲	۳۸/۸	۳۹/۲
نام سازند و مساحت	کلات (۱۳/۶ کیلومترمربع) (۱۷/۸۲ درصد). میانگین کلسیت ۳۸/۶٪			تیرگان (۱۸/۵ کیلومترمربع) (۲۴/۵ درصد) میانگین کلسیت ۳۹/۵٪					
شماره نمونه‌برداری	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶		
درصد کلسیت	۴۰/۵	۴۱	۳۹/۷	۳۹/۶	۳۷/۵	۳۷	۳۸		
نام سازند و مساحت	مزدوران (۳۱/۷ کیلومترمربع) (۴۱/۵۳ درصد) میانگین کلسیت ۴۰/۵٪			چمن بید (۱۲/۵ کیلومترمربع) (۱۶/۴ درصد) میانگین کلسیت ۳۷/۵٪					

مآخذ: نگارندگان





مأخذ: نگارندگان

**شکل ۳:** راست: نقشه پهنه‌بندی اقلیمی منطقه مورد مطالعه با مدل‌های آمیرژه (Q2) و دوماتون (Ia) در محیط جی‌آی‌اس (دوره آماری ۱۳۶۵ تا ۱۳۹۹). چپ: توسعه‌یافتگی کارن‌های خطی و حفره‌ای در سازند کلات واقع در تیپ اقلیمی نیمه مرطوب کوهستانی حوضه

## بحث و یافته‌ها

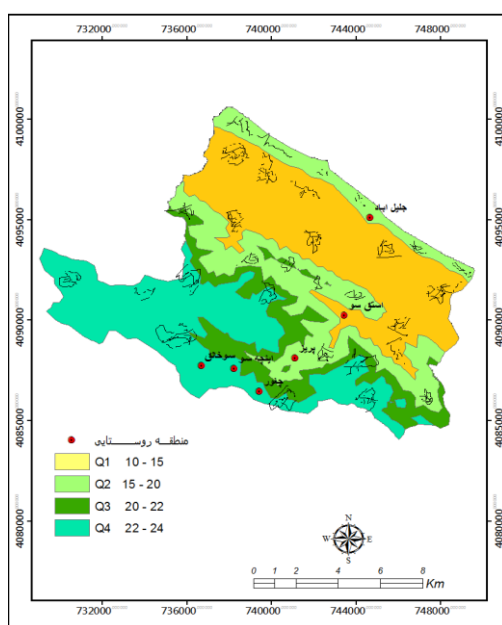
### نقش تغییر اقلیم بر تنوع و تکامل کارن‌ها

به‌منظور نقش شرایط اقلیمی بر تنوع و تکامل یافتگی کارن‌های کارستی ابتدا داده‌های ۲۵ ایستگاه هواشناسی با دوره آماری ۳۰ ساله در محیط آرک جی‌آی‌اس به نقشه پهنه‌بندی اقلیمی تبدیل گردیده و سپس با هم‌پوشانی نقشه سازندهای کارستی و پهنه‌بندی اقلیمی در هر تیپ اقلیمی، تعداد ۸۰ نمونه برداری از کارن‌ها در سازندهای کارستی منطقه برداشت شد که در مجموع تعداد ۲۴۰ کارن با سه مورفولوژی خطی، پیت کارن و تریت کارن) مورد ژئومورفومتری و نقشه‌برداری قرار گرفتند (شکل ۴). نتایج این کمی این برداشت‌ها در (جدول ۴ تا ۶) آورده شده است. مهم‌ترین شاخص‌های مورفومتری بکار گرفته شده بر تکامل کارن‌ها عبارتند از: تراکم کارن در واحد سطح، طول، عمق، قطر و نسبت عمق به عرض کارن‌ها که تعیین کننده شکل تکاملی کارن در هر پهنه اقلیمی است (وایت، ۲۰۱۹؛ فورد و ویلیامز، ۲۰۲۱). به‌طور کلی تعداد میکرو کارن‌ها در شرایط اقلیمی خشک و نیمه‌خشک بیشتر بوده ولی به‌طرف شرایط اقلیمی مرطوب‌تر بر توسعه‌یافتگی کارن‌ها افزوده می‌شود و در نتیجه میکرو کارن‌ها به مزو کارن‌ها و سپس ماکرو کارن‌ها تبدیل می‌شوند. اگرچه ممکن است منشأ اولیه کارن‌های خطی مربوط به درزه شدگی سنگ‌ها باشد (ولایتی و خانعلی‌زاده، ۱۳۹۰) ولی باز شدگی و توسعه‌یافتگی کارن‌ها در مراحل بعدی تحت شرایط اقلیمی مرطوب‌تر رخ می‌دهند و در دیواره‌های صخره‌ساز

کلات کاملاً مشهود می‌باشند، به طوری که میانگین طول کارن‌های خطی از  $5/3$  سانتی‌متر در پهنه اقلیمی خشک (Q1) به  $51/2$  سانتی‌متر در پهنه اقلیمی نیمه مرطوب کوهستانی (Q4) می‌رسد (جدول ۴).

**جدول ۴:** نتایج مورفومتریک میانگین ۸۰ نمونه‌برداری از کارن‌های با مورفولوژی خطی (GPS) در تیپ‌های اقلیمی مختلف منطقه مورد مطالعه

شماره نمونه	تیپ اقلیمی	تراکم در هر m2	طول cm	عرض cm	عمق cm	نسبت عمق به عرض	نسبت عرض به طول	مقیاس تکاملی کارن
۱	Q1 خشک/خشک سرد	۱۶	۵/۳	۰/۵	۰/۳	۰/۶	۰/۰۹	میکرو
۲	Q2 نیمه‌خشک	۱۲	۱۷/۵	۲/۲	۰/۸	۰/۳۶	۰/۱۹	میکرو و مزو
۳	Q3 معتدل	۱۱	۲۸/۸	۴/۳	۱/۸	۰/۴۱	۰/۱۷	مزو
۴	Q4 نیمه مرطوب / کوهستانی	۹	۵۱/۲	۱۰/۵	۲/۳	۰/۲۱	۰/۲	ماکرو



**شکل ۴:** راست: نقشه پراکندگی ۲۴۰ نمونه برداشت‌شده کارن‌ها در سطح حوضه، چپ: مورفولوژی کارن‌های خطی تکامل‌یافته در سازند کلات واقع در زون اقلیمی نیمه مرطوب کوهستانی منطقه (Q4)

**جدول ۵:** سنجش مورفومتریک میانگین ۸۰ نمونه‌برداری از پیت کارن‌ها (با مورفولوژی حفره‌ای) (GPS) در تیپ‌های اقلیمی مختلف منطقه مورد مطالعه

شماره نمونه	تیپ اقلیمی	تراکم در هر m2	قطر cm	عمق cm	نسبت عمق به قطر	هندسه حفره	مقیاس تکاملی
۱	Q1 خشک/خشک سرد	۴۲	۱/۲	۰/۳	۰/۲۵	کندویی	میکرو و مزو
۲	Q2 نیمه‌خشک	۲۹	۳/۲	۱/۷	۰/۵۳	کندویی	مزو
۳	Q3 معتدل	۲۴	۷/۳	۶/۵	۰/۹	دایره‌ای بی‌قاعده	مزو و ماکرو
۴	Q4 نیمه مرطوب / کوهستانی	۲	۳۵/۴	۲۲	۰/۶۲	دایره‌ای بیضوی	ماکرو

مأخذ: نگارندگان

**جدول ۶:** نتایج مورفومتریک میانگین ۸۰ نمونه برداری از تریت کارن‌ها (مورفولوژی سه وجهی) در تیپ‌های اقلیمی مختلف منطقه مورد مطالعه

شماره نمونه	تیپ اقلیمی	تراکم در هر m2	قطر cm	عمق cm	هندسه حفرات	مقیاس تکاملی
۱	Q1 خشک/خشک سرد	۱۶	۱/۸	۰/۲	سه وجهی بی‌قاعده	میکرو
۲	Q2 نیمه‌خشک	۱۰	۴/۱	۱/۵	سه وجهی کم‌عمق	مزو
۳	Q3 معتدل	۸	۷/۶	۵/۵	سه وجهی ین	مزو به ماکرو
۴	Q4 نیمه مرطوب / کوهستانی	۳	۲۷/۶	۱۱/۵	سه وجهی تشریحی	ماکرو

مأخذ: نگارندگان

ابعاد پیت کارن‌ها و تریت کارن‌ها نیز به شرایط اقلیمی منطقه وابسته است به طوری که اندازه قطر پیت کارن‌ها از ۱/۲ سانتی‌متر در اقلیم خشک به ۳/۲ سانتی‌متر در تیپ اقلیمی نیمه‌خشک و ۷/۳ سانتی‌متر در تیپ اقلیمی معتدل و در اقلیم نیمه مرطوب کوهستانی به ۳۵/۴ سانتی‌متر می‌رسد همچنان که در (جدول ۵ و ۶) ملاحظه می‌شود قطر و عمق پیت کارن‌ها و تریت کارن‌ها (کارن‌های سه وجهی) در همه سازندهای کارستی شونده با تغییر شرایط اقلیمی و به طرف اقلیم مرطوب بیشتر شده‌اند. این موضوع تأییدکننده نقش رطوبت به‌ویژه اشکال رطوبتی به صورت برف، مه و جریان‌های آبی در اقلیم معتدل و نیمه مرطوب کوهستانی منطقه است (شکل ۵). طبق نظر (وایت، ۲۰۱۹) شرایط اقلیمی نه تنها بر توسعه یافتگی کارن‌ها در مقیاس فضایی بلکه بر تنوع مورفولوژیکی آن‌ها نیز اثرگذار می‌باشند. همچنان که در (شکل ۶) ملاحظه می‌شود در دیواره‌های صخره ساز آهک سازند کلات انواع متفاوتی از کارن‌ها را با مورفولوژی خطی، حفره‌ای، پیت کارن‌ها و حتی کارن غارچه‌هایی با مقیاس میکرو تا ماکرو تشکیل می‌شوند که نشان‌دهنده توسعه یافتگی کارن‌ها تحت شرایط اقلیمی مرطوب‌تر است. در برخی نقاط حوضه مانند دامنه‌های شمال غربی، در معرض رطوبت دره‌ها قرار دارند، قطر برخی از کارن‌های غارچه ای تا ۷۳ سانتی‌متر و در ارتفاعات برف‌گیر تا یک متر می‌رسند. گردش هوای مرطوب یا ریزش باران و برف بر دیواره‌های صخره ساز آهکی این نواحی بر توسعه کارن‌ها مؤثر است. از آنجا که آب باران حاوی اسید کربنیک (CO<sub>2</sub>) می‌باشند به تدریج موجب تنوع و تکامل یافتگی کارن‌ها خواهد شد. حتی در اقلیم نیمه خشک، جایی که دیواره‌های صخره‌ای در مسیر جریان‌های آبی حاصل از چشمه‌ها و برخورد هوای مرطوب قرار دارند ترکیبی از کارن‌های با مورفولوژی خطی، حفره‌ای و سه وجهی تشکیل شده‌اند. این موضوع تأییدکننده مدل مفهومی گسیل رطوبتی توده‌های کارستی است. میزان بارش در اقلیم نیمه مرطوب کوهستانی تا بیش از ۵۰۰ میلی‌متر نیز می‌رسد و بخش قابل توجهی بین ۲۰ تا ۳۰ درصد آن به صورت برف و مه بر روی صخره‌ها کشیده می‌شود که موجب تشکیل و تکامل یافتگی کارن‌ها می‌گردد، زیرا فرآیند کارستی فیکاسیون را در این شرایط تسریع می‌کند. در درون بسیاری از کارن غارچه‌های پهنه‌های اقلیمی معتدل و سرد کوهستانی گلسنگ‌ها و خزها رشد می‌کنند و فرآیند توسعه یافتگی را تسریع می‌نمایند (حبیبی و صفایی فراهانی، ۲۰۲۱). بارش‌های رگباری که در ارتفاعات بیشتر رخ می‌دهند (خورشید دوست و همکاران، ۱۳۹۶) مقادیر زیادی از رطوبت را وارد سیستم‌های درز و ترک سنگ‌های کربناته کرده و فرآیند

کارستی‌شدن را تسریع می‌کند. این موضوع در بخش‌های شمال غربی و جنوب غربی حوضه کلات کاملاً صادق بوده و کارن‌های توسعه‌یافته‌ای در سازندهای کلات، مزدوران و تیرگان به وجود آمده‌اند.



مأخذ: نگارندگان

**شکل ۵:** بالا و راست، تریت کارن‌های نیمه تکاملی با مقیاس میکرو از پهنه اقلیمی (Q2 نیمه‌خشک) در سازند تیرگان، بالا و چپ، تریت کارن تکامل‌یافته در اقلیم سرد و مرطوب کوهستانی (Q4) بر سازند مزدوران، پایین و راست، کارن‌های خطی تکاملی در اقلیم کوهستانی، پایین و چپ، کارن‌های با مورف خطی بر سازند کلات در اقلیم نیمه‌خشک (Q2).



مأخذ: نگارندگان

**شکل ۶:** راست: کارن‌های ترکیبی با مورفولوژی خطی و پیت کارن‌ها و تریت کارن‌ها در دیواره آهکی صخره ساز سازند کلات که در مسیر جریان آب و گردش رطوبت بوده‌اند، چپ: کارن‌های غارچه‌ای با قطر ۷۳ سانتی‌متر در سازند کلات از اقلیم کوهستانی (اردیبهشت ۱۴۰۰).

## نتیجه گیری

برای نقش اقلیم بر تنوع و تکامل کارن‌های کارستی، تعداد ۲۴۰ کارن با سه نوع مورفولوژی خطی، پیت‌کارن و تریت کارن در چهار تیپ اقلیمی نمونه‌برداری و مورد عملیات مورفومتریکی قرار گرفتند. نتایج نشان دادند که هر اندازه شرایط اقلیمی دارای رطوبت بیشتر و دمای کمتری باشند تشکیل و تنوع کارن‌ها افزایش یافته و توسعه‌یافتگی آن‌ها از نظر مقیاس فضایی بیشتر شده است. از ۱۶۸/۵ کیلومترمربع وسعت منطقه ۷۶/۳ کیلومترمربع (۴۵/۴ درصد) آن را سازندهای کارست ساز کربناته تشکیل می‌دهد که همه آن‌ها از نسبت خلوص بالای ۳۰ درصد تشکیل شده‌اند و برای کارستی فیکاسیون مساعد هستند ولی در بین آن‌ها سازند آهک دولومیتی مزدوران با نسبت کلسیت ۴۰/۵ درصد و سازندهای صخره ساز تیرگان و کلات و چمن‌بید با نسبت کلسیت ۳۹/۵ و ۳۸/۶ و ۳۷/۵ درصد دارای بالاترین خلوص بوده‌اند که شرایط مساعدی برای تشکیل کارن‌ها را دارند. اثر اقلیم مرطوب ارتفاعات در تشکیل، تنوع و تکامل‌یافتگی کارن‌های منطقه بیشتر اقلیم خشک و نیمه‌خشک است. به طوری که میانگین قطر پیت کارن‌ها در شرایط اقلیمی خشک از ۱/۲ سانتی‌متر به ۳۵/۴ سانتی‌متر در شرایط اقلیمی نیمه مرطوب کوهستانی می‌رسد قطر تریت کارن‌ها از ۰/۲ سانتی‌متر در اقلیم خشک به ۱۱/۵ سانتی‌متر در اقلیم سرد کوهستانی می‌رسد و عرض کارن‌های خطی از ۰/۲ در اقلیم خشک به ۱۰/۵ سانتی‌متر در شرایط اقلیمی نیمه مرطوب کوهستانی رسیده است (جدول ۴ تا ۶) که نشان‌دهنده تکامل‌یافتگی کارن‌ها در شرایط رطوبتی بالاتر است. به دلیل شرایط رطوبتی و دمایی مناسب در اقلیم مرطوب‌تر ارتفاعات حوضه تراکم گلسنگ‌ها بیشتر شده و فرآیند بیوکارستی را در تشکیل کارن‌ها حفره‌ای و تریت کارن‌ها تسریع می‌کند؛ بنابراین پهنه‌های اقلیمی (Q3 و Q4) شرایط رطوبتی و دمایی مناسب‌تری نسبت به پهنه‌های اقلیمی خشک و نیمه‌خشک داشته و دارای کارن‌های کارستی تکامل یافته‌تری هستند در صخره‌هایی که از شرایط رطوبتی بالایی در ارتفاعات برخوردار می‌باشند، قطر برخی از کارن‌های غارچه‌ای به بیش از یک متر هم می‌رسد. تنوع کارن‌های کارستی نیز در اقلیم معتدل و نیمه مرطوب کوهستانی بیشتر بوده و شامل انواعی از کارن‌های خطی، حفره‌ای، تریت کارن‌ها و وندکارن‌ها و حتی کارن غارچه‌ها می‌باشند. این نتایج با مدل مفهومی (وایت، ۲۰۱۹) که طبقه‌بندی کارن‌ها را از نظر مقیاس در تیپ‌های اقلیمی انجام داده است انطباق دارند و نشان‌دهنده ارتباط شرایط اقلیمی با تنوع و تکامل‌یافتگی کارن‌های اپی کارستی می‌باشند.

## منابع

- ۱- بهنیافر، ابوالفضل؛ قنبرزاده، هادی (۱۳۹۵): ژئومورفولوژی کارست، مشهد، چاپ نخست، انتشارات دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد.
- ۲- بهنیافر، ابوالفضل؛ قنبرزاده، هادی (۱۳۹۸): ژئومورفولوژی کارست، مشهد، چاپ دوم، انتشارات دانشگاه آزاد اسلامی مشهد.
- ۳- خضری، سعید؛ شهاب، هیمین و محمدی، سارا (۱۳۹۶): ارزیابی و پهنه‌بندی تحول کارست حوضه آبریز غار سهولان مهاباد با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی، مجله پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، شماره ۱، صص ۳۹-۲۱.

- ۴- خوش‌رفتار، رضا؛ سرور، جلیل‌الدین و فرید مجتهدی، نیما (۱۳۹۵): بررسی اشکال کارستی در توده کوهستانی برفک گیلان، فصل‌نامه علمی پژوهشی فضای جغرافیایی، شماره ۵۳، صص ۵۶-۳۹.
- ۵- خورشید دوست، علی‌محمد؛ مفیدی، عباس، رسولی، علی‌اکبر و آزر، کامل (۱۳۹۶): تحلیل همبندی ساز و کار وقوع بارش‌های سنگین بهاره در شمال غرب ایران، مجله مخاطرات محیطی، دوره ۵، شماره ۸، صص ۵۳-۸۲.
- ۶- رضایی عارفی، محسن؛ زنگنه اسدی، محمدعلی؛ بهنیافر، ابوالفضل و جوانبخت، محمد (۱۳۹۹): شناسایی درجه کارستی شدن حوضه کوهستانی کلات در شمال شرق ایران. نشریه فضای جغرافیایی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر. دوره ۲۰، شماره ۷۱، صص ۷۴-۴۹.
- ۷- زنگنه‌اسدی، محمدعلی؛ غیور، حسنعلی؛ رامشت، محمدحسین و ولایتی، سعداله (۱۳۸۱): چشم‌اندازهای کارستی اخلمد و مدیریت محیطی آن، تهران، مجله پژوهش‌های جغرافیایی، شماره ۴۲، صص ۱۰۱-۸۷.
- ۸- دوستان، رضا (۱۳۹۹): الگوهای جوی بارش‌های شدید و فراگیر خراسان جنوبی، مجله جغرافیا و توسعه ناحیه‌ای، دوره ۱۸ شماره ۱، صص ۲۲۳-۱۹۹.
- ۹- لشنی‌زند، مهران و غلامرضایی، سارا (۱۳۹۰): بررسی رابطه متغیرهای اقلیمی و آبدهی سر آب‌های کارستی به‌منظور مدیریت منابع آب شهری مطالعه موردی: خرم‌آباد، نشریه آمایش محیط، دوره ۴ شماره ۱۵ صص ۶۱-۷۹.
- ۱۰- قربانی، محمد صدیق؛ محمودی، فرج‌الله؛ یمانی، مجتبی و مقیمی، ابراهیم (۱۳۸۹): نقش تغییرات اقلیمی کواترنر در تحول ژئومورفولوژیکی فروچاله‌های کارستی، مطالعه موردی: ناهمواری‌های شاهو، غرب ایران، مجله پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ش ۷۴، زمستان ۱۳۸۹، صص ۱۶-۱.
- ۱۱- ولایتی، سعداله و خانعلی‌زاده، فریده (۱۳۹۰): بررسی رابطه ساختارهای تکتونیک و اشکال کارستی، مطالعه موردی حوضه آبریز کارده، مجله جغرافیا، شماره ۳۱، صص ۱۸۹-۱۷۱.

- 12- Baker, Andy, (2016): Karst And Climatic Change, University Of Sydney.
- 13- Bogli, (2005): Karst Geomorphology. Amazon Pub.
- 14- Calic, J. 2011, Karstic Uvula Revisited: Toward A Redefinition Of The Term, Geomorphology, Vol.134, No.1, Pp. 32-42.
- 15- Ford, D. & Williams, P. D. (2007): Karst Hydrogeology And Geomorphology. West Sussex, England: John Wiley & Sons
- 16- Ford, D. & Williams, P. D. (2021): Karst Hydrogeology And Geomorphology. West Sussex, England: John Wiley & Sons.
- 17- Habibi, Azadeh And Safaie Frahani, Banafsheh (2021): Identification Of Fungi From Soil And Sedi-Ment In Jefriz Cave; The First Survey In A Cave From Iran, Journal Of Cave And Karst Studies, Vol. 83.
- 18- Milanovic, P. J. (1981): Karst Hydrogeology. Colorado, CO: Water Resources Publication's.
- 19- Ravbar, (2018) Climatic Trends And Anticipated Karst Spring Quantity, Geoscienceworld.
- 20- Waltham, A.C. And Fookes, P.G. (2003): Engineering Classification Of Karst Ground Conditions. Quarterly Journal Of Engineering Geology And Hydrogeology, 36, 101-18.
- 21- White, W.B. (2000): Dissolution Of Limestone From Field Observations, In Speleogenesis; Evolution Of Karst Aquifers (Eds A.V.Klimchouk, D.C. Ford, A.N. Palmer And W. Dreybrodt), National Speleological Society Of America, Huntsville, AL, Pp. 149-55.
- 22- White, W.B. (2019): Geomorphology And Hydrology Of A Karst Terrains. Oxford University Press, 464pp.