

## شناخت عوامل مؤثر بر پراکندگی و وقوع فروچاله‌ها با استفاده از شاخص‌های کمی مورفومتریک مطالعه موردی (دشت کرمانشاه)

زهرا حیدری - دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشکده برنامه ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز .  
مهرونوش قدیمی\* - استادیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران.  
مرتضی رضایی عارفی - دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه تهران.  
زینب حیدری - دانش آموخته کارشناسی ارشد مخاطرات آب و هوایی، دانشگاه محقق اردبیلی .

پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۹/۱۲      تأیید نهایی: ۱۳۹۹/۰۵/۲۲

### چکیده

لندفرم یک عارضه زمین یا سیمای زمینی است که تشکیل آن به وسیله فرایندهای طبیعی به صورتی شکل گرفته که می‌توان آن را با عارضه‌های شاخص توصیف و تعریف کرد. فروچاله‌ها یکی از لندفرم‌های شاخص مناطق کارستی می‌باشند که در اثر عوامل و فرایندهای گوناگونی شکل می‌گیرند. با توجه به اهمیت فروچاله کارستی شناسایی و تهیه نقشه پراکندگی فروچاله‌ها و ویژگی‌های شکلی آن‌ها از نیازهای علوم محیطی بخصوص ژئومورفولوژی است، هدف از این پژوهش تجزیه و تحلیل مورفومتری فروچاله‌ها جهت مدل‌سازی برای شناسایی ویژگی‌های کمی شکل فروچاله‌ها در دشت کرمانشاه با استفاده از روش‌های ژئومورفومتریک  $RTP$ ،  $CURVATURA$  می‌باشد داده‌های ورودی در این مدل شامل شیب، انحنا، پلان، انحنا، پروفیل و شاخص  $RTP$  می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد نقش عامل گسل در شکل‌گیری فروچاله‌ها به عنوان عامل غالب می‌باشد فروچاله‌های منطقه به تبعیت از ارتفاعات و بیشتر تحت تأثیر رورانندگی، گسل‌ها از نوع فروچاله مرکب با عمق زیاد (۸۹) درصد شکل گرفته است و امتداد تعداد اندکی از فروچاله‌های (انحلالی) گرد و ساده ۱۱ درصد در مناطق با توپوگرافی ملایم می‌باشند. در واقع ارزیابی میزان فعالیت گسل‌ها نشان می‌دهد که روش‌های مورفومتریک شاخص‌های مناسبی برای ارزیابی ویژگی‌های شکلی فروچاله‌ها می‌باشند.

واژگان کلیدی: فروچاله، مورفومتری، دشت کرمانشاه، شاخص  $Curvature, RTP$

## مقدمه

کارست یک سیستم ژئو مورفیک و هیدرولوژی است که توسط انحلال سنگ های انحلال پذیر مانند سنگ آهک، دولومیت و ژیپس شکل می گیرد (ازبورت و همکاران<sup>۱</sup>، ۲۰۱۴). به بیان دیگر کارست نوعی چشم انداز است که در سنگ های کربناته (سنگ آهک، دولومیت و مرمر) یا تبخیری (ژیپس، اندریت و سنگ نمک) تشکیل می شود و توسط مجموعه ای از لندفرم ها مانند چشمه ها، دولین ها، غارها، فروچاله های ریزش کرده و لندفرم های رسوبی کربناته مشخص می شود. این مناطق دارای محیط های بسیار شکننده هستند، تقریباً ۱۲ درصد قاره ها را پوشش داده اند (فنگ و همکاران<sup>۲</sup>، ۲۰۱۶) و ویژگی بارز آنها وجود لندفرم های مشخص مرتبط با انحلال و یک شبکه زهکشی مسلط زیرسطحی است.

توسعه یک سیستم کارستی به عواملی از جمله اقلیم، لیتولوژی و عوامل ساختمانی (چین، گسل و درزه) بستگی دارد (کرم و همکاران<sup>۳</sup>، ۱۳۹۱). در این میان اشکال کارستی رابطه نزدیکی با ساختارهای تکتونیکی دارند؛ در واقع تخلخل و نفوذپذیری در امتداد مناطق شکسته شده در واحدهای کربناته توسعه کارست را افزایش می دهد (انس و همکاران<sup>۴</sup>، ۲۰۱۵). علاوه بر این درزه ها و گسل ها به همراه سطوح لایه بندی، نه تنها مناطق ضعیف را در سنگ بستر تشکیل می دهند و منجر به فرسایش متمرکز می شوند (لیس و میلروی<sup>۵</sup>، ۲۰۱۳)، بلکه آنها اشکال و رفتارهای متنوعی که در سیستم های کارستی وجود دارد را تعیین می کنند. مهمترین لندفرم ها در چشم اندازهای رخنمون یافته کارستی شامل: پهنه های کارنی، فروچاله ها و حفره های بلعنده می باشند. این اشکال بر روی سطح زمین معمولاً ولی نه الزاماً، در امتداد مناطق که دچار درز و شکستگی شده است، ایجاد می شوند (کواچیچ و راوبار<sup>۶</sup>، ۲۰۱۳). در این بین به چاله های بسته کارستی کوچک تا متوسط بدون توجه به زمینه پیدایش و اقلیمی آن ها فروچاله (دولین) می گویند و یکی از دلایل شکل گیری آنها این است که غارهای اولیه که از نقاط تغذیه گسترش می یابند، به یک چشمه یا مجرای یک غار قدیمی تر متصل شوند. زمانی که این پیوندها شکل بگیرد، مقاومت نسبت به جریان عبوری از میان سنگ آن قدر زیاد است که اجازه جابه جایی مقادیر کافی آهک را می دهد تا منجر به شکل گیری چاله ای در اندازه فروچاله شود. فروچاله ها به وسیله فرایندهای مختلفی شکل می گیرند که شامل ۱. فروچاله های انحلالی و فروچاله های فروریزی که در کارست های برهنه به وجود می آیند؛ ۲. فروچاله های ریزشی و پرشده در کارست های پوششی ایجاد می شوند و ۳. فروچاله های فرونشینی / تراکمی که در کارست های مدفون تشکیل می شوند (پرین و همکاران<sup>۷</sup>، ۲۰۱۵). هنگامی که فروچاله ها یافت می شوند کارست همیشه توسعه یافته است بنابراین آنها می توانند شاخص های لندفرمی کارست در نظر گرفته شوند (پاریزی و همکاران<sup>۸</sup>، ۱۳۹۷). تجزیه و تحلیل مورفومتریک لندفرم های کارستی برای تشخیص ارتباط بین پارامترهای مختلفی که به طور مستقیم یا به آسانی قابل درک نیستند، مفید می باشد (باسو و همکاران<sup>۹</sup>، ۲۰۱۲). همچنین مطالعه مورفومتریک فروچاله ها علاوه بر اینکه یک تحلیل کمی از محیط های کارستی را فراهم می کند، مقایسه پارامترهای متنوع فروچاله ها را ممکن ساخته و نتایج غیرمنتظره ای را در بر داشته و منجر به ارائه فرضیاتی در مورد نحوه تکامل و دینامیک ژئواکوسیستم های کارستی می شود (قربانی و همکاران<sup>۱۰</sup>، ۱۳۸۹). برای مثال تا دهه ۱۹۶۰ تصور می شد که کارست ها پدیده های آشفته ای هستند، به طوری که لندفرم های آن ها مخلوطی و نامنظم از اشکال ریزشی و انحلالی است. از آن موقع تاکنون پژوهش های مورفومتریک نشان داده است که این تصور صحیح نیست. کارست های بسیاری که در مناطقی جدا از هم در سطح جهان پراکنده اند (به ویژه کارست های چندضلعی) از سازماندهی فضایی مشابهی برخوردارند. به علاوه، پراکندگی فروچاله های آن ها از الگویی برخوردار است که بسیار متفاوت از الگوی نامنظم و تصادفی است به طوری که فروچاله ها تمایل به یکسان بودن در الگوی پراکنش دارند (کریمی وردنجانی<sup>۱۱</sup>، ۱۳۹۴). بررسی مورفومتری فروچاله ها از جنبه های مختلف دارای اهمیت می باشد محدوده مورد مطالعه در امتداد زاگرس مرتفع واقع شده و عمدتاً از آهک های توده ای بیستون تشکیل شده است (یمانی، ۱۳۹۰). بنابراین با توجه به موقعیت منطقه، ارتفاع زیاد، بارش، درجه حرارت مناسب، وجود سنگ های کربناته، گسل ها،

درز و شکاف ها عواملی هستند که گسترش و تحول کارست (فروچاله ها) را باعث می شوند (فورد و ویلیامز<sup>۱</sup>، ۲۰۱۳). فروچاله ها جزو اشکال غالب دشت کرمانشاه می باشد و بررسی مورفومتری فروچاله های منطقه می تواند جهت بررسی چگونگی گسترش پدیده کارست در منطقه و مقایسه توسعه ی کارست در مناطق مختلف مفید باشد و با استفاده از این اطلاعات عوامل کنترل کننده ی فروچاله های منطقه مورد مطالعه قرار گیرد و سیمایی کلی از شرایط ژئومورفولوژی و مورفومتری منطقه معرفی شود. مطالعاتی که تاکنون در منطقه صورت گرفته با تکیه بر منابع آب کارست بوده و مطالعات مورفومتری فروچاله انجام نشده است لذا با توجه به اهمیتی که فروچاله ها در منطقه دارند در این پژوهش اندازه گیری پارامترهای مورفومتری با استفاده از توابع مورفومتری در محیط Arc-Gis10.4 انجام شده است و برای شناخت عوامل مؤثر بر پراکندگی و رخداد فروچاله ها از مدل Curvatura،RTP استفاده می شود.

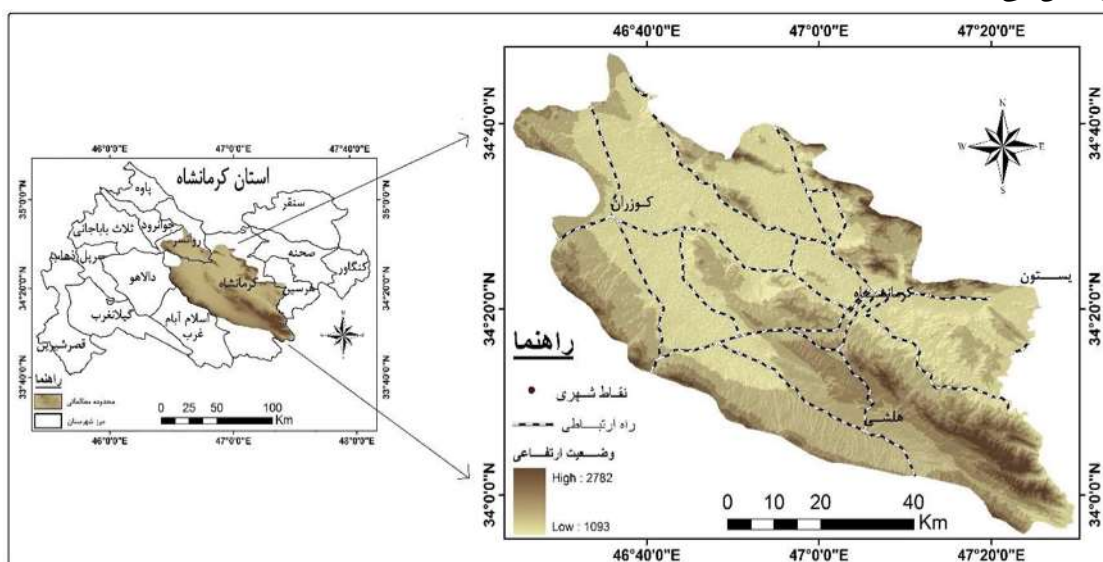
مطالعات متعددی توسط محققین در سطح بین المللی بر روی فروچاله ها صورت گرفته است، برای نمونه در تحقیقی که در امتداد دریای مرده بر روی فروچاله ها انجام گردیده، چنین گزارشی شده است که علت تشکیل فروچاله ها در کارست های نمکی دو عامل گسل های فعال نوزمین ساخت و جبهه انحلال حاشیه لایه نمکی هستند (ازرسکی و فرومکین، ۲۰۱۳). پژوهشی دیگر در منطقه مذکور نشان داد که تحول فروچاله ها از لحاظ ساختاری تحت کنترل گسلش محلی و منطقه ای است (آرجنتیری و همکاران، ۲۰۱۵). همچنین در تحقیقی که در فلات اوبروک بر روی فروچاله ها انجام گردیده، چنین استنباط شده است که در شکل گیری و توزیع فروچاله ها عوامل زمین شناسی، ارتفاع، جهت شیب، تراکم گسل، فاصله از گسل و شیب سطح آب زیرزمینی نقش عمده ای ایفا می کند (ازدمیر، ۲۰۱۵). پژوهشی در منطقه گازورخانی به عوامل کنترل کننده فروچاله ها و مورفومتری آنها با استفاده از رگرسیون لجستیک پرداخته شد که نتایج تحلیل لجستیک نشان داد پراهمیت ترین متغیرها در وقوع فروچاله ها گسل، ارتفاع و بارش می باشد و بیشتر فروچاله ها در شیب بین ۵ تا ۵۰ درجه گسترش یافته اند (ثروتی و همکاران، ۱۳۹۲). در مطالعه ای که با استفاده از DEM به تحلیل مورفوتکتونیک فروچاله های کارستی توده پراو بیستون پرداخته شد نشان داد فروچاله های کارستی متأثر از رورانندگی، گسل ها و شکستگی های منطقه شرایط مناسبی را برای تغذیه و گسترش منابع آب زیرزمینی به همراه دارد. تپیک ترین اشکال اگزوکارست یعنی فروچاله ها در امتداد درزه ها و گسل های کششی ناحیه قرار گرفته است (جعفر بیگلو و همکاران، ۱۳۹۱). با توجه به اینکه می توان از فروچاله ها به عنوان شاخصی جهت ارزیابی میزان توسعه یافتگی کارست استفاده نمود و از طرفی می توان با آنالیز مورفومتری فروچاله ها، روابط بین مؤلفه های کنترل کننده آنها را تشخیص داد، بنابراین در این پژوهش سعی شده که با استفاده از تحلیل های کمی و آماری این لندفرم ها را شناسایی و عامل شکل گیری آنها شناسایی شود.

### محدوده مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه دشت کرمانشاه در این پژوهش از نظر تقسیمات ژئومورفولوژیکی در محدوده زاگرس مرتفع قرار دارد و در حاضر منطبق بر دشت کرمانشاه می باشد (علایی، ۱۳۸۲) دشت کرمانشاه با وسعتی حدود ۷/۳۹ کیلومتر مربع بین ۳۴ درجه و ۸ دقیقه و ۳۲ ثانیه تا ۳۴ درجه و ۳۳ دقیقه و ۵۲ ثانیه عرض شمالی و ۴۶ درجه و ۲۲ دقیقه و ۵۴ ثانیه تا ۴۷ درجه و ۰۰ دقیقه و ۳۱ ثانیه طول شرقی از نصف النهار گرینویچ واقع شده و ارتفاع متوسط آن ۱۴۱۰ متر از سطح دریا است. دشت کرمانشاه با مورفولوژی کشیده، در امتداد شمالی - جنوبی، در میان مجموعه ای از کوهستان ها واقع شده است. به طوری که در شمال آن سیستم کوهستانی پرو (پراو) با شیب عمومی بیش از ۵۰ درصد و نقاط ارتفاعی بالای ۲۰۰۰ متر قرار دارد که

۱. Ford&williams

شامل کوه‌های بیستون و طاق‌بستان می‌باشد. محدوده‌ی مورد مطالعه در امتداد زاگرس مرتفع یکی از کمربندهای کارست می‌باشد و از نظر زمین ریخت شناسی به دو بخش خاوری و باختری تقسیم می‌شود. بخش خاوری که مرتفع تر و به طور عمده کوهستانی است و شامل سری های رورانده از سنگ های آذرین و دگرگونی و سنگ های آهکی و دولومیتی و... مانند کوه‌های دالخان بیستون\_ پراو و بخش باختری فضایی است که از کوه‌های فرسایش یافته نتوژن متشکل از رسوبات گچساران، میشان آجاجاری و همچنین اراضی به نسبت مسطح و مواج بین آنها تشکیل شده است مانند کوه‌های سفید. بنابراین شکل‌گیری اشکال کارستی و فرو چاله‌ها در منطقه یکی از پدیده‌های معمولی می‌باشد، ارتفاع زیاد منطقه در نواحی شمالی، از نظر آب و هوایی با توجه به اینکه در مسیر باد غربی قرر دارد از بارش و درجه حرارت مناسبی برخوردار می‌باشد (حنفی، ۱۳۹۷). وجود سنگ‌های کربناته عمدتاً از آهک بیستون و رادیولاریت، گسل‌ها، درزه‌ها و شکاف‌ها عواملی هستند که گسترش کارست و شکل‌گیری فرو چاله‌ها را در منطقه سبب می‌شود. شکل شماره (۱) نقشه موقعیت منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل ۱: موقعیت دشت کرمانشاه

### روش تحقیق

به طور کلی در پژوهش حاضر، مجموعه‌ای از بررسی‌های کتابخانه‌ای، میدانی در ارتباط با مورفولوژی فروچاله‌ها در منطقه صورت گرفته است. فروچاله‌های منطقه از جنبه مورفولوژی و فرایندهای مؤثر بر شکل‌گیری و توسعه مورد بررسی قرار خواهند گرفت. نقشه‌های توپوگرافی با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ نقشه زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰، ۱:۱۰۰۰۰۰ و همچنین سنجنده نقشه بردار موضوعی  $TM^1$  لندست (۵) که دارای توان تفکیک زمینی  $30^*30$  متر برای باندهای (۵-۱) و (۷) و علاوه بر آن از سنجنده  $ETM^+$  لندست (۷) با محتوای اطلاعاتی باند های حرارتی و انعکاسی و ورود و ذخیره‌سازی اطلاعات جهت تحلیل و بررسی از سیستم اطلاعات جغرافیایی استفاده خواهد شد و در نهایت تحلیل خوشه‌ای ویژگی‌های مورفومتریک در نرم‌افزار SPSS صورت می‌گیرد.

1. Dolores

۲. Bishop

۳. Ventura

۴. Fang-jiao

در این تحقیق با استفاده از مدل رقومی ارتفاع به بررسی قابلیت پارامترهای ژئومورفومتری در تفکیک تیپ‌های مختلف فرو چاله‌ها با استفاده از پارامترهای ژئومورفومتری به‌جای پارامترها و روش‌های سنتی شده است و پارامترهای مختلف در تفکیک لند فرم‌ها شامل متغیرهایی از قبیل مورفومتری اطلاعات ارتفاعی و ویژگی‌های ژئومورفومتری می‌باشد و داده ورودی در مطالعات ژئومورفومتری مدل رقومی ارتفاع به صورت رستری و با سلول‌های مربعی می‌باشد که در مواردی مدل رقومی سطح زمین نیز می‌تواند جایگزین آن شود.

### استخراج پارامترهای ژئومورفومتری

یکی از پارامترهای مورد استفاده، شاخص‌هایی از روش curvature می‌باشد که شامل انحنای پلان، پروفیل و شیب می‌باشد. با استفاده از این روش به بررسی ویژگی‌های مورفومتری فرو چاله‌های کارستی دشت کرمانشاه پرداخته شده است. پارامترهای مورد استفاده در این روش شیب (مقدار شیب در تمام جهات)، انحنای عرضی، انحنای حداقل (در تمام سطوح) و انحنای حداکثر (در تمام سطوح) می‌باشد (دولارس، ۲۰۱۳). محاسبه انواع انحناء در مدل رقومی ارتفاع رستری، پیکسل به پیکسل محاسبه می‌شود و برای هر سلول یک معادله پلی تامیال درجه چهار به کار می‌رود (رابطه ۱) و در یک پنجره با ابعاد ۳\*۳ محاسبه می‌شود با توجه به اینکه محاسبه انحناء در پنجره‌ی متحرک و با استفاده از هشت همسایه یک سلولی انجام می‌گیرد امکان تشخیص سلول‌ها و سطوح محدب و مقعر وجود دارد (بیشاپ، ۲۰۰۱).  
رابطه ۱:

$$Z = Ax^2y^2 + Bx^2y + Cxy^2 + Dx^2 + Ey^2 + Fxy + Hy + I$$

با توجه به اینکه سطوح پیوسته را با مدل داده رستری می‌توان نمایش داد لذا امکان مشتق‌گیری ریاضی در هر مکان وجود دارد. در عمل، به دلیل اینکه سطوح پیوسته مثلاً با مدل رقومی ارتفاع به صورت گسسته با سلول‌ها نمایش داده می‌شوند، مشتق‌گیری به مفهوم واقعی ریاضی امکان‌پذیر نیست؛ ولی با محاسبه اختلاف بین ارزش‌های سلول‌های مجاور با برآزش چندجمله‌ای با سلول‌های واقع در یک پنجره می‌توان آن‌ها را برآورد کرد (ونتورا، ۲۰۰۸). در جدول یک پارامترهای مورفومتری مورد بررسی نشان داده می‌شود

جدول ۱: رابطه پارامترهای مورفومتری مورد بررسی (فانگ جیانو، ۲۰۱۴، ۴):

پارامترهای مورفومتری	رابطه
شیب	$\arctan(\sqrt{d^2 + e^2})$
انحنای عرضی	$n \times g \times (b \times d^2 + a \times e^2 - c \times d \times e) / (d^2 + e^2)$
انحنای حداکثر	$n \times g \times (-a - b + \sqrt{(a-b) \times (a-b) + c})$
انحنای حداقل	$n \times g \times (-a - b - \sqrt{(a-b) \times (a-b) + c})$
انحنای پروفیل	$n \times g \times (b \times d^2 + a \times e^2 - c \times d \times e) / (d^2 + e^2)^{1.5}$

استخراج شاخص RTP (relative topography position) موقعیت توپوگرافی نسبی)

رابطه ۲:

$$(S_D - \min D) / (\max D - \min D)$$

SD: شاخص معیار مدل رقومی ارتفاع (smosixy نرم شده)

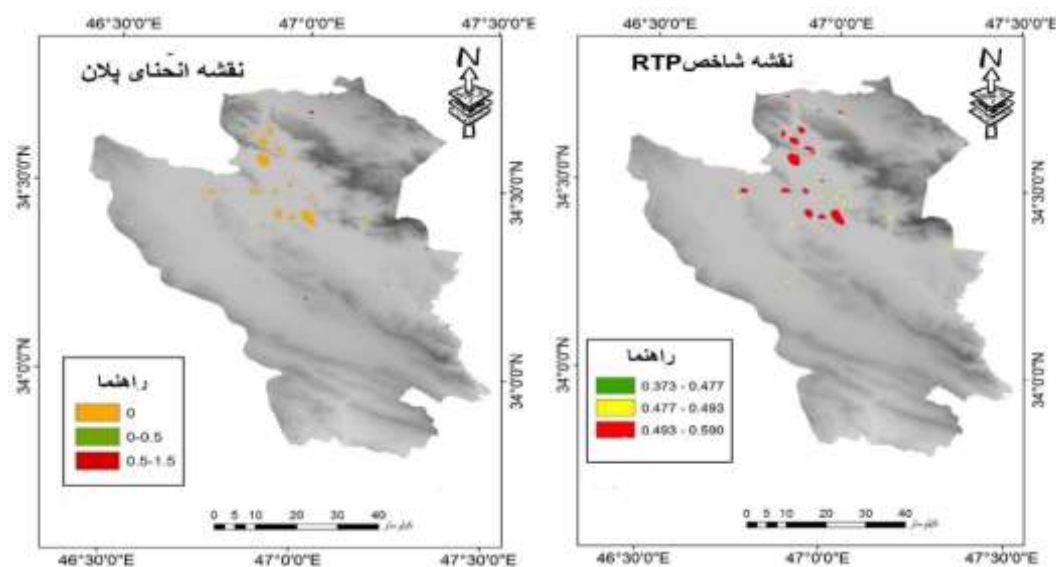
Min d: مقادیر حداقل مدل رقومی ارتفاع

Max d: مقادیر حداکثری مدل رقومی ارتفاع (اینتریری، ۲۰۱۵)

در این تحقیق از مدل رقومی ارتفاع برای بررسی پارامترهای ژئومورفومتری در تفکیک تیپ‌های مختلف فروچاله‌ها به جای پارامترها و روش‌های سنتی استفاده شده است. پارامترهای مختلف در تفکیک لندفرم‌ها شامل متغیرهایی از قبیل مورفومتری اطلاعات ارتفاعی و ویژگی‌های ژئومورفومتری می‌باشد. داده‌های ورودی در مطالعات، مدل رقومی ارتفاع به صورت رستری و با سلول‌های مربعی می‌باشد که در مواردی مدل رقومی سطح زمین نیز می‌تواند جایگزین آن شود.

### بحث و یافته‌ها

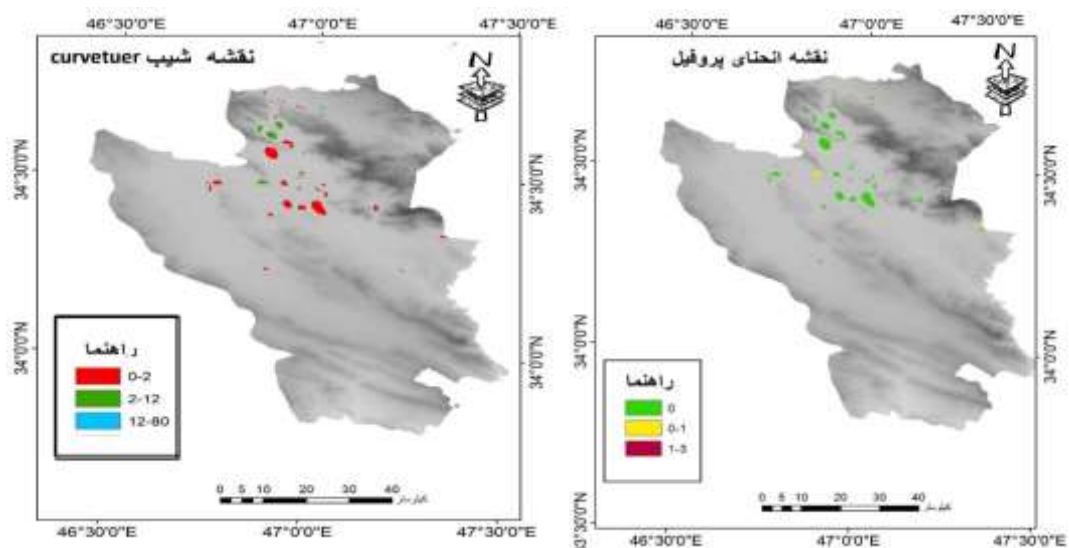
به منظور ارزیابی کمی \_ شکلی فروچاله‌های موجود در منطقه کرمانشاه پس از استخراج شاخص‌های ژئومورفومتری مقادیر میانگین، حداکثر و حداقل احتمال برای هر کلاس لندفرمی به دست آمد نتایج ارزیابی کمی نقشه‌ی انحنای پلان شکل (۲) برای نشان دادن پستی بلندی‌های فروچاله‌ها می‌باشد. بر اساس میانگین رنج طبقات که بین ۰ تا ۱٫۵ می‌باشد، با توجه به شکل بیشترین پراکنش فروچاله‌ها در طبقه اول (صفر) قرار دارند و دارای ویژگی شکلی دیواره پرتگاه مانند، شکل مرکب و پیچیده از نوع گسلی می‌باشند و هرچه از صفر فاصله می‌گیریم و به دامنه ۱٫۵ نزدیک می‌شوند دیواره‌ها صاف و کوتاه‌تر می‌شوند به فروچاله‌های ساده، گرد و دایره‌ای شکل از نوع انحلالی نزدیک می‌شوند که منطبق با نتایج شاخص RTP شکل (۳) انطباق می‌یابد در این شکل فروچاله‌های انحلالی در طبقه اول قرار دارند با میانگین رنج طبقات ۰٫۳۷۵-۰٫۴۷۷ و با تعداد خیلی محدود (۶ عدد) که با فاصله گرفتن از طبقه اول شکل آنها پیچیده‌تر و به نتایج شاخص انحنای پلان نزدیک می‌شود.



شکل شماره ۲: نقشه انحنای پلان و شاخص RTP

شکل شماره (۴) نقشه انحنای پروفیل (مقربودن) فروچاله را نشان می‌دهد. میانگین رنج طبقات بین ۳ تا ۳۰ که بیشترین پراکنش فروچاله‌ها در طبقه (۰) و نشان از عمیق بودن فروچاله و مساحت زیاد آنها می‌باشد و در طبقات ۳ کمترین میزان فروچاله با ویژگی شکلی کم عمق و مساحت محدود را در بر دارد.

شکل شماره (۵) نقشه شیب حاکی از آن می باشد میانگین شیب بیشترین تعداد فرو چاله ها در طبقه اول از نقشه بین شیب ۰ تا ۵ و ۵ تا ۱۰ درصد بیشترین پراکندگی را نشان می دهند و در شیب بالای ۲۰ درصد فرو چاله های بندرت مشاهده می شود، باتوجه به نتایج حاصل از تحلیل شکل اغلب فرو چاله های منطقه در مناطقی با شیب کم به صورت دیواره های مرتفع با عمق زیاد از نوع گسلی (۸۸ درصد) و فروچاله های انحلالی در مناطق نرم شده و دور از گسل ساده و دایره ای شکل (۱۱ درصد) گسترش داشته است.



شکل شماره ۵۴: انحنای پروفیل و نقشه شیب

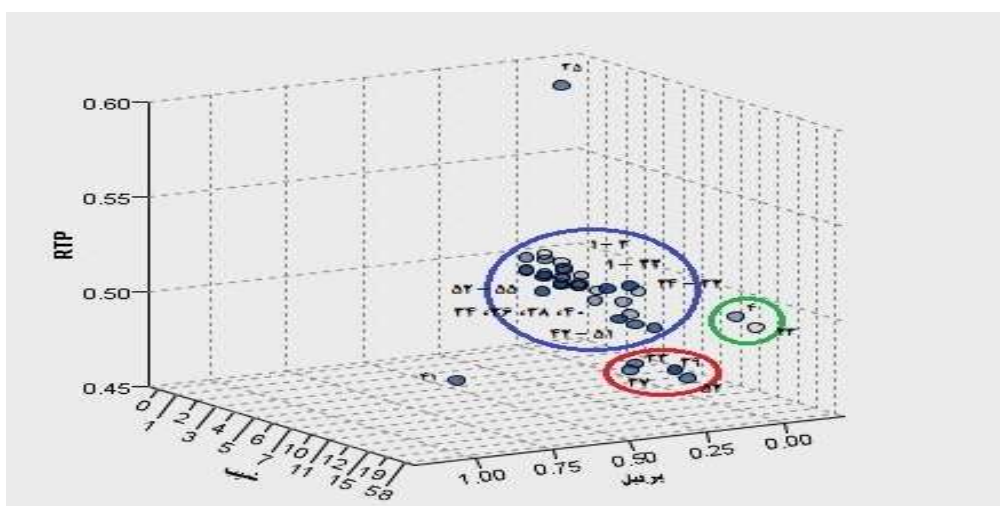
جدول ۲: مقادیر کمی شاخص‌های مورفومتریک فروچاله‌ها در منطقه مطالعاتی

میانگین شاخص RTP	حداکثر شاخص RTP	حداقل شاخص RTP	میانگین انحنای پلان	حداکثر انحنای پلان	حداقل انحنای پلان	میانگین انحنای پروفیل	حداکثر انحنای پروفیل	حداقل انحنای پروفیل	میانگین شیب	حداکثر شیب	حداقل شیب	شاخص مورفومتري فروچاله‌ها
0.496	0.540	0.325	-0.004	0.018	-0.140	0.005	0.176	-0.009	1.7	14.9	0.014	۱
0.498	0.573	0.279	-0.001	0.011	-0.017	0.003	0.068	-0.003	2.4	17.9	0.010	۲
0.482	0.606	0.287	-0.005	0.195	-0.130	0.035	0.768	-0.089	4.8	32.4	0.064	۳
0.496	0.693	0.280	0.0682	1.28	-0.564	-0.001	1.06	-1.28	19.1	54.6	0.568	۴
0.487	0.568	0.334	-0.009	0.004	-0.034	0.012	0.057	-0.004	1.9	3.3	0.054	۵
0.502	0.612	0.379	-0.009	0.009	-0.026	0.002	0.050	-0.025	1.0	2.1	0.065	۶
0.501	0.709	0.303	-0.009	0.036	-0.041	0.011	0.112	-0.025	1.9	7.5	0.023	۷
0.491	0.505	0.368	-0.017	-0.005	-0.067	0.018	0.077	0.001	2.9	9.8	0.072	۸
0.493	0.533	0.338	-0.010	0.040	-0.062	0.015	0.126	-0.054	3.2	7.2	0.124	۹
0.492	0.511	0.335	-0.019	-0.004	-0.047	0.017	0.052	0.001	4.10	7.5	0.135	۱۰
0.490	0.604	0.282	-0.005	0.043	-0.028	0.0137	0.043	-0.004	2.4	7.9	0.057	۱۱
0.493	0.510	0.318	-0.006	0.003	-0.029	0.007	0.041	0.001	1.7	3.9	0.042	۱۲
0.496	0.529	0.307	-0.006	0.012	-0.030	0.007	0.036	-0.006	4.3	8.7	0.045	۱۳
0.497	0.562	0.318	-0.006	0.029	-0.056	0.009	0.084	-0.013	5.6	19.0	0.039	۱۴
0.496	0.614	0.310	-0.005	0.029	-0.054	0.010	0.086	-0.041	3.4	9.4	0.037	۱۵
0.492	0.530	0.353	-0.013	0.006	-0.056	0.019	0.110	-0.023	3.3	13.3	0.074	۱۶
0.497	0.522	0.390	-0.011	0.034	-0.069	0.008	0.141	-0.010	3.1	12.6	0.024	۱۷
0.486	0.608	0.278	-0.005	0.264	-0.247	0.036	0.560	-0.287	5.7	26.1	0.099	۱۸
0.491	0.540	0.352	-0.001	-3.36	-0.002	0.001	0.003	6.32	0.284	0.72	0.004	۱۹
0.496	0.668	0.333	-0.001	0.006	-0.053	0.021	3.36	-2.2	1.5	51.1	0.007	۲۰
0.497	0.674	0.333	-0.002	0.008	-0.128	0.118	15.1	-8.19	7.3	226.4	0.216	۲۱
0.492	0.526	0.366	-0.003	0.003	-0.018	0.003	0.025	-0.000	0.856	1.6	0.006	۲۲
0.498	0.660	0.346	-0.006	0.000	-0.019	-0.000	5.17	-5.08	15.1	71.4	2.1	۲۳
0.487	0.639	0.252	-0.006	0.064	-0.094	0.024	0.105	-0.08	4.2	14.2	0.024	۲۴
0.490	0.563	0.282	-0.001	0.018	-0.021	0.005	0.057	-0.007	0.944	5.1	0.013	۲۵
0.499	0.660	0.326	-0.001	0.017	-0.030	0.000	0.007	-0.031	1.2	2.9	0.009	۲۶
0.497	0.612	0.275	-0.002	0.012	-0.020	0.002	0.025	-0.005	1.2	4.5	0.025	۲۷
0.497	0.6	0.4	-0.000	0.000	-0.001	0.000	0.001	-0.000	0.25	0.50	0.002	۲۸
0.492	0.717	0.244	0.005	0.097	-0.040	0.005	0.151	-0.157	2.0	6.9	0.009	۲۹
0.491	0.591	0.314	0.000	0.044	-0.014	0.013	0.054	-0.001	2.6	13.4	0.009	۳۰
0.489	0.782	0.253	-0.003	0.358	-0.164	0.024	0.829	-0.511	2.7	40.7	0.022	۳۱
0.477	0.659	0.334	-0.057	0.111	-0.289	0.181	0.739	-0.492	12.4	36.7	0.758	۳۲
0.468	0.674	0.269	-0.021	0.843	-0.622	0.221	1.81	-0.77	10.7	79.5	0.426	۳۳
0.496	0.745	0.312	-0.018	0.024	-0.041	0.007	0.053	-0.156	2.0	4.3	0.133	۳۴
0.590	0.783	0.326	0.003	0.066	-0.120	-0.050	0.165	-0.224	1.2	3.1	0.087	۳۵
0.474	0.702	0.248	0.001	0.931	-1.345	0.220	1.44	-1.02	23.2	86.8	0.351	۳۶
0.467	0.687	0.246	-0.003	1.35	-0.541	0.141	1.30	-0.58	9.6	55.6	0.240	۳۷
0.451	0.517	0.317	0.026	0.473	-0.503	0.507	1.36	-3.01	33.7	67.7	1.30	۳۸
0.457	0.616	0.270	-0.057	1.56	-0.388	-0.029	0.649	-4.56	9.5	38.3	0.307	۳۹
0.373	0.581	0.261	-0.578	1.41	-2.242	3.4	6.02	-2.16	80.7	219.2	7.40	۴۰
0.490	0.636	0.342	-0.291	1.14	-2.712	1.03	4.38	-1.56	58.3	90.5	13.6	۴۱
0.484	0.817	0.242	-0.050	0.173	-0.410	0.079	0.499	-0.314	7.3	17.3	0.200	۴۲
0.485	0.778	0.239	0.007	0.775	-0.82	0.080	2.176	-1.052	9.7	67.5	0.031	۴۳
0.490	0.692	0.36	-0.000	0.000	-0.001	0.000	0.002	-0.000	0.228	0.769	0.001	۴۴
0.496	0.542	0.298	-0.002	0.021	-0.036	0.003	0.042	-0.005	1.55	6.42	0.005	۴۵
0.490	0.571	0.352	-0.001	0.005	-0.008	0.003	0.017	-0.003	0.536	2.27	0.004	۴۶
0.482	0.560	0.335	-0.001	0.044	-0.016	0.010	0.060	0.000	1.2	6.28	0.018	۴۷
0.484	0.568	0.341	-0.005	0.476	-0.25	0.069	0.621	-0.280	5.9	37.2	0.062	۴۸
0.501	0.632	0.368	0.026	1.16	-0.357	0.036	1.33	-1.27	5.9	59.0	0.221	۴۹
0.478	0.538	0.289	-0.017	0.042	-0.065	0.056	0.157	-0.008	3.9	12.3	0.142	۵۰
0.496	0.752	0.291	-0.040	0.096	-0.396	0.047	1.33	-0.259	4.9	29.3	0.137	۵۱
0.470	0.636	0.293	0.045	0.587	-0.220	0.137	0.804	-0.407	11.7	42.6	0.134	۵۲
0.489	0.514	0.343	-0.012	-0.004	-0.020	0.012	0.026	0.001	1.7	3.61	0.061	۵۳
0.499	0.729	0.323	0.000	0.559	-0.178	0.011	0.456	-0.56	6.3	24.8	0.305	۵۴
0.475	0.676	0.259	-0.004	0.39	-0.432	0.159	2.03	-0.496	18.8	48.7	0.331	۵۵

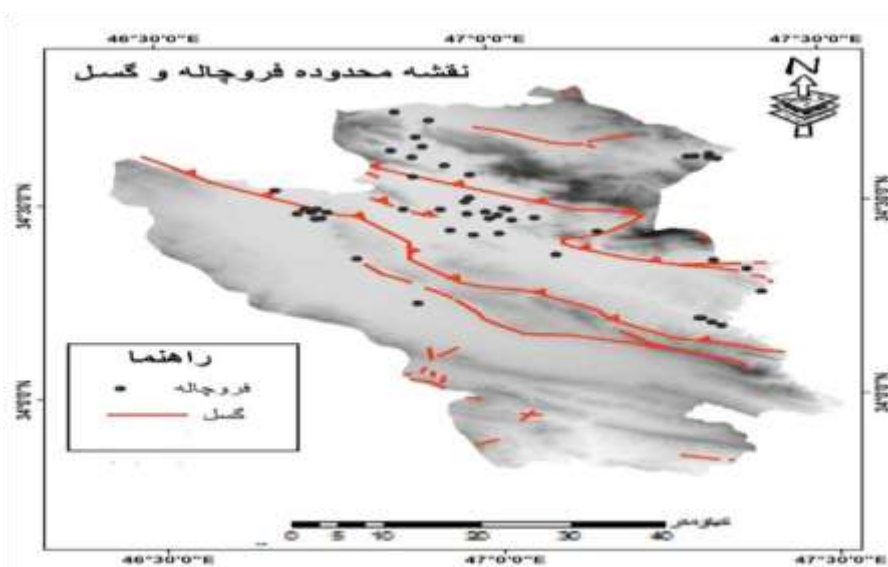


## خوشه‌بندی پارامترهای مورفومتریک فروچاله‌ها

منظور از خوشه بندی، یافتن ساختار در مجموعه‌ای از داده‌ها می‌باشد که طبقه‌بندی نشده است، این روش داده‌ها را در گروه‌هایی قرار می‌دهد که اعضای آن گروه از زاویه خاصی به یکدیگر شباهت دارند و با اعضای خوشه‌های دیگر هیچ شباهتی ندارند یا نسبت به اعضای خوشه دیگر کمترین شباهت را داشته باشند لذا از طریق تجزیه و تحلیل خوشه‌ای داده‌ها یا مشاهدات به دسته‌های همگن و متمایز از هم تقسیم‌بندی می‌شوند. در این روش فروچاله‌ها بر اساس شباهت به یکدیگر و فاصله نزدیکی آن‌ها به هم در یک گروه قرار می‌گیرند، نتایج تحلیل بدین صورت است خروجی (شکل ۶) نشان داده شده که ۸۸ درصد فروچاله‌های ما در خوشه اصلی و عامل شکل‌گیری آن‌ها گسل (تکتونیک) و منطبق بر پارامترهای شیب، انحنای پلان و پروفیل می‌باشد و از نظر ژنز و فرم کلی ویژگی‌های مورفومتریک شبیه به هم می‌باشند.



شکل ۶: خوشه‌های اصلی فروچاله‌ها



شکل شماره ۷: نقشه موقعیت فروچاله‌ها و گسل‌های دشت کرمانشاه

### نتیجه‌گیری

یکی از مشخصه‌های اصلی کارست در دشت کرمانشاه فروچاله‌ها هستند تعداد ۵۵ فروچاله از طریق DEM10 متر، بازدید میدانی و نقشه‌های رقومی منطقه شناسایی شدند. پارامترهای مورفومتریکی فروچاله‌ها شامل انحنا، پلان، انحنا، پروفیل و شاخص شیب اندازه‌گیری شد.

تراکم فروچاله‌ها نشان از تغییرات بزرگ است که نشان دهنده‌ی تغییرات در سیستم درزو شکاف، میزان بارش، دما، شیب و انحلال در منطقه می‌باشد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که تعداد فروچاله‌ها در مناطق گسلی و ارتفاع بالا ۲۲۰۰ متر گسترش بیشتری را دارد. شیب توپوگرافی از دیگر عوامل تاثیر گذار در توسعه کارست سطحی در دشت کرمانشاه می‌باشد و شیب زیاد یک عامل محدود کننده در شکل‌گیری فروچاله‌ها می‌باشد. هرچه شیب کمتر باشد شرایط توسعه فروچاله‌ها بهتر خواهد بود و بیشترین فروچاله‌ها در فاصله شیب ۵ تا ۱۰ درجه می‌باشد لذا از شیب ۱۰ درجه به بالا تعداد فروچاله‌ها کاهش می‌یابد و در شیب بالاتر از ۲۰ درجه فروچاله‌ای مشاهده نشده است.

نتایج شاخص‌های مورفومتریکی نشان می‌دهد که مهمترین عامل شکل‌گیری فروچاله‌ها به ترتیب گسل، ارتفاع و شیب می‌باشند و ۸۸ درصد از فروچاله‌ها در فاصله کمتر از ۵۰۰ متر از گسل‌ها شکل گرفته‌اند که با افزایش فاصله از گسل تعداد آنها کاهش می‌یابد، جهت غالب کشیدگی محور اصلی فروچاله‌ها شمال غربی جنوب شرقی است که با جهت غالب شمال غربی جنوب شرقی و شمال شرقی جنوب غربی گسل‌ها هماهنگ است که بیانگر نقش مؤثر عامل زمین ساخت در شکل‌گیری فروچاله‌ها می‌باشد. نتایج تحقیق در منطقه با توجه به مطالعات قبلی که در زمینه‌های مختلف کارست و شکل‌گیری فروچاله‌ها در منطقه صورت گرفته نشان می‌دهد در زمینه مورفومتری عمومی فروچاله‌ها روش‌های Curvature و RTP کارایی لازم را در استخراج طبقات اصلی ژئومورفومتری منطقه دشت کرمانشاه را داشته و کلاس‌های اصلی را با استفاده از مدل رقومی ارتفاع استخراج کرده است. اما این روش‌ها در ارائه خصوصیات خاص و استخراج سایر لندفرم‌های کارستی نیازمند به توسعه و بهبود کارایی است. بنابراین، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده، دیگر شاخص‌های مورفومتریکی مانند شاخص موقعیت توپوگرافی TPI و شاخص WOOD در زمینه شناسایی تشخیص و طبقه‌بندی انواع فروچاله‌ها و همچنین استفاده از شاخص‌هایی رگرسیونی و لگاریتمی برای محاسبه بعد فراکتال گسل‌ها در گسترش فروچاله‌ها به کار گرفته شود.

### منابع

- پاریزی، ا.، زمان زاده، م.، امینی، م.، (۱۳۹۷)، مدل‌سازی مولفه‌های مورفومتری دولین‌ها و ارائه شاخص بعد فراکتال در مطالعه گسل‌های مناطق کارستی (مطالعه موردی، مناطق کارستی بین پراو و شاهو)، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال ششم، شماره ۴، بهار ۱۳۹۷
- ثروتی، م.، رستمی، م.، (۱۳۹۲)، شناخت عوامل مؤثر بر پراکنش و رخداد فروچاله‌ها در منطقه گازورخانی کرمانشاه با استفاده از رگرسیون لجستیک، فصل‌نامه جغرافیا و توسعه، سال دوازدهم، شماره ۳۶ پاییز ۱۳۹۳.
- حنفی، ع.، (۱۳۹۷)، اقلیم شناسی نظامی غرب ایران (غرب - شمال غرب)، تهران، انتشارات دانشگاه فرماندهی و ستاد ارتش جمهوری اسلامی ایران (دافوس)، چاپ اول.
- جعفر بیگلر، م.، مقیمی، ا.، صفری، ف.، (۱۳۹۰)، استفاده از DEM در تحلیل مورفوتکتونیک فروچاله‌های کارستی توده پراو - بیستون، مجله جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، شماره ۲۲، زمستان ۱۳۹۰.

- صفاری، ا.، قنواتی، ع.، علیجانی، ف.، محمدی، ز.، (۱۳۹۵)، مروری بر خصوصیات لندفرم های کارستی در لایه های گچی، پژوهش های ژئومورفولوژی کمی، سال چهارم، شماره چهار، بهار ۱۳۹۵.
- کریمی وردجانی، ح.، (۱۳۹۴)، هیدروژئولوژی کارست، چاپ اول، انتشارات ارم شیراز.
- یمانی، م.، شمسی پور، ع.، جعفری اقدم، م.، باقری سید شکری، س.، (۱۳۹۰)، بررسی عوامل مؤثر در توسعه یافتگی و پهنه بندی کارست حوضه چله با استفاده از منطق فازی و *AHP*، مجله علوم زمین، شماره ۸۸.
- علایی طالقانی، م.، (۱۳۸۲)، ژئومورفولوژی ایران، چاپ دوم، تهران نشر قومس.
- قربانی، م.، محمودی، ف.، یمانی، م.، مقیمی، ا.، (۱۳۸۹)، نقش تغییرات اقلیمی کوآترنر در تحول ژئومورفولوژیکی فروچاله های کارستی (مطالعه موردی ناهمواریهای شاهو کرمانشاه)، فصلنامه پژوهش های جغرافیایی، جلد ۷۴.
- کرم، ا.، ضیائیان، پ.، محصل همدانی، ن.، (۱۳۹۱)، عوامل مؤثر در وقوع فرو چاله های دشت ابرکوه و تهیه نقشه ی خطر نواحی مستعد بروز آن (پایان نامه کارشناسی ارشد دانشگاه خوارزمی تهران).
- *Argentieri, A., Carluccio, R., Cecchini, F., Chiappini, M., Ciotoli, G., De Ritis, R., Margottini, S., 2015. Early stage sinkhole formation in the Acque Albule basin of central Italy from geophysical and geochemical observation. Engineering Geology, 191, PP36-47*
- *Bishop, MP., AndShroder, JF., (2000), Remote sensing and geomorphometric assessment of topographic complexity and erosion dynamics in the Nanga Parbat massif. Geological Society London, Special Publication, 170:181-199*
- *Basso, A., Bruno, E., Parise, M. & Pepe, M., 2012. Morphometric analysis of sinkhole in a karst coastal area of southern Apulia (Italy). Environmental Earth Sciences, 70(6), PP1-16.*
- *Ezersky, M. & FRUMKIN, A., 2013. Fault- Dissolution Front relations and the DEAD Sea sinkhole problem. Geomorphology, 201, PP35-40.*
- *Ennes-Silva, R.A., Bezerra, F.H.R., Nogueira, F.C.C., Balsamo, F., Klimchouk, A., Cazarin, C.L. & Auler, A.S., 2015. Superposed folding and associated fracturing influence hypogene karst development in Neoproterozoic carbonates, Sao Francisco Craton Brazil. Tectonophysics. 5, pp1-62*
- *Feng, T., Chen, H., Polyakov, V.O., Wang, K., Zhang, X. & Zhang, W., 2016. Soil erosion rates in two karst peak-cluster depression basins of northwest Guangxi, China: Comparison of the RUSLE model with <sup>137</sup>Cs measurements. Geomorphology, 253, PP217-224.*
- *Ford, D. & Williams, P.D., 2013. Karst hydrogeology and geomorphology. London.*
- *Fang -Jiao Zh., Li-Dong Zh., Jin-Cui Y., Xiang, c., (2014), Sinkhole attack detection based on redundancy mechanism in wireless sensor networks.*
- *Ventura, SJ., And Irvin, BJ., (2008), Automated landform classification methods for soil landscape studies, In: D.J*
- *Kovacic, G., & Ravbar, N., 2013. Analysis of human induced changes in a karst landscape - the filling of dolines in the karst plateau Slovenia. Science of the Total Environment, 447, pp143-151*
- *Lace, M. J. & Mylroie, J.E., 2013. Coastal karst landforms. London.*
- *Ozdemir, A., 2015. Investigation of sinkholes spatial distribution using the weights of evidence method and GIS in the vicinity of karapinar, Turkey. Geomorphology, 245, pp40-50*

- 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, pp245-254.
- Theilen-Willige, B., Malek, H.A., Charif, A., El Bchari, F. & Chaibi, M., 2014. Remote Sensing and GIS Contribution to the Investigation of Karst Landscapes in NW-Morocco. *Geosciences*, 4(2), pp50-72.
- Dolores, M., fidelibus, f., Giuseppe, s., (2013), Human-induced hydrogeological changes and sinkhole in the coastal gypsum karst of lesina marina area (foglia province, Italy *Engineering Geology* 118-119.
- Intriri, E.S., Nielsen, D., M. & Quinlan, J, F (2015), Application of dye – tracing techniques for determine solute transport characteristics of Groundwater in karst terrains
- Perrin, J., Cartannaz, C., Noury, G. & Vanoudheusden, E., 2015. A multicriteria approach to karst subsidence hazard mapping supported by weights-of-evidence analysis. *Engineering Geology*, 197, pp296-305.