



## ارزیابی توسعه‌یافتگی آبخوان‌های کارستی در ارتباط با ژئومورفولوژی دولین‌ها و ویژگی‌های هیدرودینامیکی (مطالعه‌ی موردی: توده‌ی کارستی شاهو)

عبدالکریم ویسی<sup>۱</sup>، ابراهیم مقیمی\*<sup>۲</sup>، مهران مقصودی<sup>۳</sup>، مجتبی یمانی<sup>۴</sup>، سیدموسی حسینی<sup>۵</sup>  
وصول مقاله: ۱۳۹۷/۱۰/۱۸ تأیید نهایی مقاله: ۱۳۹۸/۰۴/۱۱

### چکیده

توده‌ی کارستی شاهو واقع در زاگرس مرتفع، دارای اشکال کارستی در مقیاس‌های مختلف است. بررسی و تحلیل لندفرم‌های کارستی در ارتباط با ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی آبخوان‌ها اطلاعات جامعی را در زمینه‌ی مدیریت این مناطق ارائه می‌دهد. در این پژوهش ابتدا با استفاده از روش منحنی‌های بسته دولین‌های منطقه‌ی مورد مطالعه شناسایی شد. در ادامه‌ی ویژگی‌های مورفومتریک از جمله مساحت، عمق، شیب، محور کوچک و بزرگ دولین و شاخص‌های نسبت کشیدگی، نسبت D/H و شاخص سینوسیته برای هریک از دولین‌ها محاسبه شد. ویژگی‌های هیدرودینامیکی و عوامل مؤثر در آبخوان‌های روانسر و هولی با استفاده از توابع همبستگی خودکار و چگالی طیفی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که بیش از ۹۰ درصد دولین‌های منطقه را دولین‌های کشیده دربر می‌گیرد که دارای منشأ انحلالی هستند. تعدد دولین‌های کشیده، تراکم نسبتاً بالا و منشأ انحلالی این اشکال در منطقه‌ی مورد مطالعه نشان‌دهنده‌ی توسعه‌یافته بودن ژئومورفولوژی کارست شاهو است. ارزیابی ویژگی‌های هیدرودینامیکی آبخوان‌های مورد مطالعه نشان داد که سیستم کارستی در این آبخوان‌ها توسعه‌یافته است به گونه‌ای که دارای رفتار هیدرودینامیکی چندگانه و اینرسی کم می‌باشند؛ و همچنین معادله‌ی منحنی هیدروگراف در آبخوان‌های مورد مطالعه چندگانگی رفتار سیستم کارستی را نشان داده و نتایج حاصل از بررسی ژئومورفولوژی کارست و توابع سری زمانی را تأیید می‌کند. در نهایت می‌توان گفت که توسعه‌ی ژئومورفولوژی کارست سطحی و وجود دولین‌ها، عامل اصلی رفتار هیدرودینامیکی چندگانه در آبخوان‌های روانسر و هولی است.

کلمات کلیدی: ژئومورفولوژی کارست، دولین، آبخوان کارستی، شاهو.

۱- دانشجوی مقطع دکتری ژئومورفولوژی دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۲- استاد ژئومورفولوژی دانشگاه تهران، تهران، ایران (نوسنده مسئول).

۳- دانشیار ژئومورفولوژی دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۴- استاد ژئومورفولوژی دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۵- دانشیار ژئومورفولوژی دانشگاه تهران، تهران، ایران.

## مقدمه

کارست در ارتباط با یک چشم‌انداز خاص است که لندفرم‌ها را در زیر و سطح زمین دربرمی‌گیرد. ایجاد یک طرح برای طبقه‌بندی جامع لندفرم‌های کارستی بسیار دشوار است، چرا که آن‌ها به طور قابل توجهی در ویژگی‌های مورفومتریکی و منشأ خود متفاوت هستند (ترنتین و ربینا، ۲۰۱۶: ۵۷).

گلدشایر<sup>۲</sup> (۲۰۰۴: ۸۴) فروچاله‌ها و چشمه‌های کارستی را قابل اطمینان‌ترین شاخص جهت وجود آبخوان‌های کارستی می‌داند. یکی از راه‌های مطالعه لندفرم‌های کارستی بررسی لندفرم‌های منفرد از قبیل کارن، دولین، پولیه، تپه‌شاهدها و دره‌ها است (فورد و ویلیامز<sup>۳</sup>، ۲۰۰۷: ۴۲۰). سیویچیچ<sup>۴</sup> (۱۹۸۳: ۲۵) اصطلاح آبخوان کارستی دربرگیرنده نواحی کارستی در سنگ‌های کربناته است که توسعه کم یا زیاد کارست را به ترتیب در آبخوان، جریان افشان یا جریان مجرای ایجاد می‌کند (آتکینسون<sup>۵</sup>، ۱۹۹۷: ۹۸). جریان آب زیرزمینی در آبخوان‌های کارستی متفاوت از جریان آب در محیط‌های متخلخل است (لاروسکوئه و همکاران<sup>۶</sup>، ۱۹۹۸: ۲۱۶). علاوه بر این بسته به میزان توسعه‌ی کارست و نوع جریان میزان ناهمگنی در هدایت هیدرولیکی آبخوان‌های کارستی متفاوت است (مانجین<sup>۷</sup>، ۱۹۸۴: ۳۰) ملاحظات هیدرودینامیکی، هیدروشیمیایی و ویژگی‌های ایزوتوپی در خروجی سیستم‌های کارستی، وابسته به شرایط جریان غالبی است که بر آبخوان حاکم است. در حقیقت شناخت تنوع فضایی - زمانی دبی چشمه در سیستم‌های کارستی، منجر به شناخت فرایندهای هیدرولوژیکی ساختار آبخوان نسبت

۱- Trentin & Robaina  
۲- Goldscheider & Drew  
۳- Ford and Willams  
۴- Cvijic  
۵- Atkinson  
۶- Larocque et al.,  
۷- Mangine

به آلاینده‌ها می‌شود. آنالیز سری‌های زمانی با استفاده از روش تک‌متغیره، مشخص‌کننده‌ی ساختار ویژه و منحصر بفرد هیدروگراف است (گلدشایر و درنو<sup>۱</sup>، ۲۰۰۴: ۹۳).

اهمیت تحلیل‌های مورفومتری در کارست در دهه‌های گذشته به ویژه در کارهای ویلیامز<sup>۲</sup> (۱۹۷۱، ۱۹۷۲) و دریک و فورد<sup>۳</sup> (۱۹۷۲) به خوبی مشخص شده است. دولین‌ها نخستین اشکال کارستی بودند که موضوع تحلیل مورفومتری قرار گرفتند (سائورو<sup>۴</sup>، ۲۰۰۵: ۱۱۱). بسته به منشأ ایجاد فروچاله‌ها، محدوده و نوع ویژگی‌های مورفومتری آن‌ها خیلی متفاوت است. بنابراین شناسایی نوع فروچاله‌ها در هر تحلیلی دارای اهمیت اساسی است. پارامترهای مورفومتری زیادی بسته به منشأ متفاوت دولین‌ها (باسو و همکاران<sup>۵</sup>، ۲۰۱۳: ۲۵۵۱) در مطالعات علمی کارست منتشر شده است، پارامترهایی که بیشترین اهمیت را برای تشریح فروچاله‌های کارستی در منطقه‌ی شاهو داشته‌اند انتخاب شدند (جدول ۱) و ارتباط این متغیرها با یکدیگر مورد بررسی قرار گرفته است. مطالعات بسیاری در ایران انجام گرفته است از جمله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: بررسی‌های کمی مربوط به دولین‌های منطقه تخت سلیمان (رضایی مقدم و همکار، ۱۳۸۸: ۱۱۳)، تحلیل مورفوتکتونیک فروچاله‌های کارستی منطقه‌ی پراو (جعفربیگلو و همکاران، ۱۳۹۰: ۱)، بررسی عوامل مؤثر در تشکیل فروچاله‌های کارستی در منطقه‌ی گازورخانی (ثروتی و همکاران، ۱۳۹۳: ۱۸۱)، روش‌های تحقیق در هیدروژئولوژی کارست (قدیمی و همکاران، ۲۰۰۵: ۱۳۹۴)، تأثیر هیدروژئومورفولوژی آبخوان دشت نورآباد ممسنی بر آب زیرزمینی منطقه (نگارش و همکاران، ۱۳۹۵: ۵۵). مانجین<sup>۶</sup> (۱۹۸۴) برای نخستین بار سری‌های زمانی را برای آنالیز عملکرد آبخوان‌های کارستی به کار

۱- Goldscheider & Drew

۲- Williams

۳- Drake & Ford

۴- Sauro

۵- Basso et al.,

۶- Mangine

گرفت. در سال‌های بعد محققان بسیاری از روش تحلیل سری زمانی برای ارزیابی عملکرد آبخوان‌های کارستی استفاده کردند (آنجلینی<sup>۱</sup>، ۱۹۹۷؛ کووچیچ<sup>۲</sup>، ۲۰۰۹؛ لی و همکاران<sup>۳</sup>، ۲۰۰۲؛ پادیللا و پولیدابوش<sup>۴</sup>، ۱۹۹۵؛ رهنمایی و همکاران، ۲۰۰۵). فروچاله‌های کارستی در منطقه‌ی شاهو نقش بسیار مهمی در سیستم هیدرولوژیکی این منطقه دارند و تغذیه‌ی متمرکز از طریق آن‌ها صورت می‌گیرد آبخوان‌های کارستی شاهو منبع اصلی تأمین آب شرب و کشاورزی شهرهای پاره، جوانرود و روانسر می‌باشند. از این رو با توجه به نقش مهم آبخوان‌های کارستی در تأمین آب جوامع محلی در استان کرمانشاه، شناخت ویژگی‌های هیدرودینامیکی آن‌ها برای مدیریت بهینه از نظر کمی و کیفی، نقش مهمی را در زمینه‌ی سیاستگذاری منابع آب استان دارد. در این مطالعه ما به شناسایی فروچاله‌ها و تعیین حدود آن‌ها در سطوح کارستی شاهو با استفاده از روش CCL<sup>۵</sup> پرداخته‌ایم. پیچیدگی هر چشم‌انداز کارستی از جمله منحصرفرد بودن و نداشتن یک الگوی زهکشی سطحی واحد، انجام تحلیل‌های مورفومتری این اشکال را با مشکل روبرو می‌کند. با این حال تحلیل‌های مورفومتریک لندفرم‌های کارستی ممکن است نتایجی را در پی داشته باشد که به طور مشخصی برای شناسایی روابط بین فاکتورهای مختلفی که به طور غیرمستقیم بر این اشکال تأثیر می‌گذارند، مفید است و همچنین مقایسه مقادیر پارامترهای اندازه‌گیری شده نتایج غیرقابل انتظاری را به دست دهد و منجر به ایجاد نظریات جدید شود. شناسایی فروچاله‌ها و نحوه پراکندگی آن‌ها به همراه تجزیه و تحلیل مورفومتری این اشکال در منطقه‌ی مورد مطالعه می‌تواند در مباحث مربوط به چگونگی شکل‌گیری، ویژگی‌های مورفولوژیکی و ارزیابی مخاطرات محیطی

۱- Angelini

۲- Kovačič

۳- Lee et al.,

۴- Padilla & Pulida-Bosch

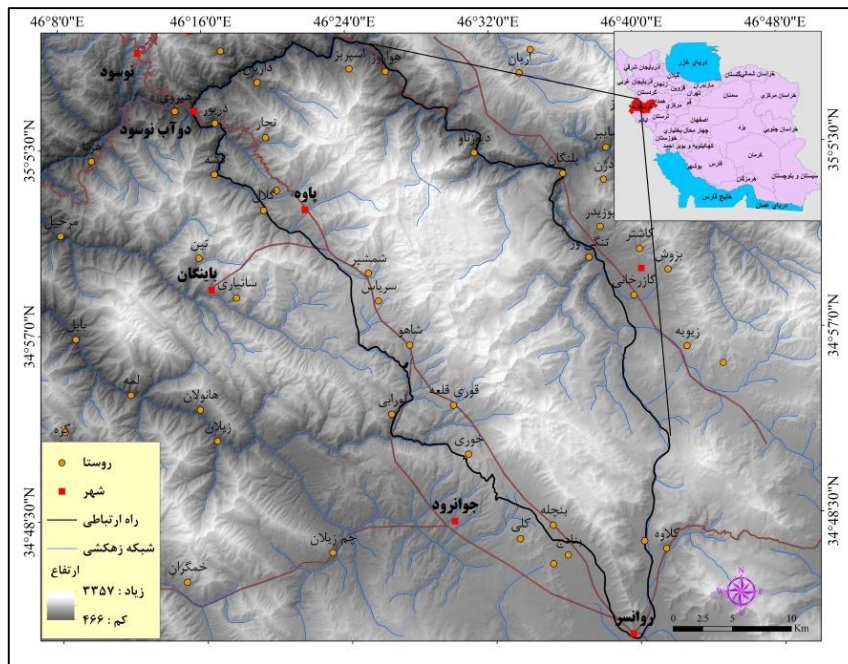
۵- Closed contour lines

مورد استفاده قرار گیرد و داده‌های قابل استفاده‌ای برای برنامه‌ریزی‌های محیطی فراهم سازد.

#### – منطقه‌ی مورد مطالعه

منطقه‌ی کارستی شاهو در زاگرس رورانده واقع شده است. بخش عمده‌ی این منطقه شامل یک توده کوهستانی آهکی با ضخامت زیاد است. اسکلت اصلی ناهمواری شاهو متشکل از آهک‌های ضخیم بیستون است که سن آهک‌های آن به کرتاسه برمی‌گردد و با روند شمال غربی - جنوب شرقی در فاصله‌ی میان استان‌های کردستان و کرمانشاه قرار گرفته است (شکل ۱). آهک‌های ضخیم بیستون با ضخامت تقریبی ۳۰۰۰ متر رسوبات به شدت چین‌خورده‌ای هستند که تکوین آن از تریاس بالایی تا کرتاسه میانی - پایانی به طول انجامیده است (آگارد و همکاران<sup>۱</sup>، ۲۰۰۵: ۴۰۲).

۱- Agard et al.,



شکل (۱) موقعیت منطقه‌ی مورد مطالعه

شهرهای پاوه، جوانرود و روانسر در دامنه جنوبی این ناهمواری قرار گرفته‌اند. محدود  
مورد مطالعه بین عرض‌های  $34^{\circ} 47' 42''$  تا  $35^{\circ} 07' 05''$  و طول شرقی  $46^{\circ} 23' 29''$   
تا  $46^{\circ} 40' 50''$  قرار گرفته‌اند.

### مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر مبتنی بر روش‌های کتابخانه‌ای، میدانی است و از نوع تحقیقات توسعه‌ای-  
کاربردی می‌باشد. از روش‌های CCL، شاخص‌های کشیدگی، شاخص سینوسیته، نسبت  
D/H، تحلیل نزدیک‌ترین همسایه به منظور تجزیه و تحلیل ویژگی‌های دولین‌های  
منطقه و روش‌های تحلیل سری‌های زمانی: همبستگی خودکار و چگالی طیفی در  
راستای بررسی ویژگی‌های هیدرودینامیکی آبخوان‌های منطقه‌ی مورد مطالعه است. در

این پژوهش از داده‌های دبی و بارش ایستگاه‌های هیدرومتری و باران‌سنجی وزارت نیرو در بازه‌ی زمانی ۱۳۸۴-۱۳۹۵ استفاده شده است. از آنجایی که تحول لندفرم‌های کارستی عمدتاً به وسیله فرایند انحلال که در سطح و زیرزمین عمل می‌کند صورت می‌پذیرد (میلروی<sup>۱</sup>، ۱۹۹۵). در سال‌های اخیر تکنیک‌های GIS برای تحلیل مورفومتری محیط‌های کارستی به کار گرفته شده‌اند (دنیزمن<sup>۲</sup>، ۲۰۰۳: ۲۹). فروچاله‌های شناسایی شده در منطقه‌ی کارستی شاهو با استفاده از این روش از تحلیل مدل رقومی ارتفاعی ۱۰ متر به دست آمده است. فعالیت‌های میدانی گسترده به منظور چک کردن اشکال شناسایی شده صورت گرفته است. یک جدول توصیفی شامل موقعیت، زمین‌شناسی و ویژگی‌های مورفومتری برای هر فروچاله محاسبه شد (جدول ۱). برای مطالعه‌ی فروچاله‌ها از شاخص کشیدگی استفاده شده است که نسبت بین قطر بزرگ و قطر کوچک دولین است. هنگامی که این شاخص برابر یا نزدیک به ۱ است شکل دولین مدور است، افزایش مقدار این شاخص منجر به ایجاد اشکال نیمه‌بیضوی و بیضوی ( $1,65 < R < 1,21$ ) و اشکال کشیده ( $R > 1,8$ ) می‌شود. همچنین با استفاده از روش CCL و از طریق منحنی‌های میزان دولین‌های منطقه‌ی مورد مطالعه شناسایی شد.

دورترین (خارجی‌ترین) منحنی بسته به عنوان مرز یک لندفرم مجزا مورد استفاده قرار گرفت. از این رو یک لندفرم خاص به وسیله‌ی مجموعه‌ای از منحنی‌های بسته فروچاله در دورترین CCL نشان داده می‌شود. پس از آن نوع لندفرم منفرد با مطالعه CCL بیرونی و تغییرات ارتفاعی بین این دو تعیین شد. هر دسته CCL با یک گره خاص به یک گراف مدور تبدیل شد که نشان‌دهنده‌ی یک CCL خاص است. خارجی‌ترین CCL به وسیله یک گره اصلی نشان داده می‌شود. یک گره برگی برای نشان دادن CCL درونی استفاده شده است که هیچ CCL دیگری را در برنمی‌گیرد اما خود حداقل به وسیله یک CCL محدود شده است. اگر یک CCL حداقل دو CCL دیگر را با ارتفاع

۱- Mylroie

۲- Denizman

یکسان دربرگیرد، به عنوان یک شاخه از گراف مدور تعریف شده است. همه CCLهای دیگر در خارجی‌ترین CCL به وسیله گره‌های میانی نشان داده است (لیانگ و همکاران<sup>۱</sup>، ۲۰۱۴:۲۰۷۳). با توجه به این موضوع لندفرم‌های منفرد می‌توانند با استفاده از سناریوی فوق تشریح گردند. در گام بعدی ویژگی‌های مورفومتریکی دولین‌ها در قالب یک پایگاه داده برداشت شد (جدول ۱). در ادامه داده‌های به دست آمده به وسیله روش‌های آماری در نرم‌افزار Minitab مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. همچنین از ویژگی‌هایی مانند: تراکم، مساحت، قطر، عمق، شیب و فاصله از گسل دولین‌ها اندازه‌گیری شده، سپس با استفاده از نرم‌افزار Minitab روی داده‌های به دست آمده تحلیل‌های آماری انجام گرفته است. همچنین از تحلیل نزدیکترین همسایه برای بررسی الگوی توزیع دولین‌های منطقه‌ی مورد مطالعه استفاده شد. از آنالیز منحنی فروکش هیدروگراف برای ارزیابی نوع سیستم جریان در آبخوان‌های کارستی مورد مطالعه استفاده شده است. در نهایت، با ارزیابی نتایج به دست آمده از تحلیل سری‌های زمانی، نتایج حاصل از آنالیز منحنی فروکش هیدروگراف و نیز مدنظر قراردادن ویژگی‌های ژئومورفولوژی کارست در منطقه شاهو، رفتار هیدرودینامیکی در آبخوان‌های مورد مطالعه مشخص شد. در این میان برای تحلیل سری‌های زمانی از نرم‌افزار Minitab16 استفاده شد.

جدول (۱) ویژگی‌های مورفومتریکی برخی از دولین‌های شناسایی شد در منطقه‌ی شاهو

ردیف	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
نوع	بیضی	کشیده	کشیده	بیضی	کشیده	کشیده	کشیده	کشیده
قطر بزرگ (سانتی متر)	۴۳۱	۱۰۳۲	۲۱۳	۴۲۸	۶۷۲	۶۱۸	۲۰۱	۲۹۵
قطر کوچک (سانتی متر)	۳۳۳	۴۲۶	۱۰۸	۳۲۵	۱۷۹	۲۹۳	۱۰۰	۱۰۹
مساحت (کیلومتر مربع)	۰/۰۶	۰/۳۶	۰/۰۲	۰/۱۱	۰/۰۹	۰/۱۳	۰/۰۱	۰/۰۲
عمق (متر)	۶	۳۴	۴	۲	۱۴	۱۵	۴	۴
میانگین شیب (متر)	۶/۸	۲۰	۹	۱۰/۹	۷/۸	۱۴/۸	۱۰/۲	۹/۲



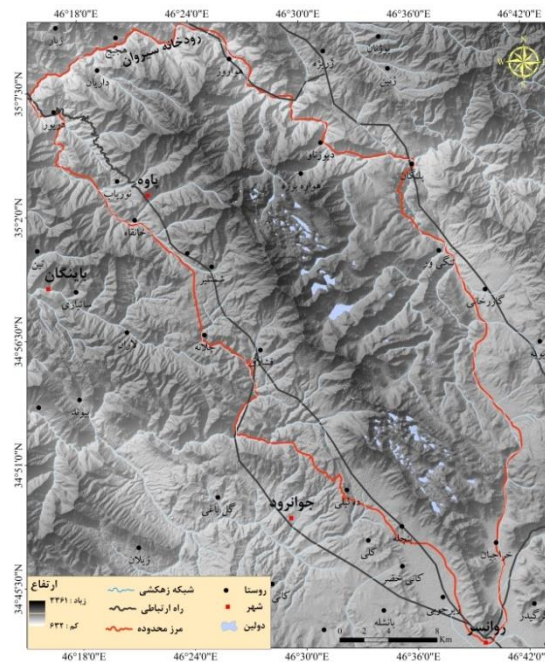
۱۰۹ ارزیابی توسعه‌یافتگی آبخوان‌های کارستی در ارتباط با ژئومورفولوژی دولین‌ها و ویژگی‌های...  
 عبدالکریم ویسی، ابراهیم مقیمی، مهران مقصودی، مجتبی یمانی، سیدموسی حسینی

شاخص کشیدگی	۱/۲۹	۲/۴۲	۱/۹۷	۱/۳۲	۳/۷۵	۲/۱۱	۲/۰۱	۲/۷۱
شاخص D/H	۴/۶	۱۴	۲	۱/۵	۳/۷	۷/۱	۲	۱/۵
شاخص سینوسیته	۰/۱۳	۰/۷۲	۰/۰۳	۰/۲۲	۰/۱۹	۰/۲۵	۰/۰۳	۰/۰۴
فاصله از گسل (متر)	۳۱۸	۲۱۶	۱۸۰	۵۲۱	۱۰۸	۶۶۳	۲۸۷	۶۴۶

### یافته‌های پژوهش

#### – مورفومتری دولین‌های کارستی

بر مبنای روش CCL در منطقه‌ی مورد مطالعه ۱۰۴ دولین شناسایی شد (شکل ۳). این دولین‌ها مساحتی در حدود ۱۱ کیلومتر مربع را در برمی‌گیرند. فروچاله‌های محدوده مورد مطالعه عمدتاً در قسمت مرکزی و شمال غربی منطقه‌ی مورد مطالعه تشکیل شده‌اند (شکل ۳). به لحاظ ویژگی‌های مورفومتری، تفاوت‌های زیادی را نشان می‌دهند، به طوری که بزرگ‌ترین فروچاله منطقه، در بخش مرکزی منطقه با مساحتی برابر با ۱/۴۱ کیلومتر مربع و کوچک‌ترین آن‌ها در بخش شمال غربی منطقه مساحتی در حدود ۱۵۳۵ مترمربع را دارا می‌باشد. دامنه‌ی تغییر در مساحت این دولین‌ها زیاد ( $R=0.49$ ) است و واریانس آن‌ها نیز رقمی بیش از ۰/۴ را نشان می‌دهد که در خور توجه است. اکثریت فروچاله‌های بررسی شده در منطقه‌ی شاهو دارای عمق میانگین ۱۵ متر است. مورفومتری فروچاله‌ها عموماً تمایل به اشکال بیضوی یا کشیده دارند.

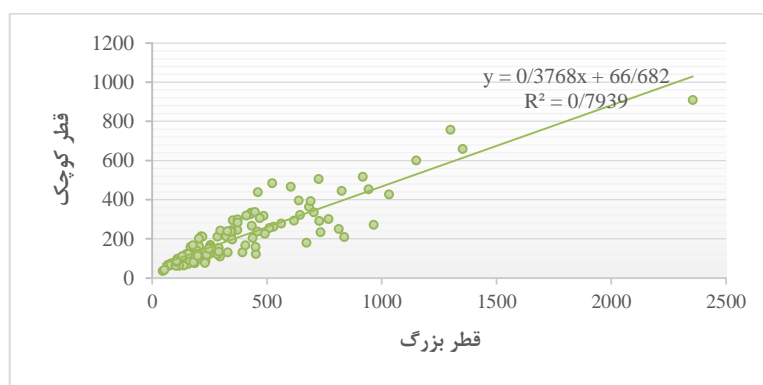


شکل (۲) موقعیت فروچاله‌های شناسایی شده در توده‌ی کارستی شاهو

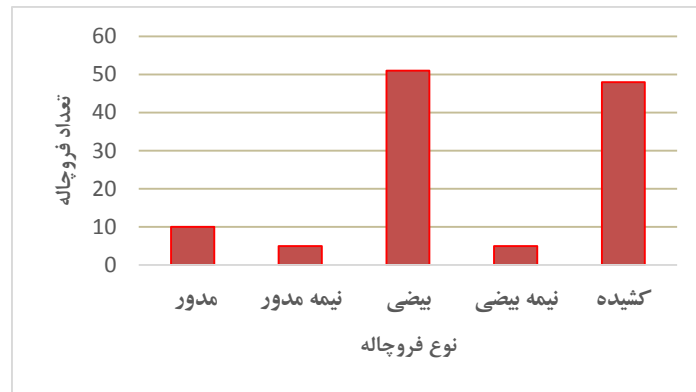
فروچاله‌های بیضوی شکل عمدتاً بزرگ هستند و فروچاله‌های تکامل‌یافته را تشکیل می‌دهند. علاوه بر این فروچاله‌های خوشه‌ای منطقه شاهو عمدتاً دارای یک رشد ترجیحی در جهت شکست‌های تکتونیکی است که گمان می‌رود با فروریزش و فروافتادن قطعات سنگی از حاشیه این اشکال که باعث شده است که این اشکال دارای شکل بیضوی و کشیده شوند. بیشترین فراوانی مساحت دولین‌ها در محدوده‌ی ۲۰۰۰-۱۰۰۰ مترمربع است. که در مقایسه با برخی از مطالعات صوت گرفته از جمله (برونو و همکاران<sup>۱</sup>، ۲۰۰۸: ۱۹۸) در جنوب‌غربی ایتالیا بزرگ‌تر می‌باشند.

۱- Bruno et al

شکل (۳) ارتباط بین دو قطر فروچاله‌های منطقه‌ی مورد مطالعه را نشان می‌دهد. ضریب تعیین برابر با ۰/۷۹ است و بیانگر این است که همبستگی غیرخطی بین دو محور فروچاله‌ها وجود دارد. چندین دلیل برای توضیح این وضعیت می‌توان متصور شد. نخست وجود عناصر تکتونیکی تأثیرگذار می‌تواند باعث ایجاد آنومالی در نسبت قطر بزرگ به قطر کوچک شود. ثانیاً فروریزش قطعات سنگی و بخش‌های از حاشیه فروچاله‌ها می‌تواند باعث تغییر این نسبت شود. با توجه به شکل (۴) فروچاله‌ها، در منطقه‌ی شاهو فروچاله‌های بیضوی اشکال غالب هستند. این نشان‌دهنده‌ی نقش قابل توجه توده سنگ در تکامل فروچاله‌ها است. فروچاله‌های نیمه‌مدور کمترین نوع فروچاله‌ها در منطقه‌ی مورد مطالعه هستند. این نوع از فروچاله‌ها بیانگر اشکال اولیه فروچاله‌ها هستند و در مرحله‌ی جوانی قرار دارند.

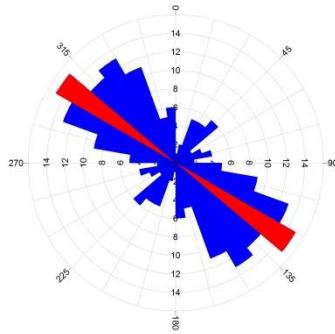


شکل (۳) ارتباط بین محور کوچک و بزرگ فروچاله‌ها

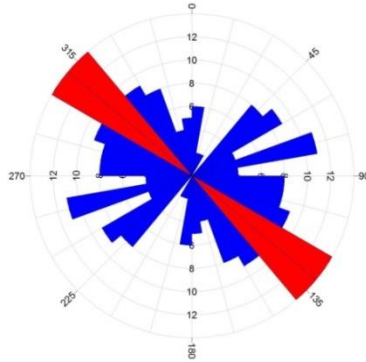


شکل (۴) نمودار اشکال فروچاله‌ها در منطقه‌ی شاهو

بسیاری از محققان بر نقش ساختارهای تکتونیکی در توزیع و تحول اشکال دولین در مناطق مختلف کارستی تأکید داشته‌اند و نتایج تحقیقات آن‌ها بر تأثیرپذیری دولین‌ها از ویژگی‌های تکتونیکی منطقه دلالت دارد (دنیزمن، ۲۰۰۳، فلورا، ۲۰۰۵). تعداد فروچاله‌ها در ارتباط با فاصله از گسل‌ها نشان می‌دهد که دورترین فروچاله از گسل در فاصله‌ی ۳۴۰۰ متری قرار گرفته است. این در حالی است که بیش از ۶۰ درصد دولین‌ها در فاصله‌ی ۰ تا ۵۰۰ متری از گسل‌های منطقه قرار گرفته‌اند. به منظور بررسی دقیق‌تر ارتباط بین درز و شکاف‌ها با فروچاله‌ها در منطقه مورد مطالعه یک تحلیل سه مرحله‌ای انجام گرفته است: (۱) اندازه‌گیری درز و شکاف‌های منطقه‌ی مورد مطالعه، (۲) اندازه‌گیری آزمون محور طویل فروچاله و (۳) مقایسه‌ی این دو مجموعه با استفاده از نمودار رزیدیاگرام آن‌ها. تحلیل توزیع فروچاله‌ها در منطقه‌ی شاهو نشان می‌دهد که آنها دو جهت اصلی را دنبال می‌کنند (شکل ۵). نخست جهت شمال غربی-جنوب شرقی است و در وهله‌ی دوم جهت شمال شرقی-جنوب غربی را دنبال می‌کنند. توزیع شکستگی‌های منطقه‌ی مورد مطالعه نیز همین دو جهت اصلی را نشان می‌دهد (شکل ۶). این حقیقت منعکس کننده‌ی ارتباط قوی بین درز و شکاف‌ها و محور طولی فروچاله‌ها است.



شکل (۵) رزداگرام دولین‌های منطقه‌ی مورد مطالعه

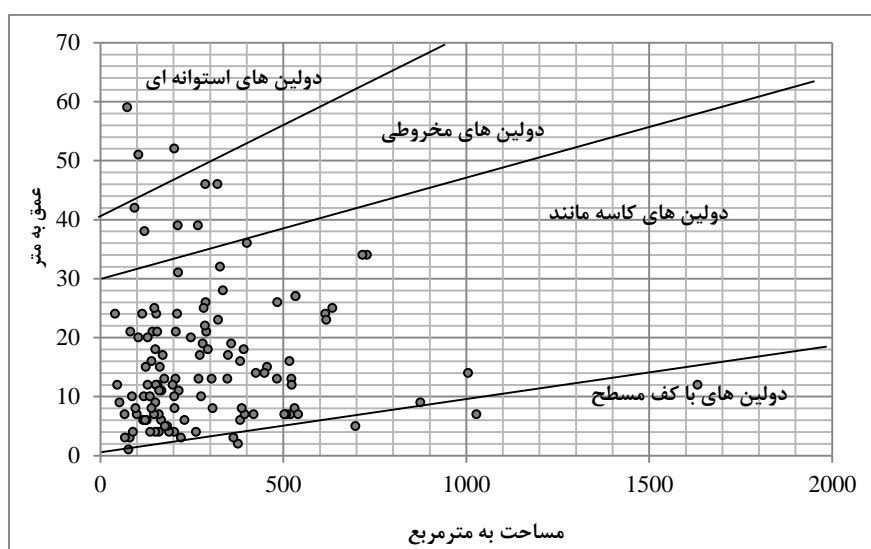


شکل (۶) رزداگرام گسل‌های منطقه‌ی مورد مطالعه

امروزه مشخص شده است که لندفرم‌های کارستی از هر دو نوع اپیژن و هیپوژن هستند که کم و بیش به وسیله ساختارهای زمین‌شناسی کنترل می‌شوند (پاریسه<sup>۱</sup>، ۲۰۱۴: ۳۹۵). به منظور تعیین تاریخچه نسبی عناصر اپیژن یک پارامتر شکل برای بخشی از اشکال تعریف شده است که نسبت بین میانگین قطر و عمق دولین‌ها است (شکل ۷). بزرگ‌ترین آن‌ها قدیمی‌ترین آن‌ها است. این پارامتر تمایز قابل توجهی در مورفولوژی و اندازه دولین‌ها در ساختارهای با مورفواستراکچر متفاوت فراهم می‌آورد. در

۱- Parise

منطقه شاهو که به لحاظ زمین‌شناختی یک توده‌ی آهکی تقریباً یکسان است و عمدتاً از سنگ آهک بیستون تشکیل شده است تنوع مورفولوژیکی دولین‌ها می‌تواند به میزان تحول اشکال دولین برگردد. دولین‌های دارای کف مسطح نسبت به دیگر اشکال دولین زمان زیادتری را در معرض فرایندهای محیطی بوده‌اند و به تکامل رسیده‌اند. کمترین تعداد دولین‌ها مربوط به دولین‌های استوانه‌ای و ریزشی هستند که مکان‌های تجمع برف و یخ نیز محسوب می‌شوند.

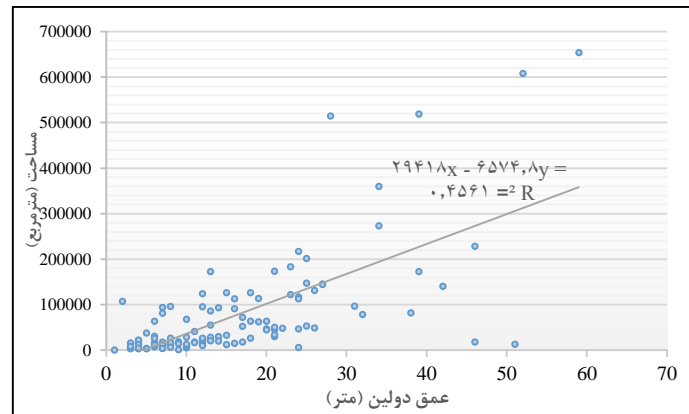


شکل (۷) رابطه بین مساحت و عمق دولین‌ها

از آنجایی که دولین‌ها در اثر تجزیه و فرسایش سنگ‌های کربناته به وجود می‌آیند، از این رو هرچه سطح چاله‌های انحلال یافته بیشتر باشد، بیانگر شدت فرسایش و مهیا بودن شرایط برای فرایند انحلال می‌باشد. بزرگ‌ترین دولین منطقه از نظر وسعت، در قسمت شمالی کوهستان شاهو قرار گرفته است که دارای شکل کشیده بوده و مساحتی در حدود ۱/۴۱ کیلومترمربع را دربرمی‌گیرد. کوچک‌ترین آن‌ها در قسمت شمال غربی

منطقه قرار گرفته است و دارای مساحتی در حدود ۱۵۳۵ مترمربع است. دامنه‌ی تغییرات مساحت دولین‌ها بسیار زیاد می‌باشد. بیشترین انحراف استاندارد در بین پارامترهای بررسی شده مربوط به مساحت بوده که این مسئله به اختلاف بسیار زیاد آن‌ها از لحاظ مساحت اشاره می‌کند (جدول ۱). این مسئله می‌تواند با تفاوت سنی دولین‌ها در ارتباط باشد. دولین‌های کم وسعت جوان بوده و مدت زیادی از سن آن‌ها نمی‌گذرد.

این دولین‌ها هنوز مراحل رشد و تحول را سپری نکرده‌اند. مساحت دولین رابطه‌ی نزدیکی با جمع‌آوری و انتقال آب به عمق زمین دارد. بزرگ‌ترین دولین منطقه مساحت زیادی دارد و می‌تواند بیشتر از یک دولین کوچک، قله یک کوه و یا یک زمین مسطح حاصل از بارش را در خود جمع‌آوری کرده و با تمرکز و نفوذ آن‌ها به عمق زمین به افزایش سطح آب‌های زیرزمینی کمک کند. نسبت مساحت به عمق نشان می‌دهد که عمیق‌شدن فروچاله‌ها در پایه‌ی آن‌ها با گسترش حاشیه آن‌ها (محیط) و متعاقباً افزایش مساحت آن همراه است که منشأ فروچاله را به ما نشان می‌دهد. از این رو نسبت مساحت به عمق بازتاب‌کننده‌ی منشأ فروچاله‌ها است به شرح زیر است. در مقایسه با فروچاله‌های انحلالی عمیق‌شدن فروچاله‌های ریزشی ارتباط مستقیمی با افزایش پهنای آن ندارد. برخی نویسندگان دریافته‌اند که مورفومتری دولین‌های ریزشی بوسیله اشکال استوانه‌ای شکل و دیواره‌های پرشیب مشخص می‌شود (کارامانا و همکاران<sup>۱</sup>، ۲۰۰۸: ۱۴۵). از این رو در دولین‌های ریزشی عمق آن نمی‌تواند به عنوان تابعی از مساحت در نظر گرفته شود. نتایج یک ارتباط نسبتاً قوی را بین این دو پارامتر نشان می‌دهد که حاکی از منشأ انحلالی بودن فروچاله‌های منطقه‌ی مورد مطالعه است (شکل ۸).



شکل (۸) ارتباط بین مساحت و عمق دولین‌ها در منطقه‌ی مورد مطالعه



شکل (۹) نمونه‌ای از دولین‌های کارستی در منطقه‌ی پیاز دول

### – ویژگی‌های هیدرودینامیکی آبخوان‌ها

توده‌ی کارستی شاهو از جمله پهنه‌های کارستی فاقد پوشش خاک است و این بیانگر خودزا بودن تغذیه در آبخوان‌های این منطقه است. از این رو می‌توان انتظار داشت



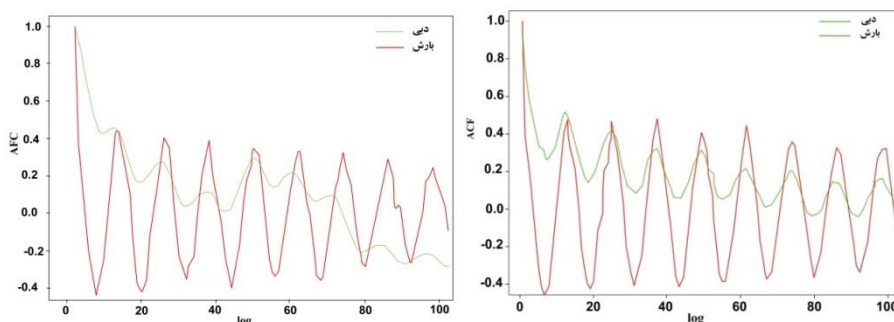
که ۸۰ درصد بارش در این مناطق نفوذ کند (گلدشایر و درنو، ۲۰۰۴). در منطقه‌ی مورد مطالعه‌ی تغذیه به دو صورت متمرکز (از طریق فروچاله‌ها) و منتشر (از طریق درز و شکاف‌ها و کارن‌ها) صورت می‌گیرد. ویژگی‌های هیدرولوژیکی چشمه‌ها در دوره‌ی آماري ۱۳۸۶-۱۳۸۷ و ۱۳۸۵-۱۳۸۶ نشان می‌دهد که حد اکثر دبی چشمه‌های روانسر و هولی در اردیبهشت ماه و حداقل دبی آن‌ها در شهریور ماه اتفاق می‌افتد. ضریب تغییرات دبی در چشمه روانسر ۳/۲۸ و در چشمه‌ی هولی برابر با ۴ است. نتایج آنالیز منحنی فروکش هیدرگراف چشمه‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد که هر دو چشمه دارای دو زیررژیم خطی و یک زیررژیم آشفته بوده و میزان توسعه کارست آن‌ها ۵/۵ می‌باشد. این معادله بیانگر تخلیه‌ی جریان سریع از آشفته از طریق مجراهای کارستی و جریان پایه از طریق در و شکاف و ماتریکس است.

#### - همبستگی خودکار

توزیع فضایی و زمانی بارش و نسبت بین نفوذ متمرکز و منتشر بر شکل هیدروگراف و در نهایت در کرولوگرام تأثیر چشمگیری دارد. در نتیجه شکل کرولوگرام به میزان توسعه‌ی سیستم کارستی مرتبط است (ایسنلور و همکاران<sup>۱</sup>، ۱۹۹۷) کرولوگرام چشمه‌ی روانسر دارای سه بخش مجزا است. در بخش اول آن شاهد کاهش جریان به سرعت و در عرض ۱۰ روز می‌باشیم که این امر معرف جریان سریع در مجراهای کارستی این آبخوان است. در بخش دوم نوسان در محدوده‌ی بالای ۲ است و حاکی از جریان نیمه سریع در شکستگی‌های بزرگ است. بخش سوم نیز نوسان عمدتاً در محدوده‌ی بین ۲ و ۲- است و دارای شکل تقریباً یکنواختی است که حاکی از وجود جریان پایه در آبخوان و اینرسی پایین و ذخیره‌ی دینامیکی کم در آبخوان است (شکل ۱۰). کرولوگرام چشمه‌ی هولی نیز شرایط تقریباً مشابهی را نشان می‌دهد و از سه بخش مجزا و غیریکسان همانند چشمه‌ی روانسر تشکیل شده است. براین اساس آبخوان‌های مورد مطالعه رفتار

۱- Eisenlohr et al.,

آبخوان‌های کارستی توسعه یافته را نشان می‌دهند. به گونه‌ای که تابع همبستگی خودکار نشان می‌دهد این آبخوان‌ها دارای چندگانگی در سیستم کارستی خود هستند. این چندگانگی در سیستم کارستی بیانگر این است که فیلترینگ آبخوان روی ورودی اثر کمی دارد و در ادامه باعث واکنش سریع به بارش و تخلیه حجم زیادی از ورودی در دوره‌ی کوتاه مدت و کم‌شدن حجم ذخیره دینامیکی آبخوان‌ها می‌شود (شکل ۱۰).



شکل (۱۰) کروئوگرام چشمه روانسر (بالا) و چشمه هولی (پایین)

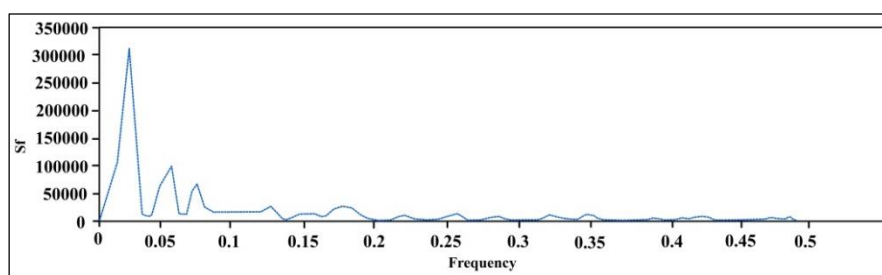
#### - چگالی طیفی

آنالیز چگالی طیفی ابزاری برای نشان دادن دوره تناوب در سری‌های زمانی است (باکس و جنکینز، ۱۹۷۶). این تابع با مقایسه سری زمانی دبی و بارش اثرات نگهداشت سیستم کارست را نشان می‌دهد (فلورا و ویچر، ۲۰۰۶). تابع چگالی طیفی هر دو چشمه‌ی مورد مطالعه ارائه دهنده یک باند طیفی گسترده در فرکانس‌های کمتر از ۱۷. (چشمه‌ی روانسر) و کمتر از ۱۵. (چشمه‌ی هولی) بوده است. چشمه‌ی روانسر در فرکانس‌های بالاتر از ۱۷. به یک اثر فیلترینگ خوب می‌رسد و این مقدار برای چشمه‌ی هولی فرکانس بالاتر از ۱۵. است (شکل ۱۲). در واقع پیک‌های مجزا در فرکانس‌های

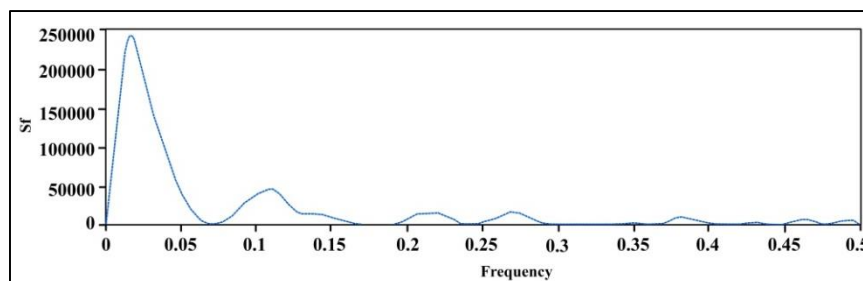
۱- Box & Jenkins

۲- Florea & Vacher

مختلف در یک سری زمانی منجر به شناسایی رخداد‌های دوره‌ای و در نتیجه شناخت ویژگی‌های سیستم کارستی می‌شود. تابع چگالی طیفی بیانگر اینرسی کم آبخوان‌های مورد مطالعه، فیلترینگ ضعیف، وجود جریان سریع و توسعه‌ی شبکه‌ی مجراهای کارستی در این آبخوان است (شکل ۱۱).



شکل (۱۱) تابع چگالی طیفی چشمه روانسر



شکل (۱۲) تابع چگالی طیفی چشمه هولی

### نتیجه‌گیری

این پژوهش به شناسایی و تحلیل مورفومتریکی دولین‌ها به منظور ارزیابی میزان توسعه‌یافتگی کارست سطحی و همچنین تجزیه و تحلیل ویژگی‌های هیدرودینامیکی آبخوان‌های روانسر و هولی در ارتباط با توسعه‌یافتگی ژئومورفولوژی کارست در منطقه شاهو پرداخته است. نتایج نشان می‌دهد که بخش‌های نسبتاً وسیعی از منطقه‌ی کارستی شاهو به وسیله‌ی دولین‌ها پوشیده شده است. ویژگی‌های شکلی دولین‌ها به

شناخت منشأ دولین‌ها کمک می‌کند. بیش از ۹۰ درصد دولین‌های منطقه را دولین‌های کشیده دربرمی‌گیرد که دارای منشأ انحلالی می‌باشند. تراکم بالای دولین در این منطقه حاکی از توسعه‌یافته بودن این سیستم کارستی است. تفاوت در ویژگی‌های مورفومتریکی دولین‌ها بیانگر این است که نوع دولین‌ها از نظر منشأ شکل‌گیری، شرایط و زمان شکل‌گیری با هم تفاوت دارند. دولین‌های کشیده که بیشترین نوع دولین‌های منطقه را شامل می‌شوند از نوع دولین‌های انحلالی است. کشیده بودن دولین‌ها بیانگر این است که این نوع دولین‌ها زمان بیشتری را در معرض فرایندهای محیطی بوده‌اند. دولین‌هایی که مساحت بیشتری دارند، در زمان قدیمی‌تری نسبت به دولین‌های دیگر شکل گرفته است. دولین‌های کوچک‌تر یا سن کمتری دارند و یا عوامل فرسایشی آنچنان فعال نبوده که بتواند آن‌ها را گسترش دهد. مساحت بالای دولین‌ها نقش زیادی در جمع‌آوری آب حاصل از بارش و نفوذ آن‌ها به عمق زمین دارند.

تجزیه و تحلیل ویژگی‌های هیدرودینامیکی چشمه‌های روانس و هولی نیز بیانگر توسعه‌یافتگی سیستم کارستی شاهو است. تحلیل فرود هیدروگراف چشمه‌های مورد مطالعه حاکی از درجه کارستی‌شدن زیاد و وجود جریان سریع و وجود مجاری کارستی در منطقه شاهو است. تابع همبستگی خودکار چشمه‌ها تأییدکننده‌ی چندگانگی رفتار سیستم کارستی، واکنش سریع به بارش و حجم کم ذخیره‌ی دینامیکی آبخوان است. کرولوگرام چشمه‌ها در زمان اولیه پرشیب بوده و در مدت ۱۰ روز کاهش می‌یابد که معرف جریان سریع در مجراها است. بخش سوم کرولوگرام چشمه‌ها تقریباً شکل یکنواخت دارد. این امر ناشی از وجود جریان پایه در آبخوان و اینرسی پایین و ذخیره‌ی دینامیکی کم در آبخوان‌های منطقه‌ی مورد مطالعه است. تابع چگالی هردو چشمه یک اوج بزرگ در فرکانس ۰.۰۳/ را نشان می‌دهد که بیانگر چرخه‌ی تغذیه‌ی سالانه آبخوان‌ها است. این تابع در هر دو چشمه‌ی مورد مطالعه نشان‌دهنده‌ی باند طیفی وسیع و واریانس‌های قابل توجه در فرکانس‌های کمتر از ۰.۳/ بوده و حاکی از اینرسی کم،

فیلترینگ ضعیف، غلبه جریان سریع و توسعه‌یافتگی شبکه‌ی مجراهای کارستی است، وجود فرم‌های توسعه‌یافته کارستی، تعدد دولین‌های کشیده، تراکم بالای آن‌ها، وجود درزه‌ها و شکاف‌های فراوان در توده‌ی آهکی، وجود مجاری کارستی وسیع در منطقه شاهو نشان‌دهنده‌ی توسعه‌یافتگی سیستم کارستی در این منطقه است که با بررسی‌های هیدرودینامیکی نیز این امر مورد تأیید قرار می‌گیرد.

## References

- Agard, P., Omrani, J., Jolivet, L., and Mouthereau, F., (2005), **Convergence history across Zagros (Iran): constraints from collisional and earlier deformation**, International journal of earth sciences, Vol. 94, No.3, PP. 401-419.
- Angelini, P., (1997), **Correlation and Spectral Analysis of Two Hydrogeological Systems in Central Italy**, Hydrology, Vol. 42, No. 3, PP. 425-438.
- Atkinson, T., (1977), **Diffuse flow and conduit flow in limestone terrain in the Mendip Hills, Somerset (Great Britain)**, Journal of hydrology, Vol.35, No.1-2, PP.93-110.
- Basso, A., Bruno, E., Parise, M., and PePe, M., (2013), **Morphometric analysis of sinkholes in a karst coastal area of southern Apulia (Italy)**, Environmental Earth Sciences, Vol.70, No.6, PP.2545-2559.
- Box, G.E.P., and Jenkins, G.M., (1976), **Time series analysis: Forecasting and control**, revised edition, San Francisco, John Wiley & Sons.
- Bruno, E., Calcaterra D., and Parise, M., (2008), **Development and morphometry of sinkholes in coastal plains of Apulia, southern Italy**, Preliminary sinkhole susceptibility assessment. Eng Geol, PP.198–209.
- Caramanna, G., Ciotoli, G., and Nisio, S., (2008), **A review of natural sinkhole phenomena in Italian plain areas**, Nat. Hazards, Vol 45, PP. 145–172.
- Denizman, C.,(2003), **Morphometric and Spatial Distribution Parameters of Karstic Depressions, Lower Suwannee River Basin, Florida**, Journal of Cave and Karst Studies, Vol. 65, No.1, PP.29-35.
- Drake, J.J., and Ford, D.C.,(1972), **The analysis of growth patterns of two generation populations: the example of karst sinkholes**, Can Geogr No.16, PP.381–384.
- Eisenlohr, L., Bouzelboudjen, M., Kiraly, L., and Rossier, Y., (1997), **Numerical Versus Statistical Modelling of Natural Response of a Karst Hydrogeological System**, Hydrology, Vol.202, No. 1-4, PP. 244-262.

- Florea, J., and Vacher, H., (2006), **Springflow hydrographs: eogenetic vs. telogenetic karst**, Groundwater Journal, Vol 44, No. 3, 352-361.
- Florea, L.,(2005), **Using state-wide GIS data to identify the coincidence between sinkholes and geologic structur**, Journal of Cave Karst Studies.Vol 67, No.2, PP.120–124.
- Ford, D.C., and Williams, P.W., (2007), **Karst Geomorphology and Hydrology**, Unwin Hyman: London, UK.
- Ghadimi, M., Moqimi, E., and Malekian, A., (2015), **Methods in karst hydrology**, Tehran Press, Tehran.
- Goldscheider, N., Drew, D., (2004), **Methods in Karst Hydrogeology**, Taylor & Francis,
- Jafarbeiglu, M., Moqimi, E., and Safari, F., (2011), **Application of digital elevation model in morphometric analysis of karstic sinkhole in Parav-Biseton**, Journal of geography and environmental planning, Vol. 22. PP. 1-18.
- Kovačič, G., (2009), **Hydrogeological Study of the Malenščica Karst Spring (SW Slovenia) by Means of a Time Series Analysis**, Acta Carsologica, Vol, 39, No. 2, PP. 201–215.
- Larocque, M., Mangin, A., Razack, M., and Banton, O., (1998), **Contribution of correlation and spectral analyses to the regional study of a large karst aquifer (Charente, France)**. Journal of Hydrology, Vol. 205, No. (3-4), PP. 217-231.
- Lee, JY., and Lee, KK., (2002), **Use of Hydrologic Time Series Data for Identification of Recharge Mechanism in a Fractured Bedrock Aquifer System**, Hydrology, Vol. 229, No.3-4, PP.190–201.
- Liang, F., Yunyan, DU.,Yong, GU., and CeA, LI., (2014), **quantitative morphometric comparison of cockpit and doline karst landforms**, Journal of Geographical Sciences, Vol 24, No. 6, PP.1069-1082.
- Mangin, A., (1984), **Pour Une Meilleure Connaissance des Systèmes Hydrologiques à Partirndes Analyses Corrélatiore et Spectral**, Journal of Hydrology, Vol, 67, No. 1-4, PP. 25-43.

- Myroie, John E., (1995), **Karst Lands**, American Scientist. Vol 83, No.5, PP. 450-459.
- Negaresh, H., Shafiee, N., Doraninejhad, M., (2016), **Effects of hydrogeomorphology of Nourabad mamasani plain on groundwater by using of Gis**, Journal of Hydrogeomorphology, Vol.2, No.6, PP 55-73.
- Padilla A., and Pulida-Bosch, A., (1995), **Study of Hydrographs of Karstic Aquifers by Means of Correlation and Cross-spectral Analysis**, Hydrology, Vol. 168, No.1-4, PP.73-89.
- Parise, M., (2014), **No limits, no boundaries: a view of karst as the typical transboundary environment**, Trebinje – Dubrovnik (Bosnia & Herzegovina – Croatia), Vol.42, No.13, PP.392-397.
- Rahnemaei, M., Zare, M., and Nematollahi, A.R., (2005), **Application of Spectral Analysis of Daily Water Level and Spring Discharge Hydrographs Data for Comparing Physical Characteristics of Karstic Aquifers**, Hydrology, Vol. 311, No. 1, PP.106-116.
- Rezaemoghadam, M.H., and Qadri, M.R., (2009), **Quantitive analysis of doline in Karst lands in Taxt-e Soleiman**, Journal of geography and Planing, Tabriz University, Vol.3, PP.113-135.
- Sauro, U., (2005), **Closed depressions**, Encyclopedia of caves. Elsevier Academic Press, Amsterdam, PP.108-122.
- Servati, M.R., Rostami, M., Nosrati, K., and Ahmadi, M., (2013), **Recognition of effective factors on distribution of sinkholes in Gazourxani in Kermanshah by logistic regression**, Journal of jeography and development, Vol. 36, PP.181-194.
- Trentin, R., and Robaina, L.E., (2016), **Classification Of The Landform Units Supported By Geomorphometric Attributes**, Mercator, Vol. 15, No. 3, PP.53-66.
- Williams, PW., (1972), **Morphometric analysis of polygonal karst in New Guinea**. Geol Soc Amer Bull, 83, PP.761-796
- Williams, P.W., (1971), **Illustrating morphometric analysis of karst with examples from New Guinea**, Zeitschrift für Geomorphologie, Vol 15, PP.40-61.