

## ارزیابی ویژگی‌های هیدرودینامیکی آبخوان‌های کارستی با استفاده از آنالیز سری‌های زمانی (مطالعه موردی: آبخوان‌های کارستی گیلانغرب و خورین در استان کرمانشاه)

سجاد باقری سیدشکری\* - دانشجوی دکترای ژئومورفولوژی دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران

مجتبی یمانی - دانشیار ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران

منصور جعفری‌نگلو - استادیار ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران

حاجی کریمی - دانشیار هیدروژئولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام

ابراهیم مقیمی - استاد دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران

پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۰۶/۱۰      تأیید نهایی: ۱۳۹۲/۱۰/۲۵

### چکیده

آبخوان‌های کارستی از نظر توسعه کارست دارای ناهمگنی بالا و تنوع فضایی هستند و ژئومورفولوژی کارست با تعیین نوع و میزان تغذیه، واکنش آبخوان‌ها را در برابر بارش کنترل می‌کند. ارزیابی سری‌های زمانی ورودی و خروجی در سیستم‌های کارستی، اطلاعات جامعی را در زمینه رفتار هیدرودینامیکی آبخوان‌ها ارائه می‌دهد. هدف از این پژوهش ارزیابی و شناخت ویژگی‌های هیدرودینامیکی و عوامل مؤثر آن در آبخوان‌های گیلانغرب و خورین با استفاده از توابع خودهمبستگی و چگالی طیفی است. در پژوهش پیش رو، از داده‌های دبی و بارش ایستگاه‌های هیدرومتری و باران‌سنجی وزارت نیرو برای محاسبه تحلیل سری‌های زمانی تک‌متغیره و آنالیز منحنی فرود هیدروگراف استفاده شده است. نتایج نشان داد، سیستم کارستی آبخوان خورین نسبت به آبخوان گیلانغرب توسعه‌یافته‌تر است. آبخوان خورین دارای رفتار هیدرودینامیکی چندگانه و اینرسی کم است؛ درحالی‌که آبخوان گیلانغرب از رفتار هیدرودینامیکی به نسبت پایدار و اینرسی بالایی پیروی می‌کند. معادله منحنی فروکش در آبخوان خورین، چندگانگی رفتار سیستم کارستی را نشان داده و نتایج به دست آمده از توابع سری زمانی را تأیید می‌کند. اما معادله منحنی فروکش هیدروگراف در چشمه گیلانغرب، وجود جریان سریع در آبخوان را که توابع سری زمانی نشان داده، تأیید نمی‌کند. توسعه ژئومورفولوژی کارست سطحی و وجود فروچاله‌ها، عامل اصلی رفتار هیدرودینامیکی چندگانه در آبخوان خورین است. نبود فروچاله‌ها و توسعه کم ژئومورفولوژی کارست و ویژگی‌های فیزیوگرافی، همچون کشیدگی حوضه تغذیه‌کننده آبخوان گیلانغرب، سبب نوسان کم در رفتار هیدرودینامیکی آبخوان گیلانغرب شده است. در نهایت می‌توان گفت که توابع سری زمانی، کارکرد قبل قبولی در ارزیابی رفتار هیدرودینامیک آبخوان‌های کارستی دارند.

کلیدواژه‌ها: آبخوان‌های کارستی، ژئومورفولوژی کارست، سری زمانی، هیدرودینامیک.

## مقدمه

اصطلاح «آبخوان کارستی» دربرگیرنده نواحی کارستی در سنگ‌های کربناته است که توسعه کم یا زیاد کارست را به ترتیب در آبخوان با جریان افشان یا جریان مجرای ایجاد می‌کند (اتکینسون، ۱۹۷۷: ۹۴). جریان آب زیرزمینی در آبخوان‌های کارستی متفاوت از جریان آب در محیط‌های متخلخل است. دو نوع جریان، شامل ۱. جریان سریع در شبکه مجراها و ۲. جریان پایه در ماتریکس را می‌توان در آبخوان‌های کارستی شناسایی کرد. اکثر آبخوان‌های کارستی دارای هر دو نوع جریان هستند (لارکو، مانین، رازک و بنتون، ۱۹۹۸: ۲۱۷). ساختار سیستم‌های کارستی ناهمگن بوده و روابط بین اجزای آن پیچیده است (جیمکو و پتریچ، ۲۰۰۹: ۳۰۵).

مانجین (۱۹۸۵) میزان توسعه کارست را عامل ایجاد ناهمگنی هدایت هیدرولیکی در آبخوان‌های کارستی می‌داند. پادیدا و پیولیدا بوش (۱۹۹۵) مطالعات هیدروژئولوژیکی در سیستم‌های کارستی را به دلیل ناهمگنی و پیچیدگی‌های محیط‌های کارستی دشوار می‌دانند. روش‌هایی همچون آزمون پمپاژ و ردیابی برای شناخت ویژگی‌های آبخوان‌های کارستی مفید است، اما به دلیل مقیاس تحقیقاتی محدود، اطلاعات کافی را فراهم نمی‌کنند، یا به دلیل هزینه زیاد امکان استفاده گسترده از آنها وجود ندارد. انتخاب رویکرد مناسب در مطالعه آبخوان‌های کارستی به عوامل زیادی، مانند ویژگی‌های سیستم کارستی، نتایج مورد نظر، داده‌های موجود (جیمکو و پتریچ، ۲۰۰۹: ۳۰۴)، هدف و دقت پژوهش، منابع مالی، زمان و... مرتبط است. سری‌های زمانی دارای مزیت استفاده از داده‌های موجود ارزان و زمان‌بر کمتری هستند. داده‌های سری زمانی اطلاعات مفیدی در مورد الگوی زمانی، تنوع فرایندهای هیدرولوژیکی و ویژگی‌های پاسخ‌های فشاری در آبخوان کارستی ارائه می‌کنند (دیوفی و گلهار، ۱۹۸۶: ۱۱۱۷).

شناخت تنوع فضایی زمانی دبی چشمه در سیستم‌های کارستی، منجر به شناخت فرایندهای هیدرولوژیکی و ساختار آبخوان، مدیریت مصرف آب و ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان نسبت به آلاینده‌ها می‌شود (لیو، چن، خو و شو، ۲۰۱۱: ۱۵۷۸).

آنالیز سری‌های زمانی با استفاده از روش تک‌متغیره، مشخص‌کننده ساختار ویژه و منحصربه‌فرد هیدروگراف است (گلدشایر و درئو، ۲۰۰۴: ۲۰۷) و تغییرات چرخه‌ای را نشان می‌دهد. امروزه مسائل و مشکلات مرتبط با تأمین آب و مدیریت آن، در برنامه‌ریزی‌های عمرانی کشور مسئله مهمی است. منابع آب کارستی نقش حیاتی در شکل‌گیری و استمرار مدنیت در استان کرمانشاه داشته و مهم‌ترین منبع تأمین آب استان کرمانشاه به‌شمار می‌روند. آبخوان کارستی گیلانغرب با آبدهی ۲۷ میلیون مترمکعب در سال، منبع اصلی تأمین آب شرب و کشاورزی شهر گیلانغرب و روستاهای اطراف است. آبخوان کارستی خورین با آبدهی سالانه بیش از ۶ میلیون مترمکعب، تغذیه‌کننده تالاب منحصربه‌فرد هشیلان بوده و نقش حیاتی در حفظ این اکوسیستم نادر دارد. علاوه بر آن، جوامع محلی اطراف برای شرب و آبیاری از آب این آبخوان استفاده می‌کنند. بنابراین با توجه به نقش مهم آبخوان‌های کارستی در تأمین آب جوامع محلی اطراف خود در استان کرمانشاه، شناخت ویژگی‌های هیدرودینامیکی آنها برای مدیریت بهینه از نظر کمی و کیفی، نقش مهمی را در زمینه سیاستگذاری منابع آب استان دارد.

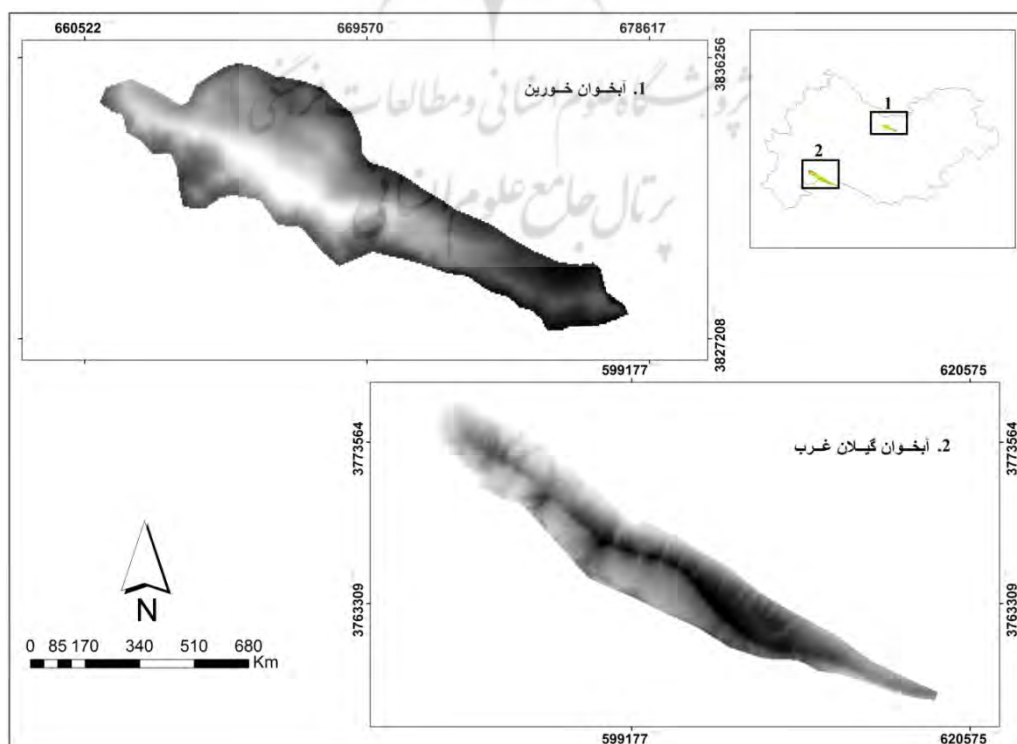
هدف از این پژوهش ارزیابی ویژگی‌های هیدرودینامیکی و شناخت عوامل مؤثر در رفتار هیدرودینامیکی

آبخوان‌های کارستی گیلانغرب و خورین با استفاده تحلیل سری‌های زمانی با تأکید بر ویژگی‌های ژئومورفولوژی کارست است.

جیکینز و واتس (۱۹۶۸) آنالیز سری‌های زمانی را ابداع کردند و مانجین (۱۹۷۱، ۱۹۷۵، ۱۹۸۱، ۱۹۸۴) آن را برای آنالیز عملکرد آبخوان‌های کارستی به کار گرفت. علاوه بر مانجین، پادیدلا و پالیدو بوش (۱۹۹۵)، آنجلینی (۱۹۹۷)، لارکو و مانین، رازک و بنتون (۱۹۹۸)، لی و لی (۲۰۰۲)، رهنمایی، زارع و نعمت الهی (۲۰۰۵)، کواچیچ (۲۰۰۹)، جیمکو و پتریچ (۲۰۱۰)، لیو و چن، خو و شو (۲۰۱۱) نیز، سری‌های زمانی را برای ارزیابی عملکرد آبخوان‌های کارستی به کار گرفته‌اند.

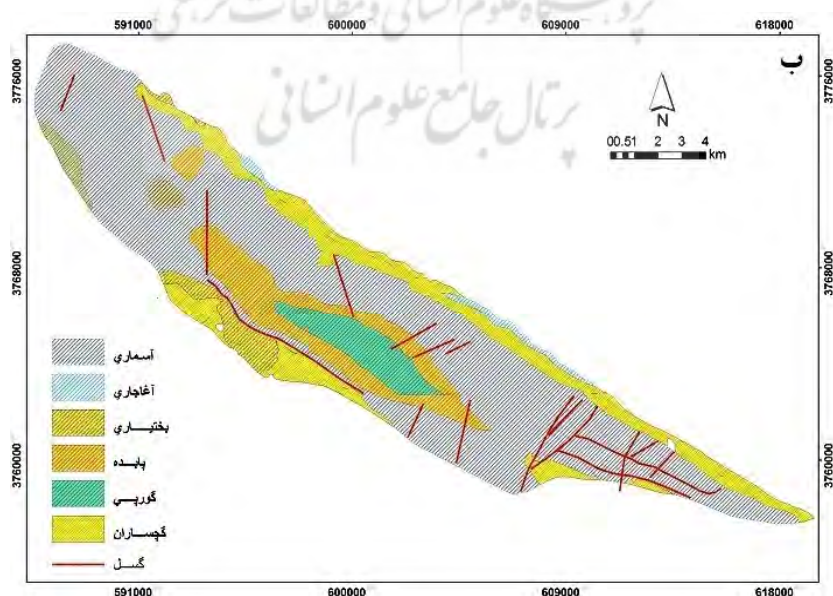
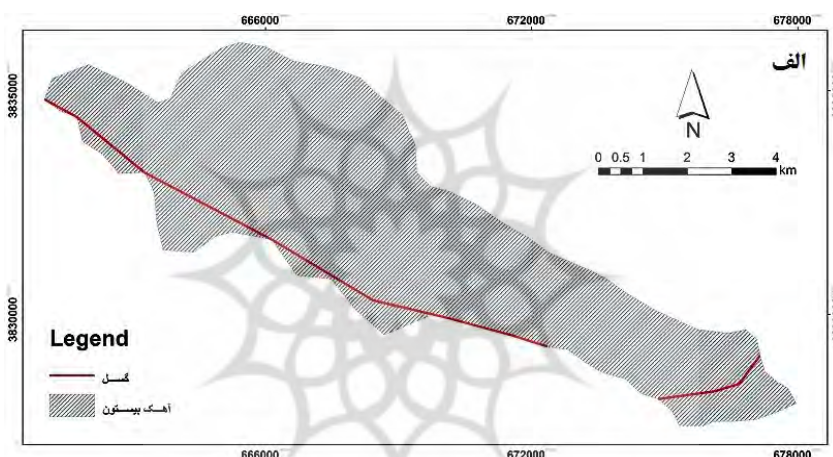
### موقعیت آبخوان‌های مورد مطالعه

آبخوان گیلانغرب در جنوب غرب استان کرمانشاه در زون زاگرس چین‌خورده قرار دارد (شکل ۱). این آبخوان منطبق بر تاقدیس سراوان به طول ۳۷ کیلومتر و عرض ۵ کیلومتر با روند شمال غرب - جنوب شرق و ارتفاع حداکثر ۱۹۳۰ و حداقل ۸۰۰ متر از سطح دریا، بین عرض‌های جغرافیایی ۳۳ درجه و ۵۲ دقیقه تا ۳۴ درجه و ۱۳ دقیقه شمالی و طول‌های جغرافیایی ۴۶ درجه تا ۴۶ درجه و ۳۰ دقیقه شرقی واقع شده است. آبخوان خورین در ۳۶ کیلومتری غرب شهر کرمانشاه در زون زاگرس مرتفع، منطبق بر تاقدیس خورین بوده با طول ۱۵ کیلومتر و عرض ۲/۵ کیلومتر و با روند شمال غرب - جنوب شرق بین عرض‌های جغرافیایی ۳۴ درجه و ۳۴ دقیقه تا ۳۴ درجه و ۳۹ دقیقه شمالی و طول‌های جغرافیایی ۴۶ درجه و ۵۶ دقیقه تا ۴۶ درجه و ۴۵ دقیقه واقع شده است (شکل ۱). ارتفاع حداکثر و حداقل تاقدیس به ترتیب ۲۴۰۰ و ۱۳۱۰ متر از سطح دریا است.



شکل ۱. نقشه موقعیت منطقه مورد مطالعه

سازندهای زمین‌شناسی تاقدیس سراوان از جدید به قدیم عبارتند از: آبرفت‌های کواترنری، ماس سنگ و مارن‌های آغاچاری (ترشیاری)، مارن و ژپس‌های گچساران (ترشیاری)، آهک‌های دولومیتی و دولومیت‌های آسماری (ترشیاری) و مارن و شیل‌های پابده - گورپی (کرتاسه). سازندهای نفوذ ناپذیر گورپی پابده در هسته تاقدیس واقع شده و سازند آسماری در سطح تاقدیس رخنمون دارد (شکل ۲). آبخوان گیلانغرب که در سازند آسماری به ضخامت حدود ۴۰۰ متر شکل گرفته، از طریق چشمه گیلانغرب در پلانچ غربی تاقدیس سراوان تخلیه می‌شود. سنگ بستر دشت الهیارخانی آهکی بوده و با نهشته‌های کواترنری پوشیده شده است. آبخوان خورین نیز در سازند توده‌ای آهک بیستون باسن تریاس فوقانی با ضخامت ۲۰۰۰ متر شکل گرفته (شکل ۲) و در قسمت جنوب شرقی تاقدیس، به کمک چشمه سبزعلی تخلیه می‌شود.



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی: الف) آبخوان خورین و ب) آبخوان گیلانغرب



در مناطق مورد مطالعه به دلیل فراهم بودن شرایط مناسب کارست‌زایی، از جمله لیتولوژی، تکتونیک، اقلیم و شرایط ژئومورفولوژیکی، لندفرم‌های کارستی متنوعی شکل گرفته است. کارن‌ها، فراوان‌ترین لندفرم کارستی در هر دو منطقه هستند (شکل ۳- الف و ۴- الف). دامنه جنوبی کوهستان خورین به دلیل دخالت راندگی، دارای مورفولوژی پرتگاهی با درزه و شکاف‌های افقی و عمودی متراکم است (شکل ۳- ب). در امتداد سطوح لایه‌بندی یا درزه‌ها، غارهای زیادی در این قسمت از تاقدیس شکل گرفته است (شکل ۳- ج). در دامنه شمالی و رأس تاقدیس، به سبب شیب کم توپوگرافی، لندفرم‌هایی همچون سینکول‌ها، شافت‌ها (شکل ۳- د) و پهنه‌های کارستی هموار ایجاد شده است. یال جنوبی تاقدیس سراوان بر اثر دخالت راندگی ناودار به صورت یک کمب درآمده و به دلیل وقوع زمین‌لغزش‌های متعدد، بی‌نظمی‌های توپوگرافی زیادی به خصوص در دامنه جنوبی تاقدیس مشاهده می‌شود. بر اثر تأثیرگذاری گسل‌های فرعی متعدد در رأس و دامنه تاقدیس، شکستگی‌های زیادی در تاقدیس نثار ایجاد شده است. غارها (شکل ۴- ب) و دره عمیق کارستی (شکل ۴- ج) در دامنه‌های تاقدیس و پهنه‌های کارستی هموار (شکل ۴- د) در رأس تاقدیس، مهم‌ترین لندفرم‌های کارستی تاقدیس نثار هستند.



شکل ۳. لندفرم‌های کارستی آبخوان خورین: الف) کارن؛ ب) نمایی از درزه و شکاف‌های دامنه جنوبی تاقدیس خورین؛ ج) غار در دامنه جنوبی تاقدیس خورین؛ د) شافت در رأس تاقدیس خورین



شکل ۴. لندفرم‌های کارستی آبخوان گیلانغرب (سراوان): الف) کارن کندویی؛ ب) غار دامنه شمالی تاقدیس سراوان؛ ج) دره‌های کارستی عمیق در دامنه شمالی تاقدیس سراوان؛ د) پهنة کارستی در رأس تاقدیس سراوان

اقلیم منطقه مورد مطالعه از نوع معتدل مدیترانه‌ای بوده و بیش از ۸۰ درصد بارش منطقه، در دوره سرد سال رخ می‌دهد. در ارتفاع بالای ۱۵۰۰ متر بیشتر بارش‌های ماه‌های دی و بهمن به صورت برف بوده و این ذخیره برفی، نقش مهمی را در تغذیه آبخوان‌ها برعهده دارد. جدول ۱ میانگین بارش‌های پانزده ساله ایستگاه‌های منتخب نزدیک به آبخوان‌ها و همچنین میانگین دمای سالانه منطقه‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

جدول ۱. ویژگی‌های بارش و دمایی ایستگاه‌های منتخب

آبخوان	ایستگاه باران‌سنجی	ارتفاع (m)	میانگین بارش سالانه (mm)	میانگین دمای سالانه (C)
گیلانغرب	چشمه پهن	۱۰۷۰	۵۵۶	۱۴/۴
خورین	گوهرچقا	۱۳۱۱	۴۱۷	۱۳/۹

## مواد و روش‌ها

این مطالعه پژوهشی توسعه‌ای - کاربردی، مبتنی بر روش‌های کتابخانه‌ای، میدانی و تحلیل سری‌های زمانی تک‌متغیره



خودهمبستگی<sup>۱</sup>، چگالی طیفی<sup>۲</sup> و آنالیز هیدروگراف است. در این پژوهش از داده‌های دبی و بارش ایستگاه‌های هیدرومتری و باران‌سنجی وزارت نیرو در بازه‌های زمانی ۱۳۵۱-۱۳۹۰ در آبخوان خورین و ۱۳۶۱-۱۳۹۰ در آبخوان گیلانغرب استفاده شده است. برای تعیین مساحت حوضه آبرگیر چشمه‌ها، از روشی که کریمی، رئیسی و زارع (۲۰۰۳) ارائه کرده‌اند، استفاده شده است (رابطه ۱).

$$A = Q/P \times I \quad \text{رابطه ۱}$$

در این روش؛

A: مساحت حوضه آبرگیر؛

Q: حجم تخلیه سالانه به میلیون مترمکعب؛

P: بارش سالانه به متر؛

I: ضریب تغذیه بی‌تد در فاصله ۰ تا ۱ است (این فاصله را می‌توان از طریق بازدیدهای میدانی و بررسی ژئومورفولوژی کارست برآورد می‌شود).

از آنالیز منحنی فروکش هیدروگراف برای ارزیابی نوع سیستم جریان در آبخوان‌های کارستی مورد مطالعه استفاده شده است. درنهایت، با ارزیابی نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل سری‌های زمانی و نتایج حاصل از آنالیز منحنی فروکش هیدروگراف و نیز، مد نظر قرار دادن ویژگی‌های ژئومورفولوژی کارست آبخوان‌های مورد بررسی، ویژگی‌های هیدرودینامیکی آبخوان‌های مورد مطالعه مشخص شد. در این میان برای تحلیل سری‌های زمانی، از نرم‌افزار Minitab استفاده شده است.

### خودهمبستگی

روش خودهمبستگی، مقایسه سری زمانی دبی با خود دبی است. این روش، ابزاری برای شناسایی برخی از ویژگی‌های دبی، به‌ویژه تغییرات چرخه‌ای است که با ویژگی‌های ساختاری آبخوان‌های کارستی ارتباط دارد. خود همبستگی را می‌توان از رابطه‌های ۲ و ۳ محاسبه کرد.

$$C_K = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-K} (z_t - z)(z_{t+k} - z) \quad \text{رابطه ۲}$$

$$r_k = \frac{C_k}{C_0} \quad \text{رابطه ۳}$$

که در این دو رابطه؛

$C_K$ : اتوکواریانس؛  $C_0$ : واریانس؛  $r_k$ : ضریب خودهمبستگی؛  $k$ : وابسته به دوره و  $N$ : تعداد دوره‌های مشاهداتی است.

نمودار نمایش‌دهنده خودهمبستگی، کورلوگرام نامیده می‌شود. ترسیم  $r_k$  در برابر  $k$  منجر به تهیه کورلوگرام می‌شود. مانجین (۱۹۸۲) مدت زمان مورد نیاز برای افت کورلوگرام به زیر را اثر حافظه نامید ( $r_k = 0/2$ ). به نظر مانجین حافظه بالای یک سیستم، نشان‌دهنده عدم توسعه شبکه‌ها و مجراهای کارستی در یک آبخوان (ذخیره بالا) است، اما میزان حافظه کم، ذخیره‌سازی کم در آبخوان و میزان توسعه زیاد کارست آن را نشان می‌دهد.

### چگالی طیفی

آنالیز چگالی طیفی ابزار قدرتمندی برای نشان دادن دوره تناوب در سری‌های زمانی است (باکس و جینکیز، ۱۹۷۶). تابع چگالی طیفی توسط یک عدد مختلط بیان شده (پالیدو و همکار، ۱۹۹۵: ۱۹۹) و با مقایسه سری زمانی دبی و بارش اثرات فیلتر (نگهداشت) سیستم کارست نشان داده می‌شود. یک تابع طیفی ساده با تغییر فوریه<sup>۱</sup> از تابع خودهمبستگی به شرح رابطه ۴ ایجاد شود (مانجین ۱۹۸۴).

$$S(f) = 2[1 + 2 \sum_{k=1}^m W_k r_k \cos(2\pi \times f \times k)] \quad \text{رابطه ۴}$$

که در این رابطه؛  $K$ : تغییر نسبی بین دو سری زمانی؛  $f$ : فراکانس؛  $r_k$ : ضریب خودهمبستگی؛  $m$ : تناوب حداکثر و  $W_k$ : تابع وزنی<sup>۲</sup> (جینکیز و باکس، ۱۹۶۸) است که از رابطه ۵ به دست می‌آید.

$$W_k = \frac{1}{2} \left[ 1 + \cos \left( \frac{\pi k}{m} \right) \right] \quad \text{رابطه ۵}$$

### آنالیز منحنی فروکش هیدروگراف

در این پژوهش به منظور بررسی توسعه‌یافتگی آبخوان‌های کارستی مورد نظر و شبکه کارست درونی آنها، از تحلیل منحنی فروکش چشمه‌ها استفاده شده است. مالیک (۲۰۰۷) با استفاده از تحلیل منحنی فروکش هیدروگراف و معادلات مربوطه، درجه توسعه کارست در سیستم‌های کارستی را بین ۰/۵ تا ۱۰ تعیین کرده است.<sup>۳</sup> بر اساس این مدل منحنی، فروکش هر آبخوان می‌تواند از یک یا چند زیررژیم خطی (رابطه ۶) یا آشفته (رابطه ۷) تشکیل شود (مالیک و وجیتکو، ۲۰۱۲: ۲۲۴۷). درنهایت پس از محاسبه روابط، برای هر سیستم کارستی می‌توان بر اساس جدول ارائه‌شده مالیک (۲۰۰۷)، میزان توسعه کارست و نوع جریان را در هر سیستم کارستی برآورد کرد.

$$Q_t = Q_0 e^{-\alpha t} \quad \text{رابطه ۶}$$

$$Q_t = Q_0 (1 - \beta_t) \quad \text{رابطه ۷}$$

1. Fourier

2. Tukey-Hanning

۳. برای اطلاعات بیشتر در این مورد به مالیک (۲۰۰۷) که به‌طور کامل در فهرست منابع معرفی شده، رجوع کنید.



## یافته‌های پژوهش

## ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی و هیدرولوژیکی آبخوان‌ها

مناطق دارای سنگ‌های کربناته کارستی شده بدون پوشش خاک، نشان‌دهنده مناطق تغذیه خودزا<sup>۱</sup> بوده و می‌توان انتظار داشت ۸۰ درصد بارش در آنها نفوذ کند (گلدشایر و درنو، ۲۰۰۷: ۱۸). در واقع، ژئومورفولوژی سطحی تأثیر زیادی در نوع و چگونگی شارژ آبخوان‌های کارستی دارد. نوع شارژ آبخوان‌های مورد مطالعه، به سبب عدم رخنمون سازندهای دیگر در سطح تاقدیس و جاری نشدن آب از سطح سازندهای غیر کارستی، از نوع خودزا است. در آبخوان خورین، شارژ یا از طریق درزه و شکاف‌ها و کارن‌ها منتشر می‌شود، یا اینکه متمرکز از طریق فروچاه‌ها<sup>۲</sup> و شافت انجام می‌گیرد. در آبخوان گیلانغرب تغذیه فقط منتشر (افشان) و از طریق درزه و شکاف و کارن‌ها انجام گرفته و به نظر می‌رسد، بیشترین میزان شارژ در کف دره‌های عمیق کارستی و پهنه‌های کارستی رأس تاقدیس انجام گیرد. مساحت حوضه آبرگیر چشمه‌های گیلانغرب و سبزعلی بر اساس داده‌های اقلیمی و هیدرولوژیکی سال‌های ۱۳۸۲-۱۳۸۳ و ۱۳۸۲-۱۳۸۱ بر اساس روش کریمی، رئیسی و زارع (۲۰۰۳)، به ترتیب ۱۰۱ و ۴۱ کیلومتر مربع برآورد شده است (جدول ۲).

جدول ۲. ویژگی‌های هیدرولوژیکی چشمه‌های مورد مطالعه

Area(Km <sup>2</sup> )	P (mm)	I	Q(MCM)	Qmin(l/s)	Qmax(l/s)	Qmen(l/s)	چشمه
۱۰۱	۵۲۸	۰/۵	۲۶/۴۲	۴۲۲	۱۶۶۶	۹۰۱	گیلانغرب
۴۱	۴۰۳	۰/۶	۹/۹۸	۰	۷۳۸	۱۸۲	سبزعلی

ویژگی‌های هیدرولوژی چشمه‌ها در دوره آماری مورد مطالعه در جدول ۲ و ویژگی‌های هیدروشیمیایی چشمه‌ها در تاریخ ۲۱ آبان ۱۳۹۰ در جدول ۳ نشان داده شده است. حداکثر دبی چشمه‌های گیلانغرب و سبزعلی، به ترتیب در اسفند و اردیبهشت و حداقل دبی آنها در شهریورماه مشاهده می‌شود. ضریب تغییرات دبی چشمه گیلانغرب ۱/۳۸ و چشمه سبزعلی ۴ است. معمولاً مقدار هدایت الکتریکی چشمه‌های کارستی کمتر از ۵۰۰ (μS/cm) به دست می‌آید. میزان EC چشمه‌های گیلانغرب و سبزعلی، به ترتیب ۴۹۱ و ۱۶۷ (μS/cm) بوده و از دید آنیونی، یون بی‌کربنات در هر دو چشمه غالب و تیپ آب چشمه‌ها بی‌کربنات است. از لحاظ کاتیونی، کاتیون غالب کلسیم و بعد از آن منیزیم است و آب چشمه‌ها رخساره کلسیک و منیزیک دارند.

تیپ آب هر دو چشمه  $Ca-Mg-HCO_3$  است. چشمه گیلانغرب از توالی آنیونی  $HCO_3 > SO_4 > Cl$  پیروی کرده و چشمه سبزعلی توالی آنیونی  $SO_4 > Cl > HCO_3$  دارد و هر دو چشمه دارای منشأ کارستی هستند. افزایش غلظت  $Mg$  یا کاهش نسبت مولار  $Ca/Mg$ ، نشان‌دهنده زمان ماندگاری بیشتر آب در آبخوان و معرف جنس سازند

1. Autogenic
2. Sinkholes

۳. حجم کل آبدهی سالانه چشمه به میلیون متر مربع

تغذیه‌کننده چشمه است که مقدار این نسبت در چشمه سبزعلی ۲ و در چشمه گیلانغرب ۱/۵ مشاهده می‌شود. افزایش غلظت  $Mg$  و کاهش نسبت  $Ca/Mg$ ، از زمان ماندگاری بیشتر آب در آبخوان گیلانغرب نسبت به خورین حکایت می‌کند و منعکس‌کننده سنگ آهک دولومیتی در منطقه تغذیه چشمه‌ها است.

جدول ۳. ویژگی‌های هیدروشیمیایی چشمه‌های مورد مطالعه

چشمه	Na	Mg	Ca	Cl	So4	Hco <sub>3</sub>	Ca/Mg	PH	Ec	TDS
گیلانغرب	۰/۳۹	۲/۷	۴/۱	۰/۶	۲/۳۷	۴/۲	۱/۵۱	۷/۸۹	۴۹۱	۳۱۴
سبزعلی	۰/۱۲	۱/۲	۲/۵	۰/۲۵	۰/۱۵	۳/۵	۲/۰۸	۸/۰۵	۲۴۹	۱۵۷

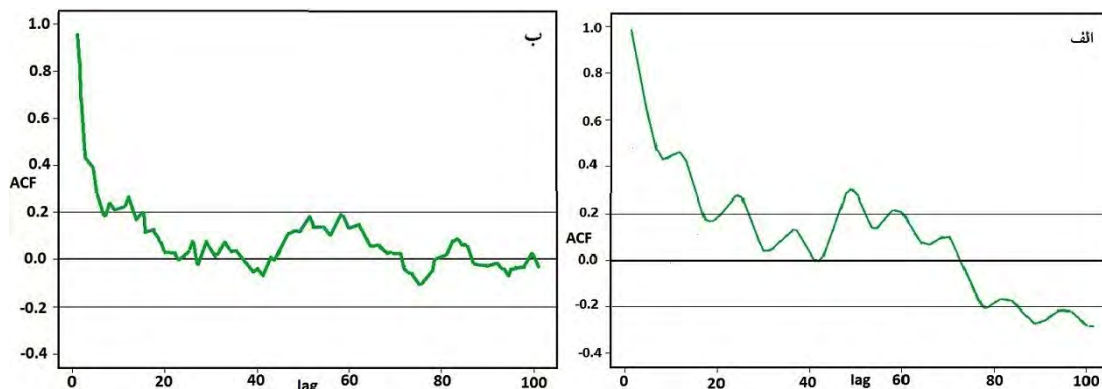
### خود همبستگی

گراسو و جینی (۱۹۹۴) با آنالیز کرولوگرام نشان دادند که افزایش فرکانس وقوع دبی‌های بالا، به افت سریع بازوی پایین رونده در کرولوگرام منجر می‌شوند و هرچه پیک دبی بالاتر باشد، فروکش کردن بازوی فروکش با سرعت بیشتری رخ می‌دهد.

بررسی‌های انجام شده ايسنلوهر، بوزدلیوجین، کربالی و روسیر (۱۹۹۷) حاکی از آن است که توزیع فضایی و زمانی بارش باران و نسبت بین نفوذ منتشر و متمرکز، بر شکل هیدروگراف و در نهایت در کرولوگرام تأثیر چشمگیری دارد. در نتیجه شکل کرولوگرام به میزان توسعه سیستم کارستی مرتبط است.

کرولوگرام چشمه سبزعلی غیریکسان و سه بخش متمایز تشکیل شده است. بخش اول آن به سرعت و در عرض ۱۰ روز کاهش می‌یابد و بخش دوم در عرض ۱۰ روز کاهش یافته و به کمتر از ۰/۲ می‌رسد (شکل ۵-الف). بخش اول نشان‌دهنده وجود جریان سریع در مجراها و بخش دوم نشان‌دهنده جریان نیمه‌سریع در شکستگی‌هاست. بخش سوم نیز تغییرات چشمگیری داشته و شکل آن یکنواخت نیست که این حالت گویای اینرسی و ذخیره دینامیکی کم آبخوان است. این مدل رفتار تابع خودهمبستگی، چندگانگی سیستم کارستی در آبخوان خورین را نشان می‌دهد و گویای این است که فیلترینگ آبخوان روی ورودی (بارش) اثر کمی دارد. این امر باعث واکنش سریع به بارش و تخلیه حجم زیادی از ورودی در دوره کوتاه‌مدت و کم شدن حجم ذخیره دینامیکی آبخوان می‌شود.

کرولوگرام چشمه گیلانغرب (شکل ۵-ب) نیز در زمان اولیه پرشیب بوده و در عرض ۱۲ روز کاهش یافته است، تابع خودهمبستگی در این چشمه به کمتر از ۰/۲ می‌رسد که منطبق با سیستم حافظه کم در مجاری کارستی بوده و معرف جریان سریع در مجراها است. اما بخش دوم کرولوگرام نوسان زیادی نداشته، شکل آن یکنواخت‌تر و بدون تغییرات واضح بوده و بیان‌کننده اینرسی و حجم ذخیره بالا و غلبه جریان پایه در آبخوان گیلانغرب است.



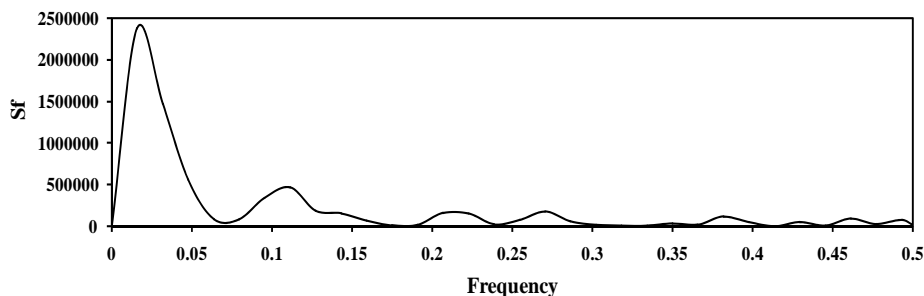
شکل ۵. الف) کولوگرام چشمه سبز علی؛ ب) کولوگرام چشمه گیلانغرب

### چگالی طیفی

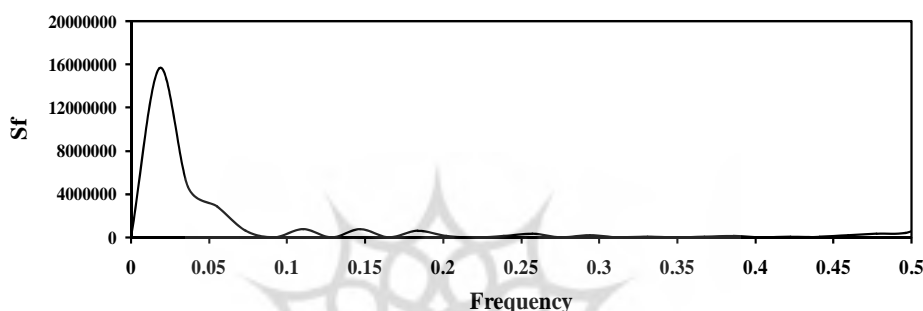
آنالیز چگالی طیفی ابزاری برای تجزیه و تحلیل تغییرات دبی بوده (پیولیدا بوش، پالیدو، دیمیترو و ماچکو، ۱۹۹۶: ۵۱۸) و مکمل آنالیز همبستگی است. تفسیر تابع چگالی طیفی (Sf) قله‌های مختلف، رخ داده‌های دوره‌ای (دبی‌های متغیر) را نشان می‌دهد که به کمک آن می‌توان ویژگی‌های سیستم کارستی را شناسایی کرد (لارکو مانین، رازک و بنتون، ۱۹۹۸: ۲۱۸). در واقع پیک‌های مجزا در فرکانس‌های مختلف در یک سری زمانی، منجر به شناسایی پدیده‌های دوره‌ای و در نتیجه شناسایی خصوصیات سیستم کارستی می‌شود (پاناگوپالوس و لامبراکیس، ۲۰۰۶: ۳۷۰).

تابع چگالی طیفی چشمه سبز علی (شکل ۶) نشان می‌دهد که یک اوج بزرگ در فرکانس  $0/003$  رخ می‌دهد که مبین چرخه شارژ سالانه آبخوان است. همچنین این تابع نشان‌دهنده یک باند طیفی نسبتاً بزرگ با واریانس‌های قابل توجه در فرکانس‌های کمتر از  $0/3$  است. علاوه بر پیک بزرگ چرخه سالانه، سه پیک قابل توجه در فرکانس‌های  $0/11$ ،  $0/22$  و  $0/27$  رخ می‌دهد که حاکی از اینرسی کم آبخوان خورین، فیلترینگ ضعیف ورودی (بارش)، وجود جریان سریع و توسعه شبکه مجراهای کارستی در این آبخوان است. جریان پایه در آبخوان خورین درصد کمتری از کل جریان را به خود اختصاص داده و نسبت جریان سریع بیشتر است.

شکل ۷ تابع چگالی طیفی چشمه گیلانغرب را نشان می‌دهد. اوج بزرگ در فرکانس  $0/003$ ، تأییدکننده چرخه سالانه مهمی است که می‌توان آن را چرخه شارژ سالانه آبخوان نامید. تابع چگالی طیفی چشمه گیلانغرب ارائه‌دهنده یک باند طیفی نسبتاً بزرگ با واریانس‌های قابل توجه در فرکانس‌های کمتر از  $0/15$  است و در فرکانس‌های بالاتر از  $0/15$  به یک اثر فیلترینگ خوب دست می‌یابد. تابع چگالی طیفی چشمه گیلانغرب وجود دو نوع جریان پایه و مجرای را نشان می‌دهد که در این آبخوان غلبه با جریان پایه بوده و جریان مجرای در این چشمه، فرعی و کم‌اهمیت است. در واقع آبخوان گیلانغرب دارای اینرسی و اثر فیلترینگ خوبی روی ورودی (بارش) است.



شکل ۶. تابع چگالی طیفی چشمه سبز علی



شکل ۷. تابع چگالی طیفی چشمه سبز علی

### آنالیز منحنی فروکش هیدروگراف

در ارزیابی توسعه شبکه کارست آبخوان خورین با استفاده از آنالیز منحنی فروکش (رابطه ۷)، درجه کارستیفیکاسیون ۵/۵ به دست آمده که نشان می‌دهد هیدروگراف این چشمه از دو زیررژیم خطی و یک زیررژیم آشفته تشکیل شده است. تخلیه آب توسط زیررژیم آشفته در دوره زمانی کوتاه مدتی رخ می‌دهد. این معادله بیانگر تخلیه جریان سریع یا آشفته از مجراهای کارستی و جریان پایه از درزه و شکاف‌ها و ماتریکس است. معادله منحنی فروکش هیدروگراف چشمه گیلانغرب نیز، حاکی از درجه کارستیفیکاسیون ۲/۳ با یک زیررژیم خطی و میزان بالای  $\alpha$  می‌باشد و تغذیه آبخوان توسط شکاف‌های ریز تا متوسط و ماتریکس صورت می‌گیرد. به عبارت دیگر مجراها توسعه زیادی در این آبخوان ندارند.

$$Q_t = 0/485e^{-0/007t} + 0/304e^{-0/027t} + 177(1 - 0/0731t)$$

$$Q_t = 0/0/0951e^{-0/012t}$$

### بحث و نتیجه گیری

با توجه به مبانی نظری، هر آبخوان کارستی از چندین نوع زیررژیم تشکیل شده و در طبیعت آبخوان‌هایی با یک نوع رژیم جریان نادر است. از سوی دیگر تفاوت در ژئومورفولوژی سطحی، زمین‌ساخت، اقلیم و دیگر شرایط مؤثر در چگونگی و میزان شارژ آبخوان‌ها، سبب ایجاد دوگانگی در شارژ و جریان در آبخوان‌های مختلف می‌شود. آبخوان‌های



کارستی موجود در زاگرس چین خورده و شکسته با وجود اقلیم کمابیش یکسان، از نظر ویژگی‌های هیدرودینامیکی تفاوت‌های زیادی دارند، این تفاوت‌های نشان می‌دهند که ژئومورفولوژی و ویژگی‌های زمین‌شناسی این دو زون یکسان نیستند. وجود سه بخش مجزا در کرولوگرام چشمه سبزیلی حاکی از وجود زیررژیم‌های جریانی مختلف در آبخوان است. بخش اول کرولوگرام به مدت زمان ۱۰ روز، نشان‌دهنده وجود جریان سریع و شارژ متمرکز از طریق فروچاله‌ها و چاله‌های بلعده در رأس تاقدیس خورین است. بخش دوم و مدت زمان ۱۰ روزه آن، جریان نیمه‌سریع در شکستگی‌ها و شارژ از طریق درزه و شکاف‌های متراکم با بازشدگی زیاد را نشان می‌دهد. بخش سوم نیز تغییرات چشمگیری داشته و از اینرسی کم آبخوان و وجود همزمان جریان سریع و جریان پایه در این بخش حکایت می‌کند.

تابع خودهمبستگی چشمه سبزیلی تأییدکننده چندگانگی رفتار سیستم کارستی، واکنش سریع به بارش و حجم کم ذخیره دینامیکی آبخوان خورین است. کرولوگرام چشمه گیلانغرب در زمان اولیه پرشیب بوده و در عرض ۱۲ روز کاهش یافته که معرف جریان سریع در مجراها و شارژ آبخوان از طریق نواحی توسعه‌یافته کارستی رأس تاقدیس نثار است. بخش دوم کرولوگرام شکل یکنواخت داشته و از اینرسی بالا، غلبه جریان پایه و شارژ منتشر از طریق ماتریکس و درزه و شکاف‌ها در آبخوان گیلانغرب حکایت می‌کند. تابع چگالی طیفی هر دو چشمه یک اوج بزرگ در فرکانس  $0.003$  را نشان می‌دهد که مبین چرخه شارژ سالانه آبخوان‌ها است. تابع چگالی طیفی چشمه سبزیلی، نشان‌دهنده یک باند طیفی نسبتاً بزرگ با واریانس‌های قابل توجه در فرکانس‌های کمتر از  $0.3$  بوده و حاکی از اینرسی کم، فیلترینگ ضعیف ورودی (بارش)، غلبه جریان سریع و توسعه شبکه مجراهای کارستی در آبخوان خورین است. تابع چگالی طیفی چشمه گیلانغرب با یک باند طیفی نسبتاً بزرگ و واریانس‌های قابل توجه در فرکانس‌های کمتر از  $0.15$ ، وجود دو نوع جریان پایه و مجرای را نشان می‌دهد، در این میان غلبه با جریان پایه بوده و جریانی مجرای در این چشمه فرعی و کم‌اهمیت است. بر اساس تابع چگالی طیفی، آبخوان گیلانغرب اینرسی بالایی داشته و اثر فیلترینگ خوبی روی ورودی می‌گذارد. معادله‌های منحنی فروکش هیدروگراف چشمه‌ها، حاکی از درجه کارستیفیکاسیون بالا در آبخوان خورین و درجه توسعه کم کارست در آبخوان گیلانغرب است. همچنین این معادله‌ها تأییدکننده وجود جریان سریع و وجود مجاری کارستی در آبخوان خورین و توسعه کم شبکه کارستی و حاکمیت سیستم درزه و شکافی و ماتریکس در آبخوان گیلانغرب است. از مقایسه نتایج تابع خودهمبستگی و چگالی طیفی هر یک از چشمه‌ها درمی‌یابیم که نتایج یکدیگر را تأیید می‌کنند؛ ضمن آنکه مقایسه این توابع، از توسعه‌یافته بودن سیستم کارستی آبخوان خورین نسبت به آبخوان گیلانغرب خبر می‌دهد. معادله منحنی فروکش در آبخوان خورین تأییدکننده چندگانگی رفتار سیستم کارستی و در نتیجه تأیید نتایج به‌دست‌آمده از توابع سری زمانی است. اما معادله منحنی فروکش هیدروگراف در چشمه گیلانغرب، وجود جریان سریع در آبخوان را که توابع سری زمانی نشان داده‌اند، تأیید نمی‌کند. این امر به ویژگی‌های فیزیوگرافی آبخوان گیلانغرب برمی‌گردد با این توضیح که آبخوان گیلانغرب، حوضه تغذیه‌کننده طولی دارد که مانع رسیدن همزمان آب نفوذی می‌شود و پیک بالا در هیدروگراف را سبب می‌شود و چون آب نفوذی از قسمت‌های مختلف آبخوان با تأخیر زمانی نسبت به هم به خروجی می‌رسند، در نتیجه دبی نوسان زیادی ندارد، این حالت را ضریب کم تغییرات دبی چشمه گیلانغرب تأیید می‌کند.

کریمی، رئیسی و زارع (۲۰۰۳) با استناد به تغییرات زمانی هدایت الکتریکی و داده‌های ایزوتوپی نشان دادند که

بخشی از آبدهی چشمه به‌وسیله جریان مجرای تأمین می‌شود. توسعه ژئومورفولوژی سطحی نقش مهمی در میزان و نحوه شارژ آبخوان داشته، بنابراین یک عامل تعیین‌کننده در رفتار هیدرودینامیکی آبخوان‌های مورد مطالعه است. توسعه یافته‌بودن ژئومورفولوژی کارست سطحی و وجود فروچاله‌ها و درزه‌های فراوان در آهک توده‌ای بیستون، عامل اصلی رفتار هیدرودینامیکی چندگانه در آبخوان خورین است. نبود فروچاله‌ها و توسعه کم ژئومورفولوژی کارست سطحی و همچنین ویژگی‌های فیزیوگرافی حوضه تغذیه‌کننده آبخوان گیلانغرب، باعث نوسان کم در رفتار هیدرودینامیکی آبخوان گیلانغرب شده است.

### منابع

- Angelini, P., 1997, **Correlation and Spectral Analysis of Two Hydrogeological Systems in Central Italy**, Hydrol, Vol. 42, No. 3, PP. 425-438.
- Atkinson, T.C., 1977, **Diffuse Flow and Conduit Flow in Limestone Terrain in the Mendip Hills, Somerset (Great Britain)**, Hydrol, Vol. 35, No. 1-2, PP. 93-103.
- Box, G.E.P., Jenkins, G.M., 1976, **Time Series Analysis: Forecasting and Control**, Holden Day, San Francisco.
- Duffy, C.J., Gelhar, L.W., 1986, **A Frequency Domain Analysis of Groundwater Quality Fluctuations: Interpretation of Field Data**, Water Resour, Vol. 22, No. 7, PP. 1115-1128.
- Eisenlohr, L., Bouzelboudjen, M., Kiraly, L., Rossier, Y., 1997, **Numerical Versus Statistical Modelling of Natural Response of a Karst Hydrogeological System**, Hydrology, Vol.202, No. 1-4, PP. 244-262.
- Goldscheider, N., Drew, D., 2004, **Methods in Karst Hydrogeology**, Taylor & Francis, London.
- Grasso, D.A., Jeannin, P.Y., 1994, **Etude Critique des Méthodes D'analyse de la Réponse Globale des Systèmes Karstiques. Application au Site de Bure (JU, Suisse)**, Bulletin d'Hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel, Vol. 13, PP. 87-113.
- Jemcov, I., Petrič, M., 2010, **Time Series Analysis, Modelling and Assessment of Optimal Exploitation of the Nemanja Karst Springs, Serbia**, Acta Carsologica, Vol. 39, No. 2, PP. 187-200.
- Jemcov, I., Petric, M., 2009, **Measured Precipitation vs. Effective Infiltration and Their Influence on the Assessment of Karst Systems Based on Results of the Time Series Analysis**, Hydrology, Vol. 379, No. 3-4, PP. 304-314.
- Jenkins, G.M., Watts, D.G., 1968, **Spectral Analysis and Its Applications**, Holden Days, San Francisco.
- Karimi, H., Raeisi, E., Zare, M., 2003, **Hydrodynamic Behavior of the Gilan Karst Spring, West of Zagros, Iran**, Cave and Karstscience, Vol. 30, No. 1, PP. 15-20.
- Karimi, H., Raeisi, E., Zare, M., 2003, **Hydrodynamic Behavior of the Gilan Karst Spring, West of the Zagros, Iran**, Cave and Karst Science, Vol. 30, No. 1, PP. 15-22.

- 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., Banton, O., 1998. **Contribution of Correlation and Spectral Analyses to the Regional Study of a Large Karst Aquifer (Charente, France)**, Hydrol, Vol, 205, No. 3-4, PP. 217–231.
- Lee, JY., Lee, KK., 2002, **Use of Hydrologic Time Series Data for Identification of Recharge Mechanism in a Fractured Bedrock Aquifer System**, Hydrol, Vol. 229, No.3-4, PP.190–201.
- Liñán Baena, C., Andreo, B., Mudry, J., Carrasco Cantos, F., 2009, **Groundwater Temperature and Electrical Conductivity as Tools to Characterize Flow Patterns in Carbonate Aquifer: the Sierra de Las Nieves Karst Aquifer, Southern Spain**, Hydrogeol, Vol. 17, No. 4, PP. 843-853.
- Liu, L., Chen, X., Xu, G., Shu, L., 2011, **Use of Hydrologic Time-series Data for Identification of Hydrodynamic Function and Behavior in a Karstic Water System in China**, Hydrogeology, Vol. 19, No. 8, PP. 1577–1585.
- Maillet, E., 1905, **Essais d'Hydraulique Souterraine et Fluvial**, Hermann, Paris.
- Malik, P., 2007, **Assessment of Regional Karstification Degree and Groundwater Sensitivity to Pollution Using Hydrograph Analysis in the Velka Fatra Mountains, Slovakia**, Environmental Geology, Vol. 51, No. 5, PP. 707-711.
- Malík, P. & Vojtková, S., 2012, **Use of Recession-curve Analysis for Estimation of Karstification Degree and its Application in Assessing Overflow / Underflow Conditions in Closely Spaced Karstic Springs**, Environmental Earth Sciences, Vol. 65, No. 8, PP. 2245-2257.
- Mangin, A., 1971, **Etude des Débits Classés D'exutoires Karstiques Portant Sur un Cycle Hydrologique**, Annales de spéléologie, Vol. 28, No. 1, PP. 21-40.
- Mangin, A., 1975, **Contribution a létude Hydrodynamique des Aquifères Karstiques**, Thèse, Institut des Sciences de la Terre de l'Université de Dijon.
- Mangin, A., 1982, **L'approche Systémique du Karst, Conséquences Conceptuelles et Méthodologiques**, Signature, 723, 132450.
- Mangin, A., 1984, **Pour Une Meilleure Connaissance des Systèmes Hydrologiques à Partir des Analyses Corrélatore et Spectral**, Journal of Hydrology, Vol, 67, No. 1-4, PP. 25-43.
- Mangin, A., 1985, **Progrès Récents Dans L'étude Hydrogéologique Des Karsts [Recent Progress in the Study of Karst Hydrogeology]**, Stygologia, Vol. 1, No. 3, PP. 239-257.
- Mangin, A., 1981, **Utilisation des Analyses Corrélatore et Spectrale Dans L'approche des Systèmes Hydrologiques**, Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Vol. 293, PP.401-404.
- Padilla A., Pulida-Bosch, A., 1995, **Study of Hydrographs of Karstic Aquifers by Means of Correlation and Cross-spectral Analysis**, Hydrol, Vol. 168, 1-4, PP.73–89.

- Panagopoulos, G., Lambrakis, N., 2006, **The Contribution of Time Series Analysis to the Study of the Hydrodynamic Characteristics of the Karst Systems: Application on Two Typical Karst Aquifers of Greece (Trifilia, Almyros Crete)**, Hydrology, Vol. 329, No. 3, PP. 368-376.
- Pulido-Bosch, A., Padilla, A., Dimitrov, D., Machkova, M., 1996, **The Discharge Variability of Some Karst Springs in Bulgaria Studied by Time Series Analysis**, Hydrological Sciences, Vol. 40, No. 4, PP. 517-532.
- Rahnemai, M., Zare, M., 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.

