

ارزیابی روش‌های برآورد جریان پایه در چشمه‌های کارستی، مطالعه‌ی موردی چشمه‌های پیرغار و دیمه

سپیده مالی

کارشناسی ارشد آشناسی، بخش علوم زمین، دانشگاه شیراز

ضرغام محمدی

دانشیار بخش علوم زمین دانشگاه شیراز

تاریخ پذیرش: ۹۳/۸/۱۹

تاریخ دریافت: ۹۳/۱۲/۲

zmohammadi@shirazu.ac.ir

چکیده

بررسی هیدروگراف جریان چشمه از کاربردی‌ترین موضوعات در هیدروژئولوژی است و پژوهش در مورد آن، می‌تواند کاربردهای مفیدی در تعیین رفتار دینامیکی آب زیرزمینی و پشتوانه ای علمی در اتخاذ راه‌کارهای مناسب در مدیریت کمی و کیفی آب آبخوان‌ها و حوضه‌های آبرگیر داشته باشد. در این پژوهش علاوه بر روشهای مرسوم، جدایش جریان پایه چشمه‌های کارستی دیمه و پیرغار واقع در استان چهارمحال و بختیاری به روش‌های فیلتر دیجیتال بازگشتی با استفاده از نرم افزار HydroOffice 2010 انجام گرفته است. تغییرات دبی جریان پایه که بر اساس شیمی‌نگار چشمه برآورد شده است، به عنوان معیار ارزیابی و مبنای مقایسه جهت انتخاب مناسب‌ترین روش فیلتر دیجیتال بازگشتی در محاسبه‌ی جریان پایه (BFI) در نظر گرفته شده است. در هر دو چشمه، روش Eckhardt Filter با مقایسه‌ی عددی و معیارهای آماری مناسب‌ترین روش تفکیک جریان در بین روش‌های دیجیتال الگوریتم عددی می‌باشد. با استفاده از روش مذکور، میانگین شاخص جریان پایه در چشمه‌های دیمه و پیرغار به ترتیب ۰/۹ و ۰/۶۱ محاسبه شده است. با بررسی تغییرات زمانی بارش، دبی و غلظت یون کلسیم در چشمه‌ی دیمه و پیرغار، اثر تدریجی آب نفوذی حاصل از بارش، به ترتیب در طول ۱۲ و ۵ ماه ظاهر می‌شود و درصد مشارکت آب جدید در دبی کل چشمه‌ها، در طول مدت مطالعه به ترتیب حدود ۱۲٪ و ۳۳٪ است. با توجه به پایین‌تر بودن شاخص جریان پایه و درصد بیشتر مشارکت آب جدید در چشمه‌ی پیرغار نسبت به چشمه‌ی دیمه، می‌توان گفت احتمالاً سیستم آبخوان چشمه‌ی پیرغار نسبت به دیمه دارای سهم جریان مجرای بیشتری بوده و از درجه‌ی کارستی شدن بیشتری برخوردار است.

کلمات کلیدی: چشمه کارستی، جریان پایه، تفکیک هیدروگراف، روش دیجیتال الگوریتم عددی

مقدمه

تقسیم دبی پایه به دبی کل برای هر سال یا کل دوره‌ی آماری به‌دست می‌آید. بالا بودن شاخص جریان پایه در چشمه‌های کارستی بیانگر حوضه‌ای است که دارای رژیم جریان پایدارتری است و کارست احتمالاً توسعه‌ی چندانی نداشته است. تاکنون به منظور تعیین نوع جریان در آبخوان‌های کارستی، روش‌های متعددی ارائه شده است. Jacobson و Longmuir در سال ۱۹۷۴ براساس تغییرات هدایت الکتریکی و دبی چشمه‌ها، سیستم‌های کارستی را به ۴ دسته‌ی مجرای، مجرای - افشان، افشان و افشان نوع گیتزبورگ تقسیم‌بندی نمودند. براساس مطالعات آن‌ها، ضریب تغییرات چشمه‌های با سامانه‌ی مجرای، بزرگ‌تر از ۱۵۰ درصد، چشمه‌های مجرای - افشان، بزرگ‌تر از ۴۰ درصد، چشمه‌های افشان کمتر از ۳۰ درصد و افشان نوع گیتزبورگ با تغییرات کم برآورد شده است. در سال ۲۰۰۴ Tallaksen و همکاران در ادامه‌ی تحقیقات پیشین روش‌های مختلف جدایش پیوسته‌ی مولفه‌های مختلف جریان را مقایسه و تفکیک کردند. (Dickinson et al., 1967) و Hall, 1971 روش‌های جداسازی جریان پایه را از نقطه نظر آنالیز سیلاب بررسی کرده‌اند. (قنبرپور و همکاران، ۱۳۸۶) شاخص جریان پایه در تعدادی از حوضه‌های آبخیز در جنوب غرب ایران را بررسی کردند. نتایج آن‌ها روش فیلتر عددی بازگشتی را به عنوان دقیق‌ترین روش نشان داد. (کلانتری و همکاران، ۱۳۹۰) به منظور بررسی خصوصیات آبخوان کارستی تغذیه کننده چشمه بی‌بی‌تلخون از روش ساده هیدروگراف تخلیه استفاده کرده‌اند و نشان دادند که یک حوضه کارستی برگزیر با رژیم تغذیه برفی-بارانی نقش مهمی در تغذیه چشمه در سرتاسر سال دارد.

بررسی خصوصیات هیدروگراف چشمه همراه با پایش پیوسته‌ی خصوصیات فیزیکی-شیمیایی آب، به عنوان تابعی از زمان می‌تواند بینشی پیرامون ویژگی‌های هیدروپدینامیکی آبخوان، فراهم آورد (Kresic and Stevanovic, 2010). خصوصیات فیزیکی و شیمیایی چشمه‌های آبخوان‌های کارستی کربناته، می‌توانند بهترین گزینه برای ترسیم شیمی‌نگارها و ارزیابی فرآیندهای حاکم بر مسیر زهکشی باشند. آبخوان‌های کارستی دارای تخلخل سه‌گانه‌ی منحصربه‌فردی هستند که در نتیجه‌ی آن دو نوع جریان آب زیرزمینی، موسوم به جریان افشان (جریان پایه) و جریان کانالی (مجرای) تعریف می‌شوند (Atkinson, 1977). درصد مشارکت این دو مولفه‌ی جریان در هیدروگراف چشمه‌ی کارستی تا حد زیادی تحت تاثیر ورودی‌های احتمالی آب و ویژگی‌های مختلف آبخوان کارستی است. وجود رودخانه‌های کور تغذیه‌کننده‌ی آبخوان، سیستم‌های کانالی دندردی وسیع و تخلخل ماتریکی بالا می‌تواند شیمی‌نگارها و هیدروگراف‌هایی با پیک‌های چندگانه تولید کند؛ که برخی از آن‌ها نشان دهنده‌ی پاسخ سریع به بارش و برخی نشان دهنده‌ی تأخیرهای طولانی است. جداسازی مولفه‌ی جریان در چنین هیدروگراف‌هایی ممکن است بدون تحقیقات صحرایی مشکل باشد و نتایج قابل اطمینان نباشد (Kresic and Stevanovic, 2010). شناخت مناسب‌ترین روش تفکیک جریان هیدروگراف و برآورد دبی پایه امکان محاسبه‌ی دقیق شاخص دبی پایه (Base Flow Index; BFI) را فراهم می‌سازد. شاخص دبی پایه (BFI) یک نسبت بدون بعد است که اولین بار توسط Lvovich, 1979 ارائه شده است و توسط پژوهشکده‌ی هیدروژئولوژی آمریکا به‌کار گرفته شده است. این شاخص از

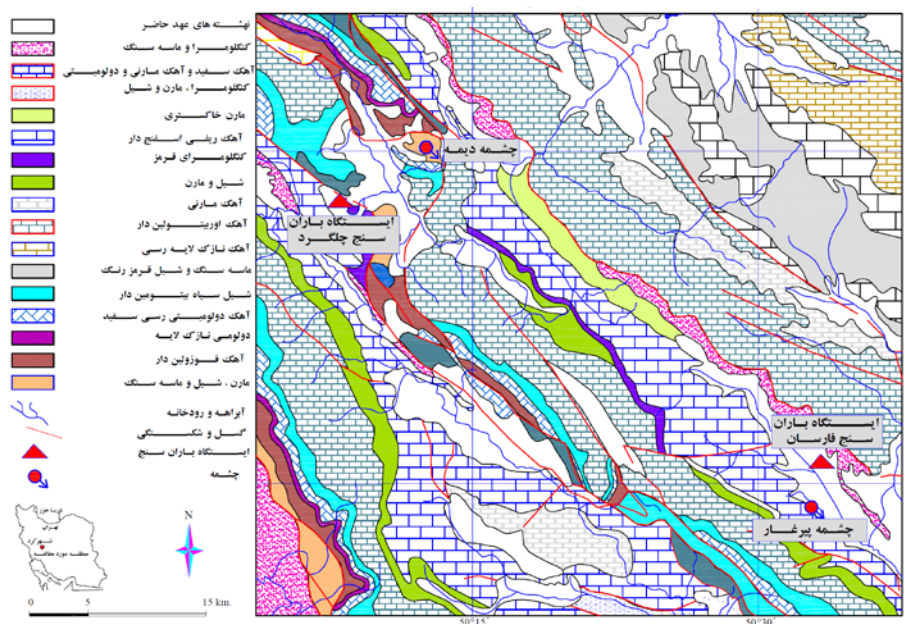
دیجیتال بازگشتی (با اساز نرم افزار HydroOffice 2010) و تعیین سهم جریان پایه بر مبنای دبی آب قدیمی مورد ارزیابی قرار گرفته است. در بسیاری از موارد که اطلاعات کیفی همانند تغییرات غلظت کلسیم در چشمه‌ها در دسترس نیست، می‌توان از روش‌های جدایش فیلتر دیجیتال بازگشتی به عنوان ابزاری جهت تفکیک جریان پایه در چشمه‌های کارستی استفاده نمود.

منطقه‌ی مورد مطالعه

منطقه‌ی پیرغار از نظر موقعیت جغرافیایی در جنوب و غرب شهرستان فارس قرار دارد. متوسط بارندگی سال‌های (۱۳۷۸-۱۳۹۰) در این منطقه با توجه به ایستگاه فارس ۵۴۲/۵ میلیمتر است. چشمه‌ی پیرغار در طول جغرافیایی ۵۰ درجه و ۳۳ دقیقه و ۴۰/۴۲ ثانیه و عرض جغرافیایی ۳۲ درجه و ۱۳ دقیقه و ۰/۵۸ ثانیه در دامنه‌ی شمالی کوه سالدوران با مساحت حوضه‌ی آبریز ۹۲ کیلومتر مربع (شجاع، ۱۳۹۰) و در ارتفاع ۲۱۰۰ متر از سطح دریا واقع شده است. آهک‌های سفید، آهک مارنی و آهک دولومیتی معادل سازند آسماری- جهرم و شهبازان با سن ائوسن - الیگوسن همراه با آهک‌های کرم رنگ ضخیم لایه بخش فوقانی سازند آسماری آبخوان اصلی کارستی چشمه پیرغار (شکل ۱) را تشکیل می‌دهد. چشمه دیمه سرچشمه اصلی زاینده رود قبل از ایجاد تونل‌های کوه‌رنگ و در ۱۲ کیلومتری چلگرد در مجاورت روستای دیمه واقع شده است و ارتفاع قرار گیری این چشمه ۲۱۹۶ متر از سطح دریا می‌باشد، طول جغرافیایی محل چشمه ۵۰ درجه و ۱۲ دقیقه و ۴ ثانیه و عرض جغرافیایی آن ۳۲ درجه و ۳۰ دقیقه ۴ ثانیه با مساحت حوضه‌ی آبریز ۱۴۰ کیلومتر مربع می‌باشد. متوسط بارندگی سال‌های (۱۳۷۸-۱۳۹۰) در این منطقه با توجه به ایستگاه چلگرد ۱۳۲۹/۱ میلیمتر است. با توجه به نقشه‌ی زمین‌شناسی محدوده چشمه در (شکل ۱) آهک‌های سفید، آهک‌های مارنی و آهک‌های دولومیتی معادل سازند آسماری- جهرم و شهبازان با سن ائوسن - الیگوسن همراه با آهک‌های کرم رنگ ضخیم لایه بخش فوقانی سازند آسماری به سن الیگوسن و آهک نازک لایه رسی و آهک خاکستری همراه با فسیل اربیتولین و شیل، مارن و ماسه سنگ به سن کرتاسه می‌توانند در تأمین آب چشمه دیمه موثر باشند.

در بررسی و مقایسه‌ی سیستم جریان در آبخوان‌های کارستی مختلف و تعیین نوع جریان حاکم بر آن‌ها، از زمان تأخیر نیز استفاده می‌شود. از آنجایی‌که این پارامتر بستگی زیادی به فاصله‌ی مسیر جریان آب در آبخوان دارد، این روش مناسب و مطلوب نمی‌باشد. بنابراین در بررسی نوع جریان، می‌توان از سرعت جریان استفاده نمود (کاوسی، ۱۳۸۷). روش مرسوم اندازه‌گیری سرعت جریان در آبخوان‌های کارستی استفاده از ردیاب و پالس جریان می‌باشد (Ashton, 1966). به دلیل پیچیدگی تفکیک جریان افشان از مجرای، دقیق‌ترین روش در برآورد سرعت جریان بین دو نقطه در آبخوان کارستی، استفاده از مطالعات ردیابی می‌باشد (کاوسی، ۱۳۸۷). لیکن این روش دارای محدودیت اجرایی و اقتصادی در سطوح وسیع است. روش و تکنیک‌های گرافیکی نیز جهت جدایش جریان پایه از هیدروگراف جریان چشمه‌ها وجود دارند. در این روش سهم جریان مجرای و افشان بر اساس ضرایب فرود محاسبه می‌شود. با برون‌یابی نقطه‌ی شروع کوچک‌ترین ضریب فرود تا زمان مصادف با قله‌ی هیدروگراف و سپس اتصال این نقطه به زمان شروع یال صعودی هیدروگراف، می‌توان جریان افشان و مجرای را از یکدیگر تفکیک کرد (Veni, 1994). روش گرافیکی مرسوم جداسازی جریان افشان و مجرای به علت عدم به‌کارگیری یک معیار مستقیم از دقت لازم برخوردار نیست (کاوسی، ۱۳۸۷) و استفاده از آن برای داده‌های طولانی مدت وقت گیر و نامناسب است. روش‌های جدایش فیلتر دیجیتال بازگشتی به دلیل اجرای ساده‌تر، سریع‌تر و قابل قبول‌تر از روش‌های گرافیکی می‌باشند در این روش یک فیلتر دیجیتال پایین‌گذر ریاضی در حوزه‌ی زمان و فرکانس تعریف می‌شود. یکی دیگر از تکنیک‌های تفکیک جریان استفاده از تغییرات زمانی ترکیبات شیمیایی همانند غلظت کلسیم می‌باشد. با استفاده از این روش می‌توان سهم دبی آب قدیمی به‌عنوان دبی پایه را بر آورد کرد.

در این پژوهش به منظور تفکیک جریان پایه در هیدروگراف دبی دو چشمه‌ی دیمه و پیرغار، از سه روش شامل شیمی‌نگار، فیلتر دیجیتال بازگشتی و گرافیکی استفاده شده است؛ تغییرات زمانی غلظت یون کلسیم، به‌عنوان نشانگری از درصد آب قدیمی و زمان ظهور و ماندگاری آب جدید در دو چشمه‌ی دیمه و پیرغار مورد بررسی قرار گرفته است. هم‌چنین در این تحقیق، مناسب‌ترین روش تفکیک هیدروگراف جریان در بین روش‌های جداسازی فیلتر



شکل ۱. نقشه زمین شناسی منطقه و موقعیت چشمه‌های کارستی دیمه و پیرغار در مورد مطالعه

فیلترهای دیجیتال بازگشتی: (Recursive digital filters)

به منظور تشخیص مناسب ترین روش تفکیک هیدروگراف جریان از بین روش های جداسازی فیلتر دیجیتال بازگشتی و تعیین سهم جریان پایه با عنوان شاخص جریان پایه (BFI)، از نرم افزار BFI (زیر شاخه ای از نرم افزار HydroOffice) استفاده شده است.

فیلترهای دیجیتال بازگشتی که عمدتاً در آب های سطحی به کار برده شده است؛ ابزار معمولی در آنالیز و پردازش سیگنال است؛ که با انتخاب یک حد آستانه ای مناسب، به منظور جدایش سیگنال های دارای فرکانس بالا از سیگنال های دارای فرکانس پایین مورد استفاده قرار می گیرد (Gregor, 2010). در جداسازی جریان پایه از جریان های سریع با فیلتر دیجیتال بازگشتی، سیگنال های جریان های سریع دارای فرکانس بالا حذف و سیگنال های جریان پایه دارای فرکانس پایین، از هیدروگراف جریان استخراج می شود.

One – parameter algorithm

در سال (Hollick and Lyne, 1979) برای اولین بار استفاده از فیلتر دیجیتال را پیشنهاد کردند که در استرالیا مورد استفاده قرار گرفته است. در ادامه Chapman در سال ۱۹۹۱ نشان داد، زمانی که هیچ رواناب مستقیمی وجود نداشته باشد، جریان پایه مقدار ثابتی دارد؛ بنابراین، یک فرمول جدیدی را پیشنهاد داد که بر اساس مدل مخزن خطی تفسیر شده است. پس از آن توسط Chapman و Maxwell در سال ۱۹۹۶ ساده شد. این فیلتر فقط نیاز به تعیین پارامتر ثابت بازگشت (k) دارد که در رابطه ی ذیل ارائه شده است:

$$q_{b(i)} = \frac{k}{2-k} q_{b(i-1)} + \frac{1-k}{2-k} q_{(i)} \quad (6)$$

که در آن $q_{b(i)}$ جریان پایه ی فیلتر شده در زمان i بر حسب متر مکعب بر ثانیه، $q_{b(i-1)}$ جریان پایه ی فیلتر شده در زمان i-1 بر حسب متر مکعب بر ثانیه، k پارامتر فیلتر مربوط به حوضه ی آبخیز، $q_{(i)}$ جریان کل در زمان i بر حسب متر مکعب بر ثانیه.

Boughton two parameter algorithm

در سال ۱۹۹۳، Boughton الگوریتمی با قابلیت بیشتر، شامل پارامتر تغییرپذیری شکل جدایش (C) که معادل $C = 1-k$ را تعریف کرد. این روش نیز به عنوان مدل تعادل آب در استرالیا شناخته شده است (AWBM). معادله ی این فیلتر به صورت زیر است:

$$q_{b(i)} = \frac{k}{1+c} q_{b(i-1)} + \frac{c}{1+c} q_{(i)} \quad (7)$$

(پارامترهای موجود در روش پیشین ذکر شده است).

IHACRES three parameter algorithm

در سال ۱۹۹۳ Jakeman و Hornbarger الگوریتم دوپارامتری Boughton را توسعه دادند و به منظور جدایش جریان الگوریتمی که بارش موثر (u) را به اجزای سریع و آهسته تقسیم کرده است را تعریف کردند. در این الگوریتم q_b و q_f که به ترتیب معرف جریان رواناب مستقیم و جریان پایه است، توسط معادلات زیر تعریف شده است.

$$q_{b(i)} = \beta_s u_{(i)} - \alpha_s q_{b(i-1)} \quad (8)$$

$$q_{f(i)} = \beta_q u_{(i)} - \alpha_q q_{f(i-1)} \quad (9)$$

که در آن α 's و β 's پارامتر فیلتر و پسوند q و s به ترتیب به جریان سریع و آهسته اشاره می کند. لازم به ذکر است که α_s منفی است. با حذف u از این معادلات، بیان رواناب مستقیم به صورت تفاضل بین جریان پایه و جریان کل است. نتایج برای جریان پایه در معادله ی زیر ارائه شده است:

$$q_{b(i)} = -\frac{\alpha_s \beta_q + \alpha_q \beta_s}{\beta_q + \beta_s} q_{b(i-1)} + \frac{\beta_s}{\beta_q + \beta_s} [q_{(i)} + \alpha_q q_{(i-1)}] \quad (10)$$

در این تحقیق به منظور تفکیک جریان پایه در هیدروگراف دبی دو چشمه ی دیمه و پیرغار، از سه روش شامل شیمی نگار، فیلتر دیجیتال بازگشتی و گرافیکی استفاده شده است:

شیمی نگار

جدایش هیدروگراف تخلیه ی چشمه بر مبنای شیمی نگار بر اساس فرضیاتی استوار است؛ به طوری که فرض می شود ساختار شیمیایی آب ورودی به آبخوان به طور قابل ملاحظه ای با آب موجود در آبخوان قبل از بارش متفاوت است. مفروضات دیگر این روش عبارتند از (Dreiss, 1989):

الف) غلظت ترکیبات شیمیایی از لحاظ مکان و زمان در آب بارش و بارش های پیشین، یکنواخت باشد.

ب) تاثیر فرآیندهای دیگر در طول واقعه ی بارندگی شامل تغذیه توسط آب های سطحی قابل اغماض باشند.

ج) غلظت املاح در طی انتقال تحت تاثیر واکنش های شیمیایی در آبخوان نباشد. البته به دلیل این که در طول جریان آب های ورودی جدید به آبخوان از طریق محیط متخلخل، انحلال اندکی در سنگ های کربناته صورت می گیرد، فرض آخر تا حدی ممکن است دارای عدم قطعیت باشد. غلظت یون کلسیم در آب چشمه بعد از بارش های سنگین به سرعت کاهش می یابد. با فرض اختلاط ساده ای از آب قدیمی آبخوان (Q_{old}) و آب جدید نفوذی (Q_{new})، تخلیه ی ثبت شده ی کلی چشمه، مجموعه ای از هردو مولفه است (Dreiss, 1989).

$$Q_{total} = Q_{old} + Q_{new} \quad (1)$$

اگر واکنش های شیمیایی در آبخوان باعث تغییرات سریع و مهم در غلظت یون کلسیم در آب بارش نفوذی نشود (اغلب در مورد آبخوان های کارستی آزاد و آبخوان های شکافی، جایی که سرعت جریان بالا است)، رابطه ی تعادلی یون کلسیم (C) در آب چشمه عبارت است از:

$$Q_{total} \times C_{total} = Q_{old} \times C_{old} + Q_{new} \times C_{new} \quad (2)$$

که در این عبارت Q_{total} دبی کل چشمه، C_{total} غلظت کلسیم در آب چشمه، Q_{old} آب قدیمی آبخوان (آب موجود قبل از واقعه ی بارش در آبخوان)، C_{old} غلظت یون کلسیم در آب چشمه قبل از واقعه ی بارش، C_{new} آب جدید نفوذی حاصل از واقعه ی بارش است. اگر C_{new} بسیار کمتر از C_{old} باشد (غلظت یون کلسیم در آب باران عموماً کمتر از ۵ میلی گرم بر لیتر است)، در نتیجه جرم ورودی یون کلسیم در مقایسه با جرم آن در آب قدیمی نسبتاً کمتر است. بنابراین:

$$Q_{new} \times C_{new} \ll Q_{old} \times C_{old} \quad (3)$$

با اعمال شرط فوق در معادله ی (۲)، Q_{old} به دست می آید:

$$Q_{old} = \frac{Q_{total} \times C_{total}}{C_{old}} \quad (4)$$

با ترکیب معادله ی (۱) و (۲)، Q_{new} به دست می آید:

$$Q_{new} = Q_{total} - \frac{Q_{total} \times C_{total}}{C_{old}} \quad (5)$$

با استفاده از معادله ی (۵)، می توان دبی آب نفوذی حاصل از واقعه ی بارش (Q_{new}) را تخمین زد.

با توجه به روش فوق، دبی کل ماهانه و غلظت ماهانه ی یون کلسیم (meq/l) چشمه های دیمه و پیرغار در طی سال های (۱۳۷۸-۱۳۹۰) جهت جدایش هیدروگراف تخلیه ی چشمه بر مبنای شیمی نگار مورد استفاده قرار گرفته است.

در این رابطه پارامتر α ثابت فیلتر است.

Eckhardt Filter

روش ارائه شده توسط (Eckhardt, 2008) در هیدروگراف به منظور جدایش جریان پایه با انجام فیلتر پایین گذر مورد استفاده قرار می‌گیرد (معادله ۱۷). این فیلتر بازگشتی به تعیین دو پارامتر نیاز دارد. (۱) ثابت منحنی فرود α و (۲) مقدار ماکزیمم شاخص جریان پایه که قابل اندازه‌گیری نیست؛ اما با انطباق نتایج روش‌های دیگر بهینه‌سازی شده است. این معادله، با شرط $q_{b(i)} \leq q_{(i)}$ برقرار است. در این معادله BFI_{max} حداکثر مقدار شاخص جریان پایه می‌باشد که توسط الگوریتم می‌تواند مدل شود و α پارامتر فیلتر مربوط به حوضه ی آبخیز است.

$$q_{b(i)} = \frac{(1 - BFI_{max})\alpha q_{b(i-1)} + (1 - \alpha)BFI_{max} q_{(i)}}{1 - \alpha BFI_{max}} \quad (16)$$

Eckhardt استفاده از داده‌های ردیابی را جهت کالیبره کردن پارامتر BFI_{max} پیشنهاد کرده است؛ اما اطلاعات لازم در این مطالعه، در دسترس نیست. در این فیلتر تا حدودی ویژگی‌های هیدرولوژیک جریان و حوضه در نظر گرفته می‌شود (Eckhardt, 2008).

روش گرافیکی

در روش گرافیکی سهم جریان مجرای و افشان بر اساس ضرایب فرود محاسبه می‌گردد. در تعیین حد بین جریان افشان و مجرای، نقطه‌ای پایان جریان مجرای با شروع کوچکترین ضریب فرود محاسبه می‌شود. در این تحقیق با استفاده از نرم افزار AutoCad با برون‌یابی نقطه‌ای شروع کوچک‌ترین ضریب فرود تا زمان مصادف با قله‌ی هیدروگراف و سپس اتصال این نقطه به زمان شروع یال صعودی هیدروگراف، جریان افشان و مجرای را از یکدیگر تفکیک گردید و سپس حجم جریان مجرای با محاسبه‌ی مساحت سطح بین خط رسم شده و منحنی هیدروگراف محاسبه گردید (Veni, 1994).

بحث و بررسی

در (اشکال ۲ و ۳) به ترتیب هایتوگراف بارش و هیدروگراف چشمه‌های دیمه و پیرغار ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود هیدروگراف چشمه‌ی پیرغار در هر سال دارای دبی با قله مشخص و نوک تیز می‌باشد، در حالی‌که چشمه دیمه دارای چندین پیک نامشخص است. تغییرات دبی چشمه‌ی دیمه در مقایسه با چشمه‌ی پیرغار کمتر است؛ به‌طوری‌که نسبت متوسط دبی بیشینه به کمینه سال‌های مورد مطالعه در چشمه‌ی دیمه و پیرغار به ترتیب ۱/۵۸، ۹/۵۷ است. به منظور مشاهده‌ی این تغییرات به عنوان نمونه هیدروگراف و هیتوگراف یک سال ترسیم شده است (شکل ۴).

در (شکل ۴ الف) هیدروگراف چشمه ی دیمه، نشان می‌دهد که افزایش در میزان جریان پایه، موجب انتقال یال فرورونده به سطحی بالاتر از جریان پایه ی قبل از رخداد بارش شده است. این حالت ممکن است در نتیجه‌ی (۱) عدم توسعه یافتگی شکستگی‌ها و انتقال عمده‌ی آب، از طریق خلل و فرج (۲) حوضه ی آگیر بزرگ‌تر (۳) ذوب تدریجی و طولانی مدت برف حاصل شده باشد. در صورتی‌که در چشمه پیرغار در (شکل ۴ ب) افزایش در سطح جریان پایه مشاهده نمی‌شود؛ این حالت ممکن است به دلیل انتقال بارش از طریق شبکه ی توسعه یافته ای از شکستگی‌ها باشد که در نتیجه‌ی آن منحنی فرود به میزان جریان پایه قبل از رخداد بارش می‌رسد.

با قرار دادن $C = \beta_s / \beta_q$ و $k = -\alpha_s - \alpha_q \beta_s / \beta_q$ در معادله‌ی بالا الگوریتم IHACRES به شکل زیر ارائه می‌شود که می‌تواند به شکل گسترده‌ای از فیلتر Boughton با یک پارامتر اضافی دیده شود.

$$q_{b(i)} = \frac{k}{1+c} q_{b(i-1)} + \frac{c}{1+c} (q_{(i)} + \alpha_q q_{(i-1)}) \quad (11)$$

که در آن $q_{(i-1)}$ دبی کل برای لحظه ی پیش از نمونه‌برداری i است. در سال (Chapman, 1999) الگوریتم‌های یک دو و سه پارامتری را با یکدیگر مقایسه کرد. نتایج نشان داد که الگوریتم دوپارامتری، جدایش قابل قبول‌تری از جریان را نسبت به یک و سه پارامتر داشته است.

Lyne & Hollick algorithm

در سال (Hollick and Lyne, 1979) به معرفی فیلتر حوزه‌ی زمان جهت جدایش جریان پایه پرداختند:

$$q_{f(i)} = \alpha q_{f(i-1)} + \frac{(q_{(i)} + q_{(i-1)})}{2} (1 + \alpha) \quad (12)$$

در این الگوریتم $q_{f(i)}$ جریان سریع فیلترشده برای آمین لحظه‌ی نمونه‌برداری، $q_{f(i-1)}$ جریان سریع فیلترشده برای لحظه‌ی پیش از نمونه برداری i ، α ثابت فیلتر است. به منظور برآورد جریان پایه، متوسط میانگین جریان پایه ابتدا به جلو و سپس به عقب در زمان فیلتر شدند.

Chapman algorithm

در سال (Chapman, 1999) تعیین کردند که روش فیلتر Lyne و Hollick با تئوری فرود متداول ناسازگار است؛ به دلیل این‌که زمانی‌که رواناب سطحی وجود نداشته باشد جریان پایه‌ی پیش‌بینی شده ثابت است. بنابراین آن را با یک فیلتر واقعی‌تر از لحاظ فیزیکی اصلاح کرد. فیلتر ابتدا به جلو، عقب و سپس جلو در طول زمان برای متوسط داده‌های جریان روزانه به کار برده شد و برآورد جریان پایه از این فیلتر به طور مطلوبی با داده‌های جریان پایه مقایسه شد. بنابراین معادله‌ی Chapman اصلاح شده به شکل زیر است:

$$q_{f(i)} = \frac{3\alpha - 1}{3 - \alpha} q_{f(i-1)} + \frac{2}{3 - \alpha} (q_{(i)} + \alpha q_{(i-1)}) \quad (13)$$

Furey & Gupta filter

در سال (Gupta and Furey, 2001) فیلتر فیزیکی را با استفاده از معادله‌ی تعادل جرمی برای جریان پایه بنیاد نهادند که به صورت ذیل است:

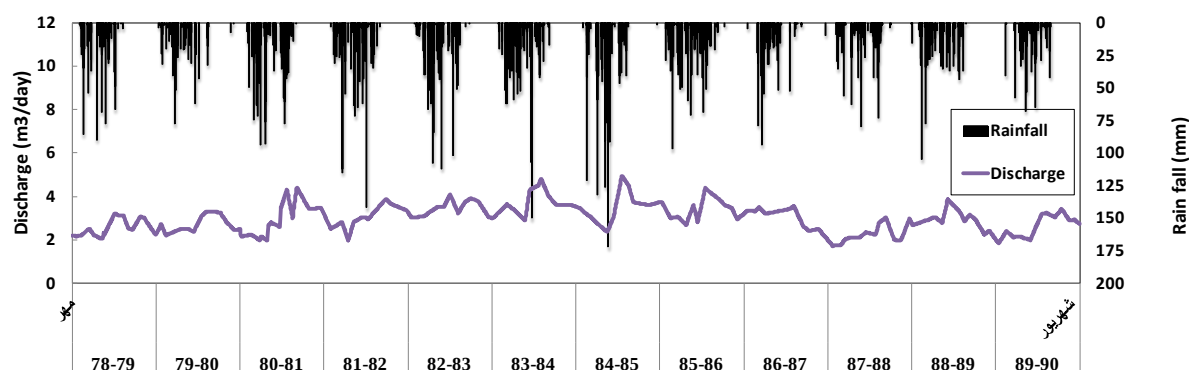
$$q_{f(i)} = (1 - \gamma) q_{b(i-1)} + \gamma \frac{C_3}{C_1} (q_{(i-d-1)} + q_{b(i-d-1)}) \quad (14)$$

در این الگوریتم، $q_{(i-d-1)}$ دبی کل برای لحظه‌ی پیش از نمونه‌برداری i با در نظرگرفتن زمان تاخیر (m^3/s) ، $q_{b(i-d-1)}$ جریان پایه‌ی فیلترشده برای لحظه‌ی پیش از نمونه‌برداری i با در نظرگرفتن زمان تاخیر (m^3/s) و C_3 و C_1 پارامتر فیزیکی فیلتر که به ترتیب مربوط به جریان سطحی و جریان زیرزمینی است، $1 - \gamma$ ثابت فرود حوضه و d زمان تاخیر می‌باشد.

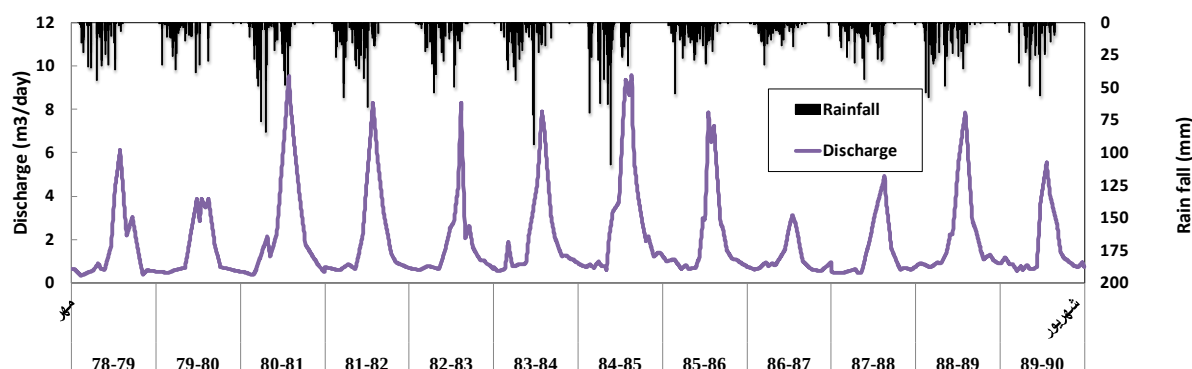
EWMA filter

مدل میانگین متحرک وزنی نمایی (EWMA) همان‌طور که در معادله‌ی (۱۶) نشان داده شده است؛ زمانی‌که با دیگر مدل‌ها مقایسه می‌شود؛ ساده تر به نظر می‌رسد و نتایج مناسبی را نشان می‌دهد. به عنوان مثال برای هر دوره‌ی زمانی t جریان پایه $q_{b(t)}$ از یک مجموعه سری زمانی با معادله ذیل به دست آمده است:

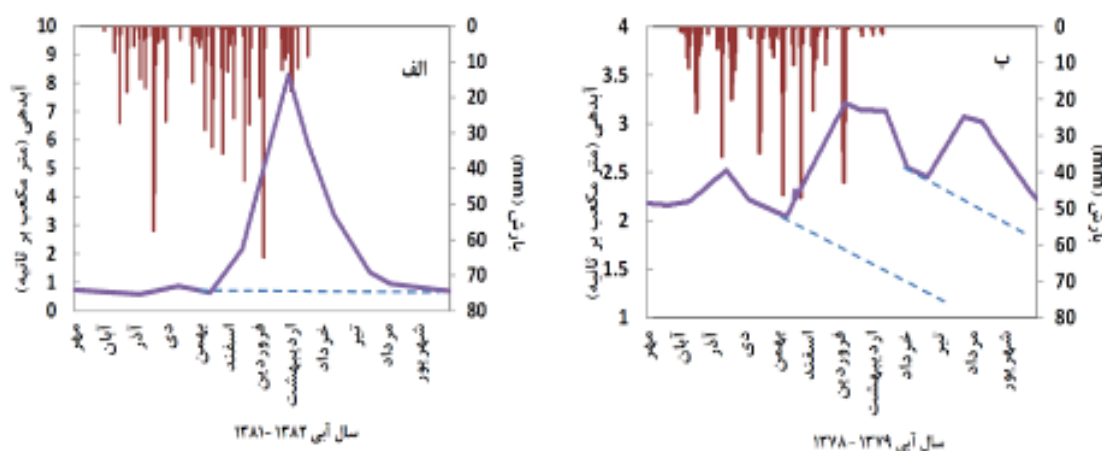
$$0 < \alpha < 1, t \geq 3 \quad q_{b(i)} = \alpha q_{(i)} + (1 - \alpha) q_{b(i-1)} \quad (15)$$



شکل ۲. هیدروگراف دبی و هایتوگراف بارش چشمه ی دیمه



شکل ۳. هیدروگراف دبی و هایتوگراف بارش چشمه ی پیرغار



شکل ۴. پاسخ آبخوان ها به بارش (الف) چشمه ی دیمه (ب) چشمه ی پیرغار

تفکیک جریان پایه بر اساس شیمی نگار

(اشکال ۵ و ۶) قسمتی از تغییرات ماهانه ی بارش، دبی، غلظت کلسیم آب خروجی و آب جدید نفوذی محاسبه شده از روش شیمی نگار را نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود بعد از وقوع بارش، غلظت کلسیم در آب خروجی چشمه ها افزایش یافته است. به نظر می رسد احتمالاً به دلیل پدیده ی *Piston flow* ابتدا آب های قدیمی موجود در آبخوان از چشمه خارج شده و سپس کاهش غلظت کلسیم، به دلیل ورود آب نفوذی جدید حاصل شده است. این افزایش و کاهش غلظت کلسیم در چشمه ی پیرغار به مدت ۴ ماه ولی در چشمه ی دیمه نزدیک به ۱۰ ماه ادامه دارد که ممکن است به دلیل بیشتر بودن سهم جریان مجرای و کانال ها و شکستگی ها در حوضه ی آبریز چشمه ی پیرغار

و سرعت بیشتر آب زیرزمینی در حوضه ی آبریز این چشمه در مقایسه با چشمه ی دیمه رخ داده باشد.

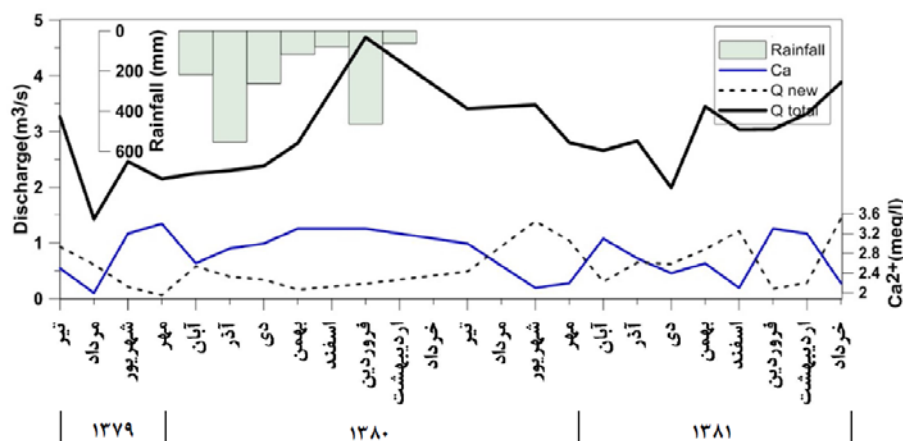
در چشمه ی دیمه حدود یک ماه بعد از افزایش در مقدار دبی کل (Q_{total})، افزایش تدریجی در مقدار آب جدید (Q_{new}) تخلیه شده، دیده می شود. این روند افزایشی آب جدید نفوذی از بهمن ماه سال ۱۳۸۰ آغاز شده و بعد از حداکثر خود در فروردین ماه سال ۱۳۸۱، در آبان ماه همین سال به حداقل رسیده است. تاخیر زمانی بین اوج دبی کل و دبی جدید حدوداً ۳ تا ۵ ماه در طول دوره آماری مشاهده می شود. در این چشمه اثر تدریجی آب جدید نفوذی حاصل از بارش، در حدود طول یک سال ظاهر می شود و متوسط درصد مشارکت آن در دبی کل چشمه در طول ۱۲ سال، حدود ۱۲٪ است (معادله

پیرگار محاسبه و ترسیم شده است (اشکال ۷ و ۸). با توجه به این که تخلیه‌ی ثبت شده‌ی کلی چشمه، مجموعه‌ی از دو مولفه‌ی دبی قدیمی و جدید است. بنابراین می‌توان دبی قدیمی را تقریباً معادل دبی پایه در نظر گرفت. لذا با در نظر گرفتن دبی قدیمی به عنوان یک مبنای مقایسه، با استفاده از روش‌های اتوماتیک موجود در نرم افزار BFI می‌توان دبی پایه را برآورد کرد و مناسب‌ترین روش تفکیک جریان را تعیین نمود. روش‌های تفکیک جریان پایه با استفاده از نرم افزار مذکور در (اشکال ۹ تا ۱۶) مربوط به چشمه‌ی دیمه و (اشکال ۱۷ تا ۲۶) مربوط به چشمه‌ی پیرگار ترسیم شده است. در (جدول ۱) ماکزیمم، متوسط و کمینه‌ی شاخص‌های جریان پایه‌ی چشمه‌های مذکور و مقایسه‌ی آن‌ها از طریق ضریب همبستگی و میزان خطا (RMSE) ارائه شده است.

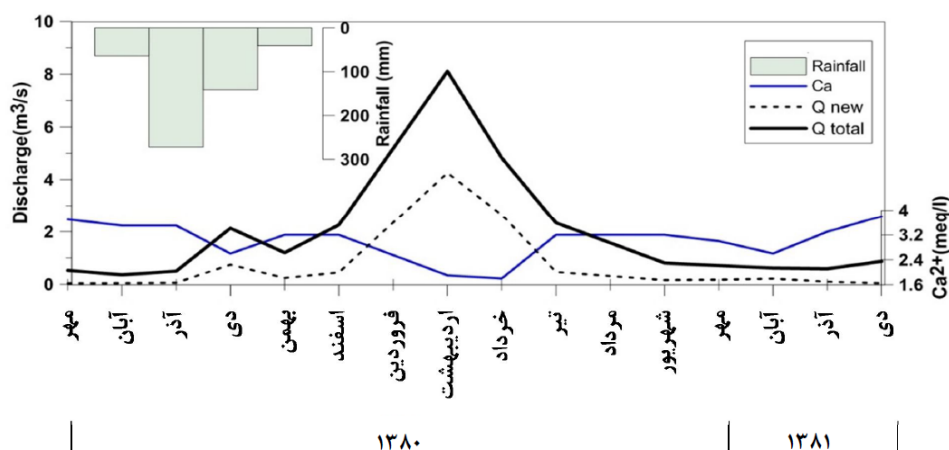
۵. در صورتی که در چشمه‌ی پیرگار، تقریباً همزمان با افزایش ناگهانی دبی کل (Q_{total})، افزایش در مقدار آب جدید (Q_{new}) مشاهده شده است و تاخیر زمانی بین اوج دبی کل و دبی جدید بسیار کم است. در بهمن ماه ۱۳۸۰ آب جدید نفوذی روند افزایشی داشته و در تیر ماه سال ۱۳۸۱ به حداقل رسیده است؛ لذا در این چشمه اثر تدریجی آب جدید نفوذی حاصل از بارش، در طول حدود ۵ ماه ظاهر می‌شود و متوسط درصد مشارکت آب جدید در دبی کل چشمه در طول ۱۲ سال، حدود ۳۳٪ است.

تفکیک جریان پایه بر اساس فیلتر دیجیتال بازگشتی

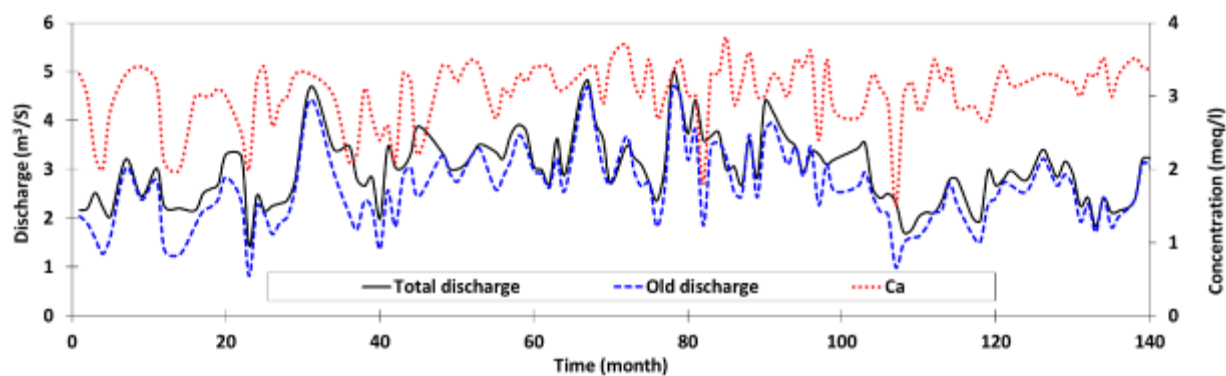
همان‌طور که قبلاً ذکر شد با استفاده از شیمی‌نگار می‌توان سهم دبی قدیمی به عنوان دبی پایه را بر آورد کرد. ولی با توجه به این که در بسیاری از موارد اطلاعات کیفی چشمه‌ها در دسترس نیست؛ می‌توان از روش‌های جدایش فیلتر دیجیتال بازگشتی به عنوان ابزاری جهت تفکیک جریان پایه در چشمه‌های کارستی استفاده نمود. بدین منظور تفکیک هیدروگراف و برآورد دبی پایه، با استفاده از تغییرات سری زمانی دبی کل و غلظت یون کلسیم، مطابق معادله‌ی ۲ و ۴، سری زمانی آب قدیمی (Q_{old}) چشمه‌های دیمه و



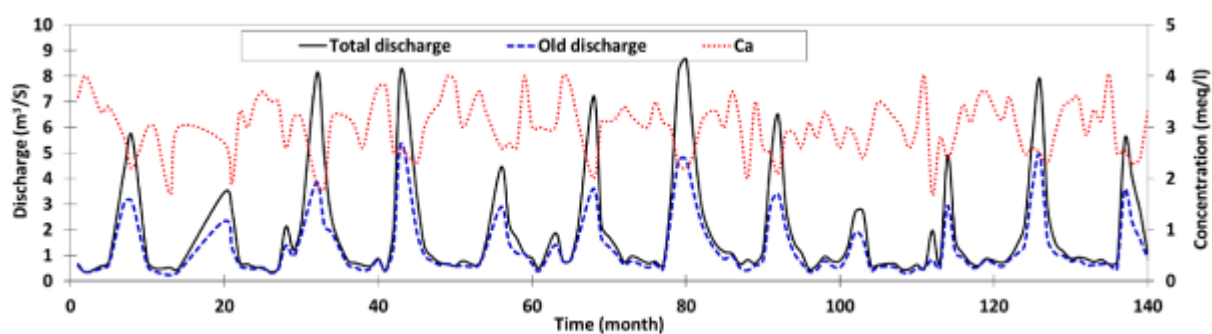
شکل ۵. نمودار تغییرات ماهانه‌ی یک واقعه‌ی بارش (۸۱ - ۱۳۸۰)، دبی کل، آب جدید نفوذی و غلظت کلسیم آب خروجی چشمه‌ی دیمه



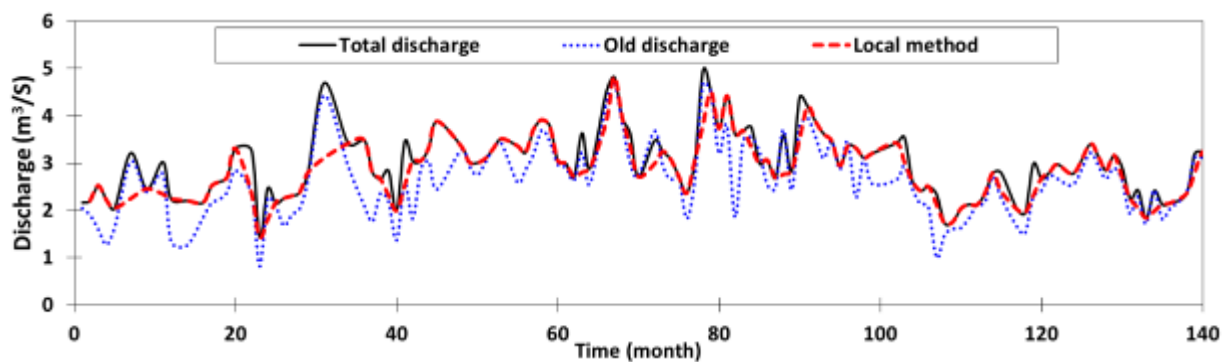
شکل ۶. نمودار تغییرات ماهانه‌ی یک واقعه‌ی بارش (۸۱ - ۱۳۸۰)، دبی کل، آب جدید نفوذی و غلظت کلسیم آب خروجی چشمه‌ی پیرگار



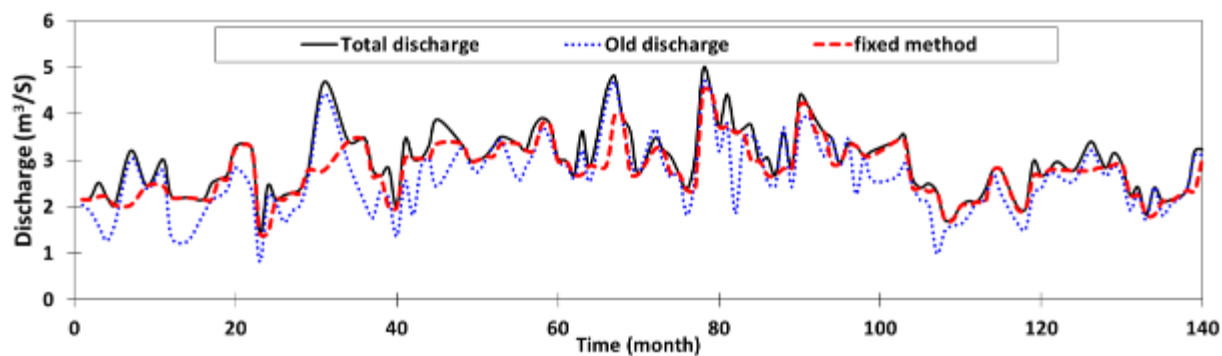
شکل ۷. نمودار تغییرات دبی کل، دبی قدیمی و غلظت کلسیم چشمه‌ی دیمه



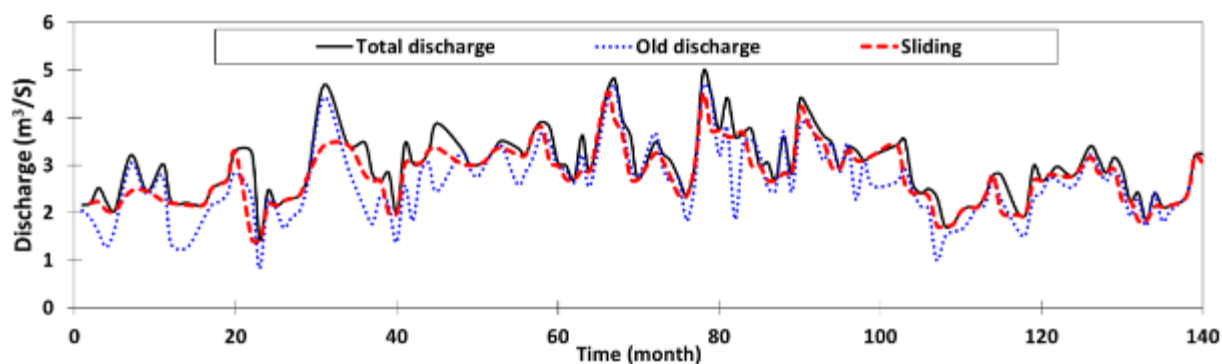
شکل ۸. نمودار تغییرات دبی کل، دبی قدیمی و غلظت کلسیم چشمه‌ی پیرغار



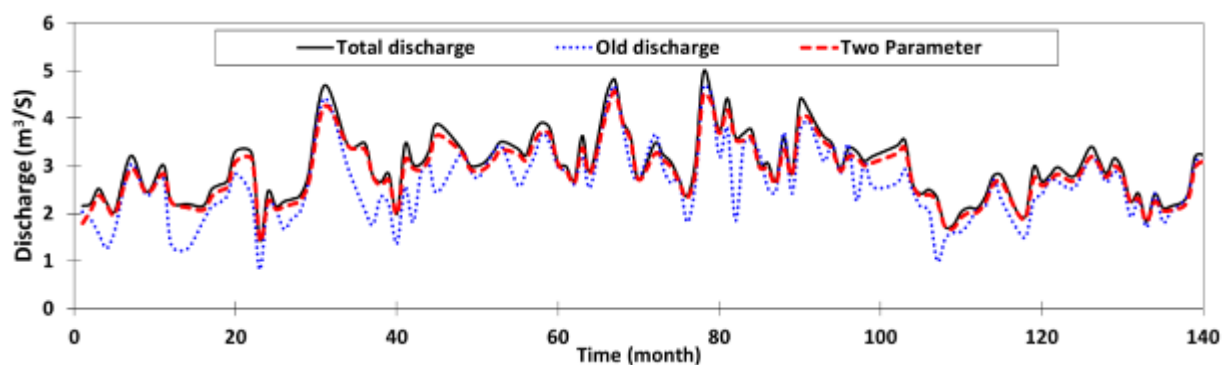
شکل ۹. تفکیک جریان پایه از دبی کل به روش Local minimum method و مقایسه با دبی قدیمی چشمه‌ی دیمه



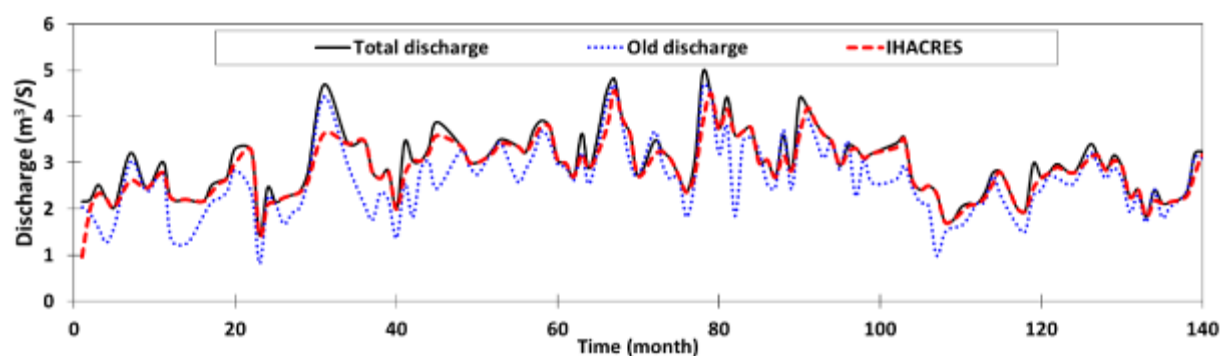
شکل ۱۰. تفکیک جریان پایه از دبی کل به روش Fixed interval method و مقایسه با دبی قدیمی چشمه‌ی دیمه



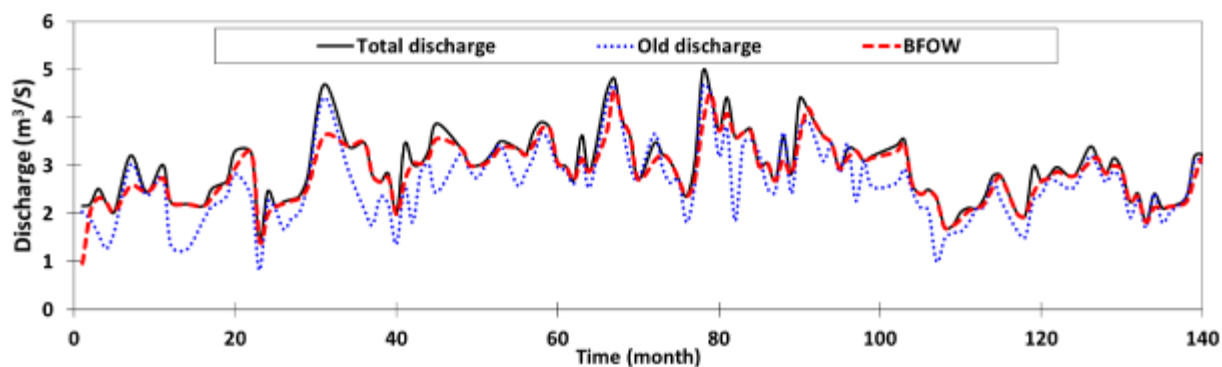
شکل ۱۱. تفکیک جریان پایه از دبی کل به روش Sliding interval method و مقایسه با دبی قدیمی چشمه‌ی دیمه



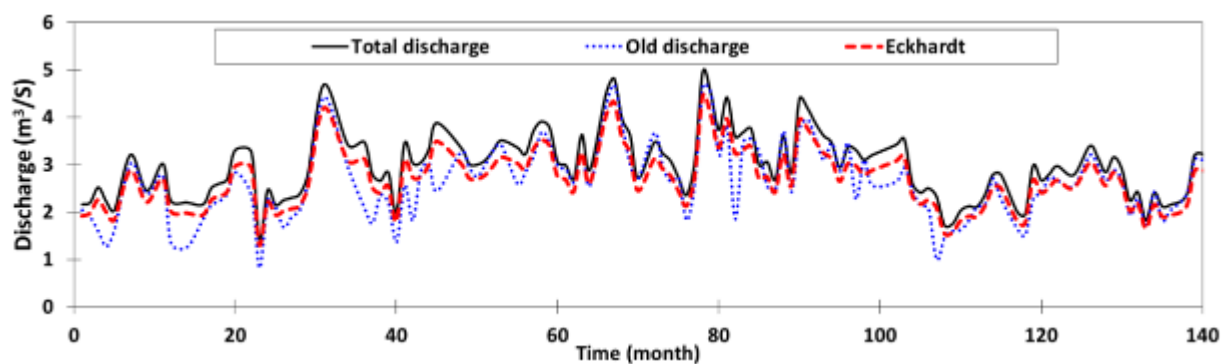
شکل ۱۲. تفکیک جریان پایه از دبی کل به روش Two - Parameter Algorithm و مقایسه با دبی قدیمی چشمه‌ی دیمه



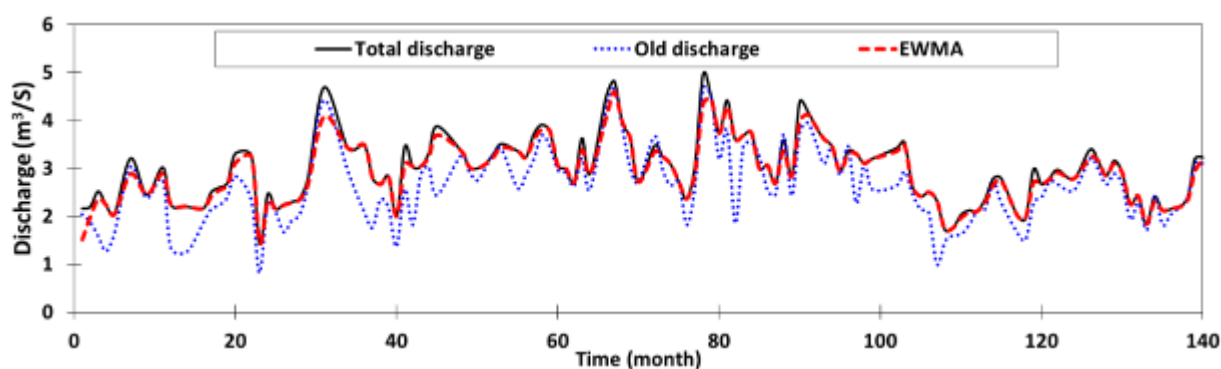
شکل ۱۳. تفکیک جریان پایه از دبی کل به روش IHACRES و مقایسه با دبی قدیمی چشمه‌ی دیمه



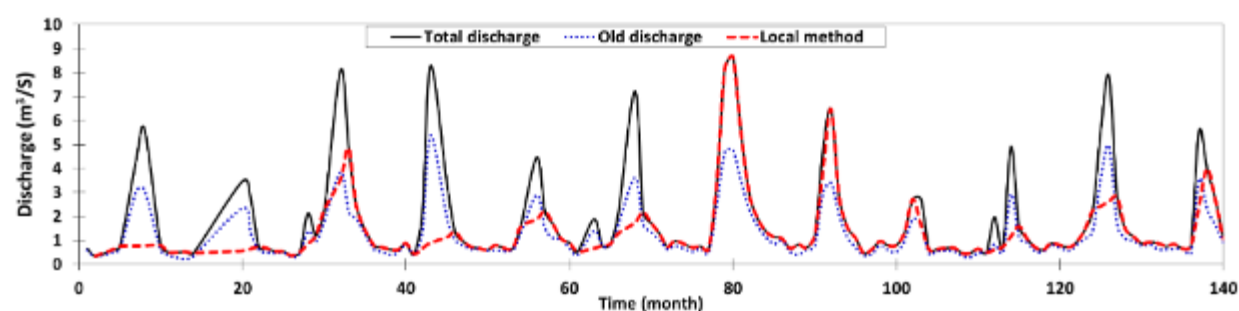
شکل ۱۴. تفکیک جریان پایه از دبی کل به روش BFOW - Lynie & Holick Algorithm و مقایسه با دبی قدیمی چشمه‌ی دیمه



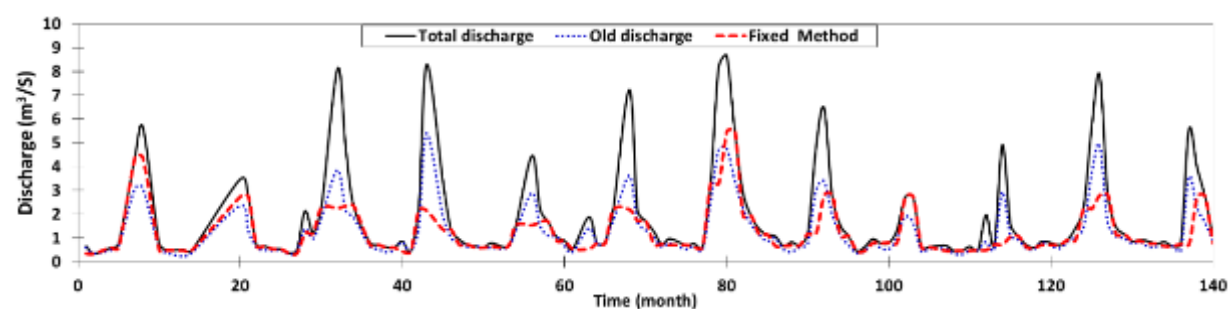
شکل ۱۵. تفکیک جریان پایه از دبی کل به روش Eckhardt Filter و مقایسه با دبی قدیمی چشمه‌ی دیمه



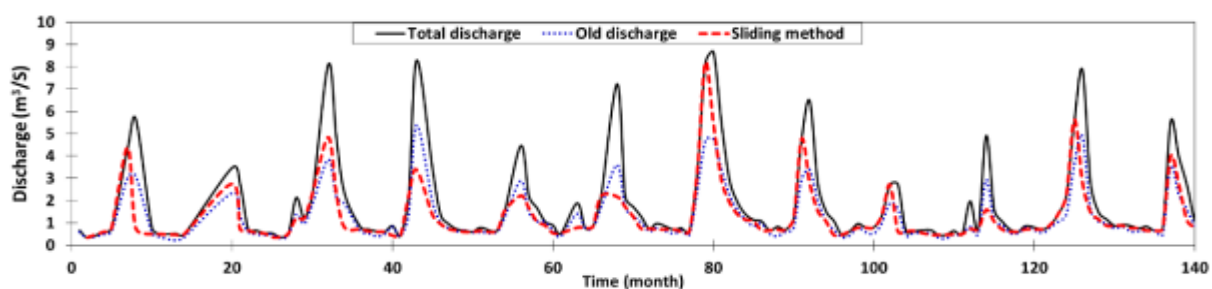
شکل ۱۶. تفکیک جریان پایه از دبی کل به روش EWMA و مقایسه با دبی قدیمی چشمه‌ی دیمه



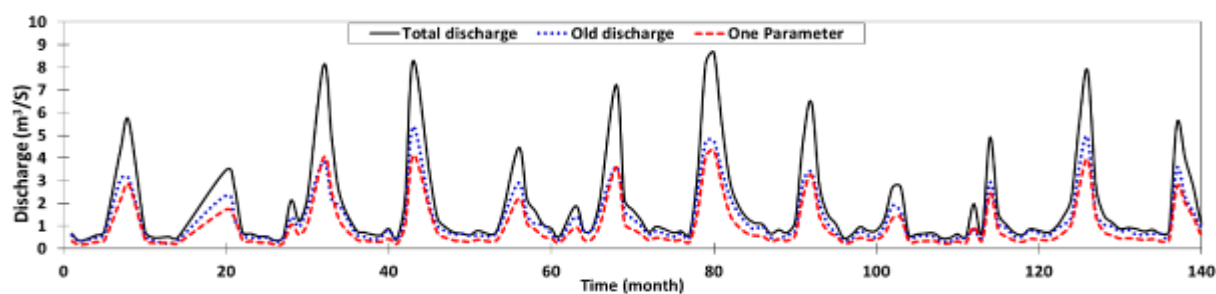
شکل ۱۷. تفکیک جریان پایه از دبی کل به روش Local minimum method و مقایسه با دبی قدیمی چشمه‌ی پیرغار



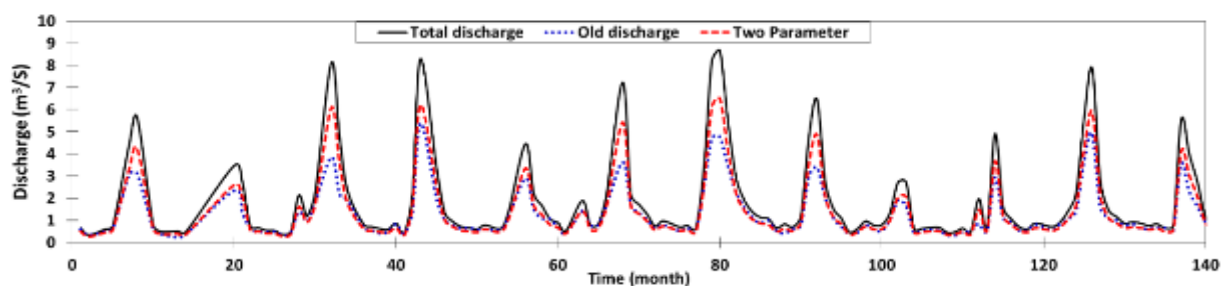
شکل ۱۸. تفکیک جریان پایه از دبی کل به روش Fixed interval method و مقایسه با دبی قدیمی چشمه‌ی پیرغار



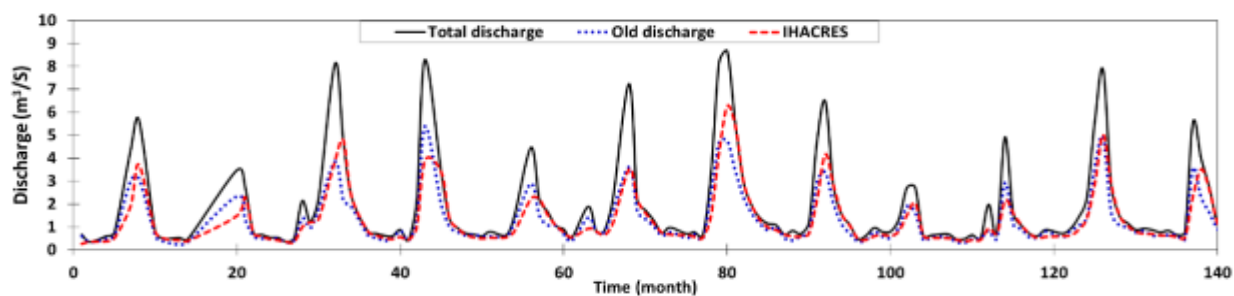
شکل ۱۹. تفکیک جریان پایه از دبی کل به روش Sliding interval method و مقایسه با دبی قدیمی چشمه‌ی پیرغار



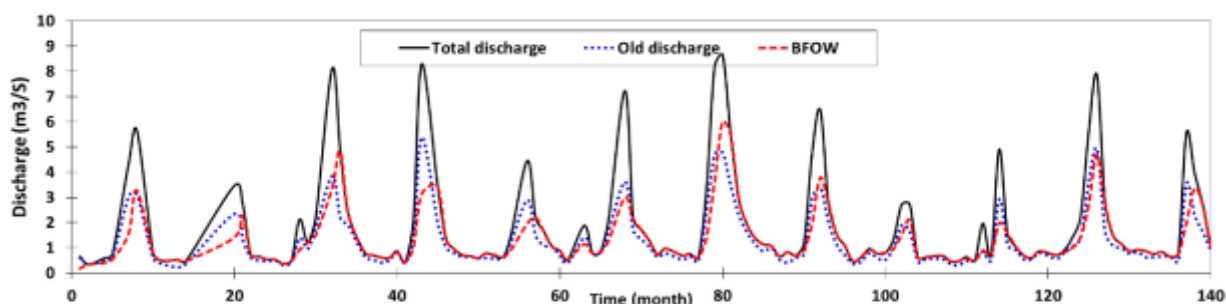
شکل ۲۰. تفکیک جریان پایه از دبی کل به روش One - Parameter Algorithm و مقایسه با دبی قدیمی چشمه‌ی پیرغار



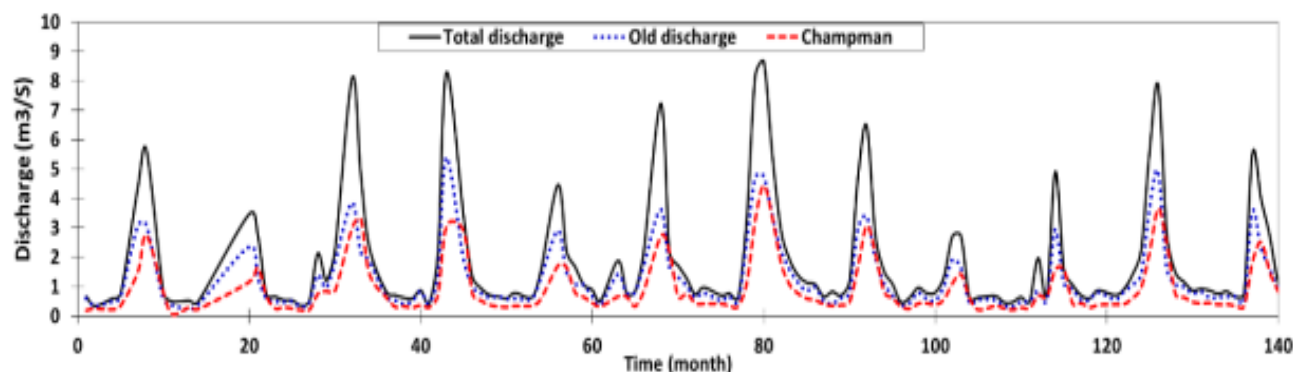
شکل ۲۱. تفکیک جریان پایه از دبی کل به روش Two - Parameter Algorithm و مقایسه با دبی قدیمی چشمه‌ی پیرغار



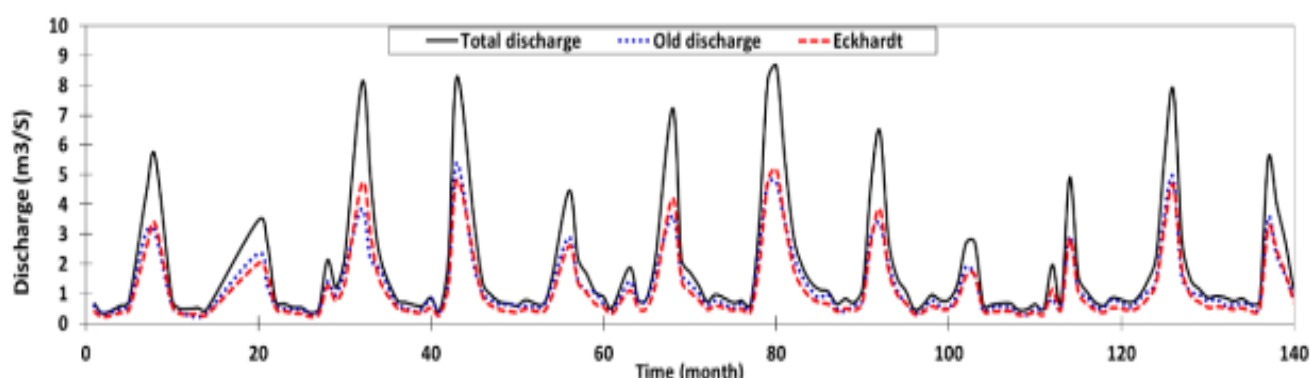
شکل ۲۲. تفکیک جریان پایه از دبی کل به روش IHACRES و مقایسه با دبی قدیمی چشمه‌ی پیرغار



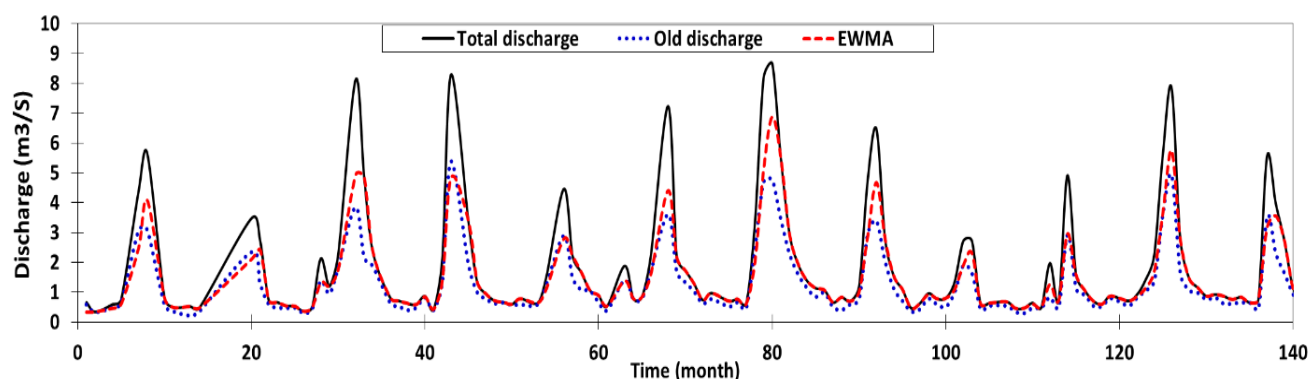
شکل ۲۳. تفکیک جریان پایه از دبی کل به روش BFLOW – Lynie & Holick Algorithm و مقایسه با دبی قدیمی چشمه‌ی پیرغار



شکل ۲۴. تفکیک جریان پایه از دبی کل به روش Chapman Algorithm و مقایسه با دبی قدیمی چشمه‌ی پیرغار



شکل ۲۵. تفکیک جریان پایه از دبی کل به روش Eckhardt Filter و مقایسه با دبی قدیمی چشمه‌ی پیرغار



شکل ۲۶. تفکیک جریان پایه از دبی کل به روش EWMA و مقایسه با دبی قدیمی چشمه‌ی پیرغار

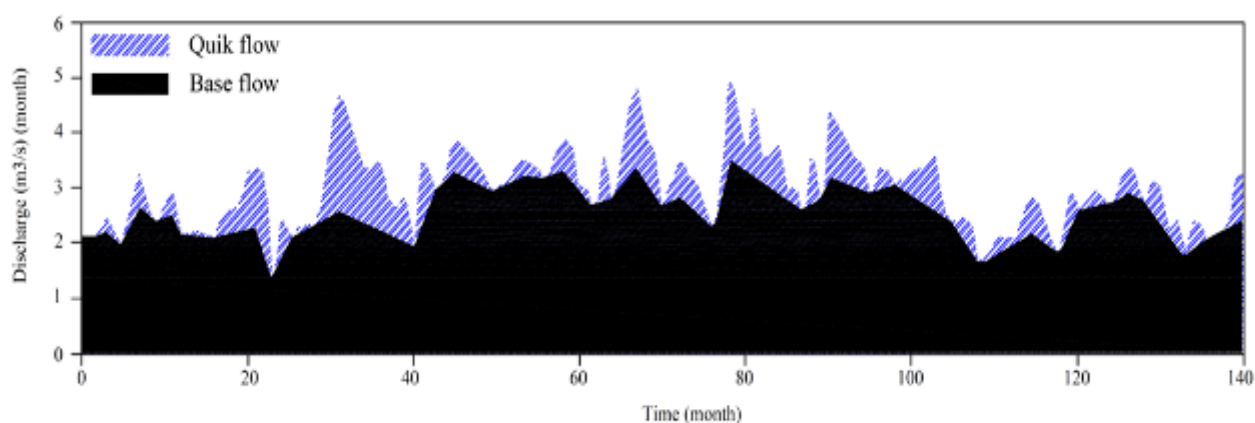
روش گرافیکی تفکیک جریان

هر چند پیش از این اشاره شده که روش گرافیکی جداسازی جریان به علت عدم به کارگیری یک معیار مستقیم از دقت لازم برخوردار نیست، اما جهت مقایسه نتایج آن با روشهای شیمی نگار و فیلتر دیجیتالی، جدایش دبی پایه‌ی دو چشمه‌ی مذکور با استفاده از روش مرسوم گرافیکی نیز انجام شده است (اشکال ۲۷ و ۲۸). با محاسبه مساحت زیر خط دبی پایه و دبی کل هیدروگراف‌ها و نسبت مساحت آن‌ها مشاهده می‌شود درصد جریان پایه در چشمه‌ی دیمه برابر با ۰/۸۵ و در چشمه‌ی پیرغار معادل ۰/۵۴ می‌باشد.

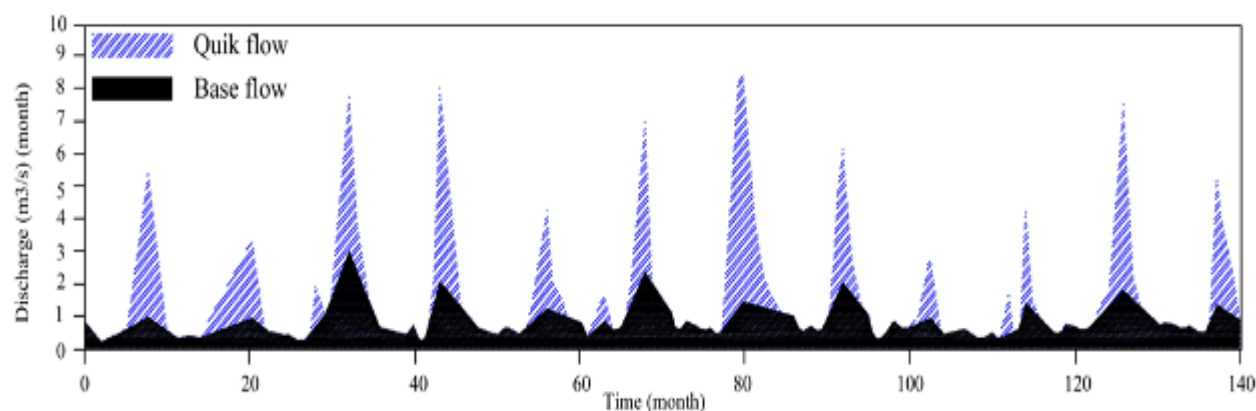
همان‌طور که در (جدول ۱) و (اشکال ۲۹ و ۳۰) مشاهده می‌شود در هر دو چشمه، روش Eckhardt Filter (اشکال ۱۵ و ۲۵) بیشترین همبستگی (R^2) و کمترین مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) را دارد و مناسب‌ترین روش تفکیک جریان در بین روش‌های اتوماتیک دیگر می‌باشد. در روش مذکور، میانگین شاخص جریان پایه در چشمه‌های دیمه و پیرغار به ترتیب ۰/۹ و ۰/۶۱ محاسبه شده است. همچنین جدایش دبی پایه دو چشمه‌ی مذکور با استفاده از روش گرافیکی نیز با درصد جریان پایه‌ی بدست آمده به روش‌های شیمی نگار و روش فیلتر Eckhardt Filter مشابهت زیادی دارد.

جدول ۱. شاخص‌های جریان پایه بدست آمده برای چشمه‌های دیمه و پیرغار با استفاده از روش‌های تفکیک فیلتر دیجیتال بازگشتی و مقایسه آن‌ها از طریق ضریب همبستگی و میزان خطا (RMSE)

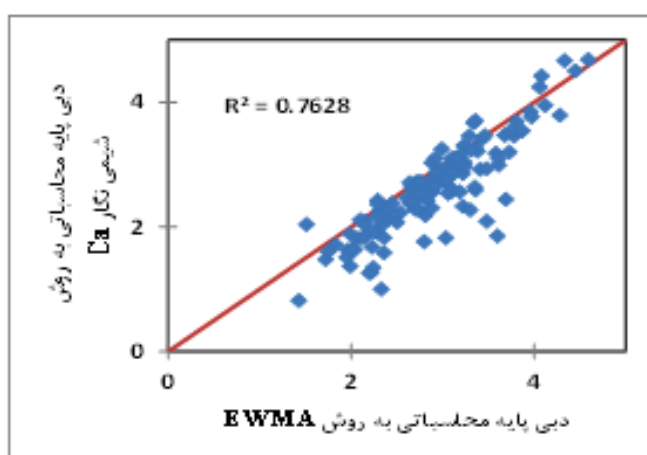
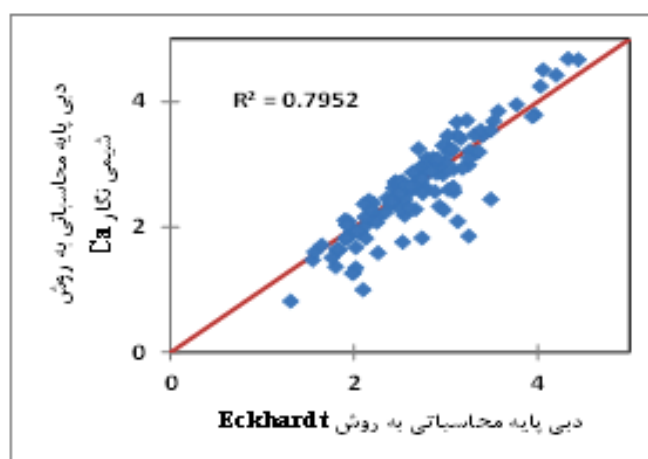
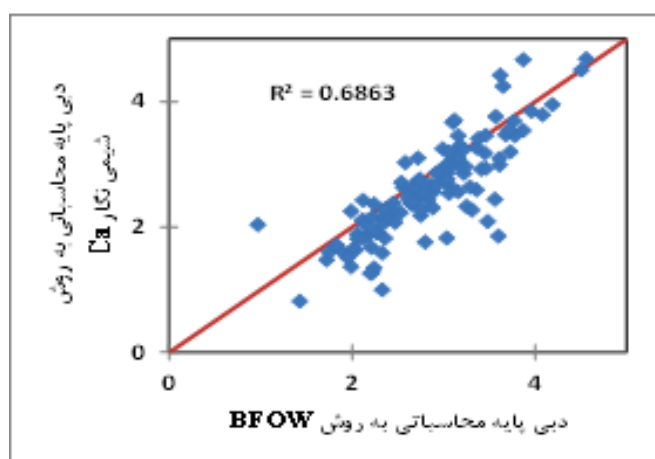
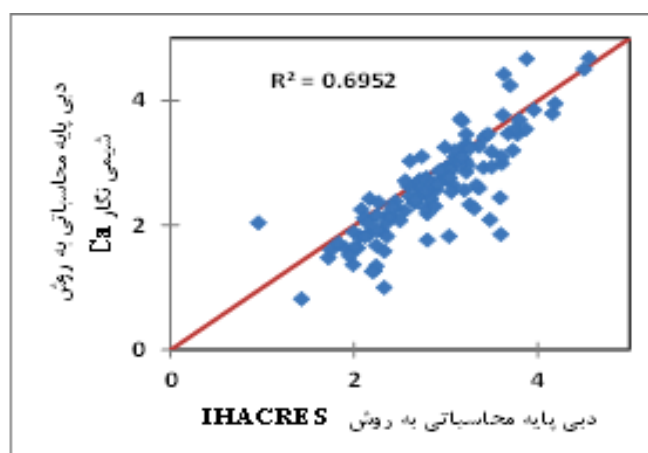
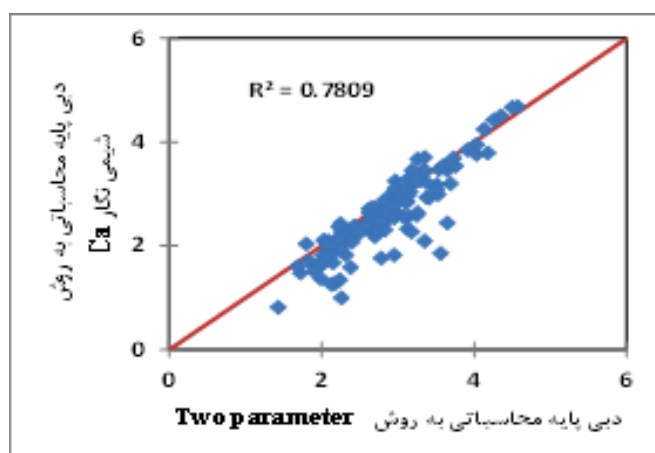
Method	Pireghar Spring					Dimeh Spring				
	R ²	RMSE	BFI	BFI	BFI	R ²	RMSE	BFI	BFI	BFI
			Min	Mean	Max			Min	Mean	Max
One parameter algorithm	۰/۹۶	۰/۰.۳۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	-	-	-	-	-
Two Parameter algorithm	۰/۹۶	۰/۰.۴۱	۰/۷۵	۰/۷۵	۰/۷۵	۰/۷۸	۰/۰.۳۸	۰/۸۳	۰/۹۶	۱
IHACRES	۰/۸	۰/۰.۴۸	۰/۳۸	۰/۷۹	۱	۰/۶۹	۰/۰.۴۳	۰/۴۴	۰/۹۶	۱
BFOV	۰/۷۲	۰/۰.۵۴	۰/۳۵	۰/۸۵	۱	۰/۶۸	۰/۰.۴۳	۰/۴۵	۰/۹۶	۱
Champman algorithm	۰/۸۱	۰/۰.۵۱	۰/۱۵	۰/۵۲	۱	-	-	-	-	-
Furey & Gupa filter	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Eckhardt filter	۰/۹۷	۰/۰.۲۳	۰/۵۷	۰/۶۱	۰/۷۶	۰/۸	۰/۰.۳	۰/۸۹	۰/۹	۰/۹۱
EWMA	۰/۸۹	۰/۰.۴۸	۰/۵	۰/۹۱	۱	۰/۷۶	۰/۰.۴۲	۰/۷	۰/۹۷	۱



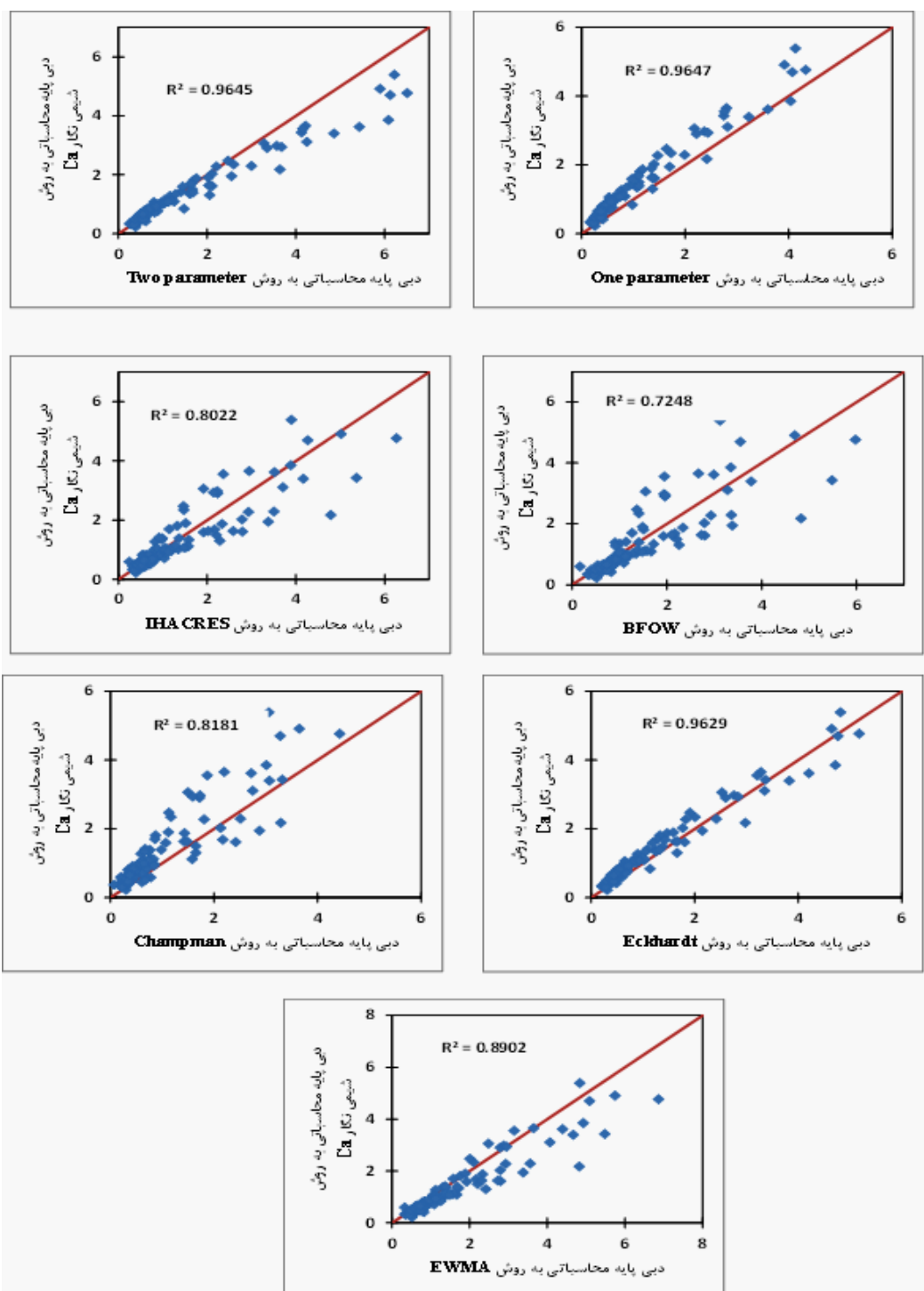
شکل ۲۷. جدایش دبی پایه با استفاده از روش گرافیکی در چشمه‌ی دیمه



شکل ۲۸. جدایش دبی پایه با استفاده از روش گرافیکی در چشمه‌ی پیرغار



شکل ۲۹. مقایسه دبی پایه محاسباتی به روش شیمی نگار و انواع روشهای دیجیتال برگشتی و ضریب همبستگی بین آنها در چشمه‌ی دیمه



شکل ۳۰- مقایسه دبی پایه محاسباتی به روش شیمی نگار و انواع روشهای دیجیتال برگشتی و ضریب همبستگی بین آن‌ها در چشمه‌ی پیرغار

نتیجه گیری

در (جدول ۲) جریان پایه‌ی به دست آمده از این سه روش ارائه شده است. نتایج به دست آمده مشابهت درصد جریان پایه را با استفاده از این سه روش نشان می‌دهد. با توجه به عدم به کارگیری یک معیار مستقیم در روش گرافیکی مرسوم جداسازی جریان افشان و مجرای و عدم دقت لازم برای داده های طولانی مدت، بکار گیری روش شیمی نگار به منظور بررسی هیدروگراف جریان و جدایش جریان پایه می تواند بسیار مناسب باشد. اما با توجه به این که در بسیاری موارد اطلاعات کیفی همانند غلظت کلسیم به منظور بررسی

هیدروگراف جریان و جدایش جریان پایه در دسترس نیست، می توان از روش های جدایش فیلتر دیجیتال موجود که عمدتاً در جریان آب سطحی به کار برده شده است؛ در چشمه های کارستی نیز استفاده کرد. نتایج این تحقیق نشان داده است که از بین روش های الگوریتم عددی، روش Eckhardt Filter مناسب ترین روش تفکیک جریان بر اساس مقایسه ی با روش جدایش جریان بر مبنای روش شیمی نگار یون کلسیم می باشد. بر اساس این روش میانگین شاخص جریان پایه در چشمه های دیمه و پیرغار به ترتیب ۰/۹ و ۰/۶۱ محاسبه شده است.

سهم جریان مجرای در چشمه ی پیرغار نسبت به چشمه ی دیمه بیشتر بوده و در نتیجه از جریان سریع و کارستی شدن بیشتری برخوردار است؛ اما چشمه ی دیمه سیستم افشان داشته و احتمالاً کارست در حوضه ی آبگیر این چشمه توسعه ی چندانی نداشته است. نتایج مذکور، کاربرد مفیدی در تعیین رفتار دینامیکی آب زیرزمینی و پشته‌های علمی در تعیین راه کارهای مناسب در مدیریت کمی و کیفی آب آبخوان و حوضه ی آبگیر منطقه را در پی خواهد داشت.

با استفاده از بررسی تغییرات سری زمانی بارش، دبی، و غلظت یون کلسیم در چشمه ی دیمه و پیرغار به ترتیب اثر تدریجی آب جدید نفوذی حاصل از بارش در طول ۱۲ و ۵ ماه ظاهر می شود. هرچند که مساحت حوضه آبگیر و میزان بارش در چشمه ی دیمه بیش از چشمه پیرغار می باشد، درصد مشارکت آب جدید در دبی کل چشمه ی دیمه (حدود ۱۲٪) کمتر از چشمه ی پیرغار به میزان ۳۳٪ است. لذا با توجه به پایین بودن شاخص جریان پایه و درصد بیشتر مشارکت آب جدید در چشمه ی پیرغار نسبت به چشمه ی دیمه، می توان گفت

جدول ۲. مقایسه نتایج برآورد سهم جریان پایه در چشمه های مورد مطالعه براساس روشهای مختلف

نام چشمه	جریان پایه با استفاده از روش شیمی نگار	جریان پایه با استفاده از روش فیلتر دیجیتال بازگشتی Eckhardt Filter	جریان پایه با استفاده از روش گرافیکی
چشمه ی دیمه	۰/۸۷	۰/۹	۰/۸۵
چشمه ی پیرغار	۰/۷	۰/۶۱	۰/۵۴

منابع

- شجاع. ع، ۱۳۹۰، بررسی تاثیر تغییرات الگوی بارش بر مشخصات هیدروگراف چشمه های کارستی، پایان نامه ی کارشناسی ارشد، بخش زمین شناسی دانشگاه شیراز، شیراز، ایران.
- قنبرپور. م. ر، تیموری. م، غلامی. ش. ع، ۱۳۸۷، مقایسه ی روش های برآورد دبی پایه بر اساس تفکیک هیدروگراف جریان (مطالعه موردی حوضه آبخیز کارون)، مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی - سال دوازدهم - شماره چهل و چهارم.
- کاوسی. حیدری. ع، ۱۳۸۷، تعیین مرز بین جریان افشان (Diffuse flow) و مجرائی (Conduit flow) در سازندهای کارستی. پایان نامه کارشناسی ارشد، بخش علوم زمین، دانشگاه شیراز، شیراز - ایران.
- کلانتری. ن، محمدی بهزاد، ح، چرچی. ع، کشاورزی. م، ۱۳۹۰، چشمه های کارستی به عنوان ساده ترین ابزار برای تعیین خصوصیات هیدروژئولوژیکی آبخوان های کارستی، مطالعه موردی چشمه بی بی تلخون، استان خوزستان، مجله زمین شناسی کاربردی پیشرفته، شماره ۲، جلد ۱.
- Ashton. K., 1966, The analysis of flow data from karst drainage system. Trans. Cave Res. Group Great Britain, Vol:7, No: 2, p: 163-203
- Atkinson. T. C., 1977, Diffuse flow and conduit flow in limestone terrain in the Mendip Hills, Somerset (Great Britain), Journal of Hydrology, Vol: 35, p:93-110
- Boughton. W. C., 1993, A hydrograph-based model for estimating water National Conference, Pub, 93/14, p: 317-324
- Chapman. T. G., 1991, Comment on evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses, by RJ Nathan and TA McMahon, Water Resources Research, Vol: 27, No: 7, p: 1783 -1784
- Chapman. T. G., Maxwell. A. I., 1996, Baseflow separation comparison of numerical methods with tracer experiments. Institute Engineers Australia National Conference. Pub, 96/05, p: 539-545
- Chapman. T., 1999, A comparison of algorithms for streamflow recession and baseflow separation, Hydrological Processes, No: 3, p: 701-714
- Dickinson. W. T., Holland. M. E., Smith. G. L., 1967, An experimental rainfall-runoff facility Hydrology paper, Colorado State University, No: 25, pp: 78.
- Dreiss. S. J., 1989, Regional scale transport in a karst aquifer, Part 1, Component separation of spring flow hydrographs, Water Resoures, Vol: 25, No: 1, p:117-125
- Eckhardt. K., 2008, A comparison of baseflow indices, which were calculated with seven different baseflowseparation methods, Journal of Hydrology, Vol: 352, p: 168- 173
- Furey. P. R., Gupta. V. K., 2001, A physically based filter for separating base flow from streamflow time series, Water Resources Research, Vol: 37, No:11, p: 2709-2722
- Gonzales. A., Nonner. L., Heijkers. J., Uhlenbrook. S., 2009, Comparison of different baseflow separation methods in a lowland catchment, Hydrology and Earth System Sciences, No: 6, p: 3483-3515.
- Gregor. M., 2010, User Manual " BFI+ 3.0"
- Hall. A. J., 1971, Baseflow recessions and the baseflow hydrograph separation problem Hydrology papers, The Institution of Engineers, Australia, pp: 159-170.
- Jacobson. R. L., Longmuir. D., 1974, Controls on the quality variation of some carbonate spring waters, J Hydrol, No: 23, pp: 247 - 265
- Kresic. N., Stevanovic. Z., 2010, Groundwater hydrology of spring, Elsevier
- Lvovich. M. I., 1979, World water resources and their future. American Geophysical Union, Washington DC.

- Lyne. V. D., Hollick. M., 1979, Stochastic time-variable rainfall-runoff modelling, Institution of Engineers, Australia, Canberra, pp: 89 - 93
- Tallaksen. L. M., Van lanen. H. A., vaneds.J., 2004, Hydrological Drought – Processes and Estimation Methods for Streamflow and Groundwater, Developments in Water Science, 48. Amsterdam, Elsevier Science B.V, ISBN 0-444-51688-3, pp. 579
- Veni. G., 1994, Geomorphology, hydrodeology, geochemistry and evolution of the karstic lower Glen Rose aquifer, south-central Texas, Dissertation, Pennsylvania State University, pp.720