

مدل‌سازی آب‌دهی روزانه چشمه کارستی طی دوره فروکش جریان با استفاده از روش‌های تحلیلی

(مطالعه موردی: چشمه‌علی دامغان)

سید موسی حسینی* - استادیار دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران
اکرم عیوضی - دانشجوی کارشناسی ارشد ژئومورفولوژی، دانشگاه تهران

پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۰۴/۲۰ تأیید نهایی: ۱۳۹۲/۱۲/۲۱

چکیده

در این پژوهش، مدل تجربی *Mangin* و مدل *Coutagne* به منظور مدل‌سازی دبی روزانه چشمه‌علی دامغان در طول دوره فروکش مورد استفاده قرار گرفت. برای این منظور داده‌های روزانه دبی چشمه مورد مطالعه طی نه سال متوالی (از سال ۱۳۸۰ تا ۱۳۸۸) اخذ و بکار گرفته شد. روش اول، بر اساس تئوری جداسازی جریان سریع که در قسمت غیراشباع آبخوان به صورت موقت ناشی از تغذیه سطحی ذخیره‌شده از جریان پایه که در تشکیلات کارستی آبخوان مطابق با تئوری *Maillet* وجود دارد، استوار است. درحالی‌که روش دوم، منحنی فروکش را پاسخ سیستم تک مخزنی آبخوان به محرک ورودی (بارندگی) در نظر می‌گیرد. نتایج روش *Mangin* در مورد چشمه‌علی دامغان نشان داد که درصد مشارکت حجم جریان سریع در مقایسه با جریان پایه آبخوان کارستی از حجم کل جریان، بسیار اندک (۰/۵٪) می‌باشد که نشان‌دهنده درجه بالای توسعه‌یافتگی بخش غیراشباع این آبخوان کارستی نسبت به بخش پائینی و غالب بودن سیستم افشان بخش اشباع آبخوان است. حجم جریان ذخیره‌شده در آبخوان کارستی که توسط روش *Mangin* (با متوسط خطای ۵٪) به دست آمده است، از خطای کمتری نسبت روش *Coutagne* (با متوسط خطای ۲۳٪) برخوردار است. درحالی‌که مقادیر پیش‌بینی‌شده دبی جریان در طول منحنی فروکش توسط روش *Coutagne* ($RMSE=0/80$) و *Mangin* ($RMSE=0/44$ و $R2=0/45$) دارد. نتایج این تحقیق نشان داد که به منظور پیش‌بینی جریان روزانه چشمه کارستی طی دوره فروکش، روش *Coutagne* نسبت به روش *Mangin* از این نظر که لازم به تفکیک جریان‌های سریع و پایه چشمه طی دوره فروکش نمی‌باشد و همچنین به دلیل سادگی ساختار مدل و اینکه تنها به یک پارامتر وابسته است و در نتیجه به محاسبات کمتری نیازمند است، دارای ارجحیت می‌باشد.

واژگان کلیدی: منحنی فروکش، چشمه‌علی دامغان، آبخوان کارستی، مدل‌سازی جریان، روش *Mangine* روش *Coutagne*

مقدمه

حدود ۲۵ درصد از منابع آب‌های زیرزمینی جهان در تشکیلات کارستی ذخیره شده است و به عنوان یکی از منابع مهم تأمین کننده نیازهای آبی بر روی کره زمین شناخته شده‌اند (Ford and Williams, 2007, 374). در ایران نیز حدود ۱۱ درصد از وسعت کشور را نواحی کارستی تشکیل می‌دهد. بیش از ۸۰٪ منابع آب استان‌هایی مانند فارس و کرمانشاه از این منابع استحصال می‌شود. منابع آبی کارست به علت قرار گرفتن در نواحی مرتفع، تقریباً دور از آلودگی‌های انسانی هستند و ارزان بودن هزینه استحصال آب از آن‌ها نسبت به سدهای مخزنی توجه بیشتر بهره‌برداران از این منابع را موجب می‌شود (افراسیابیان، ۱۳۷۲، ۹۵).

آبخوان‌های کارستی، مخازن زیرزمینی به شدت ناهمگنی هستند که آب در شبکه‌های مرتبط به هم شکاف‌ها و مجاری درون آن‌ها جمع‌آوری می‌شوند. ناهمگنی این تشکیلات عمدتاً به دلیل دوگانه و یا حتی سه‌گانه بودن تخلخل در این تشکیلات و همچنین تغییرات زیاد نفوذپذیری در جریان‌های افشان و مجرای آن می‌باشد. همچنین سطح ایستابی در این آبخوان‌ها یک سطح پیوسته نیست و دارای شیب منطقه‌ای و محلی است. به طور کلی آب زیرزمینی تمام آبخوان‌ها به طرف سطح فرسایشی تمایل و شیب‌دارند و زهکشی می‌شوند (Padilla et al., 1994, 114). سنگ‌های آهکی که محل شکل‌گیری آبخوان‌های کارستی می‌باشند، در مراحل اولیه تشکیل، تخلخل و نفوذپذیری کمی دارند، ولی بعداً بر اثر عوامل تکتونیکی، درز و شکاف و گسل‌هایی به وجود می‌آید که همراه با آب باران در آن‌ها انحلال ایجاد می‌شود و در نتیجه اشکال مناطق کارستی را به وجود می‌آورند (Milanovic, 1981, 223).

هیدروگراف جریان خروجی از آبخوان کارستی که عموماً در قالب چشمه می‌باشند، تصویر روشنی از پاسخ تشکیلات کارستی را در مقابل محرک‌های ورودی که شامل تغذیه از سطح زمین می‌باشد به دست می‌دهد (Bonacci, 1987, 208). شکل منحنی فروکش جریان چشمه تابعی از اندازه و حجم آبخوان کارستی و مشخصات هیدروپنماتیک آبخوان مانند نرخ تغذیه از سطح به منطقه غیراشباع آبخوان و همچنین نرخ جریان عبوری در منطقه اشباع آن می‌باشد (Soulios, 1991). تفاوت اساسی جریان چشمه‌های کارستی نسبت به چشمه‌هایی که از آبخوان‌های آبرفتی منشأ می‌گیرند، به دلیل متأثر بودن جریان خروجی تشکیلات کارستی از شبکه آبراهه‌های زیرزمینی با سرعت بالا (جریان سریع) که در بخش غیراشباع خاک ذخیره شده‌اند و جریان پایه (جریان کند) که در ماتریس کربناته آبخوان با درجه کارستی بالا وجود دارند، است (Atkinson, 1977). به منظور شبیه‌سازی پاسخ هیدرولوژیکی یک آبخوان کارستی در برابر محرک ورودی آن، محققین سه نوع رویکرد روابط تجربی، مدل‌های مفهومی و فیزیکی را مورد استفاده قرار می‌دهند (Estrela and Sahuquillo, 1997).

مطالعات متعددی بر روی ویژگی‌های هیدروژئولوژی و هیدروشیمیایی جریان خروجی از چشمه‌های کارستی کشور و تغییرات زمانی آن‌ها در طول سال از طریق نمونه‌برداری از آب چشمه انجام شده است. به عنوان مثال، کریمی وردنجانی (۱۳۸۴)، روی چشمه‌های آهکی موگرمون و سرآسیاب در شهرستان دهدشت مطالعه کرده است. وی برای بررسی‌ها از نمونه‌برداری‌های ماهانه استفاده کرده و آنالیز هیدروشیمیایی و سنجش میزان آب دهی را به طور هم‌زمان انجام داده است. نتایج مشخص کرد که چشمه‌های مزبور از سازند آهکی سروک تغذیه می‌گردند و دارای سیستم مجرای افشان می‌باشند و درصد جریان مجرای در چشمه موگرمون بیشتر از چشمه سرآسیاب می‌باشد. همچنین به نظر می‌رسد سیستم مزبور دارای یک رژیم جداگانه ناشی از ذوب برف می‌باشد. شفیع مطلق و لشکری‌پور (۱۳۸۷)، برای اولین بار روی چشمه کارستی کورسا در جنوب غربی مطالعه کرده‌اند. ایشان برای بررسی‌های هیدروژئولوژیکی سفره کارستی آبدار منطقه و برآورد حجم دینامیکی چشمه، آبنمود روزانه و نزولات سالیانه و بررسی‌های هیدروشیمیایی را مورد استفاده قرار داده‌اند، و اقدام به نمونه‌برداری نیز نموده‌اند. نتیجه مطالعات این است که سفره آبدار این چشمه از نوع مجرای-افشان می‌باشد. جوکار سرهنگی و همکاران (۱۳۸۸) به منظور بررسی عوامل موثر در چشمه‌های کارستی و آبرفتی و

مقایسه آن‌ها، ۸۰ چشمه کارستی را در ارتفاعات البرز مرکزی و ۸۴ چشمه آبرفتی را در سواحل جنوبی خزر مورد مطالعه قرار داده‌اند. نتایج بیانگر آن است که در چشمه‌های کارستی، علاوه بر تأثیر نوع تشکیلات آبخوان، ارتفاع مکان نیز تأثیر به‌سزایی در آب دهی این چشمه‌ها دارد. اما در چشمه‌های آبرفتی، نوع تشکیلات آبخوان و ضخامت آن، بیش از سایر عوامل در آب دهی چشمه مؤثر هستند.

اما در خصوص مدل‌سازی و پیش‌بینی رفتار جریان چشمه‌های کارستی در طول زمان در کشور تحقیقات بسیار محدودی انجام شده است. رئیسی و کریمی (۱۹۹۷)، پارامترهای انتقال ویژه، PH و دمای آب چشمه برگان در شمال غربی شیراز را هر ۲۰ روز طی دوره ۳۲ ماهه را اندازه‌گیری کرده و نمونه‌های آب در زمینه آنیون‌ها و کاتیون‌های اصلی را آنالیز کرده و از اندازه‌گیری نرخ جریان به طور روزانه، و همچنین از مدل کامپیوتری $WATEQF$ نیز استفاده کرده‌اند. ایشان هیچ تفاوت قابل‌ملاحظه‌ای بین ضریب اولین و دومین فروکش مشاهده نکردند. تنوع انتقال ویژه، غلظت کلسیم و بی‌کربنات و اشباع کلسیت طی مدت تحقیق ناچیز بود، بدین مفهوم که ویژگی‌های سفره آب زیرزمینی می‌تواند رفتار شیمیایی چشمه را کنترل کند. مورفولوژی و ژئولوژی حوضه آبرگیر چشمه برگان و داده‌های نمودارهای آب و مواد شیمیایی نشان می‌دهد سیستم هیدرولوژیکی این چشمه دارای جریان افشان است.

اما در خارج از کشور تحقیقات بیشتری در زمینه استفاده از مدل‌های ریاضی شبیه‌ساز و مدل‌های مفهومی به منظور پیش‌بینی و تحلیل رفتار منحنی فروکش جریان خروجی از آبخوان طی دوره خشک سال انجام شده است. به عنوان مثال، (Bonacci, 1993, 51-62) به آنالیز جزئیات و توصیف موارد متعددی از نقاط شکست در منحنی‌های فروکش از طریق ارزش‌های مختلف ضریب فروکش در معادله (Maillet (1905)، پرداخته است. وی رابطه بین ضریب فروکش و ضریب مخزن خطی را با استفاده از هیدروگراف آب زیرزمینی بررسی، و نشان داده است که ضریب مخزن خطی با توجه به زمان، طبق تغییرات شرایط جریان در توده سنگی کارستی تغییر می‌کند.

در تحقیق دیگری (Padilla et al., 1994, 267-277)، هیدروگراف‌های فروکش چهار چشمه کارستی در اروپا را توسط معادلات (Mangin, 1975, 269) و (Coutagne, 1968, 272) مورد تحلیل قرار دادند و درصد مشارکت جریان سریع و پایه از حجم کل آب ذخیره‌شده در آبخوان را تعیین نمودند (Halihan et al., 1998, 24-36)، از آوریل ۱۹۹۴ تا می ۱۹۹۵ هیدروگراف‌های جریان سیلاب در سفره آب زیرزمینی کارست را با مجراهای کاملاً توسعه‌یافته به دست آوردند. داده‌ها از سیستم جریان جمع‌آوری شد و تلاش شد تا تعیین شود آیا جریان با محدودیت‌های مجرای انتقال آب کنترل می‌شود یا خیر. ایشان مدل برنولی^۱ را به منظور بررسی کنترل جریان خروجی توسط مجراهای انتقال آب در ماتریس آبخوان استفاده کردند.

(Todd and Carol, 1998)، به کمک مدل‌سازی عددی جریان مجرای، واکنش هیدروگراف چشمه را در مقابل پاسخ هیدرولوژیکی آبخوان کارستی مورد بررسی قرار دادند.

(Farlin and Maloszewski, 2013, 1829) با ترکیب دو مدل کلاسیک معادله بوزینسک^۲، که بیانگر فروکش جریان پایه چشمه می‌باشد، با معادله نمایی جریان پیستونی، نشان دادند که می‌توان پارامترهایی را که بیانگر توزیع زمان انتقال سفره آب زیرزمینی هستند را با درستی بیشتری نسبت به یک روش تنها، تخمین زد. همچنین این مدل ترکیبی، همبستگی بالایی بین مقادیر مشاهده و پیش‌بینی‌شده در چشمه‌هایی که دارای ضریب فروکش ملایم می‌باشند نشان می‌دهد، که احتمالاً حاکی از تأثیر قویتر تخلیه مجدد آب‌های زیرزمینی طی فصل خشک می‌باشد.

^۱ Bernoulli

^۲ Boussinesq

با توجه به تحقیقات معدودی که در کشور به منظور شبیه‌سازی رفتار جریان چشمه طی دوره فروکش انجام شده است، هدف از این تحقیق مدل‌سازی منحنی فروکش جریان روزانه تشکیلات کارستی چشمه‌علی دامغان طی یک دوره نه ساله توسط دو معادله (Mangin, 1975, 264) و (Coutagne, 1968, 173) و مقایسه و بررسی نتایج این مدل‌ها می‌باشد.

۲- مواد و روش‌ها

شرح مختصری از تئوری دو روش (Mangin, 1975, 269) و (Coutagne, 1968, 272) به منظور مدل‌سازی آب دهی چشمه کارستی در طول دوره فروکش در این بخش ارائه می‌شود. برای مطالعه بیشتر در مورد این دو روش می‌توان به (Padilla et al., 1994, 269) و (Coutagne, 1968, 272) مراجعه کرد.

۱-۲- روش Mangin

Mangin در سال ۱۹۷۵، دبی فروکش چشمه کارستی در هر زمان t ، Q_t را به صورت مجموع جریان پایه، q_t^b مطابق با روش (Maillet, 1905, 134)، و جریان سریع، q_t^* متأثر از تغذیه و نفوذ سطح خاک در آن زمان معرفی نمود:

$$Q_t = q_t^b + q_t^*$$

رابطه‌ی (۱)

$$q_t^b = q_0^b e^{-\alpha t}$$

رابطه‌ی (۲)

$$q_t^* = q_0^* \frac{1-\eta t}{1+\varepsilon t}$$

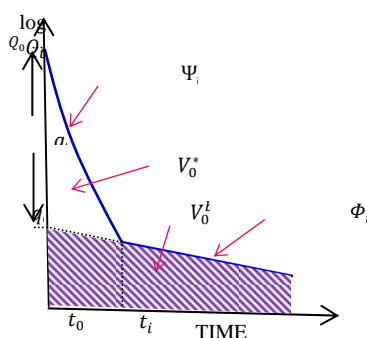
رابطه‌ی (۳)

که در آن‌ها q_0^b جریان پایه برون‌یابی شده در ابتدای منحنی فروکش مطابق با شکل (۱) می‌باشد. پارامتر α ، نیز ضریب فروکش جریان پایه طبق روش Maillet است. q_0^* ، اختلاف بین دبی کل چشمه، Q_0 ، مقدار متناظر جریان پایه، q_0^b ، در زمان شروع فروکش، $t = 0$ مطابق شکل (۱) می‌باشد. پارامتر η ، معکوس زمان شروع دبی پایه $\left(\frac{1}{t_i}\right)$ ، و یا طول عکس مدت زمان جریان سریع معرفی شده است. ضریب ε ، که از نظر ریاضی درجه تقعر منحنی جریان سریع را نیز نشان می‌دهد، بیانگر ضریب متوسط منطقه غیراشباع در نفوذ آب از سطح خاک به تشکیلات کارستی می‌باشد و دارای بعد عکس زمان $\left(\frac{1}{t}\right)$ ، می‌باشد. مقدار $\frac{1-\eta t}{1+\varepsilon t}$ ، که با تابع Y_t ، نیز نشان داده می‌شود، دارای مقدار بین صفر و یک می‌باشد.

$$Y_t = \frac{1-\eta t}{1+\varepsilon t} = \begin{cases} 1 & t = 0 \\ K & 0 < t < t_i \\ 0 & t = t_i \end{cases}$$

رابطه‌ی (۴)

که در آن $0 < K < 1$ است. این تابع، بی‌بعد بوده و مستقل از جریان چشمه است و می‌توان برای مقایسه تغییرات جریان سریع چشمه در طول سال‌های مختلف به کار برد.



شکل (۱): نمودار تغییرات جریان سریع و پایه در منحنی فروکش آب دهی چشمه کارستی (منبع: Padilla et al., 1994, 270)

با گرفتن انتگرال از توابع دبی جریان‌های سریع و پایه نسبت به زمان، می‌توان توابع حجم آب ذخیره‌شده در قسمت غیراشباع خاک، V_t^* ، و همچنین تشکیلات کارستی، V_t^b ، را در هر زمان محاسبه نمود:

$$V_t^* = \int_{t=0}^t q_t^* dt = \int_{t=0}^t q_0^* \frac{1-\eta t}{1+\varepsilon t} dt = \frac{q_0^*}{\varepsilon} \left(\ln(1+\varepsilon t) \left(1 + \frac{\eta}{\varepsilon} \right) - \eta t \right) \quad 0 < t < t_i$$

(رابطه ۵)

$$V_t^b = \int_{t=0}^t q_t^b dt = \int_{t=0}^t q_0^b e^{-\alpha t} dt = \frac{q_0^b}{\alpha} (1 - e^{-\alpha t}) \quad t > 0$$

(رابطه ۶)

تابع حجم کل جریان چشمه در هر زمان، V_t^T ، برابر مجموع دو تابع فوق می‌باشد:

$$V_t^T = V_t^* + V_t^b$$

(رابطه ۷)

برای محاسبه حجم اولیه آب ذخیره‌شده در ابتدای شاخه جریان سریع، V_0^* ، و همچنین حجم آب ذخیره‌شده در تشکیلات کارستی که در طول جریان پایه تخلیه می‌شوند، V_0^b ، می‌توان در بالای انتگرال در روابط (۵) و (۶) را به ترتیب مقادیر t_i ، و بی‌نهایت قرارداد:

$$V_0^* = \int_{t=0}^{t_i} q_t^* dt = \int_{t=0}^{t_i} q_0^* \frac{1-\eta t}{1+\varepsilon t} dt = \frac{q_0^*}{\varepsilon} \left[\ln(1+\varepsilon t) \left(1 + \frac{\eta}{\varepsilon} \right) - 1 \right]$$

(رابطه ۸)

$$V_0^b = \int_{t=0}^{t=+\infty} q_t^b dt = \int_{t=0}^{t=+\infty} q_0^b e^{-\alpha t} dt = \frac{q_0^b}{\alpha}$$

(رابطه ۹)

می‌توان نتیجه گرفت که حجم اولیه آب ذخیره‌شده که در طول فروکش جریان توسط چشمه تخلیه می‌شود، V_0^T ، برابر $V_0^T = V_0^* + V_0^b$ است.

Coutagne در سال 1968، دبی جریان یک چشمه کارستی در طول دوره فروکش را به صورت تابع پیوسته زهکشی مخازن آب به صورت زیر معرفی نمود:

$$Q_t = \begin{cases} Q_0 e^{-\alpha t} & n = 1 \\ (Q_0 - Q_c) [1 + (n-1)\alpha_0 t]^{\frac{n}{1-n}} & n \neq 1 \\ Q_c & n = 0 \end{cases} \quad \text{(رابطه ی ۱۰)}$$

پارامتر n مورد استفاده توسط Coutagne دارای مفهوم فیزیکی وسیعی می باشد، به گونه ای که اگر $n = 0$ باشد، دبی چشمه به صورت ثابت و بدون تغییر Q_c ، خارج می شود. در صورتی که $n = 1$ باشد، نمایشگر آبخوان کارستی توسعه یافته ضخیمی است که جریان با سرعت ثابت مطابق با تئوری Maillet توسط چشمه زهکشی می شود و اگر $n = 2$ ، در نظر گرفته شود، نشان دهنده آبخوان کارستی مطابق است که توسط تئوری Singh در سال ۱۹۶۹ معرفی شده است. از دیدگاه عملی، $0 < n < 2$ می باشد. ضابطه دوم از رابطه (۹) را می توان در قالب گام زمانی، Δt ، به صورت زیر نیز نوشت:

$$Q_{t+\Delta t} = (Q_t - Q_c) [1 + (n-1)\alpha_t \Delta t]^{\frac{n}{1-n}} \quad \text{(رابطه ی ۱۱)}$$

که در آن Q_t و $Q_{t+\Delta t}$ در منحنی فروکش می باشد. در عمل برای Q_c ، که به عنوان جریان ثابت چشمه در نظر گرفته می شود، می توان کمترین دبی مشاهده شده در منحنی فروکش را منظور کرد. α_t ، تابع ضریب فروکش می باشد که به صورت زیر قابل بیان است:

$$\alpha_t = \frac{\alpha_0}{1+(n-1)\alpha_0 t} \quad \text{(رابطه ی ۱۲)}$$

این ضریب، تابع زمان، و پارامترهای n و α_0 است. Padilla در سال 1990، با انتگرال گیری از ضابطه دوم رابطه (۲) نسبت به زمان، تابع حجم جریان را محاسبه کرد:

$$V_t = \int_{t=0}^{t=+\infty} (Q_0 - Q_c) [1 + (n-1)\alpha_0 t] d_t = \frac{Q_t - Q_c}{\alpha_t} \quad \text{(رابطه ی ۱۳)}$$

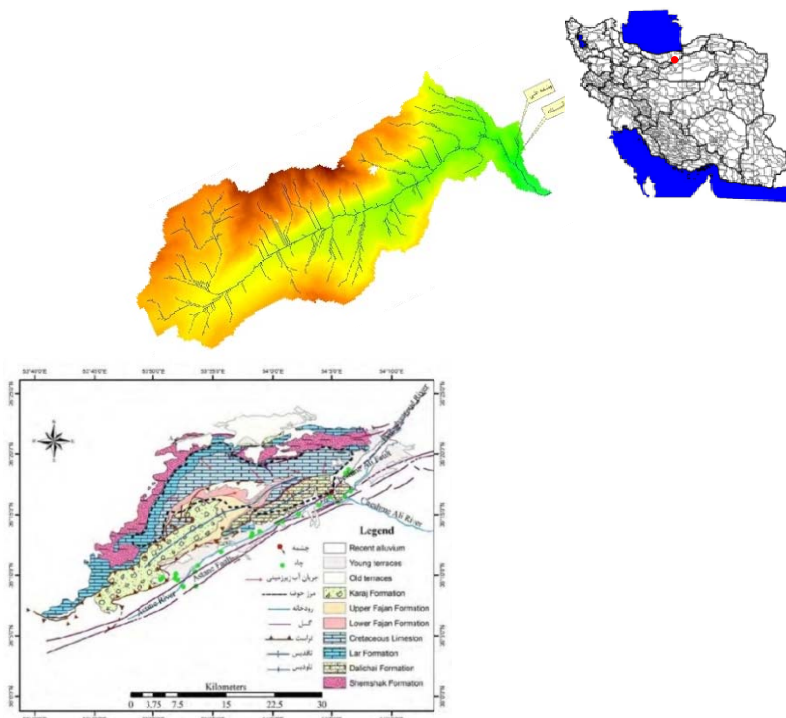
در این روش حجم اولیه آب ذخیره شده در سیستم آبخوان، به صورت $V_0 = \frac{Q_0}{\alpha_0}$ ، محاسبه می شود. مشابه با تابع Y_t ، در روش Mangin، در روش Coutagne نیز تابع بدون بعد متغیر در زمانی به نام H_t ، برای تمام منحنی فروکش تعریف شده که از تقسیم α_t بر α_0 محاسبه می شود:

$$H_t = \begin{cases} 0 & t = \infty \\ \frac{1}{1+(n-1)\alpha_0 t} & 0 < t \\ 1 & t = 0 \end{cases} \quad \text{(رابطه ی ۱۴)}$$

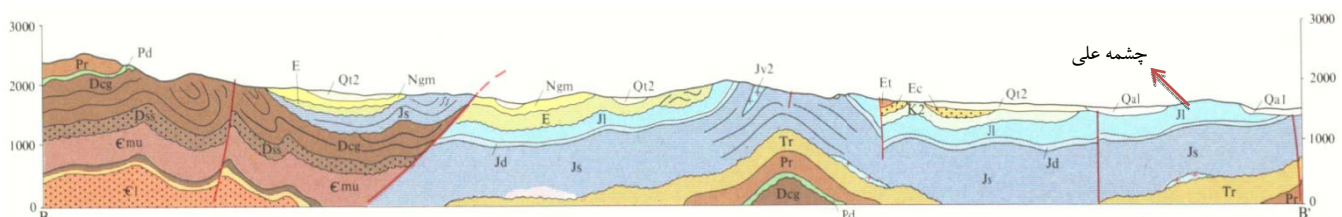
این تابع نیز دارای مقادیری بین صفر و یک است و مستقل از جریان چشمه است.

منطقه مورد مطالعه

حوضه آبرگیر چشمه‌علی دارای مساحت ۱۴۸ کیلومترمربع و در مختصات جغرافیایی ۱۵° ۵۳' تا ۴۱' ۵۴' طول شرقی و ۳۶° ۳۴' تا ۳۶° ۳۴' عرض شمالی واقع شده است. دامنه ارتفاعی از ۱۰۵۰ در حاشیه کویر حاج علی‌قلی تا ۳۹۵۰ در ارتفاعات شمالی حوضه به چشم می‌خورد. این چشمه در ۳۲ کیلومتری شمال غربی شهر دامغان یکی از زیرحوضه‌های کویر حاج علی‌قلی و به عنوان بزرگ‌ترین چشمه کارستی در استان سمنان شناخته شده است. پرآب‌ترین رود دامغان، دامغان رود از این چشمه سرچشمه می‌گیرد و از روستای آستانه شروع شده و با جهت جریان کلی شمال غرب- جنوب شرق، با طی مسیر ۳۰ کیلومتری در نهایت وارد دشت دامغان می‌شود (شکل ۲). متوسط آب دهی چشمه در محل ایستگاه آستانه در خروجی آن، ۵۰۰ تا ۷۰۰ لیتر در ثانیه (حجم رواناب سالانه ۲۷ میلیون مترمکعب) است که تأمین‌کننده نیاز آبی بخشی از شهر دامغان و حدود ۲۵ روستای اطراف می‌باشد. بر اساس ایستگاه باران سنجی آستانه که نزدیک‌ترین ایستگاه باران سنجی به خروجی چشمه با ارتفاع ۱۴۵۰ متر از دریا می‌باشد، حوضه آبرگیر آن دارای میانگین بارش سالانه ۱۵۵ میلی‌متر، میانگین سالانه دما ۱۶ درجه سانتیگراد و میانگین تبخیر سالانه از تشتک ۱۹۰۰ میلی‌متر می‌باشد که اقلیم نیمه‌خشک را در این منطقه موجب شده است. قسمت اعظم بارش‌ها در این حوضه به صورت برف است که منجر می‌شود بیشترین آب دهی چشمه در فروردین ماه رخ دهد (شهبازی و همکاران، ۱۳۹۰).



شکل (۲): نقشه شبکه زهکشی و زمین‌شناسی حوضه آبرگیر چشمه‌علی دامغان



شکل (۳): نقشه مقطع زمین‌شناسی حوضه آبرگیر چشمه‌علی دامغان (کرمی، ۱۳۸۸، ۴)

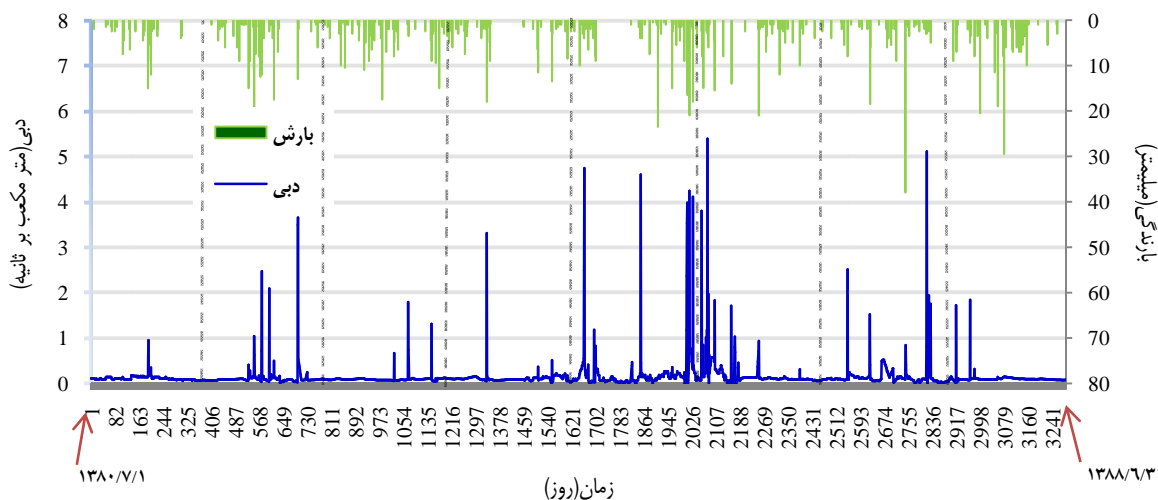
از نظر ژئومورفولوژی، ارتفاعات شمالی چشمه‌علی دارای دو تیپ کوهستانی همراه با دشت آبرفتی کوچکی در حد واسط آن می‌باشد. این منطقه فاقد پدیده‌های ژئومورفولوژیکی مهم کارستی از قبیل گودی‌های مسدود، فروچاله‌ها، درزه‌ها و شکستگی‌های انحلالی بزرگ و عمیق است. بازدیدهای صحرایی در برخی نواحی آثار قطرات باران، شکستگی‌های کم و بیش بزرگ، حفرات لانه کبوتری و کارن را نشان می‌دهد (کرمی، ۱۳۸۳، ۷۳).

از نظر زمین‌شناسی، منطقه مورد مطالعه در زون البرز مرکزی- شرقی واقع شده است. در این زون، چین‌ها به صورت تاقدیس و ناودیس‌های باریک و طولی هستند که عموماً پهلوی جنوبی آن‌ها در اثر عملکرد غسل‌های راندگی، بریده‌شده و به سمت جنوب جابه‌جا شده‌اند. عملکرد نسبتاً شدید راندگی‌ها، تکنونیک بلوکی و حوضه‌های رسوبی محدود به زون-های گسلی، سبب به هم خوردگی نظم اولیه توالی‌ها و ضخامت واحدهای سنگ چینه‌ای هم سن و هم‌زمان شده است (پایگاه ملی داده‌های علوم زمین). از نظر چینه‌شناسی، منطقه شامل سازندهای شمشک، دلیچای، لار، آهک‌های کرتاسه، فجن، کرج و نهشته‌های کواترنری می‌باشد (شکل ۳).

گسلی بافاصله حدود ۲۰۰ متر بالادست مظهر چشمه‌علی با روند شمال شرق- جنوب غرب با سازوکار معکوس در برونزدهای دلیچای مشخص است. طول این گسل در قسمت‌های شرقی حوضه به دلیل نهشته شدن آبرفت بر آن مشخص نیست. جابجایی این گسل سبب ریزش بلوک‌هایی از آهک‌های دلیچای بر روی آبرفت‌های کنار جاده شده است. لازم به توضیح است گسلی در فاصله حدود ۸۰۰ متر پایین‌دست مظهر چشمه‌علی در حاشیه جاده دامغان- چشمه- علی وجود دارد. روند این گسل به گونه‌ای می‌باشد که نسبت به گسل‌های چشمه‌علی و آستانه متقاطع می‌باشد و در نقشه زمین‌شناسی منطقه ثبت نشده است (شکری، ۱۳۹۰، ۱۰).

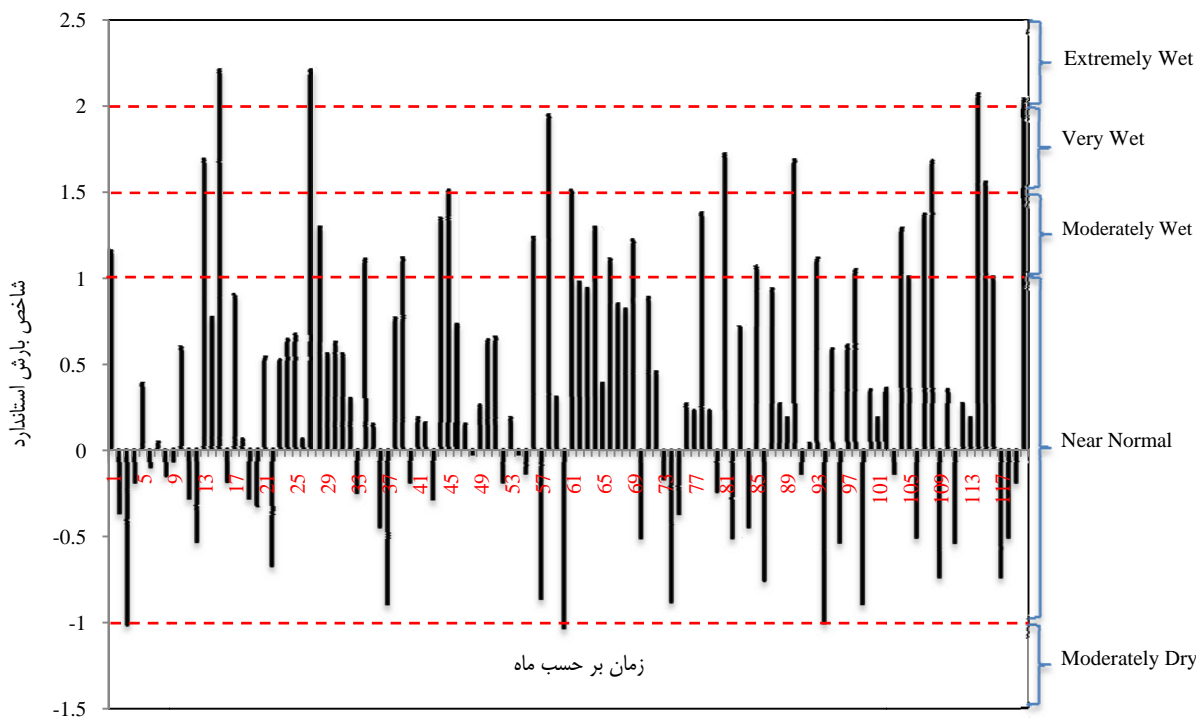
در حوضه آبگیر چشمه‌علی دامغان هیچ‌گونه چاه بهره‌برداری یا اکتشافی حفر نشده، اما در جنوب تاقدیس چشمه‌علی در داخل آبرفت‌های کواترنری تعداد ۲۴ حلقه چاه حفاری جهت مصارف کشاورزی حفر شده است (شکل ۲). بنا بر اطلاعات آماربرداری سال ۱۳۸۲ امور آب شهرستان دامغان، مجموع برداشت سالانه آب از این چاه‌ها ۱/۴۶۳/۰۱۲ مترمکعب می‌باشد. این چاه‌ها عمیق بوده و عمقی مابین ۹۰ تا ۱۸۰ متر دارند و روند کلی افزایش عمق حفاری از شرق حوضه (از محل چشمه) به غرب مشاهده می‌شود. نوع سفره در این چاه‌ها آزاد ذکر شده است. سنگ کف، شیل شمشک و آهک‌های لار قید شده است. لازم به ذکر است هدایت الکتریکی نزدیک‌ترین چاه به چشمه (بافاصله ۷۰۰ متر در جنوب غربی چشمه) ۱۱۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر و مابقی با روند کلی افزایش به سمت غرب حوضه از ۲۰۰۰ تا ۶۸۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر اندازه‌گیری شده‌اند. از آنجا که رودخانه آستانه فصلی می‌باشد، لذا بالا بودن هدایت الکتریکی این چاه‌ها دال بر تغذیه این چاه‌ها از این رودخانه می‌باشد. در فصول خشک ته‌نشست املاح در بستر رودخانه صورت می‌گیرد، جریان دوباره رودخانه و نفوذ آب سبب بالا بردن هدایت الکتریکی آب این چاه‌ها شده است (شکری، ۱۳۹۰). با توجه به اندازه-گیری‌های میدانی که توسط کرمی در سال ۱۳۸۳ انجام شده است، تغییرات زمانی خواص فیزیکی و شیمیایی جریان چشمه بسیار اندک گزارش شده است به گونه‌ای که ضریب تغییرات پارامترهای کیفی، حداقل برابر با ۱/۳۹٪ برای دمای آب و حداکثر برابر با ۱۵/۴۵٪ مربوط به نیترات می‌باشد.

به منظور بررسی رفتار هیدروژئولوژیکی چشمه مورد مطالعه، داده‌های بارش و آب دهی روزانه ایستگاه باران‌سنجی و هیدرومتری آستانه مربوط به سال‌های ۸۱-۱۳۸۰ تا ۸۹-۱۳۸۸ (مجموعاً ۳۲۸۵ روز) از شرکت مدیریت منابع آب ایران اخذ شده است و نمودار سری زمانی این داده‌ها در شکل (۴) ارائه شده است. در شکل مذکور، هر ۳۶۵ روز با خط چین مشخص و تفکیک شده است.



شکل (۴): نمودار سری زمانی داده‌های روزانه بارش و دبی چشمه مورد مطالعه (از تاریخ ۱۳۸۰/۷/۱ تا ۱۳۸۸/۶/۳۱)

به منظور بررسی وضعیت خشکسالی منطقه مورد مطالعه، شاخص بارش استاندارد (SPI) در مقیاس ماهانه محاسبه و تغییرات آن در شکل (۵) ارائه شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، ۷۳ درصد از ماه‌های مورد بررسی حالت نرمال دارند. همچنین دوره معتدل و مرطوب، و معتدل و خشک به ترتیب ۱۳/۵ و ۳/۵ درصد از ماه‌ها را به خود اختصاص می‌دهند. دوره بسیار خشک و به شدت مرطوب به ترتیب ۶/۵ و ۳/۵ درصد را شامل می‌شود. با توجه به اعداد ذکر شده می‌توان گفت حوضه مذکور دارای شاخص بارش استاندارد تقریباً نرمال می‌باشد.

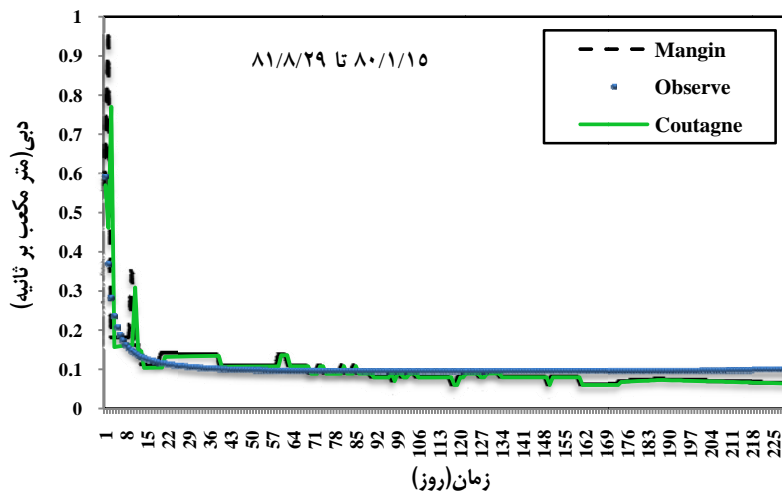


شکل (۵): سری زمانی تغییرات SPI طی ماه‌های مختلف سال در حوضه مورد مطالعه (از سال ۱۳۸۰ تا ۱۳۸۸)

بحث و نتایج

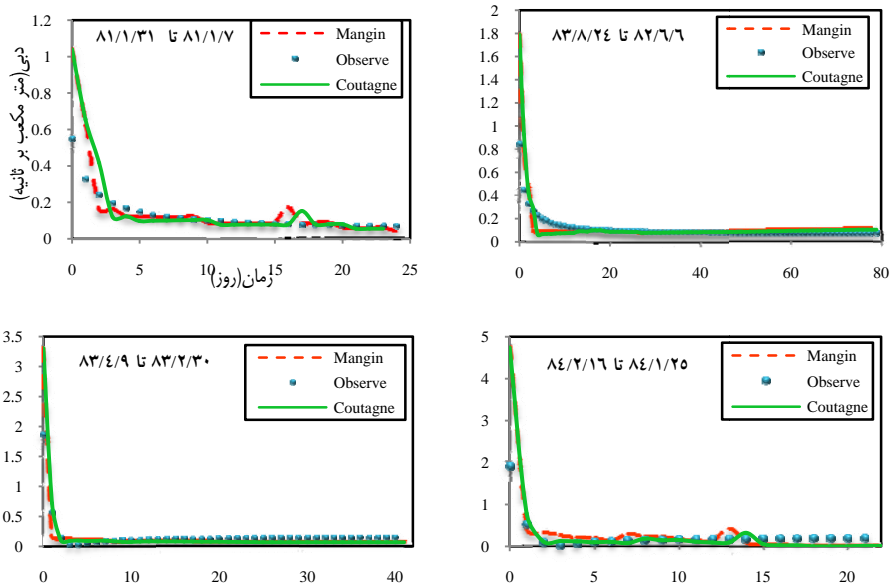
داده‌های منحنی فروکش سال اول (۱۳۸۰)، به منظور واسنجی دو روش (تخمین مقدار بهینه پارامترهای ε ، η و n) مورد استفاده قرار گرفت و سایر داده‌های موجود به منظور ارزیابی پارامترهای تخمین‌زده شده، به کار گرفته شد. به کمک تکنیک بهینه‌سازی خطی توسط ابزار Solver در محیط نرم‌افزار Excel، مقادیر بهینه پارامترهای ε و η در روش Mangin به ترتیب برابر با $0.177 \frac{1}{day}$ و $0.1 \frac{1}{day}$ و مقدار پارامتر n ، در روش Coutagne برابر با $1/36$ به دست آمد. با توجه به اینکه مقدار بهینه‌شده پارامتر n نزدیک به یک می‌باشد، می‌توان نتیجه گرفت که آبخوان مورد مطالعه یک آبخوان کارستی با ضخامت بالا است که جریان زهکشی شده با سرعت ثابت و کند (مطابق با تئوری Maillet) در بخش پایینی (اشباع) آبخوان در حرکت است.

دو معیار ضریب همبستگی (R^2) و ریشه میانگین مربعات خطاها ($RMSE$) به منظور بررسی نکویی برازش پارامترهای بهینه‌شده در دو مدل مورد استفاده قرار گرفتند. مقادیر R^2 و $RMSE$ در سال ۱۳۸۰ برای مدل Mangin به ترتیب، 0.47 و 0.053 ، و برای مدل Coutagne، 0.63 و 0.496 به دست آمده است. منحنی واسنجی فروکش جریان چشمه (سال ۱۳۸۰) توسط دو روش، بر اساس پارامترهای تخمینی در شکل (۶) ارائه شده است.

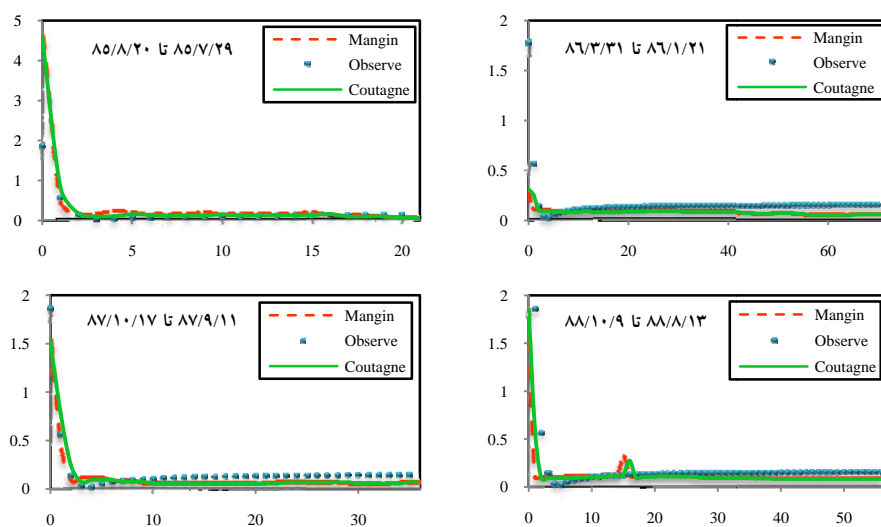


شکل (۶): منحنی واسنجی فروکش جریان چشمه توسط دو روش Mangin و Coutagne

بر اساس پارامترهای واسنجی‌شده در دو روش، منحنی فروکش جریان چشمه برای سال‌های ۱۳۸۱ تا ۱۳۸۸ شبیه‌سازی شدند و نتایج در شکل (۷) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که هر دو روش هماهنگی نسبتاً خوبی در شبیه‌سازی مقادیر دبی‌های دوره فروکش طی سال‌های مختلف دارند. ولی با این حال در روش Coutagne، در قسمت جریان سریع، پایین‌افتادگی‌هایی مشاهده می‌شود که سبب ناهماهنگی در منحنی نمودار شده است، و باید گفت که در اینجا از روش Mangin پاسخ مناسب‌تری دریافت شده است.



شکل (۷): منحنی شبیه‌سازی شده فروکش جریان چشمه توسط دو روش Mangin و Coutagne



شکل (۷): (ادامه)

به منظور بررسی کمی دقت مدل‌های مورد استفاده در شبیه‌سازی منحنی فروکش چشمه طی سال‌های ۱۳۸۱-۱۳۸۸، دو معیار خطای R^2 و $RMSE$ محاسبه و نتایج به دست آمده در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول (۱): نتایج معیارهای خطای R^2 و $RMSE$ برای منحنی‌های فروکش شبیه‌سازی شده طی سال‌های ۱۳۸۱-۱۳۸۸

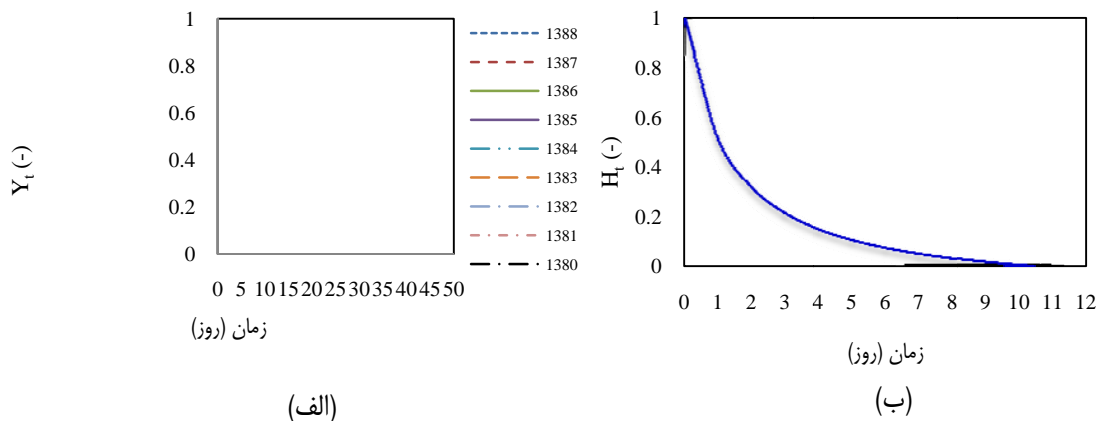
روش Coutagne		روش Mangin		دوره فروکش
+ / ۰.۶	- / ۰.۲	- / ۰.۱۲	- / ۰.۱۰	
+ / ۰.۱۴	- / ۰.۶۸	- / ۰.۱۸	- / ۰.۵۸	۸۳/۸/۲۴ - ۸۲/۶/۶
+ / ۰.۰۸	- / ۰.۹۷	- / ۰.۵۲	- / ۰.۵۰	۸۳/۴/۹ - ۸۳/۲/۳۰

۰/۱۴	۰/۹۸	۰/۹۵	۰/۶۰	۸۴/۲/۱۶ – ۸۴/۱/۲۵
۰/۰۹	۰/۹۹	۰/۹۳	۰/۷۰	۸۵/۸/۲۰ – ۸۵/۷/۲۹
۰/۰۲	۰/۷۸	۰/۲۲	۰/۶۰	۸۶/۳/۳۱ – ۸۶/۱/۲۱
۰/۰۷	۰/۹۴	۰/۳۲	۰/۱۵	۸۷/۱۰/۱۷ – ۸۷/۹/۱۱
۰/۰۷	۰/۹۰	۰/۳۱	۰/۴۰	۸۸/۱۰/۹ – ۸۸/۸/۱۳

نتایج جدول (۱) نشان می‌دهد که منحنی‌های فروکش جریان چشمه که توسط روش Coutagne شبیه‌سازی شده‌اند از نظر معیارهای خطای R^2 و RMSE در تمامی سال‌ها دارای کارایی بالاتر و خطای کمتری نسبت به روش Mangin می‌باشند.

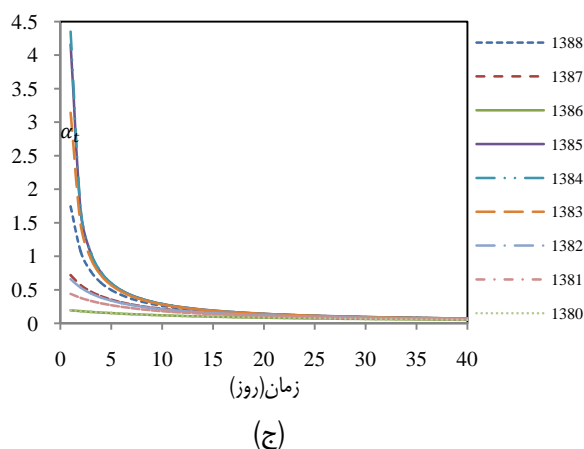
نمودار تغییرات توابع بدون بعد Y_t و H_t در روش‌های Mangin و Coutagne طبق روابط شماره (۴) و (۱۴) برای چشمه مورد مطالعه محاسبه و در شکل (۸) ارائه شده است. نکته قابل توجه اینکه روش Coutagne تنها یک نمودار برای تمام سال‌ها به ازای تنها یک مقدار پارامتر $n=1/36$ ارائه می‌کند درحالی‌که طبق روش Mangin برای هر سال، متناظر با تغییرات پارامترهای ε و η ، روند این تابع متفاوت می‌باشد.

روند تغییرات تابع ضریب فروکش (α_t) که در روش Coutagne به منظور محاسبه مقادیر دبی و حجم آب ذخیره‌شده در آبخوان مورد نیاز می‌باشد و طبق رابطه (۱۲) قابل محاسبه است در شکل (۸) ارائه شده است. این تابع متغیر در زمان تابع پارامترهای n و α_0 می‌باشد. بر اساس این شکل، ضریب فروکش جریان چشمه در روزهای اولیه شروع منحنی فروکش دارای تغییرات زیادی طی سال‌های مختلف می‌باشد. اما با گذشت زمان (حدود ۱۰ روز) پس از شروع فروکش جریان چشمه، همه مقادیر ضرایب طی سال‌های مختلف به سمت مقادیر یکسان (بین ۰/۱ تا ۰/۲) همگرا می‌شوند. علاوه بر این، برای سال‌هایی مانند ۱۳۸۳ تا ۱۳۸۵ که تغییرات ضریب فروکش شدیدتری و بالاتری نسبت به سایر سال‌ها از خود نشان می‌دهند، تابع بدون بعد H_t نیز دارای تغییرات بیشتر و مقادیر کمتری از خود نشان می‌دهد.



(الف)

(ب)



شکل (۸): تغییرات توابع بدون بعد H_t (شکل الف) و Y_t (شکل ب) و تابع ضریب فروکش جریان (شکل ج)

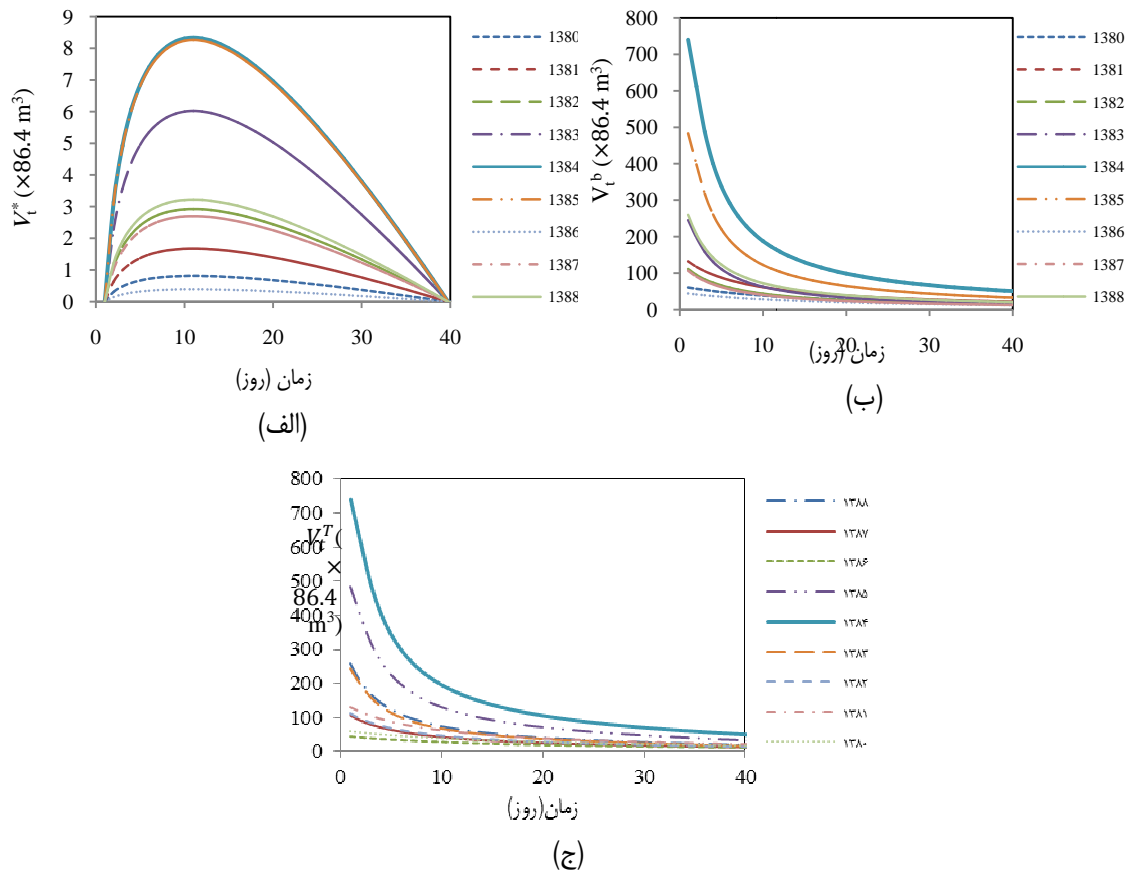
مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده حجم اولیه جریان ذخیره‌شده (V_0^T) در مخزن تشکیلات کارستی چشمه مورد مطالعه که در طول منحنی فروکش تخلیه می‌شود، توسط دو روش محاسبه و در جدول (۲) ارائه شده است. لازم به ذکر می‌باشد که مقادیر (V_0^T) در روش Mangin از مجموع حجم اولیه جریان سریع (V_0^*) و جریان پایه (V_0^b) به دست آمده است. علاوه بر این درصد خطای برآورد حجم اولیه آب ذخیره‌شده توسط دو روش در هر سال نیز در جدول (۲) ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که تقریباً در تمام سال‌ها، درصد خطای پیش‌بینی حجم اولیه آب ذخیره‌شده توسط روش Mangin کمتر از روش Coutagne می‌باشد. به طور متوسط حجم اولیه آب ذخیره‌شده در آبخوان که توسط روش‌های Mangin و Coutagne شبیه‌سازی شده‌اند به ترتیب برابر با $271/9$ و $234/1$ میلیون مترمکعب بر سال برآورد شده است درحالی‌که مقدار حجم متوسط سالانه آب دهی چشمه بر اساس داده‌های مشاهداتی برابر با $275/3$ میلیون مترمکعب محاسبه شده است که نشان‌دهنده دقت بالای روش Mangin در تخمین حجم اولیه جریان در آبخوان است. همچنین متوسط خطای برآورد حجم کل جریان ذخیره‌شده در آبخوان توسط روش Mangin و Coutagne به ترتیب برابر با 5% و $23/6\%$ به دست آمده است. اما همان طور که پیشتر نیز اشاره شد، روش Coutagne در شبیه‌سازی مقادیر دبی روزانه چشمه در طول منحنی فروکش با در نظر گرفتن معیارهای R^2 و RMSE نسبت به روش Coutagne از درجه کارایی بالاتری برخوردار است. به منظور نشان دادن میزان مشارکت حجم ذخیره‌شده جریان با ضریب قابلیت بالا (جریان سریع، V_0^*) در مقایسه با جریان با قابلیت انتقال پائین (جریان پایه، V_0^b) در تخلیه جریان از آبخوان، درصد هر یک از این دو جریان نسبت به حجم اولیه کل (V_0^T) برای سال‌های مختلف، محاسبه و در جدول (۲) ارائه شده است. علاوه بر این نتایج ارائه شده در جدول (۲) نشان می‌دهد که به طور متوسط $3/8\%$ از حجم کل آبخوان به صورت جریان سریع در بخش غیراشباع و سطحی آبخوان ذخیره‌شده و بقیه به صورت جریان آهسته و کند در تشکیلات کارستی وجود دارند. غالب بودن جریان کارستی نسبت به جریان سریع، حاکی از توسعه‌یافتگی بالای آبخوان کارستی می‌باشد و افشان بودن سیستم افشان در مقایسه با سیستم مجرای جریان آبخوان می‌باشد (Padilla et al., 1994).

جدول (۲): حجم اولیه آب ذخیره‌شده در آبخوان کارستی (V_0^T) و درصد خطای برآورد آن توسط دو روش در هر سال

سال	حجم اولیه مشاهداتی (میلیون مترمکعب)	روش Mangin			روش Coutagne	
		(میلیون مترمکعب)	(میلیون مترمکعب)	خطا خطا (%)	(میلیون مترمکعب)	درصد خطا (%)
۱۳۸۰	۷۱۸/۲	۷۰۷/۷۸	۷۰۷/۸	-۱/۴	۶۷۷/۰	-۵/۷
۱۳۸۱	۱۲۴/۰	۱۲۷/۴۸	۱۲۷/۵	۲/۸	۱۰۴/۴	-۱۵/۸

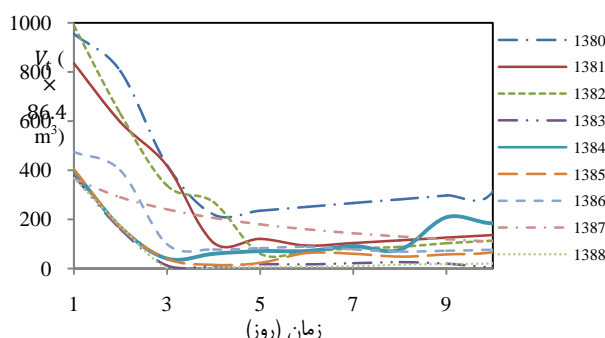
-۲۳/۵	۲۸۲/۳	-۱۳/۶	۳۱۸/۹	۳۱۸/۷۳	۰/۱۷	۳۶۹/۱	۱۳۸۲
-۶/۰	۱۹۸/۳	۶/۵	۲۲۴/۶	۲۲۴/۳۸	۰/۲۲	۲۱۱/۰	۱۳۸۳
-۳۹/۹	۱۴۹/۲	-۵/۸	۲۳۳/۸	۲۳۳/۶۹	۰/۱۱	۲۴۸/۲	۱۳۸۴
-۵۵/۹	۱۰۸/۵	۰/۸	۲۴۷/۹	۲۴۷/۷۲	۰/۱۸	۲۴۶/۰	۱۳۸۵
۲۳/۸	۱۴۳/۴	۰/۳	۱۸۸/۸	۱۸۸/۷۹	۰/۰۱	۱۸۸/۲	۱۳۸۶
۲۸/۵	۱۷۵/۱	۱۰/۵	۱۵۰/۶	۱۵۰/۵۲	۰/۰۸	۱۴۶/۳	۱۳۸۷
۱۳/۶	۲۶۹/۰	۴/۲	۲۴۶/۸	۲۴۶/۶۹	۰/۱۱	۲۳۶/۸	۱۳۸۸

تغییرات زمانی حجم آب ذخیره شده در قسمت‌های غیراشباع خاک، V_t^* و تشکیلات کارستی، V_t^b که توسط روش Mangine بر اساس روابط (۵) و (۶) محاسبه شده در شکل (۹) نشان داده شده است. روند تغییرات حجم آب ذخیره شده در قسمت غیراشباع که به صورت جریان سریع تخلیه می‌شود در ابتدا تا تقریباً روز دهم حالت افزایشی داشته و سپس حالت کاهشی نشان می‌دهد. درحالی‌که نمودار تغییرات حجم آب ذخیره شده در تشکیلات کارستی که به صورت جریان پایه یا کند تخلیه می‌شود، روند نزولی را در طی زمان نشان می‌دهد. نمودار تغییرات V_t^b و V_t^* طی سال‌های ۱۳۸۳ تا ۱۳۸۵ بالاتر از بقیه سال‌ها قرار دارد که نشان‌دهنده بالا بودن حجم آب ذخیره شده در قسمت غیراشباع خاک و مناطق کارستی ناشی از نفوذ از سطح طی این سال‌ها دارد. مجموع حجم آب ذخیره شده در قسمت غیراشباع و تشکیلات کارستی در هر زمان، حجم کل جریان ذخیره شده، V_t^T را نتیجه می‌دهد (شکل ۹).



شکل (۹): نمودار تغییرات حجم آب ذخیره‌شده در (الف) قسمت غیراشباع خاک، (ب) تشکیلات کارستی و (ج) حجم آب ذخیره‌شده کل

روند تغییرات حجم آب ذخیره‌شده در آبخوان کارستی (V_t)، توسط روش Coutagne بر اساس رابطه (۱۳) برای سال‌های مختلف محاسبه و نتایج به دست آمده در شکل (۱۰) نشان داده شده است. با مقایسه این نمودار با نمودار (۹-ج) می‌توان نتیجه گرفت که حجم آب ذخیره‌شده در آبخوان کارستی توسط روش Coutagne طی زمان‌های مختلف دارای مقادیر بالاتری نسبت به مقادیر متناظر توسط روش Mangine می‌باشد.



شکل (۱۰): نمودار تغییرات حجم جریان ذخیره‌شده در آبخوان بر اساس روش Coutagne

نتیجه‌گیری

در این تحقیق دو روش تحلیلی شبیه‌سازی منحنی فروکش آب دهی چشمه‌های کارستی که توسط روش (Mangin, 1975, 269) و (Coutagne, 1968, 272) ارائه شده است، به منظور مدل‌سازی جریان فروکش چشمه‌علی دامغان طی نه سال در مقیاس روزانه مورد استفاده قرار گرفت. نتایج به دست آمده از این تحقیق نشان داد که هر دو روش مورد استفاده در مورد توسعه‌یافتگی بخش بالایی آبخوان کارستی مورد مطالعه و غالب بودن سیستم افشانی جریان آب در تشکیلات پائینی (بخش اشباع) اتفاق نظر دارند. هر دو مدل به منظور برآورد مقدار بهینه پارامترهای خود نیاز به واسنجی دارند. از نظر برآورد حجم جریان ذخیره‌شده در تشکیلات کارستی، روش *Mangin* و از نظر پیش‌بینی دبی روزانه طی دوره فروکش، روش *Coutagne* دارای کارایی و دقت بالاتر می‌باشد. بر اساس نتایج روش *Mangin*، می‌توان چنین گفت که حدود ۹۹/۵٪ از کل حجم آب ذخیره‌شده در تشکیلات کارستی آبخوان چشمه‌علی، در بخش اشباع ذخیره‌شده و جریان کند (پایه) آبخوان را تشکیل می‌دهد و حجم بسیار اندکی از جریان خروجی از چشمه در ناحیه نفوذی (غیراشباع) آبخوان به طور موقت ذخیره می‌شوند. به عنوان نتیجه نهایی، روش *Coutagne* نسبت به روش *Mangin* از این نظر که برای پیش‌بینی جریان فروکش چشمه برای سال‌های مختلف تنها به یک پارامتر (n) وابسته است و نیاز به جداسازی جریان‌های سریع و پایه چشمه طی دوره فروکش نیست و همچنین به دلیل سادگی ساختار مدل و زمان و محاسبات کمتر دارای ارجحیت می‌باشد. به عنوان پیشنهاد برای ادامه تحقیقات می‌توان مدل‌های مفهومی و فیزیکی دیگری را که اخیراً توسعه داده شده‌اند همچنین کارایی مدل‌های جعبه سیاه بر روی چشمه مورد مطالعه مورد ارزیابی قرارداد.

قدردانی و تشکر

نویسندگان مقاله از جناب آقای دکتر غلامحسین کرمی (دانشکده زمین‌شناسی دانشگاه صنعتی شاهرود) به خاطر راهنمایی‌ها و کمک‌های بی‌دریغشان کمال تشکر را دارند.

منابع

- کرمی، غلامحسین؛ ۱۳۸۸، شماره پیاپی ۳۶، شماره اول، نقش چینه شناسی در توسعه کارست در حوضه آبگیر چشمه علی دامغان، پژوهش‌های چینه نگاری و رسوب‌شناسی، صص ۵۲-۳۹.
- امیدی، پرویز؛ نوگل سادات، میرعلی اکبر؛ قرشی، منوچهر؛ ۱۳۸۰، جایگاه نظام گسلی دامغان در پهنه برشی همگرای آستانه - عطاری، فصلنامه علوم زمین، سال دهم، شماره ۳۹-۴۰، ۸۰ صفحه، *Geosciences Scientific Quarterly Journal, ISSN 1023-7429*
- کرمی، غ. ۱۳۸۳. بررسی هیدروژئولوژیکی و هیدروژئوشیمیایی چشمه کارستی چشمه علی دامغان. طرح پژوهشی با کد ۲۱۰۷. دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، ص ۴۷
- شکری، محمد؛ اشجاری، جواد؛ کرمی، غلامحسین؛ ۱۳۹۰، تأثیر تکتونیک و چینه شناسی در جهت‌یابی جریان آب زیرزمینی در حوضه آبگیر چشمه علی دامغان، پانزدهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، ۹ صفحه
- راهنمای تهیه آب‌نمود چشمه‌های کارستی و سازندهای سخت، ۱۳۸۴، گزارش وزارت نیرو، صفحه ۲۴
- شکری، محمد، دانشجوی کارشناسی ارشد زمین‌شناسی آب‌شناسی دانشگاه صنعتی شاهرود؛ کرمی، غلامحسین، دانشیار دانشکده علوم زمین دانشگاه صنعتی شاهرود، بررسی توسعه کارست در حوضه آبگیر چشمه علی دامغان با تلفیق مطالعات هیدروژئولوژیکی (GIS و IS)
- افراسیابیان، احمد (۱۳۷۲) مطالعات و تحقیقات منابع آب کارست در ایران، مجموعه مقالات دومین همایش جهانی منابع آب در سازندهای کارستی، کرمانشاه- تهران، صص ۱۳۷-۱۲۶
- میلانویچ، پتر، ت؛ ۱۹۸۱، هیدرولوژی کارست، ترجمه عبدالوحید آقاسی با همکاری احمد افراسیابیان، انتشارات طرح تهیه استانداردهای مهندسی آب کشور، ۱۳۷۸، ۴۳۴P
- شفیع مطلق، خدارحم؛ لشکری‌پور، غلامرضا؛ ۱۳۸۷، هیدروژئولوژی چشمه کارستی کورسا، چهارمین همایش زمین‌شناسی و محیط‌زیست، ۸ صفحه
- جوکار سرهنگی، عیسی؛ غلامی، وحید؛ بردی، رحیم؛ مرادنژاد، آنا؛ ۱۳۸۸، مقایسه عوامل مؤثر در آب دهی چشمه‌های کارستی و آبرفتی (مطالعه موردی استان مازندران)، گزارش کوتاه علمی، مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی، جلد شانزدهم، شماره دوم
- کریمی وردنجانی، حسین؛ ۱۳۸۴، بررسی هیدروژئولوژیکی چشمه‌های کارستی موگرمون و سرآسیاب، مجموعه مقالات نهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران
- خانلری، غلامرضا؛ مؤمنی، علی اکبر؛ ۱۳۹۱، ژئومورفولوژی، هیدروژئولوژی و مطالعه فاکتورهای مؤثر بر توسعه کارست در منطقه گرین، غرب ایران، جغرافیا و آمایش شهری - منطقه‌ای شماره ۳، صفحات ۷۴-۶۱
- شایگان، مهران؛ علی‌محمدی، عباس؛ روحانی، حامد؛ ۱۳۹۰، مدل‌سازی هیدرولوژیک حوضه طالقان در محیط GIS با استفاده از مدل SWAT، سنجش از دور و GIS ایران سال سوم تابستان ۱۳۹۰ شماره ۲ (پیاپی ۱۰)، صص ۱۸-۱
- شهبازی، رضا، فیض‌نیا، سادات، ۱۳۹۰، تأثیر سازندهای زمین‌شناسی بر کاهش کیفیت آب‌های سطحی و زیرزمینی در حوزه آبخیز کویر مرکزی ایران (مطالعه موردی: حوزه آبخیز چشمه‌علی دامغان)، شماره ۱، پژوهش‌های فرسایش محیطی

Atkinson, T.C., 1977, **Diffuse flow and conduit flow in limestone terrain in the Mendip Hills, Somerset (Great Britain)**. J. Hydrol., Vol. 35, pp. 93-103.

Bonacci O., 1987, **Karst hydrogeology and water resource- past, present and future**. Karst hydrodeology and water resource, IAHS publ. No. 164, pp. 205-213.

Bonacci O., 1993, **Karst spring hydrographs as indicators of karst aquiferes**. Hydrogeological sciences- journal, des science hydrologiques, Vol. 38, No. 1, pp. 51-62.

- Eisenlohr L., Kiraly L., Bouzelboudjen M., Rossier Y., 1997, **Numerical simulation as a tool for checking the interpretation of karst spring hydrographs**, Journal of Hydrology, Vol. 193, No. 1–4, pp. 306–315.
- Estrela, T., and Sahuquillo A., 1997, **Modeling the response of a karstic spring at Arteta aquifer in Spain**, Ground Water, Vol. 35, No. 1, pp. 18–24.
- Farlin J., and Maloszewski P., 2013, **On the use of spring baseflow recession for a more accurate parameterization of aquifer transit time distribution functions**, Hydrology and Earth System Sciences, Vol. 17, No. 5, pp.1825-1831.
- Ford, D., and Williams, P., 2007, **Karst Hydrogeology and Geomorphology**, Second edition.
- Guzha A.C., Hardy T.B., 2010, **Application of the Distributed Hydrological Model, TOPNET, to the big darby Creek watershed**, Ohio, USA, Water Resour Manage, Vol. 24, pp. 979-1003.
- Halihan T. , Wicks C. M. , Engeln J. F. , 1998, **Physical response of a karst drainage basin to flood pulses: Example of the Devil's Icebox cave system (Missouri, USA)**, Journal of Hydrology, Vol. 204, No. 1–4, pp. 24–36.
- Halihan T., and Wicks Carol M., 1998, **Modeling of storm responses in conduit flow aquifers with reservoirs**, Journal of Hydrology, Vol. 208, No. 1–2, pp. 82–91.
- Maillet, E., 1905, **Essais d'Hydraulique Souterraine et Fluviale**, Paperback: 280 pages, Publisher: Kessinger Publishing, LLC (February 6, 2009), Language: French
- Padilla .A, Pulido-Bosch .A, and Mangin. A, **Relative importance of baseflow and quickflow from hydrographs of karst spring**. Ground water, Vol. 32, No. 2, pp. 267–277.
- Raeisi, E., and Karami, G., 1997, **Hydrochemographs of Berghan Karst Spring as Indicators of Aquifer Characteristics**, Journal of Cave and Karst Studies, Vol. 59, No. 3, pp. 112-118.
- Rostamian R., Mousavi S.F., Heydarpour M., Afiuni M., and Abbaspour K., 2009, **Application of SWAT 2000 Model for Estimating Runoff and Sediment in Beheshtabad Watershed, a Sub-basin of Northern Karun**, Journal of Sciences and Technology of Agriculture and Natural Resources, Vol. 46, pp. 517-531 (persian).
- Soulios G., 1991, **Contribution a letude des courbes de recession des sources karstiques: Example du pays Hellenique**. Journal of Hydrol., Vol. 127, pp. 29-42.