

## بررسی روند و مدل‌سازی خشکیدگی جریان با برآورد عدم قطعیت آن (مطالعه موردی: رودخانه بشار استان کهگیلویه و بویراحمد)

مهدی بهرامی<sup>۱\*</sup>، ابوالحسن فتح‌آبادی<sup>۲</sup>، علی حجتی<sup>۳</sup>

۱. استادیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فسا

۲. استادیار، دانشکده منابع طبیعی و کشاورزی، دانشگاه گنبد کاووس

۳. کارشناس ارشد مهندسی عمران آب، سازه‌های هیدرولیکی

(تاریخ دریافت ۱۳۹۵/۰۸/۱۱؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۵/۱۰/۱۰)

### چکیده

شاخه خشکیدگی نشان‌دهنده توازن شبکه رودخانه بین دریافتی‌ها و هدررفت‌های رودخانه است. منحنی خشکیدگی رابطه ذخیره- خروجی را برای خوشه نشان می‌دهد. هدف از پژوهش حاضر بررسی روند، مدل‌سازی خشکیدگی و برآورد عدم قطعیت مدل‌سازی خشکیدگی در ایستگاه شاه‌مختار روی رودخانه بشار در استان کهگیلویه و بویراحمد است. براساس نتایج آزمون من- کندال دبی در ایستگاه مطالعه‌شده روند بسیار جزئی افزایشی دارد، اما روند معناداری مشاهده نشد. پس از تعیین روند قطعات خشکیدگی تعیین و مدل‌های مایلت، بارنز، بوزینس، هورتن، کوتانگ، دراگ و مخزن توانی به آنها برآزش داده شد. در این زمینه ابتدا قسمت‌های مختلف قطعات خشکیدگی (در مدل‌های چندمخزنی) تعیین و سپس مقادیر پارامترهای مدل‌های مختلف برآورد شد. برای کالیبره کردن ضرایب معادلات علاوه بر روی هم انداختن هیدروگراف‌های برآوردی و مشاهداتی (ترسیمی) از معیار جمع مربعات خطا نیز استفاده شد. مقایسه نتایج مدل‌ها در مدل‌سازی خشکیدگی نیز بیانگر عملکرد مدل‌ها به ترتیب دراگ (ویتنبرگ و کوتانگ)، بارنز، هورتون، بوزینس، مخزن توانی و مایلت بود.

**کلیدواژگان:** رودخانه بشار، روند، شاخه خشکیدگی، هیدروگراف، کهگیلویه و بویراحمد.

## مقدمه

زمانی که ورودی حوضه، تبخیر- تعرق و برداشت از آب‌های زیرزمینی ناچیز باشد، منحنی خشکیدگی جریان رابطه ذخیره- خروجی را برای حوضه بیان می‌کند. شناخت این رابطه می‌تواند در مسائلی مانند پیش‌بینی جریان‌های کمینه، مدیریت و تصمیم‌گیری منابع آب، تخمین پارامترهای زهکشی حوضه آبخیز در مدل‌های مفهومی حوضه، انرژی برقی، کالیبره کردن مدل‌های هیدرولوژیکی، تشخیص مناطق تغذیه و فرایندهای غالبی که سبب تولید رواناب می‌شود و تخمین آب ذخیره‌شده در حوضه‌های یخچالی مفید باشد [۱ و ۲]. نوع منبع ذخیره موجود در یک حوضه مشخص، چگونگی ارتباط این منابع و همچنین تأثیر هدررفت‌ها سبب پیچیدگی دبی پایه و شاخه خشکیدگی هیدروگراف می‌شود و در اغلب موارد موجب می‌شود که رابطه ذخیره- دبی در یک حوضه به صورت غیر خطی باشد.

مسئله دیگری که سبب پیچیدگی مدل کردن خشکیدگی شده است، تغییر خصوصیات خشکیدگی متناسب با زمان است که در تغییر شکل قطعات خشکیدگی هیدروگراف رودخانه نمایان می‌شود. این امر ممکن است به دلیل تغییرپذیری فاکتورهایی مانند توزیع مکانی بارش، ذخیره باقی‌مانده در بدنه آبی متصل به هم، رطوبت حوضه، ضخامت آبخوان اشباع یا عمق نفوذ رودخانه در داخل آبخوان باشد. همچنین جریان پایه ممکن است بر اثر عواملی مثل بارش و تبخیر- تعرق دارای تغییرات فصلی باشد [۳ و ۴].

یک شاخه خشکیدگی به‌عنوان قسمتی از هیدروگراف شناخته می‌شود که از پیک جریان یا از نقطه‌ای روی شاخه پایین‌رونده هیدروگراف شروع می‌شود که منطبق با توقف بارش است و تا زمانی ادامه دارد که دبی یا بارش افزایش یابد [۴]. شکل منحنی خشکیدگی تحت تأثیر خصوصیات هیدرودینامیکی آبخوان مانند هدایت هیدرولیکی، ضریب ذخیره، شیب هیدرولیکی و خصوصیات ژئومورفولوژیکی حوضه آبخیز از قبیل ژئومتری، شیب و طول رودخانه است. تأثیرگذاری فاکتورهای مختلف سبب پیچیده شدن شاخه خشکیدگی می‌شود.

برای مدل‌سازی شاخه خشکیدگی راه حل استاندارد و مدونی وجود ندارد. به‌طوری که برخی محققان آن را به‌صورت تحلیلی و برخی دیگر به‌صورت تجربی مدل‌سازی کرده‌اند [۳، ۵ و ۶].

با توجه به پژوهش‌های انجام‌شده، استفاده از معادله ساده توانی نمی‌تواند به‌خوبی منحنی خشکیدگی را تحت دامنه وسیعی از جریان‌ها مدل‌سازی کند، بنابراین باید به دنبال روابطی بود که بتواند منحنی خشکیدگی را به‌صورت غیر خطی یا مفهومی توسط بیش از یک مخزن مدل‌سازی کند که زمان‌های پاسخ متفاوت دارند [۳ و ۵]. نخستین مطالعات مختص به شاخه خشکیدگی برمی‌گردد به تحقیقات بوزینس (۱۸۷۷) که یک سری کارهای تئوریک روی مکانیزم زهکشی آبخوان انجام داد. مور (۱۹۹۷) به بررسی عملکرد مدل‌های مختلف تک‌مخزنی (شامل مدل خطی، ذخیره توانی، ذخیره رواناب غیر خطی) و چندمخزنی (مدل مخازن موازی و سریالی) در حوضه South Creek آمریکا با مساحت ۱۷ هکتار اقدام کرد. نتایج نشان داد مدل‌های چندمخزنی عملکرد بهتری نسبت به مدل‌های تک‌مخزنی دارند [۱]. چپمن (۱۹۹۹) کارایی دو مدل کوتانگ و مایلت را در مدل‌سازی خشکیدگی در منطقه کوئیزلند و نیوسوولز استرالیا بررسی کرد. نتایج پژوهش او نشان داد هیچ‌گونه رابطه‌ای بین پارامترهای مدل‌های مختلف و دبی شروع وجود ندارد و کمترین و بیشترین مقادیر به‌دست‌آمده برای پارامتر  $a$  به ترتیب  $۱/۶۲$  و  $۳/۲۴$  بودند [۱۲]. دوندل و همکارانش (۲۰۰۳) کارایی دو روش مایلت و بوزینس را در مدل‌سازی شاخه خشکیدگی یک چشمه در کشور عمان بررسی کردند. نتایج تحقیق آنها نشان داد در حالتی که در آبخوان جزء عمودی جریان غالب باشد، رابطه مایلت و زمانی که جزء افقی جریان غالب باشد، رابطه بوزینس عملکرد بهتری دارند [۷].

هدف از پژوهش حاضر مدل‌سازی خشکیدگی در ایستگاه شاه‌مختار بر رودخانه بشار در استان کهگیلویه و بویراحمد بود. به‌طور خلاصه، در این پژوهش اهداف زیر پیگیری شد: ۱. بررسی روند داده‌های دبی رودخانه بشار؛ ۲. تعیین بهترین رابطه ذخیره- خروجی و تعیین خطی یا غیر خطی بودن رابطه دبی- ذخیره در حوضه مطالعه‌شده؛ ۳. به‌دست آوردن یک ثابت خشکیدگی واحد برای حوضه و ۴. برآورد عدم قطعیت مدل‌های خشکیدگی جریان.

## مواد و روش‌ها

## منطقه مطالعه‌شده

حوضه آبریز رودخانه بشار از زیرحوضه‌های کارون است که از کوه‌های سپیدان واقع در استان فارس سرچشمه می‌گیرد و

که در آن  $m$  تعداد دسته‌ها با داده‌های گره‌دار و  $t_i$  تعداد داده‌های گره‌دار در هر دسته  $m$  است. در نهایت، ضریب  $Z$  من- کندال از رابطه ۳ محاسبه شد:

$$Z = \begin{cases} (s-1)/\sigma_s, & ifs > 0 \\ 0, & ifs = 0 \\ (s+1)/\sigma_s, & ifs < 0 \end{cases} \quad (3)$$

مقدار  $Z$  به‌دست‌آمده با رابطه‌های یادشده با مقادیر  $Z$  به‌دست‌آمده از جدول توزیع نرمال استاندارد با سطح اطمینان مد نظر مقایسه شد. چنانچه  $Z$  محاسباتی بزرگ‌تر از  $Z$  جدول باشد فرض صفر مبنی بر نبود روند با سطح اطمینان مد نظر رد می‌شود. در صورت وجود روند مقادیر  $Z$  مثبت نشان‌دهنده روند مثبت و مقادیر منفی  $Z$  نشان‌دهنده روند منفی است.

در گام بعدی با استفاده از سه رویکرد ارائه‌شده توسط ون استروچ (۱۹۹۵)، حامد و راو (۱۹۹۸) و یو و همکارانش (۲۰۰۲) خودهمبستگی در بررسی روند لحاظ شد [۸، ۹ و ۱۰].

برای حذف تأثیر خودهمبستگی در سری‌های سالیانه روش  $pre\_whitened$  به‌صورت رابطه ۴ توسط ون استروچ (۱۹۹۵) ارائه شده است [۸]:

$$Y_t = X_t - r_1 X_{t-1} \quad (4)$$

در این رابطه  $r_1$  مقادیر خودهمبستگی در تأخیر اول و  $X_t$  داده مشاهداتی در زمان  $t$  است. پس از به‌دست‌آوردن مقادیر باقی‌مانده‌ها ( $Y_t$ )، تست من- کندال روی مقادیر باقی‌مانده‌ها صورت گرفت. حامد و راو (۱۹۹۸) تأثیر خودهمبستگی را از طریق تعیین اندازه بهینه و اصلاح واریانس محاسباتی من- کندال از بین بردند [۹]. اندازه بهینه نمونه واریانس اصلاحی با استفاده از رابطه‌های (۱۹) و (۲۰) تعیین شد:

$$n/n^* = 1 + \frac{2}{n(n-1)(n-2)} \sum_{j=1}^{n-1} (n-k)(n-k-1)(n-k-2)r_k^R \quad (5)$$

$$V^*(S) = V(S) \frac{n}{n^*} \quad (6)$$

صفر نباشد، فرض می‌شود که روند خطی است و روند با استفاده از رابطه ۸ از بین می‌رود:

$$b = Median \left( \frac{X_j - X_l}{j - l} \right) \quad (7)$$

$$X'_t = X_t - T_t = X_t - bt \quad (8)$$

که در آن  $b$  شیب روند و  $X_t$  مشاهده  $I$  است.

سرانجام به رودخانه ماربر می‌پیوندد و رودخانه خرسان را تشکیل می‌دهد. حوضه آبریز رودخانه بشار تقریباً مستطیل‌شکل با طول حدود ۱۰۰ کیلومتر است که در محدوده طول‌های جغرافیایی  $51^{\circ}05'$  تا  $51^{\circ}53'$  شرقی و عرض‌های جغرافیایی  $30^{\circ}16'$  تا  $31^{\circ}02'$  شمالی قرار گرفته است. بیشترین ارتفاع حوضه  $4437$  متر از سطح دریا (قله دنا) و کمترین آن  $1357$  متر و ارتفاع متوسط آن  $2199$  متر است. حوضه آبریز رودخانه بشار بسیار مرتفع و کوهستانی است. به‌طوری که در زمستان‌ها همه حوضه پوشیده از برف است. پوشش گیاهی محدوده را بیشتر در مناطق مرتفع درختان و درختچه‌های بومی ناحیه زاگرس و در مناطق پست عمدتاً زمین‌های کشاورزی تشکیل می‌دهد.

### بررسی روند

ابتدا با استفاده از روش مرسوم من- کندال که در آن خودهمبستگی در نظر گرفته نمی‌شود (رابطه ۱) وجود روند بررسی شد. در این آزمون با فرض  $H_0$  داده‌ها از یک سری گرفته شدند که مستقل و توزیع یکسان دارد. مراحل آزمون من- کندال به‌صورت معادله‌های زیر است:

$$S = \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \text{sgn}(x_j - x_i), \quad (1)$$

$$\text{where } \text{sgn}(x) = \begin{cases} +1, & x > 0 \\ 0, & x = 0 \\ -1, & x < 0 \end{cases}$$

که واریانس فرایند از رابطه ۲ تعیین می‌شود:

$$\sigma_s^2 = \frac{1}{18} \left[ N(N-1)(2N+5) - \sum_{i=1}^m t_i(t_i-1)(2t+5) \right] \quad (2)$$

در این رابطه‌ها  $r_k^R$  مقدار خودهمبستگی رتبه‌هاست. یو و همکارانش (۲۰۰۲) برای حذف تأثیر خودهمبستگی بر داده‌های سالانه، الگوریتم چندمرحله‌ای زیر را ارائه دادند [۱۰]: ابتدا با استفاده از روش TSA (رابطه ۷) شیب روند در سری داده‌ها تخمین زده می‌شود [۱۱]. اگر شیب برابر صفر باشد لزومی برای ادامه آنالیز روند نیست، و اگر

پارامترهای منحنی خشکیدگی مقدار دبی شروع به‌عنوان یک پارامتر در نظر گرفته و مقدار آن بهینه‌سازی می‌شود. معمولاً به‌منظور کاهش تأثیر رواناب سطحی قسمت ابتدایی دوره خشکیدگی در نظر گرفته نمی‌شود و در برخی مواقع قسمت انتهایی آن برای جلوگیری از تأثیر بارش‌های بعدی در نظر گرفته نمی‌شود که این تعداد روز متناسب با پاسخ حوضه است [۳].

حذف این تعداد روز به‌دلیل آن است که از ورود داده‌هایی که به‌طور مستقیم متأثر از بارش هستند در تجزیه و تحلیل جلوگیری شود [۱]. با توجه به نتایج سایر پژوهش‌ها در این پژوهش تعداد روزهای حذفی دو روز در نظر گرفته شد [۲ و ۵]. برای برازش و برآورد پارامترهای مدل‌های مختلف نیاز است تا شاخه خشکیدگی دوامی بیشتر از یک تعداد روز مشخص داشته باشد. در تحقیقات تالاکسون (۱۹۸۸) حداقل دوام را برابر هفت روز، گریفیتس و همکارانش (۱۹۹۷) برابر ۱۴، مور (۱۹۹۷) برابر پنج روز، و وگول و کرول (۱۹۹۲)، چپمن (۲۰۰۳) و ریس و همکارانش (۲۰۰۴)، برابر ده روز در نظر گرفتند [۱، ۲، ۳، ۱۵، ۱۶ و ۱۷]. بر این اساس، در تحقیق حاضر حداقل دوام شاخه خشکیدگی برابر ده روز در نظر گرفته شد.

#### برازش مدل‌های مختلف

پس از تعیین قطعات خشکیدگی اقدام به برازش مدل‌های مایلت (رابطه ۱۱)، بارنز (رابطه ۱۲)، بوزینس (رابطه ۱۳)، هورتن (رابطه ۱۴)، دراگ (رابطه ۱۵)، کوتانگ (رابطه ۱۶) و مخزن توانی (رابطه ۱۷) شد:

$$Q_t = Q e^{-at} \quad (11)$$

$$Q_t = \sum Q_i e^{-a_i t} \quad (12)$$

$$Q_t = \frac{Q}{(1+at)^2} \quad (13)$$

$$Q_t = Q e^{-at^m} \quad (14)$$

$$Q_t = \frac{Q \cdot}{(1+at)^n} \quad (15)$$

$$Q_t = Q [1 + (n-1)t]^{n/(1-n)} \quad (16)$$

$$Q = \frac{Q_0}{(1+\Phi Q_0 t)} \quad (17)$$

در این روابط  $Q_t$  مقدار دبی در زمان  $t$ ،  $Q_0$  مقدار دبی در شروع خشکیدگی،  $t$  زمان از شروع خشکیدگی به روز،  $a$ ،  $n$  و  $\Phi$  پارامترهای مدل‌های مختلف هستند. ابتدا

سپس مقدار خودهمبستگی مرتب اول سری بدون روند  $X_t'$  محاسبه‌شده و سپس مقدار ضریب خودهمبستگی مرتبه اول AR(1) از داده‌ها حذف می‌شود. این روش حذف خودهمبستگی بعد از حذف روند به‌عنوان روش (TFPW) است. باقی‌مانده‌ها بعد از حذف روند باید یک سری مستقل را تشکیل دهند.

$$Y_t' = X_t' - rX_{t-1}' \quad (9)$$

در گام بعد مقادیر روند حذف‌شده در گام نخست با مقادیر باقی‌مانده‌ها جمع می‌شود:

$$Y_t = Y_t' + T_t \quad (10)$$

در نهایت، آزمون من-کندال روی سری  $Y_t$  اعمال می‌شود.

#### انتخاب شاخه خشکیدگی

در مدل‌سازی شاخه خشکیدگی ابتدا نیاز است تا قطعات خشکیدگی تعیین و جداسازی شوند. در این پژوهش منظور از شاخه خشکیدگی آن قسمت از هیدروگراف است که از دبی پیک شروع شده است و تا زمانی ادامه دارد که دبی افزایش می‌یابد. همچنین منظور از قطعات خشکیدگی، آن قسمت از شاخه خشکیدگی است که برخی از مقادیر دبی آن حذف و آماده تجزیه و تحلیل و برازش مدل‌های مختلف است.

یکی از مسائل مهم در بررسی منحنی خشکیدگی، تعیین نقطه شروع و دوام خشکیدگی است. در حالت وجود یک مخزن خطی مقادیر به‌دست‌آمده خشکیدگی مستقل از جریان یا زمان شروع است و انتخاب یک قطعه خشکیدگی به‌سادگی انجام می‌شود. در عمل این حالت کمتر اتفاق می‌افتد و برای تعیین خشکیدگی از داده‌های دبی متوالی روش مدونی وجود ندارد. بدین‌منظور برای تعیین شاخه‌های خشکیدگی ابتدا از داده‌های دبی و بارش به‌طور هم‌زمان استفاده می‌شود. برای یک حوضه، دبی شروع می‌تواند ثابت یا متغیر باشد. همچنین بسته به تعداد قطعات خشکیدگی در نظر گرفته‌شده می‌توان یک یا چند دبی شروع در نظر گرفت. در حالت دبی شروع ثابت مقدار دبی ابتدای خشکیدگی به‌عنوان دبی شروع انتخاب می‌شود. در حالت دبی شروع متغیر، همانند سایر

دبی اندازه گیری شده،  $\hat{X}_i$  مقدار دبی نام برآوردی و  $X_i$  مقدار دبی  $i$  ام مشاهداتی و  $m$  تعداد داده های دبی هستند. ۳. با استفاده از رابطه (۱۹) برای هر مجموعه پارامترها یک وزن احتمالاتی محاسبه شد:

$$W_i = \frac{L(\theta_i)}{\sum_{k=1}^N L(\theta_k)} \quad (19)$$

که  $N$  تعداد مجموعه پارامترهای رفتاری  $L(\theta_i)$  تابع احتمال برای پارامتر  $\theta_i$  است.

۴. با استفاده از وزن های احتمالاتی پارامترهای رفتاری، تابع توزیع تجمعی تعیین و چارک ها و فواصل اطمینان مشخص می شود.

#### معیارهای ارزیابی

در هر مرحله برای مقایسه مدل های مختلف از معیارهای RMSE (میانگین مربعات خطا) و معیار AARE (متوسط مقادیر مطلق خطای نسبی) استفاده شد:

$$RMSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_i^i - Q_i^c)^2 \quad (20)$$

$$AARE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \left| \frac{Q_i^i - Q_i^c}{Q_i^i} \times 100 \right| \quad (21)$$

که در آن  $n$  تعداد داده ها،  $Q_i^i$  دبی مشاهداتی و  $Q_i^c$  دبی شبیه سازی شده است.

#### نتایج و بحث

##### بررسی روند

در شکل ۱ مقادیر دبی سالانه و خط سن برای ایستگاه مطالعه شده آورده شده است. ملاحظه می شود در ایستگاه مطالعه شده روند بسیار جزئی افزایشی وجود دارد (در این ایستگاه مقدار شیب سن برابر با ۰/۰۸۸۲ به دست آمد). در جدول ۱ نتایج مختص به آزمون های مختلف آورده شده است. با توجه به نتایج این جدول هیچ یک از روش های بررسی شده روند معناداری را برای ایستگاه بررسی شده تشخیص ندادند.

با لگاریتم گیری از داده های دبی قسمت های مختلف قطعات خشکیدگی (در مدل های چندمخزنی) تعیین شد. سپس روابط هریک از مدل ها در نرم افزار اکسل نوشته و با در نظر گرفتن معیار جمع مربعات خطا پارامترهای هریک از مدل ها با استفاده از Solver نرم افزار اکسل بهینه سازی شد. پس از برازش مدل مناسب به هریک از قطعات خشکیدگی به منظور برازش مدل خشکیدگی واحد حوضه، در روش Matching straip همه قطعات خشکیدگی روی یک نمودار با هم ترسیم و به صورت بصری تابعی که بهترین برازش را به داده های مشاهداتی داشت به عنوان بهترین مدل انتخاب شد. در روش مور (۱۹۹۷) همه قطعات خشکیدگی در یک ستون قرار گرفته و با در نظر گرفتن مقادیر دبی شروع مشاهداتی و معیار جمع مربعات خطا مقادیر پارامترهای آن بهینه شد [۱].

پس از برازش هریک از مدل ها و تخمین پارامترهای آنها آنالیز عدم قطعیت انجام گرفت (در این پژوهش از روش گلو استفاده شد). بدین منظور هیدروگراف یک سال انتخاب و دامنه عدم قطعیت برآورد شد. به منظور برآورد دامنه عدم قطعیت با استفاده از روش گلو مراحل کار به شرح زیر است:

۱. با در نظر گرفتن تابع توزیع یکنواخت به عنوان توزیع پیشین، اقدام به شبیه سازی مجموعه پارامترها به تعداد زیاد شد.

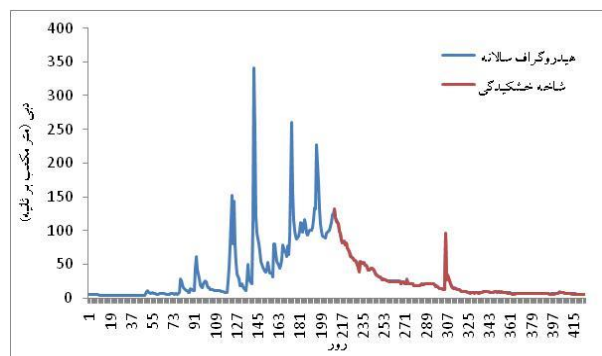
۲. مجموعه پارامترهای تولید شده در گام قبل را در مدل قرار داده و با در نظر گرفتن مقادیر معیار ناش-ساتکلیف به دست آمده مجموعه پارامترها را به پارامترهای کارآمد و ناکارآمد تقسیم شدند.

$$ME = 1 - \frac{\sum_{i=1}^m (X_i - \hat{X}_i)}{\sum_{i=1}^m (X_i - \bar{X})} \quad (18)$$

که در آن ME: ضریب کارایی مدل،  $\bar{X}$  میانگین مقادیر

جدول ۱. نتایج آزمون های مختلف کندال در ایستگاه شاه مختار

MK-PW		TFPW		MK-VCA		MK		ایستگاه شاه مختار
Z	P	Z	P	Z	P	Z	P	
۰/۱۲۱	۰/۹۰۳۷	۰/۱۲۱	۰/۹۰۳۷	۰/۴۳۱۱	۰/۶۶۶۴	۰/۴۳۱۱	۰/۶۶۶۴	۰/۱۱۴۸

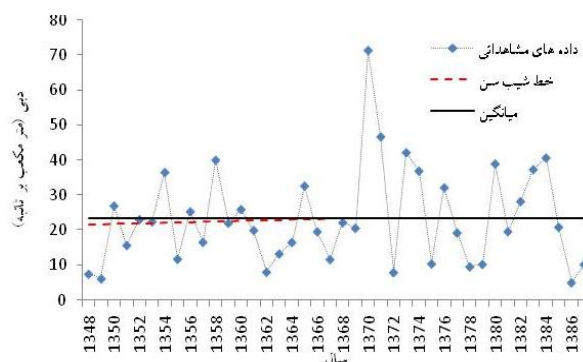


شکل ۲. هیدروگراف سالانه ایستگاه شاهمختار در سال آبی ۱۳۵۴-۱۳۵۵

مشاهداتی در ایستگاه مطالعه شده و تعداد خطوط برازش داده شده (با استفاده از روش بارنز) آورده شده است.

پس از تخمین پارامترهای مدل های مختلف با استفاده از معیارهای ارزیابی عملکرد آنها با یکدیگر مقایسه شد. پس از برازش مدل های مخزن غیرخطی شامل مدل های دراگ، کوتانگ و ویتنبرگ مشاهده شد شکل تابع برازش داده شده آنها کاملاً شبیه هم هستند. با دقت بیشتر در روابط این مدل ها مشاهده شد هر یک از این مدل ها را با کمی عملیات جبری می توان به یکدیگر تبدیل کرد. بنابراین، در این تحقیق فقط پارامترهای مدل های دراگ و کوتانگ تخمین زده شدند و مدل ویتنبرگ بررسی نشد.

در جدول ۲ عملکرد مدل های مختلف با توجه به مقادیر RMSE، AARE و مجموع مربعات خطا برای شاخه خشکیدگی در این ایستگاه آورده شده است. با توجه به عملکرد مشابه دو مدل دراگ و کوتانگ فقط روش دراگ در مقایسه مدل ها استفاده شد. در این جدول رتبه یک بدین معناست که در بین همه مدل ها مدل مد نظر بهترین عملکرد را داشته است. در هر سلول منتهی به مدل و رتبه تعداد دفعاتی که مدل رتبه مد نظر را داشته ذکر شده است. در این ایستگاه در طول دوره آماری بررسی شده ۱۴ شاخه خشکیدگی بلندمدت مناسب تشخیص داده شد. با توجه به جدول ۱ ملاحظه می شود مدل دراگ بهترین عملکرد را به خود اختصاص داده است و بعد از آن به ترتیب مدل های بارنز و هورتن قرار دارند. بدترین عملکرد نیز مختص به مدل بوزینس، مخزن توانی و مایلت است. این در حالی است که در تحقیقات مور (۱۹۹۷) و امیت و همکارانش (۲۰۰۴) روش بارنز عملکرد بهتری نسبت به مدل های با مخزن غیرخطی داشته است [۱ و ۱۳].



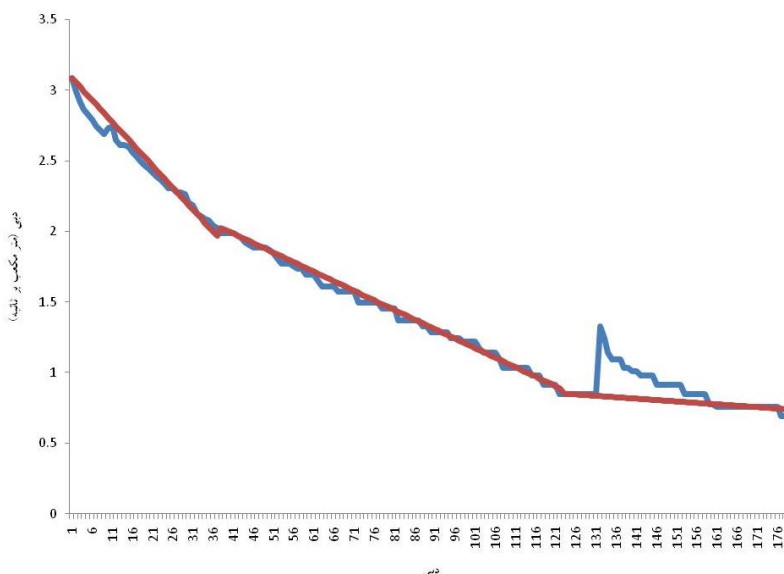
شکل ۱. مقادیر دبی مشاهداتی و شیب خط سن در ایستگاه شاهمختار

### تعیین ضرایب خشکیدگی قطعات خشکیدگی

همان طور که بیان شد ابتدا با رسم هیدروگراف سالانه، به تعیین و انتخاب قطعات خشکیدگی اقدام شد. معمولاً در هر سال یک شاخه خشکیدگی اصلی وجود داشت که از دوام زیادی برخوردار و نشان دهنده منابع ذخیره شامل ذخایر برفی و یخچالی و آبخوان های عمیق حوضه بود. در شکل ۲ نمونه ای از شاخه خشکیدگی مختص به سال آبی ۱۳۵۴-۱۳۵۵ آورده شده است. سایر خشکیدگی ها دوام کافی (حداقل ۱۰ روز) نداشتند و تخمین مقادیر پارامترهای مختلف ممکن نبود.

پس از تعیین قطعات خشکیدگی به هر یک از آنها، مدل های مختلف برازش داده و مقادیر پارامترهای آنها با در نظر گرفتن معیار جمع مربعات خطا برآورد شدند. همان طور که در قسمت قبل بیان شد در مدل سازی خشکیدگی یک پارامتر مهم مقدار دبی ثابت اولیه شروع خشکیدگی است. در این رابطه فقط در پژوهش چپمن (۱۹۹۹) صریح بیان کرده است که دبی اولیه بهینه سازی شده و در سایر پژوهش ها این مسئله بیان نشده است [۱۲]. با توجه به این مسئله پارامترهای مدل در دو حالت بررسی شد: الف) مقدار دبی شروع همان مقدار دبی مشاهداتی هیدروگراف گرفته شد و ب) دبی شروع بهینه شد.

به منظور شناسایی رفتار خشکیدگی جریان و تعیین تعداد منابع تغذیه کننده قطعات خشکیدگی روی کاغذ نیمه لگاریتمی ترسیم شدند. در این حالت هر خط نشان دهنده منبع تغذیه متفاوت است. در حوضه بررسی شده مشاهده شد در اغلب سال ها برای شاخه خشکیدگی سه خط راست می توان برازش داد. در شکل ۳ نمونه ای از هیدروگراف های



شکل ۳. برازش روش بارنز در ایستگاه شاه‌مختار

جدول ۲. عملکرد مدل‌های مختلف مدل‌سازی شاخه خشکیدگی در ایستگاه شاه‌مختار

۶	۵	۴	۳	۲	۱	
۱۲	۲	۰	۰	۰	۰	مایلت
۰	۲	۴	۲	۳	۳	بارنز
۰	۵	۱	۵	۳	۰	بوزینس
۰	۰	۷	۳	۰	۴	هورتن
۰	۰	۰	۱	۶	۷	دراگ
۲	۰	۲	۳	۲	۰	مخزن توانی

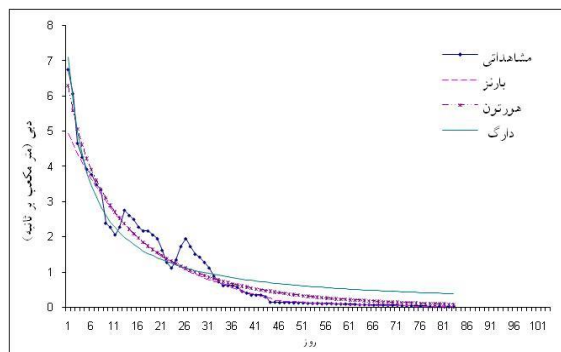
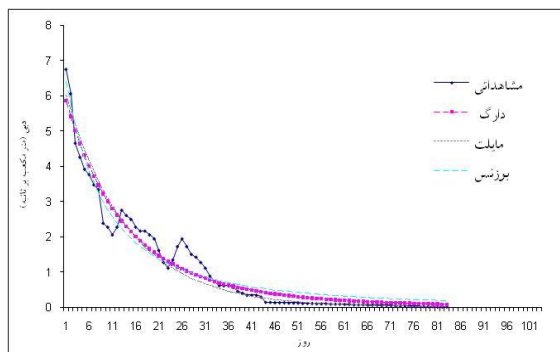
که با مقایسه مقادیر متوسط  $K$  برای سه خط برازش داده شده که برابر  $۰/۹۶۳$ ،  $۰/۹۸۵$  و  $۰/۹۹۳$  به دست آمد، می‌توان دید که هیچ‌یک از ضرایب به دست آمده در بازه رواناب سریع و زیر قشری قرار نمی‌گیرند. بنابراین، مقادیر ضرایب به دست آمده را می‌توان به سایر مخازن مانند برف، یخ و مخازن آب زیرزمینی نسبت داد.

در شکل‌های ۴ و ۵ عملکرد مدل‌های مختلف در ایستگاه شاه‌مختار در سال آبی  $۱۳۵۷-۱۳۵۸$  آورده شده است که در آن عملکرد مدل‌ها به ترتیب عبارت‌اند از: دراگ (ویتنبرگ و کوتانگ)، بارنز، هورتون، مایلت، بوزینس و مخزن توانی.

در جدول ۳ برخی پارامترهای آماری (میانگین، کمترین، بیشترین و انحراف معیار) مقادیر ضرایب به دست آمده برای ایستگاه مطالعه شده آورده شده است. در این جدول منظور از  $A_1$ ،  $A_2$  و  $A_3$  پارامترهای مدل است. به‌طور مثال، در مدل بارنز منظور مقادیر ضرایب برای سه خط برازش داده شده است. در این جدول منظور از یک مربوط به حالتی است که برآورد پارامترها با در نظر گرفتن دبی مشاهداتی به عنوان دبی شروع صورت گرفته و ۲ مختص به حالتی است که دبی شروع بهینه شده است. برای روش بارنز، ناتان و مک ماهان (۱۹۹۰) دامنه  $(۰/۲-۰/۸)$  برای رواناب سریع،  $(۰/۷-۰/۹۴)$  زیر قشری و  $(۰/۹۳-۰/۹۹۵)$  آب پایه به دست آوردند [۱۴]

جدول ۳. پارامترهای آماری ضرایب روش‌های مطالعه‌شده در ایستگاه شاه‌مختار

روش	پارامتر	A1	A2	A3	روش	پارامتر	A1	A2	A3
مایلت	1	میانگین	-۰/۰۲۰۴		3 روش	1	میانگین	۱/۷۵۴۳	۰/۰۴۴۷
		حداقل	-۰/۰۱۵۰				حداقل	۴/۰۲۹۳	۰/۱۰۴۹
		حداکثر	-۰/۰۲۶۰				حداکثر	۱/۰۵۴۹	۰/۰۰۷۵
	2	انحراف معیار	۰/۰۰۳۹			انحراف معیار	۰/۹۳۳۱	۰/۰۳۰۲	
		میانگین	-۰/۰۱۵۱			میانگین	۱/۷۱۳۲	۰/۰۴۲۸	
		حداقل	-۰/۰۱۰۰			حداقل	۳/۱۳۱۶	۰/۱۰۹۷	
بارنز	1	حداکثر	-۰/۰۱۹۰		مخزن توانی	1	میانگین	۰/۰۰۱۳	
		انحراف معیار	۰/۰۰۲۹				حداقل	۰/۰۰۲۴	
		میانگین	۰/۰۰۳۹				حداکثر	۰/۰۰۰۶	
	2	حداکثر	-۰/۰۱۹۰			انحراف معیار	۰/۰۰۰۶		
		حداقل	-۰/۰۱۰۰			میانگین	۰/۰۰۳۵		
		انحراف معیار	۰/۰۰۲۹			حداقل	۰/۰۳۲۱		
بوزینس	1	حداکثر	-۰/۰۱۹۰		کوتاه‌نگار	1	حداکثر	۰/۰۰۰۶	
		حداقل	-۰/۰۱۰۰				انحراف معیار	۰/۰۰۸۲	
		انحراف معیار	۰/۰۰۲۹				میانگین	۰/۰۱۴۰	
	2	حداکثر	-۰/۰۱۹۰			حداقل	۰/۰۲۷۸		
		حداقل	-۰/۰۱۰۰			حداکثر	۱/۳۳۰۲	۰/۰۰۴۴	
		انحراف معیار	۰/۰۰۲۹			انحراف معیار	۵/۳۹۷۵	۰/۰۰۸۷	
هورتون	1	میانگین	۰/۰۲۳۷		2	میانگین	۰/۰۱۵۷		
		حداقل	۰/۰۳۷۹			حداقل	۱۶۳/۸۹۷۸	۰/۰۲۸۵	
		حداکثر	۰/۰۱۲۹			حداکثر	۱/۴۶۹۴	۰/۰۰۰۶	
	2	انحراف معیار	۰/۰۰۷۰			انحراف معیار	۴۲/۸۱۳۹	۰/۰۰۸۵	
		میانگین	۰/۰۲۲۰						
		حداقل	۰/۰۳۱۹						
هورتون	1	حداکثر	۰/۰۱۲۶		2	حداکثر	۰/۰۰۰۶		
		حداقل	۰/۰۰۵۹			انحراف معیار	۰/۰۰۸۵		
		انحراف معیار	۰/۰۰۵۹						
	2	میانگین	۰/۱۱۴۱	۰/۶۷۹۳					
		حداقل	۰/۲۱۳۶	۰/۸۹۷۱					
		حداکثر	۰/۰۳۵۹	۰/۵۵۳۳					
2	انحراف معیار	۰/۰۵۵۸	۰/۱۱۳۰						
	میانگین	۰/۲۱۵۷	۰/۵۷۳۵						
	حداقل	۰/۵۰۶۷	۰/۷۸۹۸						
2	حداکثر	۰/۰۵۳۸	۰/۴۰۱۳						
	انحراف معیار	۰/۱۴۰۴	۰/۱۲۸۳						

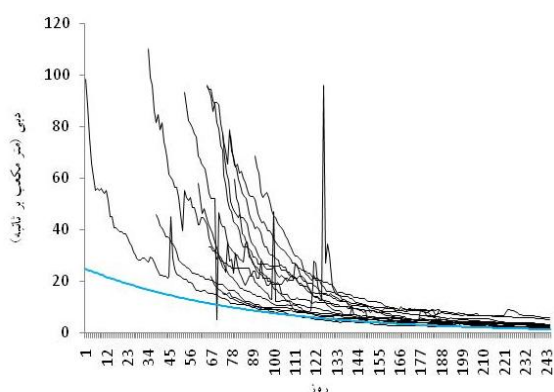


شکل ۴. عملکرد مدل‌های درآگ، مایلت و بوزینس در ایستگاه شاه‌مختار در سال آبی ۱۳۵۷-۱۳۵۸

شکل ۵. عملکرد مدل‌های بارنز، هورتون و مخزن توانی در ایستگاه شاه‌مختار در سال آبی ۱۳۵۷-۱۳۵۸



پارامترهای رفتاری و غیررفتاری برای همه مدل‌ها برابر ۰/۹۷ قرار داده شد. دو روش دراگ و کوتانگ که در قسمت‌های قبل مشابه هم عمل کرده بودند در این قسمت نیز عملکرد یکسانی در برآورد دامنه عدم قطعیت ۹۵ درصدی داشته و دامنه عدم قطعیت ۹۵ درصدی آنها شبیه یکدیگر بود. در این دو روش دامنه عدم قطعیت برآوردی به گونه‌ای بود که هیچ داده مشاهداتی خارج از دامنه عدم قطعیت ۹۵ درصدی نیست. در سه روش دیگر دامنه عدم قطعیت برآوردی به گونه‌ای بود که برخی از داده‌های مشاهداتی خارج از دامنه عدم قطعیت ۹۵ درصدی قرار گرفتند. در دو روش هورتون و بوزینس هم داده‌های مشاهداتی ابتدا و هم داده‌های مشاهداتی انتهای شاخه خشکیدگی خارج از دامنه عدم قطعیت بود در حالی که در روش مخزن توانی فقط داده‌های ابتدای شاخه خشکیدگی خارج از دامنه عدم قطعیت ۹۵ بود. به طور کلی، در همه مدل‌های بررسی شده می‌توان دید که دامنه عدم قطعیت برآوردی خیلی کوچک است.



شکل ۶. منحنی Matching striap! ایستگاه شاه‌مختار

#### تعیین ضرایب خشکیدگی واحد برای حوضه

برای تعیین خشکیدگی واحد از سه روش متوسط‌گیری از مقادیر خشکیدگی، روش Matching striap و روش مور (۱۹۹۷) استفاده شد [۱]. در روش Matching striap روی یک گراف قطعات خشکیدگی طوری روی هم اندازی می‌شوند که قسمت انتهایی آنها هم‌پوشانی داشته باشد و سپس یک منحنی به آنها برازش داده می‌شود. در شکل ۶ منحنی Matching striap ایستگاه مطالعه شده آورده شده است.

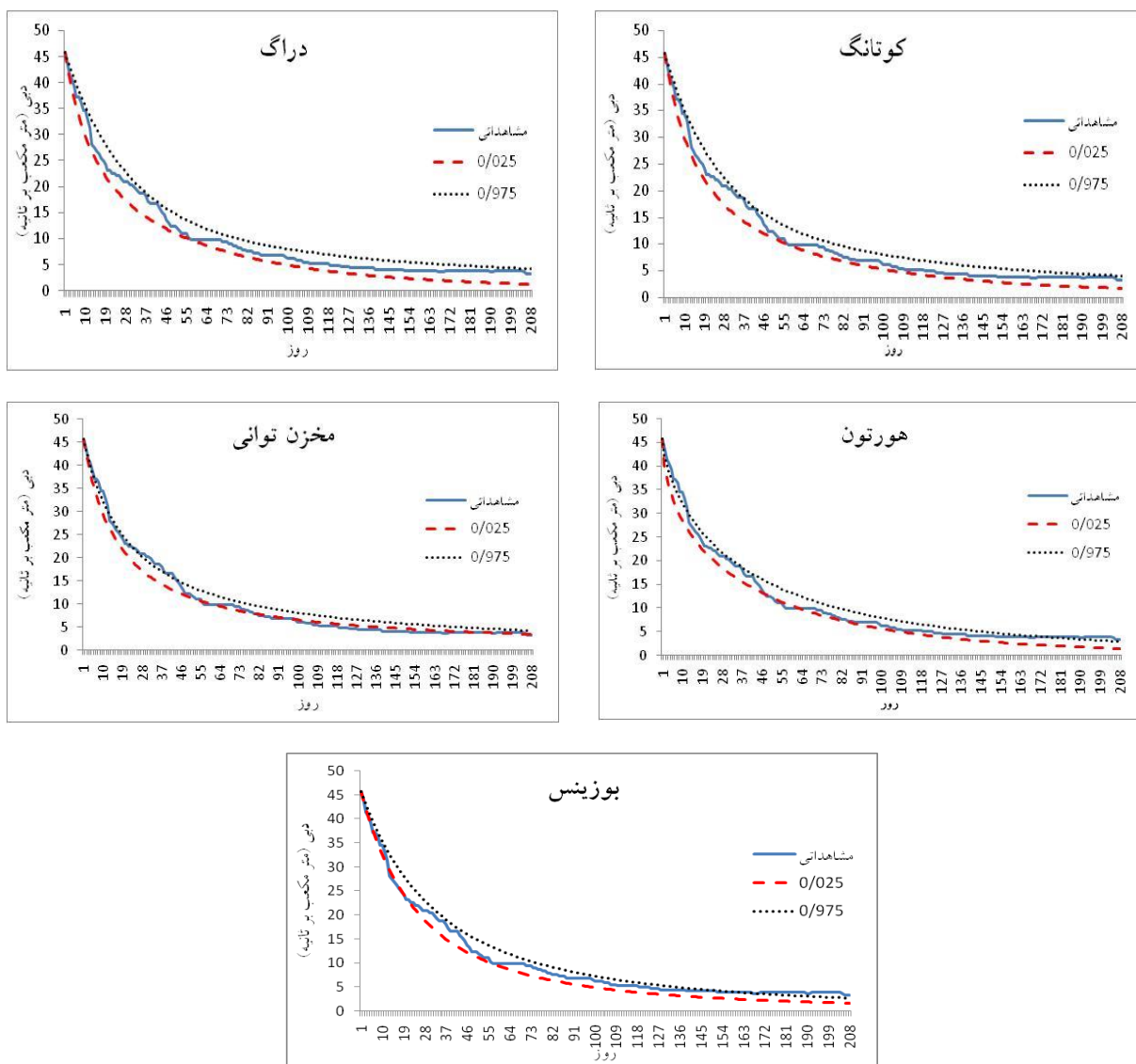
در جدول ۴ مقادیر ضریب خشکیدگی واحد ایستگاه که با استفاده از دو روش Matching Stripe و مور (۱۹۹۷) به دست آمده ارائه شده است [۱]. با استفاده از روش Matching Stripe فقط می‌توان قسمت انتهایی شاخه خشکیدگی را مدل سازی کرد یعنی آن قسمت از شاخه خشکیدگی که مختص به آب‌های زیرزمینی است. ملاحظه می‌شود در این ایستگاه اختلاف نسبتاً زیادی بین مقدار ضریب خشکیدگی مربوط به قسمت انتهایی قطعه خشکیدگی محاسبه شده با روش بارنز (مقدار ۰/۰۵۸) و Matching striap (۰/۰۱۰) وجود دارد. همچنین با مقایسه نتایج به دست آمده از روش‌های مور (۱۹۹۷) و Matching Stripe با نتایج متوسط‌گیری هر یک از مقادیر خشکیدگی، مشاهده می‌شود بیشترین اختلاف‌ها مختص به ضرایب  $A_2$  کوتانگ و  $A_1$  مخزن توانی است.

#### نتایج برآورد عدم قطعیت

در شکل ۷ نتایج مختص به آنالیز عدم قطعیت با استفاده از روش گلو آورده شده است. در این روش تعداد مجموعه پارامترهای نمونه برداری شده برابر ۱۵ هزار و آستانه

جدول ۴. مقادیر ضرایب کلی روابط مختلف با استفاده از دو روش مور (۱۹۹۷) و Matching stripe در ایستگاه شاه‌مختار

$A_2$	$A_1$	روش	روش مور ۱۹۹۷
-۰/۰۰۵۸۰	-۰/۰۳۰۳۸	بارنز	
-۰/۰۱۴۴۶	-۰/۰۱۹۳۰	مایلت	
	۰/۰۲۴۲۹	بوزینس	
۰/۶۵۳۰۳	۰/۱۱۶۴۸	هورتون	
۱/۴۳۵۳۳	۰/۰۳۹۹۵	دراگ	
	۰/۰۰۴۹۵	مخزن توانی	
۳/۲۹۷۱۹	۰/۰۱۷۳۹	کوتانگ	
	-۰/۰۱۰۰	Matching striap	



شکل ۷. نتایج آنالیز عدم قطعیت روش‌های مختلف در سال آبی ۱۳۶۸-۱۳۶۹

### نتیجه‌گیری

در بیشتر موارد عملکرد مدل‌ها در حالتی بهتر بود که دبی اولیه بهینه شود نسبت به حالتی که دبی اولیه دبی شروع هیدروگراف در نظر گرفته شود. در این پژوهش عملکرد روش مور (۱۹۹۷) نسبتاً خوب بود و استفاده از آن برای مدل‌سازی خشکیدگی کلی حوضه پیشنهاد می‌شود.

### منابع

- [1]. Moore RD. Storage-outflow modelling of streamflow recessions, with application to a shallow-soil forested catchment. *Journal of Hydrology*. 1997; 198: 260-270.
- [2]. Griffiths GA, Clausen B. Streamflow recession in basins with multiple water storages. *Journal of Hydrology*. 1997; 190: 60-74.

در این پژوهش از مدل‌های مختلف برای مدل‌سازی خشکیدگی رودخانه بشار در ایستگاه شاه‌مختار استفاده شد. نتایج نشان داد عملکرد مدل‌ها به ترتیب عبارت‌اند از: دراگ (ویتنبرگ و کوتانگ)، بارنز، هورتون، مایلت، بوزینس و مخزن توانی. در روش بارنز با توجه به مقادیر ضریب خشکیدگی ( $k$ ) به دست آمده در حالت قطعات خشکیدگی آخر سال هیچ‌یک از ضرایب خطوط برازش داده شده در دامنه رواناب سریع و زیر قشری قرار ندارد و در این حوضه سایر مخازن تغذیه از قبیل برف و یخچال سبب ایجاد خشکیدگی جریان می‌شوند.

- [3]. Tallaksen LM. A review of baseflow recession analysis. *Journal of Hydrology*. 1995; 165: 349-370.
- [4]. Brodie RS, Hostetler S. A review of technique for analyzing basflow from stream hydrographs. 2007.
- [5]. Wittenberg H. Nonlinear analysis of low flow recession curves. *FRIENDS: Flow Regimes from International and Experimental Network Data*. IAHS Publ. 1994; 221:61.
- [6]. Sujono J, Shikasho S, Hiramatsu K. A comparison of techniques for hydrographic recession analysis. *Hydrological Processes*. 2004; 18: 403-413.
- [7]. Dewandel B, Lachassagne P, Bakalowicz M, Weng PH, Al-Malki A. Evaluation of aquifer thickness by analysing recession hydrographs. Application to the Oman ophiolite hard-rock aquifer. *Journal of Hydrology*. 2003; 274:248-269.
- [8]. Von Storch VH. Misuses of statistical analysis in climate research, in H. V. Storch and A. Navarra (eds), *Analysis of Climate Variability: Applications of Statistical Techniques*, Springer-Verlag Berlin, 1995; 11-26.
- [9]. Hamed KH, Rao AR. A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data, *Journal of Hydrology*. 1998; 204: 182-196.
- [10]. Yue S, Pilon P, Phinney B, Cavadias G. The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series, *Hydrology Processes*. 2002; 16: 1807-1829.
- [11]. Sen PK. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau, *J. American Statist. Assoc.* 1968; 63: 1379-1389.
- [12]. Chapman TG. A comparison of algorithms for stream flow recession and baseflow separation. *Hydrology Processes*. 1999; 13: 701-714.
- [13]. Amit H, Lyakhovsky V, Katz A, Starinsky A, Burg A. Interpretation of spring recession curves. *Groundwater*. 2002; 40: 543-551.
- [14]. Nathan RJ, McMahan TA. Evaluation of automated techniques for baseflow and recession analysis. *Water Resources Research*. 1990; 26 (7):1465-1473.
- [15]. Vogel, RM, Kroll CN. Regional geohydrologic-geomorphic relationships for the estimation of low flow statistics. *Water Resources Research*. 1992; 28 (9): 2451-2458.
- [16]. Chapman TG. Modelling stream recession flows. *Environmental Modelling and Software*. 2003; 18 (8-9): 683-692.
- [17]. Rees HG, Holmes MGR, Young AR, Kansakar SR. Recession based hydrological models for estimating low flow in ungauged catchment in the Himalayas. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2004; 8(5): 891-902.