

## رابطه ویژگی‌های فیزیکی حوضه‌های آبخیز و دبی‌های حداقل با دوره‌های برگشت متفاوت (مطالعه موردی: حوضه آبخیز کشف‌رود)

مریم آذرخشی<sup>۱\*</sup>، سید جواد سعادت‌پور<sup>۲</sup>، علی‌رضا اسلامی<sup>۳</sup>

۱. استادیار دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تربت حیدریه

۲. کارشناسی ارشد آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تربت حیدریه

۳. استادیار پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری کشور، تهران

(تاریخ دریافت ۱۳۹۵/۰۳/۱۱؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۵/۰۶/۲۷)

### چکیده

تحلیل منطقه‌ای از مهم‌ترین روش‌های برآورد دبی جریان‌های حداقل در مناطق فاقد آمار است. بررسی ارتباط متغیرهای مؤثر بر خشکسالی هیدرولوژیکی به‌عنوان مهم‌ترین راهکار در مقابله و کاهش خسارت‌های ناشی از آن مطرح است. در این پژوهش از داده‌های ۲۵ ساله ۲۰ ایستگاه آب‌سنجی واقع در حوضه آبخیز کشف‌رود برای تحلیل جریان‌های حداقل استفاده شده است. حداقل جریان ایستگاه‌ها با تداوم‌های ۷ و ۱۵ روزه محاسبه شد و با استفاده از تحلیل فراوانی توزیع آماری لوگ پیرسون تیپ ۳ مناسب‌ترین توزیع تشخیص داده شد. سپس، جریان‌های حداقل با دوره بازگشت‌های ۲، ۵، ۱۰، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ ساله محاسبه شد. پس از محاسبه ویژگی‌های فیزیکی حوضه‌های مورد تحقیق با استفاده از تحلیل عاملی، در دو مرحله مؤثرترین پارامترها در تخمین جریان‌های حداقل شناسایی شدند. سپس با استفاده از تحلیل خوشه‌ای حوضه‌های موجود به دو منطقه همگن تقسیم و با استفاده از روش رگرسیون چندمتغیره خطی مدل‌های منطقه‌ای استخراج شد. نتایج نشان داد عوامل اول و دوم به ترتیب ۶۶/۱ و ۲۴/۲ درصد واریانس‌ها را بیان می‌کنند. مساحت، شیب متوسط و تراکم زهکشی حوضه آبخیز مهم‌ترین پارامترها در برآورد شاخص‌های جریان حداقل هستند و به ترتیب در ۱۰۰، ۷۹ و ۷۹ درصد معادلات معنادار رگرسیونی در مناطق همگن A و B دخالت دارند. همچنین مدل‌های ارائه‌شده برای مناطق همگن در مقایسه با مدل‌های کل منطقه، با توجه ضریب تبیین بالا و خطای استاندارد کمتر دقت بیشتری دارند.

**کلیدواژگان:** آنالیز منطقه‌ای، ارزش ویژه، تابع توزیع، خشکسالی هیدرولوژیکی، سری زمانی

## مقدمه

خشکسالی‌های مستمر، خسارت‌های جبران‌ناپذیری به منابع آبی، کشاورزی و پوشش گیاهی وارد می‌کند و پیامدهای زیست‌محیطی و اجتماعی زیادی به دنبال دارد. در اکوسیستم‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک زیست‌بوم‌ها حساس و شکننده‌اند و در برابر عوامل تخریب به‌سادگی در معرض نابودی و انهدام قرار می‌گیرند. اگرچه زمان وقوع خشکسالی به‌طور دقیق قابل پیش‌بینی نیست، همیشه احتمال وقوع آن وجود دارد [۱]. خشکسالی هیدرولوژیک دوره‌ای است که در آن جریان رودخانه به کمتر از مقدار طبیعی برسد و رواناب یا ذخیره منابع آبی به‌شدت کاهش یابد. محاسبه جریان حداقل رودخانه و همچنین دانستن ویژگی‌های آن در مطالعات هیدرولوژیکی مختلف مانند مدیریت کیفیت آب، تعیین حداقل دبی مورد نیاز برای تولید برق، طراحی سیستم‌های آبیاری و ارزیابی تأثیر دوره‌های خشکسالی طولانی‌مدت بر اکوسیستم‌های آبی حائز اهمیت است [۲]. پژوهشگران علوم مختلف مرتبط با خشکسالی تعریف‌های متفاوتی از این پدیده ارائه کردند و بنابراین روش‌های مطالعاتی خاصی را با توجه به شاخص‌های مورد توجه خود به‌کار گرفتند. فیزیوگرافی حوضه اثر تعیین‌کننده‌ای بر خصوصیات هیدرولوژیک و رژیم آبی آن دارد. با توجه به ثبات عوامل فیزیوگرافی و ارتباط بین آنها و دبی جریان، می‌توان از آنها در ارائه مدل‌های تخمین و برآورد دبی‌های مختلف جریان استفاده کرد. از میان روش‌های برآورد جریان‌های حداقل در مناطق بدون آمار کافی، تحلیل منطقه‌ای این نوع از جریان‌ها یکی از روش‌های مهم مطالعه خشکسالی است و برای این منظور استفاده از توزیع‌های آماری که مبتنی بر داده‌های کمی به‌دست‌آمده از ایستگاه‌های هیدرومتری است، قابلیت زیادی دارد [۳]. تجری و همکارانش [۴] در تحقیقی در حوضه آبخیز استان لرستان با استفاده از ۱۵ پارامتر فیزیوگرافی و اقلیمی در ۲۵ ایستگاه هیدرومتری، متغیرهای بارش، مساحت، تراکم زهکشی و درصد اراضی فقیر را به‌عنوان عوامل مؤثر در میزان جریان حداقل معرفی کردند. علی‌عسگری کاشانی و همکارانش [۵] در تحقیقی در ۲۹ ایستگاه هیدرومتری در استان گلستان به این نتیجه رسیدند که ایستگاه ناهمگن و ناجوری در منطقه وجود ندارد و منطقه از نظر هیدرولوژیکی کاملاً همگن است. چوگان و همکارانش [۶] در تحقیقی از داده‌های ۱۱ ایستگاه

هیدرومتری واقع در حوضه آبریز کارون شمالی برای برآورد جریان‌های حداقل بهره بردند و توزیع گامای دوپارامتره و ویبول را به‌عنوان بهترین توزیع فراوانی معرفی کردند و در نهایت به این نتیجه رسیدند که با افزایش دوره بازگشت مقادیر جریان حداقل کمتر می‌شود و شدت خشکسالی هیدرولوژیکی افزایش می‌یابد. حبیب‌نژاد روشن [۳] در مطالعه‌ای از داده‌های ۱۹ ایستگاه هیدرومتری و ۱۶ پارامتر فیزیوگرافی، اقلیمی و زمین‌شناسی در شمال شرق خراسان رضوی برای تحلیل جریان‌های حداقل استفاده کرده و مدل‌هایی برای تداوم‌های مختلف روزانه و دوره بازگشت‌های دو تا ۵۰ سال ارائه کردند. بررسی‌ها نشان داد که مدل‌های ارائه‌شده برای مناطق همگن ضرایب تبیین بالا و خطای استاندارد کمتری نسبت به کل منطقه دارد. بایزیدی و ثقفیان [۷] طی تحقیقی در مناطق جنوب غرب کشور به‌منظور مطالعه خشکسالی هیدرولوژیک از مجموع ۳۵ عامل فیزیوگرافی، اقلیمی، پارامتر زمینی پوشش گیاهی و زمین‌شناسی برای تجزیه و تحلیل منطقه‌ای استفاده کردند. نتایج نشان داد که عامل مساحت بیشترین همبستگی با حجم کمبود را دارد و بنابراین همانند بسیاری دیگر از مدل‌های منطقه‌ای مؤثرترین متغیر مستقل در برآورد منطقه‌ای خشکسالی است. صلواتی و همکارانش [۸] با استفاده از متغیرهای فیزیوگرافی و اقلیمی تولید رواناب را در حوضه‌های آبخیز استان کردستان مدل‌سازی کردند. نتایج بیانگر غلبه مدل‌های رگرسیون غیرخطی بر رگرسیون خطی و همچنین اهمیت متغیرهای مساحت، طول آبراهه اصلی و ضریب گراویلیوس در بیشتر مدل‌های نهایی بود. چارون و اواردان [۹] در تحقیقی در ۱۹۰ ایستگاه هیدرومتری در ایالت کبک کانادا به تحلیل جریان‌های حداقل پرداختند. آنها مدل‌های خطی و غیرخطی را به‌صورت جداگانه استفاده کردند که نتایج نشان‌دهنده برتری عملکرد مدل غیرخطی است. گردنی<sup>۱</sup> و همکارانش [۱۰] با تعیین و بررسی ۲۵ متغیر فیزیوگرافی و اقلیمی در ۵۹ حوضه آبریز والونیا<sup>۲</sup> در بلژیک جریان‌های حداقل را تجزیه و تحلیل کردند. آنها با استفاده از روش تجزیه و تحلیل خوشه‌ای، منطقه را به ۴ گروه همگن تقسیم کردند. نتایج نشان‌دهنده کارایی مدل‌های ارائه‌شده در

1. Charron & Ouarda  
2. Grandy  
3. Wallonia

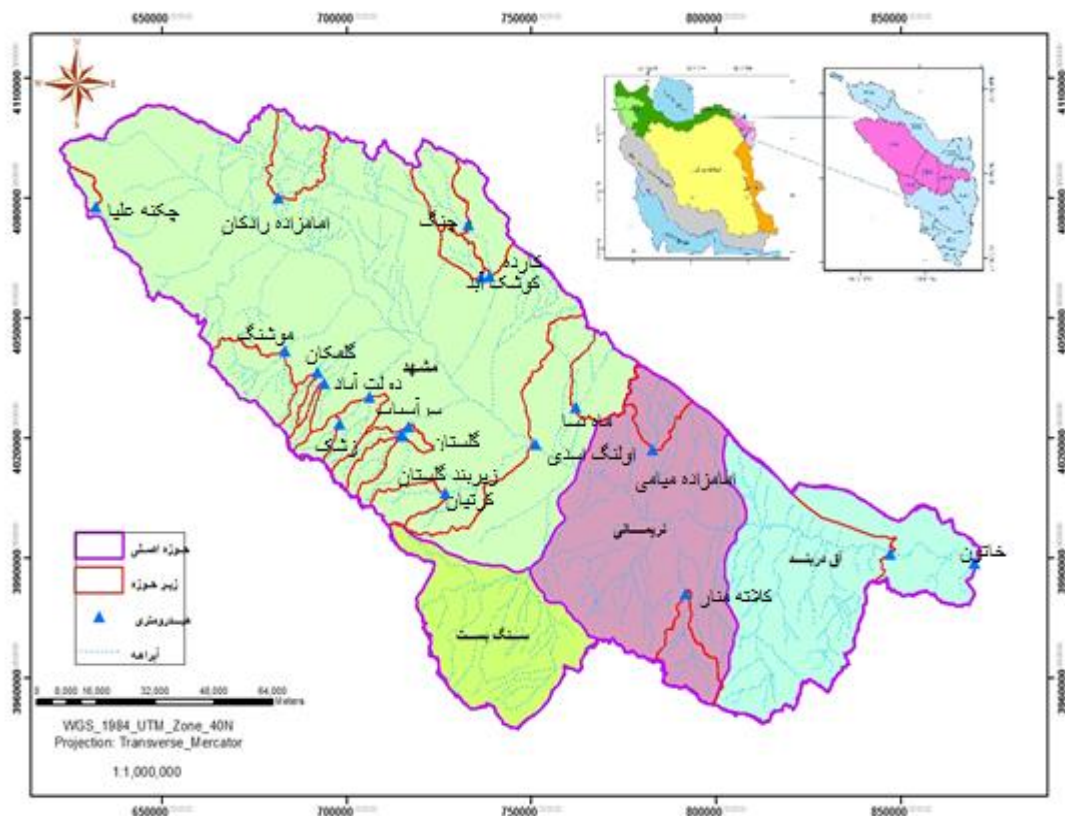
هیدرومتری در منطقه مطالعه‌شده با استفاده از روابط رگرسیونی منطقه‌ای برآورد کرد.

### مواد و روش‌ها

#### منطقه مطالعه‌شده

حوضه آبخیز کشف‌رود با وسعتی حدود ۱۶۷۸۷ کیلومترمربع، در شمال شرق کشور و در نواحی شمالی استان خراسان رضوی قرار گرفته است و از شرق شهرستان قوچان شروع و به سمت ارتفاعات شرقی، تقریباً تا جنوب شرق مشهد کشیده می‌شود. حوضه آبخیز کشف‌رود در مختصات جغرافیایی ۲۲° ۵۷' تا ۹° ۶۱' طول شرقی و ۳۸° ۳۵' تا ۳۷° ۰۴' عرض شمالی قرار دارد. اقلیم منطقه براساس روش دمارتن نیمه‌خشک است. بارندگی کم و تبخیر و تعرق پتانسیل زیاد، از ویژگی‌های این منطقه محسوب می‌شود. شکل ۱ موقعیت جغرافیایی منطقه مطالعه‌شده را نشان می‌دهد.

مناطق همگن است که ضریب تبیین بالا و خطای استاندارد کمتری نسبت به کل منطقه دارد. لیندر<sup>۱</sup> و همکارانش [۱۱] در تحلیلی روی پارامترهای هیدرولوژیکی حوضه رودخانه میوس در کشور هلند، پس از انجام تحلیل عاملی سه پارامتر شاخص خاک، خشکی دره و فراوانی رودخانه‌ها را به‌عنوان مهم‌ترین پارامترهای مؤثر در خشکسالی هیدرولوژیکی معرفی کردند. پیرسون [۱۲] با آنالیز جریان‌های حداقل در ۵۰۰ ایستگاه هیدرومتری در نیوزیلند، نتوانست یک توزیع احتمالاتی واحد که دارای دو یا سه پارامتر باشد به داده‌های حداقل جریان منطقه برازش دهد. شی<sup>۲</sup> و همکارانش [۱۳] با بررسی ۱۲ ایستگاه هیدرومتری در جنوب چین، توزیع احتمالاتی لجستیک تعمیم‌یافته را به‌عنوان توزیع فراوانی دبی حداقل هفت‌روزه معرفی کرد. هدف از این تحقیق، آنالیز منطقه‌ای جریان حداقل در زیرحوضه‌های دارای آمار حوضه آبخیز کشف‌رود است، تا بتوان دبی‌های حداقل با دوره بازگشت‌های مختلف را در حوضه‌های فاقد ایستگاه



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مطالعه‌شده<sup>۱</sup>

1. Leander  
2. Shi

## روش تحقیق

## داده‌های استفاده‌شده

پس از بررسی آمار و اطلاعات ۲۶ ایستگاه هیدرومتری موجود در منطقه، در نهایت از آمار دبی روزانه ۲۰ ایستگاه هیدرومتری با طول دوره آماری ۲۵ سال (۱۳۶۷-۱۳۹۱) استفاده شده است. برای کنترل مقادیر بسیار کم و یا بسیار زیاد و صحت داده‌ها از آزمون داده‌های پرت استفاده شده است [۱۴]. در این آزمون حد بالا و پایین داده‌ها از رابطه‌های ۱ و ۲ محاسبه می‌شود.

$$(۱) \quad \text{حد بالا} = \bar{X} + K(S)$$

$$(۲) \quad \text{حد پایین} = \bar{X} - K(S)$$

که در آن  $\bar{X}$  میانگین داده‌ها، S انحراف معیار داده‌ها، و K ضریب فراوانی است که برابر ۲/۵ در نظر گرفته می‌شود.

## تحلیل فراوانی

جریان حداقل سالانه را می‌توان به صورت کمترین جریان متوسط روزانه در طول یک سال تعریف کرد. عموماً جریان‌های حداقل روزانه تحت تأثیر اغتشاشات بالادست خود هستند، بنابراین برای رفع این مشکل جریان حداقل سالانه به صورت متوسط کمترین جریان در چند روز پیاپی از قبیل ۷، ۱۵، ۳۰، و... روز در طول یک سال تعریف می‌شود [۱۵]. در این پژوهش ابتدا دبی‌های کمینه با تداوم‌های ۷ و ۱۵ روزه برای تمام ایستگاه‌های منتخب

به دست آمده و برای آنالیز فراوانی از این مقادیر استفاده شده است. سپس با استفاده از نرم‌افزار EasyFit، ۸ توزیع مهم آماری شامل توزیع نرمال، توزیع لوگ نرمال سه پارامتره، لوگ نرمال دو پارامتره، و بیبول، لوگ پیرسون تیپ ۳، لوگ نرمال، گاما و گمبل و به این داده‌ها برازش داده شد.

برای سنجش میزان تطابق توزیع‌های یادشده از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف استفاده شد. همچنین برای تعیین بهترین تابع توزیع احتمال به روش گرافیکی، از نمودارهای احتمالی P-P و Q-Q استفاده شده است. پس از تعیین مناسب‌ترین توزیع مقادیر جریان حداقل محاسبه شده وارد برنامه Hyfaran شد و با استفاده از روش گشتاورها، مقادیر جریان حداقل با دوره‌های بازگشت مختلف محاسبه شد.

## تجزیه و تحلیل عاملی

پس از مشخص شدن مرز حوضه‌ها، مشخصه‌های هندسی مناطق مطالعه شده شامل محیط، مساحت، ارتفاع متوسط حوضه، طول آبراهه اصلی، شیب متوسط منطقه، فاکتور شکل، ضریب گراویلیوس، تراکم زهکشی، طول و عرض مستطیل معادل، زمان تمرکز و نسبت گردی برای هر زیرحوضه با استفاده از نقشه DEM و با کمک GIS به دست آمد. جدول ۱ مشخصات فیزیکی حوضه‌های مطالعه شده را نشان می‌دهد.

جدول ۱. مشخصات فیزیکی مناطق مطالعه شده

ویژگی	علامت اختصاری	واحد	حداقل	حداکثر
محیط	P	KM	۳۲	۸۳۹
مساحت	A	KM <sup>2</sup>	۳۱	۱۶۷۸۷
ارتفاع متوسط حوضه	H	M	۱۲۹۰	۲۴۳۲
طول آبراهه اصلی	LR	Km	۱۴	۳۶۰
شیب متوسط منطقه	S	%	۱۲/۷	۴۵
نسبت گردی	CR	-	۰/۲۴	۰/۵۵
طول مستطیل معادل	UL	Km	۱/۲۴	۳۸۴/۳
عرض مستطیل معادل	VL	Km	۱/۹	۶۵/۵
ضریب گراویلیوس	GC	-	۱/۳۴	۲/۰۳
فاکتور شکل	FF	-	۰/۱	۰/۴۶
تراکم زهکشی	DD	Km/km <sup>2</sup>	۰/۸۶	۱/۲۹
زمان تمرکز	TC	hr	۱/۴	۳۸/۶

### رگرسیون چندمتغیره

یکی از روش‌های رایج آنالیز منطقه‌ای جریان که در دو دهه گذشته رواج زیادی داشته، رگرسیون چندمتغیره است [۱۶]. رگرسیون چندگانه عموماً برای به‌دست‌آوردن روابط بین ویژگی‌های جریان و ویژگی‌های منطقه استفاده و نیز مدل‌هایی به‌منظور برآورد جریان ارائه می‌شود [۱۳]. در این روش سعی می‌شود که رابطه معناداری بین جریان حداقل با یک دوره بازگشت خاص و ویژگی‌های حوضه آبخیز به‌دست آورده شود. شکل کلی چنین مدل‌هایی به‌صورت رابطه ۵ است:

$$Q_d, T = f[x_1 b_1, x_2 b_2, x_3 b_3, \dots] \quad (5)$$

که در آن  $Q_d, T$  جریان حداقل  $d$  روزه با دوره برگشت  $T$  سال،  $x_i$  ویژگی‌های حوضه و  $b_i$  پارامترهای برآوردشده از تکنیک‌های رگرسیون چندمتغیره است.

با استفاده از روش رگرسیون چندمتغیره ابتدا از طریق رگرسیون گام‌به‌گام متغیرهای انتخاب‌شده توسط تجزیه و تحلیل عاملی که امکان ورود به مدل را دارند، مشخص و در مرحله بعد مدل‌های ریاضی ارائه شد. مدل‌های برآوردی شامل دبی حداقل جریان با تداوم ۷ و ۱۵ روزه با دوره بازگشت‌های ۲، ۵، ۱۰، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ ساله برای مناطق همگن است. با توجه به معنادار بودن چند مدل در یک تداوم، تمامی مدل‌ها بررسی و بهترین مدل با توجه به ضریب همبستگی و سطح معناداری و آماره دوربین واتسون انتخاب و تعیین شد.

### یافته‌ها

جدول ۲ نتایج برازش توزیع‌های آماری را در زیرحوضه‌های مطالعه‌شده نشان می‌دهد. نتایج آزمون کولموگروف-اسمیرنوف در سطح معناداری ۵ درصد نشان داد تمام توزیع‌های فراوانی برازش قابل قبولی در تداوم‌های مختلف داشتند. برطبق نتایج این آزمون توزیع لوگ پیرسون تیپ ۳ مناسب‌ترین تابع توزیع به‌دست آمد. با استفاده از توزیع لوگ پیرسون تیپ ۳ مقادیر جریان حداقل ۷ و ۱۵ روزه با دوره بازگشت‌های ۲، ۵، ۱۰، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ ساله در هر ایستگاه محاسبه شد. شکل‌های ۲ و ۳ مقادیر جریان حداقل با تداوم‌های ۷ و ۱۵ روزه را در دوره آماری (۱۳۶۷-۱۳۹۲) در ایستگاه‌های هیدرومتری مطالعه‌شده نشان می‌دهد.

تجزیه و تحلیل عاملی برای متغیرهای فیزیوگرافی اندازه‌گیری‌شده در حوضه‌های منتخب با استفاده از نرم‌افزار SPSS انجام شد. به این ترتیب که ابتدا تجزیه و تحلیل عاملی با استفاده از ۱۲ متغیر در ۲۰ زیرحوضه منتخب انجام شد. با انجام تجزیه و تحلیل عاملی، ماتریس وزن عاملی با استفاده از داده‌ها، تحلیل عامل اصلی و همچنین به‌کارگیری روش چرخش وریماکس به‌دست آمد. همچنین با استفاده از آماره KMO تعداد متغیرها از ۱۲ عامل به ۹ عامل محدود شد. درواقع، هدف از تحلیل عاملی در اینجا محدود کردن تعداد عوامل است. در مرحله بعد آنالیز عاملی مهم‌ترین متغیرها براساس ۱ و ۲ عامل انجام شد. تعیین مناطق همگن از روش تحلیل خوشه‌ای صورت گرفت. ابتدا با استفاده از روش scores عوامل یا متغیرهای مد نظر استاندارد شده و سپس براساس روش وارد<sup>۱</sup> و فاصله اقلیدوسی، تعداد خوشه‌های حوضه‌های همگن مشخص شدند. پس از استاندارد کردن داده‌ها در گزینه Anti-Image، ماتریسی ارائه شده است که عناصر قطر ماتریس ضرایب خودهمبستگی، یعنی مقادیر دقت نمونه‌گیری (MSA) است که با توجه به رابطه ۳ محاسبه می‌شود:

$$MSA = \frac{\sum_{i=j} r_{ij}^2}{\sum_{j=i} r_{ij}^2 + \sum_{j=i} a_{ij}^2} \quad (3)$$

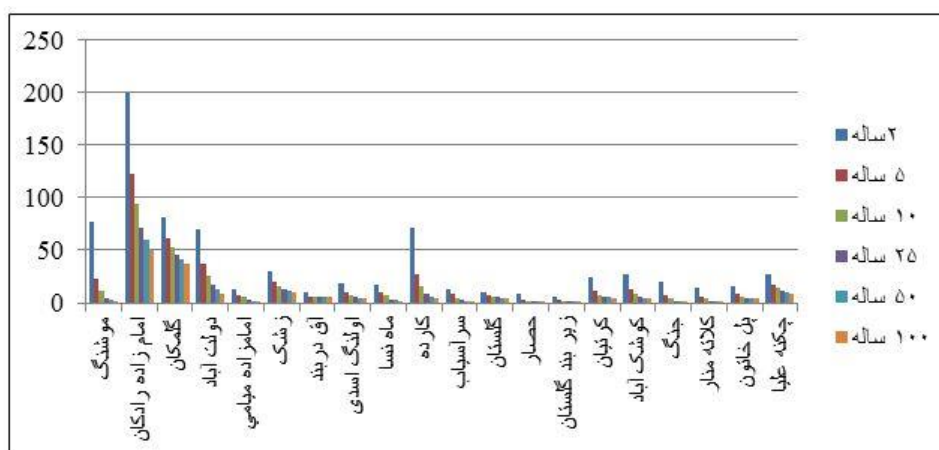
که در آن ضرایب همبستگی ساده و  $r_{ij}$  ضریب همبستگی جزئی متغیرهای  $I$  و  $J$  به شرط ثابت بودن سایر متغیرهاست. ضریب دیگری برای نتایج تجزیه به عامل‌ها (KMO) و مقادیر بزرگ این ضریب نشانه صحت مدل است که به‌صورت رابطه ۴ ارائه شده است.

$$KMO = \frac{\sum_{i=j} r_{ij}^2}{\sum_{i=j} r_{ij}^2 + \sum_{a_{ij}} a_{ij}^2} \quad (4)$$

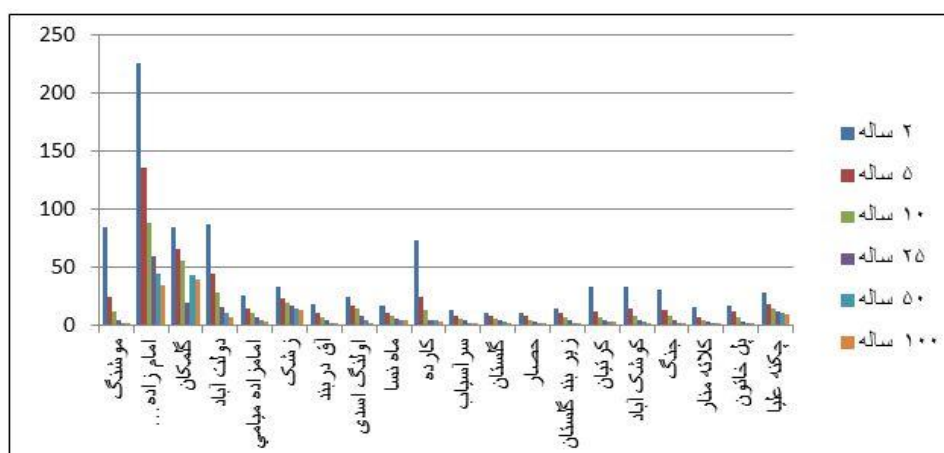
در این فرمول،  $r_{ij}$  ضریب همبستگی بین متغیرهای  $i$  و  $j$  (که دو عنصر از بردار  $x$  هستند) و  $a_{ij}$  ضریب همبستگی جزئی (شرطی یا ناقص) بین متغیرهای  $i$  و  $j$  است. اگر KMO بزرگ باشد، متغیر  $i$  حذف می‌شود و اگر KMO کوچک باشد، متغیر  $i$  باقی می‌ماند. به‌منظور تعیین صحت و کفایت مدل از ضریب تبیین و خطای استاندارد و آماره دوربین واتسون استفاده شد.

جدول ۲. نتایج بهترین برازش برای هریک از ایستگاه‌های هیدرومتری با تداوم‌های مختلف

زیرحوضه	مناسب‌ترین توزیع برای تداوم ۷ روزه	مناسب‌ترین توزیع برای تداوم ۱۵ روزه	زیرحوضه	مناسب‌ترین توزیع برای تداوم ۷ روزه	مناسب‌ترین توزیع برای تداوم ۱۵ روزه
چکنه علیا	لوگ پیرسون (III)	ویبول	اولنگ اسدی	ویبول	ویبول
امامزاده رادکان	لوگ پیرسون (III)	لوگ نرمال (III)	آق‌دربند	لوگ نرمال (III)	لوگ پیرسون (III)
موشنگ	گامبل	گامبل	پل خاتون	گامبل	لوگ نرمال (III)
گلمکان	لوگ نرمال	لوگ پیرسون (III)	زیربند گلستان	لوگ نرمال	لوگ پیرسون (III)
دولت‌آباد	لوگ پیرسون (III)	لوگ نرمال (III)	کارده	لوگ نرمال (III)	لوگ نرمال (III)
زشک	لوگ نرمال	گامبل	کوشک‌آباد	ویبول	لوگ پیرسون (III)
سرآسیاب	گاما	لوگ نرمال	ماه نسا	لوگ نرمال	گاما
حصار	گاما	گامبل	امامزاده میامی	ویبول	گامبل
گلستان	لوگ نرمال (III)	لوگ پیرسون (III)	کلاته‌منار	لوگ پیرسون (III)	لوگ پیرسون (III)
کرتیان	لوگ پیرسون (III)	ویبول	جنگ	لوگ نرمال (III)	لوگ پیرسون (III)



شکل ۲. روند تغییر دبی حداقل ۷ روزه با دوره بازگشت‌های مختلف در حوضه‌های مطالعه‌شده



شکل ۳. روند تغییر دبی حداقل ۱۵ روزه با دوره بازگشت‌های مختلف در حوضه‌های مطالعه‌شده

عامل‌های اول و دوم به ترتیب ۶۶/۱ و ۲۴/۲ درصد واریانس و در مجموع کمی بیش از ۹۰ درصد واریانس‌ها را به خود اختصاص داده‌اند. برای استخراج پارامترهای اصلی از درون مؤلفه‌ها از بار عاملی چرخانده شده با دوران واریماکس استفاده شد. بر این اساس در هر مؤلفه، پارامترهایی که بیشترین بار عاملی دارند، پارامتری مهم برای توصیف آن مؤلفه‌اند. جدول ۴ سهم متغیرها را در عامل‌ها بعد از چرخش نشان می‌دهد. هر متغیر در عاملی قرار می‌گیرد که با آن عامل همبستگی بالای معناداری داشته باشد. نتایج جدول‌های ۳ و ۴ نشان داد که عوامل استفاده شده در مجموع ۹۰/۲۹ از تغییر در داده‌های اصلی را توضیح می‌دهند.

با توجه به شکل‌های ۲ و ۳ می‌توان گفت با افزایش دوره بازگشت مقادیر دبی حداقل جریان کاهش می‌یابد. برای تعیین تعداد عامل‌های استخراجی باید مقدار ارزش ویژه<sup>۱</sup> را بر اساس روش مؤلفه‌های اصلی به منظور ارزیابی مقدار نسبی و مطلق پارامترها به دست آورد. جمع کل واریانس متغیرها در یک تحلیل عاملی، با مجموع تک‌تک متغیرها برابر است. یک ارزش ویژه برای یک عامل برابر یا بزرگ‌تر از صفر است و نمی‌تواند از کل واریانس‌ها بزرگ‌تر باشد. نتایج محاسبات استخراج عامل اولیه با استفاده از ۹ متغیر استخراج شده در مرحله دوم آنالیز عاملی در جدول ۳ نشان داده شده است. با توجه به درصد واریانس داده‌ها مشاهده می‌شود که

جدول ۳. درصد واریانس و مقادیر ویژه عامل‌های مختلف در مرحله دوم

مؤلفه	مجموعه مقادیر عامل‌های استخراج شده بعد از چرخش								
	مقادیر ویژه اولیه			واریانس تبیین شده عامل‌ها			واریانس		
	تجمعی (%)	واریانس (%)	کل	تجمعی (%)	واریانس (%)	کل	تجمعی (%)	واریانس (%)	کل
۱	۵/۹۵	۶۶/۱	۶۶/۱	۶۶/۱	۶۶/۱	۵/۹۵	۶۵/۶۵	۶۵/۶۵	۵/۹۱
۲	۲/۱۸	۲۴/۲۱	۹۰/۲۹	۹۰/۳	۲۴/۲۱	۲/۱۸	۹۰/۲۹	۲۴/۶۵	۲/۲۲
۳	۰/۵۴	۵/۹۶	۹۶/۲۵						
۴	۰/۱۷۶	۱/۹۵	۹۸/۲۱						
۵	۰/۱	۱/۱۱	۹۹/۳۲						
۶	۰/۰۶	۰/۶۳	۹۹/۹۵						
۷	۰/۰۰۳	۰/۰۴	۹۹/۹۸						
۸	۰/۰۰۱	۰/۰۱	۹۹/۹۹						
۹	۰	۰	۱۰۰						

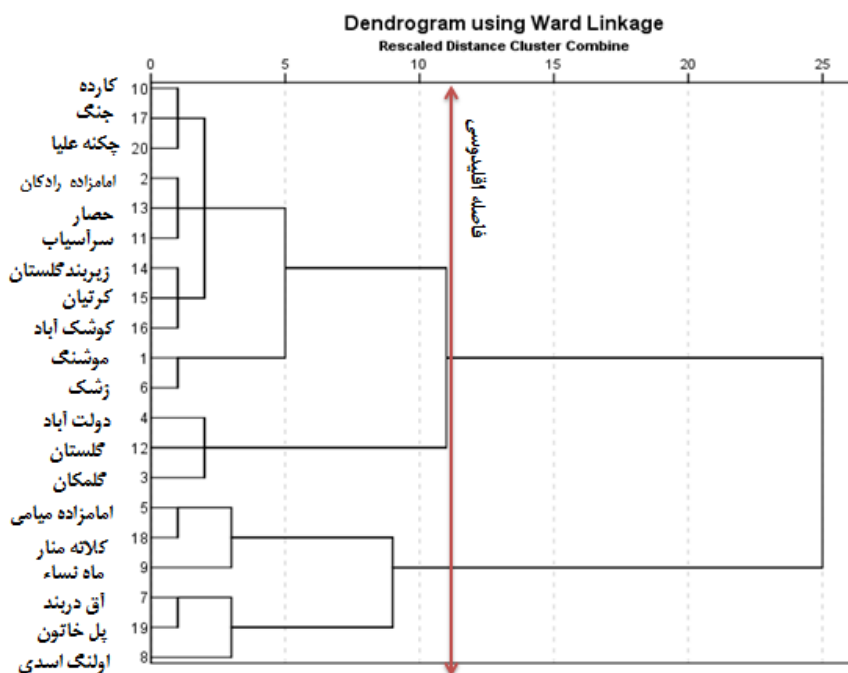
جدول ۴. ماتریس عامل چرخش شده به روش دورانی واریماکس در مرحله دوم

ردیف	پارامترها	علامت اختصاری	عوامل	
			۱	۲
۱	مساحت	A	۰/۹۷	۰/۱۹
۲	تراکم زهکشی	Dd	۰/۸۴	-۰/۳۹
۳	طول آبراهه اصلی	Lr	۰/۹۷	۰/۲
۴	ضریب گراویلیوس	Gc	۰/۱۲	۰/۹۳
۵	فاکتور شکل	Ff	-۰/۱۳	-۰/۹
۶	شیب متوسط حوضه	S	-۰/۷	۰/۴۸
۷	زمان تمرکز	Tc	۰/۹۷	۰/۱۹
۸	عرض مستطیل معادل	VI	۰/۹۷	۰/۱۹
۹	طول مستطیل معادل	UI	۰/۹۶	۰/۰۶

گلستان و گلمکان و گروه دوم شامل ایستگاه‌های: ماه‌نسا، کلاته منار، امامزاده میامی، اولنگ اسدی، آق دربند، پل خاتون هستند.

جدول ۵ نتایج مدل سازی رگرسیون چندمتغیره خطی بین شاخص‌های دبی حداقل جریان و ویژگی‌های فیزیکی مطالعه شده در مناطق همگن A و B را نشان می‌دهد. سطح معناداری معادلات ۵ درصد است.

شکل ۴ چگونگی قرارگیری ایستگاه‌ها در نمودار دندروگرام بر مبنای پارامترهای فیزیوگرافی را نشان می‌دهد. با بررسی دندروگرام و در نظر گرفتن فاصله اقلیدوسی حدود ۱۲، دو گروه همگن به شرح زیر تفکیک شد. در مجموع محدوده همگن A شامل ۱۴ زیرحوضه و محدوده B شامل ۶ زیرحوضه است. گروه نخست شامل ایستگاه‌های: کارده، جنگ، چکنه علیا، امامزاده رادکان، حصار، سرآسیاب، زیربند گلستان، کرتیان، کوشک آباد، موشنگ، زشک، دولت آباد، گلستان، گلمکان، امامزاده میامی، کلاته منار، ماه نسا، آق دربند، پل خاتون، اولنگ اسدی



شکل ۴. نمودار دندانه‌ای (دندروگرام) خوشه‌ها بر مبنای ویژگی‌های فیزیوگرافی زیرحوضه‌های منطقه

جدول ۵. بهترین مدل چندمتغیره برای تداوم ۷ و ۱۵ روزه برای بازگشت‌های مختلف محدوده همگن A و B

منطقه	مدل	D-W	R <sup>2</sup>	SE
A	$Y_{Q2} = 0.08 A + 2.098 S - 44.23$	۱/۸	۰/۷۱	۲۰/۴
	$Y_{Q5} = 0.9 A - 142.8 Dd + 72.4 Tc - 1.1 Lr + 77.8 Ff + 61.5 Gc + 64.6$	۱/۶	۰/۹۳	۵/۷
	$Y_{Q10} = 0.2 A - 77.5 Dd + 36.9 Tc - 5.2 Lr + 23.2 Gc - 4.2 UI + 88.7$	۱/۶	۰/۹۳	۳/۸
	$Y_{Q25} = 0.2 A - 40.2 Dd + 14.4 Tc - 2.4 Lr - 0.2 V1 - 7.3 UI + 86.1$	۲/۱	۰/۹۳	۲/۶
	$Y_{Q50} = 0.16 A - 23.9 Dd + 9.1 Tc - 1.7 Lr - 0.15 V1 - 5.9 UI + 61.5$	۱/۵	۰/۹۲	۲/۳
	$Y_{Q100} = 0.12 A - 2.78 Dd - 0.17 V1 - 7.41 UI + 59.26 Ff + 18.6$	۱/۵	۰/۹۰	۱/۹
	$15Q2 = 0.074 A + 2.49 S - 50.72$	۱/۸	۰/۷۱	۲۳/۲
	$15Q5 = 0.41 A - 5.16 Lr + 1.1 S - 29.46 Ff + 115.8$	۱/۸	۰/۸۱	۹/۴
	$15Q10 = 0.28 A - 5.06 Lr - 99.9 Dd - 9.2 UI + 33.41 Gc + 164.9$	۱/۹	۰/۹۲	۴/۵
	$15Q25 = 0.2 A - 3.2 Lr - 54.9 Dd - 6.43 UI + 19.5 Gc + 100.8$	۲	۰/۹۱	۳/۲
B	$15Q50 = 0.16 A - 0.76 Lr + 0.27 S - 7.6 UI - 19.12 Gc$	۲/۱	۰/۹۱	۲/۶
	$15Q100 = 0.14 A - 0.62 Lr + 0.22 S - 6.6 UI - 19.23 Gc + 56.1$	۲/۲	۰/۹۱	۲/۳



ادامه جدول ۵. بهترین مدل چندمتغیره برای تداوم ۷ و ۱۵ روزه برای دوره بازگشت‌های مختلف محدوده همگن A و B

منطقه	مدل	D-W	R <sup>2</sup>	SE
B	$7Q2 = -0.007 A + 0.69 S + 63.55 Dd - 12.75 Gc + 3.2 Tc - 59.2$	۱/۸	۰/۹۷	۰/۶
	$7Q5 = 0.0014 A + 1.99 S + 33.6 Dd + 18.4 Gc + 37.1 FF - 10.14$	۱/۵	۰/۹۸	۱/۲
	$7Q10 = -0.001 A - 0.37 S + 25.97 Dd - 4.91 Gc + 0.46 Tc - 13.9$	۱/۷	۰/۹۸	۰/۹
	$7Q25 = 0.0005 A - 0.8 S + 16.4 Dd - 0.75 Gc - 0.21 Tc - 13.6$	۱/۷	۰/۹۹	۰/۲
	$7Q50 = 0.001 A + 0.19 S + 14.4 Dd + 1.55 Gc + 0.05 Lr - 19.2$	۱/۹	۰/۹۹	۰/۱۳
	$7Q100 = 0.002 A + 0.31 S + 11.7 Dd + 2.9 Gc - 0.77 Lr - 19.8$	۱/۸	۰/۹۷	۰/۵
	$15Q2 = -0.008 A + 5.4 S + 26.9 Dd - 30.1 Gc + 4.4 Tc - 64.2$	۱/۸	۰/۹۹	۲/۱
	$15Q5 = -0.002 A - 0.81 S + 40.62 Dd - 5.73 Gc + 0.7 Tc - 20.2$	۱/۸	۰/۹۶	۲/۵۱
	$15Q10 = -0.002 A - 1.7 S + 27.5 Dd - 4.9 Gc + 0.6 Tc + 5.7$	۱/۹	۰/۸۹	۳/۳۶
	$15Q25 = 0.002 A - 1.8 S + 15.6 Dd - 5.2 Gc + 0.52 Tc + 19.4$	۱/۸	۰/۸۷	۳/۱۵
	$15Q50 = -0.001 A - 1.6 S + 10.3 Dd - 5.1 Gc + 0.5 Tc + 21.8$	۱/۸	۰/۸۵	۲/۸۵
	$15Q100 = -0.001 A - 1.3 S + 3.3 Dd - 5.9 Gc + 0.45 Tc + 26.2$	۱/۹	۰/۸۴	۲/۵۴

SE: خطای استاندارد، R<sup>2</sup>: ضریب تبیین و D-W: آماره دوربین واتسون

مساحت مهم‌ترین پارامتر در برآورد دبی حداقل با تداوم‌های ۷ و ۱۵ روزه با دوره بازگشت‌های مختلف در زیرحوضه‌های مطالعه شده است که ارتباط مستقیمی با میزان جریان حداقل دارد، پس از مساحت به ترتیب تراکم زهکشی، شیب متوسط حوضه، ضریب فشردگی گراویلیوس، زمان تمرکز، طول آبراهه، طول مستطیل معادل، عرض مستطیل معادل و فاکتور شکل در ۰.۷۹، ۰.۷۹، ۰.۶۷، ۰.۶۳، ۰.۴۵، ۰.۳۳ و ۰.۱۷ و ۱۳ درصد معادلات معنادار رگرسیون چندمتغیره در مناطق همگن A و B دخالت دارند.

### بحث و نتیجه‌گیری

در برازش داده‌ها با توزیع‌های آماری نمی‌توان توزیع خاصی را بر جریان حداقل برازش داد [۱۲] و در بین هیدرولوژیست‌ها نیز هیچ توافقی درباره استفاده از یک توزیع خاص وجود ندارد [۵]. نتایج این تحقیق نشان داد که تمام توزیع‌های آماری بررسی شده برازش قابل قبولی با دبی جریان حداقل داشتند، اما در هر ایستگاه یکی از توزیع‌های آماری که کمترین مجموع مربعات خطا (RSS) را داشت به‌عنوان بهترین توزیع انتخاب شد. بر این اساس از توزیع پیرسون تیپ ۳ با توجه به تکرار بیشتر به‌عنوان بهترین توزیع در حوضه‌های مختلف، به‌عنوان توزیع آماری مناسب برای برآورد دبی‌های حداقل با دوره بازگشت‌های متفاوت استفاده شد. نتایج مشابهی توسط نصرتی و همکارانش [۱۷] و حبیب‌نژاد روشن و همکارانش [۳] به‌دست آمده است.

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده در منطقه همگن هیدرولوژیکی A، در تداوم ۷ روزه و دوره بازگشت‌های ۲، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ سال، پارامترهای مساحت و تراکم زهکشی و در تداوم ۱۵ روزه با دوره بازگشت‌های یادشده پارامترهای مساحت و طول آبراهه اصلی به‌عنوان عوامل فیزیوگرافی مؤثر در جریان حداقل در این منطقه معرفی می‌شود. با افزایش تداوم جریان میزان دبی حداقل خروجی از حوضه کاهش می‌یابد، بنابراین عواملی که به‌طور مستقیم بر افزایش دبی خروجی از حوضه مؤثرند مثل مساحت و تراکم زهکشی در معادله‌های رگرسیونی حداقل جریان با تداوم کمتر نمود بیشتری دارند. با افزایش تداوم جریان پارامترهایی که سبب کاهش جریان حداقل شده مانند طول حوضه که زمان تمرکز حوضه را افزایش داده به‌عنوان پارامتر اصلی وارد معادلات شده‌اند. در منطقه همگن B در تداوم‌های ۷ و ۱۵ روزه و تمامی دوره بازگشت‌های مد نظر، چهار پارامتر مساحت، شیب متوسط حوضه و تراکم زهکشی و ضریب گراویلیوس به‌عنوان مؤثرترین پارامترهای دخیل در مدل‌سازی هستند و می‌توان این پارامترها را به‌عنوان شاخص‌های تأثیرگذار در جریان‌های حداقل در منطقه همگن B معرفی کرد. مقادیر ضرایب همبستگی نیز بیان می‌کند که همبستگی زیادی بین مقادیر برقرار است. در منطقه همگن B مساحت حوضه‌های آبخیز بزرگ‌تر است و بنابراین تأثیر مساحت و عوامل وابسته به مساحت بیشتر نمود دارند. نتایج نشان داد از بین ویژگی‌های فیزیکی حوضه،

باشد. با فرض یکسان بودن سایر خصوصیات حوضه (شکل، شیب و غیره) هرچه مساحت بزرگتر باشد حداکثر دبی جریان بیشتر خواهد بود زیرا سطح وسیعی در ایجاد رواناب دخالت می‌کند. در ضمن با افزایش مساحت میزان تلفات حوضه افزایش یافته و زمان تمرکز طولانی‌تر شده و آب فرصت نفوذ بیشتری دارد، بنابراین تداوم جریان پایه و حداقل بیشتر است. طول آبراهه اصلی تابعی از مساحت، شکل و زمین‌شناسی حوضه است. میزان تراکم زه‌کشی در هر حوضه آبخیز می‌تواند اطلاعات شایان توجهی در خصوص ویژگی‌های زمین‌شناسی و یا خاک‌شناسی حوضه ارائه دهد. هر چه شبکه زه‌کشی متراکم‌تر باشد، زمان تمرکز کمتر می‌شود و دبی جریان افزایش می‌یابد. شکل حوضه پارامتر مهمی است که روی زمان تمرکز حوضه و طول آبراهه اصلی تأثیر می‌گذارد و کمتر وابسته به مساحت است، بنابراین در تحلیل عاملی به‌عنوان عاملی جداگانه بخشی از تغییرات واریانس را نشان می‌دهد. نتایج آنالیز منطقه‌ای در هر منطقه با شرایط اقلیمی و جغرافیایی مشخص، خاص آن ناحیه است و برای مناطق با شرایط متفاوت این آنالیز باید دوباره انجام شود. قابلیت اعتماد یک مدل منطقه‌ای و اعتبار آن در یک منطقه خاص به طول دوره آماری، داده‌های ایستگاه‌های آب‌سنجی، سازندهای زمین‌شناسی که سبب ایجاد اختلاف در میزان نفوذپذیری و حرکت آب‌های زیرزمینی منطقه می‌شود و در نهایت به همگنی و صحت داده‌ها بستگی دارد. بنابراین، توصیه می‌شود در تحقیقات بعدی به‌جز خصوصیات فیزیکی حوضه، خصوصیات زمین‌شناسی، پوشش گیاهی و خاک‌شناسی حوضه‌ها نیز بررسی شود.

#### منابع

- [1]. Akbari M, Soleimani K, Mahdavi M. & Habibnejad Roshan M. (2010). Investigation and analysis of low flow frequency with different duration in arid and semi-arid regions, *Engineering of water resources*, 3: 75-84.
- [2]. Sarhaddi A, Soltani S. & Moddares R. (2008). Regional low flow frequency distribution in Jiroft area by L- moments. *Journal of Iranian water research*. 3: 45-54
- [3]. HabibnejadRoshan M, Ebrahimi M, Solaimani K, Vafakhah M. (2010). Low Flow Analysis in Arid and Semi-Arid Areas of Northeastern of Khorasan Razavi Province. *Journal of watershed management research*. 1: 44-58.

با افزایش دوره بازگشت مقادیر دبی حداقل جریان کاهش می‌یابد. یعنی هرچه دوره بازگشت افزایش می‌یابد، دبی حداقل جریان کاهش و شدت خشکسالی هیدرولوژیک افزایش می‌یابد. چوگان و همکارانش [۶] نیز نتایج مشابهی به‌دست آورده‌اند.

براساس ماتریس چرخش شده در مرحله دوم مشاهده می‌شود بیشترین درصد توصیف واریانس در مؤلفه نخست بوده است و پارامترهای مساحت، تراکم زه‌کشی، طول آبراهه اصلی، زمان تمرکز، طول و عرض مستطیل معادل و شیب حوضه بیشترین همبستگی (۶۶/۱ درصد) را با این مؤلفه داشته‌اند. در مؤلفه دوم نیز پارامترهای ضریب گراویلیوس و فاکتور شکل بیشترین همبستگی (۲۴/۲۱ درصد) را داشته‌اند. بنابراین، پارامترهای یادشده به‌عنوان مهم‌ترین و مؤثرترین عوامل برای تعیین همگنی در حوضه آبریز کشف‌رود تعیین شدند. حبیب‌نژاد روشن و همکارانش [۳]، نصرتی و همکارانش [۱۷]، لیندر و همکارانش [۱۱]، اواردا و شو<sup>۱</sup> [۱۸] و یو و وانگ<sup>۲</sup> [۱۹] نتایج مشابهی را گزارش کرده‌اند.

همگن‌بندی سبب می‌شود که تأثیر عوامل مؤثر در جریان خود را بهتر و بیشتر نشان دهد و تأثیر عوامل دیگر ناچیز شود، بنابراین در بهبود دقت نتایج مدل‌ها اثرگذار است. در بررسی‌های مختلف که توسط محققان دیگر در شرایط متفاوت به‌دست آمده است مانند اسلامی و تلوری [۲۰]، حبیب‌نژاد روشن و همکارانش [۳]، ثقفیان و همکارانش [۲۱]، سرحدی و همکارانش [۲]، نصرتی و همکارانش [۱۷] و گرندی و همکارانش [۱۰]، اهمیت مناطق همگن هیدرولوژیک در افزایش دقت انتقال اطلاعات از مناطق دارای آمار به مناطق فاقد آمار و همچنین افزایش دقت و کارایی مدل تحلیل منطقه‌ای بیان و اثبات شده است.

با توجه به نتایج مدل‌سازی می‌توان دریافت که تمامی مدل‌های ارائه‌شده در سطح معناداری قابل قبولی تغییرات متغیر وابسته را پیش‌بینی کرده‌اند. بنابراین، از این مدل‌ها می‌توان در برآورد جریان حداقل زیرحوضه‌های فاقد آمار حوضه کشف‌رود استفاده کرد. آنالیز منطقه‌ای جریان نشان داد در هر یک از مناطق همگن متغیرهای مختلفی در مدل نهایی شرکت دارند. مساحت حوضه بارزترین عامل فیزیکی است که روی جریان و حجم رواناب حوضه می‌تواند تأثیرگذار

1. Ouarada & Shu  
2. Yue & Wang

- [4]. Tajri A, Babanejad M, Kardel F, Soleimani K. (2015). Inspection of factors that influence the hydrological drought (Case study: Lorestan watershed province). *Geographical planning of space quarterly journal*. 16: 151-164.
- [5]. Aliasgari Kashani A, Zakerinia M, Heydarizadeh M. & Sharifan H. (2014). Assessing the hydrologic homogeneous regions and regional distribution functions with linear moments method in Golestan Province. *Journal of Water and Soil Conservation*. 21 (1): 1-21.
- [6]. Chogan M, Honarbakhsh A, Zare Bidaki R. & Pajohesh M. (2013). Frequency analysis of low flood for prediction of hydrologic drought, first conference of engineering and management of agriculture, environment, and sustainable natural resources, Hamedan, Iran.
- [7] Bayzidi M. & Saghafian B. (2011). Regional analysis of stream flow drought in southwestern of Iran. *Watershed Management Science & Engineering*. 5 (14): 37-52.
- [8] Salavati B, Sadeghi S.H.R. & Telvari A.R. (2010). Runoff generation modeling for Kurdistan province watersheds by using physiographic and climatic variables. *Journal of water and soil*. 24 (1): 84-96
- [9]. Charron C. & Ouarda T.B.M.J. (2015). Regional low-flow frequency analysis with a recession parameter from a non-linear reservoir model. *Journal of Hydrology*. 524: 468-475.
- [10]. Grandry M, Gailliez S, Sohier C. & Verstraete A. (2013). A method for low-flow estimation at ungauged sites: a case study in Wallonia (Belgium). *Hydrology and Earth System Sciences*. 17: 1319-1330.
- [11]. Leander R, Buishand T.A, Hurk B.J.J.M.V. & Wit M.J.M. (2008). Estimated changes in flood quantiles of the river Meuse from Resampling of regional climate model output. *Journal of Hydrology*. 351 (3-4): 331-343.
- [12]. Pearson C.P. (1993). Application of L-Moments to maximum river flows. *The New Zealand statistician*. 28: 2-10.
- [13]. Shi P, Chen X, Qu S, Zhang Z. & Ma J. (2010). Regional Frequency Analysis of Low Flow Based on L Moments: Case Study in Karst Area, Southwest China. *Journal of Hydrologic Engineering*. 15 (5): 370-377.
- [14]. Alizadeh A. (2011). *Principals of applied hydrology*. 32nd ed. Mashhad: Astan Ghods Razavi.
- [15] Samiee M. & Telvari A. (2008). Investigation of hydrologic drought severity and duration at Tehran province watersheds. *Pajouhesh & Sazandegi*. 79: 21-27.
- [16] Kim S.U. & Lee K.S. (2010). Regional low flow frequency analysis using Bayesian regression and prediction at ungauged catchment in Korea. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 14: 87-98.
- [17]. Nosrati K, Laaha G, Sharifnia S.A. & Rahimi M. (2015). Regional low flow analysis in Sefidrood Drainage Basin, Iran using principal component regression. *Hydrology Research*. 46 (1): 121-135.
- [18]. Ouarda T.B.M.J. & shu C. (2009). Regional low-flow frequency analysis using single and ensemble artificial neural networks. *Water Resources Research*. 45 (11): 1-16.
- [19]. Yue S. & Wang C.Y. (2004). Scaling of Canadian low flows. *Stochastic Environmental Research and Risk Management*. 18: 291-305.
- [20]. Eslami A.R. (2011). Telvari A.R. Effect of homogeneity of the basins on precision flood estimation methods. *Journal of Watershed Engineering and Management*. 3 (1): 22-32.
- [21]. Saghafian B, Mohammadi S. & Ghermezchshme B. (2009). Estimation of low flows in un-gauged location using multivariate regression model. *Journal of Watershed Engineering and Management*. 1 (1): 32-45.