

## مدل منطقه‌ای منحنی تداوم جریان حوزه‌های آبخیز بدون آمار مناطق خشک (مطالعه موردی: ایران مرکزی)

- ❖ اصغر زارع چاهوکی؛ دانشجوی دکتری آبخیزداری دانشگاه یزد
- ❖ علی سلاجقه؛ دانشیار دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران
- ❖ محمد مهدوی؛ استاد دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران
- ❖ شهرام خلیقی سیگارودی؛ استادیار دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران
- ❖ سعید اسدی؛ کارشناس ارشد مرکز تحقیقات هواشناسی کاربردی استان یزد

### چکیده

منحنی تداوم جریان (FDC) نشان‌دهنده رابطه بین فراوانی و مقدار دبی است. داده‌های دبی جریان آب، به شکل منحنی تداوم جریان، به عنوان پیش‌نیاز، برای طرح‌های مدیریت منابع آب، از قبیل طراحی سدها، نیروگاه‌های برق‌آبی، اجرای عملیات آبخیزداری، ارزیابی خطر خشک‌سالی، و بررسی سلامت زیست‌بوم رودخانه، مورد نیاز است. این مطالعه در یازده حوزه آبخیز منتخب با ویژگی‌های مشترکی، همچون طول دوره آماری مشترک دبی روزانه بیست‌ساله، حداقل تغییر کاربری اراضی، و حجم آب سالانه مشابه، از میان حوزه‌های آبخیز در سه استان یزد، مرکزی، و سمنان، واقع در زون ایران مرکزی، برای منطقه‌ای کردن منحنی تداوم جریان، انجام شد. پس از تهیه منحنی تداوم جریان، برای یازده ایستگاه هیدرومتری مورد مطالعه، شاخص‌های دبی  $5Q$ ،  $10Q$ ،  $20Q$ ،  $30Q$ ،  $40Q$ ،  $50Q$ ،  $60Q$ ،  $70Q$ ،  $80Q$  و  $90Q$ ، به عنوان متغیر وابسته، استخراج شد. برای مدل‌سازی منطقه‌ای منحنی تداوم جریان، از میان یازده متغیر مستقل فیزیوگرافی و اقلیمی چهار عامل - مساحت حوزه آبخیز، طول آبراهه اصلی، شیب آبراهه اصلی، و بارندگی متوسط سالانه - به عنوان عوامل مهم و اختلاف ارتفاع حوزه آبخیز به عنوان متغیر کمکی استفاده شد. برای تهیه مدل منطقه‌ای منحنی تداوم جریان، برای حوزه‌های آبخیز مناسب در استان‌های یزد، مرکزی، و سمنان، روش رگرسیون چندمتغیره غیرخطی به کار گرفته شد. در نهایت، برای برازش بهترین مدل منطقه‌ای حوزه‌های بدون آمار و خشک ایران مرکزی از معیار ارزیابی مقاطع نش- ساتکلیف استفاده شد.

واژگان کلیدی: حوزه‌های آبخیز بدون آمار، مدل منطقه‌ای، منحنی تداوم جریان، مناطق خشک.

## مقدمه

در بسیاری از موارد، داده‌های مشاهداتی دبی یا در دسترس نبوده و یا از لحاظ کیفیت و کمیت کافی نیستند. این عامل طرح‌های مدیریت منابع آب را با مشکل روبه‌رو می‌سازد. نام‌گذاری دهه‌های ۲۰۰۳-۲۰۱۲ به پیش‌بینی در حوزه‌های آبخیز فاقد آمار<sup>۱</sup> (PUB)، توسط انجمن بین‌المللی هیدرولوژی<sup>۲</sup> (IAHS)، ابتکاری است جدید، با هدف قانونمند کردن و اجرای برنامه‌های علمی مناسب، برای درگیر کردن جوامع علمی و نیروبخشیدن به آن طی روندی جهت‌دار. PUB برای دستیابی به پیشرفت‌های عمده برای پیش‌بینی در حوزه‌های فاقد آمار توسط انجمن بین‌المللی هیدرولوژی آغاز به کار کرده است (Sivapalan et al., 2003).

اگر از هم‌اکنون به احداث شبکه‌های ایستگاه هیدرومتری بپردازیم، باز هم سال‌ها زمان لازم است تا بتوان از این داده‌ها استفاده کرد. بنابراین، مشکلات ناشی از فقدان اطلاعات همچنان در آینده باقی می‌ماند. همچنین، ایجاد شبکه ایستگاهی ایده‌آل در برخی از مناطق امکان‌پذیر نیست. علاوه بر این، ممکن است داده‌های ایستگاه‌های قبل نیز، با تغییر کاربری اراضی بالادست و سایر مسائل، درخور استفاده نباشد. در نتیجه، به توسعه روش‌هایی برای پیش‌بینی خصوصیات جریان در حوزه‌های آبخیز بدون آمار نیاز است. انجمن بین‌المللی علوم هیدرولوژی این نیاز را در سال ۲۰۰۲ به رسمیت شناخت و پیش‌بینی در حوضه‌های بدون آمار را، به عنوان دستور کار پژوهش، برای دهه‌های آینده، به تصویب رساند.

بر اساس بُعد زمان، روش‌های منطقه‌ای کردن در هیدرولوژی به دو گروه تقسیم می‌شود: گروه اول، با در نظر گرفتن عامل زمان، از سری زمانی داده‌های دبی استفاده می‌کند (Merz & Blöschl, 2004)؛ گروه دوم از روش‌های منطقه‌ای کردن شاخص‌های هیدرولوژیکی

منتخب، از قبیل میانگین دبی سالانه جریان و شاخص دبی پایه و یا به جای استفاده از سری زمانی داده‌ها از درصدهای متفاوتی از دبی (مثلاً منطقه‌ای کردن منحنی تداوم جریان)، استفاده می‌نماید (Castellarin et al., 2004).

## منحنی تداوم جریان

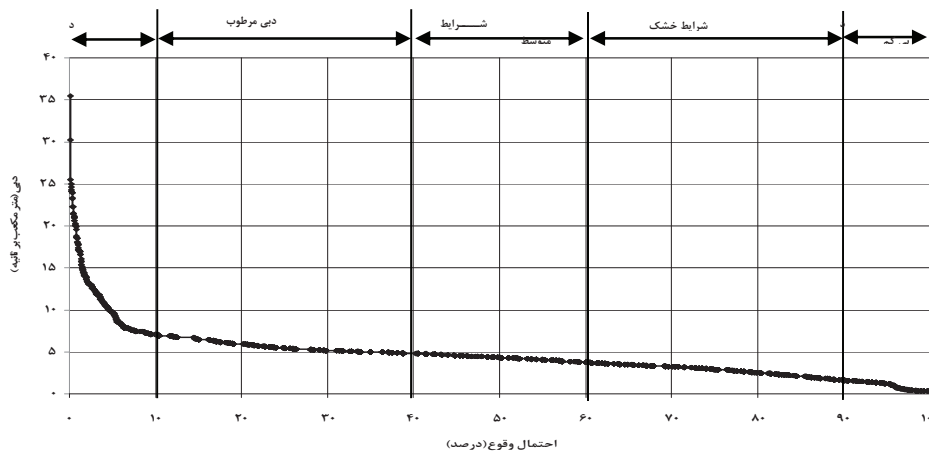
نخستین مطالعه جامع بر روی منحنی تداوم جریان را سارسی<sup>۳</sup>، در سال ۱۹۵۹ میلادی، انجام داد. منحنی تداوم جریان<sup>۴</sup> (FDC) یکی از روش‌های ارزنده است با اطلاعاتی مفید که همه دبی‌های رودخانه - اعم از کم و جریان سیلابی - را نمایش می‌دهد. این منحنی رابطه بین مقادیر دبی و درصد زمانی را - که این دبی مساوی یا بیشتر از آن است - به نمایش می‌گذارد. به عبارت دیگر، رابطه بین بزرگی و فراوانی دبی رودخانه را نشان می‌دهد (Smakhtin, 2001).

برای رسم منحنی تداوم جریان، نخست دبی‌های هر ایستگاه را، به صورت نزولی، مرتب می‌کنیم و روی محور Yها نمایش می‌دهیم و در محور Xها احتمال وقوع تجربی آن را - که از فرمول تجربی ویبول به دست می‌آید - نمایش می‌دهیم. شکل ۱ نمای کلی منحنی تداوم جریان را نشان می‌دهد.

متداول‌ترین روش برای منطقه‌ای کردن در هیدرولوژی رگرسیون دو یا چندمتغیره است. تحلیل رگرسیون چندمتغیره روشی مفید برای توسعه عوامل مورد نظر در منطقه‌ای کردن حوزه‌های فاقد آمار است. محققانی مانند (Blöschl & Merz, 2004) از روش رگرسیون چندمتغیره برای منطقه‌ای کردن هیدرولوژیکی استفاده کردند.

Quimpo & et al. (1983)، Mimikou & Kaemaki (1985)، Fennessey & Vogel (1990)، Singh et al. (1993)، Le Boutillier & Waylen (2001)، Franchini & Suppo (1996)، Yu et al.

1. Prediction of Ungauged Basins  
2. International Association of Hydrological Sciences  
3. Searcy  
4. Flow Duration Curve



شکل ۱. نمونه منحنی تداوم جریان برای جریان روزانه ده ساله در مناطق خشک (ایستگاه هیدرومتری نمود)

جریان می‌تواند برای داده‌های ایستگاه‌های هیدرومتری به صورت سالانه، ماهانه، و روزانه و، همچنین، بر اساس طول کل دوره آماری و یا دوره مشترک آماری ایجاد شود.

Yu et al (2002) با کاربرد منحنی تداوم جریان روش‌های منطقه‌ای کردن را به دو دسته تقسیم کردند: ۱. استفاده از معادله‌ها و توزیع‌های آماری برازش داده شده به منحنی تداوم جریان ایستگاه هیدرومتری خروجی حوزه آبخیز؛ ۲. روش‌های رگرسیونی بین احتمالات وقوع دبی‌های خاص (مثلاً ۱۰، ۲۰، ۳۰، ...، ۹۰ درصد) با خصوصیات حوزه آبخیز یا جریان سالانه. نتایج مطالعه این محققان نشان داد روش‌های رگرسیونی، عامل‌های بیشتر از یک عامل (شاخص سطح)، از صحت بیشتری برای پیش‌بینی منحنی تداوم جریان در حوزه‌های آبخیز فاقد آمار برخوردار است.

Zinanlo (2003) رابطه متغیرهای مورفومتریک اقلیمی و فیزیوگرافی حوزه را با دبی‌های متناظر با منحنی تداوم جریان، در ۲۵ ایستگاه، در حوزه آبخیز ارومیه، بررسی کرد. در این مدل‌ها، عوامل پستی و بلندی، درجه حرارت سالیانه، مساحت، ارتفاع خروجی حوزه، تراکم زهکشی، بارندگی سالیانه، شاخص نفوذپذیری، و شاخص برف مد نظر قرار گرفت. متغیر تراکم زهکشی و شاخص نفوذپذیری در همه معادلات وارد شد.

(2002)، و در آخر (Croker et al (2003) در مطالعاتی جداگانه، به ترتیب، در کشورهای فیلیپین، یونان، امریکا، کانادا، هند، ایتالیا، تایوان، و پرتغال از منحنی تداوم جریان چندین ایستگاه هیدرومتری حوزه آبخیز برای ارائه مدل منحنی تداوم جریان حوزه‌های فاقد آمار استفاده کردند.

Mimikou & Kaemaki (1985) روش‌های منطقه‌ای کردن را در غرب و شمال غرب یونان بررسی کردند. این محققان برای ارائه مدل منطقه‌ای از عواملی چون بارندگی متوسط سالانه، مساحت حوزه، هیسومتری، و طول آبراهه اصلی استفاده کردند.

Fennessey & Vogel (1990) منحنی تداوم جریان را در چندین حوزه آبخیز، در ماسوچوست امریکا، با توجه به پارامترهای مورفومتری حوزه آبخیز، به صورت منطقه‌ای درآوردند.

Ouarda et al (2001) ویژگی‌های حوزه‌های آبخیز مورد مطالعه در ایالت اونتاریو کانادا - اعم از مساحت، طول آبراهه اصلی، شیب آبراهه اصلی، سطحی از حوزه، که توسط دریاچه‌ها زهکشی می‌شود، طول جغرافیایی، عرض جغرافیایی، و بارندگی متوسط سالیانه - را در تحلیل منطقه‌ای دبی در نظر گرفتند و، در نهایت، طول و عرض جغرافیایی در مدل‌ها وارد نشد.

Smakhtin (2001) بیان می‌کند که منحنی تداوم

فاقد آمار، با استفاده از روش منحنی تداوم جریان، است. برای تهیه مدل منطقه منحنی تداوم جریان، در حوزه‌های آبخیز مناسب در استان‌های یزد، مرکزی، و سمنان، روش رگرسیون چندمتغیره غیرخطی به کار گرفته شد. نتایج تحقیق با بهره‌گیری از رویکرد ارزیابی متقاطع، به روش نش-ساتکلیف، ارزیابی شد.

## مواد و روش‌ها

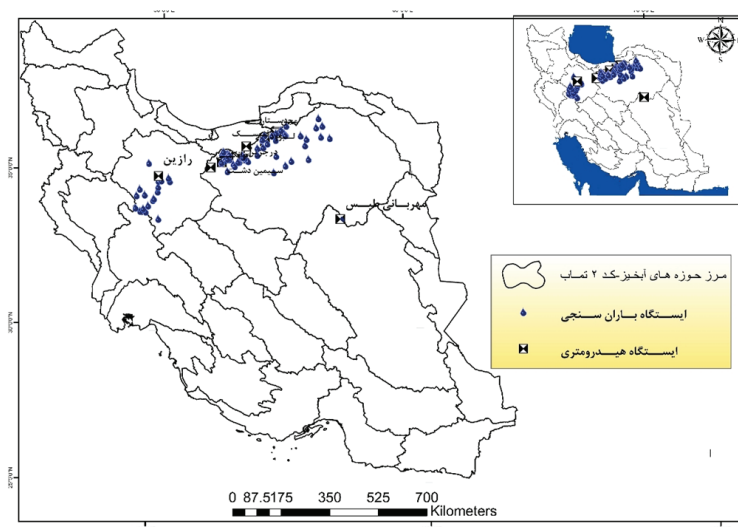
### منطقه مورد مطالعه

برای انتخاب ایستگاه‌های هیدرومتری مناسب آمار دبی روزانه ایستگاه‌های مورد نظر با بیست سال دوره آماری مشترک در نظر گرفته شد. ایستگاه‌ها به نحوی انتخاب شدند که در بالادست آن‌ها سد و بند انحرافی و اراضی وسیع کشاورزی، تا حد امکان، کمتر وجود داشته باشد و حجم آبی آن‌ها تقریباً نزدیک به هم باشد. نخست از میان همه ایستگاه‌های هیدرومتری واقع در سه استان، ۱۵ حوزه آبخیز، با طول آمار روزانه بیست سال، در استان‌های یزد، مرکزی، و سمنان انتخاب شد. شکل ۲ حوزه‌های آبخیز مورد مطالعه در سه استان یزد، مرکزی، و سمنان، همراه با پراکنش ایستگاه‌های باران‌سنجی و محل خروجی حوزه آبخیز، را نشان می‌دهد.

Castellarin et al (2004) سه روش مختلف آماری، پارامتری، و گرافیکی را برای منطقه‌ای کردن منحنی تداوم جریان در حوزه‌های آبخیز بدون آمار به کار بردند. این محققان عدم قطعیت منحنی تداوم جریان منطقه‌ای را ارزیابی کردند و روش ارزیابی متقاطع جک‌نایف<sup>۱</sup> را در منطقه وسیعی، در مرکز ایتالیا، به کار بردند. بر اساس نتایج ارزیابی محققان، منحنی تداوم جریان منطقه‌ای در حوزه‌های آبخیز بدون آمار مناسب است و سه روش مورد استفاده مشابه هم‌اند.

Alcazar & Palau (2010) پنجاه و یک خصوصیت هیدرولوژیکی و فیزیکی حوزه آبخیز Ebro در اسپانیا را برای ۴۶ حوزه آبخیز تعیین و متغیرهای مورد بررسی را در پنج گروه همگن بررسی کردند. سپس، برای کاهش بعد داده‌ها به تحلیل مؤلفه‌های اصلی هر گروه پرداختند و از مؤلفه‌های اصلی مشخص شده در تحلیل خوشه‌ای استفاده کردند و حوزه‌های آبخیز مشابه را در ۴ گروه تعیین نمودند. سپس، با استخراج ۹۵ Q (یا دبی‌ای که بزرگ‌تر یا برابر ۳۴۷ روز از سال باشد) از منحنی تداوم جریان حقایق زیست‌محیطی را هم در حوزه‌های آبخیز دارای آمار و هم فاقد آمار تخمین زدند.

هدف از این مطالعه پیش‌بینی دبی در حوزه‌های



شکل ۲. حوزه‌های آبخیز مورد مطالعه در حوزه‌های کد ۲ تماب در ایران مرکزی واقع در استان‌های سمنان، مرکزی و یزد

جدول ۱. مشخصات فیزیوگرافی حوزه‌های آبخیز مورد مطالعه

| ردیف | ایستگاه               | کد تمآب    | شیب آبراهه اصلی (درصد) | مساحت (هکتار) | محیط (کیلومتر) | طول آبراهه اصلی (کیلومتر) | ارتفاع (متر) |         | شیب متوسط (درصد) |
|------|-----------------------|------------|------------------------|---------------|----------------|---------------------------|--------------|---------|------------------|
|      |                       |            |                        |               |                |                           | حداکثر       | متوسط   |                  |
| ۱    | درجزین                | -۰۲۳<br>۴۷ | ۱۱                     | ۲۴۹۴۳         | ۸۳             | ۲۳                        | ۳۲۱۱         | ۲۱۵۲    | ۳۰٫۷۴            |
| ۲    | دستان                 | -۰۳۱<br>۴۷ | ۱۸                     | ۷۸۴۱          | ۴۸             | ۲۱                        | ۳۷۱۶         | ۲۸۳۱    | ۴۱٫۵۱            |
| ۳    | ایوانکی               | -۹۴۲<br>۴۷ | ۱۰                     | ۸۳۵۹۲         | ۱۴۶            | ۵۴                        | ۳۸۰۴         | ۱۹۲۳    | ۲۰٫۶۱            |
| ۴    | فرحزاد                | -۰۳۵<br>۴۷ | ۲۲                     | ۱۱۵۵۴         | ۶۱             | ۱۵                        | ۳۸۸۴         | ۲۷۲۳    | ۳۶٫۲۷            |
| ۵    | فنیسک                 | -۰۳۸<br>۱۳ | ۲۱                     | ۱۸۲۱۷         | ۶۱             | ۲۵                        | ۳۷۱۵         | ۲۵۱۱    | ۳۷٫۷۴            |
| ۶    | فیروزکوه              | -۰۰۵<br>۴۷ | ۱۳                     | ۵۷۳۹۴         | ۱۴۴            | ۳۷                        | ۳۳۴۹         | ۲۴۳۴    | ۲۱٫۸۰            |
| ۷    | لیرود                 | -۰۲۹<br>۴۷ | ۳                      | ۱۳۳۰۱۱        | ۲۶۵            | ۶۲                        | ۳۷۶۴         | ۲۰۵۱    | ۲۲٫۸۵            |
| ۸    | سیمین‌دشت             | -۰۱۳<br>۴۷ | ۱۹                     | ۳۳۶۵۶         | ۱۱۱            | ۴۵                        | ۴۰۱۶         | ۲۴۵۵    | ۳۶٫۹۵            |
| ۹    | مجن                   | -۰۳۳<br>۴۷ | ۱۶                     | ۱۵۳۸۷         | ۶۸             | ۲۳                        | ۳۸۱۹         | ۲۸۴۱    | ۴۰٫۶۹            |
| ۱۰   | دودهک                 | -۲۷۹<br>۴۱ | ۹                      | ۱۰۰۲۶۶۸       | ۵۴۷            | ۱۸۱                       | ۳۷۵۶         | ۲۰۸۶    | ۱۱٫۶۵            |
| ۱۱   | رازین                 | -۰۵۹<br>۴۱ | ۸                      | ۱۷۵۴۹۰        | ۲۳۲            | ۸۱                        | ۲۹۶۹         | ۱۹۵۵    | ۱۵٫۵۳            |
| ۱۲   | مهربانی طبس           | -۰۲۷<br>۴۵ | ۲۵                     | ۱۸۲۵۲         | ۶۹             | ۲۴                        | ۲۹۰۴         | ۱۸۶۴    | ۴۲               |
| ۱۳   | بن‌کوه                | -۰۱۵<br>۴۷ | ۱۵                     | ۳۲۶۹۸۷        | ۳۳۱            | ۱۱۴                       | ۴۰۳۲         | ۲۳۴۷    | ۲۸               |
| ۱۴   | سیمین‌دشت<br>حیله‌رود | -۰۱۱<br>۴۷ | ۲۳                     | ۲۲۰۹۸۰        | ۲۶۰            | ۷۶                        | ۴۰۲۱         | ۲۴۶۵    | ۲۱               |
| ۱۵   | نمرود                 | -۰۰۷<br>۴۷ | ۲۱                     | ۷۷۳۰۸         | ۱۴۰            | ۸۷                        | ۴۰۲۱         | ۲۶۰۷٫۷۲ | ۲۹               |

حدافل، شیب متوسط (درصد)، شیب آبراهه اصلی، و طول آبراهه اصلی - محاسبه شد (جدول ۱).

بر اساس مطالعات Moral (2009) و Zare و Chahouki (2011)، از روش کوکریجینگ برای تخمین بارش متوسط سالانه هر یک از حوزه‌های

پس از استخراج مرز همه حوزه‌های آبخیز در نرم‌افزار ArcGIS، با استفاده از مدل رقومی ارتفاع با قدرت تفکیک مکانی پنجاه متر برای پانزده حوزه آبخیز اشاره‌شده، پارامترهای فیزیوگرافی آن‌ها - شامل مساحت، محیط، ارتفاع متوسط، ارتفاع حداکثر، ارتفاع

منحنی تداوم جریان تهیه شد و حجم آب سالانه هر حوزه آبخیز، که برابر با مساحت زیر منحنی تداوم جریان بود، محاسبه شد و در بسیاری از ایستگاه‌های هیدرومتری، به علت تغییرات اندک دبی در طول سال یا نداشتن آب پایه در برخی فصول، منحنی تداوم جریان برای آن‌ها، به‌ویژه دبی‌های کم، شکل نگرفت و، در نتیجه، کنار گذاشته شدند. با این توضیحات، از کل ایستگاه‌های هیدرومتری در سه استان مورد مطالعه فقط پانزده ایستگاه دارای طول دوره آماری مناسب بودند. نام این پانزده ایستگاه در جدول ۱ ذکر شده است.

با در نظر گرفتن سطح زیر منحنی (حجم آب سالانه) (جدول ۲) و درصد کاربری اراضی علاوه بر طول آمار روزانه حوزه‌های آبخیز حبله‌رود، سیمین‌دشت، و نمرود در استان سمنان و دودهک (به علت اختلاف بسیار زیاد در حجم آب سالانه) در استان مرکزی حذف شدند. با اجرای این مراحل گام به گام یازده حوزه آبخیز همگن در نظر گرفته شد. حوزه‌های آبخیز نهایی عبارت‌اند از: درجزین، دستان، ایوانکی، فرحزاد، فنیسک، فیروزکوه، لبرود، سیمین‌دشت و مجن در استان سمنان، حوزه آبخیز رازین در استان مرکزی و مهربانی طبس در استان یزد.

شکل ۳ منحنی تداوم جریان حوزه‌های آبخیز نهایی انتخاب شده را نشان می‌دهد. این شکل نیز نشان‌دهنده تغییرات مشابه دبی روزانه در ایستگاه‌های مورد مطالعه نهایی و انتخاب مناسب ایستگاه‌هاست.

پس از انتخاب نهایی حوزه‌های آبخیز مورد مطالعه، مشخصات بارش استان‌های سمنان و مرکزی با استفاده از روش‌های زمین‌آمار، و استان یزد با استفاده از روش رگرسیون محاسبه شد. مشخصات بارش یازده حوزه آبخیز مطالعاتی در جدول ۳ ارائه شده است.

### معیار ارزیابی مدل

معیار خطای میانگین مربعات<sup>۱</sup> (MSE) - برای نرمال کردن - و معیار کارایی نش - ساتکلیف<sup>۲</sup> (NSE) دو معیاری

آبخیز استان‌های سمنان و مرکزی در منطقه مورد مطالعه استفاده شد. روش کوکریجینگ اصلاح شده روش کوکریجینگ است. در این مطالعه نیز از روش کوکریجینگ معمولی استفاده شد. برای تخمین کوکریجینگ نیاز به متغیر اصلی است که در اینجا بارش سالانه ایستگاه‌های باران‌سنجی و متغیر کمکی یا ثانویه ارتفاع‌های مربوط به آن ایستگاه‌هاست.

با توجه به پراکنده بودن ایستگاه‌های بارندگی در استان یزد، کاربرد روش درون‌یابی امکان‌پذیر نیست. بنابراین، برای تعیین بارندگی متوسط در حوزه آبخیز مهربانی از روش گرادیان بارندگی استفاده شد. بر اساس یک قانون عمومی، هرچه ارتفاع ایستگاه در یک رژیم بارندگی معین بیشتر باشد، بارندگی آن ایستگاه بیشتر است. با استفاده از آمار بارندگی سالانه ایستگاه‌های پیر حاجات، تپه طاق، چیروک، حلوان، خرو، ده شور، معدن قلعه، نای‌بند، نیاز طبس و دیهوک و ارتفاع متناظر با این نقاط گرادیان بارندگی تهیه شد.

### انتخاب نهایی حوزه‌های آبخیز

سه روش مختلف برای طبقه‌بندی هیدرولوژیکی وجود دارد (Roald, 1989). این روش‌ها شامل ۱. مناطق جغرافیایی؛ ۲. فیزیوگرافی حوزه آبخیز؛ و ۳. همگنی هیدرولوژیکی است. روش مناطق جغرافیایی بر اساس مرزهای ملی، سیاسی، و واحدهای هیدرولوژیکی است، در حالی که روش فیزیوگرافی بیشتر بر اساس ویژگی‌های فیزیکی و فیزیوگرافی است. همگنی هیدرولوژیکی دبی رودخانه را، به طور مستقیم، برای طبقه‌بندی حوزه آبخیز در نظر می‌گیرد (Kingston, 2010). با توجه به اینکه حوزه‌های آبخیز مورد مطالعه در منطقه جغرافیایی خشک قرار گرفته‌اند، مراحل گام به گام ذیل برای طبقه‌بندی و انتخاب هیدرولوژیکی حوزه‌های آبخیز مشابه انجام شد.

برای هر یک از ایستگاه‌های هیدرومتری واقع در محدوده جغرافیایی مورد مطالعه (سه استان از کشور)

داده‌های مشاهداتی، و  $\sigma_0^2$  واریانس داده‌های مشاهداتی است. خطای متوسط MSE به واحد متغیرهای پیش‌بینی وابسته است و از صفر شروع می‌شود، در حالی که NSE بدون بُعد است و به ۱ ختم می‌شود (از منفی بی‌نهایت تا ۱، به طوری که عدد ۱ مربوط به مدلی است که کاملاً با واقعیت مطابقت دارد). نتیجه‌گیری: NSE حاصل تقسیم MSE به واریانس، منهای ۱ به دست می‌آید. Moriasi et al (۲۰۰۷) آماره‌های کارایی نش- ساتکلیف (Nash & Sutcliffe, 1970)، نسبت خطای میانگین مربعات به انحراف معیار داده‌های

هستند که برای ارزیابی مدل‌های هیدرولوژیکی به کار می‌روند. معیار NSE را نخستین بار، در سال ۱۹۷۰، نش و ساتکلیف به کار گرفتند (روابط ۱ و ۲).

رابطه ۱

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (x_{s,t} - x_{o,t})^2$$

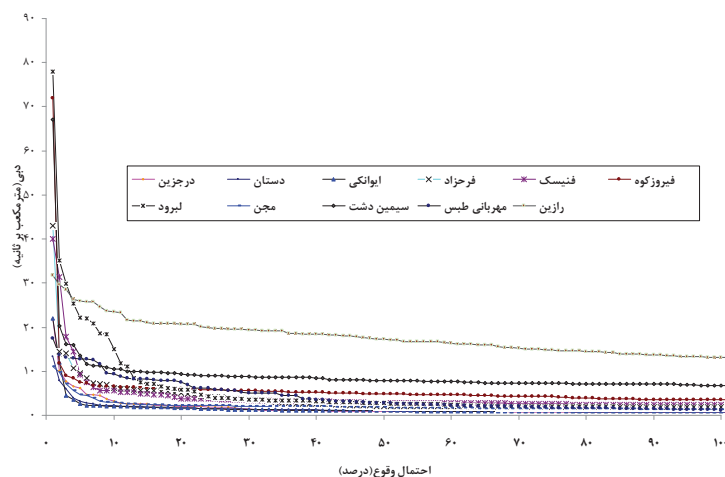
رابطه ۲

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (x_{s,t} - x_{o,t})^2}{\sum_{t=1}^n (x_{o,t} - \mu_0)^2} = 1 - \frac{MSE}{\sigma_0^2}$$

که در این روابط  $x_{s,t}$  مقادیر برآوردشده متغیر،  $x_{o,t}$  مقادیر مشاهداتی،  $n$  تعداد نمونه‌ها،  $\mu_0$  میانگین

جدول ۲. حجم آب سالانه حوزه‌های آبخیز مورد مطالعه حاصل از منحنی تداوم جریان

| ردیف | ایستگاه     | کد تمآب | حجم آب سالانه (میلیون متر مکعب) |
|------|-------------|---------|---------------------------------|
| ۱    | درجزین      | ۴۷-۰۲۳  | ۷,۰۷                            |
| ۲    | دستان       | ۴۷-۰۳۱  | ۵,۱۵                            |
| ۳    | ایوانکی     | ۴۷-۹۴۲  | ۶,۴۶                            |
| ۴    | فرحزاد      | ۴۷-۰۳۵  | ۱۰,۲۴                           |
| ۵    | فنیسک       | ۱۳-۰۳۸  | ۱۸,۴۴                           |
| ۶    | فیروزکوه    | ۴۷-۰۰۵  | ۳۲,۶۷                           |
| ۷    | لبرود       | ۴۷-۰۲۹  | ۲۵,۶۲                           |
| ۸    | سیمین‌دشت   | ۴۷-۰۱۳  | ۴۰,۱۰۰                          |
| ۹    | مجن         | ۴۷-۰۳۳  | ۷,۳۳                            |
| ۱۰   | دودهک       | ۴۱-۲۷۹  | ۱۰۸,۰۶                          |
| ۱۱   | رازین       | ۴۱-۰۵۹  | ۶۹,۰۱                           |
| ۱۲   | مهربانی طیس | ۴۰-۰۲۵  | ۷,۵۸                            |



شکل ۳. منحنی تداوم جریان روزانه یازده ایستگاه هیدرومتری نهایی

جدول ۳. مشخصات بارش سالانه در حوزه‌های آبخیز مطالعاتی

| ردیف | ایستگاه     | بارش (میلی‌متر) |       |       |
|------|-------------|-----------------|-------|-------|
|      |             | حداکثر          | متوسط | حداقل |
| ۱    | درجزین      | ۲۰۶             | ۱۹۰   | ۱۶۶   |
| ۲    | دستان       | ۲۰۳             | ۲۰۰   | ۱۹۵   |
| ۳    | ایوانکی     | ۳۲۵             | ۳۰۰   | ۲۷۵   |
| ۴    | فرحزاد      | ۲۲۰             | ۲۱۶   | ۲۰۴   |
| ۵    | فنیسک       | ۲۳۲             | ۲۰۸   | ۲۰۱   |
| ۶    | فیروزکوه    | ۲۹۴             | ۲۴۶   | ۲۰۳   |
| ۷    | لبرود       | ۲۰۳             | ۱۸۲   | ۱۶۵   |
| ۸    | سیمین‌دشت   | ۳۱۰             | ۲۹۴   | ۲۵۲   |
| ۹    | رازین       | ۳۷۳             | ۳۲۵   | ۲۵۶   |
| ۱۰   | مهربانی طیس | ۲۱۹             | ۱۵۴   | ۱۱۰   |
| ۱۱   | مجن         | ۲۱۲             | ۱۹۹   | ۱۹۵   |

برازش مدل خوب، برازش مدل خوب تا ضعیف و ضعیف ارزیابی می‌شود.

### نتایج

منحنی تداوم جریان یازده حوزه آبخیز مورد مطالعه استخراج شد. در جدول ۴ ده شاخص از منحنی تداوم جریان برای هر یک از حوزه‌های آبخیز برای مدل منطقه‌ای می‌آید.

اندازه‌گیری شده، و درصد اریبی را برای ارزیابی مدل‌های هیدرولوژیکی و کمی کردن صحت آن‌ها در آبخیزداری مقایسه کردند و شاخص کارایی نش-ساتکلیف را معیار بهتری برای ارزیابی متقاطع دانستند. NSE معیاری قوی برای ارزیابی برازش مدل‌های هیدرولوژیکی است و از آن به طور گسترده استفاده می‌شود.

نش و ساتکلیف (۱۹۷۰) بیان کردند که هرگاه

جدول ۴. دبی‌های با احتمال واقع مشخص با استفاده از منحنی تداوم جریان (متر مکعب بر ثانیه)

| نام ایستگاه دبی | کد ایستگاه  | Q <sub>۱۰</sub> | Q <sub>۲۰</sub> | Q <sub>۳۰</sub> | Q <sub>۴۰</sub> | Q <sub>۵۰</sub> | Q <sub>۶۰</sub> | Q <sub>۷۰</sub> | Q <sub>۸۰</sub> | Q <sub>۹۰</sub> |
|-----------------|-------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|                 |             | ۱               | درجزین          | ۴۷-۰۰۲۳         | ۴۱-۱۸۲          | ۰-۳۴۷           | ۰-۲۷۰           | ۰-۲۳۸           | ۰-۱۷۴           | ۰-۱۶۶           |
| ۲               | فرحزاد      | ۴۷-۰۰۳۵         | ۰-۸۸۱           | ۰-۶۳۶           | ۰-۴۶۳           | ۰-۳۷۷           | ۰-۳۰۲           | ۰-۲۵۴           | ۰-۱۹۸           | ۰-۰۴۸           |
| ۳               | فنیسک       | ۱۳-۰۰۳۸         | ۱۶-۷۵           | ۰-۹۹۷           | ۰-۶۷۴           | ۰-۵۳۹           | ۰-۴۸۹           | ۰-۴۵۰           | ۰-۳۷۲           | ۰-۲۷۲           |
| ۴               | فیروزکوه    | ۴۷-۰۰۰۵         | ۲۰-۴۲           | ۱-۹۷۶           | ۱-۵۶۰           | ۱-۲۶۰           | ۱-۰۸۰           | ۰-۸۶۷           | ۰-۶۸۵           | ۰-۱۷۶           |
| ۵               | لبرود       | ۴۷-۰۰۲۹         | ۱-۳۵۶           | ۱-۰۷۱           | ۰-۹۸۹           | ۰-۸۶۴           | ۰-۷۷۸           | ۰-۶۴۳           | ۰-۵۴۳           | ۰-۲۹۷           |
| ۶               | مجن         | ۴۷-۰۰۳۳         | ۰-۸۵۸           | ۰-۵۹۳           | ۰-۳۵۸           | ۰-۲۵۸           | ۰-۱۸۷           | ۰-۱۳۸           | ۰-۱۰۷           | ۰-۰۴۸           |
| ۷               | سیمین‌دشت   | ۴۷-۰۰۱۳         | ۴-۱۹۹           | ۳-۱۲۰           | ۲-۰۹۸           | ۱-۵۷۵           | ۱-۲۷۱           | ۱-۰۰۱           | ۰-۸۷۹           | ۰-۲۰۸           |
| ۸               | ایوانکی     | ۴۷-۹۴۲          | ۰-۵۱۷           | ۰-۳۹۳           | ۰-۲۷۴           | ۰-۲۳۴           | ۰-۱۸۵           | ۰-۱۵۸           | ۰-۱۱۳           | ۰-۰۶۱           |
| ۹               | دستان       | ۴۷-۰۰۳۱         | ۰-۵۴۰           | ۰-۴۰۰           | ۰-۲۴۰           | ۰-۱۶۵           | ۰-۱۲۷           | ۰-۱۰۰           | ۰-۰۸۰           | ۰-۰۳۰           |
| ۱۰              | مهربانی طیس | ۴۵-۰۰۲۷         | ۰-۳۷۰           | ۰-۳۰۳           | ۰-۲۲۸           | ۰-۲۲۷           | ۰-۲۱۷           | ۰-۱۹۴           | ۰-۱۸۶           | ۰-۱۳۹           |
| ۱۱              | رازین       | ۴۱-۰۰۵۹         | ۸-۶۵۷           | ۶-۲۶۱           | ۳-۰۵۰           | ۲-۲۹۶           | ۱-۸۳۲           | ۱-۱۹۲           | ۰-۷۰۰           | ۰-۰۶۰           |



متغیر، بر حسب وزن دادن به آن مؤلفه، مهم تر خواهد بود.

تجزیه به عامل‌ها با استفاده از تجزیه به مؤلفه‌های اصلی و چرخش وریماکس و نرمال کردن کایزر روی عامل موقت انجام گرفت. با توجه به اینکه یازده متغیر فیزیوگرافی و اقلیمی برای حوزه‌های آبخیز مورد مطالعه واحدهای متفاوتی داشتند، متغیرهای مورد نظر، به صورت استاندارد، به الحاقیه 2010 Xlstat نرم‌افزار Excel معرفی شدند (شکل ۴ و جدول ۵ خروجی از این الحاقیه‌اند).

با توجه به شکل ۴ و جداول مربوط به آن، از آنجا که مقدار ویژه مؤلفه‌های اول، دوم، و سوم بزرگ‌تر از ۱ است و، همچنین، با توجه به نمودار که تغییرات مقادیر ویژه را در ارتباط با عامل‌ها نشان می‌دهد، مؤلفه‌های اول، دوم، و سوم مؤلفه‌های تأثیرگذار انتخاب می‌شوند و ۹۰ درصد از تغییرات دبی را در بر دارند.

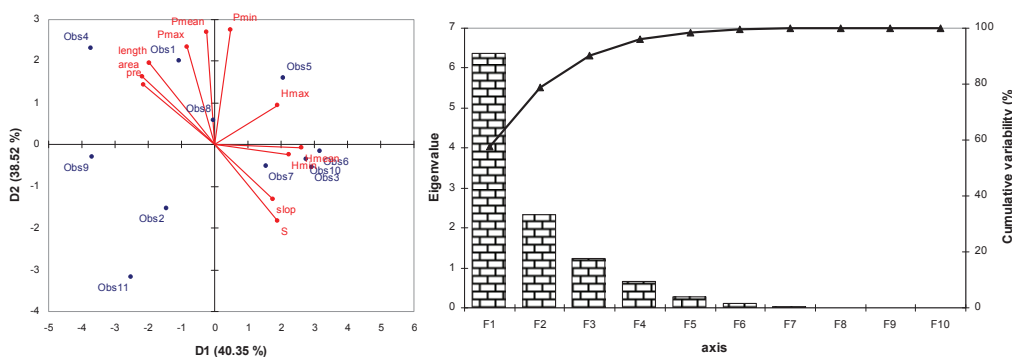
با توجه به نتایج روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی در جدول ۵، تجزیه مقادیر شیب آبراهه اصلی، مساحت حوزه آبخیز، ارتفاع متوسط حوزه آبخیز، بارندگی حداکثر سالانه، بارندگی متوسط سالانه، و بارندگی حداقل سالانه دارای بیشترین تغییرپذیری‌اند و ۹۰ درصد تغییرات مربوط به این عوامل است.

## تحلیل عاملی و انتخاب تأثیرگذارترین متغیر مستقل

مراحل تجزیه مؤلفه‌های اصلی عبارت است از: استاندارد کردن داده‌ها، محاسبه ماتریس کوواریانس، محاسبه مقادیر ویژه و بردارهای ویژه.

هدف از تجزیه مؤلفه‌های اصلی آن است که واریانس موجود در داده‌های چندمتغیره را به مؤلفه‌هایی تجزیه کند که اولین مؤلفه تا آنجا که ممکن است علت بیشترین واریانس موجود در داده‌ها باشد. دومین مؤلفه علت بیشترین واریانس ممکن بعد از مؤلفه اول و الی آخر باشد. به علاوه، در این روش هر مؤلفه از مؤلفه‌های دیگر مستقل است، یعنی بین هر مؤلفه و مؤلفه‌های دیگر همبستگی وجود ندارد و در فضا هر مؤلفه از نظر جهت در زاویه در طرف راست مؤلفه‌های دیگر قرار دارد.

هسته هر PCA شامل بردارهای ویژه و مقادیر ویژه است. بردارهای ویژه مجموعه‌ای است از نمره‌ها که هر کدام ارائه‌دهنده وزن هر یک از متغیرهای اولیه بر روی هر مؤلفه است. نمره‌های بردار ویژه مانند ضرایب همبستگی بین +۱، صفر تا -۱ تغییر می‌کند. برای هر مؤلفه، هر گونه یا متغیر دارای مجموعه متناظری از نمرات بردار ویژه است و هر چه نمره به +۱ یا -۱ نزدیک‌تر باشد، یعنی هر چه از صفر دورتر باشد، آن



شکل ۴. نمودار تغییرات مقادیر ویژه در ارتباط با عامل‌ها (scree plot)

جدول ۵. مقادیر بردار ویژه مربوط به متغیرها در هر یک از مؤلفه‌ها در روش PCA

| متغیر                    | مؤلفه (محور) |        |        |        |        |        |
|--------------------------|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                          | اول          | دوم    | سوم    | چهارم  | پنجم   | ششم    |
| شیب آبراهه اصلی          | ۰.۳۰۱        | -۰.۰۵۶ | -۰.۵۱۲ | ۰.۰۰۸  | ۰.۴۸۳  | ۰.۴۹۲  |
| مساحت حوزه آبخیز         | -۰.۳۷۳       | ۰.۰۷۳  | ۰.۱۸۸  | ۰.۱۲   | ۰.۳۴۸  | -۰.۰۸۵ |
| محیط حوزه آبخیز          | -۰.۳۵۱       | ۰.۱۰۳  | ۰.۳۳۹  | -۰.۰۱۷ | ۰.۳۵۶  | ۰.۳    |
| طول بلندترین آبراهه      | -۰.۳۸۳       | -۰.۰۱۲ | ۰.۰۶۷  | -۰.۰۴۴ | ۰.۴۳۷  | -۰.۲۴۹ |
| ارتفاع حداکثر حوزه آبخیز | ۰.۱۰۱        | -۰.۴۵۴ | ۰.۳۴۳  | -۰.۶۷۷ | ۰.۰۷۶  | ۰.۳۲۳  |
| ارتفاع متوسط حوزه آبخیز  | ۰.۲۷۲        | -۰.۴۰۱ | ۰.۲۶۹  | ۰.۲۶۷  | ۰.۱۷۸  | -۰.۲۴۷ |
| ارتفاع حداقل حوزه آبخیز  | ۰.۲۴۹        | -۰.۳۱۴ | ۰.۳۳۲  | ۰.۵۹۶  | ۰.۰۸۵  | ۰.۱۹۴  |
| شیب متوسط حوزه آبخیز     | ۰.۳۶۴        | ۰.۰۰۲  | -۰.۱۵۲ | -۰.۲۱۷ | ۰.۴۷۸  | -۰.۵۵۹ |
| بارندگی حداکثر سالانه    | -۰.۳۰۹       | -۰.۲۵۸ | -۰.۴۰۱ | ۰.۱۸۹  | ۰.۰۹۲  | ۰.۱۶۷  |
| بارندگی متوسط سالانه     | -۰.۲۸۲       | -۰.۴۰۸ | -۰.۲۸۳ | ۰.۰۶۷  | -۰.۰۳۲ | -۰.۰۹  |
| بارندگی حداقل سالانه     | -۰.۲۱۴       | -۰.۵۳۱ | -۰.۱۳۸ | -۰.۱۰۶ | -۰.۲۱۳ | -۰.۲۱۸ |

### تحلیل رگرسیونی چندمتغیره و ارائه منحنی تداوم جریان منطقه‌ای

در این مطالعه مدل‌های منطقه‌ای منحنی تداوم جریان از طریق تحلیل رگرسیون چندمتغیره گام به گام و با استفاده از خوارزمی<sup>۱</sup> OLS به دست آمد. روش رگرسیون گام به گام مورد استفاده در این مطالعه با در نظر گرفتن مدل غیرخطی ای انجام پذیرفت که متغیر وابسته را با استفاده از مقادیر ثابت برای متغیرهای مستقل با آزمون‌های متوالی<sup>۲</sup>، انتخاب حداکثر ضریب تشخیص<sup>۳</sup>، و حداقل باقی مانده<sup>۴</sup> بهترین مدل را برازش می‌دهد. مدل کلی (رابطه<sup>۳</sup>) با استفاده از تکرارهای متوالی به صورت زیر است:

$$Q_{\text{flow}} = A_0 + X_1^4 X_2^4 \dots X_n^4 + \eta \quad \text{رابطه ۳}$$

که در این معادله  $X_i$  متغیر مستقل است و  $\eta$  باقی مانده مدل. جدول ۶ خوارزمی رگرسیون گام به گام OLS مدل رگرسیونی زیر را در منطقه مطالعاتی نشان می‌دهد.

برای ارزیابی مدل‌های پیش‌بینی منحنی تداوم جریان از معیار کارایی نش-ساتکلیف، که در هیدرولوژی بسیار کاربرد دارد، استفاده شد. این معیار با به‌کاربردن واریانس

داده‌های مشاهداتی بسیار دقیق است. نش و ساتکلیف بیان کردند که هرگاه برازش مدل خوب، برازش مدل خوب تا ضعیف، و ضعیف ارزیابی می‌شود. بر اساس نتایج ارزیابی (جدول ۷)، برازش مدل‌های پیش‌بینی خوب است.

در همه معادلات مساحت حوزه آبخیز (A) بر اساس کیلومتر مربع، طول طولانی‌ترین آبراهه (L) بر حسب کیلومتر، شیب آبراهه اصلی (S) بر حسب درصد، بارندگی متوسط سالانه (P) بر حسب میلی‌متر، و اختلاف حوزه آبخیز بر حسب متر است. برخی از خصوصیات آماری حوزه‌های آبخیز مورد مطالعه در جدول ۷ آورده شده است.

### بحث و نتیجه‌گیری

پیش‌بینی متغیرهای هیدرولوژیکی برای حوزه‌های بدون آمار توجه بسیاری از محققان و هیدرولوژیست‌ها را جلب کرده است (دهه پیش‌بینی در حوزه‌های فاقد آمار). پیش‌بینی منحنی تداوم جریان در حوزه‌های فاقد جریان از مبانی اساسی است و از آن برای پرداختن به مسائلی همچون برق‌آبی، رسوب‌گیری مخزن و رودخانه،

1. Ordinary Least Squares
2. iteration
3. R squared
4. Residuals

جدول ۶. مدل‌های منطقه‌ای منحنی تداوم جریان

| ملاحظات   | NSE  | R <sup>۲</sup> | معادله   |
|-----------|------|----------------|--|
| -         | ۰٫۸۴ | ۰٫۸۲           | $Q_5 = 1 + A^{-23.50} L^{65.65} S^{-1.34} P^{-0.16}$   |
| -         | ۰٫۸۹ | ۰٫۸۸           | $Q_{10} = 1 * A^{3.64} L^{0.21} S^{6.42} P^{1.14}$   |
| -         | ۰٫۷۸ | ۰٫۷۶           | $Q_{20} = 3.177 * 10^{-28} A^{3.64} L^{0.21} S^{6.42} P^{1.14}$                              |
| بدون بُعد | ۰٫۹۸ | ۰٫۷۷           | $Q_{30} = 1.134 - A^{-1.824} / L^{-1.791} S^{0.817} P^{-3.749} H^{3.964}$                    |
| بدون بُعد | ۰٫۹۸ | ۰٫۷۶           | $Q_{40} = 8.745 * 10^{-2} A^{0.198} / S^{-0.105} - P^{6.156} H^{0.337} L^{1.417 * 10^{-19}}$ |
| بدون بُعد | ۰٫۹۸ | ۰٫۷۷           | $Q_{50} = 7.005 * 10^{-2} A^{0.234} / S^{-0.070} - P^{0.397} H^{-0.289} L^{0.009}$           |
| بدون بُعد | ۰٫۹۸ | ۰٫۷۶           | $Q_{60} = 2.390 * 10^{-2} A^{0.280} / S^{-0.196} - P^{2.370} H^{-0.377} L^{1.379 * 10^{-7}}$ |
| بدون بُعد | ۰٫۹۷ | ۰٫۸۰           | $Q_{70} = 6.651 * 10^{-1} - A^{-0.666} / L^{0.145} S^{-1.224} P^{3.625} H^{-1.514}$          |
| بدون بُعد | ۰٫۸۵ | ۰٫۸۲           | $Q_{80} = -1.021 + A^{0.051} / L^{-0.053} P^{-1.299} S^{0.265} H^{0.101}$                    |
| بدون بُعد | ۰٫۸۴ | ۰٫۸۲           | $Q_{90} = 1.767 - A^{-0.069} / L^{0.039} S^{-0.121} P^{0.530} H^{-0.182}$                    |

جدول ۷. متوسط، حداقل، و حداکثر عوامل مستقل رابطه‌های منطقه‌ای منحنی تداوم جریان

| آماره  | شیب آبراهه اصلی (درصد) | مساحت حوزه آبخیز (Km <sup>۲</sup> ) | طول آبراهه اصلی (Km) | بارندگی متوسط سالانه (mm) | اختلاف ارتفاع حوزه آبخیز (m) |
|--------|------------------------|-------------------------------------|----------------------|---------------------------|------------------------------|
| متوسط  | ۱۵٫۰۹                  | ۵۲۶۶۷                               | ۳۷٫۲۷                | ۲۲۸٫۵                     | ۱۲۱۹                         |
| حداقل  | ۳                      | ۷۸۴۱                                | ۱۵                   | ۱۵۴                       | ۸۸۵                          |
| حداکثر | ۲۵                     | ۱۷۵۴۹۰                              | ۸۱                   | ۳۲۵                       | ۱۸۸۱                         |

$$Q_{Highflow} = A_0 + X_1^{A_1} X_2^{A_2} \dots X_n^{A_n} + \eta \quad \text{رابطه ۴}$$

بخشی از منحنی تداوم جریان، که دربرگیرنده دبی برای شرایط مرطوب است، در منطقه مطالعاتی دو دبی  $Q_{10}$  و  $Q_{20}$  را در بر می‌گیرد. مدل کلی با استفاده از تکرارهای متوالی به صورت زیر است (رابطه ۵):

$$Q_{Moistflow} = A_0 X_1^{A_1} X_2^{A_2} \dots X_n^{A_n} + \eta \quad \text{رابطه ۵}$$

ضریب تشخیص معادله هیچ گاه از ۰٫۶۷ برای  $A_0 \dots A_n$  در معادلات به شکل قبل بالاتر نرفت. بنابراین، برای برازش دبی‌ها با استفاده از میانگین روزانه تمامی داده‌ها (بیست سال روزانه) با تقسیم مقدار هر دبی به میانگین کل تعداد روزهای کل طول دوره آماری، بدون بُعد گردید. برای برازش بهتر و افزایش معیار NSE متغیرهای وابسته‌های مختلف دیگر آزمون شد و از متغیر مستقل  $\Delta H$  برای پیش‌بینی بهتر استفاده شد.

ارزیابی استفاده از آب، تخصیص منابع آب، و شایستگی تعیین پناهگاه‌های زیستی استفاده می‌شود.

از مدل منطقه‌ای پیشنهادشده در این تحقیق به طور مؤثر و کارآمدی برای پیش‌بینی پتانسیل نیاز آبی، تخمین شاخص‌های دبی کم و حداکثر و، در کل، بازسازی سری داده‌های دبی روزانه در هر حوزه آبخیز بدون آمار در منطقه مورد مطالعه استفاده می‌شود. روش مطالعه‌ای که در این تحقیق از آن استفاده شده، به آسانی، در سایر مناطق نیز کاربرد دارد.

شکل مدل‌های دبی‌های پیشنهادشده برای منحنی تداوم جریان، با افزایش درصد احتمال وقوع، تغییرات منظمی دارد. دبی با احتمال ۵ درصد، که نشان‌دهنده دبی سیلابی و به طور ویژه در مناطق خشک نشان‌دهنده تندسیلاب‌هاست، از مدل زیر پیروی می‌کند (رابطه ۴):

جدول ۸ ضرایب همبستگی بین متغیرهای مستقلی را نشان می‌دهد که در مدل‌های رگرسیونی استفاده شده است (اختلاف ارتفاع، متوسط بارندگی سالانه، طول آبراهه اصلی، شیب آبراهه اصلی و مساحت). ضرایب همبستگی بالای بین متغیرهای مستقل نشان می‌دهد که این متغیرها به خوبی انتخاب شده‌اند. در مورد عامل اختلاف ارتفاع نیز باید به اینکه توجه کرد که از این عامل، در نهایت، به عنوان متغیر کمکی، به معادلاتی که باقی‌مانده آن‌ها توزیع نرمال نداشت، استفاده شد. همان‌طور که در جدول مشاهده می‌شود، متغیرهای متوسط بارندگی سالانه، طول آبراهه اصلی، شیب آبراهه اصلی، و مساحت، که همبستگی بالایی دارند، در همه

این بخش از منحنی تداوم جریان، که دربرگیرنده دبی برای شرایط متوسط است، در منطقه مطالعاتی دبی را در بر می‌گیرد. مدل کلی با استفاده از تکرارهای متوالی برای دبی‌های  $30Q$ ،  $40Q$ ،  $50Q$  و  $60Q$  به صورت زیر است (رابطه ۶):

$$Q_{Mid-range} = A_0 X_1^{A_1} / X_2^{A_2} \dots X_n^{A_n} + \eta \quad \text{رابطه ۶}$$

این بخش از منحنی تداوم جریان که در برگیرنده دبی برای شرایط خشک و حداقل است، که دبی‌های  $70Q$ ،  $80Q$  و  $90Q$  را در بر می‌گیرد. مدل کلی با استفاده از تکرارهای متوالی به صورت زیر است (رابطه ۷):

$$Q_{Dry-Lowflow} = A_0 \pm X_1^{A_1} / X_2^{A_2} \dots X_n^{A_n} + \eta \quad \text{رابطه ۷}$$

جدول ۸. ضرایب همبستگی بین متغیرهای وابسته مورد استفاده در مدل‌های رگرسیونی چندمتغیره منحنی تداوم جریان

| مسا | شیب         | طول آبراهه | متوسط بارندگی | اختلا    |                 |
|-----|-------------|------------|---------------|----------|-----------------|
| حت  | آبراهه اصلی | اصلی       | سالانه        | ف ارتفاع |                 |
|     |             |            |               | ۱        | اختلاف ارتفاع   |
|     |             |            | ۱.۰۰          | ۰.۳۱     | متوسط بارندگی   |
|     |             |            |               |          | سالانه          |
|     |             | ۱.۰۰       | ۰.۶۷          | ۰.۴۵     | طول آبراهه اصلی |
|     | ۱.۰۰        | -۰.۷۳      | -۰.۳۱         | -۰.۳۸    | شیب آبراهه اصلی |
| ۱.۰ | -۰.۷۹       | ۰.۹۶       | ۰.۵۳          | ۰.۳۴     | مساحت           |

را در نظر نگرفتند و از طول دوره آماری موجود استفاده کردند. همچنین، از دبی‌های استخراجی با احتمال ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۷۰، ۸۰ و ۹۰ استفاده کردند. در این مطالعه فقط از عامل مساحت، به عنوان متغیر مستقل، استفاده شده است و آنان از ۹ شاخص هیدرولوژیکی استفاده کردند، در حالی که در مطالعه حاضر از ۱۰ شاخص هیدرولوژیکی و ۱۱ متغیر مستقل برای مدل‌سازی منطقه‌ای منحنی تداوم جریان استفاده شده است.

Mimikou & Kaemaki (1985) منحنی تداوم جریان ماهانه را در یازده حوزه آبخیز یونان به صورت منطقه‌ای درآوردند و مدل‌های را با استفاده از روش رگرسیون غیرخطی چندگانه، به عنوان مدل منطقه‌ای

مدل‌های رگرسیونی غیرخطی برآورد دبی معنی‌دار شده‌اند. گرچه مساحت حوزه آبخیز با طول آبراهه اصلی همبستگی بالایی دارد، مساحت فقط اندازه حوزه آبخیز را بیان می‌کند، در حالی که ترکیب مساحت حوزه آبخیز با طول آبراهه، شکل و اندازه حوزه آبخیز را، که هر دو آن‌ها بر دبی نقش دارند، بیان می‌کند.

Yu & Yang (2002)، در مقایسه با مطالعه حاضر، فقط از مساحت حوزه آبخیز، به عنوان متغیر مستقل، برای مدل‌سازی منحنی تداوم جریان استفاده کردند و برای همگن‌بندی هیدرولوژیکی در مناطق اقلیمی مختلف تایوان (برای ۳۴ حوزه آبخیز) روش تحلیل کلاستر را، بر اساس منحنی تداوم جریان، مناسب ارزیابی کردند. این محققان طول دوره آماری مشترک

مطالعات Mimikou & Kaemaki (1985) و Castellarin et al (2004)، علاوه بر انتخاب متغیرهای وابسته - که به هر کدام از آنها اشاره شد - در انتخاب متغیرهای مستقل نیز متفاوت است. در مطالعه حاضر همه متغیرهای وابسته - به جز عامل شیب آبراهه اصلی - مشابه هم‌اند.

در این مطالعه، با توجه به نتایج مطالعات گذشته، منحنی تداوم جریان روزانه در منطقه ایران مرکزی نیز به صورت منطقه‌ای درآمد، با این تفاوت که این تحقیق در مرز جغرافیایی و اقلیمی همگنی صورت گرفت؛ بدین صورت که این روش برای مدل منطقه‌ای تداوم جریان فقط در مناطق خشک کشور به کار برده شد.

### سپاسگزاری

از آقایان دکتر محسن محسنی ساروی، دکتر علی اکبر نظری سامانی، دکتر آرشد ملکیان، و مهندس مجید بختیاری به پاس ارائه رهنمودهای ارزشمند در مراحل انجام دادن این تحقیق تشکر و قدردانی می‌شود.

تداوم جریان، معرفی کردند. این محققان میانگین بارندگی سالانه، مساحت، اختلاف ارتفاع، و طول آبراهه اصلی حوزه آبخیز را به عنوان متغیر مستقل انتخاب کردند. این مطالعه در منطقه آب و هوایی خاصی قرار نداشت و، در مقایسه با مطالعه حاضر، منحنی تداوم جریان ماهانه را بررسی کردند و، همچنین، دوره آماری موجود را برای هر ایستگاه در نظر گرفتند.

Castellarin et al (2004) سه روش آماری، پارامتری، و گرافیکی را برای منطقه‌ای کردن منحنی تداوم جریان مقایسه کرده و هر سه روش مورد مقایسه را مناسب ارزیابی کردند. این محققان برای منطقه‌ای کردن منحنی تداوم جریان، برای دوره آماری موجود، برای ۵۱ حوزه آبخیز در ایتالیا از دبی‌هایی با احتمال ۳۰، ۷۰، ۹۰، و ۹۵ - به متغیر وابسته - و از عامل‌های مساحت، طول آبراهه اصلی، میانگین بارندگی سالانه، و اختلاف ارتفاع حوزه آبخیز - به عنوان متغیر مستقل - در مدل‌سازی منحنی تداوم جریان استفاده کردند.

## References

- [1]. Alcazar, J. and Palau, Antoni (2010). Mediterranean watershed based on a regional classification. *Journal of Hydrology*, 388, 41–51
- [2]. Castellarin, A., Galeati, G., Brandimarte, L., Montanari, A., and Brath, A. (2004a). Regional flow-duration curves: Reliability for ungauged basins. *Advance Water Resource*, 27, 953–965.
- [3]. Castellarin, A., Vogel, R. M., and Brath, A. (2004b). A stochastic index flow model of flow duration curves. *Water Resource Research*, 40, W03104.
- [4]. Croker, K. M., Young, MDZ, Rees HG. (2003). Flow duration curve estimation in ephemeral catchments in Portugal. *Hydrological Science*, 48(3):427–39
- [5]. Fennessey, N., Vogel, R. M. (1990). Regional flow-duration curves for ungauged sites in Massachusetts. *Journal of Water Resource management*, 116 (4), 530–549.
- [6]. Franchini, M., Suppo, M. (1996). Regional analysis of flow duration curves for a limestone region. *Journal of Water Resource management*, 10, 199–218
- [7]. Kingston, D., Hannah, David M., Damian M., Lawler and McGregor, Glenn R. (2010). Regional classification, variability, and trends of northern North Atlantic River flow. *Hydrological Process*, DOI: 10.1002/hyp.7655
- [8]. Le Boutillier, D. W., Waylen, P. R. (1993). Stochastic model of flow duration curves. *Water Resource Research*, 29 (10), 3535–3541.
- [9]. Merz, B., Blöschl, G. (2004). Regionalization of catchment model parameters. *Journal of Hydrology*, 287, 95–123.
- [10]. Mimikou, M., and Kaemaki, S. (1985). Regionalization of flow duration characteristics. *Journal of Hydrology*, 82, 77–91.
- [11]. Moral, F. J. (2009). Comparison of different geostatistical approaches to map climate variables: application to precipitation. *International Journal of Climatology*, DOI: 10.1002/joc.1913
- [12]. Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., and Veith, T. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations, *Transactions of the ASABE*, 50, 885–900.
- [13]. Roald, L. A. (1989). Application of regional flood frequency analysis to basins in northwest Europe. *FRIENDS in Hydrology*. IAHS. Publication No. 187: Wallingford; 163–173.
- [14]. Sivapalan, M., Takeuchi, K., Franks, S. W., Gupta, V.K., Karambiri, H., Lakshmi, V., Liang, X., - McDonnell, J. J., Mendiondo, E. M., O’Connell, P. E., Oki, T., Pomeroy, J. W., Schertzer, D., Uhlenbrook, S., Zehe, E. (2003). *IAHS Decade on Predictions in Ungauged Basins (PUB), 2003–2012: Shaping an exciting future for the hydrological sciences*. *Hydrological Science Journal*, 48(6), 857-880.
- [15]. Ouarda, T. B. M. J., C. Girard, G. S. Cavadias and B. Bobee (2001). Regional flood frequency estimation with canonical correlation analysis. *Journal of Hydrology*, 254, p: 157-173.
- [16]. Quimpo, R. G., Alejandrino, A. A., and McNally, T. A. (1983). Regionalised flow duration

- curves for Philippines. *Journal of Water Resource Planning and management*, 109-4, 320–30.
- [17]. Singh, R. D., Mishra, S. K., and Chowdhary, H. (2001). Regional flow duration models for large number of ungauged Himalayan catchments for planning microhydro projects. *Journal Hydrologic Engineering*, 64, 310–316.
- [18]. Sivapalan, M. (2003). Prediction in ungauged basins: a grand challenge for theoretical hydrology. *Hydrological Processes*, 17, 3163-3170.
- [19]. Smakhtin V. U. (2001). Low-flow hydrology: a review. Elsevier, *Journal of hydrology*, Vol 240, 147-186.
- [20]. Yu, P S, Yang T.C. and Wang Y. C. (2002). Uncertainty analysis of regional flow duration curves. *Journal of Water Resources, Planning and Management*, 128 (6), 424-30.
- [21]. Yu, P. S., Yang, T. C., and Liu, C. W. (2002). A regional model of low flow for southern Taiwan. *Hydrological Processes*, 16, 2017–2034.
- [22]. Zinanlo, A. (2003). Low flow and duration curve analysis aiming at predicting runoff from ungauged catchments, Master of Science Thesis, International Institute for Geo Information Science and Earth Observation Enschede, The Netherlands, 94p.
- [23]. Zare Chahouki, A., Zrae Chahouki, M. A. (2011). Estimation of seasonal and annual precipitation using geostatistical methods in southern Alborz in Semnan province, *Journal of Range and Watershed Management, Iranian Journal of Natural Resources*, Vol. 64, No. 1, pp.1-13.