Iranian Journal of
Rainwater Catchment Systems

مجله علمی سامانه های سطوح آبگیر باران

شاپا الکترونیکی: ۲۷۸۲-۱۵۲۱ شاپا چاپی: ۲۴۲۲-۵۹۷۰

مدل‌سازی منحنی تداوم جریان ماهانه به‌روش رگرسیون غیرخطی برای حوضه‌های بدون آمار استان اردبیل

لیلا بابایی[۱]، محمدحسین جلیلی[۲]، زینب امین‌زاده[۲]، فریدون سلیمانی[۳]، زینب حزباوی[۴*]

۱. دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه

۲. دانشجوی کارشناسی مهندسی طبیعت، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

۳. استادیار، بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اهواز، ایران

۴. استادیار، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، پژوهشکده مدیریت آب، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران[۱]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۱

صفحات: ۱۸- ۱

نوع مقاله: علمی-پژوهشی

چکیده

منحنی تداوم جریان (FDC) بیان‌گر توزیع فراوانی جریان آب در یک بازه زمانی است که به‌طور گسترده در هیدرولوژی برای ارزیابی طیف‌های مختلف کاربرد جریان آب رودخانه‌ها استفاده می‌شود. لذا، توسعه یک مدل و روش مناسب برای برآورد آن در حوضه‌های فاقد آمار ضروری است. در همین راستا، در پژوهش حاضر، از مدل‌سازی مبتنی بر رگرسیون غیرخطی، برای تهیه FDC بر اساس داده‌های دبی جریان آب (مترمکعب بر ثانیه) و بارش (میلی‌متر) در دوره آماری ۱۳۸۱-۱۳۹۲، مساحت (کیلومترمربع) و شیب متوسط (درصد) حوضه‌های بالادست مربوط به ۳۰ ایستگاه استان اردبیل استفاده شد. برای تحلیل رگرسیون غیرخطی، حدود ۷۰ و ۳۰ درصد ایستگاه‌ها به ترتیب برای واسنجی و اعتبارسنجی در نظر گرفته شدند. توسعه مدل برآورد FDC شامل چندین مرحله ازجمله بی‌بعد کردن داده‌های جریان دبی، نرمال‌سازی، تعریف پارامترهای معادلات رگرسیون غیرخطی و محاسبه چارک‌ها بوده است. درنهایت پس از آزمون رابطه‌های مختلف، رابطه $Q = 0.00002385(AP)^{0.571}S^{0.845}$ با در نظر گرفتن تمام متغیرهای ورودی با ضریب تعیین (R^2) برابر با ۰/۷۸ و میانگین قدر مطلق خطا (MAE) برابر با ۰/۰۲۱ به‌عنوان رابطه نهایی برای مدل‌سازی FDC در حوضه‌های فاقد آمار معرفی شد.

واژه‌های کلیدی: بی‌بعد سازی، رژیم جریان رودخانه، مدیریت منابع آب، مدل‌سازی منطقه‌ای.

مقدمه

تحلیل سامانه‌های مربوط به چرخه آب و هیدرولوژی از طریق مدل‌سازی[۲] می‌تواند نقش اساسی در مدیریت یکپارچه حوضه[۳] ایفا نموده و مدیران را در اتخاذ اقدامات مناسب مدیریتی و حفاظتی کمک نماید. (مهدوی، ۱۳۹۵). از طرفی، اساس و پایه مطالعات هیدرولوژی، وجود داده‌های آماری با دقت و طول دوره زمانی موردقبول است. با توجه به ناقص بودن اغلب

1- *Email:z.hazbavi@uma.ac.ir نویسنده مسئول: زینب حزباوی

2- Modeling

3- Catchment/watershed

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.24235970.1400.9.4.5.3]

داده‌های هیدرولوژی به دلایل مختلفی ازجمله عدم وجود تجهیزات اندازه‌گیری، ثبت نکردن به‌موقع آمار و یا ثبت آمار اشتباه، تخمین و برآورد این داده‌ها برای دستیابی به مبنای صحیح و حتی‌المقدور نزدیک به واقعیت لازم و ضروری است. اهمیت دسترسی به داده‌های کافی و دقیق باهدف کاهش مدت‌زمان مطالعات، برآورد مناسب از پارامترهای هدف و نیز کاهش هزینه‌های اجرایی و خسارات ناشی از اجرای طرح‌های مدیریتی مبتنی بر داده‌های هیدرولوژی روزبه‌روز توسط دانشمندان و کارشناسان اجرایی مورد تأکید قرار می‌گیرد (Smakhtin, 2001).

امروزه، در برنامه‌ریزی‌ها و شیوه‌های مدیریت منابع آب، ابزارهای محاسباتی بسیاری در دسترس محققان و مهندسان قرارگرفته است (حسینی و همکاران، ۱۳۹۸؛ Ridolfi et al., 2020). در این میان منحنی تداوم جریان (FDC)[1] برای توصیف رژیم هیدرولوژیک حوضه بر اساس سری زمانی حجم جریان رودخانه مورداستفاده قرار می‌گیرد. با استفاده از FDC، دبی جریان با درصد زمانی مشخص تعیین و رویدادهای بیشینه و کمینه جریان محاسبه می‌شود. FDC منطقه‌ای با توسعه معادلات و انتقال اطلاعات مرتبط با ویژگی‌های مورفولوژی و هیدرولوژی حوضه از مناطق دارای داده به مناطق بدون آمار قابل تهیه است. البته مدل‌های FDC برای یک حوضه به حوضه دیگری قابل‌انتقال نیستند، مگر این‌که حوضه‌ها ازنظر ویژگی‌های هیدرولوژی و ژئومورفولوژی مشابهت داشته باشند (Burgan & Aksoy, 2020).

به دلیل فقدان داده‌های دبی و مشکلات ناشی از آن‌ها در برخی مناطق، کاربرد FDC در مطالعات هیدرولوژی، اکولوژی رودخانه و مدیریت منابع آب محبوبیت بالایی پیداکرده است. FDC اطلاعاتی در مورد جریان و هم‌چنین مدیریت بهینه منابع آب رودخانه ارائه می‌دهد. هم‌چنین کاربرد آن دارای سابقه طولانی در زمینه آبیاری، تأمین آب، برنامه‌های پیش‌گیری از سیل، ارزیابی جریان، تخصیص بار پسماند، تخصیص منابع برق‌آبی، انتخاب ظرفیت تصفیه فاضلاب‌ها، مطالعات رسوب رودخانه/مخزن/دریاچه/تالاب، مدیریت مخزن، تجزیه‌وتحلیل فراوانی سیل، ارزیابی خسارت سیل، انتخاب پروژه مدیریت بهینه منابع آب، مهندسی مصرف آب، ذخیره محیط زیستی، طراحی کانال شامل ارزیابی ظرفیت انتقال رسوب و وضعیت زیستگاه، تنوع زیستی آبزیان_ارزیابی تصادفی جریان‌های کمینه است (Smakhtin, 2001).

با افزایش نیاز به منابع آبی و به دنبال آن نیاز به برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب کشورها، استفاده از FDC اهمیت زیادی پیداکرده است. بنابراین، مطالعات مختلفی در مورد مدل‌های هیدرولوژی باهدف برآورد FDC در حوضه‌های بدون آمار با استفاده از داده‌های دبی و توپوگرافی حوضه‌های اطراف انجام‌شده است. برای نمونه، Verma و همکاران (۲۰۱۷) به مطالعه و بررسی تداوم جریان برای تخمین جریان‌های محیط زیستی در حوضه دامودار در هند پرداختند. در این مطالعه، کم‌ترین میزان جریان محیط زیستی در شش حوضه دامودار با استفاده از دو روش FDC و اندازه‌گیری دوره‌ای (POR)[2] ثبت و رویکردهای تصادفی برای داده‌های روزانه برآورد شد. هم‌چنین، Over و همکاران (۲۰۱۸) با استفاده از روش رگرسیون منطقه به برآورد FDC پرداختند. آن‌ها با در نظر گرفتن متغیرهای مختلف مدل‌سازی و اعتبارسنجی، مدل را در ۱۹ حوضه رودخانه‌ای واقع در ایالات‌متحده بررسی کردند. محاسبات رگرسیونی عمدتاً توسط حداقل مربعات وزنی صورت گرفت. تجزیه‌وتحلیل رگرسیون در این مطالعه بر اساس داده‌های جریان دبی دوره آماری ۳۳ ساله رگرسیون خطی با استفاده از خصوصیات حوضه در محدوده احتمال بین ۰/۰۲ تا ۰/۹۹برآورد شد.

Mateo-Lázaro و همکاران (۲۰۱۸) به بررسی و تجزیه‌وتحلیل تداوم جریان پایه و منابع آب قابل‌دسترس بر اساس مدل‌های مخزن خطی موازی (PLR)[3] پرداختند. آزمون مدل‌ها از طریق پایش مداوم حوضه‌ای واقع در شمال شرقی اسپانیا صورت گرفت. بر همین اساس، یک روش جدیدی برای تحلیل و تفکیک اجزای جریان، بر اساس روابط پویا بین مخازن

1- Flow duration curve
2- Period of record
3- Parallel linear reservoir models

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-11-23]
[DOR: 20.1001.1.24235970.1400.9.4.5.3]

خطی وابسته به مدل‌های PLR توسعه داده شد. نتایج نشان می‌دهد که FDC و منحنی تداوم ذخیره (SDC)[1] نسبتاً قابل‌قبول بوده که امکان ارزیابی منشأ منابع آب حوضه را فراهم نموده است. در ادامه، Ksiazka و همکاران (۲۰۱۹) به بررسی قابلیت استفاده ترکیبی از روش‌های هیدرولوژیک و هیدرولیک در محاسبه جریان محیط زیستی رودخانه سیلوکای لهستان پرداختند. برای انجام تحقیق از روش‌های متداول هیدرولوژیک مانند FDC استفاده کردند. نتایج نشان داد که توسعه مجموعه پارامترهای موردنیاز با در نظر گرفتن ماهیت فصلی آن‌ها، روش را به سمت روش‌های مدل‌سازی زیستگاه تغییر می‌دهد. بااین‌حال، دامنه الزامات محیط زیستی اکوسیستم‌ها ازجمله مجموعه موجودات آبزی قبل از استفاده گسترده از روش هیدرولیک بایستی تعریف‌شده و موردتوجه قرار گیرد.

Ridolfi و همکاران (۲۰۲۰) به برآورد منحنی‌های تداوم جریان برای حوضه‌های تقریباً فاقد تجهیزات اندازه‌گیری در ایالات‌متحده امریکا پرداختند. در این پژوهش با استفاده از داده‌های بارش در حوضه‌های دیگر به‌عنوان مناطق هدف برای برآورد FDC استفاده شد. مقایسه بین FDC برآورد شده، منطقی بودن این روش را به‌ویژه برای صدک‌های متوسط نشان داده است. هم‌چنین در ترکیه Burgan و Aksoy (۲۰۲۰) بر اساس مدل‌سازی رگرسیون غیرخطی، دبی جریان حوضه‌های فاقد آمار را برآورد نمودند. با دخالت دادن داده‌های هواشناسی و توپوگرافی در رگرسیون، نتایج حاکی از تطابق مناسب داده‌های برآوردی با مشاهداتی به‌ویژه در جریان‌های با دبی متوسط و بالا بوده است. اخیراً نیز Costa و Fernand (۲۰۲۱) به مدل‌سازی منطقه‌ای منحنی‌های تداوم و جریان با استفاده از انتقال اطلاعات با روش رگرسیون چندجمله‌ای پرداختند. در این پژوهش از رگرسیون چندجمله‌ای تکاملی برای شناسایی معادلات منطقه‌ای و بررسی شاخص‌های جریان استفاده شده است. نتایج حاصل از معادلات نشان داد که این شیوه ابزاری مؤثر و قوی برای انتقال اطلاعات به سایت‌های بدون آمار می‌باشد. نتایج نشان داد که مدل‌سازی برای جریان درازمدت نسبتاً خوب ارزیابی‌شده است اما برای رژیم‌های جریان کمینه در بیشتر موارد نتایج خوب نبوده است. همچنین این مدل نشان داد که می‌تواند رژیم‌های جریان را در سال‌های معمولی و مرطوب به‌خوبی تحلیل کند اما در شرایط خشک موفق به انجام این کار نیست.

در راستای منطقه‌ای کردن FDC در ایران، حیدری‌زاده و همکاران (۱۳۸۹) به بررسی و تخمین آب‌دهی و همگن‌بندی حوضه‌های فاقد آمار شمال غرب کشور پرداختند. آن‌ها برای همگن‌بندی مناطق موردنظر از تحلیل خوشه‌ای و برای مدل‌سازی از روش تحلیل چندمتغیره استفاده کردند. نتایج نشان داد که همگن‌بندی در این مناطق برای تخمین آب‌دهی در حوضه‌های فاقد آمار در برآورد منحنی منطقه‌ای تأثیرگذار نیست، اما می‌توان آبدهی آن‌ها را با دقت مناسبی به‌دست آورد. هم‌چنین، روابط رگرسیونی به‌دست‌آمده بر مبنای میانه، از دقت بالاتری نسبت به روابط به‌دست‌آمده بر مبنای میانگین برخوردار بودند. علاوه بر این، زارع‌چاهوکی و همکاران (۱۳۹۲) در مطالعه‌ای در حوضه‌های بدون آمار مناطق خشک ایران مرکزی از میان ۱۱ متغیر مستقل فیزیوگرافی و اقلیمی چهار عامل مساحت حوضه، طول و شیب آبراهه اصلی و بارندگی متوسط سالانه به‌عنوان عوامل مهم و اختلاف ارتفاع حوضه به‌عنوان متغیر کمکی استفاده نمودند. آن‌ها برای تهیه مدل منطقه‌ای FDC، برای حوضه‌های مناسب در استان‌های یزد، مرکزی و سمنان روش رگرسیون چندمتغیره غیرخطی را به‌کار گرفتند. درنهایت، برای برازش بهترین مدل منطقه‌ای حوضه‌های بدون آمار و خشک ایران مرکزی از معیار ارزیابی متقاطع نش-ساتکلیف استفاده شد. خسروبیگی‌بزچلویی و وفاخواه (۱۳۹۳) به مطالعه و تحلیل منطقه‌ای FDC در حوضه دریاچه نمک با استفاده از روش رگرسیون چندمتغیره و ترکیب تحلیل خوشه‌ای پرداخته‌اند. نتایج نشان داد که رویکرد تحلیل منطقه‌ای با تشخیص حوضه‌های همگن باعث افزایش کارآیی و خطای کم‌تر مدل‌های منطقه‌ای می‌شود و با توجه به میزان ضریب بتا معادلات رگرسیونی، طول آبراهه اصلی مهم‌ترین پارامتر تأثیرگذار در دبی‌های تداوم جریان بوده است. در بیش‌تر شاخص‌های مستخرج از FDC، میزان ضریب کارایی کم‌تر از ۰/۸ به‌دست آمد. کاظمی و همکاران (۱۳۹۷) به مطالعه و بررسی

1- Storage duration curve

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.24235970.1400.9.4.5.3]

و تعیین عوامل مؤثر بر شکل FDC در اقلیم‌های مختلف ایران پرداختند. نتایج نشان داد که در تحلیل عاملی در مناطق مختلف اقلیمی کشور برخی از پارامترهای دسته‌بندی شده در قالب عامل اول شامل شماره منحنی، شاخص جریان پایه، تعداد روزهای بارانی در تمامی مناطق اقلیمی، مشترک است. عامل شماره منحنی در تمامی این مناطق تأثیرگذاری بیش‌تری نسبت به سایر پارامترهای موجود در عامل اول دارد.

بابایی (۱۳۹۸) به بررسی مدل‌سازی FDC و شاخص‌های جریان کمینه در حوضه‌های فاقد آمار استان اردبیل پرداختند. برای انجام این پژوهش مدل‌های منطقه‌ای FDC از طریق تحلیل رگرسیون چندمتغیره استفاده کردند. نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش نشان می‌دهد که بیش‌ترین پارامترهای تأثیرگذار بر معادلات مدل‌سازی شده FDC شامل محیط، شیب، ارتفاع و بارندگی حوضه‌هاست. میانگین میزان درست بودن معادلات بر اساس مقدار ضریب تعیین (R^2) بیش‌تر از ۰/۹۰ به‌دست‌آمده است. هم‌چنین متغیرهای بارندگی و محیط نیز رابطه مؤثر و مستقیمی با مقادیر دبی جریان در درصدهای مختلف FDC دارند. فتح‌آبادی و آنامرادی (۱۳۹۹)، به بررسی کارایی توابع مبتنی بر FDC و معیارهای ارزیابی آماری در واسنجی مدل‌های هیدرولوژی پرداختند. در این پژوهش، اقدام به اجرای مدل HBV[1] در حوضه زیارت گرگان در استان گلستان در محل ایستگاه نهارخوران شده است. نتایج نشان داد که ضرایب کارایی مانند نش-ساتکلیف (NSE)[2] و کلینگ گوپتا (KGE)[3] در برآورد داده‌های اوج و معیارهایی از قبیل میانگین قدر مطلق خطا (MAE)[4] و ریشه مربعات خطا (RMSE)[5] در برآورد داده‌های متوسط و معیارهای مبتنی بر FDC در برآورد دبی‌های کمینه عملکرد بهتری داشته است. اخیراً نیز کاظمی و قرمزچشمه (۱۴۰۰) به بررسی تأثیر خشکسالی بر FDC در حوضه کارستی کاکارضا پرداختند. در این مطالعه روابط شاخص خشکسالی با شاخص‌های FDC با استفاده از روش همبستگی بررسی و تحلیل شد. نتایج به‌دست‌آمده میزان کم تغییرات شاخص‌های FDC، نقش پدیده کارستی در تعیین شکل FDC و نیز کنترل نوسانات جریان و تأمین جریان‌های پایدار در دوره خشکسالی را نشان می‌دهد.

با توجه به پیشینه تحقیق می‌توان جمع‌بندی نمود که متداول‌ترین روش برای منطقه‌ای کردن و مدل‌سازی در هیدرولوژی رگرسیون دو یا چندمتغیره است. تحلیل رگرسیون چندمتغیره روشی مفید برای توسعه عوامل موردنظر در منطقه‌ای کردن حوضه‌های فاقد آمار است. بر همین اساس، تحقیق حاضر به‌منظور تحلیل منطقه‌ای FDC با استفاده از رگرسیون چندمتغیره غیرخطی به‌منظور تخمین دبی در حوضه‌های بدون آمار استان اردبیل انجام‌گرفته است.

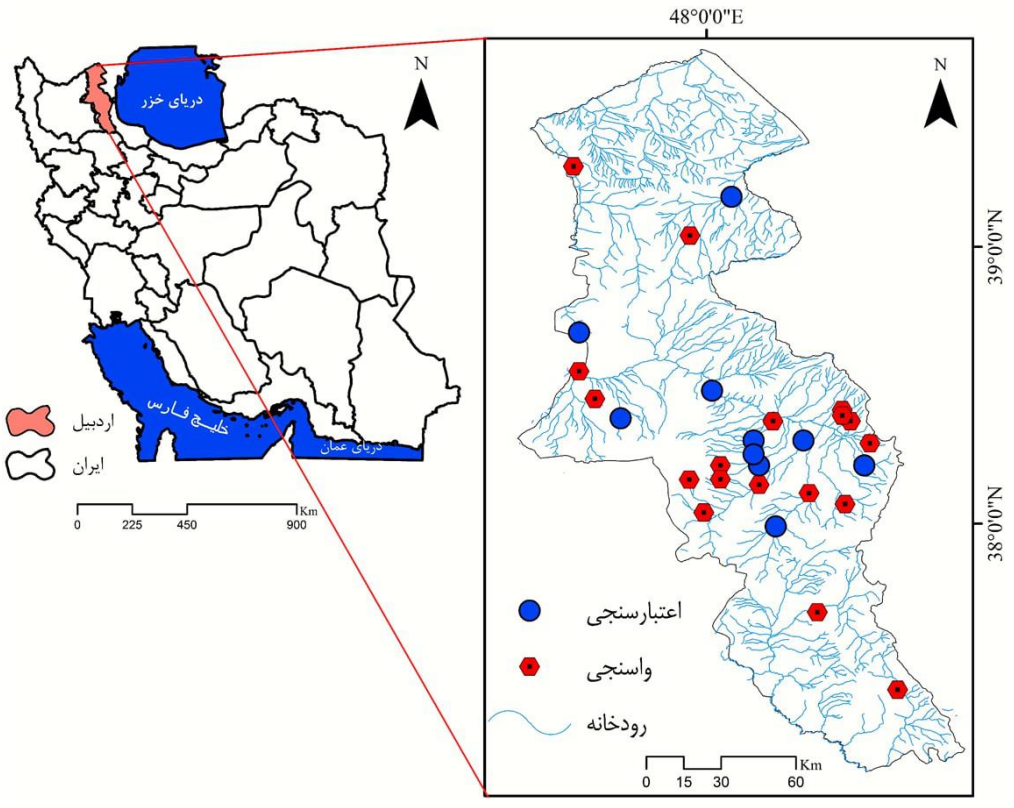
معرفی منطقه مطالعاتی

استان اردبیل در شمال غرب کشور و در بین نصف‌النهارهای ۴۷ درجه و ۱۵ دقیقه و ۴۸ درجه و ۵۶ دقیقه طول شرقی و مدارهای ۳۷ درجه و ۹ دقیقه و ۳۹ درجه و ۴۲ دقیقه عرض شمالی قرارگرفته است. مقدار نزولات جوی در این استان به‌طور متوسط بین ۲۵۰ تا ۶۰۰ میلی‌متر در سال در بخش‌های مختلف نوسان دارد. مساحت این استان ۱۷۹۵۳ کیلومترمربع (حدوداً ۱/۰۹ درصد) از مساحت کل کشور است و در محور طول جغرافیایی با گسترش یک درجه و ۳۵ دقیقه، همراه با عامل ارتفاع دشت‌ها و کوهستان‌های آن در ترکیبی هماهنگ با هم‌جواری دریای خزر بوده است. هم‌چنین، گستردگی زیاد در جهت شمالی-جنوبی در عرض جغرافیایی (۲ درجه و ۳۱ دقیقه) تنوع آب و هوایی زیادی به استان اردبیل بخشیده است. حدود دوسوم آن دارای بافت کوهستانی با اختلاف ارتفاع زیاد و بقیه را مناطق هموار و پست تشکیل می‌دهند. به‌طوری‌که شمال استان (مغان) با ارتفاع کم دارای آب‌وهوای نسبتاً گرم و مناطق مرکزی و جنوبی دارای

1- Hydrologiska Byrans Vattenavdelning
2- Nash–Sutcliffe efficiency
3- Kling Gupta efficiency
4- Mean absolute error
5- Root mean square error

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-11-23]
[DOR: 20.1001.1.24235970.1400.9.4.5.3]

آب‌وهوای کوهستانی سرد هستند (مهری و همکاران، ۱۳۹۶؛ بابایی، ۱۳۹۸). موقعیت ایستگاه‌های استان اردبیل در شکل (۱) ارائه‌شده است.



شکل (۱): موقعیت ایستگاه‌های موردبررسی در استان اردبیل، ایران

داده‌های مورداستفاده

در بسیاری از مطالعات هیدرولوژی آگاهی از میزان دبی با دوره بازگشت‌های مختلف از موارد ضروری است، این در حالی است که در اکثر موارد با فقدان و یا کمبود ایستگاه‌های هیدرومتری مواجه بوده و نیز عوامل بسیاری وجود دارند که باعث از دست رفتن آمار برخی ایستگاه‌ها می‌شوند. ازاین‌رو در تحقیق حاضر، ابتدا اقدام به جمع‌آوری، اصلاح، و آمار بارندگی و دبی در منطقه شد. سپس آمار دبی روزانه ۱۲ سال دوره آماری مشترک ایستگاه‌های هیدرومتری در ۳۰ حوضه استان اردبیل در نظر گرفته شد. ایستگاه‌ها به نحوی انتخاب شدند که در بالادست آن‌ها سد و بند انحرافی و اراضی کشاورزی، تا حد امکان وجود نداشته و نیز دارای آمار کامل در دوره آماری منتخب باشد (جدول ۱). پس از استخراج مرز حوضه‌های بالادست ایستگاه‌های منتخب، با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS مدل رقومی ارتفاع برای ۳۰ حوضه تهیه و ویژگی‌های بارش، مساحت و شیب آن‌ها استخراج شد.

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-11-23]
[DOR: 20.1001.1.24235970.1400.9.4.5.3]

جدول (۱): ویژگی‌های ایستگاه‌های هیدرومتری منتخب برای انجام پژوهش حاضر در استان اردبیل

ردیف	محدوده مطالعاتی	نام رودخانه	نام ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	مساحت حوضه بالادست (کیلومترمربع)	بارش سالانه (میلی‌متر)	شیب متوسط حوضه بالادست (درصد)
۱		بالخلوچای	پل‌الماس	۴۸-۱۱-۱۹	۴۸-۰۸-۱۶	۱۰۷۰	۳۷۰/۵۱	۱۱/۱۸
۲		قره‌سو	سامیان*	۴۸-۱۴-۴۸	۵۳-۲۲-۳۸	۴۰۰۴	۳۵۱/۵۲	۹/۲۴
۳		نیرچای	نیر	۳۸-۵۹-۴۷	۳۸-۰۲-۰۲	۲۵۶	۳۹۱/۵۷	۱۴/۱۵
۴		قره‌سو	آلادیزگه	۴۸-۳۵-۲۲	۳۸-۱۷-۰۰	۲۲	۳۳۲/۳۶	۸/۲۴
۵		نئور	نئور*	۴۸-۳۳-۴۳	۳۸-۰۰-۵۳	۴۴	۳۵۱/۱۳	۸/۷۱
۶		ویلادرق‌چای	ویلادرق*	۳۸-۱۰-۳۸	۱۹-۴۸-۰۳	۹۴	۴۲۷/۳۳	۱۱/۸۵
۷	اردبیل	شهریورچای	باروق*	۴۸-۱۰-۰۶	۳۸-۱۸-۱۷	۹۶	۳۳۶/۴۳	۱۱/۶۶
۸		یدی‌بولیک‌چای	عموقین	۴۷-۱۰-۴۰	۳۸-۱۵-۰۷	۱۱۰	۳۷۵/۴۸	۱۲/۸۸
۹		آق‌چای	شمس‌آباد	۴۸-۱۵-۱۴	۳۷-۵۹-۵۳	۱۲۸	۳۵۴/۰۸	۱۰/۳۷
۱۰		لای‌چای	لای	۴۷-۵۴-۰۳	۳۸-۰۷-۰۰	۳۶	۴۱۱/۳۱	۱۶/۲۷
۱۱		نوران‌چای	آتشگاه	۴۸-۰۳-۲۳	۳۸-۱۳-۰۵	۴۴	۳۶۷/۲۸	۱۱/۸۵
۱۲		نوران‌چای	نوران	۴۸-۱۱-۳۷	۳۸-۱۳-۵۹	۱۲۶	۳۵۱/۱۳	۸/۷۱
۱۳		قوری‌چای	کوزه‌تپراقی	۴۸-۲۲-۰۱	۳۸-۰۷-۲۸	۸۱۲.۵	۳۸۴/۹۹	۸/۸۶
۱۴		بالخلوچای	گیلانده*	۴۸-۲۱-۴۳	۳۸-۱۸-۱۶	۱۶۳۸	۳۶۴/۹۱	۱۰/۶۵
۱۵	هیر	هیرچای	هیر	۳۸-۱۰-۲۸	۳۸-۰۴-۵۵	۱۷۸	۳۷۰/۷۲	۱۴/۱۸
۱۶		نمین‌چای	نمین	۴۸-۲۹-۰۶	۳۸-۲۵-۴۵	۴۴	۳۴۵/۴۹	۱۱/۵۶
۱۷		عنبران	عنبران	۴۸-۲۹-۰۶	۳۹-۲۹-۴۰	۳۶	۳۴۲/۸۷	۹/۳۸
۱۸		نرگس‌چای	ننه‌کران	۴۸-۳۱-۳۲	۳۸-۲۲-۱۷	۴۰	۳۳۱/۱۵	۹/۵۹
۱۹	نمین	سقزچی‌چای	ایریل*	۴۸-۳۴-۳۰	۳۸-۱۳-۲۳	۸	۳۴۳/۵۹	۱۲/۹۷
۲۰		سولاچای	سولا	۴۸-۲۹-۰۴	۳۸-۲۳-۱۴	۴۴	۳۵۱/۵۲	۹/۲۴
۲۱		شاهرود	درو	۴۸-۴۱-۴۸	۳۷-۲۴-۳۸	۱۵۸	۳۳۸/۰۱	۱۱/۲۰
۲۲		فیروزآبادچای	فیروزآباد	۴۸-۱۳-۳۵	۳۷-۳۵-۰۸	۱۵۱۵	۳۵۷/۱۷	۱۳/۵۶
۲۳	خلخال	هروچای	آبگرم	۴۸-۲۴-۲۵	۳۷-۴۱-۴۵	۵۹۰	۳۴۳/۵۲	۱۲/۸۵
۲۴		قره‌سو	دوست‌بیگلو	۴۷-۳۲-۱۸	۳۸-۳۳-۰۲	۷۳۱۱	۳۴۵/۴۵	۱۴/۰۴
۲۵		قره‌سو	ارباب‌کندی*	۴۸-۰۱-۵۸	۳۸-۲۹-۴۱	۴۸۰۰	۳۵۰/۰۹	۹/۲۹
۲۶	مشگین‌شهر	خیاوچای	پل‌سلطانی*	۴۷-۴۱-۳۹	۳۸-۲۳-۵۶	۹۸	۴۴۲/۹۰	۱۹/۶۰
۲۷		دره‌رود	بوران	۴۷-۳۱-۰۸	۳۹-۱۷-۴۱	۱۳۹۷۹	۳۳۶/۴۳	۱۱/۶۶
۲۸		دره‌رود	مشیران*	۴۷-۳۲-۰۱	۳۸-۴۱-۱۰	۱۱۳۷۹	۳۰۹/۴۶	۱۷/۱۴
۲۹	مغان	برزندچای	حاج‌احمدکندی	۴۷-۵۶-۱۷	۳۹-۰۲-۱۰	۱۵۷	۳۲۳/۹۷	۱۱/۵۸
۳۰		ساریقمیش	اکبرداوود*	۴۸-۱۹-۰۵	۳۹-۱۱-۴۵	۷۱۰	۳۰۳/۲۱	۱۰/۶۸

*ایستگاه‌های مورداستفاده در اعتبارسنجی

مراحل مدل‌سازی منحنی تداوم جریان (FDC)

به‌طورکلی مبنای روش مورداستفاده در پژوهش حاضر مبتنی بر مدل‌سازی ارائه‌شده توسط Burgan و Aksoy (۲۰۲۰) بوده است. بر همین اساس، توسعه مدل با استفاده از داده‌های بارش، مساحت و شیب در هفت مرحله (شکل ۲) انجام شد که جزئیات آن به شرح زیر است:

۱- بی‌بُعدسازی: در این مرحله داده‌های متوسط هرماه دبی بر داده‌های متوسط درازمدت آن ماه طبق رابطه (۱) تقسیم‌شده است:

$$q_{ij} = \frac{Q_{ij}}{\overline{Q_o}} \quad i = ۱, ۲, \cdots, n: \quad j = ۱, ۲, \cdots, ۱۲ \qquad (۱)$$

که در آن q_{ij} دبی جریان بدون بُعد ماه j در سال i است و Q_{ij} جریان متوسط مشاهده‌شده (دارای بُعد) ماه j در سال i است.

۲- آزمون نرمال بودن داده‌ها که به چند روش قابل‌اجرا می‌باشد:

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.24235970.1400.9.4.5.3]

الف) ابتدا میانه داده‌های بدون بُعد برآورد شده و سپس داده‌های بدون بُعد بر میانه تقسیم شدند. اگر نسبت به‌دست‌آمده، برابر با ۱/۰۵-۰/۹۵ باشد نشان‌دهنده دامنه قابل‌قبول است.

ب) روش دوم با استفاده از هیستوگرام دبی‌ها یا پلات احتمال-احتمال (p-p) انجام می‌شود.

ج) آزمون کای-اسکوئر نیز برای آزمون نرمال بودن داده‌ها استفاده می‌شود.

۳- نرمال‌سازی داده‌ها:

برای نرمال کردن جریان متوسط ماهانه طبق رابطه (۲) از طریق انتخاب توان متناسب (θ) با سری داده انجام شد تا تابع توزیع احتمال طبیعی نرمال شود.

$$\mathcal{W}_{ij} = q_{ij}^{\theta}: \qquad i = ۱, ۲, n: \quad j = ۱, ۲, \cdots, ۱۲ \tag{۲}$$

$\mathcal{W}_{ij}$ جریان بدون بُعد نرمال شده ماه j در سال i است. متغیر θ با آزمون‌وخطا تعیین می‌شود و در صورت کاملاً نرمال بودن داده‌ها، θ برابر با یک است.

۴- محاسبه چارک‌های نرمال‌شده: در این مرحله ابتدا میانگین داده‌ها و سپس انحراف معیار داده‌ها را محاسبه و سپس مقادیر نرمال شده از طریق فرمول زیر برآورد شده است:

$$\mathcal{W}_{\mathcal{D}} = u_{w} + Z_{\mathcal{D}}\sigma_{\mathcal{W}} \tag{۳}$$

که در آن u_w و $\sigma_{\mathcal{W}}$ به ترتیب میانگین و انحراف معیار دبی جریان آب نرمال شده هستند و $Z_{\mathcal{D}}$ از توزیع نرمال استاندارد به‌دست‌آمده است.

۵- تبدیل معکوس داده‌های بدون بُعد: با در نظر گرفتن $\mathcal{W}_{\mathcal{D}}$ و θ به‌عنوان چارک q احتمال تجاوز D، $q_{\mathcal{D}}$، از طریق تبدیل معکوس از رابطه (۴) به‌دست می‌آید.

$$q_{\mathcal{D}} = (W_D)^{1/\theta} \tag{۴}$$

۶- محاسبه متوسط بلندمدت دبی جریان: متوسط دبی جریان آب با استفاده از رگرسیون غیرخطی طبق رابطه (۵) انجام شد. در این رابطه، A، مساحت برحسب کیلومترمربع، p، بارش سالانه به میلی‌متر و S، شیب توپوگرافی حوضه هستند. در این مطالعه، میانگین دبی جریان سالانه بلندمدت هر حوضه به‌صورت یک تابع نمایی ارائه‌شده است.

$$\bar{Q}_m = CA^{b_1}p^{b_2}S^{b_3} \tag{۵}$$

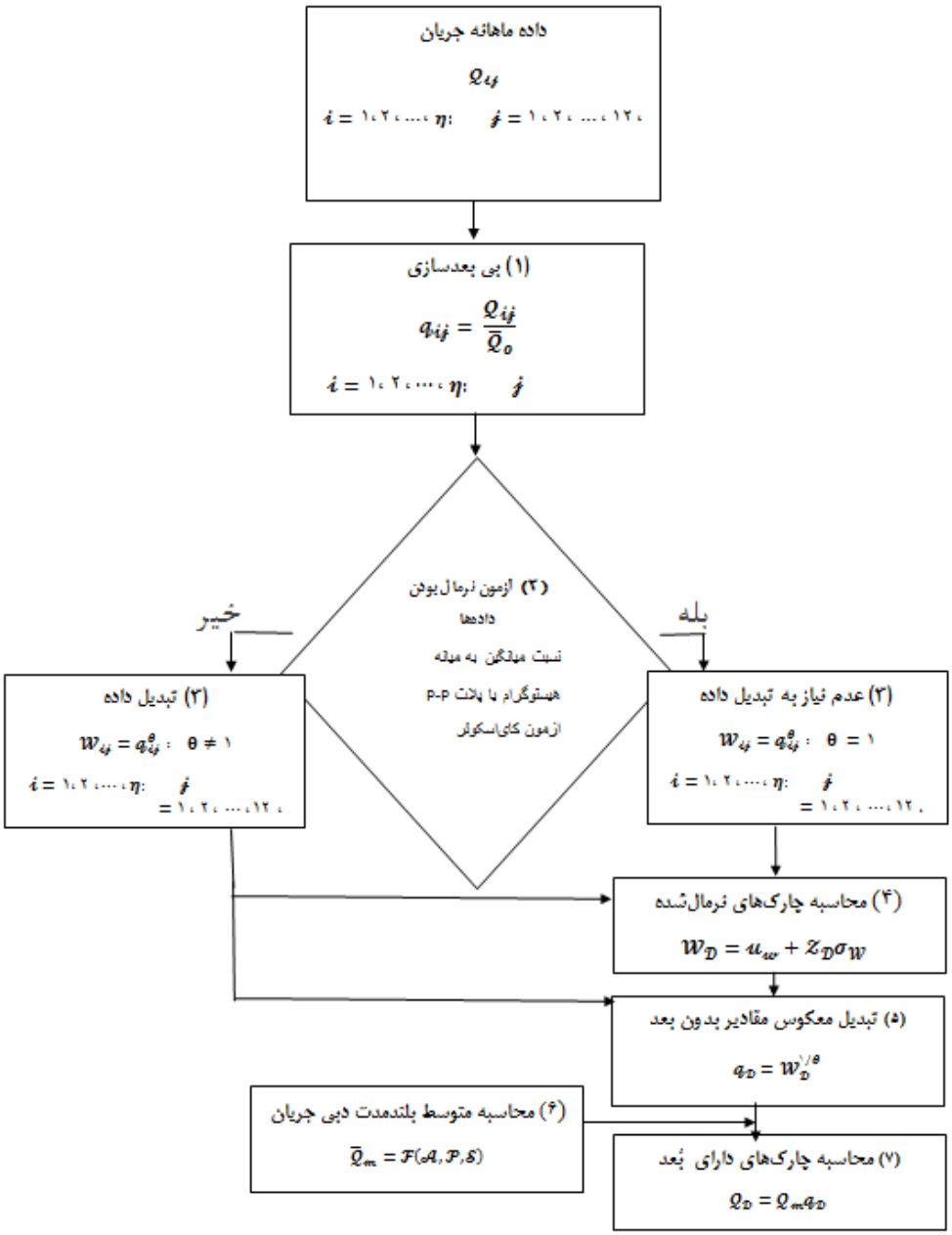
$\bar{Q}_m$ متوسط بلندمدت دبی جریان آب است و C، b_1، b_2 و b_3 پارامترهایی هستند که توسط رابطه‌های رگرسیون غیرخطی برآورد شده‌اند.

۷- محاسبه چارک‌های دارای بُعد: طبق رابطه (۶) چارک $\mathcal{Q}$ دارای بُعد با احتمال تجاوز $\mathcal{D}$، $\mathcal{Q}_{\mathcal{D}}$، را می‌توان برای هر حوضه بدون آمار تعیین کرد.

$$\mathcal{Q}_{\mathcal{D}} = \bar{Q}_m q_{\mathcal{D}} \tag{۶}$$

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.24235970.1400.9.4.5.3]



شکل (۲): مراحل مدل‌سازی غیرخطی منحنی تداوم جریان (اقتباس از Burgan & Aksoy, 2020)

رسم منحنی تداوم جریان (*FDC*) و برآورد مشخصه‌های آن

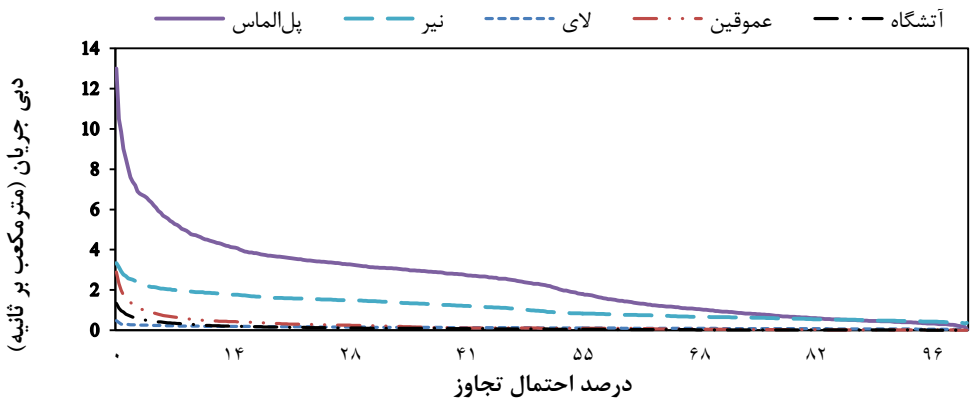
در این مطالعه با استفاده از میانگین داده‌های جریان روزانه برای هر ایستگاه در طول دوره آماری ۱۲ ساله، FDC رسم شد که برای تعدادی از ایستگاه‌ها با شرایط متفاوت در شکل (۳) نمایش داده‌شده است. پس از رسم منحنی FDC شاخص‌های موردنظر شامل Q_5 تا Q_{95} به‌عنوان شاخص‌هایی از کل طیف جریان با دبی جریان پایین و متوسط و سیلابی برآورد شدند. در این میان، Q_{90} و Q_{95} به‌عنوان شاخص‌هایی از جریان کمینه و Q_5 و Q_{10} شاخص‌هایی برای مواقع سیلابی هستند. ۱۳ شاخص مورداستفاده از FDC برای هر یک از حوضه‌ها در جدول (۲) ارائه‌شده است.

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.24235970.1400.9.4.5.3]

جدول (۲): شاخص‌های منحنی تداوم جریان در حوضه‌های مطالعاتی

شاخص / ایستگاه	Q5	Q10	Q15	Q25	Q35	Q45	Q50	Q55	Q65	Q75	Q85	Q90	Q95
آلادیزگه	۰/۷۵	۰/۴۳	۰/۲۶	۰/۱۶	۰/۱۱	۰/۰۶	۰/۰۵	۰/۰۴	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۰
ایریل	۱/۱۲	۰/۷۱	۰/۵۲	۰/۲۶	۰/۱۷	۰/۰۹	۰/۰۷	۰/۰۳	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
اکبرداوود	۰/۳۶	۰/۲۵	۰/۲۱	۰/۱۴	۰/۱۰	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۴	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۰
ارباب‌کندی	۷/۴۲	۴/۶۳	۳/۸۰	۲/۶۳	۱/۹۷	۱/۳۸	۱/۰۷	۰/۶۱	۰/۲۱	۰/۰۸	۰/۰۴	۰/۰۳	۰/۰۱
باروق	۰/۷۷	۰/۴۲	۰/۲۸	۰/۱۸	۰/۱۲	۰/۰۷	۰/۰۵	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
درود	۲/۲۸	۱/۵۹	۱/۱۷	۰/۶۹	۰/۴۴	۰/۳۳	۰/۳۰	۰/۲۶	۰/۱۹	۰/۱۵	۰/۱۱	۰/۰۸	۰/۰۶
دوست‌بیگلو	۱۴/۶۳	۱۰/۵۵	۸/۷۸	۷/۰۰	۶/۰۰	۴/۷۱	۴/۰۰	۲/۸۸	۱/۵۰	۰/۵۸	۰/۱۹	۰/۱۱	۰/۰۵
فیروز	۱۱/۷۰	۸/۶۱	۵/۹۶	۳/۰۸	۲/۰۱	۱/۶۶	۱/۵۳	۱/۳۳	۰/۸۷	۰/۴۸	۰/۲۵	۰/۱۳	۰/۰۷
گیلانده	۴/۹۱	۳/۵۰	۲/۹۵	۲/۴۰	۱/۹۵	۱/۳۱	۰/۸۴	۰/۲۶	۰/۰۴	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
هیر	۰/۷۵	۰/۵۹	۰/۵۱	۰/۳۸	۰/۲۹	۰/۲۵	۰/۲۲	۰/۲۰	۰/۱۴	۰/۱۵	۰/۱۰	۰/۰۶	۰/۰۵
کوزه‌تپراقی	۱/۹۵	۱/۰۶	۰/۶۷	۰/۳۲	۰/۱۹	۰/۱۲	۰/۰۸	۰/۰۷	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
لای	۰/۲۳	۰/۱۹	۰/۱۸	۰/۱۶	۰/۱۳	۰/۱۲	۰/۱۱	۰/۱۰	۰/۰۹	۰/۰۸	۰/۰۷	۰/۰۶	۰/۰۵
نمین	۰/۳۲	۰/۱۸	۰/۱۴	۰/۰۹	۰/۰۵	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
ننه‌کران	۰/۳۳	۰/۱۹	۰/۱۲	۰/۰۶	۰/۰۴	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
پل‌الماس	۶/۲۰	۴/۶۳	۳/۹۳	۳/۳۷	۲/۹۸	۲/۵۸	۲/۳۲	۱/۷۶	۱/۱۸	۰/۸۰	۰/۵۲	۰/۴۳	۰/۳۲
پل سلطانی	۱۸	۱۱	۱/۱۰	۰/۸۶	۰/۶۳	۰/۴۷	۰/۳۹	۰/۳۱	۰/۱۴	۰/۰۳	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
سامیان	۱۲/۲۸	۷/۶۹	۶/۰۴	۴/۲۸	۳/۵۲	۲/۶۲	۲/۰۶	۱/۰۹	۰/۳۸	۰/۱۲	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۱
شمس‌آباد	۰/۸۴	۰/۴۵	۰/۲۸	۰/۱۳	۰/۰۹	۰/۰۷	۰/۰۶	۰/۰۴	۰/۰۲	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
سولا	۰/۵۵	۰/۳۲	۰/۲۲	۰/۱۳	۰/۰۹	۰/۰۵	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
ویلادرق	۵/۶۴	۳/۴۹	۲/۸۲	۱/۹۶	۱/۵۳	۱/۱۲	۰/۸۲	۰/۴۰	۰/۰۹	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲
نیر	۲/۱۲	۱/۸۷	۱/۷۳	۱/۵۰	۱/۳۲	۱/۱۲	۰/۹۷	۰/۸۳	۰/۷۱	۰/۶۲	۰/۵۳	۰/۴۸	۰/۴۳
نوران	۰/۹۹	۰/۶۶	۰/۵۷	۰/۴۵	۰/۳۶	۰/۲۰	۰/۱۳	۰/۰۷	۰/۰۴	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱
بوران	۳۳/۲۱	۲۳/۷۰	۱۹/۷۸	۱۵/۰۴	۱۱/۹۱	۹/۵۴	۸/۶۵	۶/۵۰	۳/۰۱	۱/۰۵	۰/۲۱	۰/۱۱	۰/۰۷
نئور	۰/۵۳	۰/۴۶	۰/۳۷	۰/۱۱	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
مشیران	۲۶/۳۸	۱۹/۵۶	۱۶/۰۴	۱۲/۴۰	۱۰/۲۸	۸/۸۴	۷/۷۵	۶/۱۲	۳/۷۹	۱/۸۷	۰/۶۲	۰/۳۶	۰/۲۳
عنبران	۰/۳۶	۰/۱۸	۰/۰۸	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
آبگرم	۶/۷۲	۵/۱۹	۴/۱۵	۲/۷۵	۲/۷۵	۲/۰۱	۳/۰۶	۱/۱۳	۰/۹۰	۰/۵۵	۰/۲۲	۰/۲۰	۰/۱۳
آتشگاه	۰/۴۷	۰/۲۶	۰/۱۸	۰/۱۳	۰/۱۰	۰/۰۷	۰/۰۶	۰/۰۴	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱
عموقین	۰/۷۴	۰/۴۴	۰/۳۳	۰/۲۲	۰/۱۴	۰/۰۷	۰/۰۴	۰/۰۲	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
احمدکندی	۰/۳۴	۰/۲۹	۰/۲۷	۰/۲۲	۰/۱۱	۰/۰۸	۰/۰۶	۰/۰۵	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۰



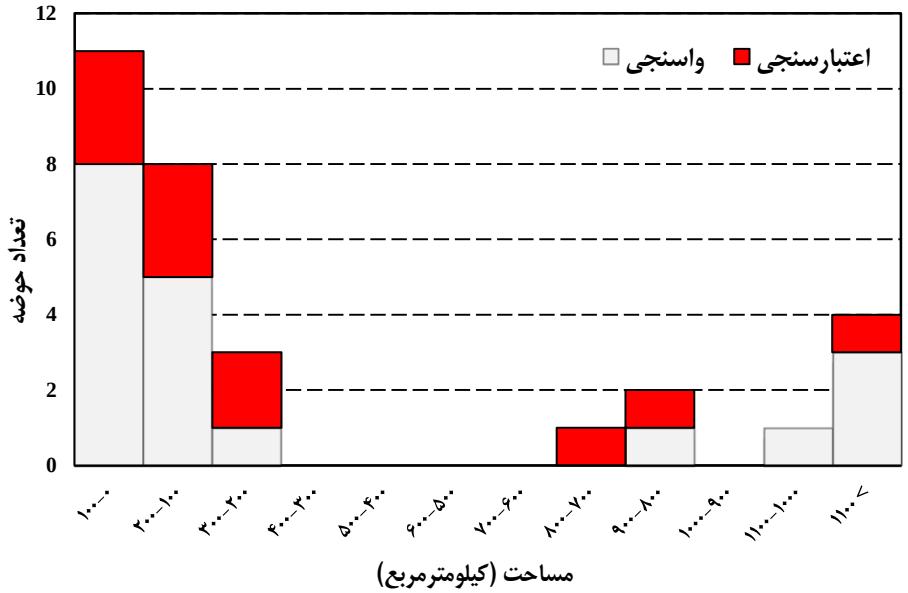
شکل (۳): منحنی‌های تداوم جریان روزانه تعدادی از ایستگاه‌های هیدرومتری موردمطالعه

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.24235970.1400.9.4.5.3]

دسته‌بندی حوضه‌ها برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل

انتخاب حوضه‌ها برای اعتبارسنجی مدل به‌وسیله دسته‌بندی داده‌ها بر اساس مقادیر دبی و مساحت انجام شد. به‌نحوی‌که از داده‌های ایستگاه‌های مختلف با مقادیر دبی کم، متوسط و زیاد برای ارزیابی اعتبار روابط رگرسیونی و واسنجی مدل استفاده شد. در شکل (۴) نمایی از تفکیک ایستگاه‌ها برحسب مساحت نشان داده‌شده است.



شکل (۴): ایستگاه‌های منتخب برای واسنجی و اعتبارسنجی بر اساس مساحت

شاخص‌های ارزیابی خطا

برای ارزیابی خطا و صحت مدل‌های برآورد شده طبق جدول (۳)، سه شاخص موردمحاسبه قرار گرفت. هر چه مقدار عددی آماره‌های MAE، RMSE و خطای میانگین (ME) به عدد صفر نزدیک‌تر باشد، بهتر بوده و به معنی آن است که مدل برآورد شده کارایی بالایی دارد (رضائی و همکاران، ۱۳۹۶، Burgan & Aksoy, 2020).

جدول (۳): شاخص‌های برآورد صحت مدل

نام فارسی	نام انگلیسی (اختصار)	دامنه تغییرات	رابطه	شماره رابطه
میانگین قدر مطلق خطا	Mean Absolute Error (MAE)	$0 \leq MAE \leq \infty$	$MAE = \frac{\sum\|Q_o - Q_m\|}{N}$	(۷)
ریشه مربعات خطا	Root Mean Square Error (RMSE)	$0 \leq RMSE \leq \infty$	$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(Q_o - Q_m)^2}{N}}$	(۸)
خطای میانگین	Mean Error (ME)	$-\infty \leq ME \leq \infty$	$ME = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(Q_o - Q_m)$	(۹)

نتایج

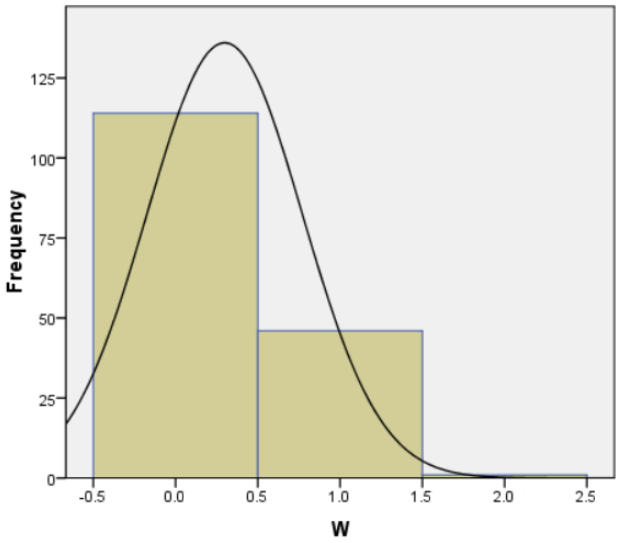
منحنی تداوم جریان (FDC) با استفاده از داده‌های بارش، مساحت و شیب به روش رگرسیون غیرخطی برای حوضه‌های استان اردبیل مدل‌سازی شده است. جزئیات نتایج مدل‌سازی برای ایستگاه آلادیزگه به‌عنوان نمونه ارائه‌شده است (جدول ۴).

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-11-23]
[DOR: 20.1001.1.24235970.1400.9.4.5.3]

جدول (۴): داده‌های ماهانه با بعد (مترمکعب بر ثانیه) و بدون بعد دبی جریان ایستگاه آلادیزگه

سال	ماه	داده‌های ماهانه (Q)	داده‌های ماهانه بدون بعد (q)
۱۳۸۰	۱	۰/۳۷	۱/۴۸
۱۳۸۰	۲	۰/۲۱۸	۰/۶۹
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
۱۳۹۲	۱۲	۰/۰۰۲	۰/۰۰۸

بر اساس نتایج حاصل از نرمال‌سازی با آزمون‌وخطا، میزان θ با مقدار ۰/۳۰۹ بهترین شرایط را برای نرمال کردن داده‌ها به وجود آورده است. شکل (۵) هیستوگرام داده‌ها را در مراحل قبل و پس از نرمال‌سازی نشان می‌دهد. در جدول (۵)، داده‌های جریان ماهانه بدون بعد برای ایستگاه آلادیزگه به‌عنوان نمونه آورده شده است.



شکل (۵): هیستوگرام توزیع نرمال داده‌های دبی جریان ایستگاه آلادیزگه قبل (راست) و پس (چپ) از نرمال‌سازی

جدول (۵): نتایج حاصل از نرمال‌سازی داده‌های ماهانه دبی جریان ایستگاه آلادیزگه

سال	ماه	داده‌های ماهانه بدون بعد (q)	W
۱۳۸۰	۱	۵۵	۱/۱۳
۱۳۸۰	۲	۶۰	۰/۸۹
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
۱۳۹۲	۱۲		۰/۴۷

متغیر نرمال استاندارد برای احتمالات مختلف D در جدول (۶) ارائه‌شده است. با توجه به این‌که میانگین و انحراف معیار در دسترس هستند، دبی جریان برای هر احتمال D به‌دست‌آمده است. بر همین اساس، نتایج محاسبه دبی بدون بعد با چارک d (qd) بدون بعد در جدول (۷) نشان داده‌شده است.

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-11-23]
[DOR: 20.1001.1.24235970.1400.9.4.5.3]

جدول (۶): محاسبه کمیت‌های معمولی

W_D	Z_D	D%	W_D	Z_D	D%
۰/۹۱	-۰/۱۳	۵۵	۱/۲۰	۱/۶۴	۵
۰/۸۹	-۰/۲۵	۶۰	۱/۵	۱/۲۸	۱۰
۰/۸۷	-۰/۳۹	۶۵	۱/۱۰	۱/۰۴	۱۵
۰/۸۵	-۰/۵۲	۷۰	۱/۰۷	۰/۸۴	۲۰
۰/۸۲	-۰/۶۷	۷۵	۱/۰۵	۰/۶۷	۲۵
۰/۸۰	-۰/۸۴	۸۰	۱/۰۲	۰/۵۲	۳۰
۰/۷۶	-۱/۰۴	۸۵	۱/۰۰	۰/۳۹	۳۵
۰/۷۲	-۱/۲۸	۹۰	۰/۹۸	۰/۲۵	۴۰
۰/۶۶	-۱/۶۴	۹۵	۰/۹۶	۰/۱۳	۴۵
-	-	-	۰/۹۳	۰/۰۰	۵۰

جدول (۷): محاسبه q_D منحنی تداوم جریان بدون بعد (FDC) برای ایستگاه آلادیزگه

q_D	D%	q_D	D%
۰/۴۷	۵۵	۲/۹۵	۵
۰/۴۲	۶۰	۲/۱۸	۱۰
۰/۳۲	۶۵	۱/۷۵	۱۵
۰/۲۵	۷۰	۱/۴۵	۲۰
۰/۱۹	۷۵	۱/۲۳	۲۵
۰/۱۴	۸۰	۱/۰۴	۳۰
۰/۰۹	۸۵	۰/۸۹	۳۵
۰/۵	۹۰	۰/۷۶	۴۰
۰/۰۱۵	۹۵	۰/۶۵	۴۵
-	-	۰/۵۵	۵۰

با به‌دست آوردن نتایج ارائه‌شده برای ایستگاه آلادیزگه برای سایر ایستگاه‌های موردمطالعه، نسبت به ورود داده‌های نهایی حاصل از مدل‌سازی اولیه و نیز متغیرهای بارش، مساحت و شیب نسبت به برقراری روابط رگرسیون غیرخطی اقدام شد. بر همین اساس، معادلات جدول (۸) برای محاسبه میانگین دبی جریان ایستگاه‌های استان اردبیل به‌دست‌آمده است.

جدول (۸): روابط به‌دست‌آمده از رگرسیون غیرخطی برای برآورد شاخص‌های منحنی تداوم جریان (FDC)

شماره رابطه	رابطه	R^2
۱۰	$Q = 0.033A^{0.589}$	۰/۷۱۲
۱۱	$Q = 0.004A^{0.595} + P^{0.347}$	۰/۷۱۲
۱۲	$Q = 0.001(AP)^{0.600}$	۰/۷۲۳
۱۳	$Q = 0.005A^{0.559} * S^{0.844}$	۰/۷۸۶
۱۴	$Q = 0.00002385(AP)^{0.571}S^{0.845}$	۰/۷۸۹

در محاسبه میانگین جریان در مرحله واسنجی، رابطه (۱۴) به دلیل مشارکت هر سه متغیر مورداستفاده در مدل‌سازی و هم‌چنین بر اساس ضریب تعیین (R^2) و ریشه مربعات خطا (RMSE) بهترین رابطه در نظر گرفته شد. رابطه (۱۰) بر اساس میانگین خطای مطلق (MAE) بهترین عملکرد را نشان داد (جدول ۹). بااین‌حال، برای مرحله اعتبارسنجی، رابطه (۱۲)

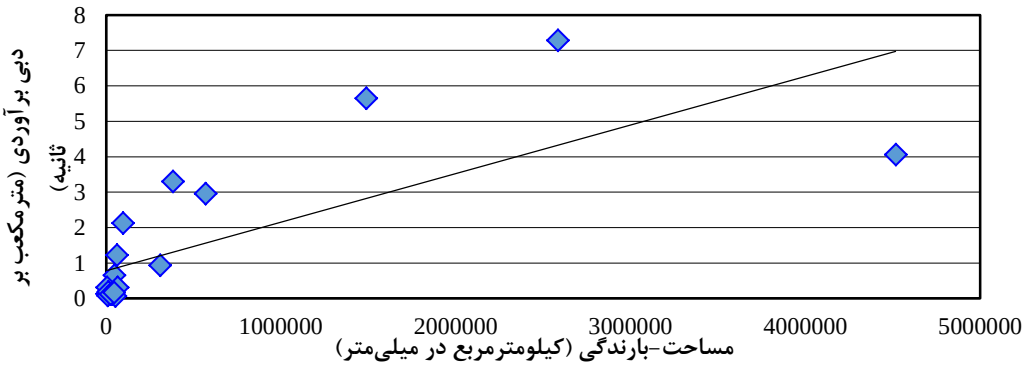
[Downloaded from jircsa.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.24235970.1400.9.4.5.3]

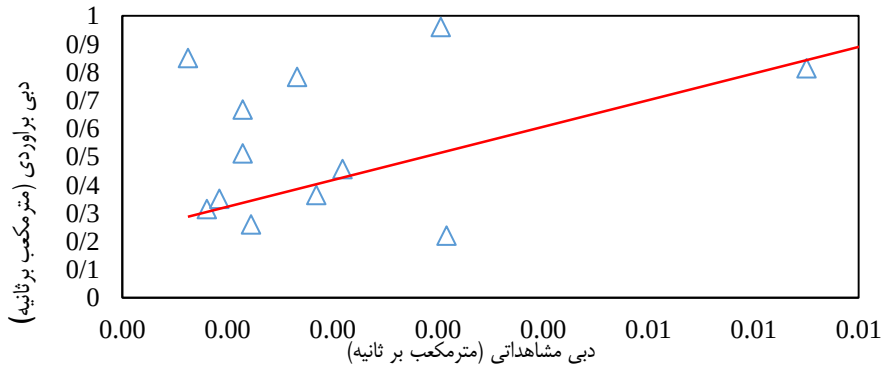
باوجود معیارهای کم عملکرد بهتری نسبت به بقیه داشت. از طرفی، به دلیل این‌که تفاوت چشم‌گیری در نتایج کلی ایجاد نمی‌کرد به‌عنوان مدل اصلی در نظر گرفته نشد، در عوض ساده‌ترین رابطه رگرسیونی ازنظر پارامتر سازی در بازتولید میانگین دبی جریان، رابطه (۱۰) است که می‌تواند موفق عمل کند ولی به دلیل در نظر گرفتن تنها یک متغیر در اولویت قرار نگرفت. رابطه (۱۴) به دلیل ساختار پایدار آن ازنظر پارامترها و تعداد ورودی‌های بیش‌تر در این مطالعه ترجیح داده شد. رابطه میان دبی متوسط جریان و مساحت حوضه-بارندگی در سطح کل ایستگاه‌های موردمطالعه در شکل (۶) نشان داده‌شده است. هم‌چنین، منحنی برازش شده بر اساس رابطه (۱۴) برای جریان‌های محاسبه‌شده در ایستگاه الادیزگه به‌عنوان نمونه مشاهده‌ای در شکل (۷) ترسیم‌شده است. از طرف دیگر بیش‌ترین R^2 مربوط به رابطه (۱۰) و کم‌ترین آن مربوط به رابطه (۱۴) بود. ازلحاظ RMSE بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار به ترتیب برای رابطه‌های (۱۲) و (۱۰) به‌دست‌آمده آمد.

جدول (۹): شاخص‌های ارزیابی خطا محاسبه‌شده برای میانگین دبی جریان تخمینی (مترمکعب بر ثانیه)

شاخص‌های ارزیابی	شماره رابطه				
خطا	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴
R^2	۰/۸۱۲	۰/۸۰	۰/۷۸۵	۰/۷۸۳	۰/۷۸۸
MAE	۰/۰۱۶	۰/۰۲۱	۰/۰۱۸	۰/۰۲۳	۰/۰۲۱
ME	۲/۵۵	۰/۴۷	۱/۴۲	۲/۵۵	۲/۵۵
RMSE	۰/۹۴	۱/۴۸	۱/۵۴	۱/۲۸	۱/۳۰



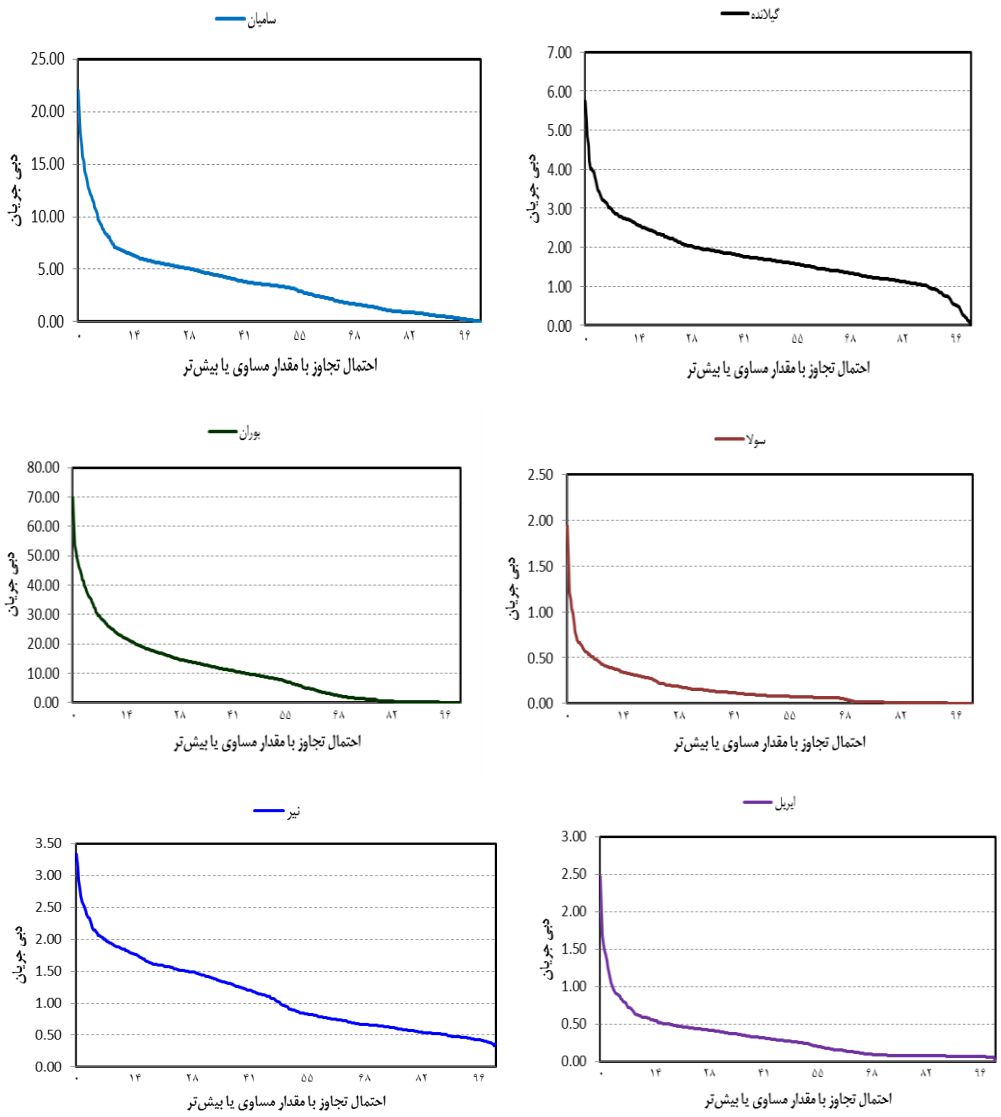
شکل (۶): رابطه میان دبی متوسط جریان و مساحت حوضه-بارندگی (رابطه ۱۴)



شکل (۷): رابطه مقدار مشاهده‌شده و برآورد شده دبی متوسط برای ایستگاه آلادیزگه

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-11-23]
[DOR: 20.1001.1.24235970.1400.9.4.5.3]

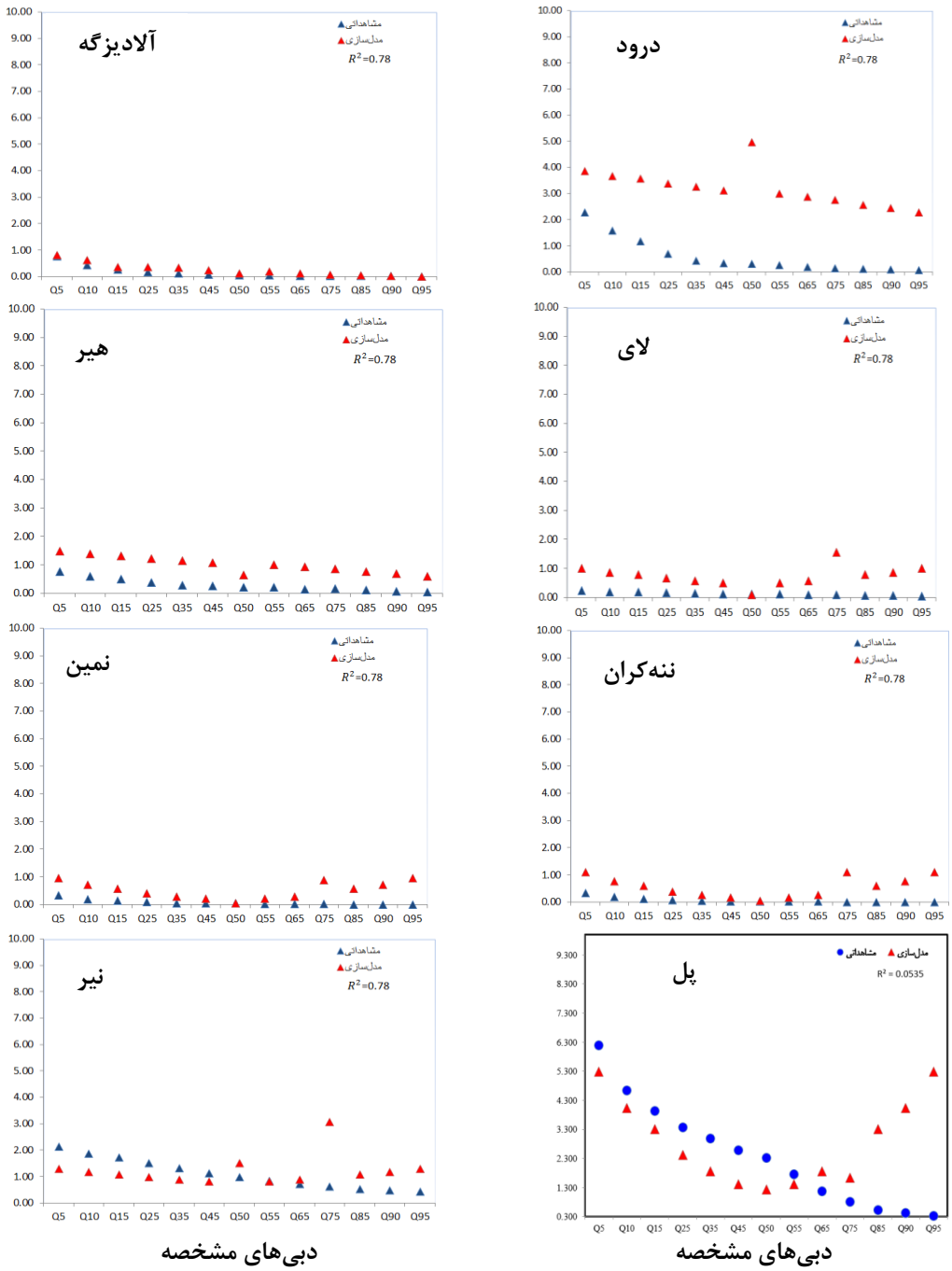
(و) نتایج حاصل از محاسبه شاخص‌های FDC برای برخی از ایستگاه‌ها در شکل (۸) نشان داده‌شده است.



شکل (۸): منحنی‌های تداوم جریان روزانه تعدادی از ایستگاه‌های موردمطالعه

منحنی‌های تداوم جریان روزانه تعدادی از ایستگاه‌های موردمطالعه در شکل (۸) برای نمایش وضعیت تداوم جریان در رودخانه‌های استان اردبیل آورده شده است. ازلحاظ تئوری اگر R^2 برابر یک شود، تمامی مقادیر مشاهده‌شده با مقادیر برازش شده یکسان خواهند بود و همه نقاط داده‌ها بر خط برازش شده قرار خواهند گرفت. برای مقادیر دیگر شاخص‌ها هم تقریباً مقادیر برازش شده نسبت به خط برازش فاصله کم‌تری دارند. هم‌چنین برای ارزیابی صحت و توانایی پیش‌بینی مدل، نمودارهای مقایسه‌ای برای مقادیر مختلف شاخص‌های استخراج‌شده از منحنی تداوم جریان برای چند ایستگاه به‌عنوان نمونه رسم شد که در شکل (۹) نمایش داده‌شده است.

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-11-23]
[DOR: 20.1001.1.24235970.1400.9.4.5.3]



شکل (۹): تغییرات مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی تعدادی از ایستگاه‌های موردمطالعه

بحث و نتیجه‌گیری

در این مطالعه، کاربرد مدل‌سازی منحنی تداوم جریان (FDC) در ۳۰ حوضه استان اردبیل موردبررسی قرار گرفت و مدل‌های ماهانه FDC به‌صورت پنج رابطه رگرسیونی ارائه شد. در تحقیقات مختلف در رابطه با تحلیل منطقه‌ای FDC، در بیش‌تر موارد از ویژگی‌های فیزیوگرافی، زمین‌شناسی و اقلیمی حوضه استفاده‌شده است (Claps & Fiorentino, 1997؛

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-11-23]
[DOR: 20.1001.1.24235970.1400.9.4.5.3]

Castellarin et al., 2004). در این تحقیق نیز برای انجام مدل‌سازی از داده‌های جریان ماهانه نرمال شده استفاده شد که دارای رابطه رگرسیون تجربی با متغیرهای بارش، مساحت و شیب برای محاسبه میانگین دبی جریان هستند. این نتیجه با زارع‌چاهوکی و همکاران (۱۳۹۲) که در مطالعه خود در حوضه‌های بدون آمار مناطق خشک ایران مرکزی از میان ۱۱ متغیر مستقل فیزیوگرافی و اقلیمی، چهار عامل مساحت حوضه، طول و شیب آبراهه اصلی و بارندگی متوسط سالانه را به‌عنوان عوامل مهم و اختلاف ارتفاع حوضه را به‌عنوان متغیر کمکی مؤثر معرفی کردند، همخوانی دارد. هم‌چنین بابایی (۱۳۹۸) در بررسی مدل‌سازی FDC و شاخص‌های جریان کمینه در حوضه‌های فاقد آمار استان اردبیل محیط، شیب، ارتفاع، و بارندگی را به‌عنوان پارامتر تأثیرگذار گزارش کردند و متوسط R^2، ۰/۸ را برای مدل‌های برآوردی ارائه کردند که نزدیک به میزان همبستگی به‌دست‌آمده در پژوهش حاضر (۰/۸-۰/۷) می‌باشد. در پژوهش صورت گرفته توسط Ridolfi و همکاران (۲۰۲۰) که با استفاده از داده‌های بارش به برآورد منحنی تداوم جریان در حوضه‌های دیگر پرداخته‌شده است. مقایسه بین FDC برآورد شده، منطقی بودن این روش را به‌ویژه برای صدک‌های متوسط نشان داده است که با نتایج حاکی از مدل انتخابی پیشنهادشده برای حوضه‌های استان در ایستگاه‌ها مانند لای، هیر، ننه‌کران، پل الماس، بخش‌های میانی منحنی (با احتمال ۴۵ تا ۶۵) به‌خوبی مدل‌سازی شده و هم‌خوانی دارد اما در مقادیر پایین منحنی‌ها میزان جریان مقداری بیش‌تر از مقدار واقعی تخمین زده شده است. این امر در ایستگاه‌های موردبررسی با مقادیر کم جریان بیش‌تر نمایان بود، که این انحراف قابل‌چشم‌پوشی است و در ایستگاه‌های هیر، درود، دوست‌بیگلو و نمین تقریباً تمام احتمالات موردبررسی به‌خوبی مدل‌سازی شده و رضایت‌بخش هستند. تقریباً معیارهای ارزیابی عملکرد مدل به‌جز در تعدادی از ایستگاه‌ها (ایریل، سولا و گیلانده) قابل‌قبول به‌دست آمدند. اگرچه در برخی از ایستگاه‌های موردبررسی عملکرد پایینی دارد، به‌ویژه این مورد هنگامی مشاهده می‌شود که ایستگاه اندازه‌گیری ازنظر رفتار هیدرولوژیک از حالت نرمال حوضه منحرف‌شده باشد. بنابراین پیشنهاد می‌شود که علاوه بر استفاده از روش آزمون شده در این پژوهش از سایر روش‌های مدل‌سازی مانند شبکه عصبی مصنوعی، FDC بی‌بعد-مساحت و FDC بی‌بعد-دبی استفاده شود.

منابع

۱. بابایی، ل. (۱۳۹۸) مدل‌سازی منحنی تداوم جریان و شاخص‌های جریان کمینه در حوضه‌های فاقد آمار استان اردبیل. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، ۱۱۵ ص.

۲. حسینی، ا.، م. گلابی، ص. معروفی، ن. خالدیان و م. سلطانی (۱۳۹۸) ارزیابی مدل شبکه عصبی توسعه‌یافته با فیلترکالمن و برنامه‌ریزی بیان ژن در مدل‌سازی بارش. مهندسی و مدیریت آبخیز، ۱۲(۳): ۷۷۱-۷۸۴.

۳. خسروبیگی بزچلویی، س. و م. وفاخواه (۱۳۹۳) تحلیل منطقه‌ای منحنی تداوم جریان در حوزه آبخیز دریاچه نمک، پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز، ۷(۱۴): ۲۲۸-۲۳۶.

۴. زارع چاهوکی، ا.، ع. سلاجقه، م. مهدوی، و ش. خلیقی سیگارودی و س. اسدی (۱۳۹۲) مدل منطقه‌ای منحنی تداوم جریان حوضه‌های بدون آمار مناطق خشک (مطالعهٔ موردی: ایران مرکزی). مرتع و آبخیزداری، ۶۶(۲): ۲۵۱-۲۶۵.

۵. رضائی، ل.، س.ع.ا. موسوی، . دواتگر و م. شعبانپور شهرستانی (۱۳۹۶) مقایسه مدل‌های مختلف منحنی مشخصه آب خاک در ارزیابی شاخص کیفیت خاک‌های شالیزاری. پژوهش‌های خاک، ۳۱(۴)، ۵۰۹-۵۲۳.

۶. فتح‌آبادی، ا. و و. آنامرادی (۱۳۹۹) بررسی کارایی توابع هدف مبتنی بر منحنی تداوم جریان و معیارهای ارزیابی آماری در واسنجی مدل‌های هیدرولوژیک. مهندسی و مدیریت آبخیز، ۱۳(۳): ۵۴۸-۵۶۲.

۷. کاظمی، ر. و ب. قرمزچشمه (۱۴۰۰) بررسی تأثیر خشکسالی بر منحنی تداوم جریان در آبخیزهای کارستی (مطالعه موردی؛ آبخیز کاکارضا). محیط زیست و مهندسی آب، ۷(۳): ۴۳۳-۴۴۳.

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-11-23]
[DOR: 20.1001.1.24235970.1400.9.4.5.3]

۸. کاظمی، ر.، ج. پرهمت و ف. شریفی (۱۳۹۷) بررسی و ارائه روابط منطقه‌های شاخص‌های منحنی تداوم جریان، در مناطق نیمه‌خشک. مهندسی و مدیریت آبخیز، ۱۱(۳): ۶۷۶-۶۹۰.

۹. حیدری‌زاده، م.، ه. رحمتی، ج. پرهمت، ف. شریفی و پ. دانشکاراهسته (۱۳۸۹) تخمین آبدهی و همگن‌بندی حوضه‌های آبخیز فاقد آمار شمال غرب کشور با استفاده از منحنی رشد منطقه‌ای در مناطق نیمه‌خشک. مهندسی آبیاری و آب، ۱(۱): ۴۵-۵۶.

۱۰. مهدوی، م. (۱۳۹۵) هیدرولوژی کاربردی (جلد اول)، انتشارات دانشگاه تهران. نوبت چاپ ۱۱. ۳۴۲ ص.

۱۱. مهری، س.، ر. مصطفی‌زاده، ا. اسمعلی‌عوری و ا. قربانی (۱۳۹۶) تغییرات زمانی و مکانی جریان پایه در رودخانه‌های استان اردبیل. فیزیک زمین و فضا، ۴۳(۳): ۶۲۳-۶۳۴.

12. Burgan H.I. and Aksoy H. *(2020). Monthly flow duration curve model for ungauged river basins*. Water, *12(2), 338.*
13. Costa V. and Fernandes W. *(2021). Regional modeling of long-term and annual flow duration curves: reliability for information transfer with evolutionary polynomial regression*. Journal of Hydrologic Engineering, *26(2): 04020067*.
14. Castellarin A., Vogel R. and Brath M. *(2004). Stochastic index flow model of flow duration curves*. Water Resource Research, *40: W03104.*
15. Claps P. and Fiorentino M. *(1997). Probabilistic flow duration curves for use in environmental planning and management*. Natural Hazards and Earth System, In: Harmancioglu N.B., Alpaslan M.N., Ozkul S.D., Singh V.P. (eds) Integrated Approach to Environmental Data Management Systems. NATO ASI Series (Series: 2: Environment), Springer, Dordrecht. *255-266.*
16. Książek L., Woś A., Florek J., Wyrębek M., Młyński D. and Wałęga A. *(2019). Combined use of the hydraulic and hydrological methods to calculate the environmental flow: Wisloka river, Poland: case study*. Environmental Monitoring and Assessment, *191(4): 254.*
17. Mateo-Lázaro J., Castillo-Mateo J., Sánchez-Navarro J. Á., Fuertes-Rodríguez V., García-Gil A. and Edo-Romero V. *(2018). New analysis method for continuous base-flow and availability of water resources based on parallel linear reservoir models*. Water, *10(4): 465.*
18. Ridolfi E., Kumar H. and Bárdossy, A. *(2020). A methodology to estimate flow duration curves at partially ungauged basins*. Hydrology and Earth System Sciences, *24(4): 2043-2060.*
19. Smakhtin V.U. *(2001). Low flow hydrology: A review*. Journal of Hydrology, *240: 147-186.*
20. Over T. M., Farmer W. H. and Russell A. M. (*2018*). *Refinement of a regression-based method for prediction of flow-duration curves of daily streamflow in the conterminous United States*. Scientific Investigations Report 2018-5072, US Geological Survey, *44 p*.
21. Verma R.K., Murthy S., Verma S. and Mishra S.K. *(2017). Design flow duration curves for environmental flows estimation in Damodar River Basin, India*. Applied Water Science, *7(3): 1283-1293.*

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-11-23]
[DOR: 20.1001.1.24235970.1400.9.4.5.3]

Modeling of monthly flow duration curve using nonlinear regression method for un-gauged watersheds of Ardabil Province

Leyla Babaei[1], Mohammad Hossein Jalili[2], Zeinab Aminzadeh[2], Freidoon Soleimani[3], Zeinab Hazbavi[*4]

1. Ph.D. Student Watershed Management Science and Engineering, Faculty of Natural Resources, Urmia University, Urmia, Iran.
2. B.Sc. Student, Department of Range and Watershed Management, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.
3. Assistant Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Department, Khuzestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Ahvaz, Iran.
4. Assistant Professor, Department of Range and Watershed Management, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Water Management Research Center, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

Received: 2021/12
Accepted: 2022/04

Abstract

The flow duration curve (FDC) represents the frequency distribution of water flow over a period of time, which is widely used in hydrology to evaluate different ranges of river water flow applications. Therefore, it is necessary to develop a suitable estimation model and method in un-gauged watersheds. To this end, in the present study, a modeling method based on nonlinear regression, for the preparation of FDC based on water flow (Q) and precipitation (P) data in the statistical period 2002-2013, area (A) and mean slope (S) of upland watersheds of 30 stations of Ardabil Province were used. For nonlinear regression analysis, about 70 and 30% of the stations were considered for calibration and validation, respectively. The development of the FDC estimation model involved several steps, including nondimensionalization of flow data, normalization, definition of the parameters of nonlinear regression equations, and calculation of required quartiles. According to the results, after testing different equations, the equation $Q = 0.00002385(AP)^{0.571}S^{0.845}$ considering all input variables with a coefficient of determination (R^2) 0.78 and mean absolute error (MAE) 0.021, was introduced as the final equation for FDC modeling in watersheds without statistics.

Keywords: Nondimensionalization, River flow regime, Water resources management, Regional modeling.

*Corresponding Author Email:z.hazbavi@uma.ac.ir

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.24235970.1400.9.4.5.3]