Archive of SID

مجله پژوهش آب ایران
جلد ۹/ شماره ۳/ پیاپی ۱۸/ پاییز ۱۳۹۴ (۲۷-۳۵)

تحلیل منطقه‌ای منحنی تداوم جریان برای زیرحوضه‌های فاقد آمار (مطالعه موردی: حوضه آبخیز دریاچه نمک)

یاسر شهنواز[1*]، سید فرهاد موسوی[2]، آرش ملکیان[3]، جعفر دستورانی[4] و مسعود سمیعی[5]

چکیده

منحنی تداوم جریان روزانه کاربرد زیادی در پروژه‌های منابع آب مانند طرح‌های برقابی، مدیریت آلودگی رودخانه‌ها، رسوب‌گذاری مخازن و فرسایش دارد. عدم وجود این اطلاعات در حوضه‌های فاقد آمار چالشی اساسی در مسائل هیدرولوژی است. پس، هیدرولوژیست‌ها تلاش کرده‌اند به این چالش با گسترش ابزارهایی مانند تحلیل منطقه‌ای مطالعات پاسخ دهند. در این راستا، این پژوهش به بررسی معادلات رگرسیونی به‌عنوان رویکرد پارامتریک در ترسیم منحنی تداوم جریان زیرحوضه‌های فاقد آمار می‌پردازد. از این‌رو، ۱۸ ایستگاه هیدرومتری مناسب در حوضه آبخیز دریاچه نمک انتخاب شد. سپس مقادیر دبی‌های شاخص منحنی تداوم جریان (Q_{10}، Q_{20}، و ... Q_{95}) درنظر گرفته شد. در ادامه، معادلات رگرسیونی بین مقادیر این دبی‌ها با متغیرهای فیزیوگرافی، اقلیمی و کاربری اراضی به روش گام به گام به دست آمد. برای ارزیابی مدل رگرسیونی به دست آمده، آماره‌های رگرسیون بررسی شدند. مقدار معیار نش- ساتکلیف این معادلات نیز محاسبه شد. نتایج حاصل نشان داد که از بین متغیرهای مورد بررسی، طول آبراهه اصلی، مساحت، متوسط بارندگی سالانه و شیب حوضه بیشترین نقش را در تغییرات جریان رودخانه دارند و با توجه به معنی‌داری معادلات در سطح ۹۵٪، از معادلات رگرسیونی می‌توان در ترسیم منحنی‌های تداوم جریان زیرحوضه‌های فاقد آمار استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: دبی‌های شاخص، دریاچه نمک، زیرحوضه فاقد آمار، معادلات رگرسیونی، معیار نش- ساتکلیف، منحنی تداوم جریان.

ارجاع: شهنواز ی. موسوی س. ف. ملکیان آ. دستورانی ج. و سمیعی م. ۱۳۹۴. تحلیل منطقه‌ای منحنی تداوم جریان برای زیرحوضه‌های فاقد آمار (مطالعه موردی: حوضه آبخیز دریاچه نمک). مجله پژوهش آب ایران. ۱۸: ۲۷-۳۵.

۱- کارشناسی ارشد بیابان‌زدایی، دانشکده کویرشناسی، دانشگاه سمنان.
۲- استاد وابسته دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان.
۳- دانشیار دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران.
۴- استادیار دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه سمنان.
۵- کارشناسی ارشد اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان فارس.
* نویسنده مسئول: Y_shahnavazi@yahoo.com
تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۱۰/۰۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۰۷/۰۹

www.SID.ir

Archive of SID

مقدمه

منحنی تداوم جریان (FDC)[1]، درصد زمانی که جریان روزانه یا ماهانه رودخانه در یک دوره تاریخی برای یک حوضه از مقدار معینی تجاوز می‌کند را ارائه می‌دهد. منحنی‌های تداوم جریان به طور گسترده با هیدرولوژیست‌های سراسر دنیا در کاربردهای متنوع مرتبط با آب مانند طرح‌های برقابی، طراحی سیستم‌های آبیاری، مدیریت آلودگی رودخانه‌ها، رسوب‌گذاری مخازن و فرسایش استفاده می‌شوند (کاستلارین و همکاران، ۲۰۰۴). گرچه منحنی تداوم جریان به طور وسیعی در مهندسی منابع آب استفاده شده است، اما تعداد بررسی‌های مربوط به این موضوع در مقایسه با اهمیت آن کم است. اصل این بررسی‌ها درباره کاربرد منحنی‌های تداوم جریان در مهندسی منابع آب است و بعضی از آن‌ها نیز تعیین منحنی‌های تداوم جریان منطقه‌ای را پوشش می‌دهند. چون بعضی پروژه‌های منابع آب در حوضه‌های فاقد آمار قرار دارند که برای آن‌ها منحنی‌های تداوم جریان نیاز است (اما موجود نیست)، اطلاعات حوضه‌های مجاور دارای آمار می‌تواند برای طرح هیدرولوژیک در حوضه‌های فاقد آمار مفید باشد. بنابراین منحنی‌های تداوم جریان منطقه‌ای برای تحلیل در هیدرولوژی مفیدند و به آن‌ها توجه زیادی می‌شود.

زینالو (۱۳۸۲) نسبت به برآورد منحنی تداوم جریان در حوضه‌های آبخیز بدون آمار هیدرومتری اقدام کرد. بدین منظور، ۲۵ حوضه آبخیز در محدوده دریاچه ارومیه که آمار هیدرومتری داشته‌اند، انتخاب شدند. دبی‌های برآوردی با معادلات به دست آمده با دبی‌های مشاهداتی ۲۵ حوضه آبخیز مورد بررسی، نتایج معنی‌دار در سطح ۹۹٪ به همراه داشت. این مدل‌ها در ۷ حوضه دیگر تست شدند که نتایج حاصل دارای دقت بسیار خوبی بود. زارع (۱۳۸۹) مدل منطقه‌ای منحنی تداوم جریان را در مناطق خشک برای حوضه‌های آبخیز بدون آمار در ایران مرکزی بررسی کرد. برای مدل‌سازی منطقه‌ای منحنی تداوم جریان از میان ۱۱ متغیر مستقل فیزیوگرافی و اقلیمی، چهار عامل مساحت حوضه آبخیز، طول و شیب آبراهه اصلی و بارندگی متوسط سالانه به‌عنوان عوامل مهم و اختلاف ارتفاع حوضه آبخیز به‌عنوان متغیر کمکی در رگرسیون چند متغیره غیرخطی استفاده شد. همچنین، برای برازش بهترین مدل منطقه‌ای حوضه‌های بدون آمار از معیار نش- ساتکلیف استفاده کرد. سلیمانی و همکاران (۱۳۹۱) توسعه منحنی‌های تداوم جریان منطقه‌ای مصنوعی را در ۱۳ ایستگاه هیدرومتری حوضه آبخیز بختگان بررسی کردند. آن‌ها فقط از مساحت حوضه آبخیز به‌عنوان متغیر مستقل برای مدل‌سازی منحنی تداوم جریان استفاده کردند و نتایج رضایت‌بخشی حاصل شد. کاستلارین و همکاران (۲۰۰۴) سه روش مختلف آماری، پارامتری و ترسیمی را برای منطقه‌ای کردن منحنی تداوم جریان در حوضه‌های آبخیز بدون آمار به کار بردند. این پژوهش‌گران عدم قطعیت منحنی تداوم جریان منطقه‌ای را ارزیابی کردند و روش ارزیابی متقاطع جک نایف را برای منطقه وسیعی در مرکز ایتالیا به کار بردند. همچنین، برای منطقه‌ای کردن منحنی تداوم جریان برای دوره آماری موجود ۵۱ حوضه آبخیز از دبی‌های با احتمال وقوع ۳۰، ۷۰، ۹۰ و ۹۵ درصد به‌عنوان متغیر وابسته و عامل‌های مساحت، طول آبراهه اصلی، میانگین بارندگی سالانه و اختلاف ارتفاع حوضه آبخیز به‌عنوان متغیر مستقل در مدل‌سازی منحنی تداوم جریان استفاده کردند. نتایج کار این پژوهش‌گران ارزیابی اعتمادپذیری منحنی تداوم جریان منطقه‌ای برای حوضه‌های آبخیز فاقد آمار را فراهم کرد. لی و همکاران (۲۰۱۰) روش جدیدی را برای منطقه‌ای کردن منحنی تداوم جریان به نام مدل شاخص[2] معرفی کردند. مدل شاخص رابطه غیرپارامتری بین هر پارامتر پیش‌بینی و ترکیب انواع مدل خطی و غیرخطی پیش‌بینی کننده‌ها ارائه می‌دهد. این بررسی در ۲۲۷ حوضه آبخیز مستقل در جنوب شرق استرالیا برای پیش‌بینی منحنی تداوم جریان انجام شد. نتایج مدل‌های منطقه‌ای را براساس رگرسیون خطی، نزدیک‌ترین همسایه و تشابه هیدرولوژیک مقایسه کردند. نتایج نشان می‌دهد که مدل شاخص بیشترین دقت پیش‌بینی را با بیشترین ضریب کارایی ایجاد می‌کند که از طریق رگرسیون خطی پشتیبانی می‌شود. ویولا و همکاران (۲۰۱۱) منحنی تداوم جریان منطقه‌ای برای حوضه‌های فاقد آمار در سیسیل ایتالیا را بررسی کردند. نتایج به گونه‌ای بود که مجموعه زیادی از داده‌های رواناب تجزیه و تحلیل شد و پارامترهای منحنی تداوم جریان برای حدود ۵۰ حوضه مشتق شد. از مدل‌های رگرسیونی نیز برای استنتاج منحنی تداوم

1- Flow duration curve

2- Index model

www.SID.ir

Archive of SID

جریان منطقه‌ای که بیشتر از خصوصیات مورفولوژیک حوضه شروع می‌شود، استفاده می‌شود.

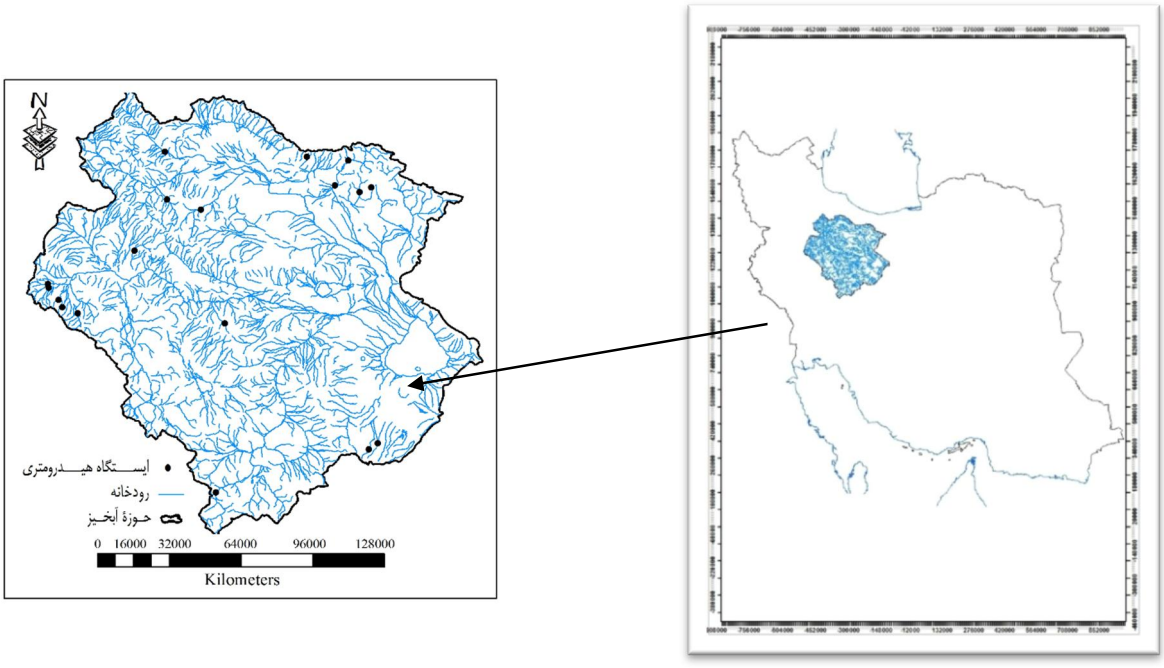
بوکر و اسنلدر (۲۰۱۲) منحنی‌های تداوم جریان را در ۳۷۹ ایستگاه سراسر نیوزیلند با هدف بررسی چگونگی پارامتره کردن و تعمیم ترکیب با اثر صحت و دقت‌هایی که به طور تجربی منحنی‌های تداوم جریان را در مکان‌های بدون آمار پیش‌بینی کرده بودند، آنالیز کردند. متناسب بودن چهار راه‌کار برای برآورد منحنی‌های تداوم جریان مقایسه شد ۱- پارامتره کردن و سپس تعمیم، ۲- پارامتره کردن، منطقه‌ای کردن و بعد تعمیم، ۳- پارامتره کردن و تعمیم همزمان و ۴- جایگزینی منحنی تداوم جریان. نتایج نشان داد که قابلیت پیش‌بینی بین روش‌ها و درصدهای مختلف افزوده شده متغیر است.

هدف این پژوهش، توسعه مدل‌های رگرسیونی منطقه‌ای منحنی تداوم جریان روزانه در حوضه آبخیز دریاچه نمک است. بدین منظور، دبی‌های شاخص این منحنی‌ها در هر ایستگاه با مشخصات فیزیوگرافی، اقلیمی و کاربری اراضی حوضه آبخیز ارتباط داده می‌شود و درنهایت معادلات رگرسیونی به دست آمده ارزیابی می‌شود.

مواد و روش‌ها

محدوده مورد بررسی

حوضه آبخیز دریاچه نمک با مساحتی برابر با ۹۲۶۷۰ کیلومترمربع در موقعیت جغرافیایی '۷ °۴۸ تا '۲۹ °۵۲ طول شرقی و '۱۰ °۳۳ تا '۱۰ °۳۶ عرض شمالی قرار دارد. این حوضه از شمال به حوضه آبخیز سواحل دریای خزر، از غرب به حوضه‌های آبخیز سفیدرود و کرخه، از جنوب به حوضه‌های آبخیز دز و باتلاق گاوخونی و از شرق به حوضه‌های آبخیز دق سرخ و کویر محدود شده است. بلندترین نقطه حوضه حدود ۴۳۱۵ متر در شمال دیزین در قله کوه پالن گردن و گودترین نقطه حدود ۷۹۵ متر در نزدیکی دریاچه نمک نسبت به سطح دریا ارتفاع دارد. بارندگی متوسط سالانه در این نواحی حدود ۲۵۰ میلی‌متر است. پوشش گیاهی در این منطقه مرکزی ایران نیز همانند بارندگی متنوع است. شکل ۱ موقعیت جغرافیایی منطقه مورد بررسی را نشان می‌دهد.



شکل ۱- نقشه موقعیت حوضه آبخیز دریاچه نمک

روش پژوهش

ابتدا آمار دبی روزانه ۱۶۰ ایستگاه هیدرومتری در رودخانه‌های حوضه آبخیز دریاچه نمک بررسی شد و ایستگاه‌هایی که دارای پراکنش مناسب جغرافیایی، طول دوره آماری مناسب و تنوع مساحت بودند، انتخاب شدند. بنابراین با توجه به موارد بالا، ۱۸ ایستگاه هیدرومتری (جدول ۱) که دارای طول دوره مشترک آماری ۳۱ سال (۱۳۸۸-۱۳۵۸)، انتخاب و ایرادهای آماری آن‌ها برطرف

www.SID.ir

Archive of SID

شد. در ادامه، با بررسی آمار دبی جریان، منحنی‌های تداوم جریان برای این ایستگاه‌ها رسم و مقادیر دبی با احتمالات مختلف ($Q_{۱۰}$، $Q_{۲۰}$، $Q_{۳۰}$، $Q_{۴۰}$، $Q_{۵۰}$، $Q_{۶۰}$، $Q_{۷۰}$، $Q_{۸۰}$، $Q_{۹۰}$ و $Q_{۹۵}$) هر کدام درنظر گرفته شد. در گام بعدی، با بهره‌گیری از نقشه‌های رقومی موقعیت ایستگاه‌ها، رودخانه‌ها و توپوگرافی حوضه آبخیز دریاچه نمک، حوضه‌های محصور به هر یک از آن ها از محل ایستگاه تا سرشاخه ترسیم شد. سپس با استفاده از نقشه‌های کاربری اراضی و زمین‌شناسی، مشخصات فیزیوگرافی، اقلیمی، زمین‌شناسی و کاربری اراضی (متغیرهای مستقل) هر حوضه درنظر گرفته شد. بین متغیرهای مستقل و دبی‌های شاخص منحنی تداوم جریان ($Q_{۱۰}$، ...، $Q_{۸۰}$، $Q_{۹۰}$ و $Q_{۹۵}$) در هر حوضه معادلات رگرسیونی برقرار شد. در نهایت، معادله‌ای منطقه‌ای بین پارامترهای منحنی تداوم جریان و متغیرهای مستقل حوضه ارائه شد.

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های هیدرومتری انتخاب شده مربوط به حوضه آبخیز دریاچه نمک

ردیف	نام ایستگاه	کد تماب	ارتفاع	مساحت (km^2)	ردیف	نام ایستگاه	کد تماب	ارتفاع	مساحت (Km^2)
۱	قروه (ابهررود)	۴۱-۰۷۳	۱۴۳۰	۱۹۰۰	۱۰	صالح آباد	۴۱-۰۴۳	۱۷۷۰	۱۸۰
۲	بیلقان	۴۱-۱۰۳	۱۳۶۰	۱۱۲۰	۱۱	یالفان	۴۱-۰۳۵	۱۹۸۰	۱۶۵
۳	سرآب هنده	۴۱-۰۰۹	۲۰۰۰	۸۱۷	۱۲	گبرآباد (حسین آباد)	۴۱-۰۰۷	۱۵۶۰	۱۳۰
۴	سیرا (کرج)	۴۱-۱۰۱	۱۷۹۰	۷۲۵	۱۳	قمصر (بن رود)	۴۱-۰۰۵	۱۹۵۰	۸۵
۵	حاجی عرب	۴۱-۰۷۹	۱۶۷۰	۵۵۰	۱۴	سولان	۴۱-۰۴۱	۱۹۰۰	۳۷
۶	ارتش آباد	۴۱-۰۶۹	۱۷۵۰	۴۷۰	۱۵	تفرش	۴۱-۱۳۱	۱۸۸۰	۳۶
۷	زهتران	۴۱-۰۵۱	۱۷۵۰	۴۲۰	۱۶	دربند (فشند)	۴۱-۰۹۳	۱۷۸۰	۳۴
۸	بهادربیک	۴۱-۰۴۵	۱۷۹۰	۲۰۰	۱۷	محل تقسیم آب	۴۱-۰۳۹	۲۰۴۲	۳۰
۹	سولقان	۴۱-۱۰۹	۱۴۳۰	۱۹۶	۱۸	هفت حوض (درکه)	۴۱-۱۴۳	۱۷۰۰	۲۵

استخراج مشخصات فیزیوگرافی و کاربری اراضی

پس از استخراج محدوده تمام حوضه‌های آبخیز با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)، پارامترهای فیزیوگرافی و کاربری اراضی آن ها شامل مساحت، طول آبراهه اصلی، شیب حوضه، حداقل ارتفاع، متوسط ارتفاع، حداکثر ارتفاع، تراکم آبراهه، اختلاف ارتفاع به‌عنوان فاکتور کمکی، اراضی کشت دیم، کشت آبی، اراضی مرتعی و اراضی صخره‌ای محاسبه شد.

برآورد بارش حوضه‌های آبخیز مورد بررسی

برای تخمین متوسط بارش سالانه هر یک از حوضه‌های آبخیز مورد بررسی از آمار ۱۸ ایستگاه با طول دوره ۳۱ سال و روش کریجینگ استفاده شد. روش کریجینگ یکی از روش‌های بسیار مناسب برای تحلیل فضایی و توزیع منطقه‌ای داده‌های مکانی است. در این روش، میانگین وزنی برای توزیع متغیرها استفاده می‌شود. به این صورت که هرچه متغیر به مبدأ نزدیک‌تر باشد، وزن آن بیشتر است و هرچه فاصله نقاط دورتر باشد، وزن کمتر خواهد بود (حقیقت‌جو و همکاران، ۱۳۹۰). ممکن است شباهت‌هایی در بین روش‌ها وجود داشته باشد. به‌عنوان مثال آنچه در مورد روش کریجینگ و روش عکس مجذور فاصله بیان شده است. یعنی هرچه به ایستگاه مدنظر نزدیک‌تر باشد وزن بیشتر در بازسازی آمار ایستگاه ناقص می‌شود. اما تفاوت بین روش‌ها می‌تواند در توان‌ها و معادلاتی باشد که استفاده می‌شود.

ترسیم و تحلیل منطقه‌ای منحنی‌های تداوم جریان

سه رویکرد روش آماری، روش پارامتریک و روش ترسیمی (غیرپارامتری) برای ترسیم و تحلیل منحنی تداوم جریان بیشتر استفاده می‌شود. در روش آماری، یک توزیع فراوانی مانند لوگ نرمال دو پارامتری برای نمایش توزیع جریان روزانه در فواصل مختلف انتخاب می‌شود. سپس احتمال تجاوز، از طریق این توزیع‌ها به دست می‌آید. بیرد (۱۹۴۳) استفاده از تابع چگالی احتمال لوگ نرمال برای تخمین منحنی تداوم جریان را پیشنهاد کرد. در روش پارامتریک، یک معادله برای نمایش منحنی تداوم جریان روزانه استفاده می‌شود. کیمپو و همکاران (۱۹۸۳) از معادله نمایی دو پارامتره استفاده کردند. یو و همکاران (۲۰۰۲) از معادلات Q_p (دبی متناظر صدک‌های مختلف) به صورت تابعی از چند شاخص ژئومورفوکلیماتولوژی استفاده کردند.

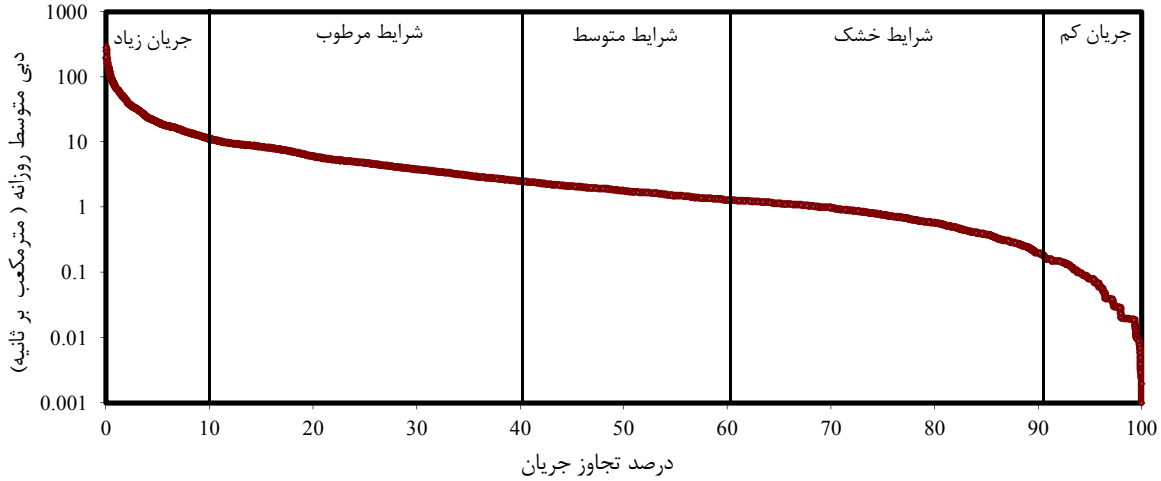
www.SID.ir

Archive of SID

در روش ترسیمی، ابتدا منحنی‌های تداوم جریان تمام ایستگاه‌های دارای آمار از طریق تقسیم منحنی تداوم جریان تجربی به یک جریان شاخص (مانند میانگین طولانی مدت جریان روزانه) استاندارد می‌شوند و منحنی تداوم جریان ترسیمی بی‌بعد منطقه‌ای از روی میانگین منحنی‌های تداوم جریان تجربی استاندارد شده تمام ایستگاه‌ها در منطقه مورد بررسی به دست می‌آیند. سپس برای ترسیم منحنی تداوم جریان برای حوضه‌های فاقد آمار در منطقه مورد بررسی می‌توان از منحنی تداوم جریان منطقه‌ای بی‌بعد و برآوردی از جریان شاخص در آن حوضه استفاده کرد. اسماختین و همکاران (۱۹۹۷) از روش ترسیمی استفاده کردند. در روش‌های آماری هنوز توزیع آماری که مورد قبول بیشتر پژوهش‌گران باشد ارائه نشده و از طرفی برآورد دبی‌ها از طریق این توزیع‌ها با خطا روبرو است. همین‌طور در مورد روش ترسیمی، نحوه ترسیم منحنی استاندارد می‌تواند جای بحث باشد. اما در روش پارامتری می‌توان به طور مستقیم ارتباط بین جریان‌ها و مشخصات حوضه برقرار کرد. در این روش، نه موضوع انتخاب توزیع آماری مطرح است و نه نحوه ترسیم منحنی استاندارد. مزیت این روش این است که می‌توان به سادگی به بسیاری از مسائل پی برد. به‌عنوان مثال کدام متغیر مستقل تا چه اندازه جریان رودخانه را تحت تأثیر قرار می‌دهد. به همین دلیل، در این پژوهش، از روش پارامتریک و معادله خطی چندمتغیره برای ترسیم منحنی تداوم جریان استفاده شد.

محاسبه مقادیر دبی‌ها با احتمالات مختلف و شرایط هیدرولوژیک جریان‌ها

برای رسم منحنی تداوم جریان، ابتدا دبی‌های روزانه مربوط به هر ایستگاه به صورت نزولی مرتب شد. سپس تعداد دبی‌های تکراری شمارش شده، که به‌دلیل تعداد زیاد داده‌ها برای شمارش، داده‌های تکراری در نرم‌افزار اکسل فرمول‌نویسی و روی محور Yها دبی قرار گرفت و در محور Xها درصد تجاوز جریان که از فرمول ویبول به دست آمد قرار داده شد. از داده‌های ترسیم این منحنی‌ها، مقادیر دبی با احتمالات مختلف (Q_{10}، ...، Q_{80}، Q_{90} و Q_{95}) درنظر گرفته شد. در ادامه، برای بررسی و شناخت وضعیت هیدرولوژیک جریان‌ها، درصد وقوع جریان‌ها در هر یک از کلاس‌های وضعیت هیدرولوژیک جریان‌ها محاسبه شد. این منحنی‌ها، شرایط حاکم بر حوضه‌های آبخیز را نیز نشان می‌دهند. به‌عبارت دیگر، با تعیین درصد وقوع جریان‌ها در کلاس‌های مختلف این منحنی‌ها، می‌توان شرایط جریان‌ها را بررسی کرد. شکل ۲ نمای کلی یک منحنی تداوم جریان را نشان می‌دهد.



شکل ۲- نمونه منحنی تداوم جریان برای جریان ۳۰ ساله (سازمان حفاظت محیط‌زیست، ۲۰۰۷)

ماتریس همبستگی بین پارامترها

با توجه به میزان ضریب همبستگی بین پارامترها و بهره‌جویی از نتایج پژوهش‌های قبلی، تعداد ۱۲ متغیر مستقل که رابطه همبستگی کمتری با دیگر پارامترها داشتند انتخاب شدند. در رگرسیون چندمتغیره، پارامترهایی‌که همبستگی بالایی با هم ندارند به کار گرفته

www.SID.ir

Archive of SID

می‌شوند (مور و مک‌کاب، ۱۹۹۹)، در غیر این صورت، اطلاعات زائد و اضافی وارد سیستم می‌شود. در این پژوهش برای بررسی همبستگی بین پارامترها و همچنین پارامترها با دبی‌های تداوم جریان، ۱۲ پارامتر مساحت، شیب حوضه، تراکم آبراهه، ارتفاع حداقل، متوسط و حداکثر، طول آبراهه اصلی، متوسط بارندگی سالانه و کاربری‌های اراضی انتخاب شدند.

تحلیل‌های چندمتغیره به روش رگرسیون گام به گام

در بسیاری از مسائل واقعی، متغیر هیدرولوژیک وابسته به بیش از یک متغیر مستقل است. پس با استفاده از رگرسیون چند متغیره می‌توان دقت تخمین متغیر وابسته را افزایش داد. معادله رگرسیون خطی چندمتغیره به صورت معادله (۱) است:

$$y = \alpha_0 + \sum_{i=1}^{m} \alpha_i x_i \qquad (۱)$$

که در آن m تعداد متغیرهای مستقل و α پارامترهای مدل است (کارآموز و عراقی‌نژاد، ۱۳۸۹). روش گام به گام، روش انتخاب مدل به‌صورت خودکار است که در الگوریتم رایانه، مدل برتر را تعیین می‌کند. روش رگرسیون گام به گام ایده‌های دو روش پیش‌رونده و پس‌رونده را ترکیب می‌کند. این روش بین افزودن و حذف متغیرها به‌صورت تناوبی عمل کرده و معنی‌داری تک‌تک متغیرها را در داخل و بیرون مدل بررسی می‌کند. وقتی متغیرهای مهم وارد مدل می‌شوند، اگر معنی‌دار نباشند حذف خواهند شد. این روش تا زمانی ادامه پیدا می‌کند که خطای معنی‌داری به ۵٪ برسد (مهدوی و دستورانی، ۱۳۹۱).

معیارهای کلی کیفیت مدل رگرسیونی

در آنالیز رگرسیون، تصمیم‌گیری‌ها درباره کفایت مدل بیشتر براساس آماره‌های خلاصه رگرسیون مانند R^2 (ضریب تشخیص)، S (خطای استاندارد رگرسیون یا انحراف معیار باقی‌مانده‌ها) و نتایج آزمون F یا t است. در حالیکه می‌توان از دو آماره دیگر یعنی مجموع مربعات خطای پیش‌بینی[1] (PRESS) (معادله (۲)) و R^2 تعدیل شده (R^2_a) (معادله (۳)) نیز استفاده کرد

$$\mathbf{PRESS} = \sum_{i=1}^{n} \mathbf{e(i)^2} \qquad (۲)$$

PRESS برآورد کننده معتبری از خطاست. به‌جای جداسازی مجموعه داده‌ها به دو نیمه (یک نیمه برای توسعه مدل و دومی برای اعتبارسنجی آن)، PRESS تعداد n-1 مشاهده را به کار می‌گیرد تا معادله را توسعه دهد و مقدار مشاهده حذف شده را برآورد کند. سپس مشاهده حذف شده را تغییر می‌دهد و فرایند را برای هر مشاهده تکرار می‌کند. خطاهای پیش‌بینی به توان ۲ می‌رسند و جمع زده می‌شوند. حداقل کردن PRESS به این معناست که هنگام پیش‌بینی جدید، معادله حداقل خطا را خواهد داشت. در رگرسیون چندگانه، برآورد خیلی مفیدی از کیفیت مدل‌های رگرسیونی ممکن است. با حداقل کردن PRESS، مدلی که کمترین خطا را در پیش‌بینی مشاهدات آینده داشته باشد، انتخاب می‌شود.

دومین معیار، R^2_a یعنی تعدیل‌شده R^2 تعداد متغیرهای مستقل (یا به‌طور معادل، درجه آزادی) مدل است. مدلی با بالاترین R^2_a همان مدل با کوچک‌ترین خطای استاندارد (S) یا مربع آن میانگین خطای استاندارد (MSE) است.

$$\mathbf{R^2_a = 1 - \frac{MSE}{(\frac{ss_y}{n-1})}} \qquad (۳)$$

که در آن ss_y مجموع مربعات کل و MSE میانگین خطای استاندارد است. چون ((ssy/(n-1)) برای مجموعه داده‌های مشخص ثابت است، R^2_a با کاهش MSE افزایش می‌یابد. از این‌رو به‌عنوان یک معیار کلی از کیفیت، باید R^2_a حداکثر و یا MSE حداقل شود (مهدوی و دستورانی، ۱۳۹۱).

برای بررسی قابلیت کاربرد معادله رگرسیونی برای پیشگویی دبی با احتمالات مختلف، ارزیابی مدل با مقایسه دبی به دست آمده از معادلات و مشاهداتی با استفاده از معیار نش- ساتکلیف (۱۹۷۰) (معادله (۴)) و ضریب تشخیص انجام شد.

$$\mathbf{Ef} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(Q_{ip}-Q_m)^2 - \sum(Q_{ip}-Q_i)^2}{\sum(Q_{ip}-Q_m)^2} \qquad (۴)$$

که Q_{ip} متغیر پیشگویی شده برای رخداد i، Q_m مقدار متوسط متغیر مشاهده شده برای رخداد i، n تعداد رخداد و Q_i متغیر مشاهده شده برای رخداد i است. این ضریب برابر با یک مقدار عالی است و کمتر از صفر اجرای نامطلوب را نشان می‌دهد (موریاسی و همکاران، ۲۰۰۷). مقدار Ef منفی بیانگر نامفهوم بودن و دور شدن نسبت به نتیجه و مسئله مورد ارزیابی است.

معادلات رگرسیون خطی بین متغیرهای مستقل و متغیرهای وابسته

بین هر یک از دبی‌ها با احتمالات مختلف به‌عنوان متغیر

1- Prediction error sum of squares

www.SID.ir

Archive of SID

وابسته و متغیرهای مستقل مساحت، طول آبراهه اصلی، شیب حوضه، تراکم آبراهه، حداقل ارتفاع حوضه، متوسط ارتفاع حوضه و حداکثر ارتفاع حوضه، بارندگی متوسط سالانه، کاربری‌های اراضی (درصد کشت آبی، درصد کشت دیم، درصد پوشش مرتعی و درصد صخره‌ای) و اختلاف ارتفاع حوضه به‌عنوان متغیر کمکی، بهترین مدل رگرسیونی در نرم‌افزار Minitab ۱۶، به روش رگرسیون گام به گام و براساس آماره‌های حداکثر ضریب تشخیص، حداقل باقیمانده، PRESS، R^2_a، P-Value و معیار نش-ساتکلیف برازش داده شد.

نتایج و بحث

پس از اینکه ایرادات آماری ایستگاه‌های منتخب برطرف و آزمون همگنی داده‌ها انجام شد، داده‌های هر ایستگاه با توجه به هدف مورد نظر که تحلیل منحنی تداوم جریان منطقه‌ای برای زیرحوضه‌های فاقد آمار در حوضه آبخیز دریاچه نمک بود برای تجزیه و تحلیل آماده شدند.

استخراج دبی‌های شاخص منحنی تداوم جریان به‌عنوان متغیر مستقل

منحنی تداوم جریان ایستگاه‌های مورد بررسی برای وضعیت‌های هیدرولوژیک با درصد تجاوز جریان ۰-۱۰۰ رسم و مقادیر دبی‌های شاخص ($Q_{۱۰}$، ...، $Q_{۸۰}$، $Q_{۹۰}$ و $Q_{۹۵}$) درنظر گرفته شد.

وضعیت هیدرولوژیک جریان‌ها

در این پژوهش، منحنی تداوم جریان به پنج وضعیت (جریان سیلابی، شرایط مرطوب، جریان متوسط، شرایط خشک و جریان کم) جداسازی شد. به طور کلی، دبی با احتمال ۱۰٪ به‌عنوان آستانه دبی سیلابی، ۴۰٪ به‌عنوان دبی متوسط و دبی ۹۰٪ به‌عنوان آستانه حداقل آبی معرفی می‌شود. مقادیر نشان می‌دهد در چند درصد از زمان، شرایط سیلابی، مرطوب، متوسط، خشک و کم آبی در حوضه حاکم است. نتایج حاصل از درصد وقوع جریان‌ها در هر یک از کلاس‌ها نشان می‌دهد که بیشتر شرایط جریان‌های سیلابی در حوضه حاکم است. به گونه‌ای که بیشترین درصد مربوط به دبی‌های با درصد تجاوز جریان ۰-۱۰ (جریان‌های سیلابی) و سپس ۱۰-۴۰ (شرایط مرطوب) است (جدول ۲).

جدول ۲- درصد وقوع جریان‌ها با احتمالات مختلف و کلاس‌های هیدرولوژیک جریان‌ها

ردیف	نام ایستگاه	کد تماب	۰-۱۰	۱۰-۴۰	۴۰-۶۰	۶۰-۹۰	۹۰-۱۰۰
			سیلابی	مرطوب	متوسط	خشک	کم
۱	قمصر (بن رود)	۴۱-۰۰۵	۳۷/۴۷	۳۶/۸۳	۱۳/۷۲	۱۰/۵۶	۱/۴۱
۲	گبرآباد (حسین آباد)	۴۱-۰۰۷	۲۸/۷۱	۳۸/۶۳	۱۵/۴۰	۱۶/۱۸	۱/۰۹
۳	سرآب هنده	۴۱-۰۰۹	۵۶/۸۸	۳۰/۷۰	۷/۳۳	۴/۶۲	۰/۴۷
۴	یالفان	۴۱-۰۳۵	۴۶/۰۸	۴۲/۲۲	۸/۱۴	۳/۵۰	۰/۰۵
۵	محل تقسیم آب	۴۱-۰۳۹	۴۳/۷۶	۳۶/۹۴	۹/۵۴	۸/۷۴	۱/۰۲
۶	سولان	۴۱-۰۴۱	۴۸/۶۱	۳۷/۰۹	۸/۹۰	۵/۱۹	۰/۲۰
۷	صالح‌آباد	۴۱-۰۴۳	۴۹/۴۷	۴۱/۲۵	۷/۰۵	۲/۲۰	۰/۰۲
۸	بهادربیک	۴۱-۰۴۵	۵۳/۲۵	۴۰/۱۳	۵/۴۶	۱/۱۵	۰/۰۱
۹	زهتران	۴۱-۰۵۱	۵۵/۶۵	۳۱/۲۸	۸/۵۸	۴/۱۵	۰/۳۳
۱۰	ارتش آباد	۴۱-۰۶۹	۵۵/۶۲	۳۳/۷۶	۷/۶۴	۲/۷۴	۰/۲۳
۱۱	قروه (ابهررود)	۴۱-۰۷۳	۶۲/۷۰	۲۹/۶۳	۴/۳۳	۳/۱۶	۰/۱۸
۱۲	حاجی عرب	۴۱-۰۷۹	۵۸/۰۶	۳۰/۸۸	۷/۶۸	۳/۱۴	۰/۲۲
۱۳	دربند (فشند)	۴۱-۰۹۳	۴۵/۴۰	۳۳/۹۹	۱۰/۸۴	۸/۳۰	۱/۴۶
۱۴	سیرا (کرج)	۴۱-۱۰۱	۳۳/۸۴	۴۱/۳۵	۱۱/۳۰	۱۰/۹۹	۲/۵۳
۱۵	بیلقان	۴۱-۱۰۳	۲۶/۴۳	۳۵/۱۹	۱۶/۱۲	۱۸/۲۹	۳/۹۷
۱۶	سولقان	۴۱-۱۰۹	۵۳/۶۴	۳۹/۰۲	۵/۵۹	۱/۷۳	۰/۰۲
۱۷	تفرش	۴۱-۱۳۱	۶۲/۳۸	۲۹/۴۵	۴/۹۶	۳/۰۵	۰/۱۷
۱۸	هفت حوض (درکه)	۴۱-۱۴۳	۵۰/۱۴	۳۹/۹۳	۷/۱۴	۲/۶۲	۰/۱۷

www.SID.ir

Archive of SID

معادلات رگرسیونی بین متغیرهای مستقل و وابسته

در میان عوامل ذکر شده، بین طول آبراهه اصلی، متوسط بارندگی، مساحت و شیب حوضه همبستگی معنی‌داری در سطح ۹۵٪ مشاهده شد که نتایج آن به‌همراه آماره‌های محاسبه‌شده در جدول ۳ ارائه شده است.

L طول آبراهه اصلی، P متوسط بارندگی سالانه، A مساحت، S شیب R^2 حداکثر ضریب تشخیص، NSE ضریب نش- ساتکلیف، Se خطای استاندارد، R^2_a ضریب تشخیص تعدیل شده، PRESS مجموع مربعات خطای پیش‌بینی و P-Value احتمال رخداد خطای نوع اول است. براساس جدول ۳، مقدار ضریب تشخیص بزرگ‌تر از ۰/۷۹ بیانگر این است که بیش از ۷۹٪ تغییرات دبی تحت تأثیر این متغیرها است. همچنین در معادلات ارائه شده مشاهده می‌شود که در دبی‌های ۱۰ و ۲۰ درصد عامل بارندگی (P) نقش بیشتری نسبت به شیب (S) دارد (همان‌طور که بیان شد نقش بارندگی بیشتر از شیب بوده و به معنی هیچ‌گونه نقش شیب در جریان‌ها نیست) که این می‌تواند به این دلیل باشد که دبی‌های ۱۰ و ۲۰ درصد جریان‌های سیلابی و شرایط مرطوب در حوضه هستند و نقش عامل بارندگی در جریان‌های سیلابی و شرایط مرطوب بیشتر از عامل شیب است. همچنین دیگر معیارهای ارائه شده برای این معادلات نشان از معنی‌داری معادلات در سطح ۹۵٪ است. پس می‌توان از معادلات ارائه شده برای منحنی تداوم جریان، حوضه‌های فاقد آمار منطقه استفاده کرد.

جدول ۳- روابط منطقه‌ای بین دبی‌های شاخص و پارامترهای حوضه

درصد جریان	معادله	R^2	R^2_a	PRESS	NSE	Se	P-Value
۱۰	Q= -16.140 + 0.581 (L) + 0.0315 (P) – 0.0167 (A)	۸۳/۴۳	۷۹/۸۸	۴۷۳/۳۸۰	۰/۸۳	۴/۰۵	۰
۲۰	Q= -11.698 + 0.421 (L) + 0.0217 (P) – 0.0125 (A)	۷۹/۸۶	۷۵/۵۴	۳۰۶/۸۶	۰/۸۰	۳/۲۱	۰
۳۰	Q= -10.069 + 0.322 (L) + 0.0092 (P) – 0.0086 (A) + 0.111 (S)	۸۷/۲۲	۸۳/۲۸	۱۳۹/۲۲	۰/۸۷	۱/۹۳	۰
۴۰	Q= -7.120 + 0.267 (L) – 0.0066 (A) + 0.133 (S)	۸۹/۵۳	۸۷/۲۹	۴۰/۲۳	۰/۹۰	۱/۳۸	۰
۵۰	Q= -6.276 + 0.230 (L) – 0.0059 (A) + 0.118 (S)	۹۱/۶۹	۸۹/۹۱	۲۲/۵۲	۰/۹۲	۱/۰۴	۰
۶۰	Q= -5.696 + 0.205 (L) – 0.0053 (A) + 0.106 (S)	۹۱/۶۹	۸۹/۹۱	۲۱/۷۹	۰/۹۲	۰/۹۱۸	۰
۷۰	Q= -5.252 + 0.186 (L) – 0.0048 (A) + 0.097 (S)	۹۱/۱۵	۸۹/۲۶	۲۱/۸۹	۰/۹۱	۰/۸۶۱	۰
۸۰	Q= -4.870 + 0.170 (L) – 0.00445 (A) + 0.090 (S)	۹۰/۸۹	۸۸/۹۴	۲۱/۲۱	۰/۹۱	۰/۸۰۳	۰
۹۰	Q= -4.447 + 0.155 (L) – 0.00404 (A) + 0.082 (S)	۹۰/۷۶	۸۸/۷۸	۱۸/۷۶	۰/۹۱	۰/۷۳۵	۰
۹۵	Q= -4.150 + 0.144 (L) – 0.00377 (A) + 0.077 (S)	۹۰/۵۰	۸۸/۴۷	۱۶/۸۳	۰/۹۱	۰/۶۹۶	۰

نتیجه‌گیری

تجزیه و تحلیل معادلات رگرسیونی برآورد دبی‌های شاخص از روی پارامترهای حوضه نشان داد که از بین ۱۲ متغیر مستقل مورد بررسی در منطقه مورد مطالعه، چهار متغیر شامل طول و شیب آبراهه اصلی، مساحت حوضه و متوسط بارندگی سالانه بیشترین تأثیر را در برآورد دبی‌های شاخص دارا هستند.

در این پژوهش تلاش شد تا بیشتر متغیرهای مستقل و تأثیرگذار در جریان‌ها در معادلات رگرسیون گنجانده شود و در این راستا نقشه‌های کاربری اراضی و زمین‌شناسی منطقه تهیه شد. اما این نقشه‌ها بدون اطلاعات قابل توجه که بتوانند نقش این عوامل را در دبی‌ها تعیین کنند، بودند. با وجود اینکه معادلات رگرسیونی معنی‌دار حاصل شد، اما نمی‌توان از نقش نفوذپذیری سازندها و CN (شماره منحنی) در دبی‌های مختلف چشم‌پوشی کرد. زیرا با توجه به شرایط حاکم در مناطق خشک، نفوذپذیری سازند می‌تواند نقش مؤثری در خصوصیات جریان‌ها داشته باشد. در صورتی که این داده‌ها تهیه و از آن‌ها در بررسی‌های آینده استفاده شود می‌توان انتظار داشت نتایج بهتر از این پژوهش حاصل شود. همچنین، ارزیابی رویکردهای مختلف (پارامتریک، غیرپارامتریک و آماری) می‌تواند در محاسبه دبی‌های شاخص حوضه‌های فاقد آمار و انتخاب رویکرد مناسب مفید باشد.

از طرفی، گرچه ممکن است مساحت حوضه آبخیز با طول آبراهه اصلی همبستگی بالایی داشته باشد، اما مساحت فقط اندازه حوضه آبخیز را بیان می‌کند. در حالیکه ترکیب مساحت حوضه آبخیز با طول آبراهه اصلی، شکل و اندازه حوضه آبخیز را که هر دوی آن ها بر دبی نقش دارند بیان می‌کند. از روش رگرسیون خطی چندگانه برای برقراری معادلات رگرسیونی استفاده شد که در پژوهش‌های

www.SID.ir

Archive of SID

دیگری از جمله زینالو (۱۳۸۲)، هولمز و همکاران (۲۰۰۲)، لی و همکاران (۲۰۱۰) و بوکر و اسنلدر (۲۰۱۲) نیز استفاده شده است. سلیمانی و همکاران (۱۳۹۱) در مقایسه با این پژوهش فقط از مساحت حوضه آبخیز به‌عنوان متغیر مستقل برای مدل‌سازی منحنی تداوم جریان استفاده کردند.

منابع

۱. حقیقت‌جو پ. امیری م. و بحرینی‌مطلق م. ۱۳۹۰. انتخاب مناسب‌ترین روش زمین‌آماری جهت پهنه‌بندی خشکسالی به کمک نرم‌افزار Arc GIS (مطالعه موردی: استان فارس). یازدهمین سمینار سراسری آبیاری و کاهش تبخیر، دانشگاه شهید باهنر کرمان.

۲. زارع ا. ۱۳۸۹. مدل منطقه‌ای منحنی تداوم جریان در مناطق خشک برای حوضه‌های آبخیز بدون آمار. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، گروه احیای مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران. ۸۲ ص.

۳. زینالو ع. ا. ۱۳۸۲. برآورد منحنی تداوم جریان از حوضه‌های آبریز بدون آمار هیدرومتری. اولین کنفرانس ملی نیروگاه‌های آبی کشور. ۸۴۶-۸۳۷.

۴. سلیمانی م. لیاقت ع. غلامی ع. و سمیعی م. ۱۳۹۱. توسعه منحنی تداوم جریان منطقه‌ای در حوضه آبخیز بختگان. سومین همایش ملی مدیریت جامع منابع آب. دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری.

۵. کارآموز م. و عراقی‌نژاد ش. ۱۳۸۹. هیدرولوژی پیشرفته. انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، چاپ دوم. ۴۶۴ ص.

۶. مهدوی م. و دستورانی ج. ۱۳۹۱. روش‌های آماری در منابع آب (ترجمه). انتشارات دانشگاه تهران. ۴۸۶ ص.

7. Beard L. R. 1943. Statistical analysis in hydrology. Trans., ASCE, 108: 1110-1160.
8. Booker D. J. and Snelder T. H. 2012. Comparing methods for estimating flow duration curves at ungauged sites. Journal of Hydrology. 434-435: 78-94.
9. Castellarin A. Galeati G. Brandimarte L. Montanari A. and Brath A. 2004. Regional flow-duration curves: Reliability for ungauged basins. Journal of Advances in Water Resources. 27: 953-965.
10. Environmental Protection Agency. 2007. An Approach for Using Load Duration Curves in the Development of TMDLs, U.S. 74 p.
11. Holmes M. G. R. Young A. R. Gustard A. and Grew R. 2002. A region of influence approach to predicting flow duration curves within ungauged catchments. Journal of Hydrology and Earth System Sciences. 6: 721-731.
12. Li M. Shao Q. Zhang L. and Chiew F. H. S. 2010. A new regionalization approach and its application to predict flow duration curve in ungauged basins. Journal of Hydrology. 389(1-2): 137-145.
13. Moore D. S. and McCabe G. P. 1999. Introduction to the Practice of Statistics. Third edition, New York. 747 p.
14. Moriasi D. N. Arnold A. G. Van Liew M. W. Bingner R. L. Harmel R. D. and Veith T. L. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. American Society of Agricultural and Biological Engineers. 50(3): 885-900.
15. Nash J. E. and Sutcliff J. V. 1970. River flow forecasting through conceptual models. 1. A discussion of principles. Journal of Hydrology. 10: 282-290.
16. Quimpo R. G. Alejandrino A. A. and McNally T. A. 1983. Journal of Water Resources, Planning and Management Regionalised flow duration curves for Philippines, ASCE. 109(4): 320-330.
17. Smakhtin V. U. Hughes D. A. and Creuse-Naudine E. 1997. Regionalization of daily flow characteristics in part of the Eastern Cape (South Africa). Journal of Hydrology and Earth System Sciences. 42(6): 919-936.
18. Viola F. Noto L. V. Cannarozzo M. and La Loggia G. 2011. Regional flow duration curves for ungauged sites in Sicily. Journal of Hydrology and Earth System Sciences. 15: 323-331.
19. 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): 424-430.

www.SID.ir