

داد که انتقال پارامترهای مدل بر مبنای مشابهت هیدرولوژیکی بدست آمده با روش مجاورت مکانی در مقایسه با روش‌های دیگر اندکی بهتر می‌باشد و روش شاخص مشابهت فیزیکی نیز بهتر از روش مشابهت بر مبنای سطح زهکشی در منطقه مورد مطالعه می‌باشد. همچنین نتایج این مطالعه نشان داد که مدل HBV قابلیت خوبی برای استفاده در منطقه مورد مطالعه دارد و می‌توان تا حدود زیادی عدم قطعیت پارامترهای مدل HBV را با واسنجی مدل مرتفع نمود. با توجه به نتایج رضایت بخش فوق‌الذکر از کاربرد این مدل، توصیه می‌شود که از این مدل در تحقیقات مشابه در آینده استفاده شود.

کلید واژه‌ها: مدل HBV، منطقه‌ای کردن، منطقه البرز مرکزی، مجاورت مکانی، سطح زهکشی، مشابهت فیزیکی

مقدمه

برآورد جریان پیوسته یکی از مسائل مهم در بحث هیدرولوژی سطحی و به‌ویژه در حوضه‌های فاقد آمار می‌باشد. بر اساس نظر سیواپالان و همکاران [۲۹]، اصطلاح حوضه‌های فاقد آمار به حوضه‌هایی اطلاق می‌شود که فاقد داده‌های اندازه‌گیری شده کافی و یا باکیفیت مناسب باشند. پس با توجه به متغیرهای مورد نیاز برای تحقیق، دارای آمار بودن و یا فاقد آمار بودن حوضه‌ها تعریف می‌شود. انجمن بین‌المللی هیدرولوژی (IAHS^۵) دهه ۲۰۱۲-۲۰۰۳ را به نام دهه پیش‌بینی در حوضه‌های فاقد آمار نام‌گذاری نمود (رضوی [۲۵]). بیشتر مطالعات در این مورد بعد از سال ۲۰۰۳ انجام شده‌اند. بیشتر رودخانه‌ها و به‌ویژه سرشاخه‌های رودخانه‌های اصلی در سراسر جهان فاقد آمار یا دارای آمار ناقص می‌باشند (سیواپالان و همکاران [۲۹]؛ یانگ [۳۵]؛ میسرا و کولیالی [۱۸]). به دلیل فراوانی حوضه‌های فاقد آمار و اهمیت مسئله آب بخصوص در دهه‌های اخیر و بحران کم‌آبی توجه به پیش‌بینی در حوضه‌های فاقد آمار نمود بیشتری یافته است. سری‌های زمانی پیوسته جریان نیز به دلیل اینکه می‌توانند اطلاعات کافی در اختیار مدیران و هیدرولوژیست‌ها برای مدیریت بهتر منابع آبی موجود قرار دهند از اهمیت خاصی برخوردارند. به‌رغم پیشرفت‌های قابل توجه در هیدرولوژی، هنوز هم برآورد جریان در حوضه‌های دارای آمار کم یا فاقد آمار به عنوان یک چالش اصلی

برآورد رواناب روزانه در حوضه‌های فاقد آمار با استفاده از منطقه‌ای کردن پارامترهای مدل HBV (منطقه مورد مطالعه: البرز مرکزی)

محمد خسروی^۱، علی سلاجقه^۲، محسن محسنی‌ساروی^۳ و آرش ملکیان^۴
تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۱/۱۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۵/۱۴

چکیده:

اطلاعات مربوط به جریان روزانه برای حل مسائل مختلف هیدرولوژیکی بسیار اساسی می‌باشند. با این حال تنها در درصد کمی از رودخانه‌های دنیا داده‌های پیوسته جریان برای واسنجی مدل‌ها در دسترس می‌باشند. یک روش برآورد جریان روزانه در حوضه‌های فاقد آمار انتقال پارامترهای واسنجی شده مدل بارش رواناب از حوضه دارای آمار (حوضه بخشنده) به حوضه فاقد آمار (حوضه گیرنده) می‌باشد. این روش بر پایه انتخاب یک حوضه مشابه دارای آمار با حوضه فاقد آمار می‌باشد. بر این اساس امکان شبیه‌سازی سری‌های زمانی جریان روزانه در حوضه‌های فاقد آمار با استفاده از یک مدل مفهومی هیدرولوژیکی مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور ۱۴ حوضه انتخابی (۱۶ تا ۸۰۴ کیلومترمربع) در منطقه البرز مرکزی با دوره آماری مشترک ۱۱ ساله از تاریخ ۱۳۷۹/۰۷/۱ تا ۱۳۹۰/۰۶/۳۱ (۲۲ سپتامبر ۲۰۰۰ تا ۲۲ سپتامبر ۲۰۱۱) برای مطالعه انتخاب شدند. از مدل HBV برای شبیه‌سازی جریان در حوضه‌های دارای آمار و انتقال پارامترهای مدل به حوضه‌های مشابه فاقد آمار فرضی استفاده گردید. این مدل یکی از پرکاربردترین مدل‌ها در زمینه منطقه‌ای کردن جریان در مطالعات پیشین بوده و به دلیل سادگی، در دسترس بودن داده‌های ورودی آن و قابلیت استفاده در اقلیم‌های مختلف برای این مطالعه انتخاب شد. مشابهت هیدرولوژیک حوضه‌ها نیز با استفاده از سه روش مجاورت مکانی، مشابهت سطح زهکشی و شاخص مشابهت فیزیکی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این مطالعه نشان

۱- نویسنده مسئول و استادیار گروه منابع طبیعی، دانشگاه رازی پست الکترونیک: khosravim59@gmail.com

۲- استاد دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران

۳- استاد دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران

۴- دانشیار دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران

در هیدرولوژی مطرح می باشد (واگنر و ویتز [۳۳]؛ سیواپالان و همکاران [۲۹]). هیدرولوژیست‌ها برای رفع این مشکل روش‌های مختلفی را توسعه داده‌اند که در قالب روش‌های منطقه‌ای کردن قرار می‌گیرند (یاداو و همکاران [۳۴]؛ بلوشل و سیواپالان [۵]؛ سیواپالان و همکاران [۲۹]). از آنجا که در حوزه‌های فاقد آمار سری‌های زمانی جریان مشاهداتی در دسترس نمی‌باشند، معمولاً از انتقال پارامترهای واسنجی شده مدل از حوزه (های) دارای آمار به حوزه (های) مشابه فاقد آمار برای پیش‌بینی جریان استفاده می‌شود. این انتقال پارامترها از حوزه دارای آمار به حوزه فاقد آمار را منطقه‌ای کردن می‌نامند که از این روش به دلیل کم هزینه بودن بیشتر استفاده می‌شود (یانگ [۳۵] و ساموئل و همکاران [۲۶]). این روش‌ها را می‌توان بر اساس بعد زمانی به دو گروه عمده تقسیم کرد (مسیح و همکاران [۱۶]): گروه اول از سری‌های زمانی پیوسته جریان (مرز و بلوشل [۱۷]) برای پیش‌بینی استفاده می‌کنند و گروه دوم شاخص‌های هیدرولوژیکی انتخابی از جمله میانگین جریان سالانه و شاخص جریان پایه (ناتان و مک ماهون [۱۹])، یا چارک‌های مختلف سیل (برای مثال منطقه‌ای کردن منحنی تداوم جریان) (کاستلارین، [۷]) را محاسبه می‌نمایند. روش‌های مورد استفاده برای برآورد سری‌های زمانی جریان را می‌توان به سه زیرگروه تقسیم کرد (مسیح و همکاران [۱۶]): الف- برآورد پارامترهای مدل با استفاده از رابطه رگرسیونی بین پارامترهای مدل و ویژگی‌های حوزه (برای مثال رحمتی و همکاران [۲۳]) ب- انتقال پارامترهای مدل، به این ترتیب که پارامترهای بدست آمده مدل در یک حوزه دارای آمار محاسبه شده و در حوزه فاقد آمار یا دارای آمار کم و مشابه با حوزه دارای آمار از آنها برای برآورد جریان استفاده می‌شود (برای مثال کوکون و همکاران [۱۳]؛ واگنر و همکاران [۳۱]). ج- روش‌های دیگر منطقه‌ای کردن مثل درون یابی مکانی پارامترها (برای مثال مرز و بلوشل [۱۷]) یا بدست آوردن پارامترهای حوزه‌های فاقد آمار با استفاده از جمع‌آوری داده‌های منطقه (برای مثال گوسوامی و همکاران [۹]). در این رابطه از مدل‌های هیدرولوژیکی مختلفی برای پیش‌بینی در حوزه‌های فاقد آمار یا دارای آمار کم استفاده می‌شود که برای مثال می‌توان از مدل‌های فیزیکی مینا (مثل، MIKE-SHE، MIKE 11 و ..)، مدل‌های مفهومی و نیمه توزیعی (از جمله HBV و IHACRES) و مدل‌های داده مینا (مثل شبکه‌های عصبی مصنوعی و رگرسیون خطی چندگانه) نام برد (رضوی [۲۵]). استفاده از مدل‌های فیزیکی مینا که در آنها پارامترهای مدل از روی ویژگی‌های فیزیکی حوزه‌های فاقد آمار به دست می‌آیند باعث ایجاد عدم قطعیت می‌شود (مسیح و همکاران، [۱۶] و بولیگینا و همکاران، [۶]). این مسئله در برخی موارد باعث وابستگی مدل به پارامترها و ایجاد خطا می‌شود (گوسوامی و همکاران [۹]؛ یاداو و همکاران [۳۴]). در این نوع مدل‌ها داده‌های ورودی نقش مهمی را ایفا می‌نمایند و در مقایسه با مدل‌های نیمه توزیعی یا مفهومی مثل HBV (برگستروم [۳])، نیاز به داده‌های بیشتر و همچنین صرف زمان بیشتری دارند. بنابراین معمولاً مدل‌های غیرتوزیعی (یکپارچه) در این نوع مطالعات بیشتر مورد استفاده قرار

می‌گیرند. خیرفام و همکاران [۱۲] با بکارگیری مدل IHACRESS برای تعیین رواناب در ۷ زیر حوضه گرگانرود نشان دادند که این مدل کارایی نسبتاً قابل قبولی در بعضی از زیرحوضه‌ها دارد ولی در بیشتر موارد دبی اوج را کمتر از واقعیت برآورد می‌کند. رحمتی و همکاران [۲۳] با استفاده از روابط رگرسیونی بین دبی با دوره بازگشت دو ساله و مساحت حوزه اقدام به برآورد دبی در حوزه‌های فاقد آمار شمال غرب کشور کردند و نشان دادند که روابط رگرسیونی بدست آمده بر مبنای میانه نسبت به روابط بدست آمده بر مبنای میانگین دقت بیشتری دارند. زرین و همکاران [۳۶] از مدل AWBM برای برآورد رواناب روزانه در حوزه‌های فاقد آمار استان سیستان و بلوچستان استفاده کردند و نشان دادند که این مدل توانایی خوبی در برآورد رواناب روزانه در حوزه‌های فاقد آمار در مناطق خشک و نیمه خشک دارد. سبیرت [۲۷] از مدل HBV در یک مطالعه منطقه‌ای کردن در ۱۱ حوضه در سوئد استفاده کرد و نتایج بدست آمده نشان‌دهنده میزان NSE بین ۰/۲۳ تا ۰/۷۲ برای شبیه سازی‌های جریان بودند. کروکه و همکاران [۸] به منظور تعیین پاسخ هیدرولوژیکی به تغییر کاربری اراضی با شبیه‌سازی جریان روزانه در سه زیرحوضه فاقد آمار در تایلند و با استفاده از روش مقیاس‌بندی پارامترهای مدل‌های IHACRES و CATCHCROP با استفاده از نسبت سطح حوضه دارای آمار به حوضه فاقد آمار، نشان دادند که این روش می‌تواند جریان‌های سالانه و فصلی را با دقت خوبی پیش‌بینی نماید. پارایکا و همکاران [۲۱] برای منطقه‌ای کردن پارامترهای مدل HBV در ۳۲۰ حوضه در استرالیا به منظور برآورد رواناب روزانه در حوضه‌های فاقد آمار از روش‌های میانگین حسابی، مجاورت مکانی، رگرسیون و شاخص مشابهت فیزیکی استفاده کردند و نشان دادند که روش مجاورت مکانی و شاخص مشابهت فیزیکی دارای کارایی بهتری نسبت به بقیه روش‌ها می‌باشند و مقدار شاخص ناش ساتکلیف بدست آمده با این روش‌ها را بین ۰/۶۲ تا ۰/۶۶ گزارش کردند.

گوسوامی و همکاران [۹] از هفت مدل مختلف برای منطقه‌ای کردن جریان استفاده کردند و در هر مدل از سه روش مبتنی بر سری جریان و با در نظر گرفتن میانگین منطقه‌ای، یکی کردن داده‌های منطقه و جابه‌جایی داده‌های دبی نزدیک‌ترین همسایه، استفاده کردند. نتایج نشان‌دهنده ترکیبی از موفقیت و شکست در حوضه‌های مختلف و برای روش‌های بررسی شده بودند. ژانگ و همکاران [۳۷] برای پیش‌بینی رواناب روزانه در ۲۱۰ حوضه فاقد آمار در جنوب شرقی استرالیا و با بکارگیری مدل‌های هیدرولوژیکی خیانتینگ و SIMHYD نشان دادند که روش ترکیبی مجاورت مکانی و شاخص مشابهت فیزیکی اندکی بهتر از روش مجاورت مکانی و روش مجاورت مکانی نیز کمی بهتر از روش شاخص مشابهت فیزیکی در منطقه مورد مطالعه عمل می‌کنند. اودین و همکاران [۲۰] سه روش منطقه‌ای کردن را در ۹۱۳ حوضه فرانسه (در محدوده مساحتی ۱۰ تا ۹۳۰ کیلومتر مربع) با استفاده از دو مدل مفهومی بارش - رواناب (GR4J و TOPMO) با همدیگر مقایسه کردند. نتایج نشان دادند

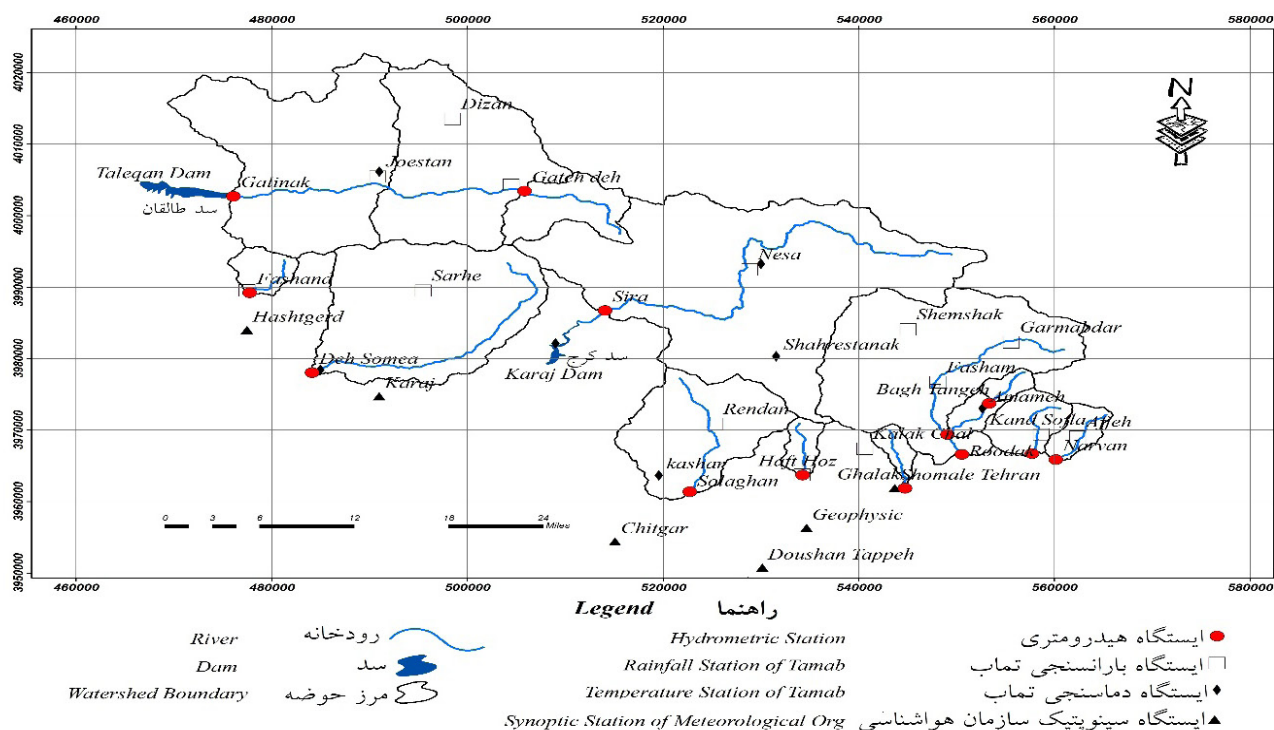
بهتری می‌باشند. همچنین نشان دادند که روش IDW به عنوان یک روش مناسب برای منطقه‌ای کردن جریان در حوضه‌های فاقد آمار منطقه می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. سینگ و همکاران [۲۸] با بررسی عوامل موثر در انتقال موفق پارامترهای مدل هیدرولوژیکی PDM در ۸۷ حوضه در سراسر آمریکا نشان دادند که عوامل موثر در انتقال پارامترهای مدل هیدرولوژیکی مورد استفاده در مناطق مختلف متفاوت می‌باشند به طوریکه در مقیاس کلی عوامل اقلیمی و ارتفاعی موثرتر بودند ولی در جنگل‌های کوهستانی شرق و مناطق هموار عوامل زمین‌شناسی و به دنبال آن زهکشی، توپوگرافی و اقلیم، معیارهای مشابهت غالب بودند در حالیکه در دشت‌های مرطوب کاربری کشاورزی پارامتر تاثیرگذارتری بود. هدف اصلی این تحقیق بررسی این است که در چه حالتی انتقال پارامترهای یک مدل مفهومی هیدرولوژیکی از یک حوضه دارای آمار به یک حوضه فاقد آمار (مشابه بودن حوضه‌ها از نظر هیدرولوژی) می‌تواند موفقیت آمیز باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه به مساحت ۲۷۲۲ کیلومترمربع در قسمت جنوبی رشته‌کوه البرز و در سه استان تهران، البرز و مازندران واقع شده است. این منطقه در بین طول‌های جغرافیای ۵۰° ۳۹' و ۴۴° ۵۱' و عرض‌های ۳۵° ۴۷' و ۳۶° ۲۰' واقع شده است (شکل ۱).

که روش منطقه‌ای کردن بر اساس مجاورت مکانی در حوضه‌های مورد مطالعه بهترین روش می‌باشد. لی و همکاران [۱۴] به منظور پیش بینی رواناب در حوضه‌های فاقد آمار در ۲۱۰ حوضه در جنوب شرقی استرالیا با استفاده از مدل خیابنجینگ نشان دادند که منطقه‌ای کردن پارامترهای مدل بر اساس دو روش مجاورت مکانی و شاخص مشابهت فیزیکی دارای نتایج مشابهی می‌باشند و مقدار شاخص ناش ساتکلیف بدست آمده در هر دو روش بین ۰/۲ تا ۰/۷ می‌باشد با اینحال کارایی این روش‌های در حوضه‌های مختلف متفاوت می‌باشد. مسیح و همکاران [۱۶] چهار روش منطقه‌ای کردن جریان در حوضه‌های فاقد آمار و دارای آمار کم را با استفاده از مدل HBV در ۱۱ زیر حوضه کرخه مورد بررسی قرار دادند. نتایج مطالعه آنها نشان داد که روش منطقه‌ای کردن بر مبنای مشابهت منحنی تداوم جریان نسبت به بقیه روش‌های مورد استفاده نتایج بهتری دارد و بعد از آن روش مجاورت مکانی نتایج بهتری نسبت به روش مشابهت بر مبنای مساحت حوضه‌ها دارد. ساموئل و همکاران [۲۶] برای برآورد جریان در حوضه‌های فاقد آمار اصلی ایالت آنتاریو در کانادا با استفاده از مدل MAC-HBV نشان دادند که کارایی روش‌های شاخص مشابهت فیزیکی و IDW بهتر از روش‌های مجاورت مکانی و رگرسیونی می‌باشد. رضوی [۲۵] از مدل‌های هیدرولوژیکی HBV-MAC، HBV-SAC و MLP برای منطقه‌ای کردن جریان در ۸۴ حوضه کانادا استفاده کردند و نتایج مطالعه آنها نشان داد که رویکرد ترکیب مدل‌ها در مقایسه با مدل‌های منفرد دارای کارایی



شکل ۱. موقعیت حوضه‌های منطقه مورد مطالعه

Figure 1. location of studied watersheds

از نظر موقعیت جغرافیایی ۸ حوزه رودک، امامه، نجارکلا، نارون، باغ تنگه، سولقان، قلاک و درکه در استان تهران و بقیه حوضه‌های منطقه (طالقان، سیرا، جویستان، گاته‌ده، ده‌صومعه (کردان) و فشدن) یا قسمت بیشتر مساحت آن‌ها در استان البرز و درصد کمی از مساحت حوزه طالقان در استان مازندران واقع شده است. منطقه مورد مطالعه به واسطه قرار گرفتن در دامنه‌های جنوبی رشته‌کوه البرز یک منطقه کوهستانی محسوب می‌شود. از ویژگی‌های بارز حوضه‌های این منطقه ارتفاع بالای آن‌ها از سطح دریا می‌باشد به‌طوری‌که ارتفاع متوسط میانه منطقه ۲۷۲۴ متر از سطح دریا و حداقل و حداکثر ارتفاع منطقه به ترتیب برابر با ۱۴۰۵ و ۴۳۲۳ متر از سطح دریا می‌باشند که حداقل ارتفاع منطقه مربوط به نقطه خروجی حوزه سولقان و حداکثر ارتفاع منطقه در حوزه سیرا می‌باشد. شیب متوسط منطقه ۴۶/۵ درصد و شیب‌های منطقه بیشتر در جهت جنوبی (۱۵/۴۲ درصد) واقع شده‌اند. کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه بیشتر شامل مراتع درجه ۳ و ۴ می‌باشد و عملیات انسانی در این منطقه بیشتر به‌صورت کشت درختان میوه در اطراف روستاها و حاشیه رودخانه‌ها دیده می‌شود.

ویژگی‌های اقلیمی و هیدرولوژیکی منطقه مورد مطالعه از نظر اقلیمی با توجه به تقسیم بندی دومارتن نیمه مرطوب می‌باشد و شاخص رطوبتی P/ET (نسبت بارش متوسط سالانه به تبخیر و تعرق پتانسیل سالانه) در همه حوضه‌های مورد بررسی کمتر از یک می‌باشد. میزان بارش متوسط سالانه منطقه با بررسی ۲۱ ایستگاه منتخب منطقه و در دوره آماری ۱۱ ساله ۶۲۹ میلی‌متر محاسبه شد. میانگین دمای متوسط روزانه منطقه در این دوره آماری ۱۲/۸ درجه سانتیگراد می‌باشد. پراکنش زمانی بارش در طول سال نامنظم و بیشتر بارش‌های منطقه در فصل‌های زمستان و بهار اتفاق می‌افتند. به‌طوری‌که حدود ۴۰ درصد بارش‌ها در فصل زمستان، ۲۹ درصد در فصل بهار، ۲۷ درصد در فصل پاییز و تنها در حدود ۴ درصد در فصل تابستان روی می‌دهند. بزرگ‌ترین رودخانه‌های منطقه از نظر آبدی رودخانه‌های کرج، شاهرود و جاجرود می‌باشند که به ترتیب زهکش حوزه‌های سیرا، طالقان و رودک می‌باشند.

روش تحقیق

روش‌های منطقه‌ای کردن جریان

روش مجاورت مکانی

روش مجاورت مکانی یکی از روش‌هایی است که به‌صورت گسترده‌ای در تحقیقات منطقه‌ای کردن مورد استفاده قرار گرفته است. در این روش فرض بر این است که فاصله مکانی حوضه‌ها از همدیگر می‌تواند در تعیین مشابهت پاسخ هیدرولوژیک آن‌ها مؤثر باشد و بر این اساس هر چه حوضه‌ها به هم نزدیک‌تر باشند مشابهت آن‌ها بیشتر و در صورت افزایش بعد فاصله مشابهت آن‌ها کاهش می‌یابد. در این مطالعه بر اساس همین اصل و با در نظر گرفتن مرکز ثقل حوضه‌ها به‌عنوان نقاط شاخص فاصله آن‌ها از همدیگر محاسبه

و نزدیک‌ترین حوضه‌ها به همدیگر به‌عنوان مشابه‌ترین حوضه‌ها برای دسته‌بندی حوضه‌ها مورد استفاده قرار گرفتند. بر این اساس در محیط نرم‌افزار GIS ابتدا مراکز ثقل حوضه‌ها تعیین و سپس از روی مختصات این نقاط و با استفاده از معادلات زیر فاصله بین آن‌ها محاسبه گردید:

$$a = \sin^2\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right) + \cos\phi_1 \times \cos\phi_2 \times \sin^2\left(\frac{\Delta\lambda}{2}\right) \quad (۱)$$

$$c = 2 \times \operatorname{atan}2 \times (\sqrt{a}, \sqrt{(1-a)}) \quad (۲)$$

$$d = R \cdot c \quad (۳)$$

که در این معادلات $\Delta\phi$ تفاوت عرض جغرافیایی دو حوضه، $\Delta\lambda$ تفاوت طول جغرافیایی حوضه‌ها، R شعاع کره زمین (۶۳۷۱ کیلومتر) و d فاصله بین دو حوضه مورد بررسی برحسب کیلومتر است.

مشابهت سطح زهکشی

منطقه‌ای کردن بر اساس مشابهت سطح زهکشی یکی دیگر از روش‌های مرسوم در مطالعات می‌باشد که به‌صورت گسترده‌ای در مطالعات منطقه‌ای کردن مورد استفاده قرار گرفته است. در این روش فرض بر این است که مساحت حوضه‌ها به‌عنوان عامل اصلی در نحوه پاسخ هیدرولوژیک حوضه به ورودی‌های اقلیمی می‌باشد. بر اساس این روش هر چه مساحت حوضه‌های یک منطقه دارای اختلاف کمتری باشد، احتمال مشابهت پاسخ هیدرولوژیکی آن‌ها بیشتر می‌باشد. در این روش از اختلاف سطح زهکشی حوضه‌ها برای تعیین حوضه‌های مشابه در این روش استفاده گردید. به‌طوری‌که حوضه‌های دارای کمترین تفاوت در مساحت زهکشی به‌عنوان حوضه‌های مشابه انتخاب شدند.

مشابهت فیزیکی

در این روش بر اساس مهم‌ترین ویژگی‌های حوضه‌ها که از روش PCA به‌دست آمده بودند برای تعیین مشابهت حوضه‌ها استفاده گردید. از میان ۱۷ ویژگی مورد استفاده در روش PCA، ۷ ویژگی که بیشترین تأثیر را در تشریح واریانس مؤلفه‌های اصلی داشتند انتخاب شدند. این ویژگی‌ها شامل مساحت، ارتفاع میانه حوضه، طول آبراهه اصلی، درصد اراضی باغی، شاخص تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی (NDVI)، بارش متوسط سالانه و عرض جغرافیایی بودند. با استفاده از این ویژگی‌ها و بر اساس معادله زیر مشابهت حوضه‌ها مورد بررسی قرار گرفت.

$$S = 1 - \sum_{i=1}^n a_i \left(\frac{\Delta V_i}{\operatorname{Max}(\Delta V_i, \bar{V}_i)} \right) \quad (۴)$$

که در آن: S شاخص مشابهت می‌باشد که مقدار آن بین ۰ و ۱ قرار گرفته و مقدار آن نشان‌دهنده مشابهت دو حوضه می‌باشد و n تعداد ویژگی‌های مورد استفاده حوضه‌ها (۷ ویژگی در اینجا) برای

محاسبه شاخص مشابهت می‌باشد. وزن‌های بین صفر و ۱ برای ویژگی‌های موردنظر می‌باشند به‌طوری‌که مجموع وزن‌ها برابر ۱ می‌باشد. در اینجا با توجه به اینکه تعداد ۷ ویژگی مورد استفاده قرار گرفتند و برای هر کدام وزن‌های برابر در نظر گرفته شد، مقدار برابر با 0.1428 به دست آمد ($a_i = \frac{1}{7}$). متغیرهای V و $V\Delta$ و به ترتیب مقادیر مربوط به ویژگی‌های حوضه، قدر مطلق اختلاف بین حوضه یک و دو و مقدار میانگین حوضه‌های یک و دو می‌باشند. با توجه به این شاخص هر چه مقدار S بیشتر باشد، مشابهت بین حوضه‌ها بیشتر می‌باشد و برعکس.

مدل هیدرولوژیکی HBV

همان‌طور که قبلاً اشاره شد در مطالعات منطقه‌ای کردن جریان در حوضه‌های فاقد آمار در بیشتر موارد از مدل‌های هیدرولوژیکی مفهومی استفاده می‌شود و در این میان مدل‌های HBV و IHACRES بیشتر از بقیه مدل‌های هیدرولوژیکی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. دلایل انتخاب مدل HBV برای استفاده در این مطالعه را می‌توان

به‌صورت زیر برشمرد:

الف- این مدل ساده و کار کردن با آن آسان می‌باشد. ب- این مدل خیلی به داده‌ها حساس نیست و بیشتر داده‌های مورد نیاز آن به راحتی در دسترس هستند و ج- به صورت گسترده‌ای در سراسر دنیا و در اقلیم‌های مختلف مورد استفاده قرار گرفته است و مناسب بودن آن برای منطقه‌ای کردن در چندین مطالعه نشان داده شده است (برای مثال سیبرت [۲۷]، مرز و بلوشل [۱۸] و مسیح و همکاران [۱۶]). همچنین اجراهای اولیه مدل در منطقه مورد مطالعه نشان دادند که این مدل می‌تواند برای هدف این مطالعه بسیار مناسب باشد. از سری‌های زمانی جریان، بارش، دما و تبخیر و تعرق پتانسیل روانه برای تعیین پارامترهای بهینه اولیه استفاده گردید. در مرحله بعد همه این پارامترها و دامنه‌های به دست آمده آن‌ها برای واسنجی مدل مورد استفاده قرار گرفتند. دامنه اولیه پارامترهای به دست آمده در همه حوضه‌ها که برای واسنجی مدل در محیط MATLAB (با استفاده از الگوریتم ژنتیک) مورد استفاده قرار گرفتند، در جداول ۱ نشان داده شده‌اند.

جدول ۱. دامنه اولیه تعیین شده پارامترهای مدل HBV در حوضه‌های منطقه مورد مطالعه برای استفاده در واسنجی مدل با استفاده از الگوریتم ژنتیک

Table 1. Initial ranges of HBV model parameters in studied watersheds used in GA calibration

Range دامنه	Description تشریح	Unit واحد	Parameter پارامتر
Routine Snow روندیابی برف			
0-2	Correction Coefficient Ranifall ضریب تصحیح بارش باران	-	RFCF
0-1	Correction Coefficient Snow ضریب تصحیح بارش برف	-	SFCF
0-4	Factor Day-Degree ضریب دما - روز	$\text{mm } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ d}^{-1}$	CFMAX
0-4	temperature Threshold دمای آستانه	$^\circ\text{C}$	TT
Routine moisture Soil روندیابی رطوبت خاک			
100-550	Storage Moisture Soil Maximum حداکثر ذخیره رطوبت خاک	mm	FC
0.3-4	Evaporation of Reduction defining Factor ضریب آستانه کاهش تبخیر	-	LP
0.3-2.5	coefficient Shape ضریب شکل	-	BETA
0-0.1	rise capillary of Rate Maximum حداکثر مقدار جریان شعریه	mm	CFLUX
Response Watershed پاسخ حوضه			
0-0.4	معیار غیر خطی بودن جریان در رواناب سریع runoff quick in flow of linearity-non for Measure	mm	ALFA
0.025-0.3	tank upper for coefficient Recesson ضریب برگشت جریان به مخزن بالایی	d-1	K0
0.015-0.1	tank lower for coefficient Recesson ضریب برگشت جریان به مخزن پایینی	d-1	K4
0.5-12	tank lower to upper from Percolation نفوذ از مخزن بالایی به مخزن پایینی	mm d-1	PERC
Routine Flow روندیابی جریان			
0.2-2	parameter function Transfer پارامتر تابع انتقال	d	MAXBAS

داده‌ها به‌رغم تفاوت مقادیر آن‌ها دارای روند همگامی باشند، معیار مورد استفاده R2 ممکن است مقادیر بزرگ‌تری را نشان دهد (کارایی خوب). بنابراین برای نشان دادن تصویر بهتری از نتایج، علاوه بر NSE از R2 و RMSE نیز برای تفسیر نتایج این مطالعه استفاده شد.

نتایج

نتایج منطقه‌ای کردن مدل HBV با روش‌های مجاورت مکانی، مشابهت سطح زهکشی و مشابهت فیزیکی در جدول ۲ نتایج جریان شبیه‌سازی شده و مشاهداتی با استفاده از شاخص‌های RMSE، R2 و NSE نشان داده شده‌اند. در جدول ۳ خلاصه نتایج بررسی مشابهت حوضه‌ها نشان داده شده است که بر این اساس حوضه‌هایی که بیشترین مشابهت را داشته‌اند (با توجه به ۳ روش مورد بررسی) از انتقال پارامترهای آنها برای شبیه‌سازی جریان در حوضه دیگر استفاده شده است.

از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی نتایج مدل و واسنجی پارامترهای آن استفاده شد. بدین منظور برنامه مدل HBV در محیط MATLAB نوشته شد و سپس با استفاده از الگوریتم ژنتیک و در دامنه‌های تعیین شده برای پارامترهای مدل که در مرحله قبل و به‌صورت کلی برای تمام حوضه‌های منطقه تعیین شده بودند، استفاده شد. توابع هدف مختلفی می‌توانند در امر بهینه‌سازی مورد استفاده قرار گیرند ولی معیاری که بیش از همه مورد استفاده قرار گرفته است شاخص ناش ساتکیلف (NSE) می‌باشد. این شاخص یک روش مناسب برای ارزیابی مدل‌سازی هیدرولوژیکی می‌باشد و به‌طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته است (ASCE [۲]). باین‌حال ذکر این نکته مهم است که نتایج بر مبنای بهینه‌سازی NSE ممکن است به سمت جریان‌های بزرگ انحراف پیدا کنند، که لازم است در تفسیر آن به این نکته توجه شود (واگنر و همکاران [۳۲]). به علاوه معیارهای مورد استفاده دیگر نیز دارای مزیت‌ها و محدودیت‌های خاص خود می‌باشند. برای مثال اگر تغییرات دو مجموعه از

جدول ۲. نتایج اجرای مدل HBV در ۱۴ حوضه مورد مطالعه بر اساس داده‌های سری زمانی ۱۱ ساله (از تاریخ ۱۳۷۹/۰۷/۰۱ تا ۱۳۹۰/۰۶/۳۱ برای دوره warming up، از ۱۳۸۰/۰۷/۰۱ تا ۱۳۸۵/۰۶/۳۱ برای واسنجی مدل و از ۱۳۸۵/۰۷/۰۱ تا ۱۳۹۰/۰۶/۳۱ به‌عنوان داده‌های تست) نشان داده شده است.

Table 2. The results of applying HBV model in 14 studied watersheds based on daily time series of 11 years (data from 2000.22.9 to 2001.23.9; 2001.22.9 to 2006.22.9 and 2006.23.9 to 2011.22.9 used for warming up, calibration and test respectively)

ردیف Rank	Watershed حوضه	دوره واسنجی Calibration Period			دوره تست Test period		
		R ²	RMSE	NSE	R ²	RMSE	NSE
1	امامه Amameh	0.86	0.39	0.74	0.87	0.49	0.76
2	باغ تنگه Tangeh Baghe	0.83	0.20	0.66	0.78	0.28	0.53
3	ده صومعه somea Deh	0.88	1.86	0.78	0.80	2.87	0.61
4	فشند Fashand	0.88	0.21	0.77	0.76	0.29	0.47
5	طالقان Taleqan	0.88	6.53	0.76	0.83	8.17	0.69
6	گاته ده Deh Gate	0.85	0.68	0.74	0.81	0.94	0.63
7	قلای Ghalak	0.82	0.34	0.67	0.86	0.42	0.68
8	درکه Darkeh	0.83	0.29	0.70	0.85	0.39	0.69
9	جوستان Joestan	0.83	3.88	0.69	0.85	4.76	0.63
10	نچارکلا Najarkola	0.79	0.65	0.59	0.80	0.73	0.60
11	نارون Narvan	0.86	0.28	0.70	0.73	0.37	0.53
12	رودک Roodak	0.88	3.73	0.75	0.80	4.59	0.48
13	سیرا Sira	0.80	6.86	0.80	0.87	8.63	0.72
14	سولقان Solaqan	0.83	1.55	0.73	0.78	1.88	0.55

جدول ۳. نتایج حاصل از تعیین حوضه‌های مشابه با روش‌های مجاورت مکانی، شاخص مشابهت فیزیکی و مشابهت سطح زهکشی
Table 3. Results of watersheds similarity analysis for the three regionalization methods of spatial proximity, drainage area and physical index similarity

حوضه مشابه تعیین شده با روش‌های منطقه‌ای کردن methods regionalization using Watershed Similar Defined			حوضه Watershed	کد Code	ردیف Rank
سطح زهکشی Drainage Area	مشابهت فیزیکی Physical Similarity Index	مجاورت مکانی Proximity Spatial			
فشند Fashand	Narvan نارون	Baghe تنگه Tangeh	امامه Amameh	41-115	1
قلاک Ghalak	Ghalak قلاک	امامه Amameh	تنگه Tangeh Baghe	41-165	2
جوستان Joestan	جوستان Joestan	فشند Fashand	ده صومعه somea Deh	41-095	3
نارون Narvan	Darkeh درکه	ده صومعه somea Deh	فشند Fashand	41-093	4
سیرا Sira	جوستان Joestan	جوستان Joestan	طالقان Taleqan	17-035	5
نچارکلا Najarkola	جوستان Joestan	جوستان Joestan	گاته ده Deh Gate	17-050	6
تنگه Tangeh Baghe	Darkeh درکه	Darkeh درکه	قلاک Ghalak	41-191	7
قلاک Ghalak	Ghalak قلاک	Ghalak قلاک	Darkeh درکه	41-143	8
رودک Roodak	Roodak رودک	طالقان Taleqan	جوستان Joestan	17-966	9
امامه Amameh	Narvan نارون	امامه Amameh	نچارکلا Najarkola	41-159	10
فشند Fashand	Najarkola نچارکلا	Najarkola نچارکلا	Narvan نارون	41-161	11
جوستان Joestan	جوستان Joestan	امامه Amameh	رودک Roodak	41-117	12
طالقان Taleqan	Roodak رودک	گاته ده Deh Gate	سیرا Sira	41-101	13
گاته ده Deh Gate	ده صومعه somea Deh	Darkeh درکه	سولقان Solaqan	41-109	14

از خطای روش مجاورت مکانی در تعیین حوضه مشابه برای انتقال پارامترهای مدل HBV به حوزه سولقان، می‌توان این روش را بهتر از دو روش دیگر ارزیابی کرد و بعد از آن روش شاخص مشابهت فیزیکی روش بهتری نسبت به مشابهت سطح زهکشی می‌باشد. در مورد عدم کارایی روش مجاورت مکانی در حوزه سولقان که حوضه مشابه تعیین شده برای آن حوزه درکه می‌باشد می‌توان آن را به تغییرات شدید اقلیمی و ارتفاعی بین این دو حوضه که فاقد مرز مشترک می‌باشند مرتبط نمود. به طوری که این دو حوضه بر اساس ویژگی‌های فیزیکی و اقلیمی و شاخص شاخص مشابهت فیزیکی کمترین مشابهت را با هم (میزان مشابهت آنها بر اساس شاخص شاخص مشابهت فیزیکی ۰/۴۱ می‌باشد در حالی که میزان این شاخص در مشابه‌ترین حوضه با آن ۰/۶۷ می‌باشد) دارند. همچنین در مقایسه دو روش شاخص مشابهت فیزیکی و مشابهت سطح زهکشی می‌توان گفت که دلیل برتری نسبی روش شاخص مشابهت فیزیکی در نظر گرفتن ویژگی‌های بیشتری از حوضه‌ها در مقایسه با انتخاب حوضه مشابه صرفاً بر اساس مشابهت سطح زهکشی می‌باشد، و بنابراین احتمال انتقال موفق‌تر پارامترهای مدل در این

نتایج بدست آمده نشان می‌دهند که در هر سه روش در حوزه‌های طالقان، درکه و نچارکلا نتایج انتقال پارامترهای مدل یکسان می‌باشند. که این موارد نشان دهنده همگرایی هر سه روش مورد استفاده در تعیین یک حوضه خاص به عنوان حوضه مشابه با حوضه فاقد آمار فرضی می‌باشد. در مقایسه نتایج روش‌ها باز موارد مشابه دیگری دیده می‌شوند به طوریکه دو روش شاخص مشابهت فیزیکی و مجاورت مکانی در حوزه قلاک نیز نتایج کاملاً یکسان و در حوزه‌های فشند، رودک و جوستان نتایج مشابهی را نشان می‌دهند. همچنین روش‌های شاخص مشابهت فیزیکی و مشابهت سطح زهکشی علاوه بر موارد پیش گفته در مورد حوزه‌های سیرا، سولقان و جوستان نتایج یکسانی داشته‌اند. به طور کلی همه روش‌ها نتایج رضایت بخش و خوبی را نشان می‌دهند به طوری که در روش مجاورت مکانی بجز در حوزه سولقان (میزان ناش ساتکلیف منفی می‌باشد) در بقیه حوضه‌ها میزان ناش ساتکلیف بدست آمده برای انتقال پارامترهای مدل HBV بیش از ۰/۵۴ می‌باشد و در روش‌های مشابهت سطح زهکشی و شاخص مشابهت فیزیکی میزان ناش ساتکلیف بدست آمده بین ۰/۳۸ تا ۰/۷۶ می‌باشد. با صرف نظر

روش بیشتر می‌باشد. این نتایج با نتایج مطالعات پارایکا و همکاران [۲۱]، لی و همکاران [۱۴]، مسیح و همکاران [۱۶] و ساموئل و همکاران [۲۶] انطباق دارند.

بحث و نتیجه‌گیری

مقادیر NSE در بیشتر حوضه‌ها در دوره واسنجی خیلی خوب بودند (بیشتر از ۰/۶۵) و فقط در حوزه نجارکلا مقدار آن ۰/۵۹ می‌باشد. در دوره تست نیز به طور مشابه در مورد دو شاخص ضریب تعیین و مجذور میانگین مربعات خطا نیز نتایج در بیشتر موارد بسیار خوب بودند. مقادیر شاخص‌های ناش سانتکیف و ضریب تعیین در دوره تست در بیشتر موارد بیشتر از مقدار آن‌ها در دوره واسنجی بودند و این نشان‌دهنده تطبیق پذیری واسنجی مناسب مدل و همچنین توانایی خوب مدل در شبیه‌سازی جریان در منطقه مورد مطالعه می‌باشد (منطبق با نتایج مسیح و همکاران [۱۶]، رضوی [۲۵]، واگنر و همکاران [۳۲]). علاوه بر این نتایج کارایی بدست آمده در این مطالعه با مطالعات منطقه‌ای کردن با استفاده از مدل‌های دیگر انطباق خوبی دارند (برای مثال مرز و بلوش [۱۷] و مسیح و همکاران [۱۶]). نتایج واسنجی و تست نشان می‌دهند که مجموعه پارامترهای بهینه شده می‌تواند روابط بارش رواناب را به طرز مناسبی شبیه‌سازی نمایند. با توجه به کارایی بهتر روش شاخص مشابهت فیزیکی نسبت به روش‌های مشابهت از نظر مجاورت مکانی و سطح زهکشی، می‌توان نتیجه گرفت که هرچه میزان پارامترهای مورد استفاده در تعیین مشابهت هیدرولوژیک حوضه‌ها بیشتر باشد می‌توان انتظار داشت که مشابهت بدست آمده قابل اعتمادتر خواهد بود و از طرف دیگر این نشان دهنده درستی فاکتورهای بدست آمده با روش PCA برای تعیین مشابهت هیدرولوژیک حوضه‌های مورد مطالعه می‌باشد. این نتایج با نتایج مطالعه سینگ و همکاران [۲۸] مطابقت دارد. با این وجود ذکر این نکته لازم است که مدل‌ها کامل نیستند و ممکن است نتایج آن‌ها دارای عدم قطعیت‌هایی در رابطه با ساختار مدل، مقادیر پارامترها و داده‌های ورودی باشند که در ادامه این مساله تشریح شده است.

ارزیابی اثر عدم قطعیت پارامترها بر نتایج منطقه ای کردن

منحصر بفرغ نبودن مقادیر پارامترها باعث عدم قطعیت در نتایج مدل می‌شوند (مسیح و همکاران [۱۶]). علاوه بر این نتایج شبیه‌سازی‌های مشابه مدل می‌توانند با استفاده از ترکیبات مختلف مقادیر پارامترهای مدل که معمولاً در هیدرولوژی به نام هم پایانی یا عدم منحصر بفرغ

بودن پارامترهای مدل شناخته می‌شوند، ناشی شوند (بیون [۴]). در این مطالعه، اثرات عدم قطعیت پارامترها بر نتایج منطقه‌ای کردن مورد بررسی قرار گرفت (برای نمونه نتایج بدست آمده با روش مجاورت مکانی در جدول ۴ نشان داده شده است). بدین منظور ابتدا بهترین مجموعه پارامترهای واسنجی شده در هر حوضه دارای آمار مشابه با حوضه فاقد آمار (در روش‌های منطقه‌ای کردن بر مبنای مجاورت مکانی، شاخص مشابهت فیزیکی و مشابهت سطح زهکشی) از بین ۵۰ مجموعه پارامتر موجود انتخاب و از آن‌ها برای شبیه سازی جریان در حوضه فاقد آمار استفاده گردید. سپس برای بررسی سازگاری نتایج، ۴۹ مجموعه پارامتر مختلف دیگر حوضه دارای آمار که با استفاده از فرایند واسنجی بوسیله الگوریتم ژنتیک بدست آمده بودند و دارای NSE بالایی بودند نیز به مانند بهترین مجموعه پارامتری که ابتدا استفاده شده بودند یک به یک مورد استفاده قرار گرفتند. واسنجی مدل با استفاده از الگوریتم ژنتیک و بر مبنای رویکرد بهینه سازی انجام شد. بنابراین، این ۵۰ مجموعه پارامتر از بین مجموعه پارامترهای تولید شده توسط الگوریتم ژنتیک و بر اساس دارا بودن بیشترین مقادیر NSE انتخاب شدند. همانطور که در جدول ۴ نشان داده شده است می‌توان مشاهده کرد که نتایج منطقه‌ای کردن بر اساس این مجموعه پارامترها در همه روش‌های منطقه‌ای کردن نیز قابل اعتماد می‌باشند به طوری که مقایسه نتایج بدست آمده بر اساس شاخص‌های کارایی مورد استفاده نشان دهنده هم‌خوانی خوب آن‌ها با هم می‌باشد. این نتایج با نتایج مطالعات اوهلنبروگ و همکاران [۳۰]، واگنر و همکاران [۳۲]، ژانگ و همکاران [۳۷] و مسیح و همکاران [۱۶] انطباق دارند. به عبارت دیگر در صورت استفاده از هرکدام از این مجموعه پارامترهای واسنجی شده در حوضه دارای آمار برای شبیه‌سازی در حوضه فاقد آمار، نتایج بدست آمده زیاد تفاوت نخواهند داشت و اگر بهترین پارامترهای انتخابی حوضه‌ای در انتقال به حوضه فاقد آمار کارایی خوبی نشان داده‌اند در انتقال بقیه مجموعه پارامترهای واسنجی شده آن حوضه نیز تفاوت زیادی در نتایج حاصله روی نخواهد داد زیرا دامنه‌های بالا و پایین مقادیر شاخص‌ها تفاوت زیادی باهم ندارند.

جدول ۴- نتایج بررسی عدم قطعیت مجموعه پارامترهای مدل HBV در منطقه‌ای کردن با روش مجاورت مکانی

Table 4. Uncertainty results for the HBV model parameters sets used for the spatial proximity based regionalization method

معیار ضریب تعیین Determination of Coefficient				ضریب کارایی ناش - ساتکلیف Coefficient Efficiency Sutcliffe-Nash				حوضه Watershed	ردیف Rank
حداکثر .Max	میان .Med	میانگین .Max	حداقل .Min	حداکثر .Max	میان .Mid	میانگین .Max	حداقل .Min		
0.74	0.72	0.72	0.69	0.73	0.72	0.71	0.67	امامیه Amameh	1
0.73	0.70	0.70	0.68	0.69	0.68	0.67	0.62	باغ تنگه Tangeh Baghe	2
0.64	0.62	0.62	0.61	0.58	0.53	0.53	0.48	ده صومعه somea Deh	3
0.67	0.66	0.65	0.63	0.64	0.63	0.62	0.60	فشند Fashand	4
0.77	0.76	0.76	0.75	0.76	0.73	0.73	0.70	طالقان Taleqan	5
0.65	0.62	0.62	0.60	0.65	0.62	0.62	0.59	گاتمه Deh Gate	6
0.62	0.61	0.60	0.58	0.63	0.56	0.57	0.55	قلاک Ghalak	7
0.65	0.64	0.64	0.62	0.58	0.57	0.57	0.53	درکه Darkeh	8
0.73	0.72	0.71	0.69	0.69	0.68	0.67	0.61	جوسان Joestan	9
0.61	0.58	0.58	0.56	0.60	0.56	0.56	0.54	نچارکلا Najarkola	10
0.70	0.69	0.69	0.68	0.70	0.69	0.69	0.68	نارون Narvan	11
0.72	0.69	0.70	0.69	0.70	0.67	0.68	0.66	رودک Roodak	12
0.61	0.60	0.60	0.58	0.54	0.51	0.51	0.48	سیرا Sira	13
0.51	0.50	0.50	0.48	0.01-	0.05-	0.05-	0.09-	سولقان Solaqan	14

منابع

6. Bulygina, N. McIntyre, N. and Howard, W. 2011. Bayesian conditioning of a rainfall-runoff model for predicting flows in ungauged catchments and under land use changes. Water Resources Research 47(W02503).

7. Castellarin, A. Camorani, G. and Brath, A. 2007. Predicting annual and long-term flow-duration curves in ungauged basins. Advances in Water Resources. 30(4): 937-953.

8. Croke, B.F.W. Merritt, W.S. and Jakeman, A.J. 2004. A dynamic model for predicting hydrologic response to land covers changes in gauged and ungauged catchments. Journal of Hydrology. 291(1-2): 115-131.

9. Goswami, M. O'Connor, K.M. and Bhattarai, K.P. 2007. Development of regionalization procedures using a multi-model approach for flow simulation in an ungauged catchment. Journal of Hydrology. 333(2-4): 517- 531.

10. Göttinger, J. and Bárdossy, A. 2007. Comparison of four regionalization methods for a distributed hydrological model. Journal of Hydrology. 333(2-4): 374- 384.

11. Hargreaves, G. L. Hargreaves, G. H. and Riley, J. P.

1. Allen, R. G. Pereira, L.S. Raes, D. Smith, M. 1998. Crop Evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements). FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. FAO, Water Resources, Development and Management Service Rome, Italy.

2. ASCE Task Committee on Definition of Criteria for Evaluation of Watershed Models of the Watershed Management Committee Irrigation and Drainage Division, 1993. Criteria for evaluation of watershed models. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 119 (3): 429-442.

3. Bergström, S. 1976. Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian catchments. Series A, No. 52, Lund Institute of Technology/Univ. of Lund, Lund, Sweden.

4. Beven, K. J. 2001. Rainfall-runoff modeling: the primer. John Wiley & Sons: Chichester.pp449.

5. Blöschl, G. and Sivapalan, M. 1995. Scale issues in hydrological modeling: a review. Hydrological Processes. 9(3-4): 251-290.

parameters. *Monthly Weather Review*. 100 (2): 81–92.

23. Rahmati, S.H. Porhemmat, J. Daneshkar, A. Heidarizadeh, M. 2011. Yield estimation and homogenizing in north-west ungauged sites of Iran by applying Regional Growth Curve (Azarbayejan sharghi, Azarbayejan gharbi, Ardebil, Kordestan and Ilam provinces). *Iranian Journal of Irrigation & Water Engineering*. 1(1): 45-56.

24. Razavi, T. and Coulibaly, P. 2013. Classification of Ontario watersheds based on physical attributes and streamflow series. *Journal of Hydrology* 493: 81–94.

Razavi, T. 2014. Streamflow Estimation in Ungauged Basins Using Regionalization Methods. Ph.D. Dissertation. Department of Civil Engineering, McMaster University, 200 Pages.

25. Samuel, J. Coulibaly, P. and Metcalfe, R.A. 2011. Estimation of Continuous Streamflow in Ontario Ungauged Basins: Comparison of Regionalization Methods. *Journal of Hydrologic Engineering* 16(5): 447-459.

26. Seibert, J. 1999. Regionalization of parameters for a conceptual rainfall runoff model. *Agricultural and Forest Meteorology* 98–99: 279–293.

27. Singh, R. Archfield, S.A. and Wagener, T. 2014. Identifying dominant controls on hydrologic parameter transfer from gauged to ungauged catchments—A comparative hydrology approach. *Journal of Hydrology*. 517: 985–996.

28. Sivapalan, M. Takeuchi, K. Franks, S.W. Gupta V.K. Karambiri, H. Lakshmi, V. Liang, X. McDonnell. J.J. Mendenso. E.M. Connell, O. Oki, T. Pomeroy, J.W. Schertzer. D. Uhlenbrook. S. and 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.

29. Uhlenbrook, S. Seibert, J. Leibundgut, C. and Rodhe, A. 1999. Prediction uncertainty of conceptual rainfall-runoff models caused by problems to identify model parameters and structure. *Hydrological Science Journal*. 44 (5): 779–797.

30. Wagener, T. Sivapalan, M. Troch, P. and Woods, R. 2007. Catchment classification and hydrologic similarity. *Geography Compass*. 1(4): 901–931.

31. Wagener, T. Wheeler, H.S. Gupta, H.V. 2004. Rainfall-Runoff Modeling in Gauged and Ungauged Catchments, Imperial College Press, 306pp.

32. Wagener, T. and Wheeler, H.S. 2006. Parameter

1985. Irrigation water requirements for Senegal river basin. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 111(3): 265–275.

12. Kheirfam, H. Mostafazadeh, R. and Sadeghi, S.H.R. c. Daily Discharge Prediction Using IHACRES Model in Some Watersheds of Golestan Province. *Journal of Watershed Management Research*. 4(7): 114:127.

13. Kokkonen, T. Jakeman, A.J. Young, P.C. and Koivusalo, H.J. 2003. Predicting daily flows in ungauged catchments: model regionalization from catchment descriptors at the Coweeta Hydrologic Laboratory, North Carolina. *Hydrological Processes*. 17(11): 2219–2238.

14. Li, H. Zhang, Y. Chiew, F.H.S. and Shiguo, X. 2009. Predicting runoff in ungauged catchments by using Xinanjiang model with MODIS leaf area index. *Journal of Hydrology*. 370(1-4): 155–162.

15. Mahdavi, M. 1998. *Applied Hydrology* (3rd Ed.). The Tehran University Press, Tehran, 362 p. (In Persian).

16. Masih, I. Uhlenbrook, S. Maskey, S. and Ahmad, M. D. 2010. Regionalization of a conceptual rainfall-runoff model based on similarity of the flow duration curve: A case study from the semi-arid Karkheh basin, Iran. *Journal of Hydrology* (391): 188–201.

17. Merz, R., and Blöschl, G. 2004. Regionalization of catchment model parameters. *Journal of Hydrology* 287(1-4): 95–123.

18. Mishra, A.K. and Coulibaly, P. 2009. Development in hydrometric networks design: A review. *Reviews of Geophysics* 47(RG2001).

19. Nathan, R.J., McMahon, T.A., 1990. Identification of homogeneous regions for the purposes of regionalisation. *Journal of Hydrology* 121(1-4): 217–238.

20. Oudin, L. Andréassian, V. Perrin, C. Michel, C. and Le Moine, N. 2008. Spatial proximity, physical similarity, regression and ungauged catchments: A comparison of regionalization approaches based on 913 French catchments. *Water Resources Research*. 44 (w03413).

21. Parajka, J., Merz, R., and Blöschl, G. 2005. A comparison of regionalization methods for catchment model parameters. *Hydrology and Earth System Sciences* 9(3): 157–171.

22. Priestley, C.H.B. Taylor, R.J. 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale

35. Zarin, H. Moghaddamnia, A.R. Nam Dorost, N. and Mosaedi, A. 2013. Simulation of outlet runoff in ungauged catchments by using AWBM Rainfall-Runoff Model. *Journal of Water and Soil Conservation*. 20(2): 195-208.
36. Zhang, Z. Wagener, T. Reed, P. and Bhushan, R. 2008. Reducing uncertainty in predictions in ungauged basins by combining hydrologic indices regionalization and multi objective optimization. *Water Resources Research*. 44(12).
- estimation and regionalization for continuous rainfall-runoff models including uncertainty. *Journal of Hydrology*. 320(1-2): 132–154.
33. Yadav, M. Wagener, T. and Gupta, H.V. 2007. Regionalization of constraints on expected watershed response behavior for improved predictions in ungauged basins. *Advances in Water Resources*. 30(8): 1756 – 1774.
34. Young, A.R. 2006. Streamflow simulation within UK ungauged catchments using a daily rainfall-runoff model. *Journal of Hydrology*. (320): 155–172.

*Abstract***Runoff Prediction in Ungauged Watersheds Using Regionalization of HBV Model Parameters (Case study: Central Alborz Region)**M. Khosravi¹, A. Salajegheh², M. Mohseni saravi³ and A. Malekian⁴

Received: 04-04-2016 Accepted: 05-08-2018

Daily streamflow information has a major role for solving various hydrologic problems, but the continuous information of daily streamflow is not available in most cases. One of the approaches to estimate daily streamflow at an ungauged location is to transfer rainfall-runoff model parameters calibrated at a gauged (donor) watershed to an ungauged (receiver) watershed of interest. This method is based on selecting a similar gauged watershed to ungauged watershed. The study examines the possibility of simulating time series of daily streamflow for ungauged watersheds based on hydrological similarity. The data of 14 gauged watersheds (with drainage area between 16 to 804 square Kilometers) with 11-year time series of daily streamflow data located in central Alborz region, Iran, are used for this research. The HBV model is applied to simulate daily streamflow with parameters transferred from gauged watersheds counterparts. This model has been used widely in previous similar studies and was selected for this research due to its simplicity, input data availability and adaptability to different climates. Hydrological similarity is defined based on three regionalization methods including drainage area, spatial proximity and physical similarity.

The obtained results showed that transferring HBV model parameters based on spatial proximity method produces better runoff simulation compared to the other two methods and physical similarity is preferred to drainage area. Also, the results indicate that the HBV model has a high ability for regionalization of daily streamflow in the study area and the uncertainty related to model parameters could be neglected by using the best calibrated parameters set of model. According to the aforementioned brilliant results of applying HBV model predictions in this study, we suggest this model in future similar study.

Keywords: *HBV model, Regionalization, Central alborz Region, Spatial proximity, Drainage area, Physical similarity*

1. Corresponding author and Assistant Professor, Razi University.

2. Professor, Faculty of Natural Resources, University of Tehran.

3. Professor, Faculty of Natural Resources, University of Tehran.

4. Associate Professor, Faculty of Natural Resources, University of Tehran.