ارزیابی کارایی مدل بارش-رواناب GR4J در شبیه‌سازی دبی روزانه جریان در آبخیز نیرچای اردبیل

رئوف مصطفی‌زاده[۱]، ابراهیم عسگری[۲]

تاریخ ارسال: ۱۳۹۷/۱۲/۰۳
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۹/۲۶

پژوهشی

چکیده

با توجه به لزوم برآورد دقیق مقادیر دبی‌های روزانه در آبخیزهای فاقد آمار و پیش‌بینی رفتارهیدرولوژیک آبخیزها، بر اهمیت آزمون مدل‌های بارش-رواناب تاکید می‌کند. مدل GR4J مدل بارش-رواناب یکپارچه بوده که با ورودی‌های محدود و سهل‌الوصول نتایج قابل قبولی را ارائه می‌کند. در پژوهش حاضر به بررسی کارایی مدل GR4J در شبیه‌سازی دبی روزانه جریان در آبخیز نیرچای اردبیل پرداخته شد. از داده‌های روزانه بارش، تبخیر و تعرق و دبی در فاصله سال‌های ۱۳۹۱-۱۳۸۱ استفاده شد. پس از به‌دست آوردن پارامترهای مدل، مدل با روش سعی و خطا مورد واسنجی قرار گرفت و سپس با داده‌هایی متفاوت اعتبارسنجی شد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که، علی‌رغم بیش تخمینی مقادیر شبیه‌سازی شده مدل در مرحله اعتبارسنجی، شبیه‌سازی مدل در روند تغییرات جریان و نیز دوره‌های جریان کمینه مناسب بوده است. ارزیابی نتایج مدل با معیار نش-ساتکلیف نشان داد که دامنه تغییر مقادیر این شاخص در سال‌های مختلف بین ۰/۷۷-۰/۳۱ است. ارزیابی نتایج نشان داد که، نتایج شبیه‌سازی و برآورد شده دبی به‌وسیله مدل GR4J در حد متوسط و قابل قبولی است و مدل مذکور می تواند برای حوزه‌هایی مشابه از نظر اقلیمی، فیزیوگرافی و کاربری اراضی مورد استفاده قرار گیرد. وجود اختلاف ارتفاعی ایستگاه ثبت داده‌های اقلیمی با مرکز ثقل حوزه و تفاوت مقادیر ورودی به مدل با مقادیر واقعی موثر بر دبی می‌تواند منشاء بروز خطا در نتایج باشد. علی‌رغم آزمون مدل در آبخیزهای متعدد، بنظر می‌رسد که مساحت و واکنش هیدرولوژیک آبخیز بر شبیه‌سازی مدل (مقیاس زمانی روزانه است) موثر باشد. لذا رفتار جریان مشاهداتی آبخیز نیرچای با واکنش سریع ناشی از شیب و مساحت کم، در مدل بارش-رواناب به‌طور مناسب شبیه‌سازی نشده است.

کلمات کلیدی: مدل GR4J، واسنجی، اعتبارسنجی، مدل‌سازی جریان، مدل بارش-رواناب، حوزه نیرچای

[۱] دانشیار گروه منابع طبیعی دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، عضو پژوهشکده مدیریت آب دانشگاه محقق اردبیلی، ۰۹۱۴۴۸۱۵۷۴۳، raoofmostafazadeh@uma.ac.ir (نویسنده مسئول)

[۲] دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و کویرشناسی، دانشگاه یزد، ۰۹۱۴۹۲۳۳۵۵۹، ebrahim.asgari90@yahoo.com

مقدمه

درک و پیش‌بینی فرآیندهای تولید رواناب و انتقال آن به نقطه خروجی حوزه آبخیز، یکی از اساسی‌ترین مباحث در هیدرولوژی محسوب می‌شود. روش‌های غیرمستقیم متعددی برای شبیه‌سازی رفتار سیستم‌های هیدرولوژیک جهت برآورد دقیق و جامع، با انجام محاسبات پیچیده ابداع شده است (روحانی و فراهی‌مقدم، ۱۳۹۲). یکی از روش‌های مورد استفاده برای برآورد رواناب، مدل‌سازی بارش-رواناب در مقیاس حوزه آبخیز می‌باشد که از مباحث اصلی هیدرولوژی است. مدل‌سازی هیدرولوژیک ابزار مفیدی در فراهم نمودن بستر مدیریت پایدار منابع آب می‌باشد (Stoter and Zlatanova, 2003). مدل‌سازی تبدیل بارش-رواناب با مدل‌های ساده اهمیت زیادی در بسیاری از برنامه‌های عملیاتی هیدرولوژی دارد (Bahremand and Mostafazadeh, 2009). مدل‌های هیدرولوژیکی می‌تواند برای برنامه‌های مختلف در مهندسی و مدیریت منابع آب، از جمله برآورد و پیش‌بینی سیل، پیش‌بینی بلندمدت جریان کمینه، تشخیص روند و طراحی و مدیریت مخازن استفاده شود. اگرچه بسیاری از مدل‌های جدید ساختارهای پیچیده‌ای دارند اما پژوهشگران هنوز هم بر سودمندی مدل‌های بارش-رواناب تاکید دارند. مدل‌ها ذاتاً دارای برخی محدودیت‌ها هستند و در مدل‌های مفهومی یکپارچه، کمی نمودن عدم قطعیت پارامترهای تخمینی دشوار است (Perrin et al., 2005). در مدل‌های یکپارچه کل وسعت حوزه آبخیز به‌عنوان یک ویژگی تصور شده و رفتار سامانه در مقابل یک ورودی، بدون لحاظ تغییرات مکانی درون حوزه شبیه‌سازی شود. شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی از اولین مراحل اقدامات مدیریتی و برنامه‌ریزی منابع آب، بررسی اثرات هیدرولوژیکی تغییر کاربری اراضی و نحوه بهره‌برداری از منابع آب و خاک در یک حوزه آبخیز می‌باشد. شبیه‌سازی فرآیندهای رواناب در حوزه‌های دارای آمار را می‌توان ضمن صرفه‌جویی در زمان و هزینه به حوزه‌های مشابه بدون آمار تعمیم داد (زارعی و همکاران، ۱۳۸۸). با توجه به اهمیت امر مهار آب‌های سطحی، شناسایی رفتار رودخانه‌ها جهت برنامه‌ریزی‌های بلندمدت و استفاده بهتر از پتانسیل‌های آن‌ها از موارد ضروری است. از آنجا که در حوزه‌های آبخیز امکان اندازه‌گیری تمام کمیت‌های مورد نیاز جهت بررسی عکس‌العمل حوزه میسر نمی‌باشد، لذا انتخاب مدلی که بتواند در عین سادگی ساختار، با استفاده از داده‌های سهل‌الوصول و حداقل اطلاعات ورودی، پیش‌بینی با دقت قابل قبولی را ارائه کند، امری ضروری به نظر می‌رسد (Croke et al., 2006; Hernandez et al., 2013). در این راستا، استفاده از مدل‌های یکپارچه مفهومی نظیر GR4J[1] که با داده‌های ورودی کم می‌توانند میزان جریان را با دقت بالایی برآورد نمایند، بسیار مورد توجه قرارگرفته است.

مدل GR4J یک مدل توسعه یافته بارش-رواناب بوده که علاوه بر ورودی‌های مدل، دارای چهار ضریب جهت واسنجی است که در اصل توسط Edijatno and Michel (1989) در مرکز تحقیقات فرانسه ارائه شده و پس از آن توسط Edijatno et al. (1999) و Perrin et al. (2003) توسعه یافته است و کارآمدی آن در مناطق مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته است. GR4J آخرین نسخه اصلاح شده و توسعه یافته مدل GR3J است (Harlan et al., 2010). اگرچه بسیاری از مدل‌های امروزی دارای قابلیت توزیعی-مکانی هستند، اما مدل GR4J درک مناسبی از فرآیندهای هیدرولوژیک ارائه می‌دهد و هر یک از اجزای مدل به‌صورت یکپارچه محاسبه می‌شود و این برتری عملی آن نسبت به سایر مدل‌ها به‌خصوص در شبیه‌سازی جریان رودخانه، باعث شده است با تطابق قابل قبول، به‌طور گسترده مورد توجه قرار گیرد (Perrin et al., 2003).

از پژوهش‌هایی که در زمینه استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی به‌ویژه مدل GR4J برای شبیه‌سازی بارش-

[1] Génie Rural with 4 Parameters Journalier

رواناب استفاده شده است می‌توان به تحقیقات زیر اشاره نمود. پرین و لیتل‌وود (۲۰۰۰) عملکرد مدل‌های GR4J و IHACRES[1] را در ۸ حوزه در انگلیس و ۴ حوزه در فرانسه مورد ارزیابی قرار دادند و نتایج نشان داد که به‌طور متوسط مدل GR4J با توجه به مقدار بالای معیار نش-ساتکلیف[2]، از مدل IHACRES بهتر عمل نموده و نتایج بهتری را ارائه می‌دهد. در تحقیقی که توسط رولند و همکاران (۲۰۱۰) در آبخیز Sahelian سودان انجام گرفت، دو مدل هیدرولوژیکی HydroStrahler و GR4J در مقیاس روزانه طی دوره آماری ۵۰ ساله مورد مقایسه قرار گرفت و نتایج نشان داد که هر دو مدل شبیه‌سازی را به‌طور مناسب انجام دادند ولی تخمین مدل GR4J نسبت به مدل HydroStrahler دقیق‌تر است. هم‌چنین اعتبارسنجی شبیه‌سازی‌ها نشان داد که مدل‌های مذکور را می‌توان در اقلیم‌های مختلف آب و هوایی استفاده نمود. برای بررسی جریان حوزه رودخانه Citarum Hulu هارلن و همکاران (۲۰۱۰)، از مدل GR4J و NRECA[3] استفاده کردند. نتایج نشان داد که کارایی مدل GR4J در دو دوره واسنجی و اعتبارسنجی مشابه است و این امر نشان می‌دهد که داده‌های بارش و دبی در طی دو دوره به‌طور قابل توجهی تغییر نکرده است. درمجموع نتایج دلالت بر کارایی بهتر مدل GR4J نسبت به مدل NRECA برای شبیه‌سازی جریان روزانه داشت. موالهای و همکاران (۲۰۱۳) به ارزیابی مدل‌های GR[4] (GR4J، GR2M[5] و GR1A[6]) برای شبیه‌سازی رواناب سالانه ۴۰۷ حوزه آبخیز در کشورهای مختلف (۲۹۸ حوزه در فرانسه، ۷۰ حوزه در آمریکا، ۲۶ حوزه در استرالیا، ۹ حوزه در ساحل‌عاج و ۴ حوزه در برزیل) پرداختند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که از بین مدل‌های GR کارایی مدل GR1A برای شبیه‌سازی رواناب سالانه نسبت به مدل GR2M و GR4J بیش‌تر است. در پژوهشی که هوگز و همکاران (۲۰۱۳) در غرب استرالیا انجام دادند، با مقایسه مدل GR4J و مدل اصلاح شده آن و با توجه به مقدار شاخص نش-ساتکلیف که ۰/۸۱ برآورد شد این نتیجه حاصل شد که در مدل GR4J اصلاح شده بین ذخیره آبخیز و عمق آب‌های سطحی رابطه بهتری ایجاد می‌شود. ژانگ و همکاران (۲۰۱۳)، در آبخیز Great Barrier Reef در استرالیا به مقایسه سه مدل Simhyd، Sacramentoو GR4J برای برآورد دبی روزانه پرداختند و نتیجه گرفتند که با توجه به ضریب تعیین بیش‌تر از ۰/۷۵ و ضریب نش-ساتکلیف بیش‌تر از ۰/۵۵ عملکرد سه مدل مناسب بوده است اما مدل Sacramento نسبت به دو مدل دیگر عملکرد بهتری دارد. به‌منظور بررسی رفتار هیدرولوژیکی رودخانه Koulountou در گامبیا در دوره آماری ۱۷ ساله، ترآوره و همکاران (۲۰۱۴) از دو مدل GR2Mو GR4J در مقیاس روزانه و ماهانه استفاده نمودند. با واسنجی و اعتبارسنجی مدل‌ها نتایج نشان داد که کارایی مدل‌ها با توجه به معیار نش-ساتکلیف مناسب بوده و این دو مدل زمانی که معیار نش-ساتکلیف بیش‌تر از ۰/۸ باشد بهتر عمل می‌کنند. نتایج پژوهش یوتوی (۲۰۱۴) در خصوص مدل‌سازی بارش-رواناب در مقیاس روزانه و ماهانه با استفاده از مدل‌های مفهومی و سیستم استنتاج عصبی-فازی در آبخیز Isser الجزایر نشان داد که شبیه‌سازی داده‌های روزانه با مدل مفهومی GR4J یک روند کلی از شبیه‌سازی را ارائه می‌کند و برخی از رویدادها شبیه‌سازی نمی‌شوند، اما با ترکیب داده‌های GR4J و سیستم استنتاج عصبی-فازی، دقت شبیه‌سازی در مقیاس روزانه بهبود می‌یابد. آمیار و همکاران (۲۰۱۵) در مطالعه‌ای که در حوزه D'oued Touil در رودخانه

[1]- Identification of Unit Hydrograph and Component Flows from Rainfall, Evaporation and Streamflow Data
[2]- Nash-Sutcliffe Cofficient of Efficiency
[3]- National Rural Electric Cooperative Association
[4]- Genierural
[5]- Génie Rural À 2 Paramètres Au Pas De Temps Mensuel
[6]- Modèle du Génie Rural à 1 paramètre Annuel

Boughzoul الجزایر انجام دادند پس از واسنجی و اعتبارسنجی مدل‌های هیدرولوژیکی GR (GR2M، GR1A و GR4J) نشان دادند در مواردی که مقادیر نش-ساتکلیف و R^2 بالای ۰/۷ بوده، کارکرد مدل‌ها بهتر بوده است. دمیرال و همکاران (۲۰۱۵) برای پیش‌بینی جریان کم و فصلی رودخانه Moselle از سه مدل HBV[1]، GR4J و ANN-E[2] استفاده کردند. نتایج نشان داد که هر سه مدل قابلیت پیش‌بینی رواناب در طول دوره کم جریان را دارند، ولی در سال‌های خشک عملکرد مدل GR4J از دو مدل دیگر مناسب‌تر بوده است. جباری (۱۳۹۵) در حوضه آبریز نازلوچای ارومیه پس از شبیه‌سازی رواناب، با تاکید بر قواعد انتخاب مدل برتر نتیجه گرفت که مدل GR4J با ضریب نش-ساتکلیف بالاتر از ۰/۷ بهترین تطبیق را با داده‌های مشاهداتی در حوزه مذکور دارد. نتایج سه مدل بارش-رواناب IHACRES، GR4J و GR2M را زندی‌دره‌غریبی (۱۳۹۴) برای شبیه‌سازی جریان حوزه دره تخت لرستان مورد مقایسه قرار داد. میزان شباهت جریان مشاهداتی و شبیه‌سازی شده با استفاده از ضریب نش-ساتکلیف و میزان خطا نیز بر اساس مجذور میانگین مربعات خطا و خطای کل در حجم جریان برآورد شده و نتایج نشان داد که مدل IHACRES با ضریب نش-ساتکلیف ۰/۷ و معیار خطای ۰/۵۶ بیش‌ترین کارایی و مدل GR4J با ضریب نش-ساتکلیف ۰/۴۲۷ و معیار خطای ۸/۹ کم‌ترین کارایی را در شبیه‌سازی جریان داشت.

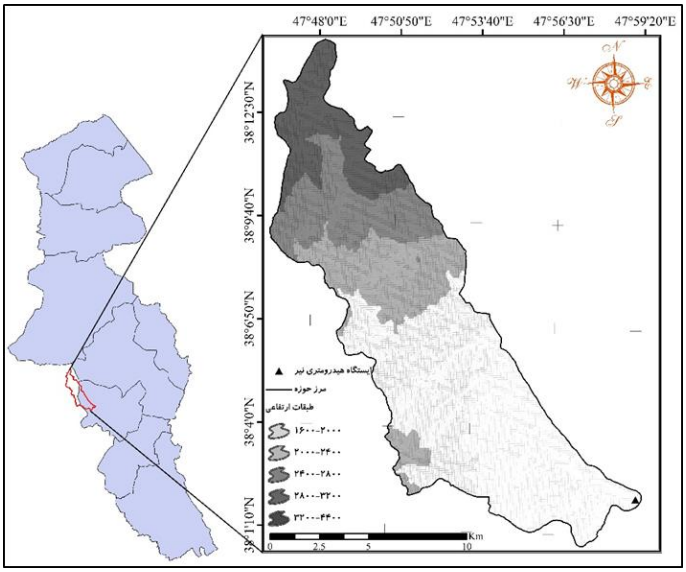
در مجموع با توجه به لزوم انتخاب مدل‌هایی با ورودی‌های سهل‌الوصول و محدود و نتایج قابل قبول در مدل‌سازی رواناب در پژوهش حاضر واسنجی و اعتبارسنجی مدل بارش-رواناب GR4J با هدف مدل‌سازی دبی روزانه جریان در آبخیز نیرچای اردبیل انجام گرفت.

مواد و روش

منطقه مورد مطالعه

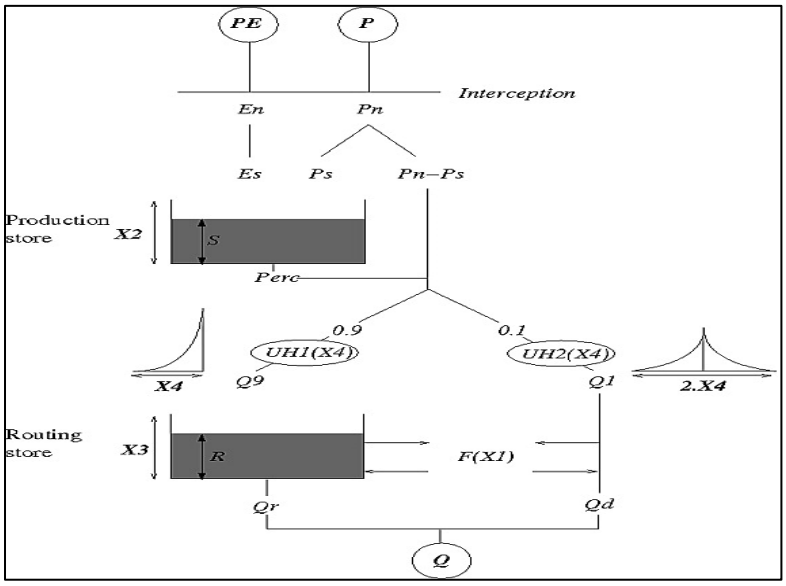
آبخیز نیرچای با مساحت ۱۶۸ کیلومتر مربع در استان‌های اردبیل و آذربایجان‌شرقی قرار گرفته است و از نظر موقعیت جغرافیایی بین "۳۰ ´۰۰ °۳۸ تا "۴۰ ´۱۴ °۳۸ عرض شمالی و "۵۰ ´۴۶ °۴۷ تا "۳۰ ´۵۹ °۴۸ طول شرقی در دامنه جنوب‌شرقی قله سبلان واقع شده است و یکی از زیرحوزه‌های آبخیز بالخلوچای بوده که خروجی آن متصل به رودخانه بالخلوچای در محل شهرستان نیر است. حداکثر ارتفاع حوزه ۴۴۰۰ متر در قسمت شمالی و حداقل ارتفاع نیز در قسمت خروجی و جنوب‌شرقی حوزه با ۱۶۱۰ متر است. طول بزرگ‌ترین آبراهه حوزه نیرچای از محل سرچشمه در ارتفاع ۴۱۰۰ متری تا محل تلاقی آن با رود بالخلوچای در دهانه خروجی شهر نیر ۳۵/۵ کیلومتر است (ذاکر و همکاران، ۱۳۹۲). از کل مساحت این آبخیز حدود ۶۵ درصد آن مربوط به کاربری مرتعی است (ذاکر و همکاران، ۱۳۹۲). آبخیز نیر از شمال به ارتفاعات سبلان، از جنوب به گردنه صائین و محدوده سرشاخه رودخانه بالخلوچای، از غرب به استان آذربایجان‌شرقی و محدوده سرشاخه رودخانه آجی‌چای و قره‌سو و از شرق به آبخیز رودخانه کمال‌آباد محدود می‌شود. شکل ۱ موقعیت آبخیز نیرچای را در استان اردبیل نشان می‌دهد.

[1]- Hydrologiska Byrans Vattenavdelining
[2]- Artificial Neural Network Ensemble



شکل (۱): موقعیت آبخیز نیرچای در استان اردبیل

با توجه به‌این‌که مدل GR4J امکان شبیه‌سازی جریان در مقیاس روزانه را فراهم می‌کند به‌همین منظور از این مدل برای شبیه‌سازی دبی جریان استفاده شد و به دلیل این‌که طول دوره شبیه‌سازی برای این مدل حداقل یک‌سال کامل (۳۶۵ روز) توصیه شده است (Perrin, 2000; Perrin et al., 2003) بنابراین از داده‌های بارش و تبخیر و تعرق پتانسیل روزانه آبخیز نیرچای استفاده شد. پس از تهیه و آماده‌سازی داده‌های بارش و تبخیر و تعرق پتانسیل روزانه، مدل با استفاده از داده‌های مشاهده‌ای دبی، واسنجی شد (شکل ۲).



شکل (۲): ساختار مدل GR4J (Rinsema, 2014)

مدل GR4J دارای دو مخزن با اندازه‌های مختلف بوده که هر کدام از آن‌ها تابع قانون دبی غیرخطی هستند و دو تابع مسیریابی مبتنی بر هیدروگراف واحد پایه آن را پشتیبانی می‌کنند، لذا مدل مذکور می‌تواند به‌عنوان ابزاری مفید برای شبیه‌سازی رفتار حوزه‌های آبخیز با ساختار پیچده باشد و می‌تواند تاخیر زمانی بین بارندگی و دبی پیک حاصل از آن بارش را شبیه‌سازی کند (Rinsema, 2014; Guinot et al., 2015). در مرحله بعد اقدام به استفاده از این مدل شد که این مدل دارای چهار پارامتر مستقل (Harlan et al., 2010) است: X_1، ذخیره تولید یا ظرفیت ذخیره آب در لایه‌های سطحی خاک (میلی‌متر)، ظرفیتی است که خاک می‌تواند بارش را ذخیره کند. تبخیر، تعرق و نفوذ در این ذخیره‌سازی وجود دارند و ظرفیت این ذخیره‌سازی به نوع خاک آبخیز بستگی دارد و خاک‌های با تخلخل کم منابع ذخیره‌ای کم‌تری می‌توانند ایجاد کنند. X_2، ضریب تبادل آب‌های حوضه با بیرون از خود (میلی‌متر)، بخشی از آب زیرزمینی که ذخیره مسیر را تحت تاثیر قرار می‌دهد. زمانی که آب وارد آبخوان عمیق می‌شود مقدار آن منفی و پس از خروج آب از آبخوان برای ذخیره (ذخیره مسیر) مقدار آن مثبت می‌شود. X_3، ظرفیت ذخیره روز قبل یا ذخیره مسیر (میلی‌متر) بخشی از آب که می‌تواند در خاک متخلخل ذخیره شود. مقدار این عامل به نوع و رطوبت خاک بستگی دارد. X_4، زمان تا اوج (روز) زمانی که در مدل‌سازی GR4J، هیدروگراف سیل به اوج می‌رسد در عرض این هیدروگراف ۹۰ درصد از جریان، جریان آهسته بوده و به داخل زمین نفوذپیدا می‌کند و ۱۰ درصد از جریان به‌صورت سریع بر روی سطح خاک جریان می‌یابد.

در مرحله بعد داده‌ها بر حسب طول دوره آماری ده ساله (۱۳۸۱-۱۳۹۱) برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل مذکور به دو دسته تقسیم شدند به‌طوری که از ۶ سال (۱۳۸۱-۱۳۸۷) داده برای واسنجی و از ۴ سال (۱۳۹۱-۱۳۸۸) داده برای اعتبارسنجی مدل استفاده شد. واسنجی مدل از طریق روش واسنجی دستی سعی و خطا بر اساس حداکثر نمودن تابع هدف نش-ساتکلیف استفاده شده (خیرفام و همکاران، ۱۳۹۲) و مقادیر پارامترهای واسنجی مدل GR4J به‌دست آمدند. اعتبارسنجی مدل نیز با استفاده از نتایج به‌دست آمده از واسنجی مدل انجام گرفت و نتایج به‌دست آمده از مدل با استفاده از معیارها و شاخص‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفتند. برای ارزیابی دقت نتایج مدل از معیارهای نش-ساتکلیف (Nash and Sutcliffe, 1970; McCuen, 2006)، کمیت R^2 یا ضریب همبستگی یا ضریب تعیین[1] (Rodgers and Nicewander, 1988; Legates and McCabe, 1999) و درصد خطا در حجم[2] (Janssen and Heuberger, 1995; Mostafazadeh, et al. 2017; Paik et al., 2005) استفاده شد که روابط این شاخص‌ها به‌صورت زیر هستند:

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^{n}(Q_{Obs} - Q_{Sim})^2}{\sum_{i=1}^{n}(Q_{Obs} - \bar{Q}_{Obs})^2}\right] \quad (۱)$$

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^{n}[(Q_{Obs} - \bar{Q}_{Obs})(Q_{Sim} - \bar{Q}_{Sim})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(Q_{Obs} - \bar{Q}_{Obs})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(Q_{Sim} - \bar{Q}_{Sim})^2}}\right]^2 \quad (۲)$$

$$RV_E = \left[\frac{\sum_{i=1}^{n}(Q_{Sim} - Q_{Obs})}{\sum_{i=1}^{n} Q_{Obs}}\right] \times 100 \quad (۳)$$

که در آن‌ها، Q_{Obs}: دبی مشاهداتی، Q_{Sim}: دبی شبیه‌سازی شده، $\bar{Q}_{Obs}$: میانگین دبی مشاهداتی، $\bar{Q}_{Sim}$: میانگین دبی شبیه‌سازی شده هستند. در معیار نش-ساتکلیف مقدار یک نشان‌دهنده تطابق کامل داده‌های شبیه‌سازی شده با داده‌های مشاهداتی است و هرچه ضریب تعیین به مقدار یک و درصد خطا در حجم به مقدار صفر نزدیک باشد کارایی مدل بالاتر خواهد بود (Dawson, 2005; Dominguez et al., 2011).

[1]- Coefficient of Determination
[2]- Relative Volume Error

نتایج و بحث

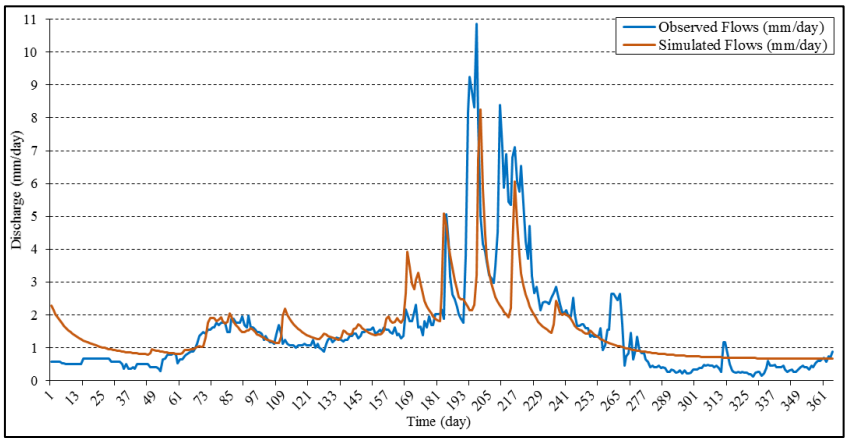
علاوه بر داده‌های ورودی اصلی (بارش و تبخیر و تعرق) و نیز داده‌های دبی مشاهداتی جریان، مدل GR4J از مدل‌های بارش-رواناب یکپارچه بوده که شامل ۴ پارامتر است که مقادیر این پارامترها به‌صورت سعی و خطا و بر اساس تابع هدف نش-ساتکلیف به‌دست آمدند. با توجه به ساختار مدل با وارد نمودن داده‌های ورودی اصلی ایستگاه موردنظر و مقادیر فرضی پارامترهای X1 تا X4 که با توجه به مقادیر به‌دست آمده از مطالعات مختلف انجام شده در نظر گرفته می‌شوند مدل شبیه‌سازی را انجام می‌دهد ولی به‌دلیل عدم انجام مرحله واسنجی این شبیه‌سازی و مقادیر دارای خطای بالایی هستند لذا جهت به حداقل رساندن مقادیر خطا و به حداکثر رساندن تابع نش ساتکلیف اقدام به واسنجی مدل به روش دستی و با سعی و خطا شد و مقادیر اولیه مدل به مقادیر تولید شده توسط مدل تبدیل شدند و مقادیر تولید شده نسبت به مقادیر اولیه دارای حداکثر مقدار نش ساتکلیف هستند و هم‌چنین مقدار خطا نیز کاهش یافته است و به‌عبارتی مدل واسنجی شده است که مقادیر پارامترهای اولیه و تولید شده به‌وسیله مدل در دوره واسنجی مدل به تفکیک سال در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

جدول (۱): مقادیر پارامترهای مدل GR4J به تفکیک سال در دوره واسنجی مدل در آبخیز نیرچای اردبیل

سال	مقادیر اولیه پارامترهای مدل GR4J				مقادیر پارامترهای تولید شده به‌وسیله مدل GR4J			
	X_1 (mm)	X_2 (mm)	X_3 (mm)	X_4 (day)	X_1 (mm)	X_2 (mm)	X_3 (mm)	X_4 (day)
۱۳۸۱	۵/۸۸	۱/۸۵	۳/۴۴	۰/۰۱	۳۵۷/۸۱	۳/۱۰	۳۱/۱۹	۱/۵۱
۱۳۸۲	۴/۹۶	۱/۵۲	۳/۰۲	۰/۰۱	۱۴۲/۵۹	۲/۱۸	۲۰/۴۹	۱/۵۱
۱۳۸۳	۵/۱۶	۱/۶۱	۳/۴۱	۲/۲۴	۱۷۴/۱۶	۲/۴۰	۳۰/۲۷	۹/۸۹
۱۳۸۴	۷/۶۲	۰/۰۷	۳/۶۹	۰/۰۲	۲۰۳۸/۵۶	۰/۰۷	۴۰/۰۴	۱/۵۲
۱۳۸۵	۷/۴۹	۰/۰۱	۴/۱۳	۰/۰۱	۱۷۹۰/۰۵	۰/۰۱	۶۲/۱۸	۱/۵۱
۱۳۸۷	۷/۵۷	۰/۰۱	۳/۷۲	۰/۱۲	۱۹۳۹/۱۴	۰/۰۱	۴۱/۲۶	۱/۶۳

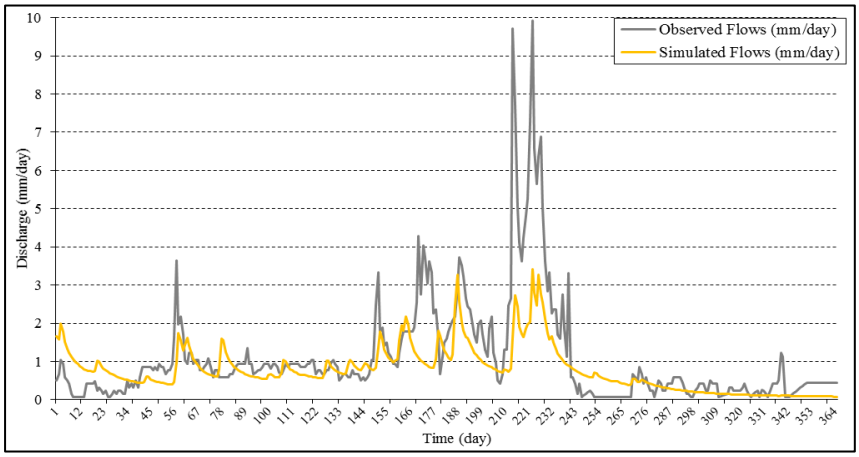
با بررسی جدول ۱، مقادیر اولیه و هم‌چنین مقادیر تولید شده به‌وسیله مدل در پژوهش حاضر تقریبا در دامنه اعداد پیشنهادی برای پارامترهای مدل GR4J در تحقیقات مختلف (Perrin et al., 2007; Harlan et al., 2010; Rulland et al., 2010; Rinsema, 2014; Traore (et al., 2014; Guinot et al., 2015; Nepal et al., 2017 قرار دارد که نشان‌دهنده تخمین مناسب پارامترهای مدل GR4J و تشابه آن با پژوهش‌هایی که در مناطق و شرایط مختلف صورت گرفته است.

مدل‌سازی جریان به‌وسیله مدل GR4J که ساختاری ساده ولی در عین حال کارآمد دارد می‌تواند در مواردی که حوزه دارای نقص آماری در داده‌ها است عملکرد مناسبی ارائه نماید. نتایج شبیه‌سازی مدل و هیدروگراف‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی جریان در آبخیز نیرچای به‌وسیله مدل GR4J در یک سال از دو دوره واسنجی و اعتبارسنجی مدل با توجه به دوره آماری مورد مطالعه در شکل‌های ۳ و ۴ ارائه شده است.



شکل (۳): مقایسه مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده به‌وسیله مدل GR4J برای یک سال در دوره واسنجی مدل در آبخیز نیرچای اردبیل

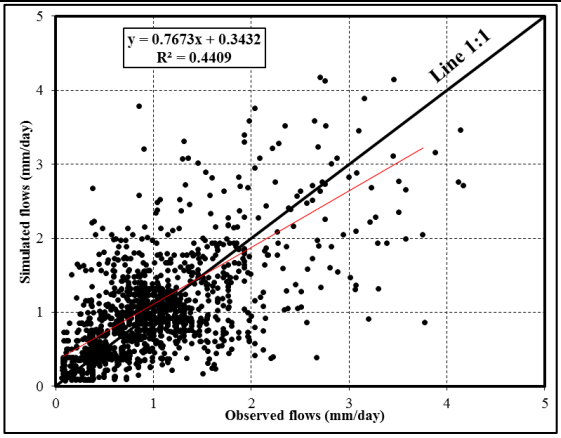
با توجه به شکل ۳ و با تفسیر بصری هیدروگراف‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در دوره واسنجی مدل در برخی موارد که داده‌های مشاهداتی حداکثر مقدار را دارند مقدار جریان شبیه‌سازی شده نیز نزدیک به آن مقدار است (اواسط سال ۱۳۸۱) ولی این مورد در برخی موارد نیز صدق نکرده و مدل توانایی زیادی شبیه‌سازی جریان‌های با مقدار بالا (دبی‌های اوج) را در تمام طول دوره آماری ندارد (اواسط سال‌های ۱۳۸۲ و ۱۳۸۵) از طرفی مدل GR4J جریان‌های حداقل و با مقدار پایین را خیلی بهتر شبیه‌سازی نموده است زیرا مقدار شبیه‌سازی شده به مقدار مشاهداتی خیلی نزدیک‌تر است. هم‌چنین مقدار شبیه‌سازی شده توسط مدل در بیش‌تر مقادیر هیدروگراف از جریان مشاهداتی کم‌تر است که این موارد با نتایج پژوهش زندی‌دره‌غریبی (۱۳۹۵)، اودین و همکاران (۲۰۰۶)، آگوئه و همکاران (۲۰۱۴) و گوینوت و همکاران (۲۰۱۵) که جریان شبیه‌سازی شده در دوره واسنجی به‌وسیله مدل GR4J در بیش‌تر مقادیر هیدروگراف از جریان مشاهداتی بیش‌تر بود، مطابقت ندارد. اما با یافته‌های پژوهش هارلن و همکاران (۲۰۱۰) و یوتوی (۲۰۱۴) هم‌خوانی دارد زیرا ایشان نیز در پژوهش خود به تخمین پایین نتایج شبیه‌سازی شده مدل نسبت به مقادیر مشاهداتی اشاره نمودند.



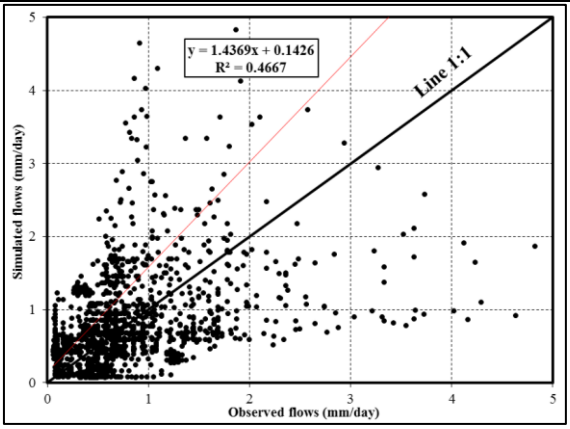
شکل (۴): مقایسه مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده به‌وسیله مدل GR4J برای یک سال در دوره اعتبارسنجی مدل در آبخیز نیرچای اردبیل

بر طبق شکل۴، با مقایسه چشمی هیدروگراف مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده به‌وسیله مدل GR4J در مرحله اعتبارسنجی مدل توانایی بالایی در شبیه‌سازی دبی‌های اوج نداشته به‌طوری که در برخی موارد جریان شبیه‌سازی شده توسط مدل حدود ۵ برابر کم‌تر از جریان مشاهداتی در آبخیز (اواسط سال‌های ۱۳۸۸، ۱۳۸۹ و ۱۳۹۰) است. هم‌چنین در بیش‌تر مقادیر هیدروگراف جریان‌های شبیه‌سازی شده از مقادیر مشاهداتی خیلی کم‌تر بوده یعنی مدل جریان را خیلی پایین‌تر از مقدار مشاهداتی شبیه‌سازی نموده و مدل درصد خطای حجمی بالایی در این دوره دارد. این نتایج با یافته‌های زندی‌دره‌غریبی (۱۳۹۵) و تراوره و همکاران (۲۰۱۴) مبنی بر این‌که میزان دبی شبیه‌سازی شده در مرحله اعتبارسنجی مدل GR4J کم‌تر از جریان مشاهداتی است مطابقت دارد ولی در نتایج پژوهش آن‌ها اختلاف زیادی بین جریان مشاهداتی و شبیه‌سازی شده مشاهده نشده بود. هم‌چنین با نتایج پژوهش آگوئه و همکاران (۲۰۱۴) و یوتوی (۲۰۱۴) هم‌خوانی ندارد زیرا در نتایج اعتبارسنجی مدل در پژوهش آن‌ها از لحاظ بصری مقادیر جریان شبیه‌سازی شده و مشاهداتی تقریبا هم‌پوشانی خوبی با هم داشتند. بر اساس نتایج می‌توان گفت که هرچند مدل مذکور در برآوردها دارای بیش یا کم تخمینی است، اما در شبیه‌سازی روند تغییرات جریان و نیز تغییرات صعودی و نزولی جریان مناسب بوده است.

همبستگی بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده به‌وسیله مدل GR4J در دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی مدل مورد بررسی قرار گرفت که نتایج به‌صورت نمودار در شکل‌های ۵ و ۶ ارائه شده است.



شکل (۵): همبستگی مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده به‌وسیله مدل GR4J در دوره واسنجی (سال‌های ۱۳۸۷-۱۳۸۱) در آبخیز نیرچای اردبیل



شکل (۶): همبستگی مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده به‌وسیله مدل GR4J در دوره اعتبارسنجی (سال‌های ۱۳۸۷-۱۳۸۱) در آبخیز نیرچای اردبیل

با توجه به شکل‌های ۵ و ۶ نتایج همبستگی بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در دوره واسنجی و اعتبارسنجی نشان داد که پراکندگی نقاط حول خط یک به یک در این دو دوره زیاد بوده است و مقادیر ضریب همبستگی آن‌ها نیز پایین (به ترتیب ۰/۴۴ و ۰/۴۷) است که این مورد با یافته‌های پژوهش گوینوت و همکاران

(۲۰۱۵) مطابقت دارد این در حالی است که کیم و همکاران (۲۰۱۱) بر اساس مقدار ضریب همبستگی نتایج شبیه‌سازی شده و مشاهداتی، کارایی بالای مدل مذکور را گزارش نموده‌اند.

با توجه به تنوع مدل‌های هیدرولوژیکی در دسترس انتخاب بهترین مدل با کارایی بالا برای شبیه‌سازی جریان در حوزه‌های آبخیز دشوار است. بنابراین ارزیابی کارایی مدل‌ها و نتایج آن‌ها برای تشخیص قابلیت و محدودیت‌های آن‌ها در حوزه‌های آبخیز و مناطق مورد مطالعه ضروری است. ارزیابی دقت نتایج مدل از معیارهای نش-ساتکلیف، ضریب تعیین و درصد خطا در حجم در دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی به تفکیک سال‌های مختلف در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول (۲): شاخص‌های آماری نتایج ارزیابی مدل در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی در آبخیز نیرچای اردبیل

	واسنجی									اعتبارسنجی	
سال	۱۳۸۱	۱۳۸۲	۱۳۸۳	۱۳۸۴	۱۳۸۵	۱۳۸۷	۱۳۸۸	۱۳۸۹	۱۳۹۰	۱۳۹۱
NSE	۰/۵۱	۰/۳۱	۰/۷۷	۰/۴۷	۰/۵۵	۰/۶۵	۰/۵۸	۰/۲۵	۰/۴۱	۰/۵۴
R^2	۰/۴۶	۰/۳۱	۰/۶۱	۰/۰۵	۰/۱۶	۰/۱۴	۰/۵۴	۰/۰۸	۰/۱۹	۰/۳۵
RV_E	-۰/۹۲	-۰/۲۲	-۶/۵۹	-۲۶/۷۲	-۲۴/۸۳	-۱۹/۴۶	-۲۷/۷۵	-۶۸/۵۹	-۵۳/۵۴	-۵۳/۰۶

مقدار ضریب نش-ساتکلیف برای داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در دو دوره واسنجی و اعتبارسنجی مدل به تفکیک سال‌های مختلف نشان داد که حداکثر مقدار نش-ساتکلیف (۰/۷۷) و بیش‌ترین مقدار ضریب تعیین (۰/۶۱) در دوره واسنجی مدل مربوط به سال ۱۳۸۳ است و کم‌ترین مقدار نش-ساتکلیف و ضریب تعیین در این دوره که نشان‌دهنده ضعف در شبیه‌سازی مدل است، به‌ترتیب مربوط به سال‌های ۱۳۸۲ و ۱۳۸۴ با مقدار ۰/۳۱ و ۰/۰۵ است. در دوره اعتبارسنجی مدل کم‌ترین مقدار ضریب نش-ساتکلیف و ضریب همبستگی مربوط به سال ۱۳۸۹ با مقادیر ۰/۲۵ و ۰/۰۸ و بیش‌ترین مقدار این ضرایب مربوط به سال ۱۳۸۸ با مقادیر ۰/۵۸ و ۰/۵۴ است. خطای کل در حجم جریان است که نشان‌دهنده بیش‌تر یا کم‌تر بودن جریان شبیه‌سازی شده به‌وسیله مدل نسبت به جریان مشاهداتی است. در پژوهش حاضر در دوره واسنجی بهترین شبیه‌سازی مربوط به سال۱۳۸۲ با مقدار ۰/۲۲- و بر اساس این ضریب ضعیف‌ترین شبیه‌سازی را مدل در سال ۱۳۸۴ با مقدار خطا در حجم ۲۶/۷۲- انجام داده است. در دوره اعتبارسنجی نیز کم‌ترین خطا در حجم رواناب مربوط به سال ۱۳۸۸ و بیش‌ترین خطا در حجم مربوط به سال ۱۳۸۹ به ترتیب با مقادیر ۲۷/۷۵- و ۶۸/۵۹- است.

در مجموع با توجه به نتایج ارزیابی دقت مدل GR4J و مقادیر ضریب نش-ساتکلیف در دو دوره واسنجی و اعتبارسنجی این مقادیر در حد متوسط و قابل قبول قرار دارند (موریاسی و همکاران، ۲۰۰۷؛ بوسکیدیس و همکاران، ۲۰۱۲؛ آیله و همکاران، ۲۰۱۷). در مجموع بر اساس پارامترهای ورودی کم این مدل می‌توان کارایی آن را قابل قبول در نظر گرفت. در نتایج پژوهش‌های زندی‌دره‌غریبی (۱۳۹۴) این مقدار ۰/۴۲۷، جباری (۱۳۹۵) مقدار نش-ساتکلیف ۰/۷، هارلن و همکاران (۲۰۱۰) این مقدار ۰/۷۴، هوگس و همکاران، (۲۰۱۳) این ضریب ۰/۷۳، رینسما (۲۰۱۴)، با مقادیر ۰/۸۰۹ در مرحله واسنجی و ۰/۴۹ در مرحله اعتبارسنجی به‌دست آمده است.

نتیجه‌گیری

با توجه به لزوم برآورد در آبخیزهای فاقد آمار و پیش‌بینی رفتار هیدرولوژیک آبخیز، مدل‌های بارش-رواناب ابزارهای مهمی در پیش‌بینی رواناب حاصل از بارش در حوزه‌های آبخیز هستند. مدل GR4J مدل بارش-رواناب یکپارچه‌ای است که به‌منظور شبیه‌سازی جریان، برآورد سیل، پیش‌بینی سیل و خشکسالی کاربرد دارد (پرین و همکاران، ۲۰۰۱). با توجه به این‌که ورودی‌های این مدل محدود و از طرفی این ورودی‌ها سهل‌الوصول بوده و کارایی و عملکرد قابل قبولی دارد در تحقیقات بیش‌تر مورد توجه قرار گرفته است. بر همین اساس پژوهش حاضر با هدف مدل‌سازی جریان در آبخیز نیرچای با استفاده از مدل GR4J انجام گرفت و نتایج نشان داد که دامنه پارامترهای اولیه قابل تخمین است. با بررسی اولیه هیدروگراف‌های تولید شده به‌وسیله مدل GR4J، هیدروگراف شبیه‌سازی در مرحله واسنجی مدل به هیدروگراف مشاهداتی نزدیکتر بوده ولی تطابق کاملی با هم ندارند و در بیش‌تر مقادیر هیدروگراف، مقدار شبیه‌سازی شده از مقدار مشاهداتی کم‌تر برآورد شده است. در مرحله واسنجی دقت شبیه‌سازی در مقادیر مختلف هیدروگراف به‌خصوص در دوره‌های پرآب یا دبی‌های اوج، پایین است. همبستگی مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده جریان به‌وسیله مدل نشان از همبستگی پایین این مقادیر با هم داشته و مقدار ضریب تعیین در هر دو دوره واسنجی و اعتبارسنجی پایین (کم‌تر از ۰/۵) است. دقت نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی مدل نیز با سه معیار نش-ساتکلیف، ضریب همبستگی و درصد خطای حجم ارزیابی شدند و نتایج معیار نش-ساتکلیف نشان داد که مقدار این شاخص در بازه ۰/۷۷-۰/۳۱ تغییر می‌کند و در بیش‌تر سال‌ها در دوره واسنجی و اعتبارسنجی مقادیر این شاخص، در حد متوسط قرار دارد، لذا می‌توان گفت کارایی و عملکرد مدل GR4J نیز قابل قبول است. با توجه به دامنه اختلاف ارتفاعی موجود در منطقه می‌توان گفت که با شرایط دما و بارش در این ایستگاه با بخش بالادست و نیز مرکز ثقل حوضه متفاوت است، لذا بخشی از خطای مدل را می‌توان به موقعیت ایستگاه ثبت بارش و تبخیر در ارتفاع پایین آبخیز مورد مطالعه نسبت داد که ممکن است مقدار دبی ثبت شده در ایستگاه هیدرومتری بیش‌تر متاثر از مقادیر متغیرهای اقلیمی بالادست باشد. علی‌رغم استفاده از مدل مذکور در آبخیزهای متعدد، به‌نظر می‌رسد که کارایی مدل با مساحت آبخیز و واکنش هیدرولوژیکی در ارتباط باشد. در حوزه مورد مطالعه چون شبیه‌سازی مدل در مقیاس زمانی روزانه صورت گرفته است، لذا تندی شیب و نیز مساحت کم و زمان تمرکز کم واکنش سریع حوزه را سبب شده و باعث می‌شود تمام تغییرات ثبت شده جریان در رفتار مدل منعکس نشود و احتمال بروز خطا را افزایش دهد. در مجموع می‌توان نتیجه گرفت مدل GR4J برای شبیه‌سازی جریان در آبخیز نیرچای به‌دلیل مقدار متوسط شاخص نش-ساتکلیف در این حوزه و عدم نیاز به صرف زمان و هزینه زیاد برای تهیه داده‌ها در این مدل مناسب و قابل استفاده است و شبیه‌سازی مناسب و قابل قبولی از جریان ارائه می‌دهد.

منابع

جباری، آ. ۱۳۹۵. ارزیابی مدل‌های مختلف هیدرولوژیکی و انتخاب مدل برتر در راستای ارائه سناریوهای مختلف الگوی کشت، رساله دکتری مهندسی آب، دانشگاه ارومیه.

خیرفام، ح.، ر. مصطفی‌زاده و س.ح.ر. صادقی. ۱۳۹۲. تخمین دبی روزانه با استفاده از مدل IHACRES در برخی از حوزه‌های آبخیز استان گلستان. پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز، جلد ۴، شماره ۷، ص ۱۲۷-۱۱۴.

ذاکر، م.، ر. آقایاری‌سامیان، ی. مهدی‌زاده و ع. لطیفی. ۱۳۹۲. تحلیلی بر توان محیطی حوضه آبریز آغلاغان‌چای نیر با تاکید بر اکوتوریسم منطقه. اولین همایش ملی گردشگری، جغرافیا و محیط زیست پایدار، ۳۰ آبان ۱۳۹۲، همدان، ۱۲-۱.

روحانی، ح. و م. فراهی‌مقدم. ۱۳۹۲. واسنجی خودکار دو مدل بارش-رواناب تانک و SIMHYD با استفاده از الگوریتم ژنتیک. نشریه مرتع و آبخیزداری (منابع طبیعی ایران)، جلد ۶۶، شماره ۴، ص ۵۳۳-۵۲۱.

زارعی، م.، م.ر. قنبرپور، م. حبیب‌نژادروشن و ک. شاهدی. ۱۳۸۸. شبیه‌سازی جریان رودخانه با استفاده از مدل بارش-رواناب IHACRES مطالعه موردی حوزه آبخیز کسیلیان. مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، شماره ۸، ص ۲۰-۱۱.

زندی‌دره‌غریبی، ف. ۱۳۹۴. مقایسه عملکرد سه مدل IHACRES، GR4J و GR2M در شبیه‌سازی جریان ماهانه (مطالعه موردی حوضه آبخیز دره‌تخت)، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد آبخیزداری، دانشگاه صنعتی خاتم‌الانبیا (ص) بهبهان.

زندی‌دره‌غریبی، ف.، ز. خورسندی‌کوهانستانی، م. مزین و ن. آرمان. ۱۳۹۵. گزارش فنی بررسی کارایی مدل‌های بارش-رواناب GR4Jو GR2M در شبیه‌سازی جریان حوزه آبخیز دره‌تخت. مجله مهندسی و مدیریت آبخیز، جلد ۹، شماره ۳، ص ۳۷۰-۳۶۰.

Ague, A.I., A. Afouda and F. Lanhoussi. 2014. Etude comoarative dun modele conceptual global (GR4J) et dun modele semi-distribue (GEOSFM) sur le basin versant de loueme a save (Benin, Afrique de louest). Revue Scientifique et Technique, 24-25: 1-8.

Amiar, S., A. Bouanani and K. BabaHamed. 2015. Modélisation pluie-débit: Calage et validation des modèles hydrologiques GR1A, GR2M et GR4J sur le bassin d'oued Touil (Cheliff amont de Boughzoul, Algérie). Conférence Internationale FRIEND/UNESCO/Programme Hydrologique International sur l'Hydrologie des Grands Bassins Africains Hammamet, Tunisie 26-30 octobre 2015, 1-10.

Ayele, G.T., E.Z. Teshale, B. Yu, I.D. Rutherfurd and J. Jeong. 2017. Streamflow and sediment yield prediction for watershed prioritization in the upper Blue Nile River basin, Ethiopia. Water, 9(782): 1-29.

Bahremand, A., and R. Mostafazadeh, 2009. Mathematical computation of Nash model parameters for hydrograph prediction. The 3rd International Conference on Approximation Methods and Numerical Modelling in Environment and Natural Resources MAMERN. France.

Boskidis, I., G. Gikas, G. Sylaios and V. Tsihruntzis. 2012. Hydrologic and water quality modeling of lower Nestos River basin. Water Resource Management. 26: 3023-3051.

Croke, B.F., F. Andrews, A.J. Jakeman, S.M. Cuddy and A. Luddy. 2006. IHACRES classic plus: A redesign of the IHACRES rainfall-runoff model. Environmental Modelling & Software, 21(3): 426-427.

Dawson, C.W., R.J. Abrahart and L.M. See. 2005. HydroTest: A web-based toolbox of evaluation metrics for the standardised assessment of hydrological forecasts. Loughborough's Institutional Repository, 1-69.

Demirel, M.C., M.J. Booij and A.Y. Hoekstra. 2015. The skill of seasonal ensemble low-flow forecasts in the Moselle River for three different hydrological models. Hydrology and Earth System Science, 19: 275-291.

Domı´nguez, E., C.W. Dawson, A. Ramı´rez and R.J. Abrahart. 2011. The search for orthogonal hydrological modelling metrics: a case study of 20 monitoring stations in Colombia. Journal of Hydroinformatics, 13(3):429-442.

Edijatno, M.C. and C. Michel. 1989. Un modele pluie-debit Journalier a trois Parameters. La Houille Blanche 2: 113-121.

Edijatno, M.C., N.O. Nascimento, X. Yang, Z. Makhlouf and C. Michel. 1999. GR3J: A daily watershed model with three free parameters. Hydrological Sciences Journal, 44(2): 263-277.

Guinot, V., M. Savéan, H. Jourde and L. Neppel. 2015. Conceptual rainfall-runoff model with a two-parameter, infinite characteristic time transfer function. Hydrological Processes, 29(22): 4756-4778.

Harlan, D., M. Wangsadipura and C.M. Munajat. 2010. Rainfall-runoff modeling of Citarum Hulu river basin by using GR4J. Proceedings of the World Congress on Engineering, 2(1-5): 1607-1611.

Hernandez, D.C., G.D. Ramírez, M.R. González, R.T. Caciano and G.E. Avalos. 2013. Ajuste validaciondel modelohidrologico GR2M en la cuencaaltadelrionazas. Agrofaz, 13: 81-89.

Hughes, J.D., R.P. Silberstein and A.H. Grigg. 2013. Extending rainfall-runoff models for use in environments with long-term catchment storage and forest cover changes. In MODSIM2013, 20th International Congress on Modelling and Simulation, Adelaide, Australia, 1-6 Dec. 2013, 2471-2477.

Janssen, P.H.M. and P.S.C. Heuberger. 1995. Calibration of process-oriented models. Ecological modelling, 83(1-2): 55-66.

Kim, S.S.H., D. Dutta, R. Singh, J. Chen and W.D. Welsh. 2011. Providing flexibility in GUI-based river modelling software: Using Expression Editors and plug-ins to create Custom Functions in Source IMS. 19th International Congress on Modelling and Simulation, Perth, Australia, 12–16 Dec. 2011, 2345-2351.

Legates, D.R. and G.J. McCabe. 1999. Evaluating the use of goodness-of-fit measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. Water Resources Research, 35: 233-241.

McCuen, R.H., Z. Knight and A.G. Cutter. 2006. Evaluation of the Nash-Sutcliffe Efficiency Index. Journal of Hydrologic Engineering, 11: 597-602.

Moriasi, D.N., J.G. Arnold, M.W. Van Liew, R.L. Bingner, R.D. Harmel and T.L. Veith. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 50: 885-900.

Mostafazadeh, R., A, Sadoddin., A, Bahremand., V.B Sheikh., A, ZareGarizi. 2017. Scenario analysis of flood control structures using a multi-criteria decision making technique in Northeast Iran. Natural Hazards , 87(3): 1827-1846.

Mouelhi, S., Kh. Madani and F. Lebdi. 2013. Structural overview through GR(s) models characteristics for better yearly runoff simulation. Open Journal of Modern Hydrology, 3: 179-187.

Nash, J.E. and J.V. Sutcliffe. 1970. River flow forecasting through conceptual models part I- A discussion of principles. Journal of Hydrology, 10(3): 282-290.

Nepal, S., J. Chen, D.J. Penton, L.E. Neumann, H. Zheng and Sh. Wahid. 2017. Spatial GR4J conceptualization of the Tamor glaciated alpine catchment in Eastern Nepal: Evaluation of GR4JSG against streamflow and MODIS snow extent. Hydrological Processes, 31: 51-68.

Oudin, L., V. Andre´assian, Th. Mathevet, Ch. Perrin and C. Michel. 2006. Dynamic averaging of rainfall-runoff model simulations from complementary model parameterizations. Water Resources Research, 42: 1-10.

Paik, K., J.H. Kim, H.S. Kim and D.R. Lee. 2005. A conceptual rainfall-runoff model considering seasonal variation. Hydrological Processes, 19(19): 3837-3850.

Perrin Ch., C. Michel and V. Andréassian. 2007. Modèles hydrologiques du Génie Rural (GR) Hydrologic models of rural engineering. Cemagref, UR Hydrosystèmes et Bioprocédés Parc de Tourvoie, 1-16.

Perrin, Ch. 2002. Vers une amelioration d'un modele global pluie-debit au travers dune approche comparative. La Houille Blanche, 6-7: 84-91.

Perrin, Ch., V. Andréassian, C. Michel and L. Oudin. 2005. GR4J: A parsimonious model for rainfall-runoff Simulations. Geophysical Research Abstracts, 6: 1-2.

Perrin, Ch. And I.G. Littlewood. 2000. A comparative assessment of two rainfall-runoff modelling approaches: GR4J and IHACRES. In: Elias, V., Littlewood, I.G. (Eds.). Proceedings of the Liblice Conference (22-24 September 1998). IHP-V, Technical Documents in Hydrology No. 37 UNESCO, Paris, 191-201.

Perrin, Ch., C. Michel and V. Andréassian. 2003. Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. Journal of Hydrology, 279(1-4): 275-289.

Perrin, Ch., C. Michel and V. Andreassian. 2001. Does a large number of parameters enhance model performance? Comparative assessment of common catchment model structures on 429 catchments. Journal of Hydrology, 242: 275-301.

Rinsema, J.G. 2014. Comparison of rainfall-runoff models for the Florentine Catchment. University of Tasmania, 1-54.

Rodgers, J.L. and W.A. Nicewander. 1988. Thirteen ways to look at the correlation coefficient. The American Statistician, 42(1): 59-66.

Ruelland, D., V. Larrat and V. Guinot. 2010. A comparison of two conceptual models for the simulation of hydro-climatic variability over 50 years in a large Sudano Sahelian catchment. Global Change: Facing Risks and Threats to Water Resources (proceedings of the 6th World FRIEND Conference. Fez, Morocco, Oct. 2010), 668-678.

Stoter, J.E. and S. Zlatanova. 2003. Visualising and editing of 3D objects organised in a DBMS. EUROSDR Workshop: Rendering and visualisation. Enschede, the Netherlands.

Traore, Vb., S. Sambou, S. Tamba, S. Fall, At. Diaw and Mt. Cisse. 2014. Calibrating the rainfall-runoff model GR4J and GR2M on the Koulountou river basin, a tributary of the Gambia River. American Journal of Environmental Potection, 3: 36-44.

Ytoui, Y. 2014. Rainfall-runoff modeling at monthly and daily scales using conceptual models and Neuro-fuzzy inference system. 2nd International Conference-Water Resources and Wetlands. 11-13 September 2014, Tulcea (Romania), 263-270.

Zhang, X., D. Waters and R. Ellis, 2013. Evaluation of Simhyd, Sacramento and GR4J rainfall-runoff models in two contrasting Great Barrier Reef catchments. 20th International Congress on Modelling and Simulation, Adelaide, Australia, 1-6 Dec. 2013, 3260-3266.

Performance assessment of GR4J rainfall-runoff model in daily flow simulation of Nirchai Watershed, Ardabil province

Raoof Mostafazadeh[1], Ebrahim Asgari[2]

Abstract

The necessity of precise estimation of daily discharge values and prediction of hydrological response in ungagged watersheds highlights the importance of rainfall-runoff model applications. The GR4J model is an integrated rainfall-runoff model that produces reasonable results with limited input and easy accessible data. In this study, the performance of GR4J model was assessed in simulating daily flow of the Nirchai watershed, Ardabil province. Daily precipitation, evapotranspiration, and discharge data were used during the period of 2002-2012 years. After obtaining the input model parameters, the model was calibrated using trial and error process and consequently validated against different available data set. The simulation results showed that despite the over-estimation of the simulated values in validation stage, the simulation was consistent with flow variations well as predict the low flow periods in an acceptable manner. The evaluation of the results based on Nash-Sutcliffe criteria showed that the range of model accuracy varies from between 0.31-0.77 in different years. The evaluation of the results showed that the GR4J model with moderate and acceptable results can be used for daily flow simulation in similar watershed in terms of climate, physiographic and land use. The difference in elevation of the recording climatic station with the real state watershed condition may affect the accuracy of the modelling results. Despite testing the GR4J model in numerous watersheds, it seems that the area and hydrological response of the watershed are effective factors on modelling results (with daily time scale). Therefore, the fast-hydrologic response of the Nirchai watershed due to high slope amount and small area may not properly reflected in the rainfall-runoff model simulation.

Keywords: GR4J Model, Calibration, Validation, Flow modelling, rainfall-runoff model, Nirchai Watershed

[1] Associate Professor, Department of Natural Resources, Faculty of Agriculture and Natural Resources, member of Water Management Research Center, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran (*Corresponding Author; Email: raoofmostafazadeh@uma.ac.ir)

[2] Ph.D. student of Watershed Management Sciences and Engineering, Faculty of Natural Resources and Desert Studies, Yazd University, Yazd, Iran; Email: ebrahim.asgari90@yahoo.com

Performance assessment of GR4J rainfall-runoff model in daily flow simulation of Nirchai Watershed, Ardabil province

Raoof Mostafazadeh[1], Ebrahim Asgari[2]

Abstract

Introduction: The necessity of precise estimation of daily discharge values and prediction of hydrological response in ungagged watersheds highlights the importance of rainfall-runoff model applications. The GR4J model as a lumped rainfall-runoff model produces reasonable results with limited input and easy accessible data. In this study, the performance of GR4J model was assessed in simulating daily flow of the Nirchai watershed, Ardabil province. Rainfall-runoff transformation is of great importance in many hydrological operations. Hydrological models can be used for various applications in water resources engineering and management, including flood estimation and forecasting, long-term low flow forecasting, trend detection, and reservoir design and management. Although many new models have complex structures, hydrologists still emphasize the usefulness of rainfall-runoff models. Models have some inherent limitations, and in lumped concept models it is difficult to quantify the uncertainty of the estimation parameters. In lumped hydrologic models, the total area of the watershed is conceived as a feature and the behavior of the system with respect to an input is simulated, regardless of spatial variations of the watershed characteristics over the area under study.

Methodology:
The maximum elevation of the basin is 4400 meters in the northern parts of the watershed, and the minimum elevation in the outlet and southeast of the watershed is 1610 meters. The length of the largest stream of Nirchai watershed from the upland at an altitude of 4100 meters to its confluence with the city of Nir is around 35.5 km. About 65% of the total area of this watershed is covered with rangeland area as a main land use of the study area. The GR4J model has two linear reservoirs of different sizes, each of reservoir is subject to the law of nonlinear flow and supports two routing functions based on unit hydrograph theory, so the model can be used as a useful tool to simulate the behavior of watersheds with complex structures. The GR4J model can simulate the time lag between rainfall and peak discharge values. Daily precipitation, evapotranspiration, and discharge data were used during the period of 2002-2012 years. In the next step, the available observed discharge data were divided into two periods according to the length of the available data for calibration and validation of the model. After obtaining the input model parameters, the model was calibrated using trial and error process based on maximizing the Nash-Sutcliffe objective function and the values of the GR4J model calibration parameters were obtained. The model validation was performed against different available data set and using the results obtained from the model calibration and the model simulation results were evaluated using different assessment criteria and indicators. To evaluate the accuracy of the model results, Nash-Sutcliffe criteria, coefficient of determination, and percentage error in volume were used. The simulation results showed that despite the over-estimation of the simulated values in validation stage, the simulation was consistent with flow variations well as predict the low flow periods in an acceptable manner. The evaluation of the results based on Nash-Sutcliffe criteria showed that the range of model accuracy varies from between 0.31-0.77 in different years. The evaluation of the results showed

[1] Associate Professor, Department of Natural Resources, Faculty of Agriculture and Natural Resources, member of Water Management Research Center, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran (*Corresponding Author; Email: raoofmostafazadeh@uma.ac.ir)
[2] Ph.D. student of Watershed Management Sciences and Engineering, Faculty of Natural Resources and Desert Studies, Yazd University, Yazd, Iran; Email: ebrahim.asgari90@yahoo.com

that the GR4J model with moderate and acceptable results can be used for daily flow simulation in similar watershed in terms of climate, physiographic and land use.

Discussion and Conclusion: The difference in elevation of the recording climatic station with the real state watershed condition may affect the accuracy of the modelling results. Despite testing the GR4J model in numerous watersheds, it seems that the area and hydrological response of the watershed are effective factors on modelling results (with daily time scale). Therefore, the fast-hydrologic response of the Nirchai watershed due to high slope amount and small area may not properly reflected in the rainfall-runoff model simulation. Considering the elevation difference in the region, it can be said that the temperature and precipitation conditions at the given station near the watershed outlet are different from the upstream part and the center of gravity of the watershed, so part of the model error can be attributed to the position of the precipitation station at low altitude. The study concluded that the amount of discharge recorded at the river gauge station may be more affected by the values of the upstream climatic variables. Despite the use of this model in multiple watersheds, it seems that the efficiency of the model is related to the watershed area and hydrological response. In general, it can be concluded that the GR4J model for flow simulation in Nirchai watershed is suitable and usable due to the average amount of Nash-Sutcliffe criteria in this watershed and easy obtained input data to simulate the daily runoff values which is acceptable from statistical point of view.

Keywords: GR4J Model, Calibration, Validation, Flow modelling, rainfall-runoff model, Nirchai Watershed

Selected References:

Dawson, C.W., R.J. Abrahart and L.M. See. 2005. HydroTest: A web-based toolbox of evaluation metrics for the standardised assessment of hydrological forecasts. Loughborough's Institutional Repository, 1-69.

Domınguez, E., C.W. Dawson, A. Ramı´rez and R.J. Abrahart. 2011. The search for orthogonal hydrological modelling metrics: a case study of 20 monitoring stations in Colombia. Journal of Hydroinformatics, 13(3):429-442.

Guinot, V., M. Savéan, H. Jourde and L. Neppel. 2015. Conceptual rainfall-runoff model with a two-parameter, infinite characteristic time transfer function. Hydrological Processes, 29(22): 4756-4778.

Harlan, D., M. Wangsadipura and C.M. Munajat. 2010. Rainfall-runoff modeling of Citarum Hulu river basin by using GR4J. Proceedings of the World Congress on Engineering, 2(1-5): 1607-1611.

Mostafazadeh, R., A, Sadoddin., A, Bahremand., V.B Sheikh., A, ZareGarizi. 2017. Scenario analysis of flood control structures using a multi-criteria decision making technique in Northeast Iran. Natural Hazards , 87(3): 1827-1846.

Perrin, Ch. 2002. Vers une amelioration d'un modele global pluie-debit au travers dune approche comparative. La Houille Blanche, 6-7: 84-91.

Perrin, Ch., V. Andréassian, C. Michel and L. Oudin. 2005. GR4J: A parsimonious model for rainfall-runoff Simulations. Geophysical Research Abstracts, 6: 1-2.

Rinsema, J.G. 2014. Comparison of rainfall-runoff models for the Florentine Catchment. University of Tasmania, 1-54.

Zhang, X., D. Waters and R. Ellis, 2013. Evaluation of Simhyd, Sacramento and GR4J rainfall-runoff models in two contrasting Great Barrier Reef catchments. 20th International Congress on Modelling and Simulation, Adelaide, Australia, 1-6 Dec. 2013, 3260-3266.